

第V部

長周期地震動に対する実大免震部材の特性評価(2)

第1章 震動台を用いた実大免震部材の構造実験（その2）

1.1 目的

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査のクライテリア設定へ向けて、多数回繰り返し加振実験に基づく実大免震部材の特性評価を行うことを目的とする。実大免震部材の動的・多数回繰り返し加振実験は、試験装置能力の制約により従来殆ど実施されておらず、本実験により実大免震部材のエネルギー吸収性能を把握することは、長周期地震動に対する免震建築物の安全性向上に大きく寄与することが期待される。

第IV部第2章では、第III部第1章に示した縮小試験体の多数回繰り返し実験の条件を踏まえて、実大試験体の多数回繰り返し実験及び実大試験体の破断相当歪（±90cm、450%）までの実験実施計画を作成し、実大免震部材（弾性すべり支承（高摩擦）およびオイルダンパー）の加振実験結果を示した。本章では、新たに積層ゴム系実大支承（鉛プラグ入り積層ゴムおよび高減衰積層ゴム）を対象として、多数回繰り返し実験を実施した結果を示す。

1.2 実験条件の設定

過去に実施された実大実験の実験条件を考慮して、それらと同等以上の実大実験の免震部材を使用することとし、鉛プラグ入り積層ゴム支承および高減衰積層ゴム支承は $\phi 1000$ の大きさを想定する。

第IV部第1章ならびに第2章に示した議論を踏まえて、実験条件には以下の優先順位を付ける。

- 1) 長時間動的繰返し加振
- 2) 鉛直載荷
- 3) 水平2方向加振
- 4) 破断実験

1) の長時間繰返し加力については、加振振幅は、 $\phi 1000$ の積層ゴム支承で、 $\pm 40\text{cm}$ （せん断歪200%）程度とし、加振時間は、4秒周期で30回～60回（累積変形で50m～100m）程度とする。これらの条件は、第III部第1章に示した縮小免震部材の試験条件と整合させる。

2) 鉛直載荷については、実面圧相当を目標とするが、ロードセルが許容荷重を越えない範囲で最大荷重を5000kNに設定した（第IV部2.5.4参照）。面圧変動の許容値は、目標としては $\pm 20\%$ 程度を目指すこととするが、震動台の制御精度を予備加振により確認し、実現可能な精度で最終的に決定する。

FEM解析結果（第IV部2.5.4参照）によれば、当初計画の上部鋼板100mmでは10000kNの鉛直載荷時に中央部ロードセル荷重が許容荷重の2倍程度に達する。許容荷重を越えないようにするには、上部鋼板を200mmに厚くした上で、中央付近のロードセルを油圧ジャッキに置き換える必要がある。

油圧ジャッキを使用することにより10000kN載荷は可能ではあるが、軸力が何らかの理由で解放された時に、ロードセルに許容値以上の引張荷重が作用する可能性がある。従って、長時間・繰返し実験には適用出来る可能性があるが、破断実験には採用出来ない。

油圧ジャッキ無しで可能な範囲をFEM解析と実際の予備加振により見極めて、加振条件を設定することとする。長時間・繰返し実験について、可能であれば油圧ジャッキによる加振も試験的に行うこととする。

3) の水平2方向加力については、高減衰積層ゴム支承では、1方向加力と2方向加力では特性に差があることが知られているため、2方向加力が行えるようにする。

4) 破断実験については、 $\pm 90\text{cm}$ 程度まで漸増加振を行うこととし、破断しない場合はそれ以上の振幅増加はさせないこととする。積層ゴムの破断せん断力として6000kN程度が想定される。

以上の実験条件を整理して、表1.2.1に示す。

表 1.2-1 実験条件の設定

実験条件	目標値	留意点
試験体寸法	・積層ゴム：φ1000	
長時間・動的繰返し加振	正弦波加振： ・±40cm ・4秒周期で30回～60回（累積変形で50m～100m） 地震波加振： ・長周期地震動模擬波に対する免震建物応答波を使用する。	・φ1000 積層ゴムでせん断歪 200%相当。 ・主梁方向を基本とする。 ・必要に応じて高次振動数成分をフィルター処理する。
鉛直載荷	・最大 5000kN*	・面圧変動の許容値は±20%程度を目標とするが、震動台の制御精度により決定する。
水平2方向加振	・各方向とも±40cm（せん断歪 200%）以下程度	・正弦波は、円軌道または楕円軌道とする。 ・地震波は、2方向応答波を使用する。
破断実験（大振幅加振）	・±90cm（せん断歪 450%）まで段階的に加振（破断時の荷重は 6000kN、衝撃力 9000kN 程度）	・受け梁方向に加振する。 ・破断に至らない場合、それ以上振幅を増加させない。

*ロードセルの許容荷重を考慮して設定する。予備解析として鉛直加力時及び鉛直加力+水平加力時のロードセルにかかる荷重分布を3次元 FEM 解析で検討し、載荷可能な鉛直軸力を設定し、実際の加振時に検証を行った。

第2章 多数回繰返し荷重を受ける免震部材の構造実験（その2）

2.1 全体実験計画

実大免震部材の動的・多数回繰返し加振実験を実施し、免震部材の特性変化を実測する。ここでは、鉛プラグ入り積層ゴムおよび高減衰積層ゴムを想定する。破断に至る大振幅加振も併せて実施する。試験体、計測方法、実験方法（加振波作成、加振ケース）の詳細については、後述の「2.2.1 鉛プラグ入り積層ゴム」及び「2.2.2 高減衰積層ゴム」を参照されたい。

2.1.1 加力計画、計測計画、加振計画および安全対策

加力治具・試験体の設置、加振計画、安全上の留意点及び計測計画については、第IV部 2.1.2 項に示した内容と同様の部分の記述は割愛する。第IV部 2.1.2 項を参照してほしい。

① 試験体設置における震動台の調整

- ・本実験では積層ゴム試験体の高さを考慮して中立軸位置を着座状態から 240mm に変更して使用した。新中立位置への変更運用にあたっては、事前に非積載状態における震動台の試運転により問題を生じないことを確認した。

② 支承の鉛直軸力の導入と水平加振

- ・水平方向加振時の震動台の鉛直方向変位を調べるため、例えば無負荷状態、2000kN、4000kN、と必要なステップを踏んで鉛直荷重を増やした場合の影響を調べる。
- ・主梁方向の水平 1 方向正弦波加振とし、2 方向加振は円軌道または楕円軌道で設定する。
- ・長周期地震動模擬波による免震建物応答波についても加振を行う。

2.1.2 防護計画

試験体の破断に備えて、試験体の周囲（下部ブロック上面の外縁部）をポリカーボネード製の防護壁（図 2.1-1）で遮る計画とする。

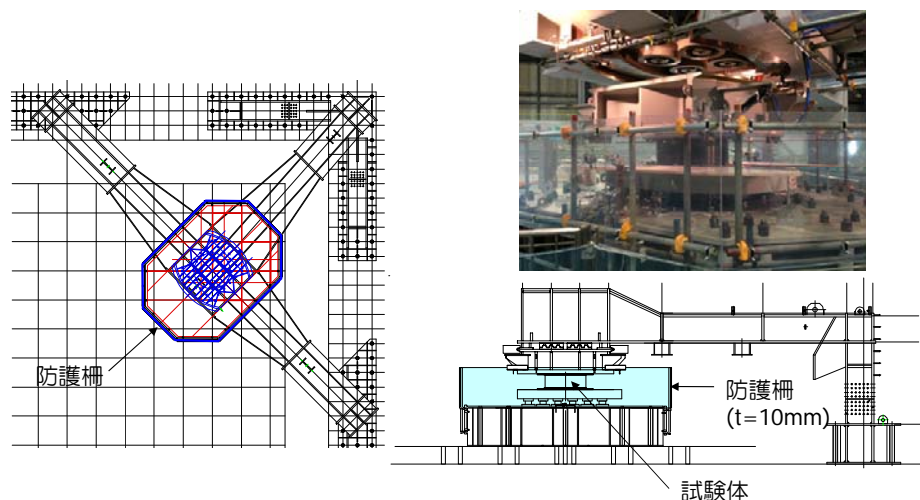


図 2.1-1 防護壁の設置

2.1.3 実験スケジュール

表 2.1-1 に、E-ディフェンスでの実験スケジュールを示す。

2.1.4 実験手法の検証

本実験では、各ロードセルに加わる荷重が許容荷重（700kN）を越えないようにするため、ロードセル取付け時の初期荷重分布を静歪として計測しておき、加力時の軸力とせん断力は動歪として計測した。加力時にロードセルに加わる荷重が許容値を越えていないことの確認は、静歪と動歪の和から評価した。

(1) 初期荷重分布の計測

以下の手順でロードセルを取付けて、静歪を計測した。

- ① ロードセルを下部ブロックに締付け
- ② 静歪の計測
- ③ 感圧紙をロードセル上に設置。
- ④ 上部ブロックの設置と静歪の計測。感圧紙の色変化確認。
- ⑤ トレッシングペーパー（0.02mm）設置による荷重分担の調整。
- ⑥ 上部ブロックの締付けと静歪の計測

(2) 軸力導入時と水平加力時の計測

以下の手順で軸力を導入して、水平加力を行った。軸力導入前にロードセルのバランスを取り、以後の軸力とせん断力を動歪として計測した。

- ① 震動台着座状態から新中立軸位置（+240mm）へ上昇
- ② 震動台降下（鉛入り+70mm、高減衰+100mm）、ならし加振（水平±500mm、上下 50mm）
- ③ 中立軸位置へ上昇。以後、ここを原点（0、0、0）として震動台変位を制御。
- ④ 震動台水平位置の修正（X：35mm、Y：28mm）
- ⑤ コッター噛合い位置まで上昇
- ⑥ コッター密着レベルまで小刻みに上昇
- ⑦ コッター密着をロードセル荷重変化で確認。ジャッキで遠隔固定。
- ⑧ 水平加力

震動台を上昇させて免震部材に所定の軸力が入っている事と、ロードセルの許容荷重を越えていない事を、リアルタイムモニターにより、載荷中のロードセル荷重をモニターした。

(3) 軸力解放の手順は以下の通りである。

- ① ロードセル荷重が解放されるコッター密着レベルまで震動台を降下。
- ② ジャッキ解放。
- ③ 震動台を中立位置へ降下。
- ④ 着座状態へ。震動台停止。

2.2 実大部材実験の実施

2.2.1 鉛プラグ入り積層ゴム

(1) はじめに

実大鉛プラグ入り積層ゴム多数回繰返し加力実験により、繰返し変形による温度上昇と履歴特性変動について把握し、これらを考慮した解析モデルの開発に寄与するデータを取得することを目的とする。本実験では、従来の試験で実施してきた水平1方向だけではなく、水平2方向加振の繰返し特性、および、破断性状の確認も行う。また、平成22年度に実施した1/2縮尺の鉛プラグ入り積層ゴムの多数回繰返し試験結果と比較することで、縮小試験体の力学特性の実大試験体への適用性を検討する。

試験実施日時と場所は以下の通りである。

- ・試験日時

2012年10月17日：

正弦波1方向多数回繰返し加振、地震応答波加振、正弦波2方向（楕円）多数回繰返し加振

2012年10月18日：

正弦波2方向（楕円）多数回繰返し加振、正弦波1方向大振幅加振（破断）

- ・試験場所

独立行政法人 防災科学技術研究所 兵庫県耐震工学研究センター（E-Defense）

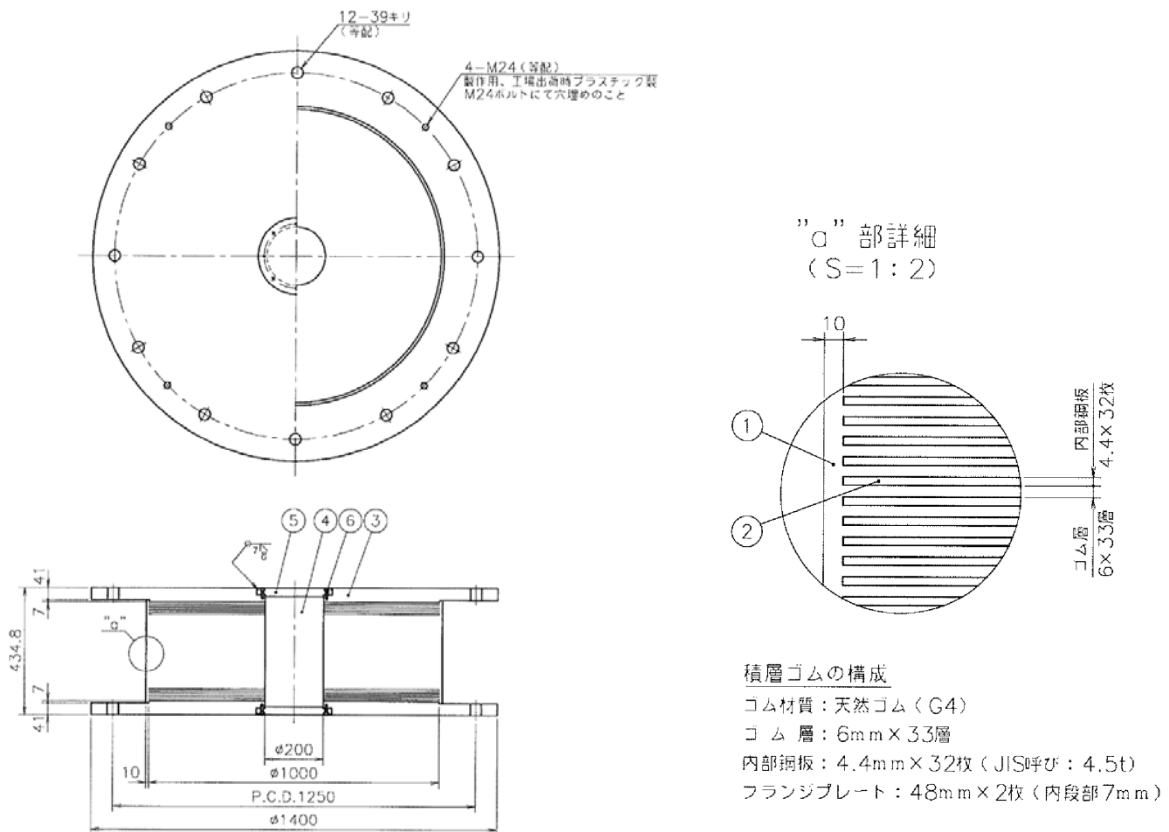
(2) 試験体

1) 試験体諸元

試験体は表 2.2.1-1 に示す、外径φ1,000、鉛プラグ径がφ200の鉛プラグ入り積層ゴム1体である。試験体図面を図 2.2.1-1 に試験体全景写真を写真 3.4.1-1 に示す。

表 2.2.1-1 試験体諸元

外径 (mm)	鉛プラグ径 (mm)	ゴム層厚	内部鋼板厚 (mm)	S ₁	S ₂
1,000	200	6mm×33層=198mm	4.4	41.7	5.1



材料表

製作数量：×基

番号	名称	材質	個数	重量	備考
1	外部被覆及び内部ゴム	NR	—	176.5	G4
2	内部鋼板	SPHC相当品	32	833.4	SPHCもしくはSS400
③	フランジプレート	SS400	2	1036.1	
4	鉛プラグ	Pb	1	134.2	純度：99.99%以上
5	キャッププレート	SS400	2	21.6	
6	キャップ固定ボルト	強度区分：12.9	16	—	六角穴付ボルト M8×25
7	穴埋め用ボルト	—	8	—	プラスチックボルト
				総重量：2201.8 kg	

防錆処理仕様

- 印：エポキシ樹脂系塗装（三層塗り 合計膜厚170μm以上）
- 印：ジンクリッチペイント

図 2.2.1-1 試験体（LRB1000）

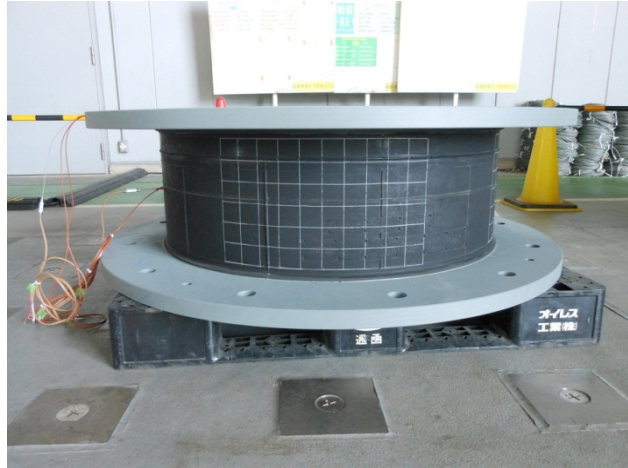


写真 2.2.1-1 試験体写真

2) 熱電対設置位置

実験中の試験体温度を計測するため、試験体に熱電対を設置した。破断試験結果への影響を小さくするため、ゴム部を配線が通過するのは1本のみに限定し、鉛プラグ中央部の温度を計測するものとした。これに追加して、鉛上部とフランジ部および被覆ゴム内部に熱電対を配置した。なお加力治具と積層ゴムフランジ間には厚さ 10mm の高温用断熱板 (D.M.E 双葉製) を挟むものとする。表 2.2.1-2 に使用熱電対の一覧を、写真 2.2.1-2、写真 2.2.1-3 に熱電対の設置状況を示す。

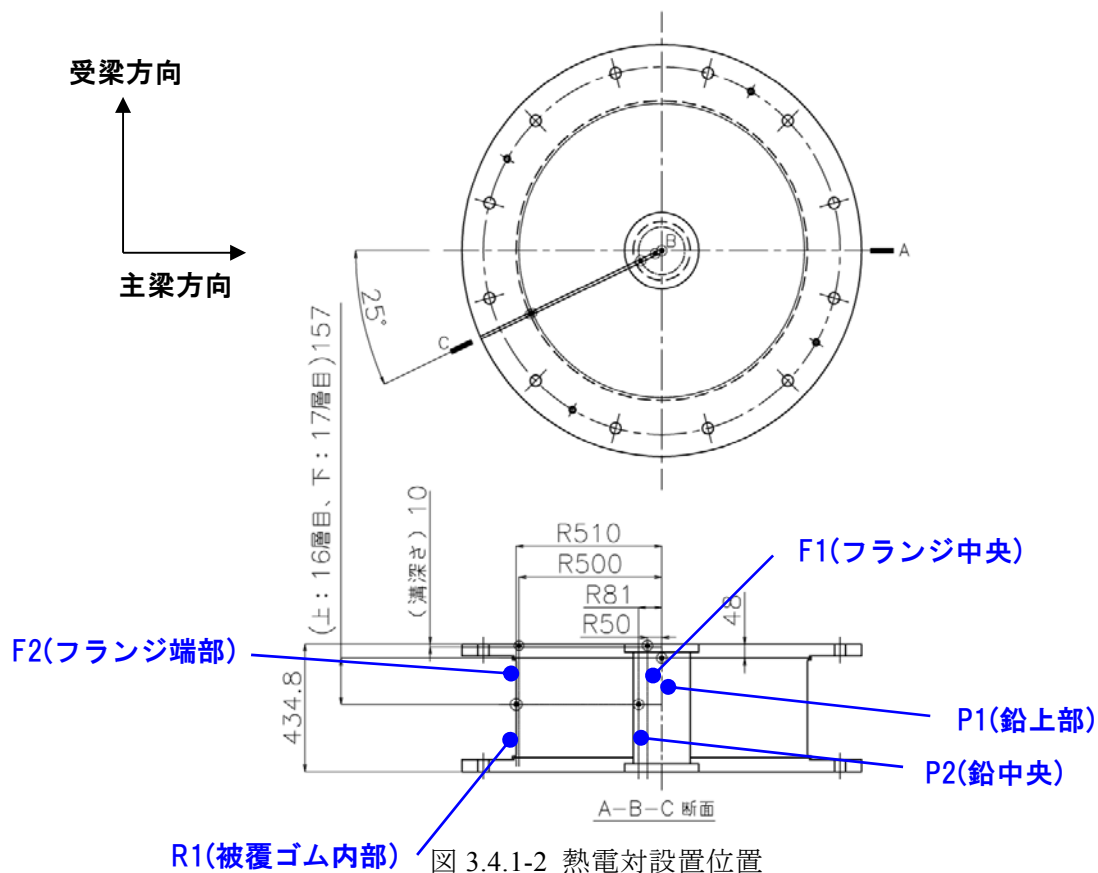


表 2.2.1-2 使用熱電対一覧

計測位置	記号	熱電対種類
鉛上部	P1	T型シース熱電対、シース径 φ1.6
鉛中央	P2	T型シース熱電対、シース径 φ3.2
フランジ中央	F1	T型被覆熱電対
フランジ端部	F2	T型被覆熱電対
被覆ゴム内部	R1	T型被覆熱電対

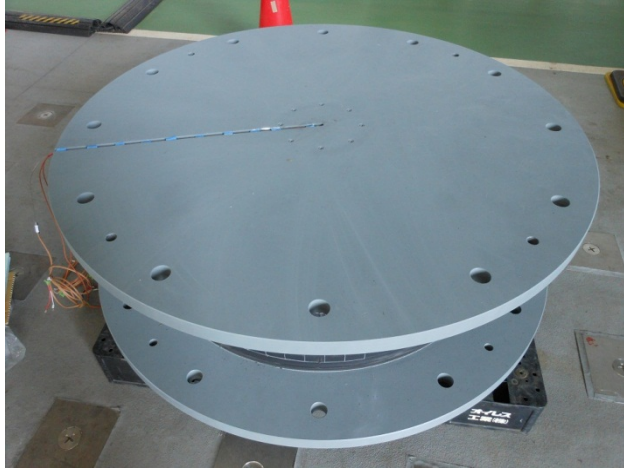


写真 2.2.1-2 フランジ・鉛上部の熱電対設置状況



写真 2.2.1-3 被覆ゴム内部、鉛中央部の熱電対設置状況

(3) 計測項目と計測方法

1) 計測項目

計測項目は、水平荷重、水平変位、鉛直荷重、鉛直変形、温度である。また、試験体ゴム部の3側面に幅50mm、水平方向×鉛直方向=10マス×6マスのメッシュを描き、ビデオカメラにて、加振中・加振後に試験体のねじれの有無を確認した。

支承の水平変形は、主梁方向、受梁方向にレーザー変位計を2台ずつ設置し、その平均値から求めた。鉛直変形は、上下フランジ間にレーザー変位計を4台設置した。また、固定プレートが鉛直方向に変形していないか確認するため、歪ゲージ型変位計を下部ブロックと試験体固定プレート間に4台設置した。水平荷重および鉛直荷重は、下部ブロックと試験体固定プレート下部の間に固定された31台の3分力計ロードセルにより測定した。31台分のデータをリアルタイムで合算し、水平は主梁(u方向)、受梁(v方向)成分にそれぞれ変換した。温度計測は、表3.4.1-2に示した熱電対を用いて、試験体内部(鉛中央、鉛上部、フランジ中央、フランジ端部、被覆ゴム内部)を計測した。さらに、非接触型の放射温度計(HIOKI3444)で試験体表面温度を、T型被覆熱電対で外気温度を計測した。使用センサー一覧を表2.2.1-3に、表2.2.1-4に試験体上下フランジと加力治具の間に断熱板の仕様を示す。

表 2.2.1-3 使用センサー (加力フレーム計測用は除く)

センサー種類	台数	計測方向	ch 名称	計測箇所	性能
レーザー変位計 IL-2000 (KEYENCE)	4	水平	LRB-Hu1、2 (主梁) LRB-Hv1、2 (受梁)	水平主梁方向、 受梁方向に 各2台	-1000mm~+1500mm (基準距離 2000mm)
レーザー変位計 LK-500 (KEYENCE)	4	鉛直	LRB-v1~v4	上フランジと 下フランジ間	±250mm (基準距離 500mm)
歪ゲージ型変位計 CDP-10 (東京測器)	4	鉛直	LRB-v5~v8	下部ブロックと 試験体固定 プレート間	±5mm
3分力計ロードセル LSM-700KN (共和電業)	31	水平 鉛直		下部ブロックと 試験体固定 プレート間	

表 2.2.1-4 断熱板の仕様

圧縮強度	338(N/mm ²) (24℃の場合) 103(N/mm ²) (285℃の場合)
吸水性	0.06%
熱伝導率	0.274W/(m・k) (24℃の場合) 0.303W/(m・k) (220℃の場合)
難燃性	94V-0(自己消化性)
最高使用温度	285℃
材質	アルミニウムカーボネート+グラスファイバー+不飽和ポリエステル

2) 計測位置

図 2.2.1-3 に荷重、変形、温度の測定点図を、図 2.2.1-4 に 3 分力計の配置図を示す。

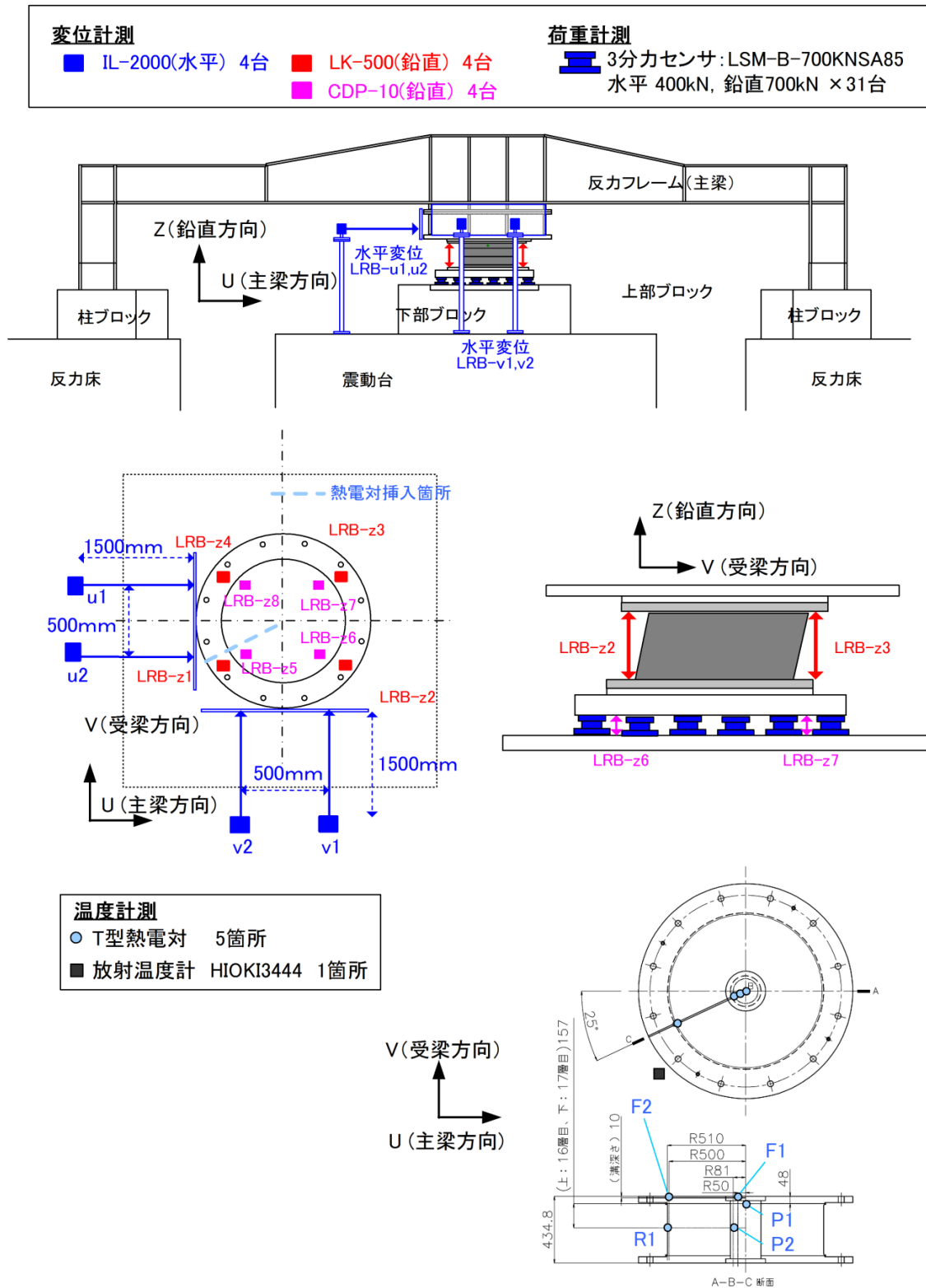


図 2.2.1-3 測定点図 (荷重、変形、温度)

3分力センサ: LSM-B-700KNSA85

水平 400kN, 鉛直700kN × 31

水平U方向 31成分

水平V方向 31成分

鉛直Z方向 31成分

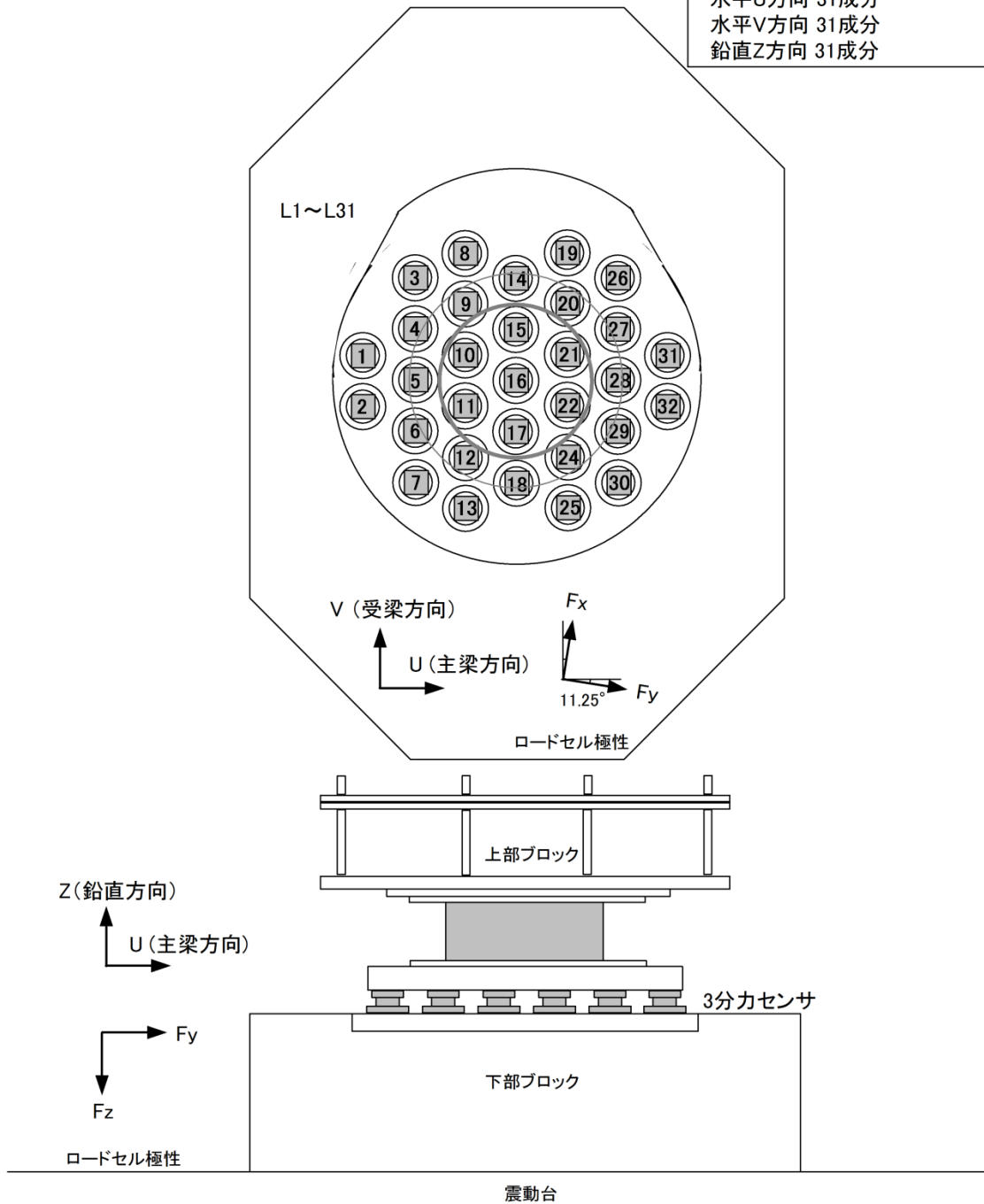


図 2.2.1-4 3分力計配置図

(4) 加振方法と実験ケース

1) 加振方法

震動台の上昇により、面圧 5N/mm^2 (約 $3,800\text{kN}$) を載荷した状態で、せん断ひずみ $100\% \sim 400\%$ までの正弦波および地震応答波により水平 1 方向または 2 方向に加振を行った。震動台を上昇させることで、加力フレームが傾斜するため、その分震動台を傾斜させて加振を実施した。また、本実験では鉛直荷重も変位制御にて実施するため、水平変形を与えた場合の試験体の圧縮沈み込み変形を逆位相で試験体に与えることとした。なお、加力フレームの剛性 \ll 積層ゴムの鉛直剛性であることを考慮し、鉛直沈み込み量が比較的小さいせん断ひずみ 200% までの範囲では、鉛直方向の制御は実施しないこととした。

実験では、震動台のアクムレータ蓄圧および加振準備のため、インターバルを取りながら加振を実施した。

2) 実験ケース

実験ケース詳細を下記 a)~e) に記す。また、図 2.2.1-5 に加振に用いた変位波形および変位軌跡を、表 2.2.1-5 に本実験における加振実績を示す。

a) 基本特性試験

各試験の前後に、試験体の基本特性を確認するため、面圧を 5N/mm^2 で一定とし、せん断ひずみ $\pm 100\%$ 、周期 80 秒の正弦波加振を 4 サイクル実施した。なお予備実験として、試験体出庫時の製品検査では、標準的な出荷試験 (面圧 15N/mm^2) に加えて実験面圧である面圧 5N/mm^2 における試験を実施した。加力方向は主梁方向である。

b) 正弦波 1 方向多数回繰返し加振

積層ゴムサイズの違いによるスケール効果を確認するため、第Ⅲ部第 1 章に示した縮小試験体実験における 3A 長周期に対応する加振として、 $\gamma = 200\%$ (400mm)、周期 4 秒、35 サイクル (累積水平変形約 56m) の正弦波加振を実施した。

c) 地震応答波加振

長周期地震動に対する応答変位波形を想定した、地震応答波加振を実施するものとする。1 方向加振と 2 方向加振を実施する。ランダム波加振による積層ゴムの損傷を評価するため、正弦波加振と同等の累積変形に達するまで (約 100m) 地震応答波加振を繰り返し実施する。

実験で用いる地震応答波は、第Ⅲ部第 2 章で検討した 2 方向入力地震動による応答解析結果 (温度上昇非考慮) を用いた。入力地震動として、竹中工務店作成の Wave-Tk を用いた。Wave-Tk は、大阪堺における東南海、南海連動地震の予測波である。応答解析は上部建物 (積層ゴム 1 台当たりの重量: $7,477\text{kN}$) を 1 質点としてモデル化したもので、免震層は鉛プラグ入り積層ゴムのみで構成されるものとした。鉛プラグ入り積層ゴムのゴム種は G4、外形 $\phi 1,000$ 、鉛径 200mm 、ゴム総厚 200mm とし、積層ゴムのゴム剛性による周期が 4.5 秒、鉛降伏せん断力係数 $\alpha_s = 0.035$ となるよう設定されたものである。

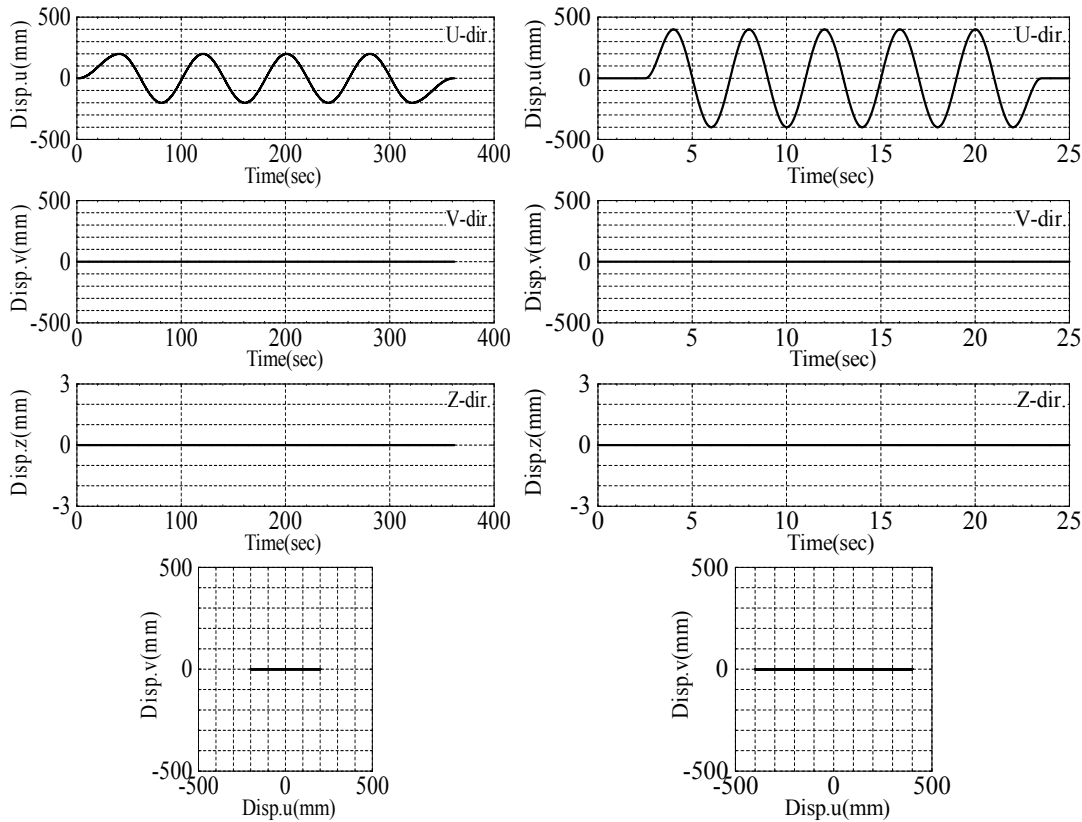
1 方向加振では、Wave-Tk (EW) を主梁方向に入力する。2 方向加振では、Wave-Tk (EW) を主梁方向に Wave-Tk (NS) を受梁方向に入力する。最大せん断ひずみは、EW 方向が 108% 、NS 方向が 69% である。

d) 正弦波 2 方向多数回繰返し加振

第Ⅲ部第 1 章に示したの縮小試験体実験における 3B 限界に対応する試験として、累積水平変形約 100m 超となる加振を行なうものとする。併せて水平 1 方向加振との比較を行い、直交方向の影響を確認する。最大水平振幅 $\gamma = 200\%$ (400mm 主梁方向)、100% (200mm 受梁方向)、加振周期 4 秒の楕円加振とした。また、直交方向の変位振幅による比較を行うため、最大水平振幅 $\gamma = 200\%$ (400mm 主梁方向)、200% (400mm 受梁方向)、加振周期 4 秒の真円加振を実施した。真円加振の累積変形は 3A 長周期に対応し約 50m とした。

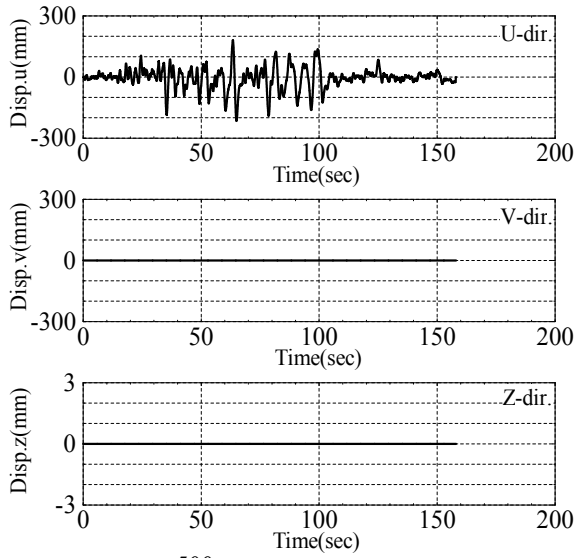
e) 正弦波 1 方向大振幅加振

周期 4 秒、最大水平振幅 $\gamma = 300\%$ (600mm)、350% (700mm)、および 400% (800mm) の正弦波加振を実施した。震動台アキュムレータ性能の都合により、 $\gamma = 300\%$ では 3 サイクル、 $\gamma = 350\%$ および 400%では 2 サイクルの加振を実施した。加振方向は受梁方向である。

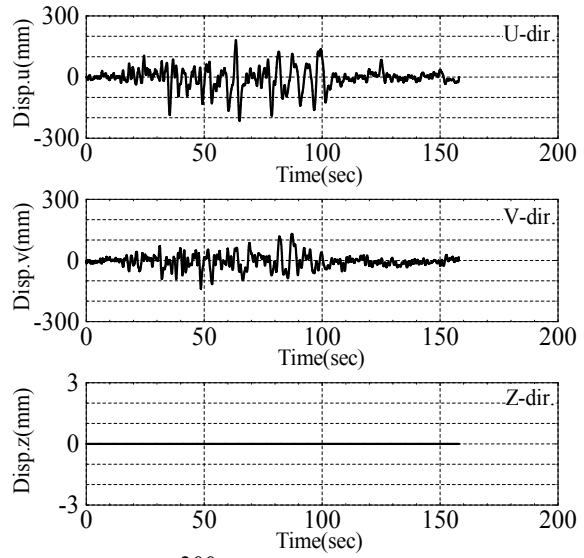


(a)基本特性試験

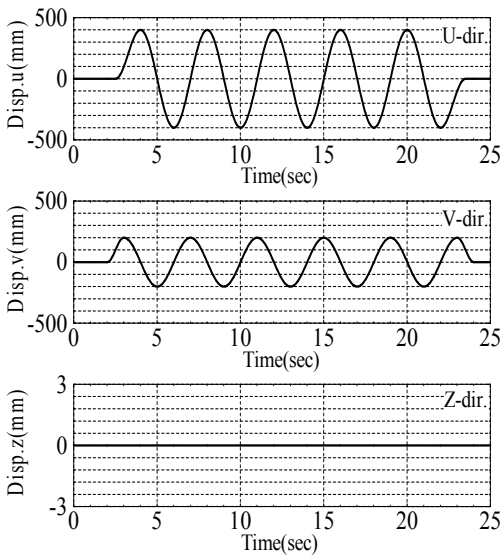
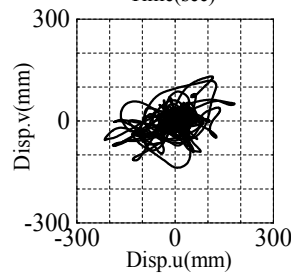
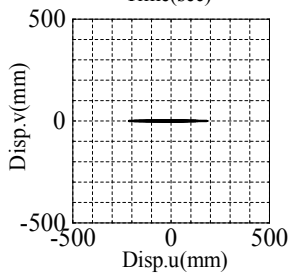
(b)正弦波 1 方向多数回繰返し (7 回繰返し)



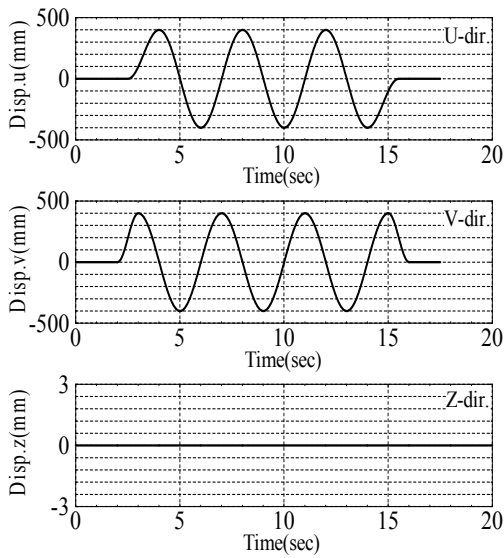
(c)地震応答波 1 方向



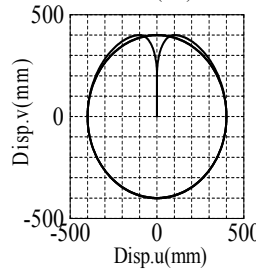
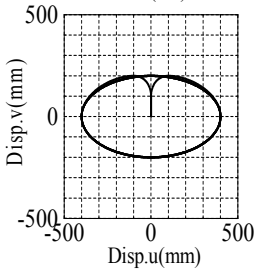
(d)地震応答波 2 方向 (6 回繰返し)

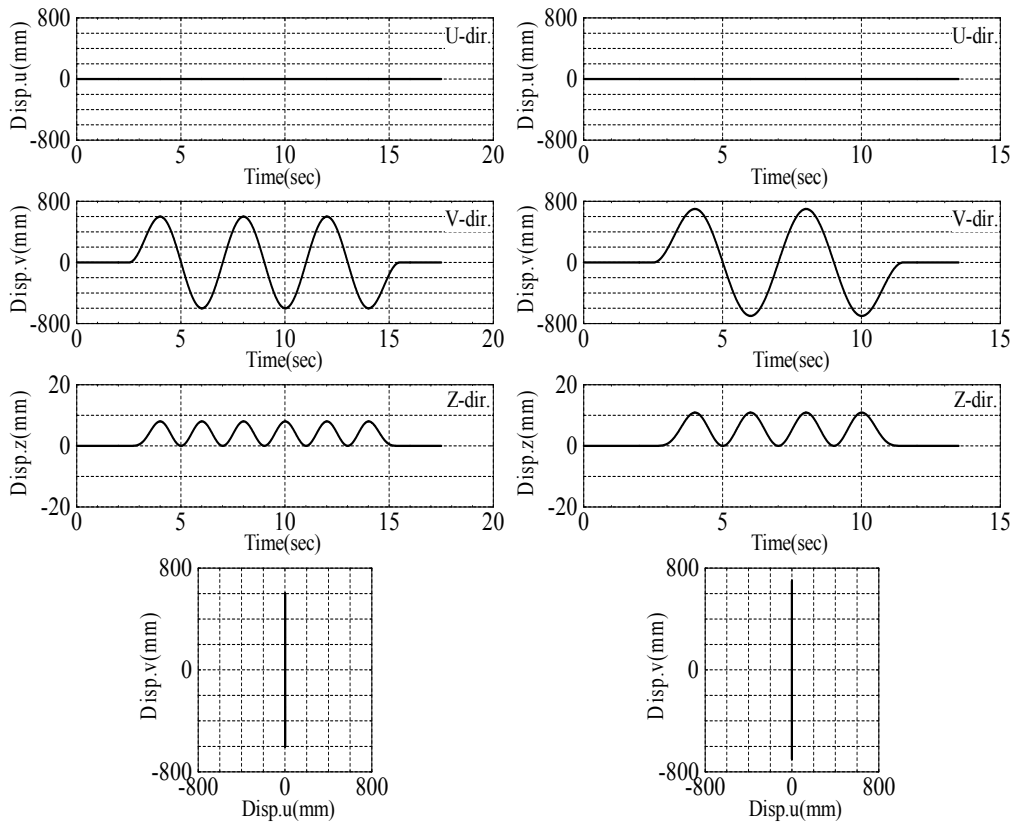


(e)楕円加振 (12 回繰返し)



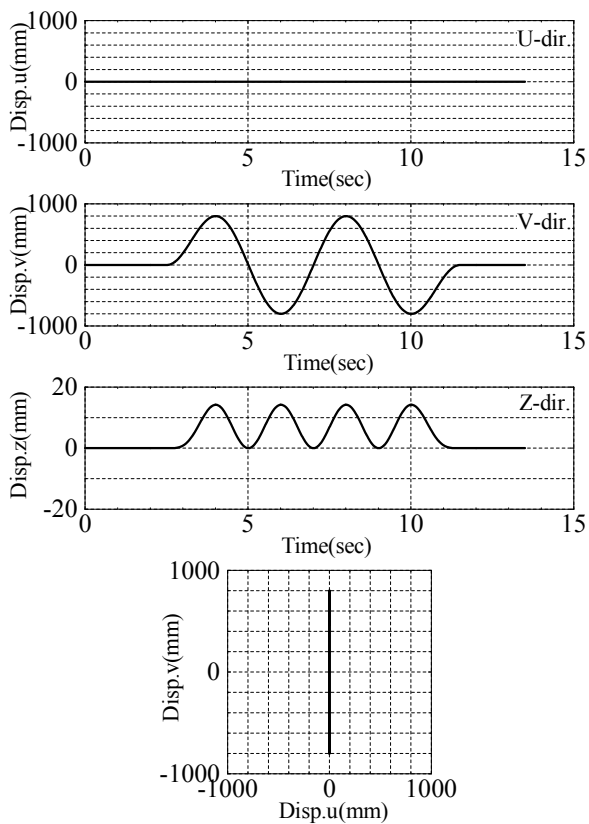
(f)真円加振 (7 回繰返し)





(g) 正弦波 1 方向大振幅 ($\gamma=300\%$)

(h) 正弦波 1 方向大振幅 ($\gamma=350\%$)



(i) 正弦波 1 方向大振幅 ($\gamma=400\%$)

図 2.2.1-5 加振変位波形および変位軌跡

表 2.2.1-5 加振実績

No.	実施日	試験条件	加振方向	レベル	面圧 (MPa)	加振周期 (秒)	
1	10/17	基本特性 1	u	$\gamma 100\% \times 4\text{cyc.}$	5	80	
2		正弦波 1 方向	u	$\gamma 200\% \times 5\text{cyc.} \times 7$ 回 (累積変形 55m)	5	4	
3		基本特性 2	u	$\gamma 100\% \times 4\text{cyc.}$	5	80	
-		試験体冷却					
4		地震応答波 1 方向	u	$\gamma 109\%$ 継続時間 160 秒 $\times 1$ 回 (累積変形 10.1m)	5	-	
5		地震応答波 2 方向	u+v	u 方向 : $\gamma 109\%$ 、v 方向 : $\gamma 70\%$ 継続時間 160 秒 $\times 6$ 回 (累積変形 89.8m)	5	-	
6		基本特性 3	u	$\gamma 100\% \times 4\text{cyc.}$	5	80	
-		試験体冷却					
7		基本特性 4	u	$\gamma 100\% \times 4\text{cyc.}$	5	80	
8		正弦波 2 方向 楕円加振	u+v	u 方向 : $\gamma 200\%$ 、v 方向 : $\gamma 100\%$ $\times 5\text{cyc.} \times 12$ 回 (累積変形約 119.4m)	5	4	
9		基本特性 5	u	$\gamma 100\% \times 4\text{cyc.}$	5	80	
-		試験体冷却					
10		10/18	基本特性 6	u	$\gamma 100\% \times 4\text{cyc.}$	5	80
11			正弦波 2 方向 真円加振	u+v	u 方向 : $\gamma 200\%$ 、v 方向 : $\gamma 200\%$ $\times 3\text{cyc.} \times 7$ 回 (累積変形 57.4m)	5	4
12			基本特性 7	u	$\gamma 100\% \times 4\text{cyc.}$	5	80
-	試験体冷却						
13	正弦波 1 方向 大振幅		v	$\gamma 300\% \times 3\text{cyc.}$	5	4	
14	正弦波 1 方向 大振幅		v	$\gamma 350\% \times 2\text{cyc.}$	5	4	
15	正弦波 1 方向 大振幅		v	$\gamma 400\% \times 2\text{cyc.}$	5	4	

(5) 実験結果

1) 力学特性値の算出方法

実験における鉛プラグ入り積層ゴムの特性値である降伏荷重 Q_d 、降伏後剛性 K_d 、等価減衰定数 H_{eq} および履歴吸収エネルギー ΔW は、図 2.2.1-6 および式(2.2.1-1)～(2.2.1-3)に基づき算定する。

降伏荷重 Q_d は、荷重変形関係において正負の切片荷重の絶対値平均で評価する。また、荷重変形関係において、各加力試験における変位が、せん断ひずみ振幅： $\pm \gamma_{max}$ の 1/2 ひずみ時の点を結ぶ直線の傾きをその荷重変形関係における降伏後剛性とし、荷重変形関係の上側と下側の降伏後剛性 (K_{du} , K_{dd}) の平均を、その荷重変形関係における降伏後剛性 K_d とする。なお、 Q_d 、 K_d の時刻歴結果は、3 サイクル目の値で除した変化率で評価する。各サイクルの荷重変形関係の描く面積を履歴吸収エネルギーを ΔW とし、各加振ケースの履歴面積の累積値を累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$ とする。

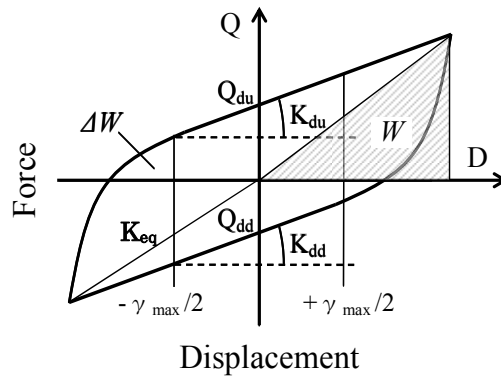


図 2.2.1-6 力学特性値算出の定義

$$\text{降伏荷重 } Q_d = \frac{|Q_{du}| + |Q_{dd}|}{2} \quad (2.2.1-1)$$

$$\text{降伏後剛性 } K_d = \frac{|K_{du}| + |K_{dd}|}{2} \quad (2.2.1-2)$$

$$\text{等価減衰定数 } H_{eq} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (2.2.1-3)$$

2) 出庫試験

図 2.2.1-7 に、出庫試験における荷重変形関係を示す。試験条件は、通常面圧である 15N/mm^2 、および本実験における試験面圧である 5N/mm^2 の 2 水準とし、せん断ひずみ $\pm 100\%$ 、周期 80 秒の正弦波加振を実施した。表 2.2.1-6 に設計値と出庫試験結果の比較を示す。これより、3 サイクル目の降伏荷重 Q_d は面圧 15N/mm^2 で 223.3kN であり、設計値に対して -11% となり、検収条件を満たしている。一方、面圧 5N/mm^2 における 3 サイクル目の Q_d は 201.4kN であった。

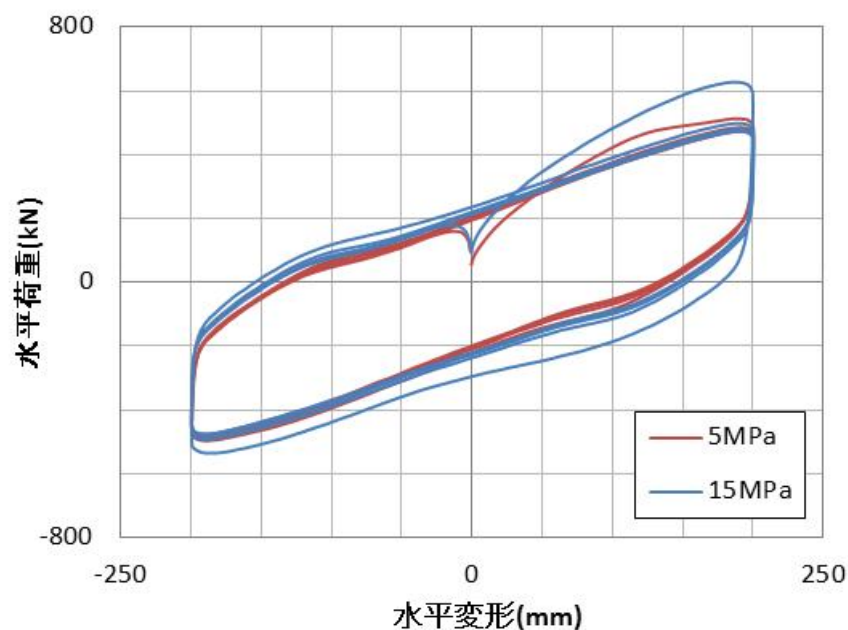


図 2.2.1-7 出庫試験の荷重変形関係(面圧 15N/mm^2 、 5N/mm^2)

表 2.2.1-6 設計値と出庫試験結果の比較

	面圧 (N/mm^2)	降伏荷重 $Q_d(\text{kN})$	等価剛性 $K_{eq}(\text{kN/mm})$	降伏後剛性 $K_d(\text{kN/mm})$	等価減衰定数 $H_{eq}(\%)$
設計値	15	250.4	2.83	-	26.5
出庫試験 15MPa	15	223.3	2.56	1.428	27.4
出庫試験 5MPa	5	201.4	2.58	1.570	24.7

3) 基本特性試験

図 2.2.1-8 に出庫試験と加振前の基本特性試験（基本特性 1）の結果をあわせて示す。試験面圧は双方とも 5N/mm^2 、周期は 80 秒である。なお、水平荷重は試験体温度 20°C で温度補正をしたものとする。荷重変形関係は概ね一致しているものの、基本特性 1 の温度補正後の 3 サイクル目の降伏荷重 Q_d は 212.0kN であり、出庫試験の 201.4kN よりやや大きい。これは、試験機の違いや面圧の微小な変動等による影響と考えられる。

図 2.2.1-9 に各基本特性試験の荷重変形関係を開始時のフランジ温度とあわせて示す。試験体温度の上昇とともに履歴ループが小さくなるが、温度低下に伴い、履歴ループも回復している。

図 2.2.1-10 に、基本特性試験における 3 サイクル目の Q_d と加振開始時のフランジ温度の関係を示す。図中には、1 日目の結果の近似曲線をあわせて示している。これより、真円加振後に実施した基本特性試験 7 回目の結果は、近似曲線を大きく下回っていることがわかる。また、図 2.2.1-11 にフランジ温度を 20°C で補正した降伏荷重を示す。図より、真円加振直後の力学性能が他に比べ低下していることは明らかである。以上より、真円加振中に試験体に何らかの損傷が生じた可能性が考えられる。

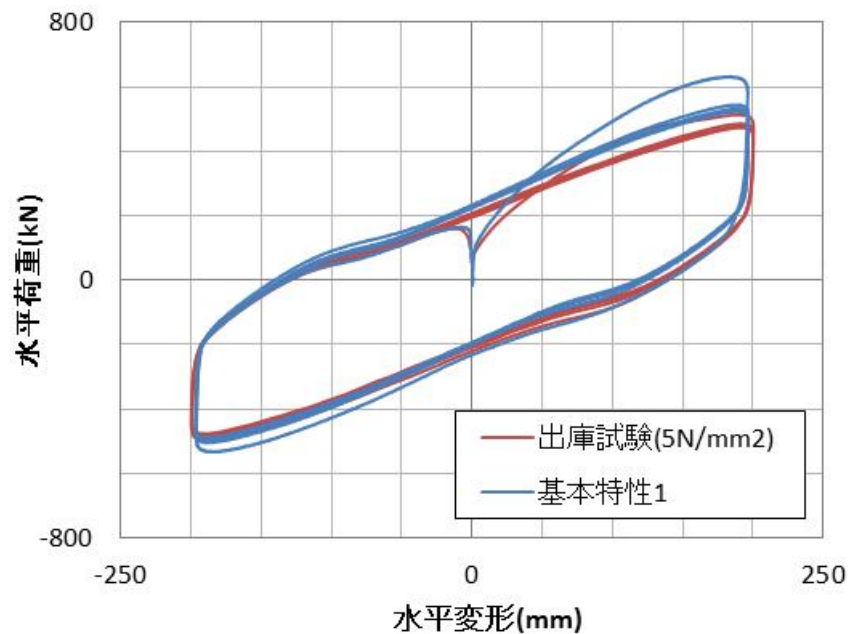
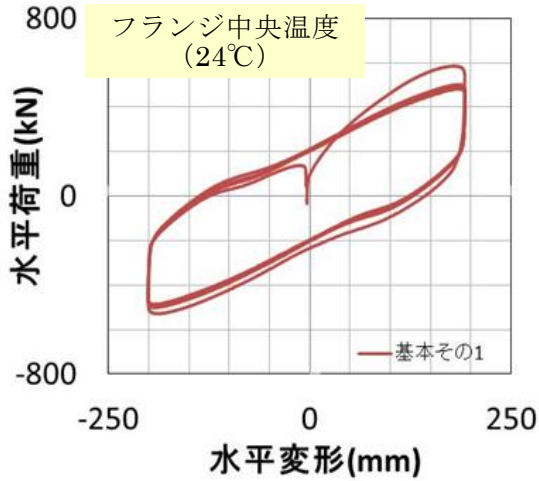
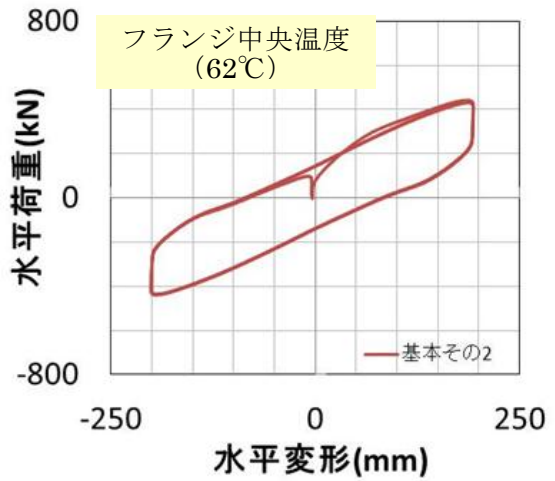


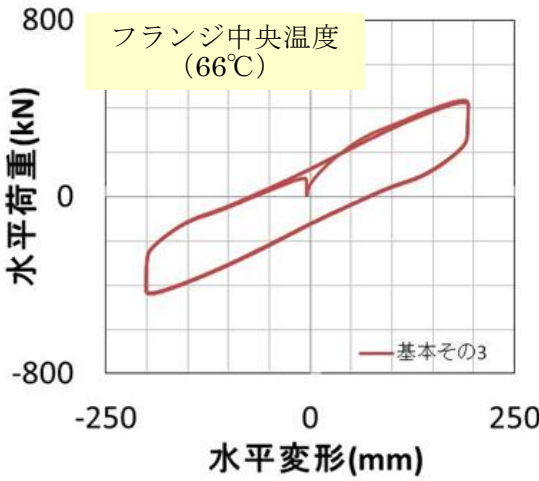
図 2.2.1-8 出庫試験と基本特性試験の比較



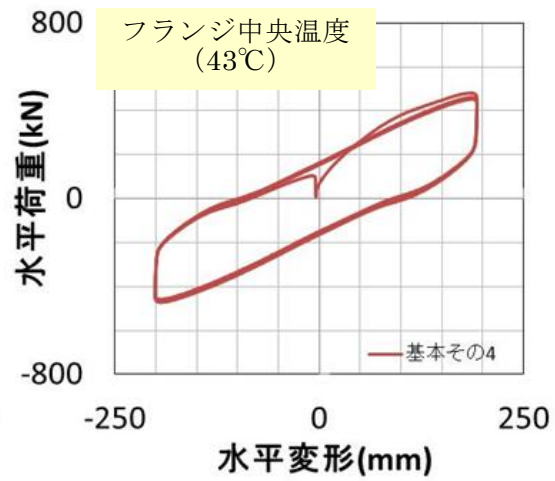
(1) 基本特性 1 : 実験前 / 1 日目



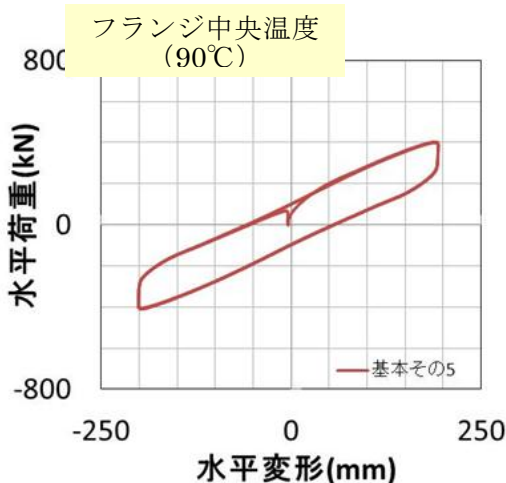
(2) 基本特性 2 : 正弦波 1 方向直後 / 1 日目



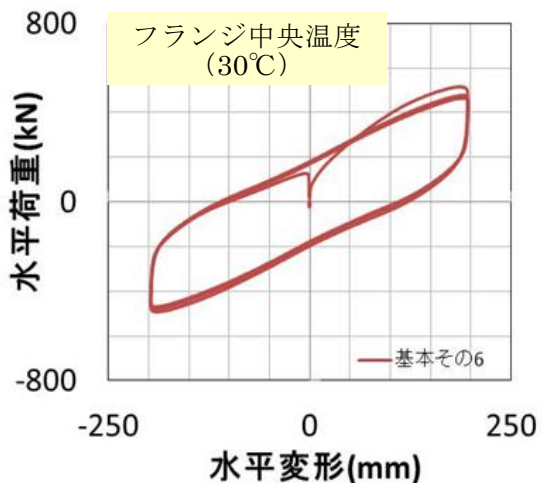
(3) 基本特性 3 : 地震応答波加振直後 / 1 日目



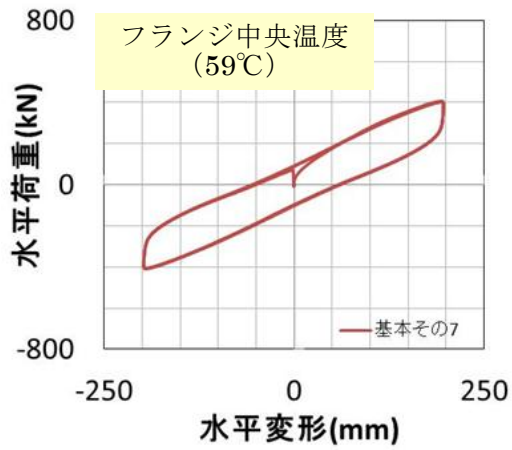
(4) 基本特性 4 : 楕円加振直前 / 1 日目



(5) 基本特性 5 : 楕円加振直後 / 1 日目



(6) 基本特性 6 : 真円加振直前 / 2 日目



(7) 基本特性 7: 真円加振直後 / 2 日目

図 2.2.1-9 基本特性の変化

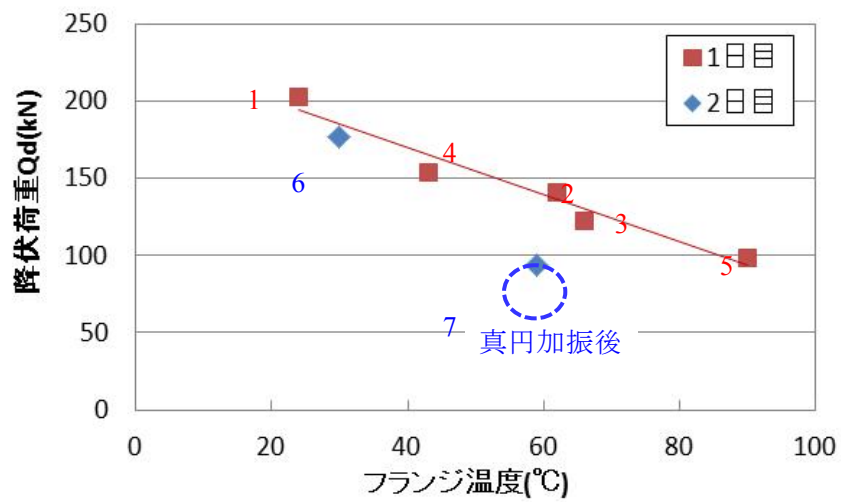


図 2.2.1-10 フランジ温度と降伏荷重の関係

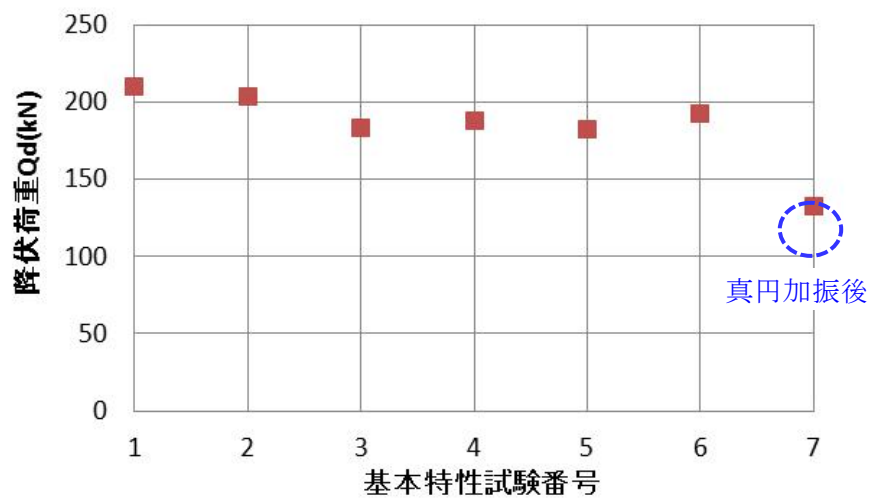


図 2.2.1-11 温度補正後の降伏荷重

4) 正弦波 1 方向多数回繰返し加振

写真 2.2.1-4 に 400 mm 変形（せん断ひずみ 200%）時の試験体写真を示す。図 2.2.1-12 に正弦波 1 方向多数回繰返し試験の荷重変形関係を示す。繰返し回数が増すごとに降伏荷重が低下し履歴ループが小さくなっているものの、安定したループを描いている。

図 2.2.1-13 に降伏荷重 Q_d および降伏後剛性 K_d の変化を示す。なお、3 サイクル目の値を 1 として基準化している。 Q_d は、震動台性能により 5 サイクル毎にインターバルがある都合上、インターバル毎に回復しているが、初期サイクルで Q_d が急激に低下し、それ以降の低下は緩やかである傾向が見られる。 Q_d は最終サイクルで 55% まで低下した。 K_d の変化は Q_d に比べ小さい。



写真 2.2.1-4 400mm 変形時の試験体

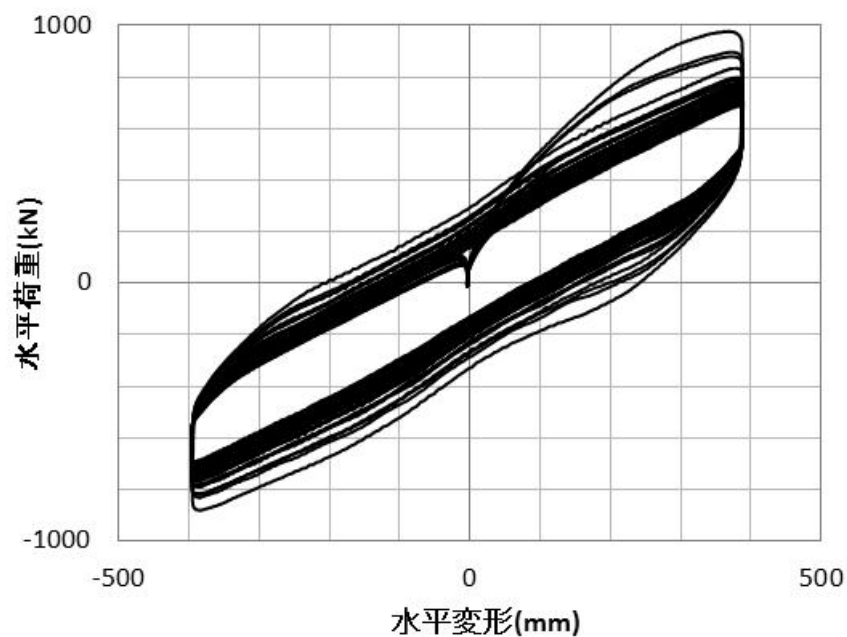
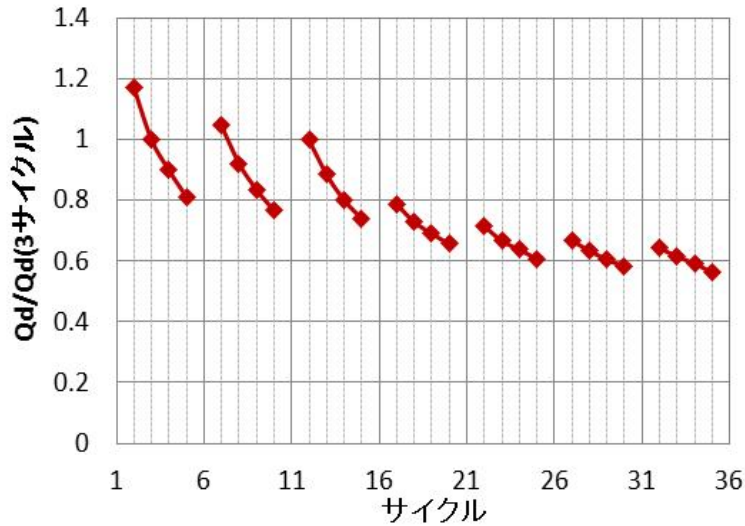
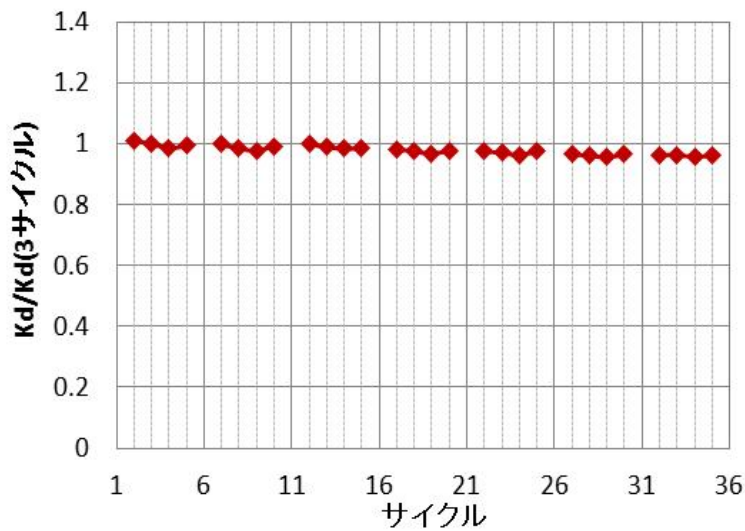


図 2.2.1-12 正弦波 1 方向多数回繰返し試験の荷重－変形関係
(周期 4 秒、せん断ひずみ ±200%、35 サイクル)



(a) 降伏荷重 Qd



(b)降伏後剛性 Kd

図 2.2.1-13 力学特性値の変化

(正弦波 1 方向多数回繰返し加振、せん断ひずみ 200%)

図 2.2.1-14 に降伏荷重 Qd を鉛プラグの断面積で除した降伏せん断応力 τ_y と鉛プラグ単位体積当たりの累積エネルギー E/V (=履歴吸収エネルギー ΔW / 鉛プラグ体積) の関係を示す。降伏せん断応力については加振初期では設計で用いられる 8.33N/mm^2 よりも大きいですが、徐々に低下し、加振終了時には 4N/mm^2 程度に至っている。

図 2.2.1-15 に正弦波 1 方向加振時の温度計測結果を示す。これより、鉛中央温度は加振開始と同時に急上昇し、加振が終了すると直ちに温度が低下し始めていることがわかる。これに対し、鉛上部やフランジ中央の温度上昇は緩やかで、加振終了後も温度が上昇し続けている。鉛中央で発生した熱が、徐々に鉛上部やフランジに熱伝導されているためと推察される。なお、フランジ端部や被覆ゴム内部の温度はほとんど上昇しなかった。

正弦波 1 方向加振では、加振中に鉛上部の熱電対が断線し、鉛中央の熱電対の抜け出しが確認されたため、以降のケースについてはこの 2 計測点は参考値とする。

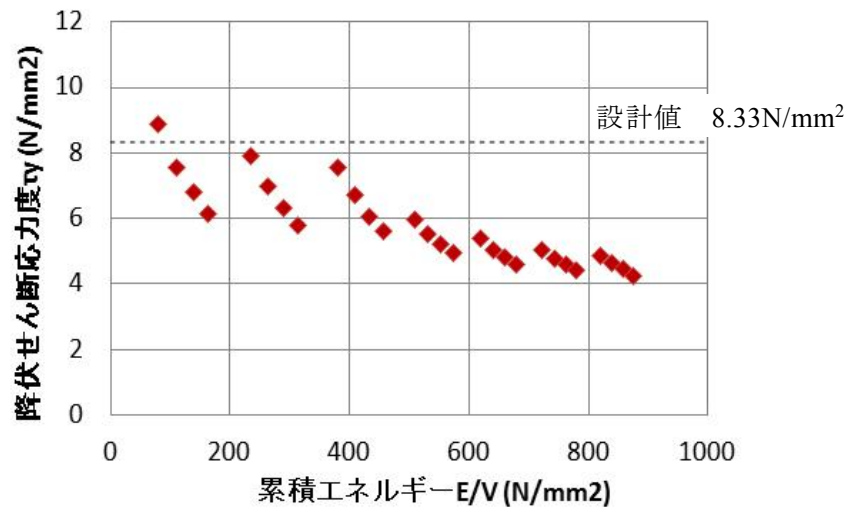


図 2.2.1-14 降伏せん断応力度 τ_y と鉛プラグ単位体積当たりの累積エネルギー E/V 関係

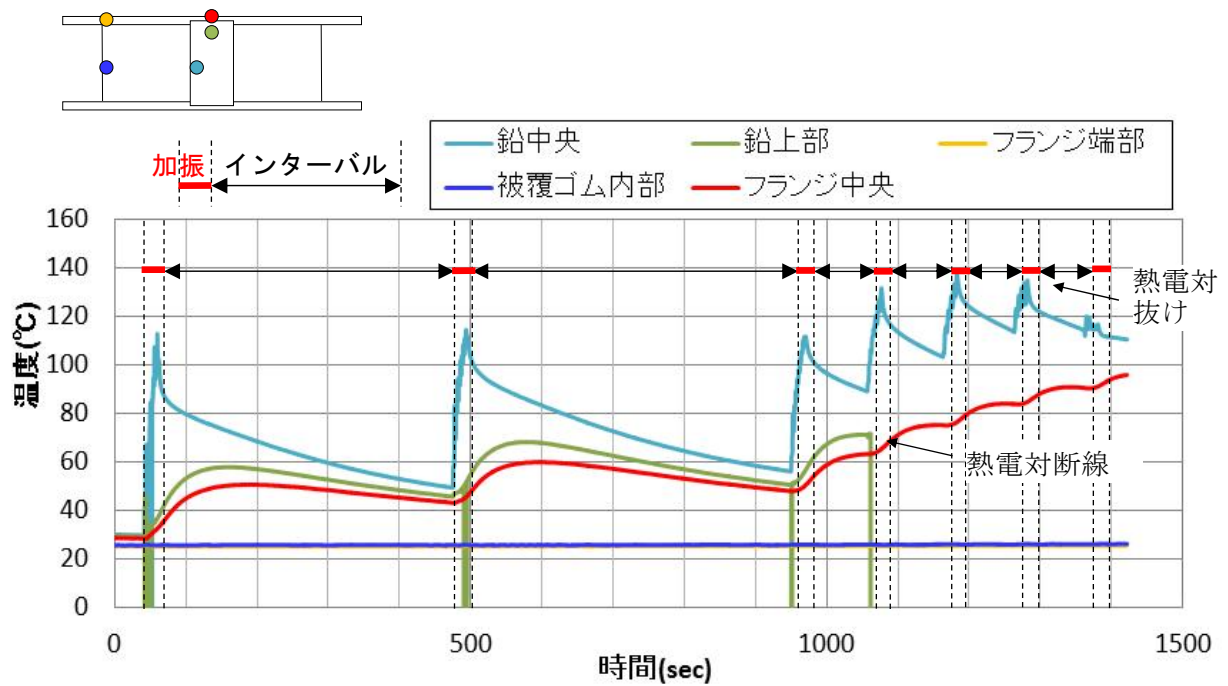
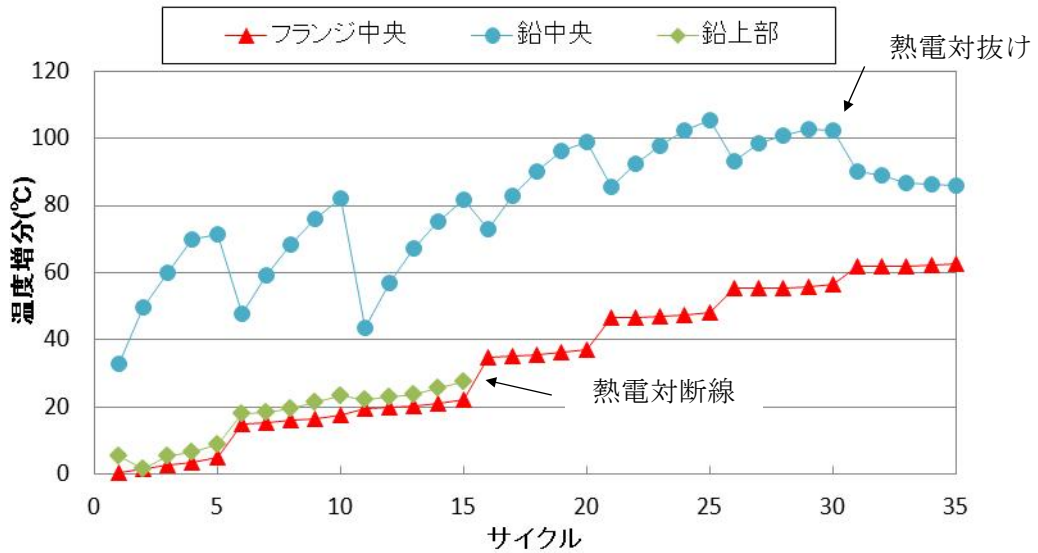
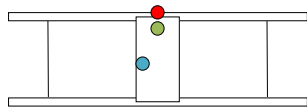
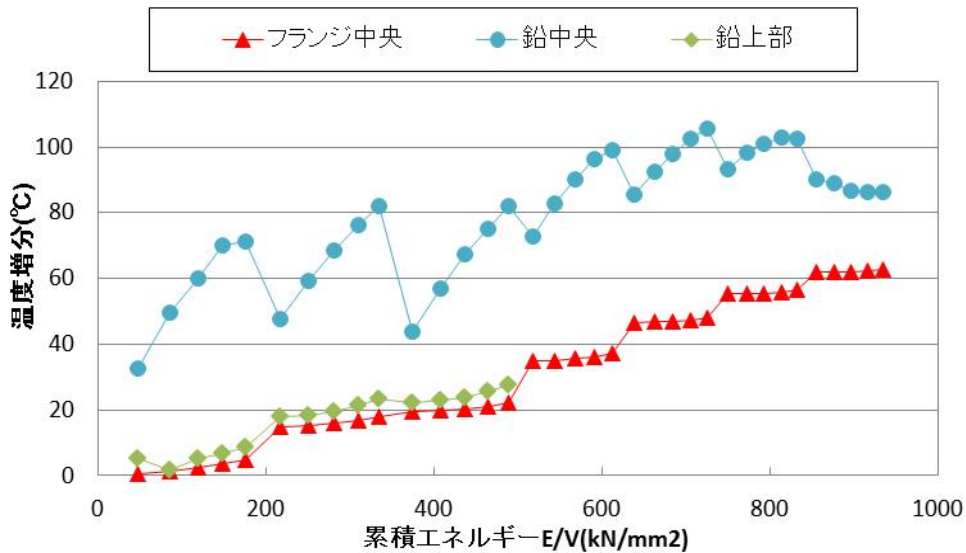


図 2.2.1-15 温度の推移
(正弦波 1 方向多数回繰り返し)

図 2.2.1-16 に加振サイクル、鉛プラグ単位体積当たりの累積エネルギーE/V と試験体温度の関係を示す。これより、加振サイクルと E/V 値の関係は概ね同等である。鉛中央は加振インターバルにより温度低下するが、鉛上部とフランジ中央はサイクル数、累積エネルギーに比例して温度が上昇している。



(a)加振サイクルと温度増分関係



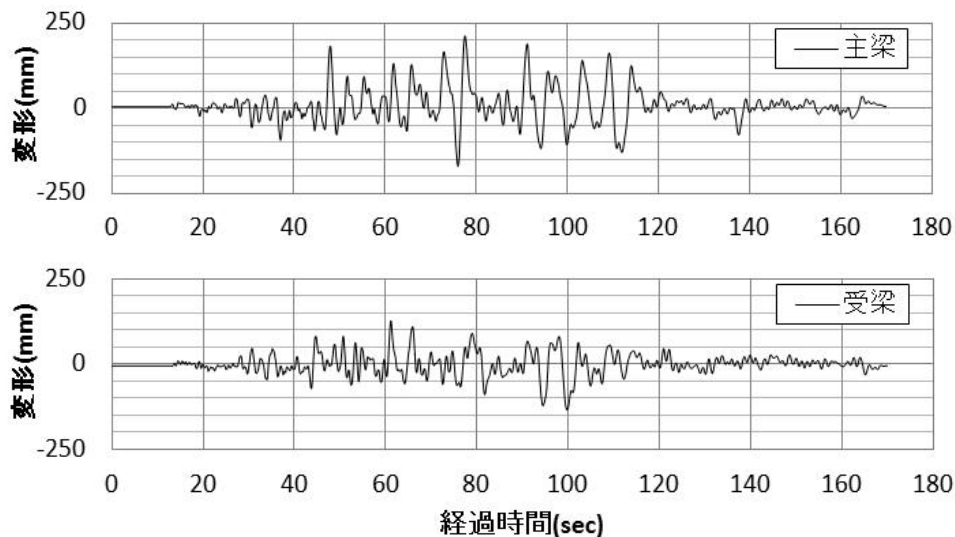
(b)累積エネルギーE/V と温度増分関係

図 2.2.1-16 加振サイクル、累積エネルギーE/V と試験体温度の関係

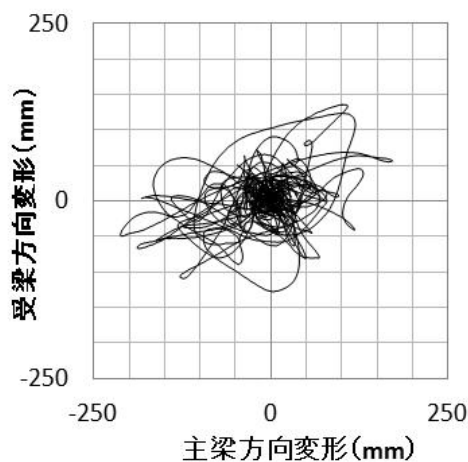
5) 地震応答波加振

図 2.2.1-17 に地震応答波加振の変位時刻歴波形および 2 方向加振の変位軌跡を示す。図 2.2.1-18 に地震応答波 1 方向加振および 2 方向加振(1 回目)の主梁方向における荷重変形関係、図 2.2.1-19 に変位振幅がせん断ひずみ 50%を超えたサイクルにおける降伏荷重 Q_d を、図 2.2.1-20 に累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$ を示す。なお、1 方向加振時の加振開始時フランジ中央温度は 33.4°C 、2 方向加振では 42.6°C である。

図 2.2.1-18 および図 2.2.1-19 より、直交方向振幅および温度上昇の影響により、主梁方向の荷重変形関係は 2 方向加振の方が小さくなっていることがわかる。同じ変位振幅における 1 方向加振と 2 方向加振の Q_d の差は、2 方向加振の受梁方向の変位振幅が比較的大きい 50 秒~100 秒の間で顕著であり、温度上昇だけでなく、直交方向の変位振幅が Q_d に与える影響は大きいと言える。1 加振の累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$ は、1 方向加振では $1.6 \times 10^6 (\text{kN} \cdot \text{mm})$ 、2 方向加振では $2.2 \times 10^6 (\text{kN} \cdot \text{mm})$ であった。

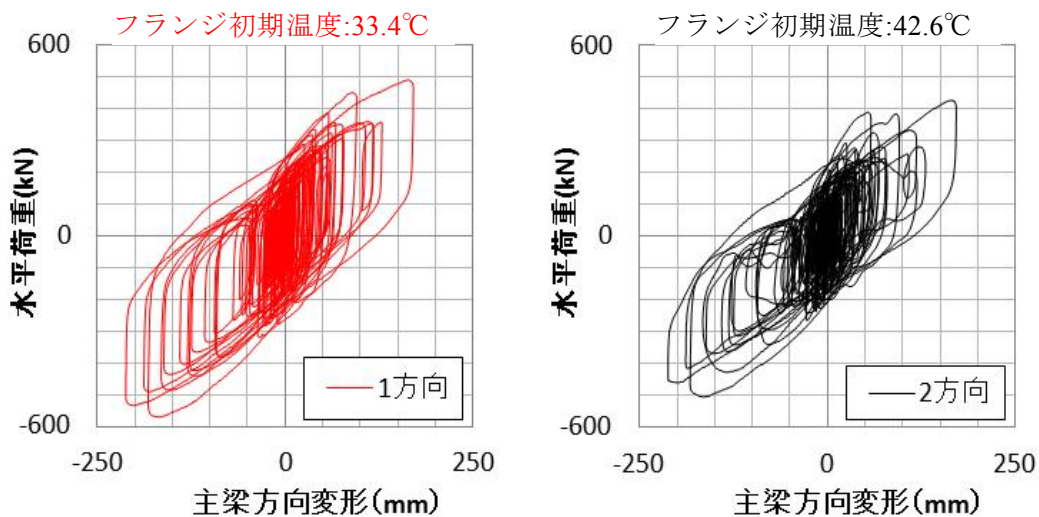


(a)時刻歴波形



(b)変位軌跡 (2 方向加振)

図 2.2.1-17 地震応答波加振の時刻歴波形



(a)1方向加振 主梁方向 (b)2方向加振 主梁方向

図 2.2.1-18 地震応答波 1方向および2方向加振の荷重-変形関係

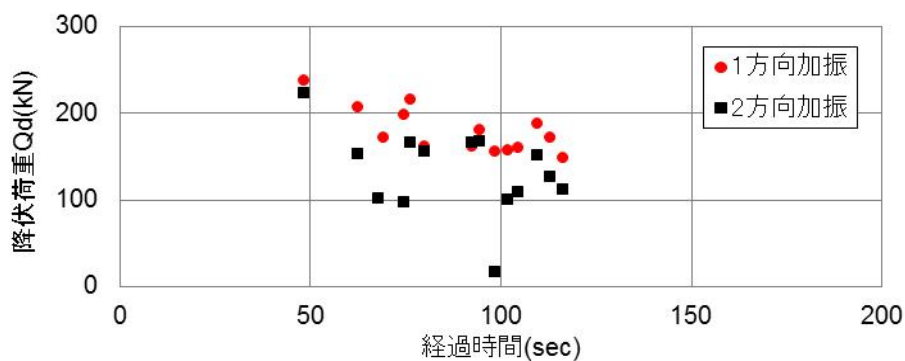


図 2.2.1-19 地震応答波加振の降伏荷重 Qd の推移

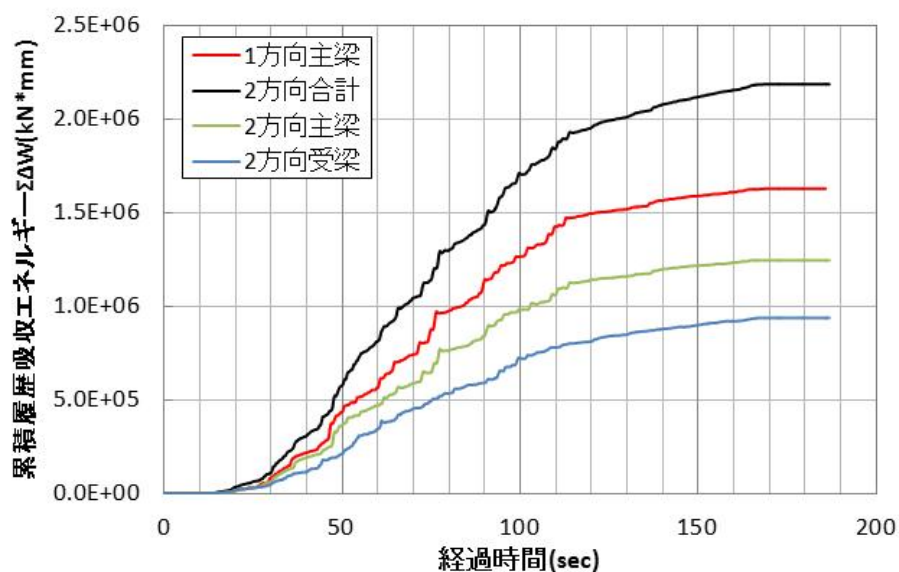
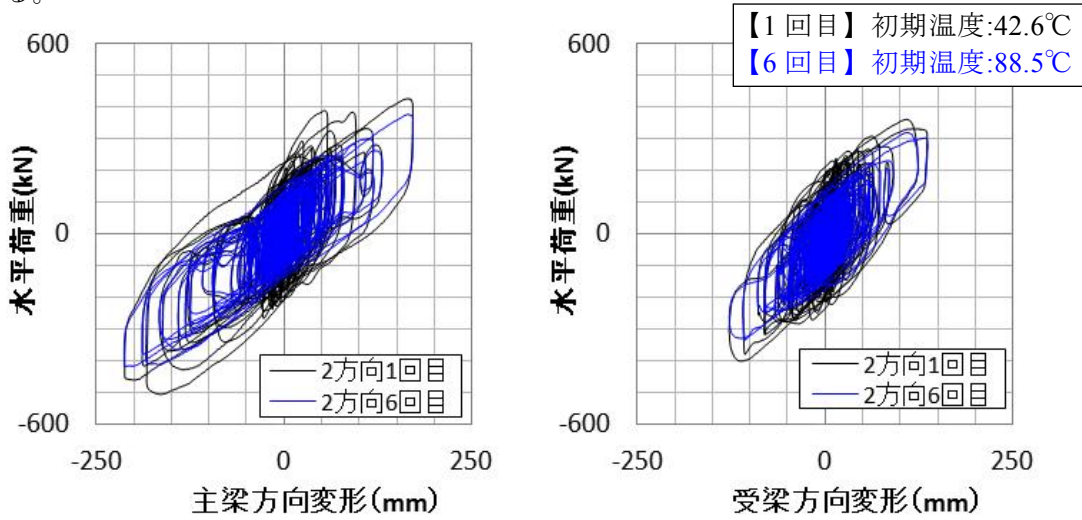


図 2.2.1-20 累積履歴吸収エネルギー $\Sigma\Delta W$ (1加振分)

図 2.2.1-21 に 2 方向加振の初回（1 回目）と最終回（6 回目）の荷重-変形関係をあわせて示す。また、図 2.2.1-22 には変位振幅がせん断ひずみ 50%を超えたサイクルにおける Qd を示す。なお、加振開始時のフランジ中央温度は初回が 42.6℃、最終回が 88.5℃である。

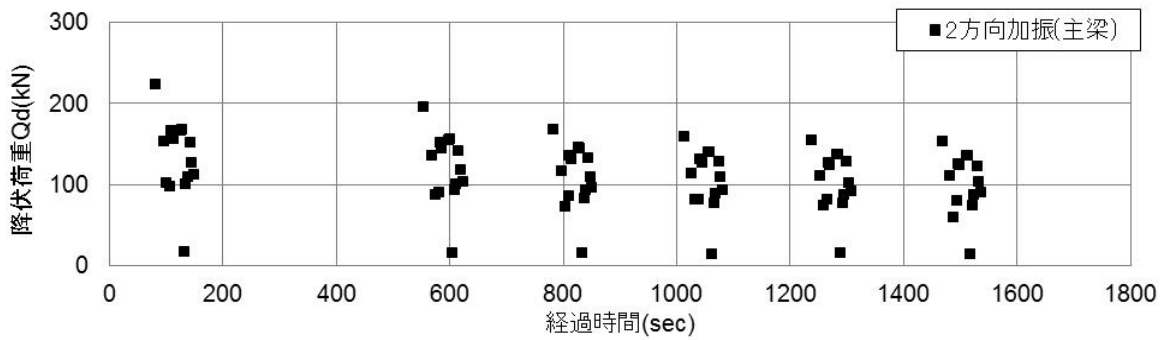
荷重変形関係の 6 回目の比較から、繰り返しによる荷重の低下が認められる。Qd は主梁方向受梁方向ともに加振回数とともに低下しているが、初期の回数における低下に比べ、後半の低下は緩やかであることがわかる。この傾向は、正弦波 1 方向多数回繰り返し加振でも見られた傾向である。



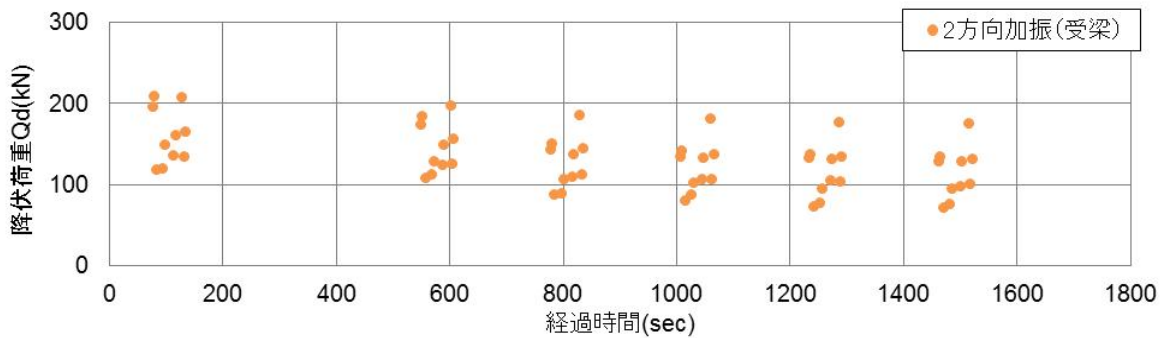
(a) 2 方向加振 主梁方向

(b) 2 方向加振 受梁方向

図 2.2.1-21 地震応答波 2 方向加振の荷重-変形関係



(a) 主梁方向



(b) 受梁方向

図 2.2.1-22 地震応答波 2 方向加振の Qd の推移

図 2.2.1-23、2.2-1-24 に地震応答波 1 方向加振および 2 方向加振における試験体の温度計測結果を示す。なお、鉛中央の温度については、熱電対の抜け出しによる位置ずれが確認されていることから、参考値とする。試験体の温度は、振幅が大きくなる 50 秒～120 秒で上昇するが、その他の部分では大きな温度上昇はない。フランジ中央温度は、1 方向加振で 33.4℃から 49.8℃（温度増分 16.4℃）に上昇し、2 方向加振（1 回目）では 42.6℃から 64.4℃（温度増分 21.8℃）上昇した。鉛中央温度は、熱電対の位置ずれにより鉛プラグ付近のゴム温度を計測していると考えられるが、フランジ温度よりも 10℃程度温度が高い。

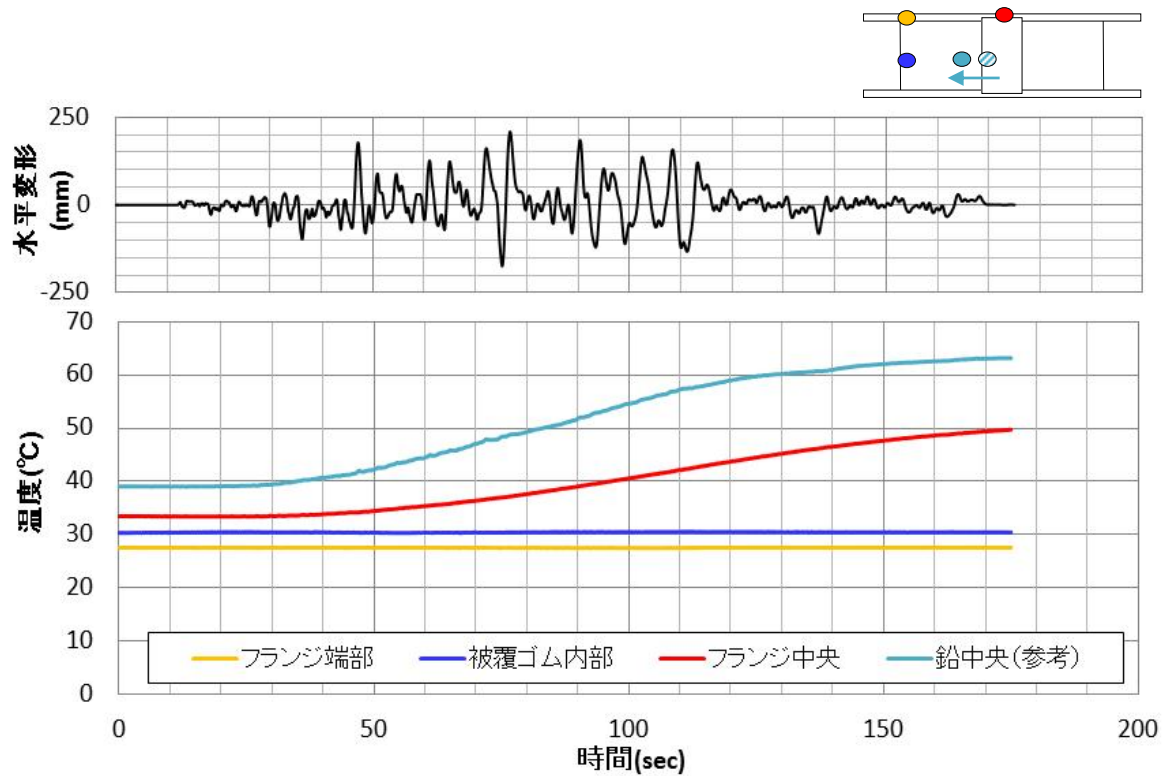


図 2.2.1-23 地震応答波 1 方向加振における温度の推移

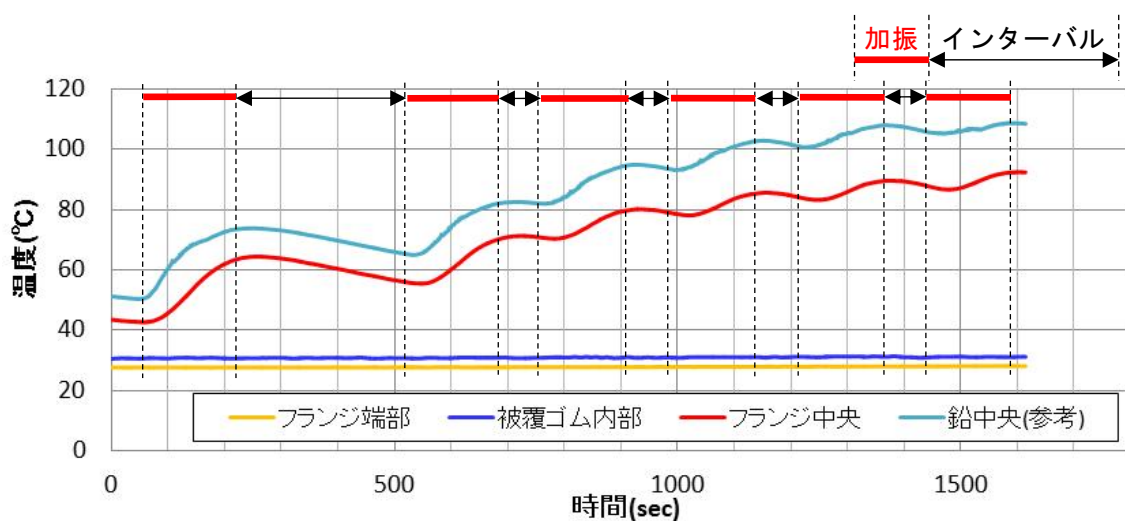
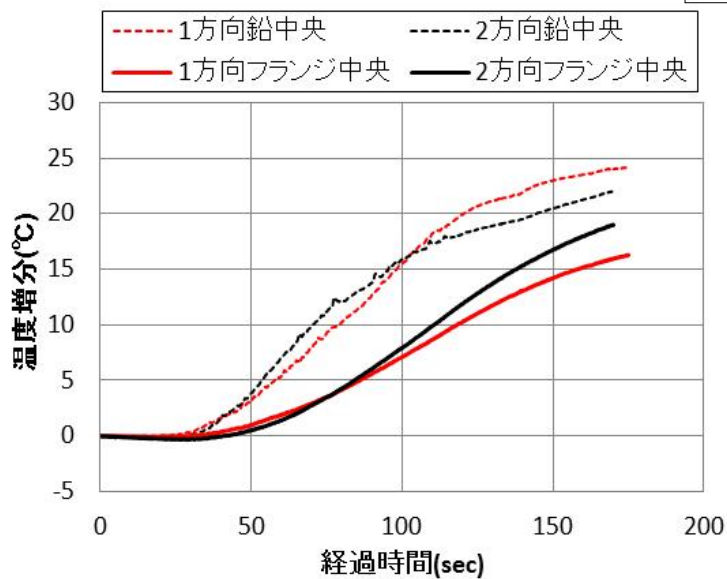
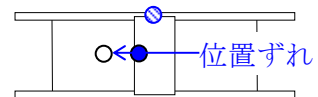


図 2.2.1-24 地震応答波 2 方向加振における温度の推移

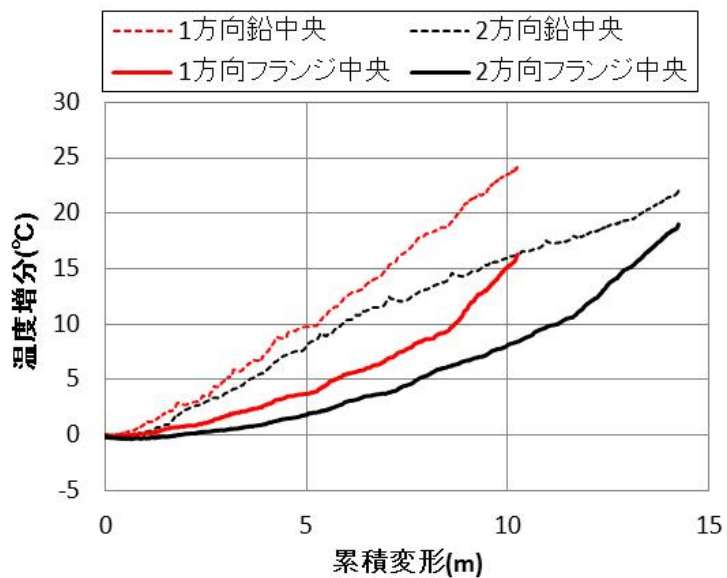
図 2.2.1-25 に地震応答 1 方向加振と 2 方向加振の試験体温度と経過時間・累積変形量・鉛プラグ単位体積当たりの累積エネルギーE/V の関係を比較して示す。なお、鉛中央の温度については、熱電対の位置ずれが確認されていることから、参考値とする。

図(a)より、加振振幅が大きい 50~120 秒の間に温度が急増する傾向は 1 方向・2 方向で共通して見られる。図(b)(c)から、同じ累積変形および鉛プラグ単位体積当たりの累積エネルギーE/V における温度増分は 1 方向加振のほうが大きいのが、2 方向加振の初期温度が高いことも一因と推察される。本加振は、2 方向加振の受梁方向のせん断ひずみが最大で 70%程度で、2 方向加振が試験体の温度上昇に与える影響は小さかったと考えられる。

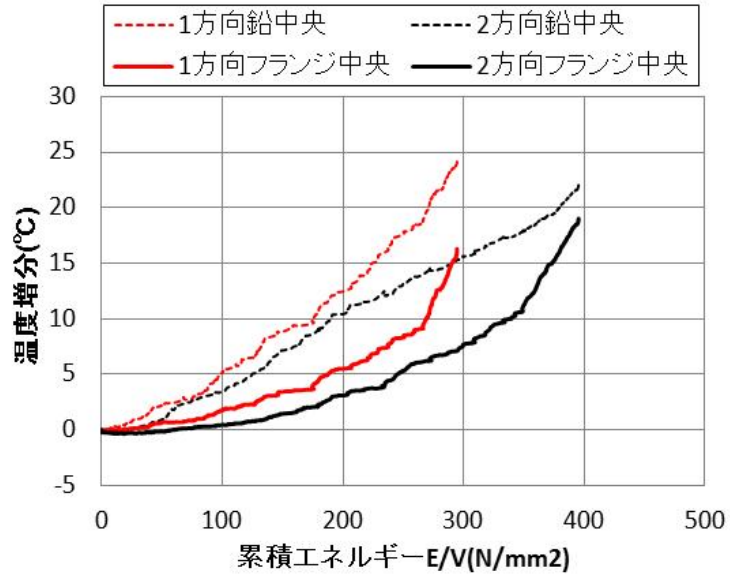
1 方向加振	初期温度…鉛中央 39.0℃、フランジ中央 33.4℃
2 方向加振	初期温度… 50.6℃、 42.6℃



(a)経過時間との関係



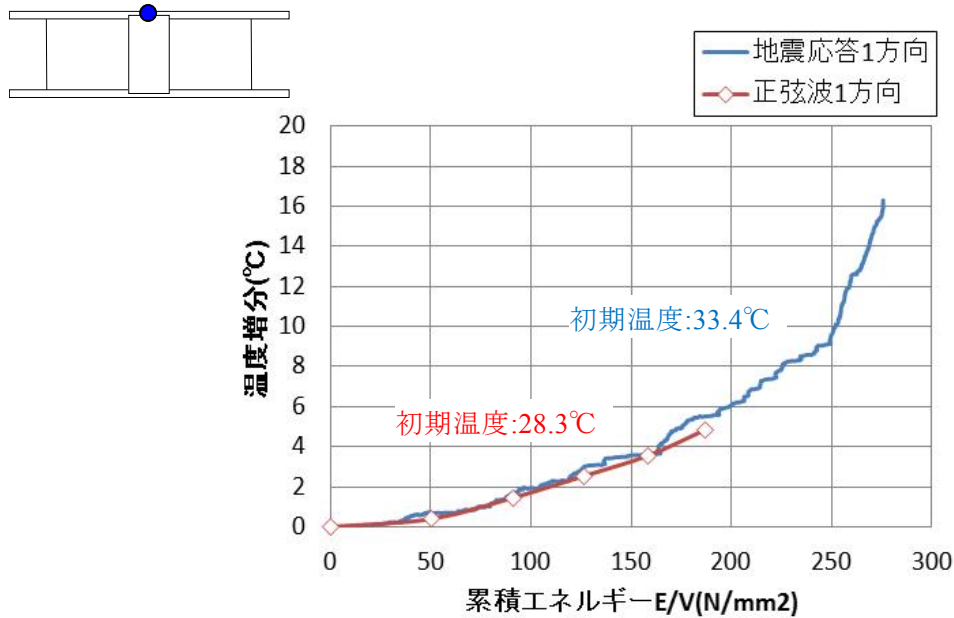
(b)累積変形との関係



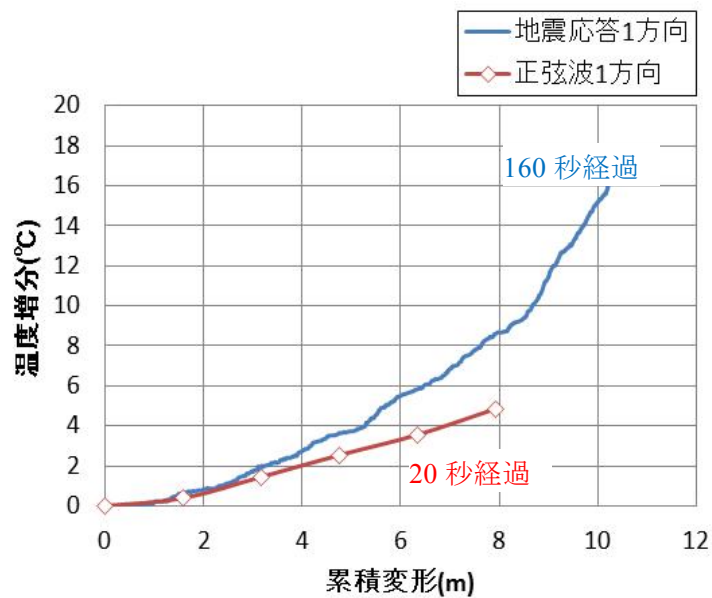
(c)累積エネルギーE/V との関係

図 2.2.1-25 温度増分の比較(地震応答波 1 方向・2 方向)

図 2.2.1-26 に地震応答波 1 方向加振における累積変形・鉛プラグ単位体積当たりの累積エネルギーE/V と温度上昇の関係を正弦波 1 方向加振（1 回目）と比較して示す。累積エネルギーでの比較では温度増分は同等であるが、同じ累積変形における温度増分は正弦波加振が小さい傾向が見られる。これは、同じ累積変形に達する時間が地震応答波加振よりも短いため、加振直後では鉛中央で発生した熱がフランジ上部まで伝達されていないためと考えられる。



(a)累積エネルギーとの関係



(b)累積変形との関係

図 2.2.1-26 地震応答 1 方向加振と正弦波 1 方向加振のフランジ中央温度増分の比較

6) 正弦波 2 方向多数回繰り返し加振

a) 楕円加振

図 2.2.1-27 に楕円加振における荷重-変形関係を示す。主梁方向の荷重変形関係は安定した履歴ループを描いている。楕円加振は、フランジ中央の温度が 43°C の状態で加振を開始している。そこで、主梁方向の荷重変形関係 (図(a)) に、正弦波 1 方向加振においてフランジ中央温度が約 43°C の時のサイクルの荷重変形関係をあわせて示した。これより、正弦波 1 方向加振に比べ履歴面積が小さくなっており、楕円加振における直交方向振幅の影響が確認できる。図(d)(f) より、受梁方向の荷重変形関係はループが交差しており、一時的に負減衰となっていたと考えられる。

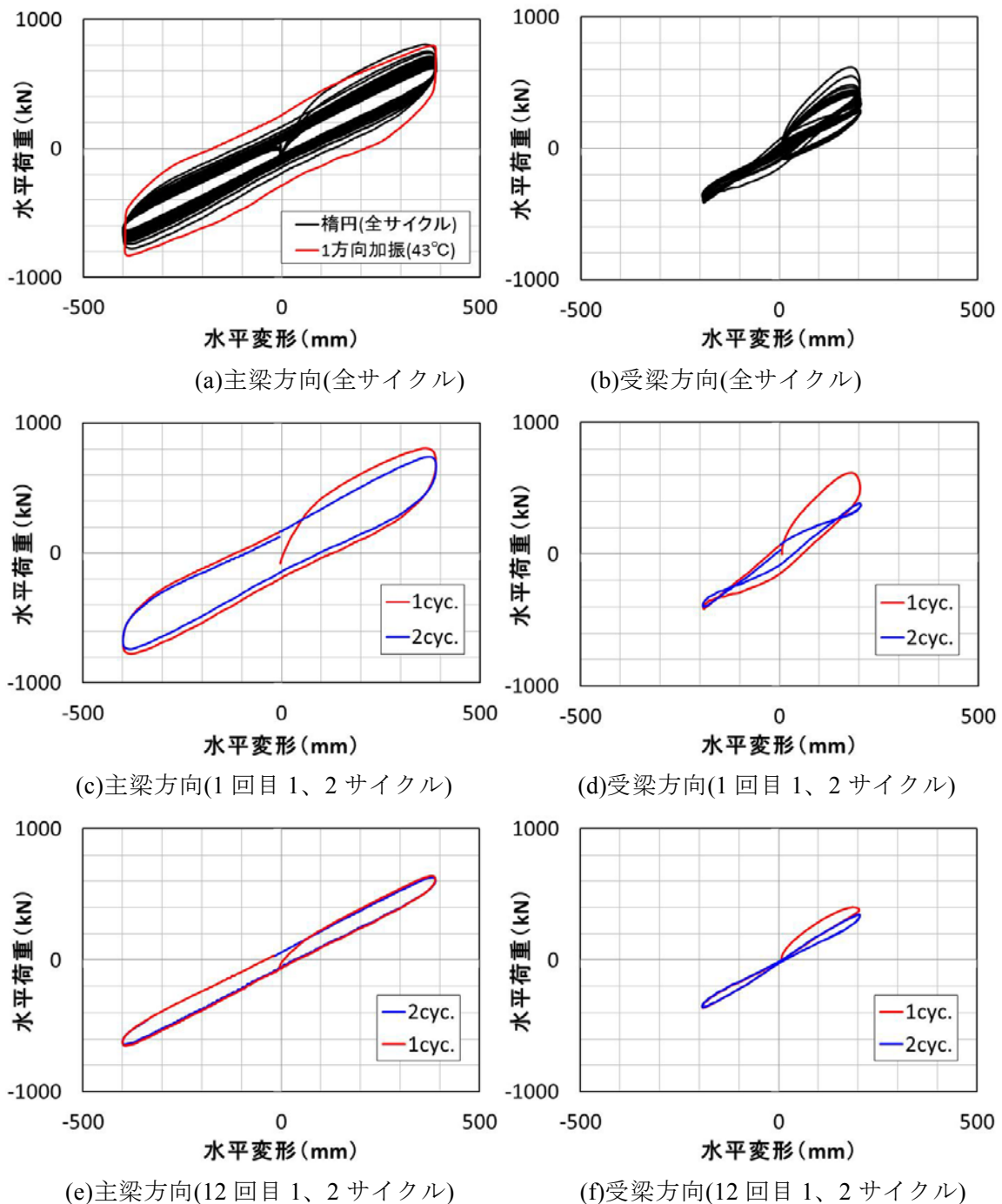
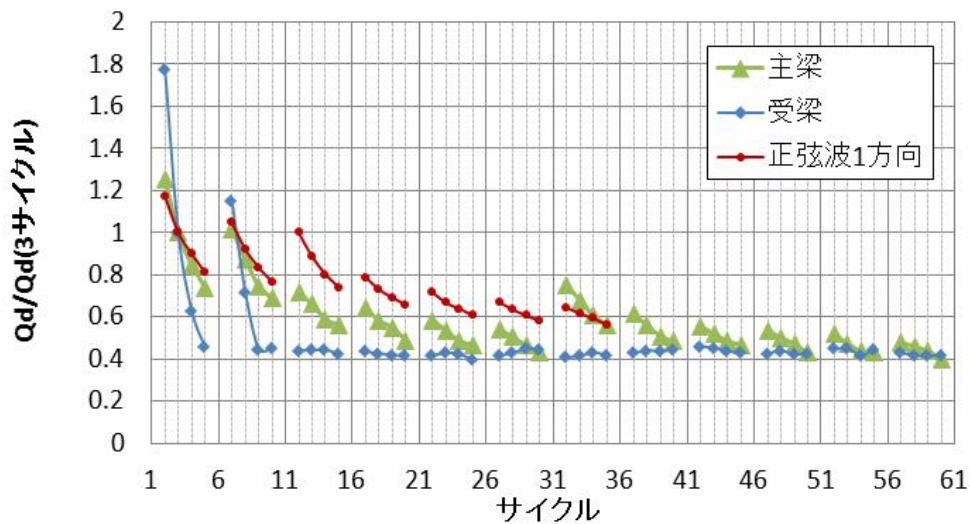


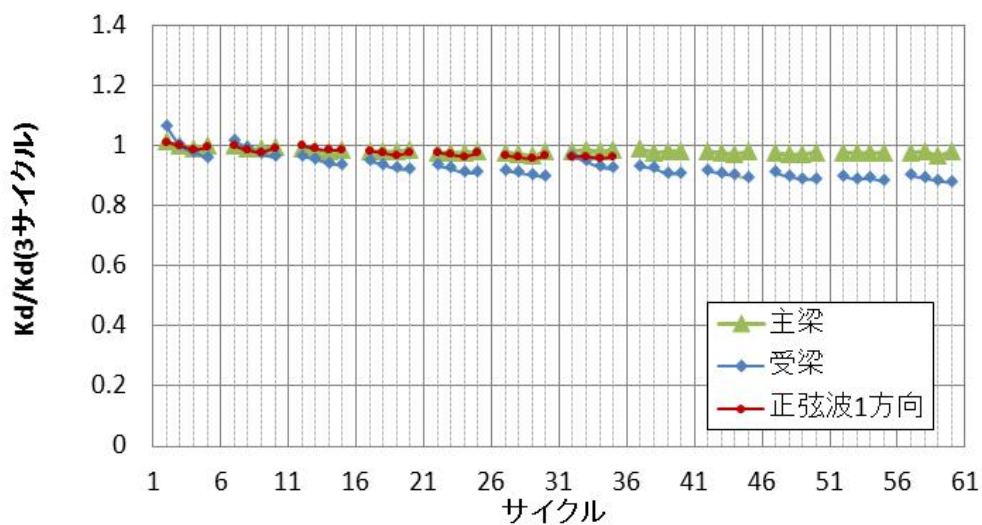
図 2.2.1-27 楕円加振の荷重変形関係

図 2.2.1-28 に楕円加振における加振サイクルと降伏荷重 Q_d 、降伏後剛性 K_d 、等価減衰定数 Heq 、履歴吸収エネルギー ΔW の関係を示す。図には正弦波 1 方向加振の結果もあわせて示す。

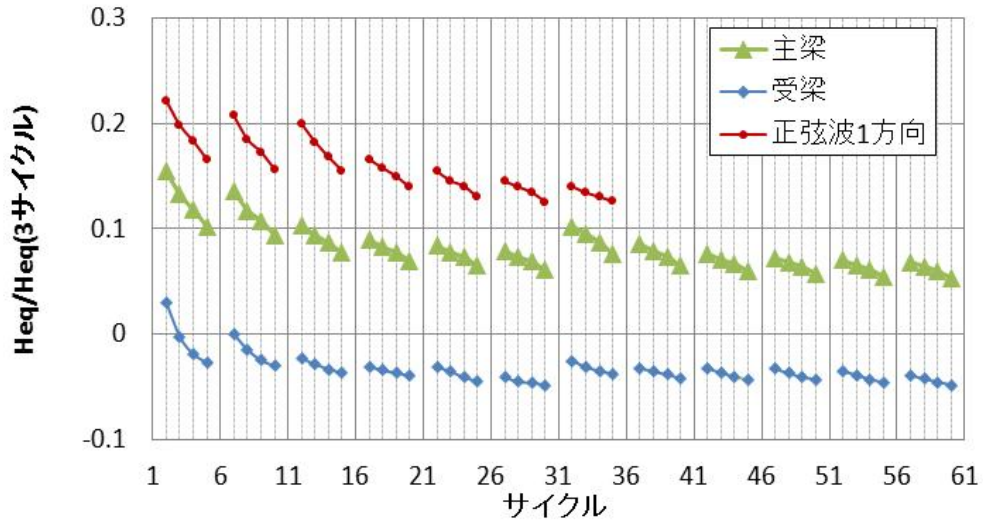
図(a)より、主梁の Q_d の変化は初期サイクルでは大きく、それ以降は緩やかである傾向は正弦波加振と同様である。しかし、 Q_d の低下は正弦波加振よりも大きく、温度上昇や 2 方向加振の影響が伺える。受梁方向の Q_d は 2 回目の加振で加振 1 回目の 3 サイクル目に対して 40% 近くまで激減したが、それ以降の変化は小さい。主梁方向、受梁方向ともに、最終サイクルまでに Q_d は 40% 程度まで低下した。図(b)より、主梁方向の K_d は全サイクルに渡り大きく変化していないが、受梁方向はわずかに K_d が低下していることがわかる。図(c)より、正弦波加振における Heq は 13~22% 程度であるのに対し、楕円加振の主梁方向の Heq は 5~15% と小さい。また、前述の通り、受梁方向の Heq は負となっており、2 方向加振における減衰定数の評価方法も含め、今後さらなる検討の必要がある。



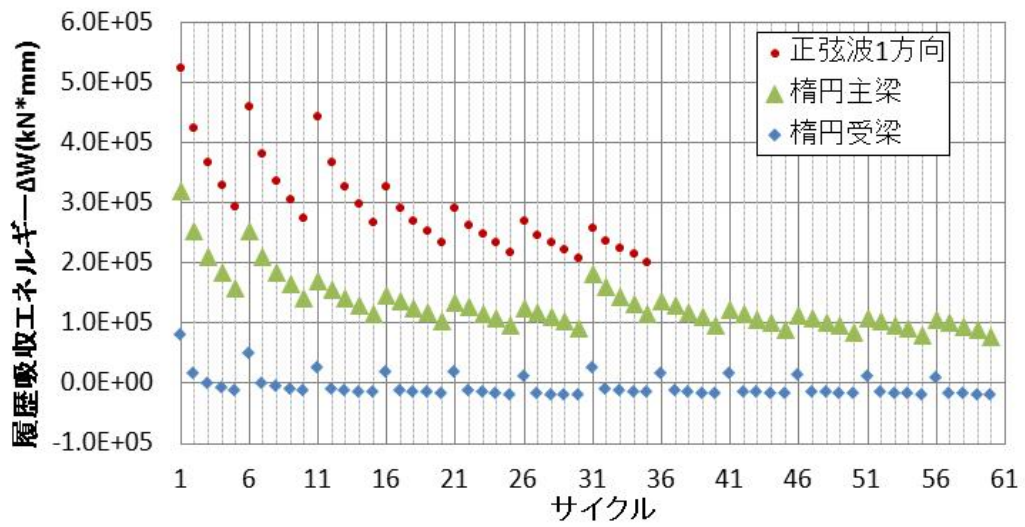
(a) 降伏荷重 Q_d



(b) 降伏後剛性 K_d



(c)等価減衰定数 Heq



(d)履歴吸収エネルギー ΔW

図 2.2.1-28 力学特性値の変化

(楕円加振、せん断ひずみ主梁：200%、受梁 100%)

図 2.2.1-29 に楕円加振における温度計測結果を示す。フランジ端部および被覆ゴム内部は温度上昇は見られないが、フランジ中央温度は加振開始直後に上昇し始め、加振終了も上昇し続けていることがわかる。楕円加振開始時のフランジ中央温度は 43.0℃で最高温度は 121.4℃であった（温度増分 78.4℃）。楕円加振全サイクルの累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$ は 7.4×10^6 (kN*mm)であり、これを鉛プラグ熱容量で除した値は 429.2℃となる。

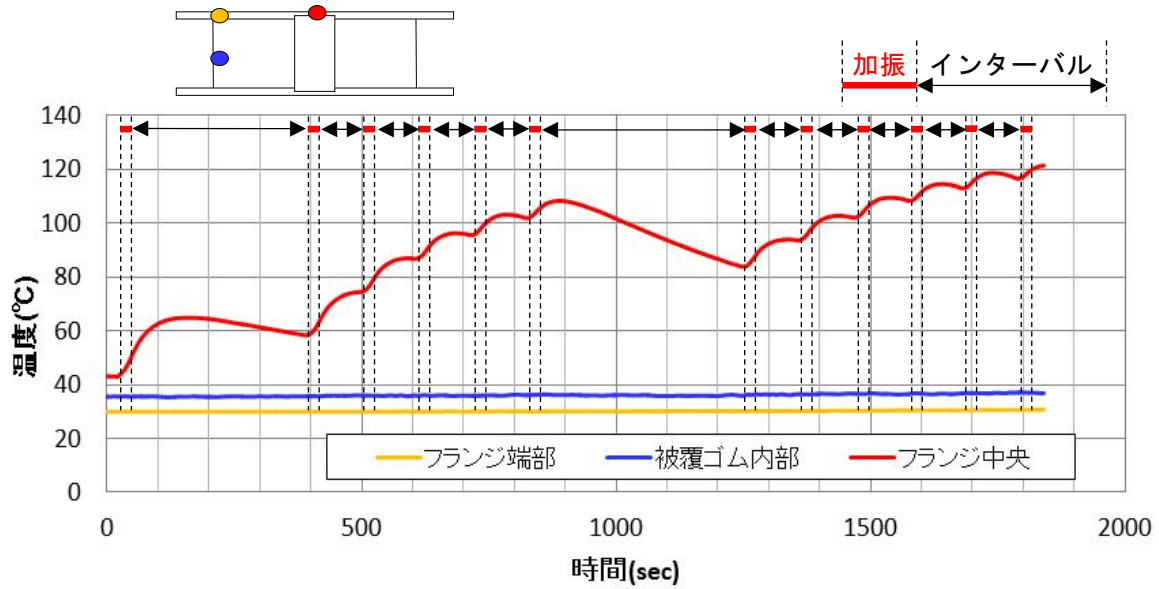
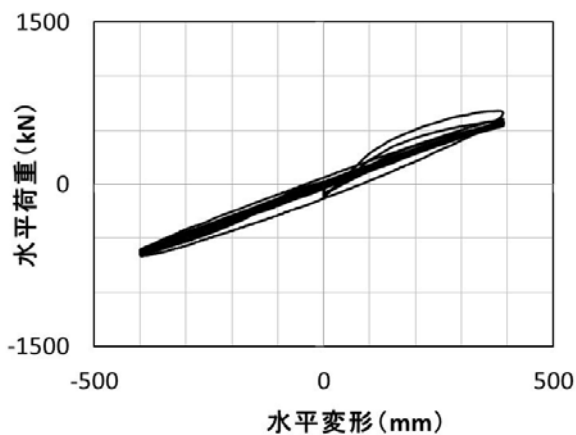


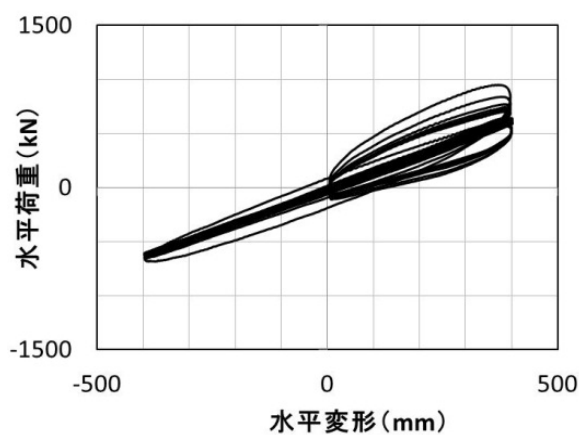
図 2.2.1-29 楕円加振における温度の推移

b) 真円加振

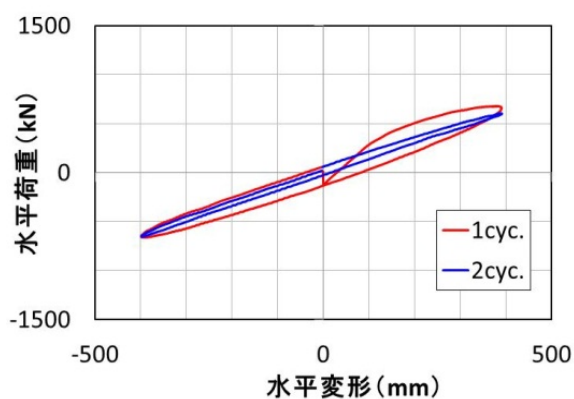
図 2.2.1-30 に真円加振の荷重変形関係を、図 2.2.1-31 に真円加振における加振サイクルと降伏荷重 Q_d 、降伏後剛性 K_d 、等価減衰定数 Heq 、履歴吸収エネルギー ΔW の関係を示す。真円加振では、主梁方向・受梁方向ともに履歴面積の殆どない荷重変形関係が得られた。また、 Q_d は他の加振ケースとは異なり、サイクルによる増減が大きい。サイクルによっては、前サイクルよりも Q_d が大きくなるケースが見られる。受梁方向の ΔW 、 Heq については、楕円加振と同様に負の値となる傾向が見られる。



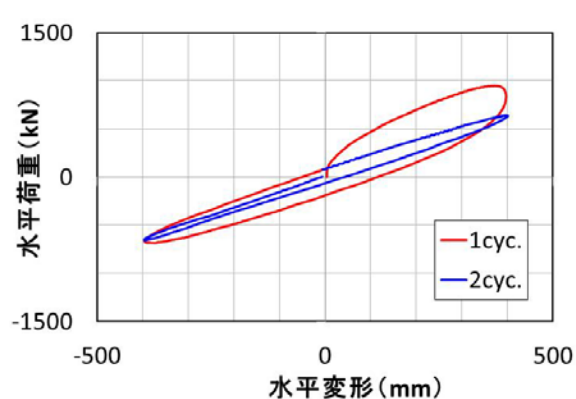
(a)主梁方向(全サイクル)



(b)受梁方向(全サイクル)

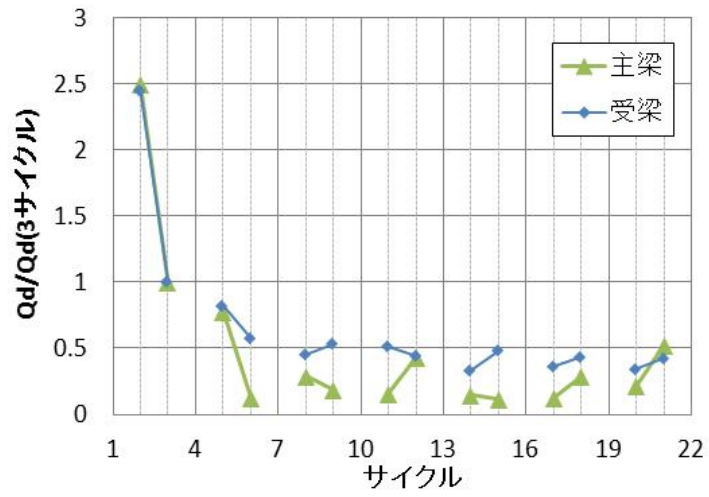


(c)主梁方向(1、2 サイクル)

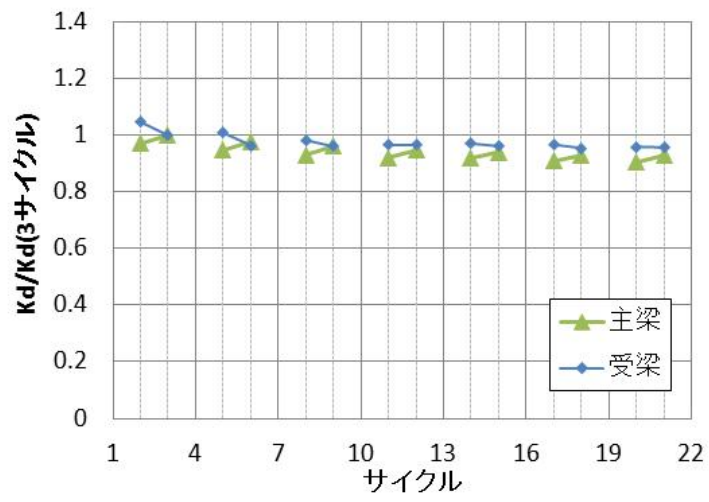


(d)受梁方向(1、2 サイクル)

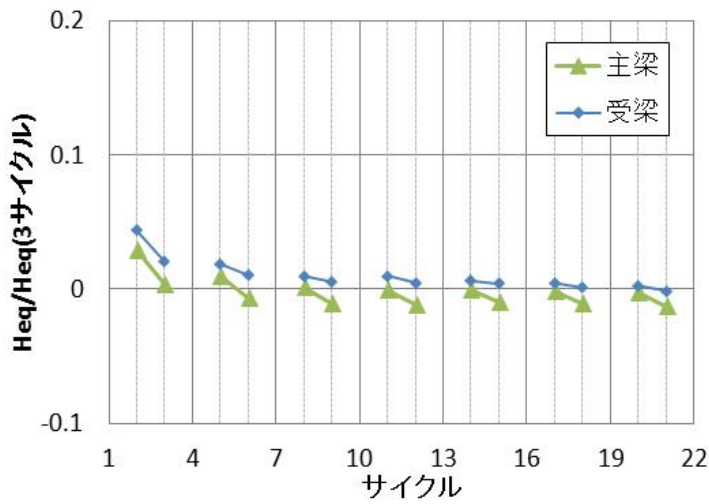
図 2.2.1-30 真円加振の荷重変形関係



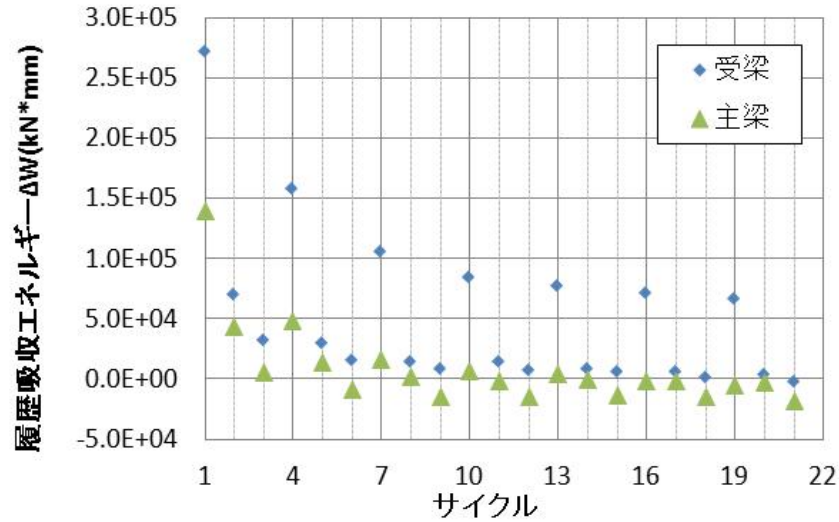
(a) 降伏荷重 Q_d



(b) 降伏後剛性 K_d



(c) 等価減衰定数 H_{eq}



(d)履歴吸収エネルギー ΔW

図 2.2.1-31 力学特性値の変化

(真円加振、せん断ひずみ主梁：200%、受梁 200%)

図 2.2.1-32 に真円加振における温度計測結果を示す。フランジ端部および被覆ゴム内部では温度は上昇していないが、フランジ中央温度は加振開始直後に上昇し始め、加振終了も上昇し続けていることがわかる。真円加振開始時のフランジ中央温度は 31.0℃で最高温度は 70.1℃であった（温度増分 39.1℃）。真円加振全サイクルの累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$ は 1.2×10^6 (kN*mm)であり、これを鉛プラグ熱容量で除した値は 71.5℃である。

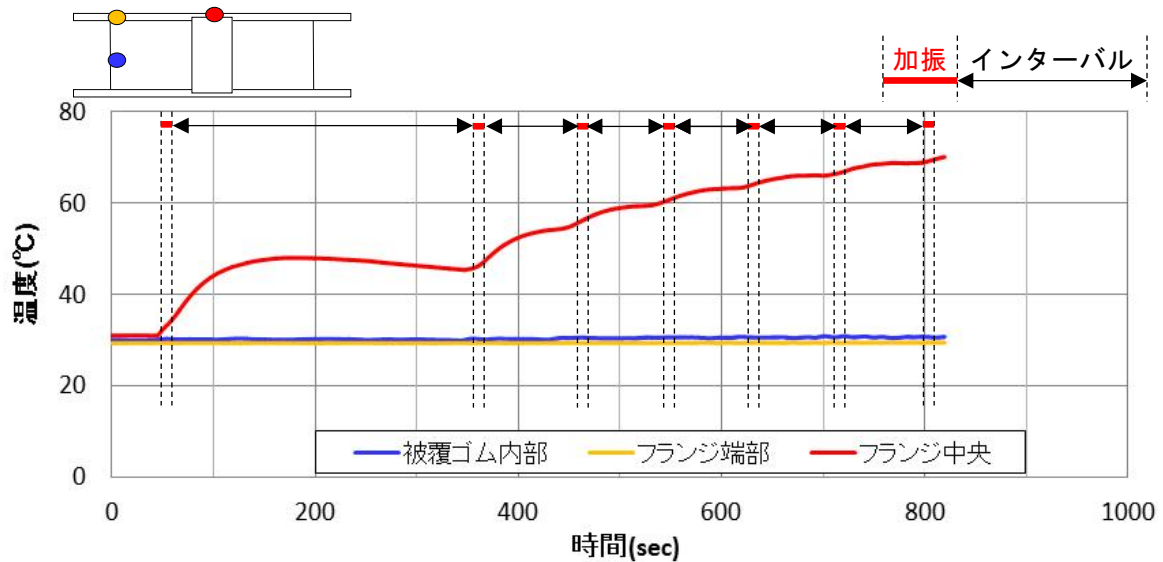


図 2.2.1-32 真円加振における温度の推移

7) 正弦波 1 方向大振幅加振

図 2.2.1-33 に荷重変形関係を、図 2.2.1-34 に鉛直沈み込み量を示す。また、写真 2.2.1-5～7 に、試験体の破断状況写真を示す。図 2.2.1-33 より、変形約 500mm (せん断ひずみ $\gamma =$ 約 250%) まで荷重-変形関係は概ね線形であるが、それ以降はハードニングが顕著になっている。鉛直方向の沈み込み量は、 $\gamma = 300\%$ で最大 1.3mm、 $\gamma = 350\%$ で 2.8mm、 $\gamma = 400\%$ で 4.7mm であった。

$\gamma = 300\%$ 、 350% では、試験体に異常は認められず、安定した履歴を描いている。 $\gamma = 400\%$ では、+400%を経験後、-399%で積層ゴムが破断した。破断時の水平荷重は 1614kN であった。なお、破断箇所は上から 4 層目のゴムである。

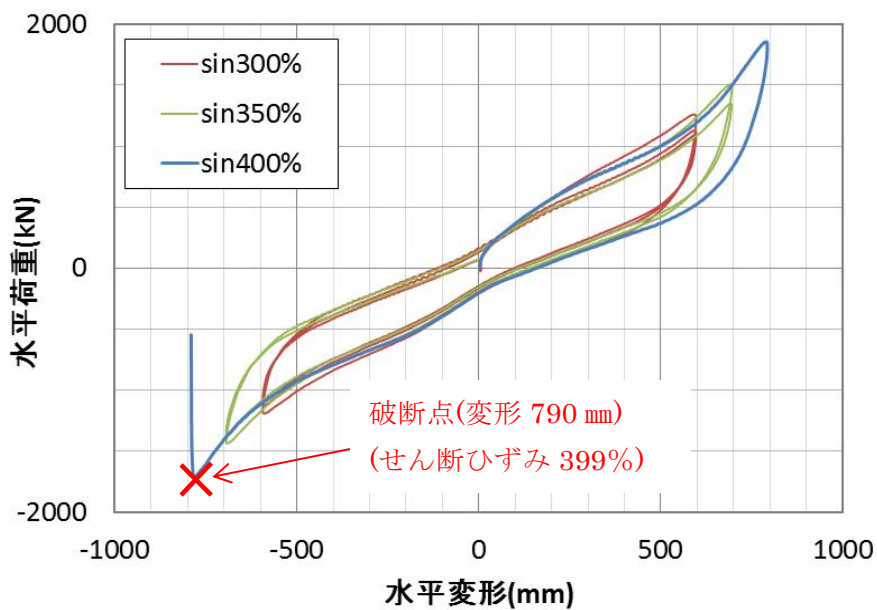


図 2.2.1-33 正弦波 1 方向大振幅加振の荷重－変形関係

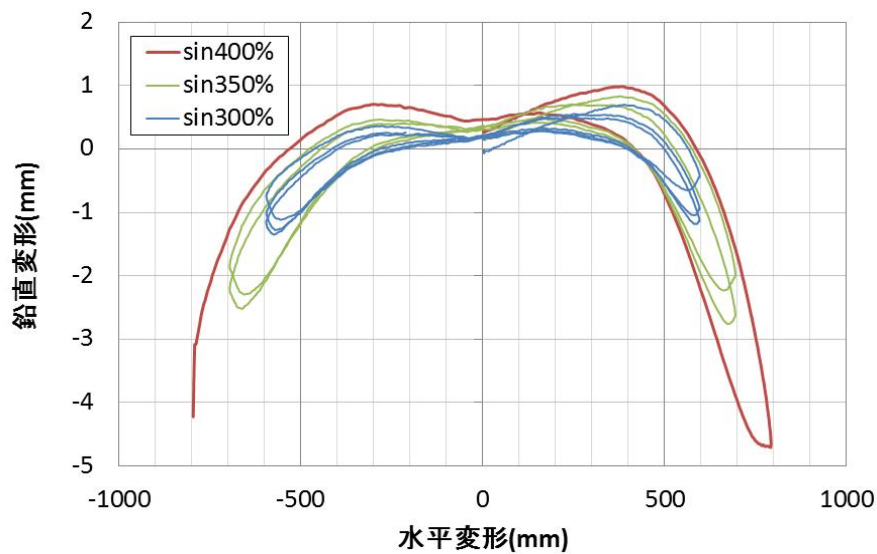


図 2.2.1-34 正弦波 1 方向大振幅加振における試験体の鉛直変形



写真 2.2.1-5 破断後の試験体（下側）



写真 2.2.1-6 破断後の試験体（上側）



写真 2.2.1-7 飛散した鋼板と鉛プラグ

(6) 実験結果のシミュレーション解析

1) 検討内容

熱伝導および温度変化に伴う力学的特性変化を考慮した手法^{2.2.1-1)}により、実験結果についてのシミュレーション解析を実施する。

2) 解析手法

シミュレーション解析手法は、実験時の水平変位を与えることにより修正バイリニアモデルに基づく荷重変形関係を求め、履歴吸収エネルギーが鉛部分の熱エネルギーに変換されるとし、熱伝導解析により得られた鉛温度と設定した鉛温度～降伏荷重関係に基づき降伏荷重を時々刻々修正しているものである。

鉛プラグ入り積層ゴム（以下 LRB）における熱伝導解析差分法モデルは、前進差分法による LRB を要素分割した差分法モデルとする。履歴吸収エネルギーはすべて鉛プラグでの発熱となると仮定し、モデル化範囲には断熱材および取り付け部も含めることによって、鉛プラグから積層ゴム、フランジ等への熱エネルギー拡散を考慮する。

鉛温度-降伏荷重関係は、式(2.2.1-4)の提案式に基づくものとする。本式は、鉛プラグが約 200°C まで上昇した実験ケースを含む鉛プラグ入り積層ゴム加振実験結果の分析により得られた実験式である¹⁾。

$$\tau = \tau_0 \left\{ 1 - (T/T_L)^{\alpha_T} \right\}, \quad \alpha_T = 0.4 + 0.25 \cdot (T/T_L) \quad (2.2.1-4)$$
$$\tau_0 = 15.0 (\text{N/mm}^2), \quad T_L = 327.5 (\text{°C})$$

ここに、 τ : 鉛降伏応力、 τ_0 : 0°Cでの鉛降伏応力
 T : 鉛プラグ平均温度、 T_L : 鉛融点

なお、2方向加力に対するシミュレーションでは、積層ゴムの解析モデルを MSS モデルとして評価を行なう。

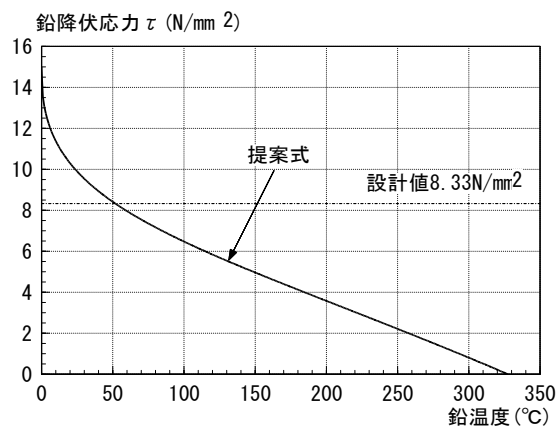


図 2.2.1-35 鉛温度～降伏荷重関係

3) 解析条件

実験結果のシミュレーションのうち熱伝導解析においては、LRBの軸対称性および上下対称性を考慮し、鉛プラグ部分6要素(①,②,⑧,⑨,⑮,⑯)、積層ゴム部分10要素(③~⑦,⑩~⑭)、取り付け鋼板部分6要素(A~F)、断熱材部分4要素(C'~F')、取り付けブロック部分4要素(C''~F'')の計30の要素に分割したモデルを対象とする。図2.2.1-36に要素分割図を示す。解析で用いた熱伝導・比熱などの諸定数を表2.2.1-7に示す。なお、断熱材部分についてはコンクリートの値を仮定した。

表 2.2.1-7 各材料の諸定数

	熱伝導率 W/cm°C	比熱 J/g°C	比重 g/cm ³
鉛	3.52×10^{-1}	0.126	11.34
ゴム	1.30×10^{-3}	1.500	1.10
鉄	6.05×10^{-1}	0.435	7.85
断熱材	1.00×10^{-2}	0.880	2.30

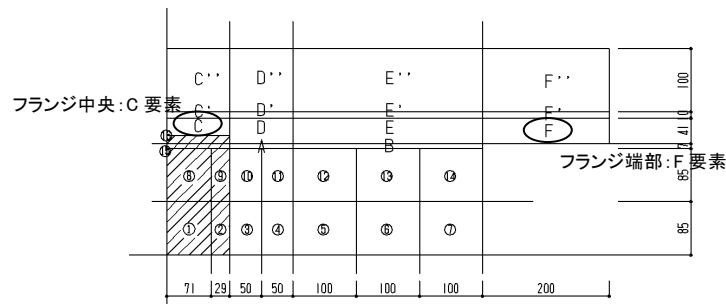


図 2.2.1-36 鉛プラグ入り積層ゴム要素分割

解析開始時の初期温度については、実験結果の荷重変形関係から得られる履歴エネルギーを直接入力し、冷却時間などインターバルを適宜考慮した熱伝導解析結果に基づき設定している。解析の時間刻みは0.05秒とする。表2.2.1-8に各ケースの初期温度設定値を示す。

表 2.2.1-8 初期温度設置値 (°C)

CASE	鉛部	ゴム部	鉛直上の フランジ部	その他 (取付鋼板など)
正弦波1方向	30	30	30	25
地震応答波1方向	40	40	33.5	27.5
地震応答波2方向	60	45	45	27.5
楕円	63	53	46	30
真円	30	30	30	30

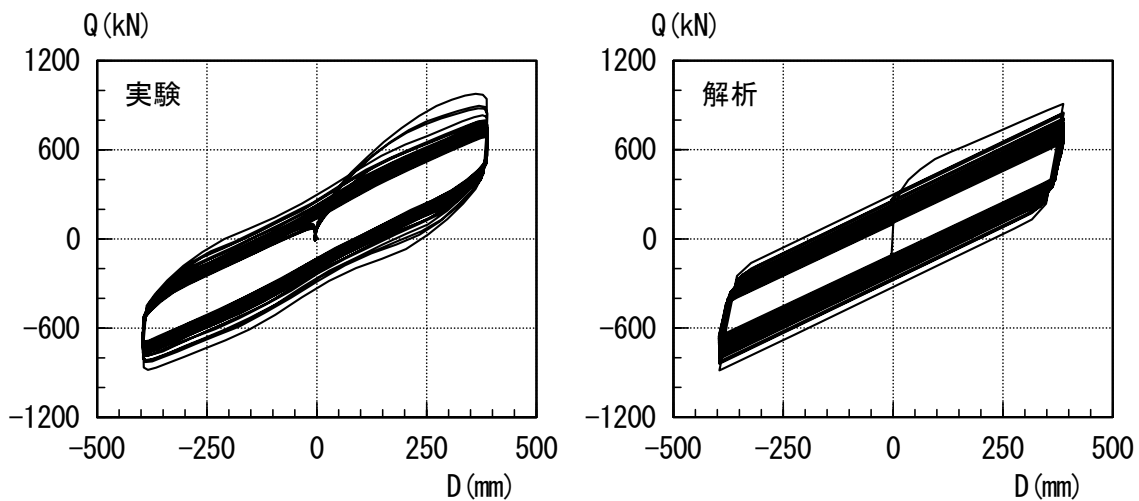
4) 解析結果

図 2.2.1-37～図 2.2.1-49 に各実験ケースに対するシミュレーション結果を示す。各図について、i)～vi)は荷重変形関係、a)は各部温度時刻歴、b)は履歴吸収エネルギー時刻歴、c,d)は降伏荷重時刻歴である。

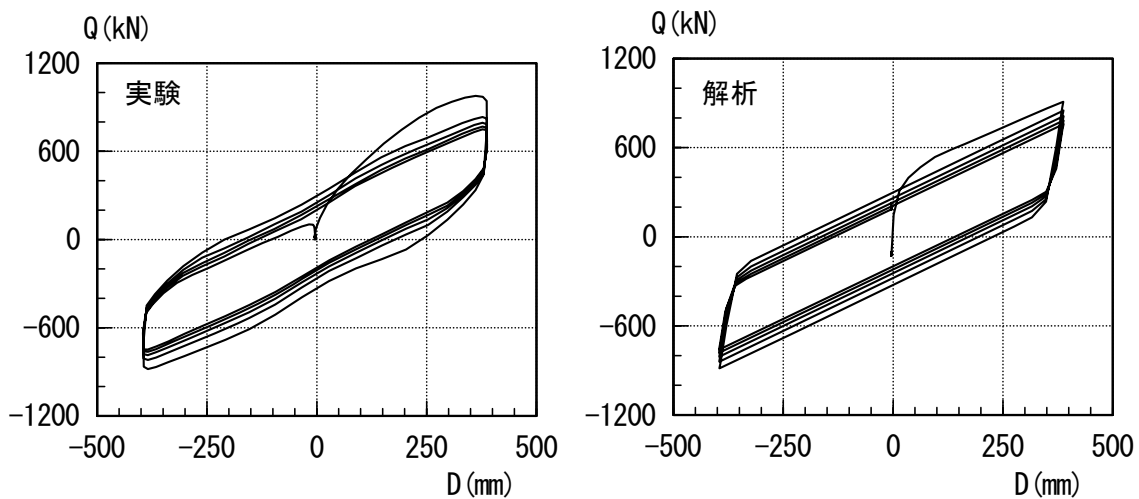
正弦波 1 方向加振、地震波 1 方向加振、地震波 2 方向加振のケースについては、温度や履歴エネルギー、降伏荷重と、概ね実験結果をシミュレートできている。

正弦波 2 方向加振（楕円、真円）のケースについては、履歴エネルギーの大幅な減少や負の履歴エネルギーの発生などの実験結果に対して、対応する解析結果は得られない結果となった。

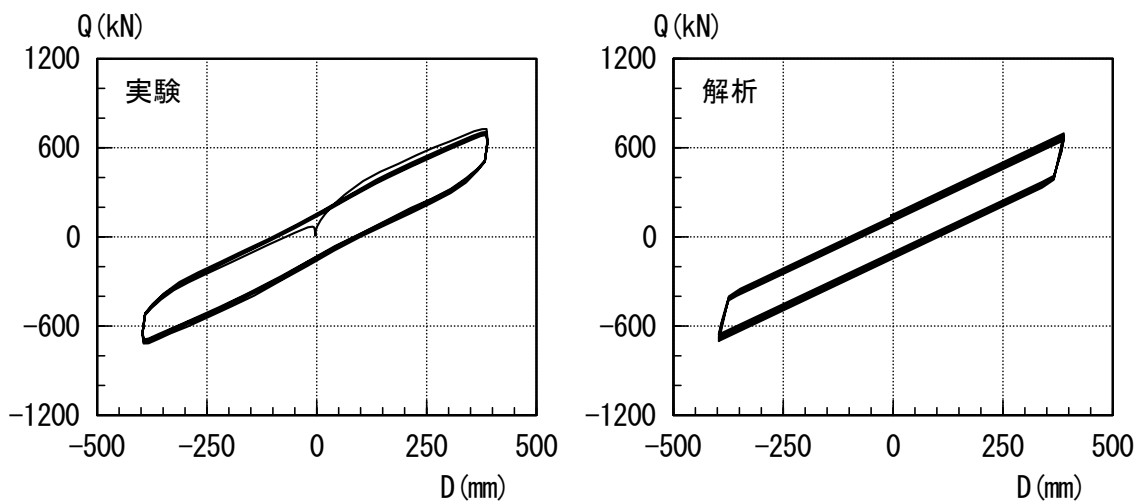
a) 正弦波 1 方向加振



i) 加振全体

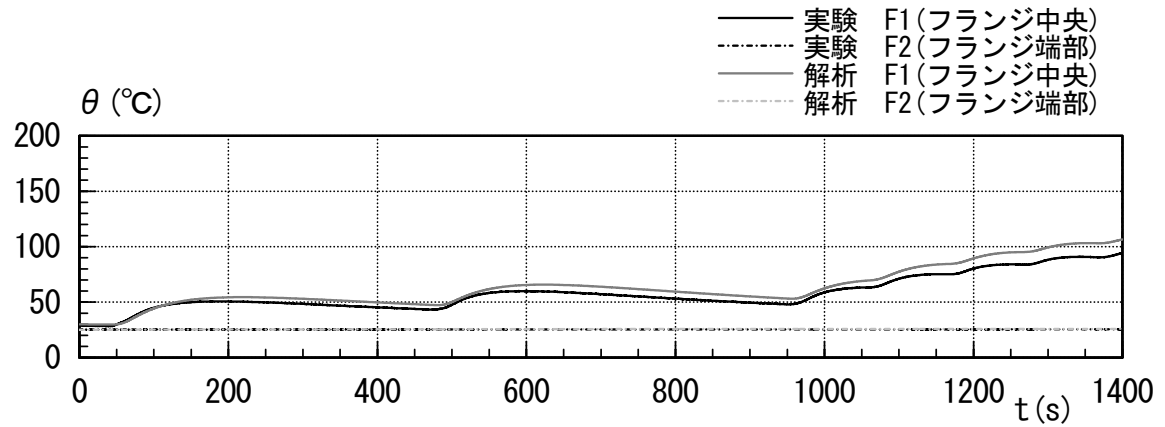


ii) 加振 1 回目

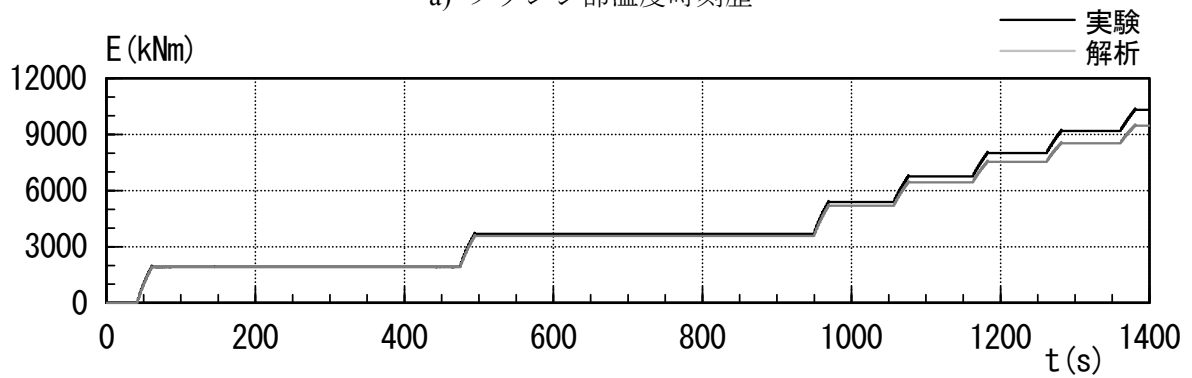


iii) 加振 7 回目

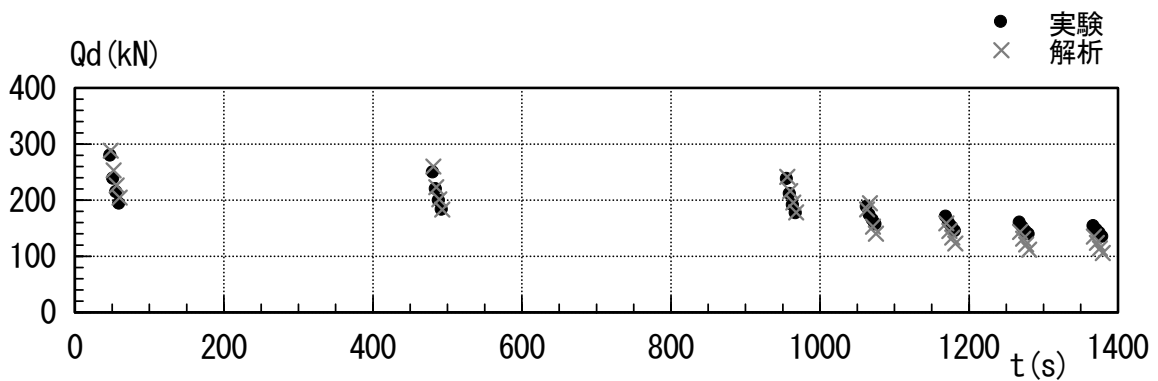
図 2.2.1-37 【正弦波 1 方向加振】 実験・解析の比較 (荷重変形関係)



a) フランジ部温度時刻歴



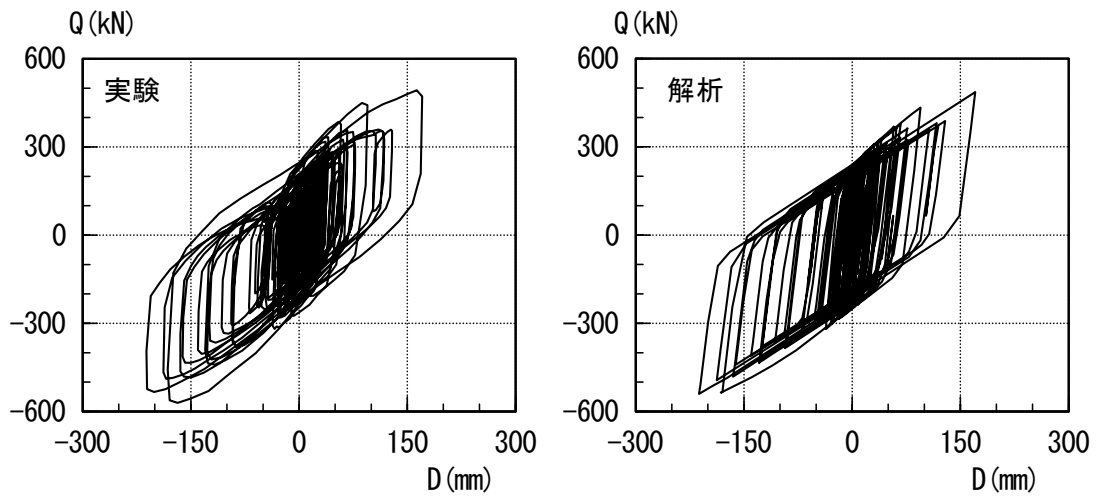
b) 履歴吸収エネルギー時刻歴



c) 降伏荷重時刻歴

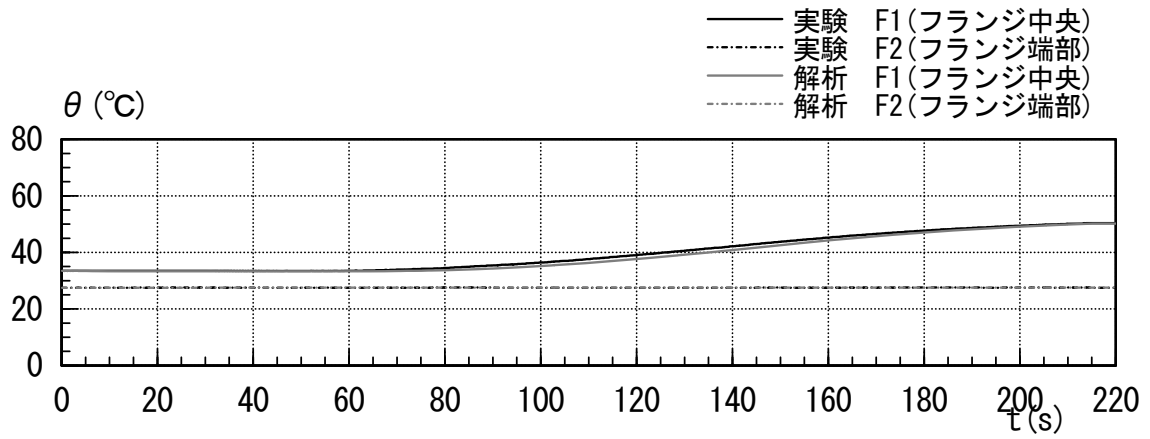
図 2.2.1-38 【正弦波 1 方向加振】 実験・解析の比較
 (フランジ部温度、履歴吸収エネルギー、降伏荷重)

b) 地震応答波 1 方向加振

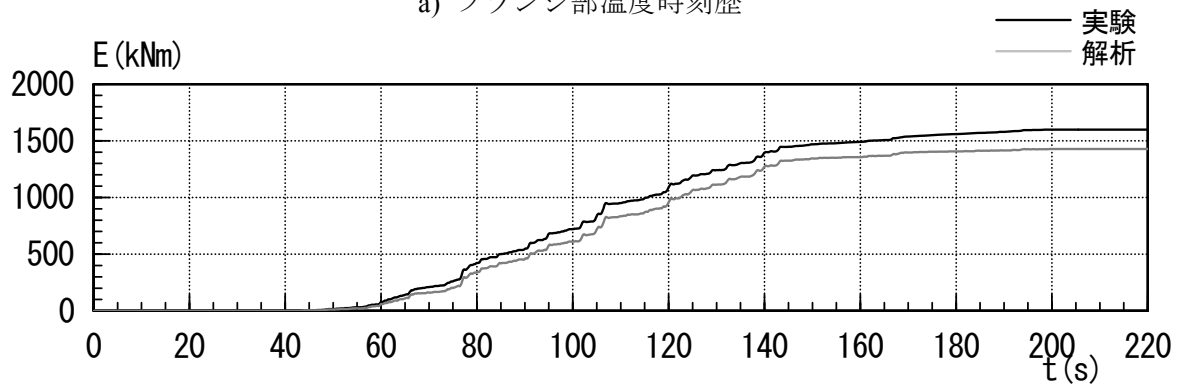


i) 加振全体

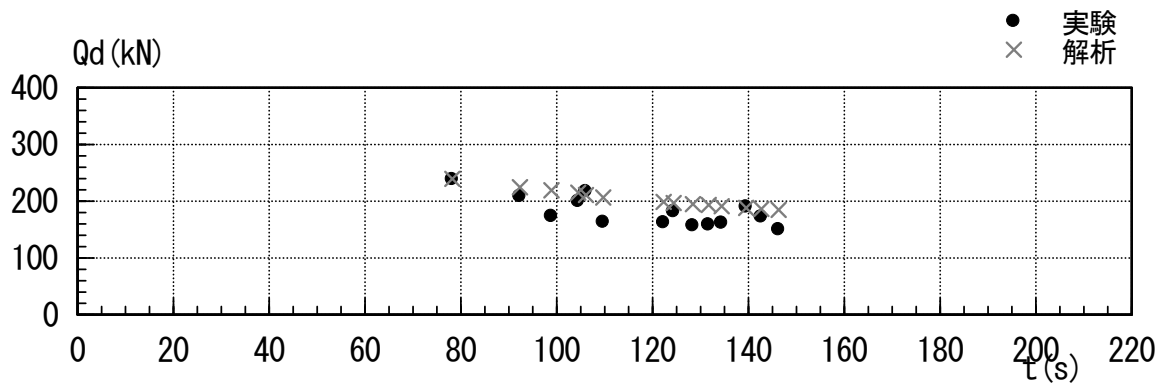
図 2.2.1-39 【地震応答波 1 方向加振】 実験・解析の比較 (荷重変形関係)



a) フランジ部温度時刻歴



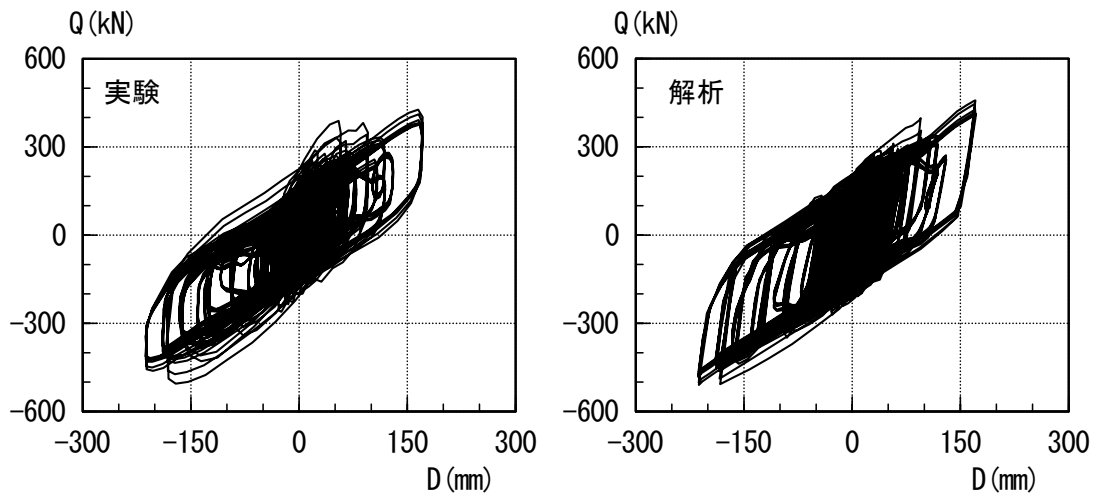
b) 履歴吸収エネルギー時刻歴



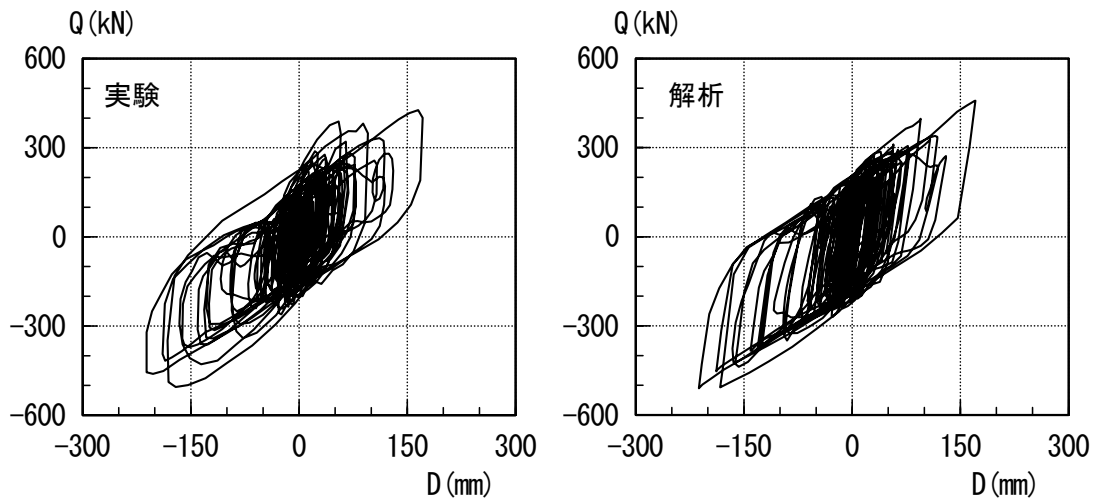
c) 降伏荷重時刻歴

図 2.2.1-40 【地震応答波 1 方向加振】 実験・解析の比較
 (フランジ部温度、履歴吸収エネルギー、降伏荷重)

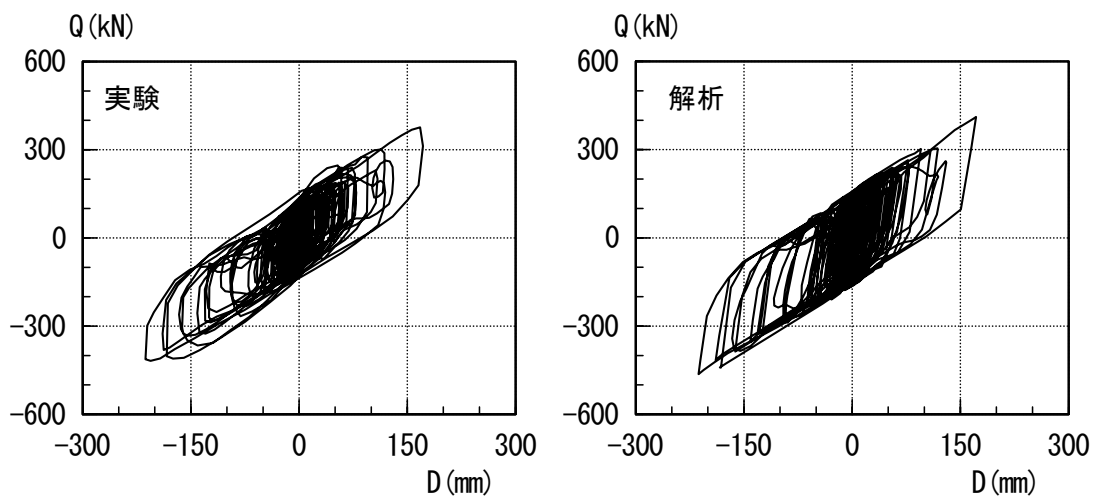
c) 地震応答波 2 方向加振



i) 加振全体

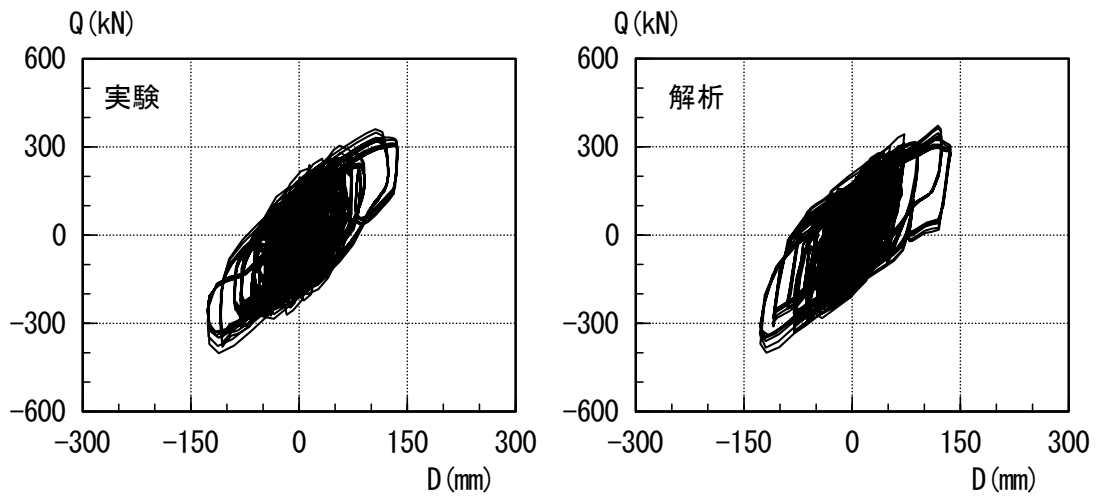


ii) 加振 1 回目

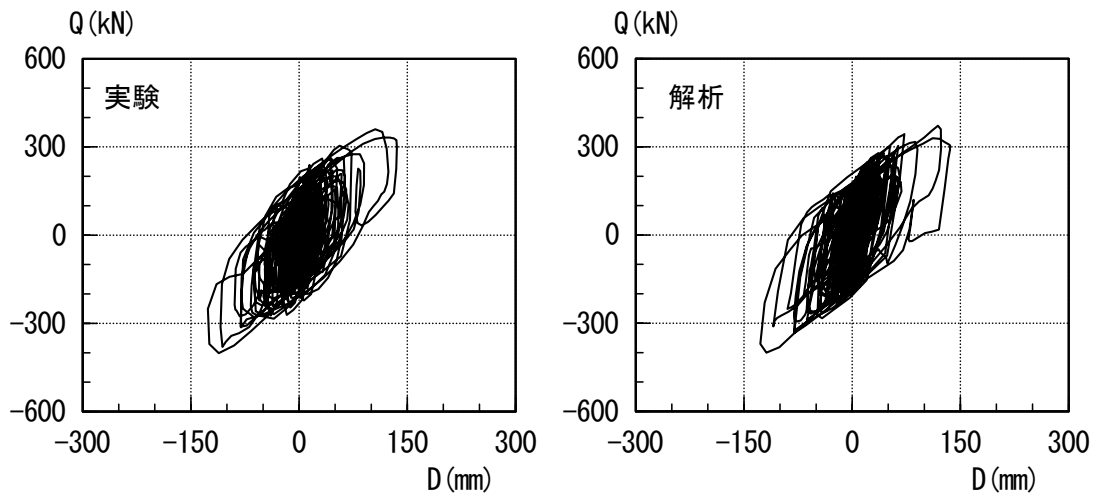


iii) 加振 12 回目

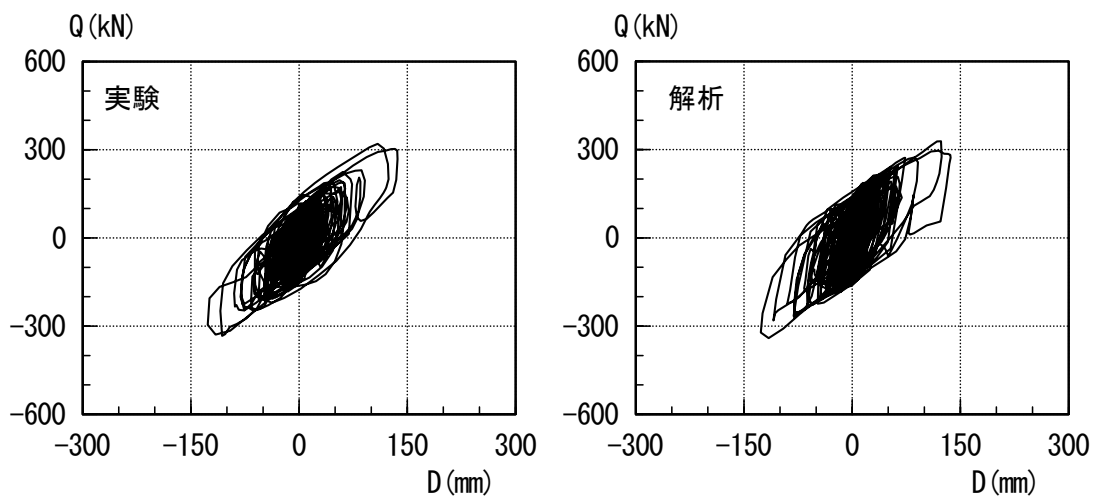
図 2.2.1-41 【地震応答波 2 方向加振】 実験・解析の比較 (主梁方向 荷重変形関係)



iv) 加振全体

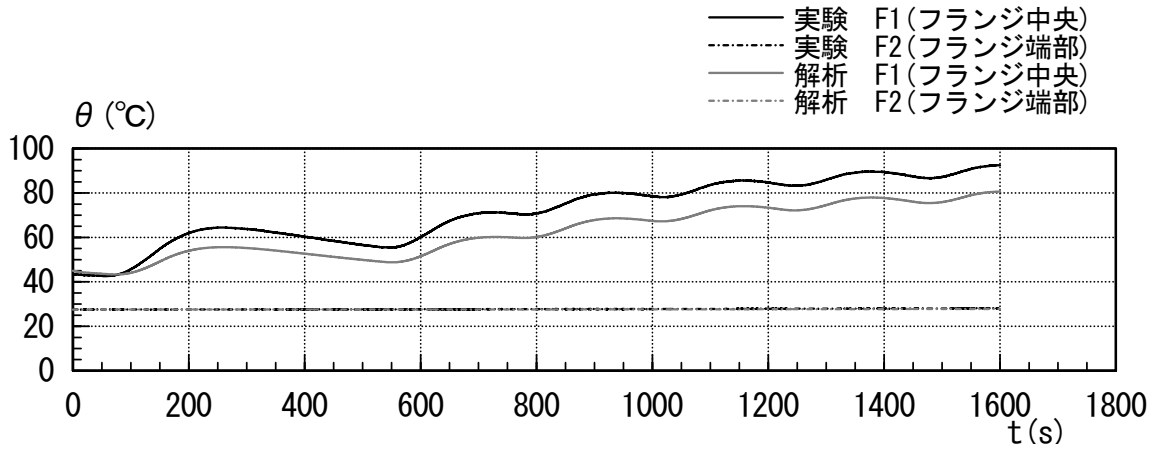


v) 加振1回目

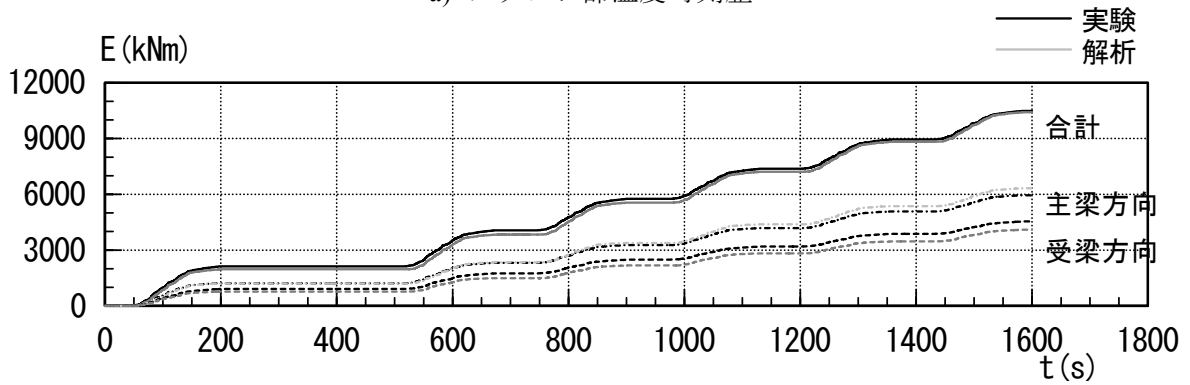


vi) 加振6回目

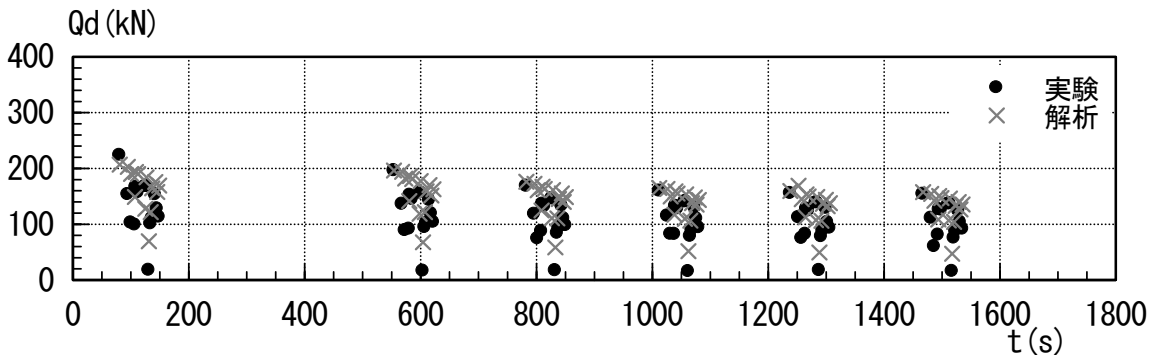
図 2.2.1-42 【地震応答波 2 方向加振】 実験・解析の比較 (受梁方向 荷重変形関係)



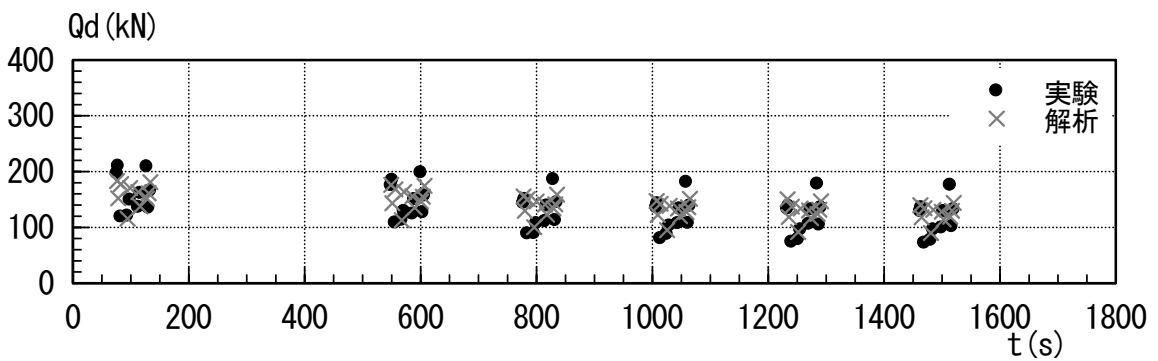
a) フランジ部温度時刻歴



b) 履歴吸収エネルギー時刻歴



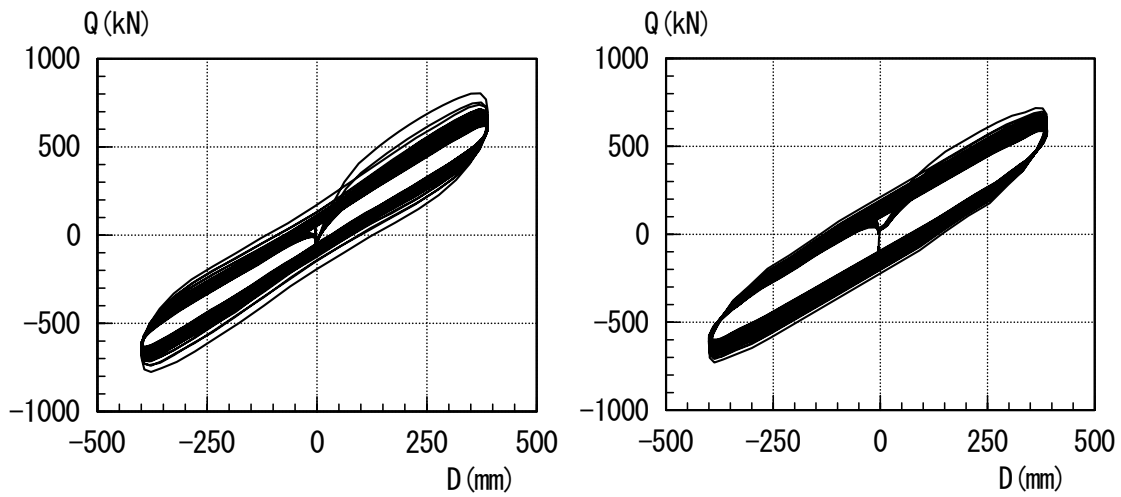
c) 降伏荷重時刻歴 (主梁方向)



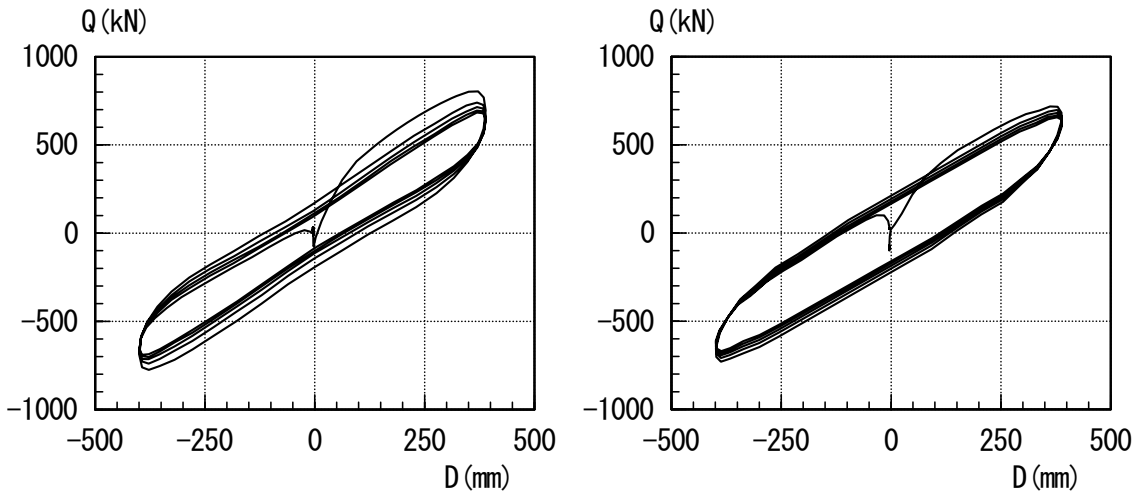
d) 降伏荷重時刻歴 (受梁方向)

図 2.2.1-43 【地震応答波 2 方向加振】 実験・解析の比較
(フランジ部温度、履歴吸収エネルギー、降伏荷重)

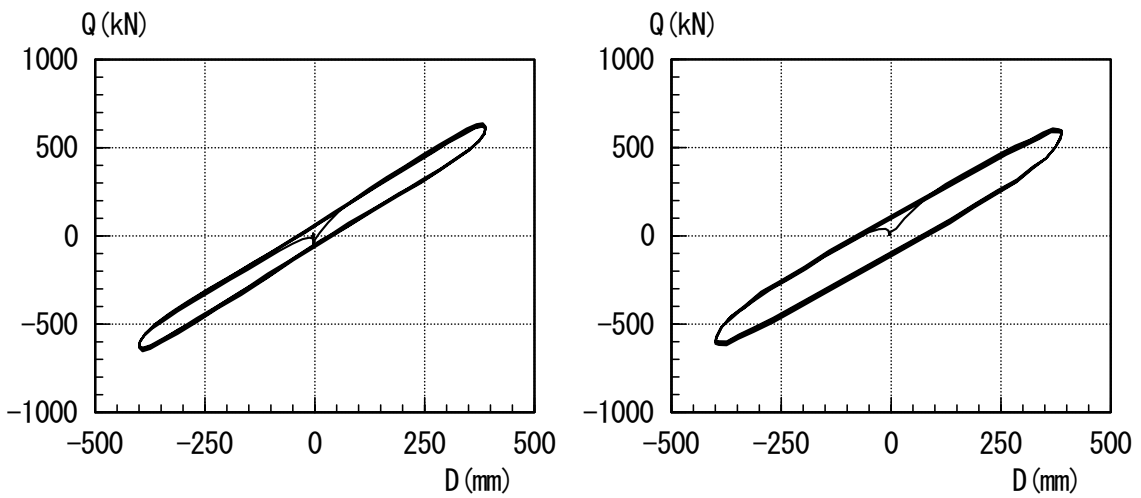
d) 楕円加振



i) 加振全体

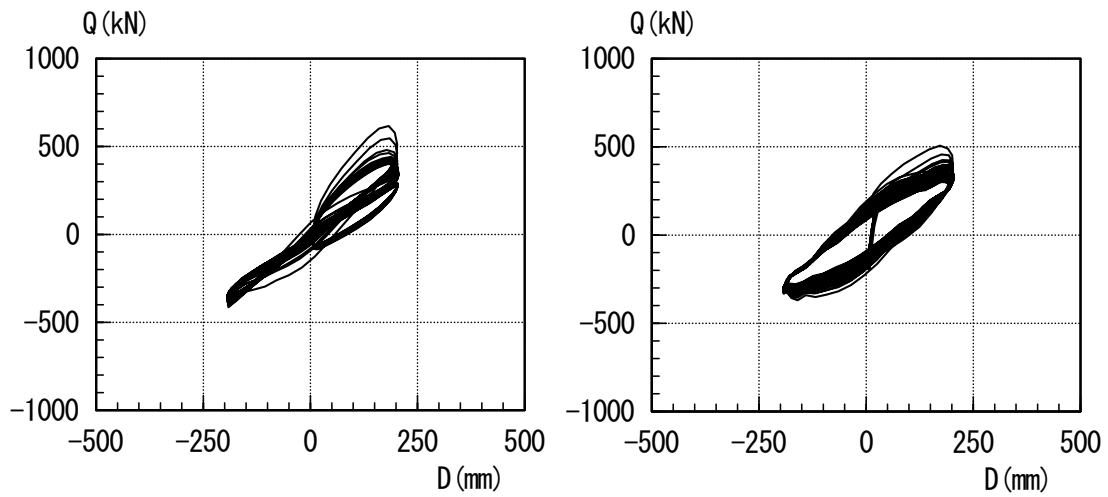


ii) 加振 1 回目

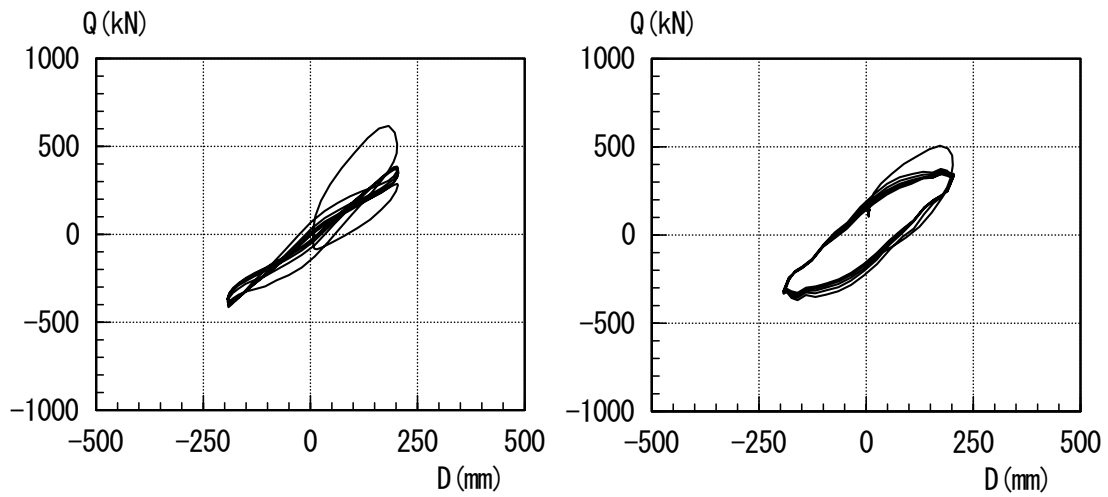


iii) 加振 12 回目

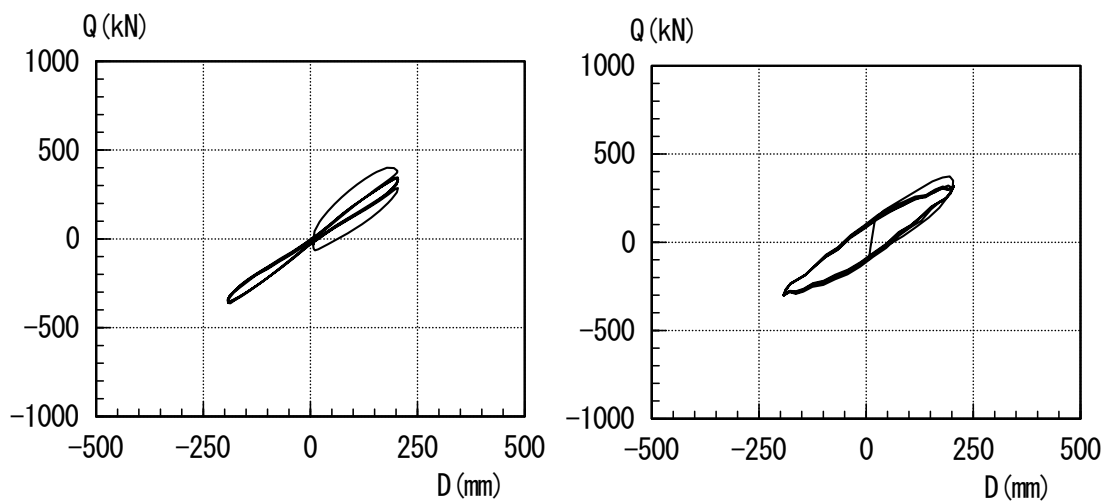
図 2.2.1-44 【楕円加振】実験・解析の比較 (主梁方向 荷重変形関係)



iv) 加振全体

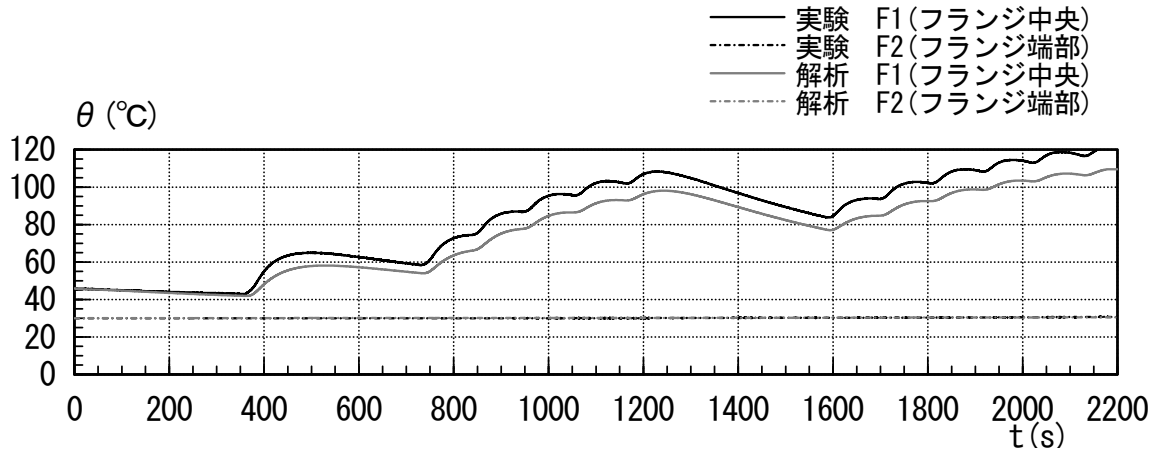


v) 加振 1 回目

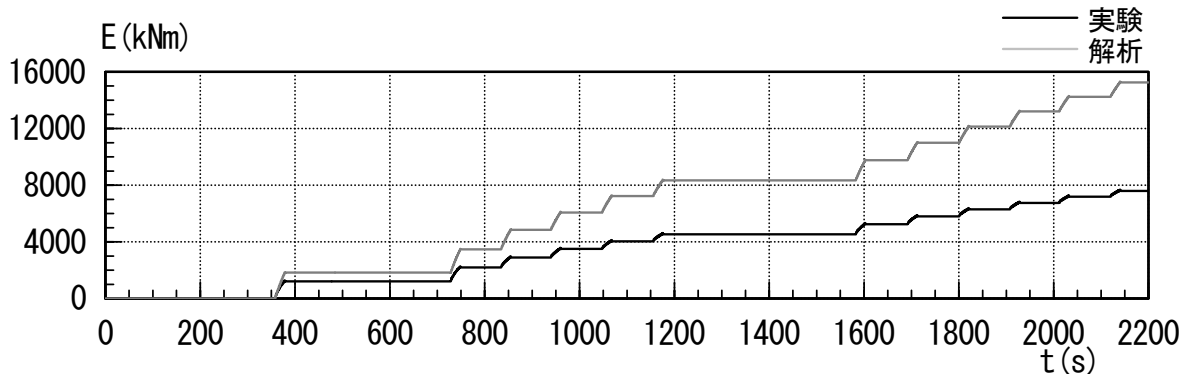


vi) 加振 12 回目

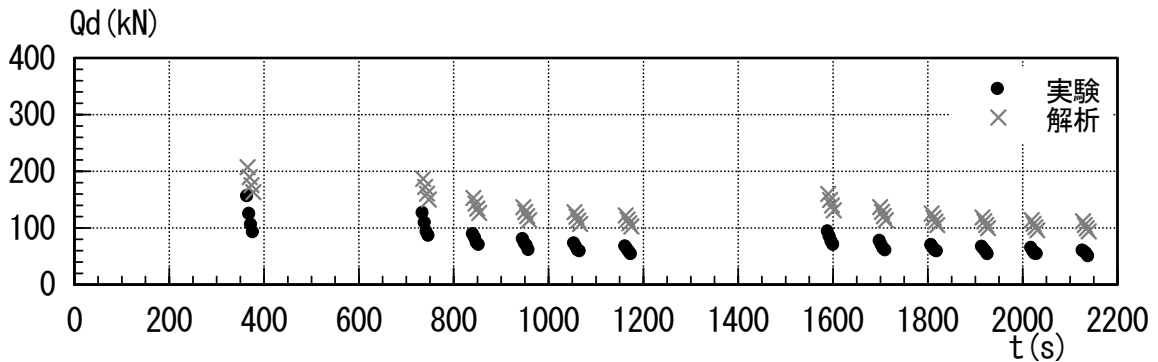
図 2.2.1-45 【楕円加振】実験・解析の比較（受梁方向 荷重変形関係）



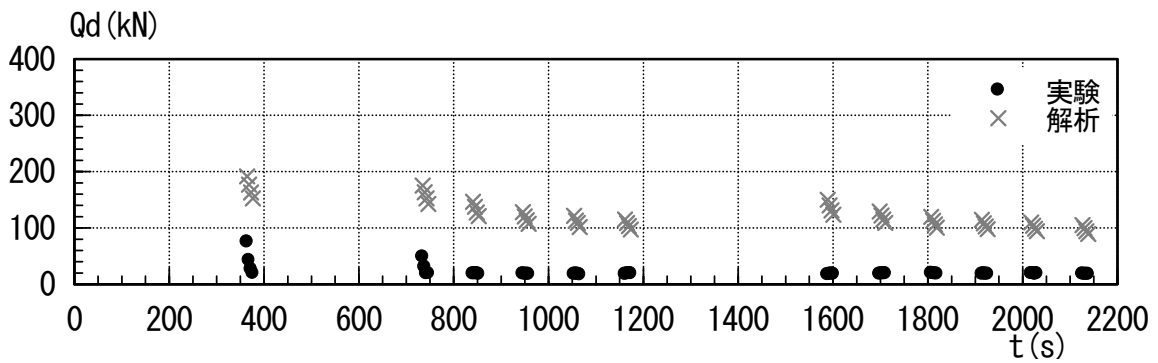
a) フランジ部温度時刻歴



b) 履歴吸収エネルギー時刻歴



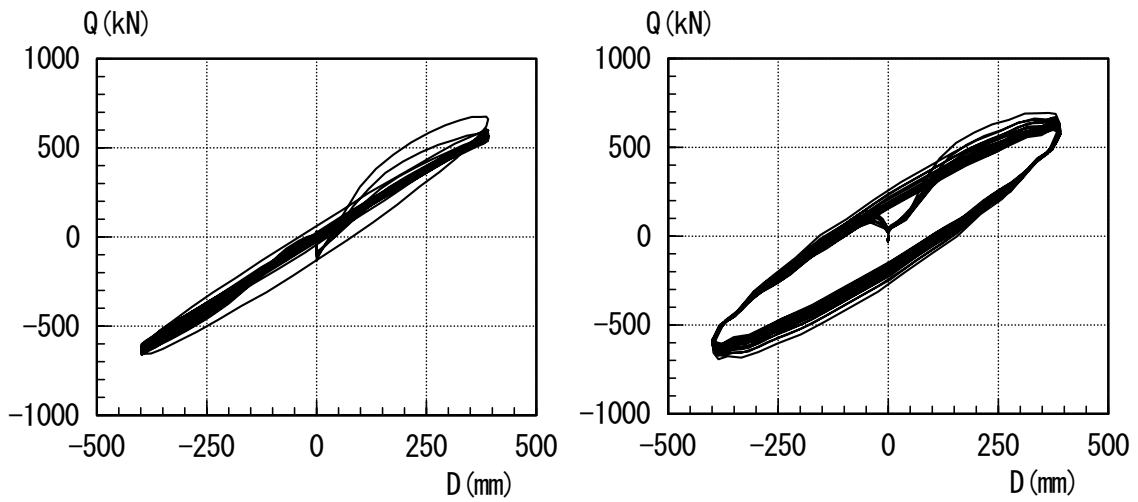
c) 降伏荷重時刻歴 (主梁方向)



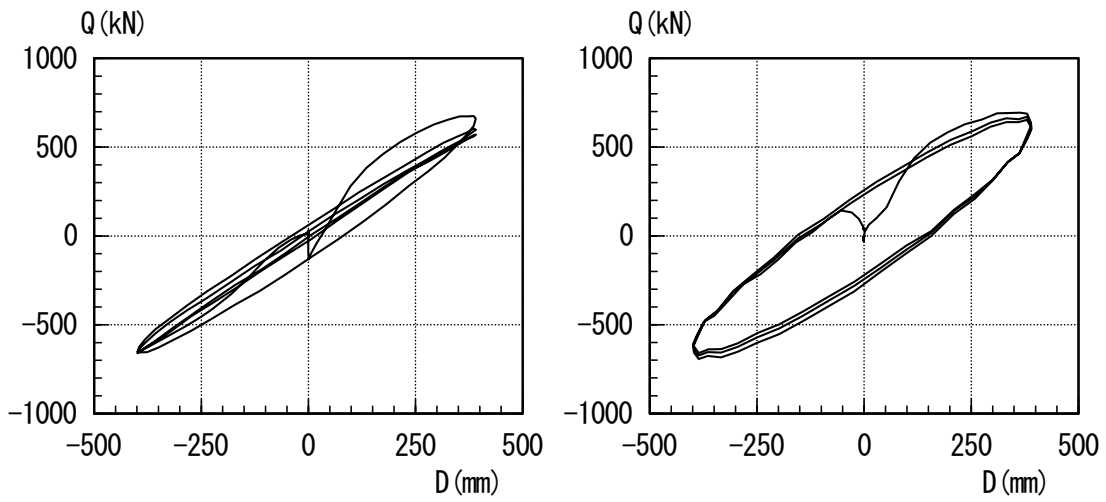
d) 降伏荷重時刻歴 (受梁方向)

図 2.2.1-46 【楕円加振】実験・解析の比較
(フランジ部温度、履歴吸収エネルギー、降伏荷重)

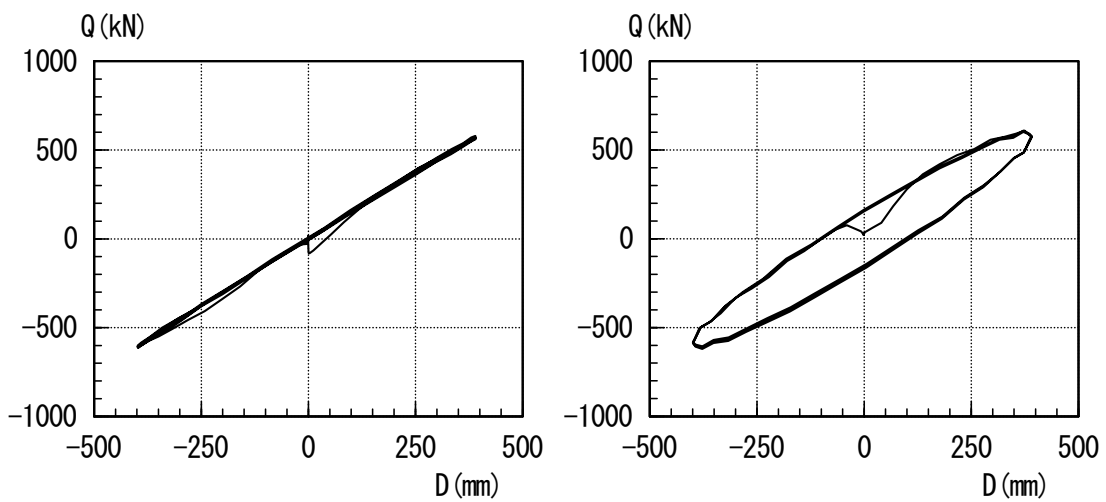
e) 真円加振



i) 加振全体

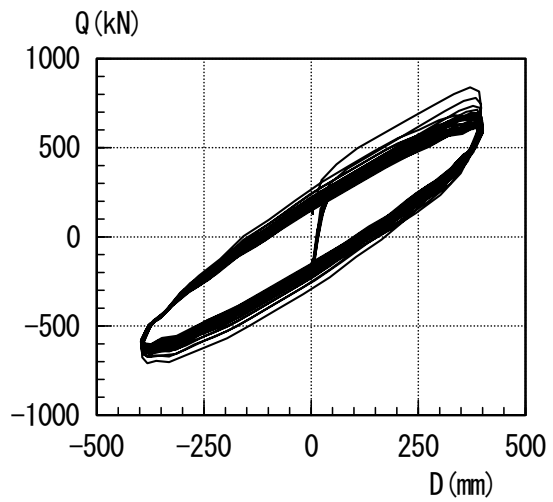
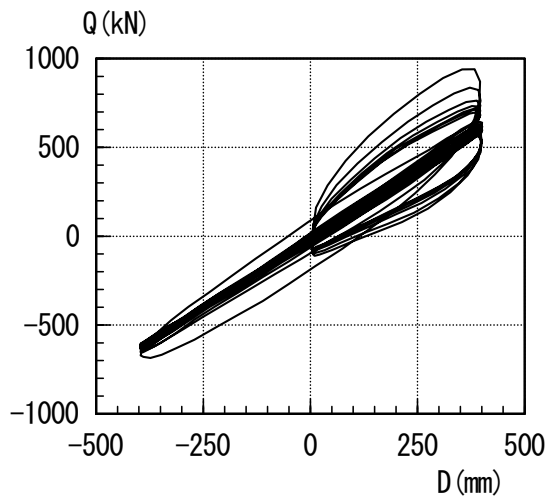


ii) 加振 1 回目

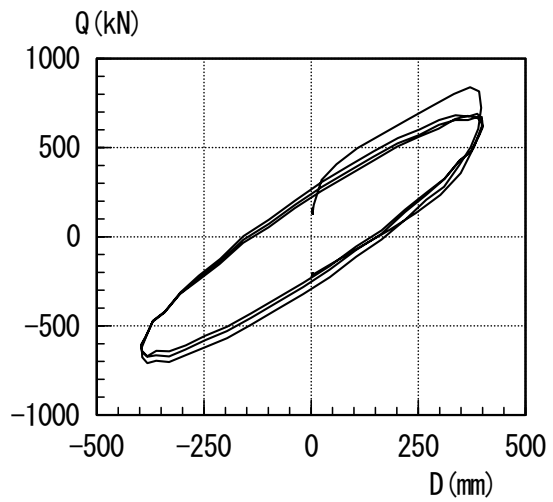
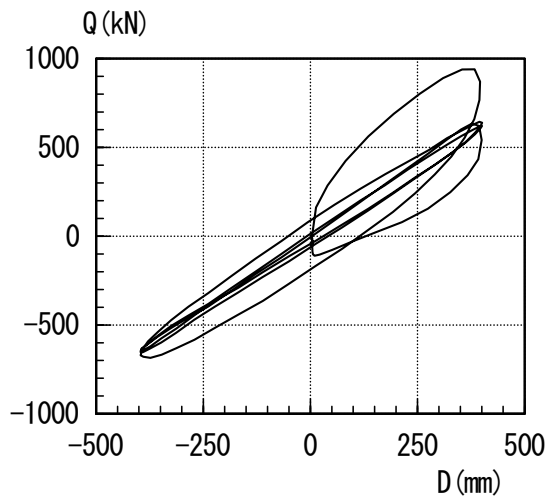


iii) 加振 7 回目

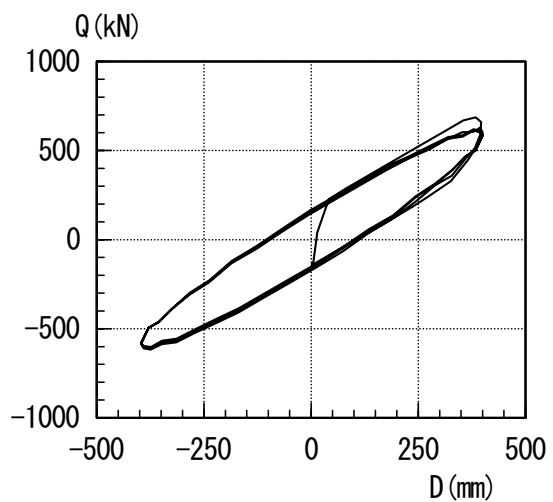
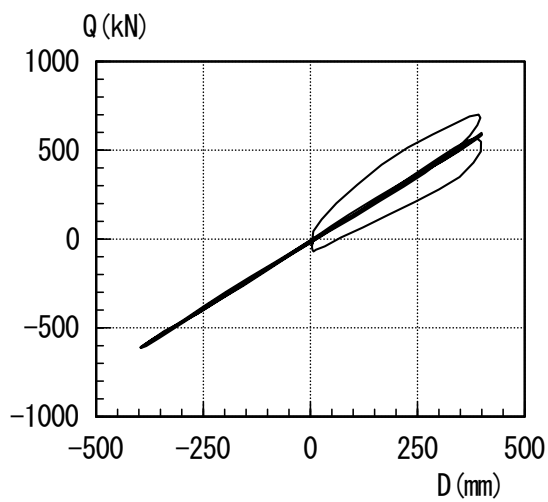
図 2.2.1-47 【真円加振】実験・解析の比較（主梁方向 荷重変形関係）



iv) 加振全体

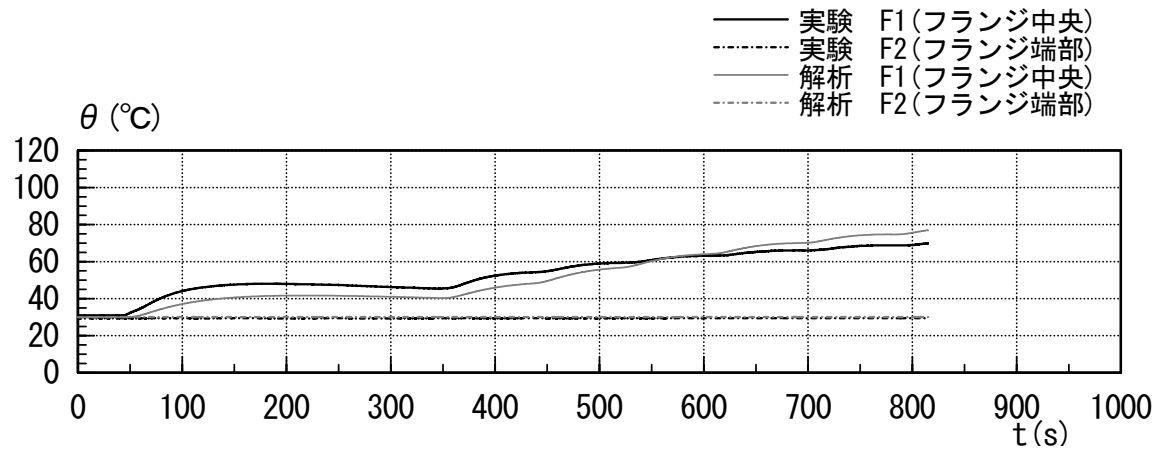


v) 加振 1 回目

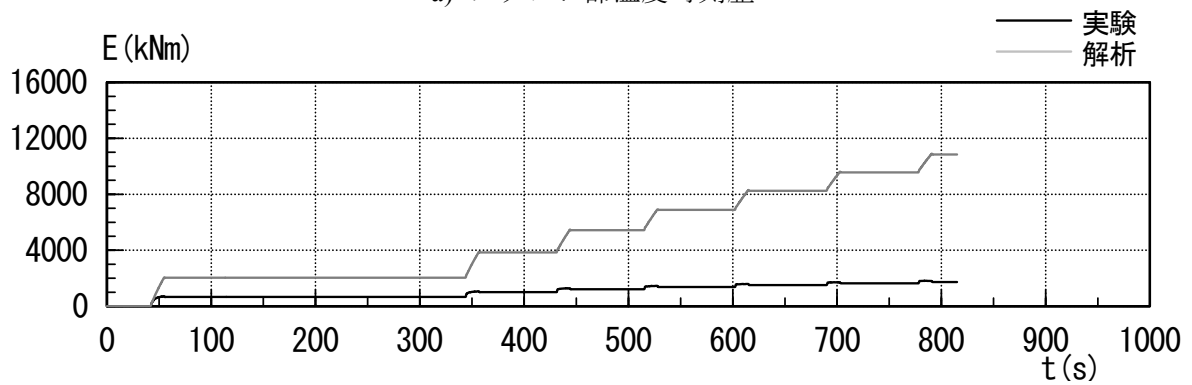


vi) 加振 7 回目

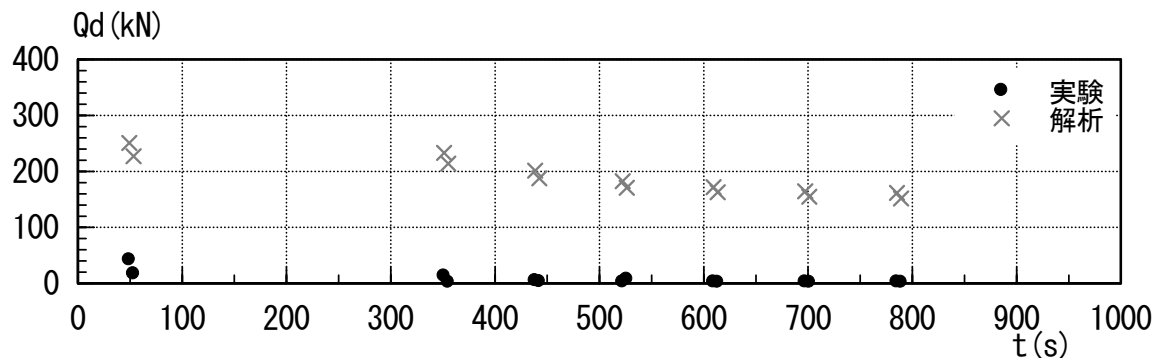
図 2.2.1-48 【真円加振】実験・解析の比較（受梁方向 荷重変形関係）



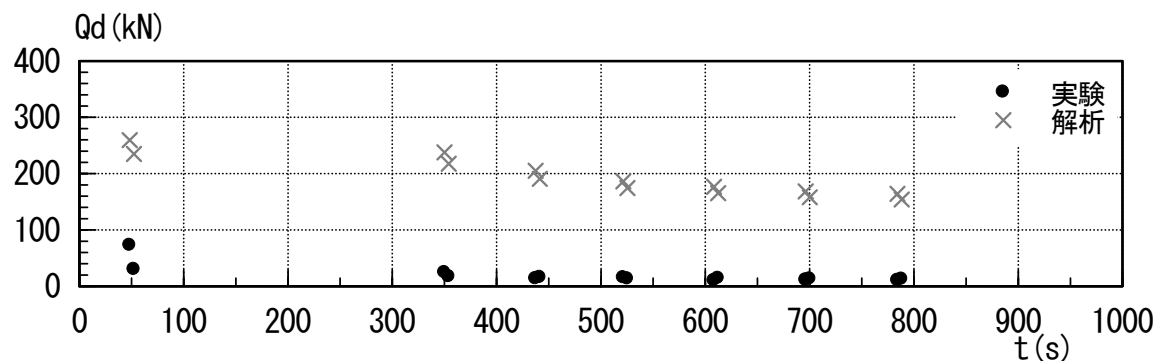
a) フランジ部温度時刻歴



b) 履歴吸収エネルギー時刻歴



c) 降伏荷重時刻歴 (受梁方向)



d) 降伏荷重時刻歴 (受梁方向)

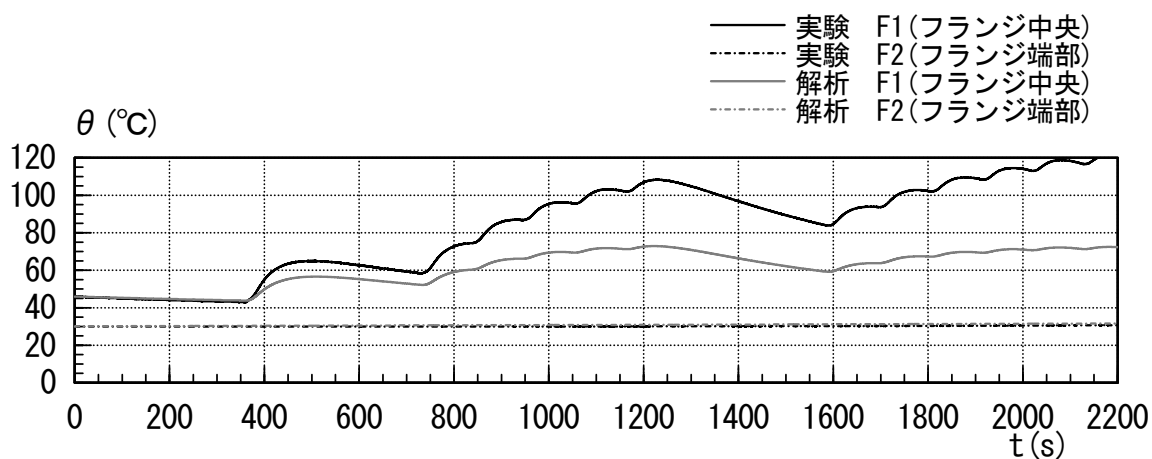
図 2.2.1-49 【真円加振】 実験・解析の比較
 (フランジ部温度、履歴吸収エネルギー、降伏荷重)

5) 正弦波 2 方向加振における分析と考察

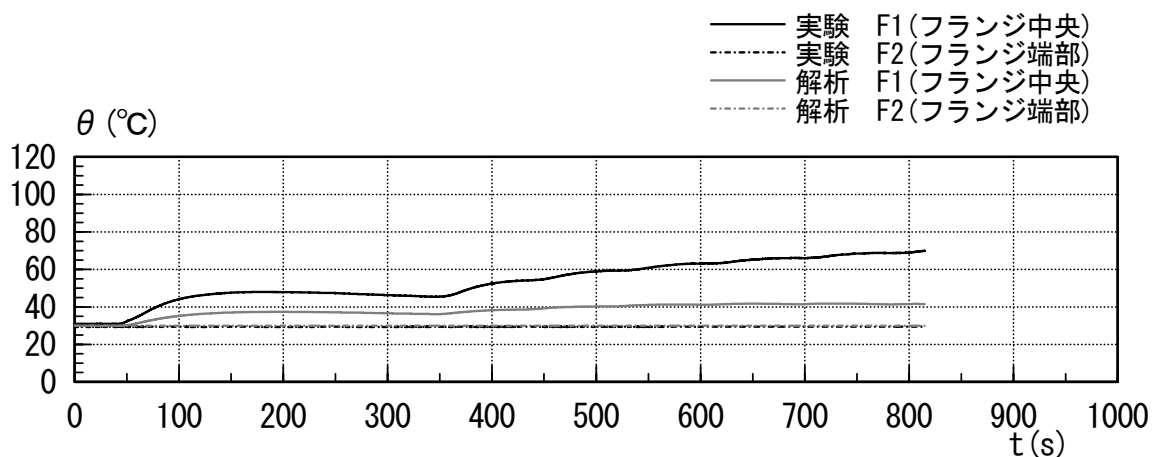
正弦波 2 方向加振（楕円加振、真円加振）時には、楕円加振時においても履歴ループ面積が小さく、真円加振時には、履歴ループ面積の殆どない履歴曲線が得られた。これらの実験加振前後の基本特性試験（1 方向加振、 $\gamma = 100\%$ ）では、このような顕著な履歴ループ面積の低下は生じていない。

図 2.2.1-50 に楕円加振、真円加振時の荷重変形関係から鉛プラグ入り積層ゴムの履歴吸収エネルギーを求め、そのエネルギーが全て鉛プラグの温度上昇に費やされると仮定し、熱伝導解析によりフランジ中央部、フランジ端部の温度を求めた結果を示す。結果には実験結果も示している。

熱伝導解析により求めたフランジ中央部の温度は実験結果との乖離が大きい。実験結果ではフランジ温度は 120°C 程度まで上昇しており、この温度上昇をもたらした理由は不明である。考えられる点としては鉛プラグ上部と取り付け鋼板部での摩擦により発熱したことや、後述するように実験後の積層ゴムの切断により鉛プラグに割れが生じていたことからエネルギー吸収による発熱が鉛プラグ全体でなされず、割れた一部分の鉛プラグでなされたことなどが挙げられる。



a) 楕円加振時



b) 真円加振時

図 2.2.1-50 フランジ部温度時刻歴

6) シミュレーション解析のまとめ

実大鉛プラグ入り積層ゴム（φ1,000）の実験結果のシミュレーション解析として、各加振ケースでの荷重変形関係、降伏荷重特性値 Q_d の低下及び積層ゴム内部温度等に着目した評価を行った。

シミュレーション解析結果より、1方向加振結果については、正弦波加振、地震応答波加振ともに、積層ゴムの内部温度や荷重変形関係、降伏荷重特性値の変化について実験結果と解析結果とでよく一致した。2方向加振結果については地震応答波加振のケースでは積層ゴムの内部温度や荷重変形関係、降伏荷重特性値の変化について実験結果と解析結果とがよく一致したものの、正弦波楕円加振、真円加振については実験結果と解析結果とで乖離が見られた。実験時に見られた荷重変形関係の履歴面積が小さくなる現象のシミュレーション解析については今後の要検討項目である。

(7) 楕円・真円加振に関する検討

1) 2方向加振時の試験体ねじれ変形

2方向加振時の試験体のねじれ変形について検討するため、最も条件が過酷であった真円加振の最終回について、ねじれひずみを算出した。ねじれ変形は、試験体ゴム部の3側面に幅50mm、水平方向×鉛直方向=10マス×6マスのメッシュを描き、ビデオ画像により判定した。なお、ビデオ画像の解像度の都合上、主梁方向せん断ひずみ=0%、受梁方向せん断ひずみ=200%の位置におけるねじれ変形を算出している。

表 2.2.1-9 に最大ねじれ変形と最大ねじれひずみを、図 2.2.1-51 にメッシュ中央列のねじれ変形図およびねじれ状況写真を示す。ねじれひずみ γ_{ϕ} は、ねじれ変形の分布を2字曲線で回帰し、下式(2.2.1-5)~(2.2.1-7)により求める。

$$\begin{aligned} & \text{高さ方向のねじれ変形角度分布 } \theta(x) \\ & \theta(x) = a \cdot x^2 + a \cdot R \cdot x + b \end{aligned} \tag{2.2.1-5}$$

$$\gamma_{\phi ap} = a \cdot R \cdot H \tag{2.2.1-6}$$

$$\gamma_{\phi} = \lambda \cdot \gamma_{\phi ap} \tag{2.2.1-7}$$

ここで、

$\theta(x)$: 高さ方向のねじれ変形角度分布

x : 計測高さ

a 、 b : 回帰定数

$\gamma_{\phi ap}$: 見かけのねじれによる最大せん断ひずみ

R : 有効半径

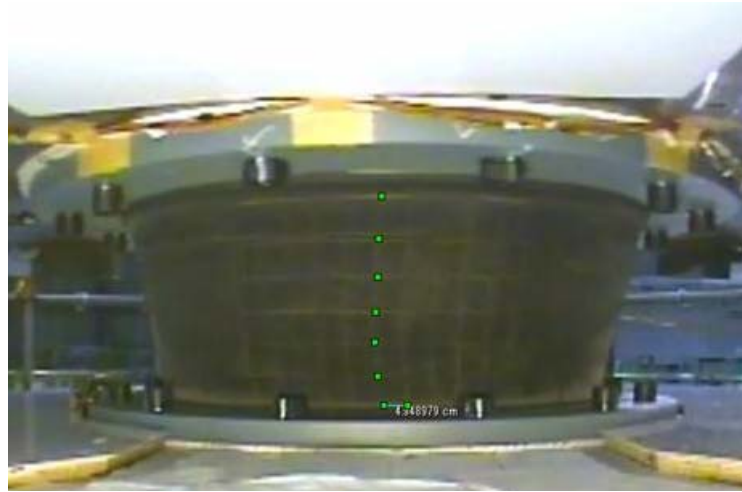
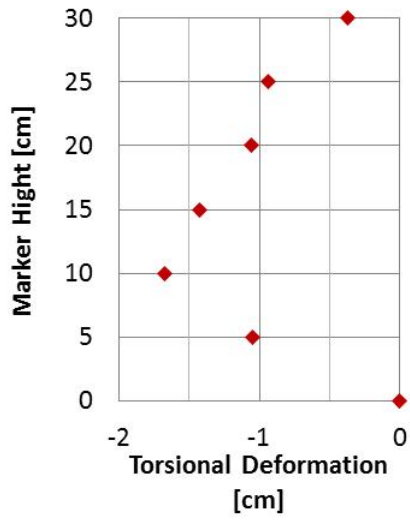
H : LRB のフランジおよび連結鋼板を除いた高さ

λ : 内部鋼板に関する補正係数 (=2.41)

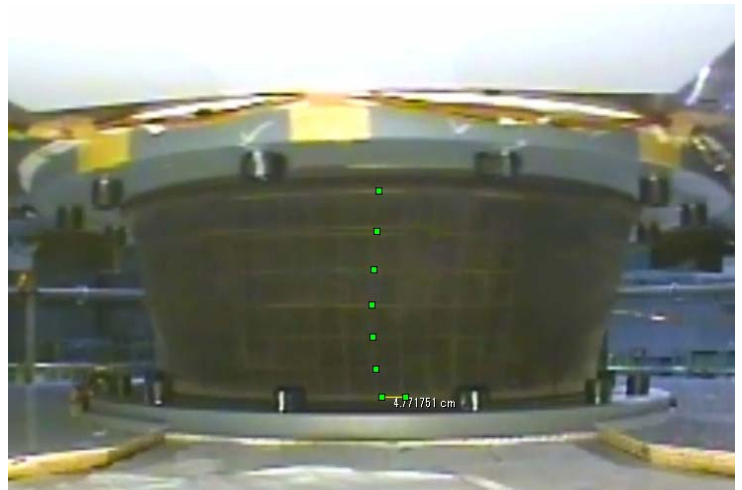
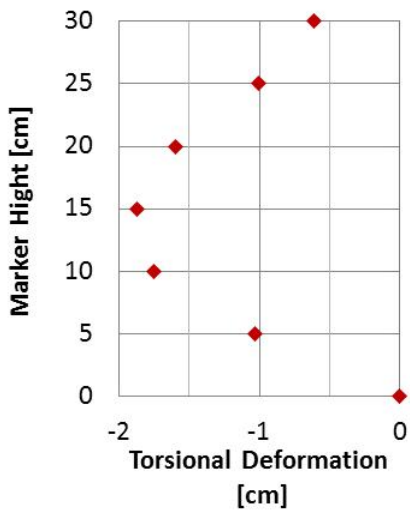
以上より、ねじれ変形は最大で 1.87cm で、その際のねじれひずみは 52%である。なお、加振前後には試験体にはねじれが発生していないことが確認されており、ねじれひずみは加振中にのみ発生し、終了後の残留ひずみはないと言える。

表 2.2.1-9 最大ねじれ変形 (真円加振、最終回)

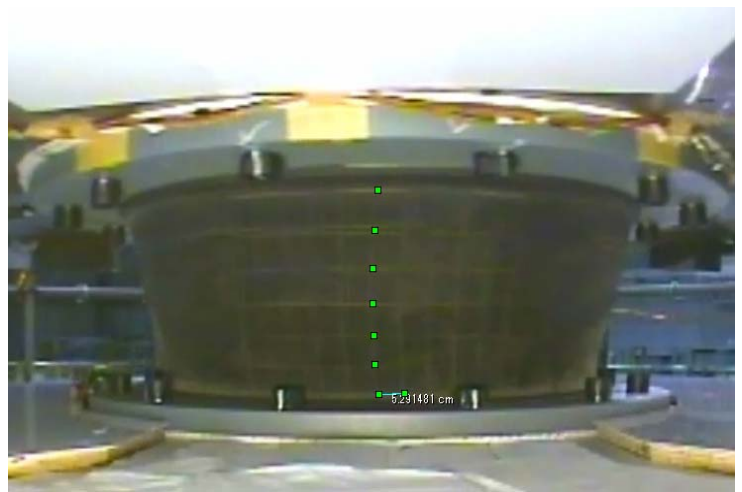
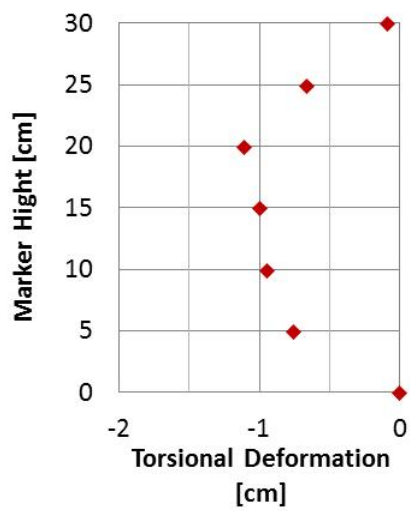
サイクル	ねじれ変形	ねじれひずみ
1	1.68cm	41%
2	1.87cm	52%
3	1.11cm	33%



(a) 最終回 1 サイクル目



(b) 最終回 2 サイクル目



(c) 最終回 3 サイクル目

図 2.2.1-51 真円加振におけるねじれ変形

2) 正弦波 2 方向加振における履歴特性の分析と考察

a) 実験結果履歴特性の分析

真円加振時の鉛プラグ入り積層ゴム (LRB) は、履歴ループ面積の殆どない荷重変形関係が得られた。楕円加振時においても履歴ループ面積は小さい。これらの実験加振前後の基本特性試験 (1 方向加振、 $\gamma = 100\%$) では、このような顕著な履歴ループ面積の低下は生じておらず、これらの現象は鉛プラグの温度上昇だけでは説明できない。そこで、実験結果の分析などによりこれらの現象の原因について考察する。

- 図 2.2.1-52(a)に真円加振の 1 回目の 2 方向の変形 D_u 、 D_v および応力 Q_u 、 Q_v の軌跡と U 、 V 方向の履歴ループを示した。
- 図 2.2.1-52(b)に、同実験における変形 D_u 、 D_v を極座標系におけるもの D_r 、 D_θ に変換してその時刻歴波形を示した。

$$D_r = \sqrt{D_u^2 + D_v^2} \quad (2.2.1-8)$$

$$D_\theta = \tan^{-1}(D_v / D_u) \quad (2.2.1-9)$$

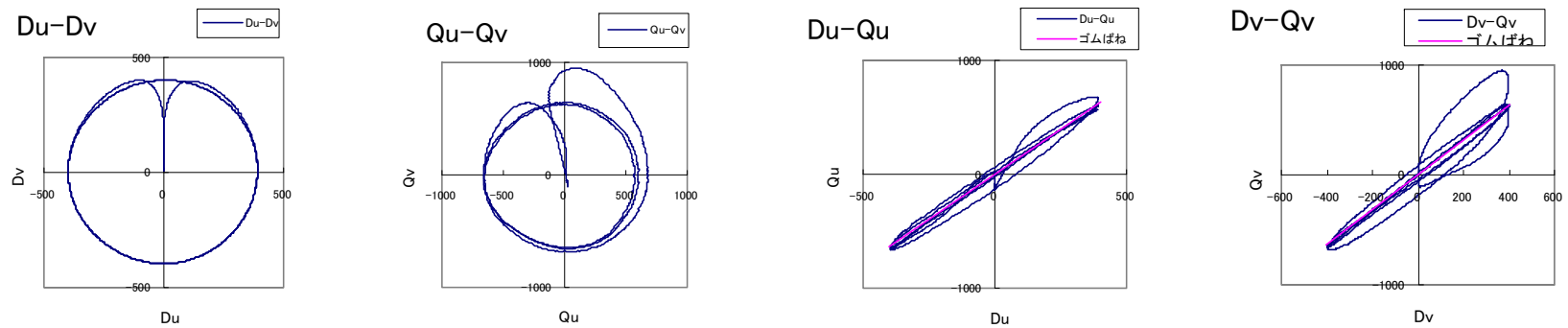
次に、同実験における変形 Q_u 、 Q_{uv} からそれぞれによるゴム応力を減算して、2 乗和平方根をとった降伏荷重値 Q_{dr} を算定しその時刻歴波形を示すと共に、 D_r の単位時間変化率 $\Delta D_r / \Delta t$ の絶対値を重ね書いて時刻歴波形も示した。

$$Q_{dr} = \sqrt{(Q_u - KrD_u)^2 + (Q_v - KrD_v)^2} \quad (2.2.1-10)$$

Q_{dr} の時刻歴波形をみると、加振初期と加振終了直前のみ降伏荷重が大きな値をもち、 $\Delta D_r / \Delta t$ の絶対値との相関が高い。ただし、 $\Delta D_r / \Delta t$ がゼロになっても Q_{dr} が十分小さくなるには若干時間がかかるようである。

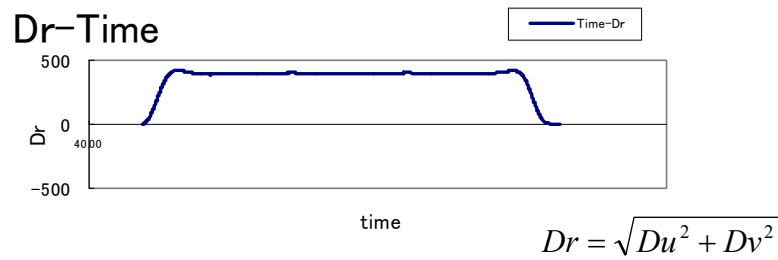
- 図 2.2.1-53 に、真円加振 (2~5 回目) における変形・応力の軌跡と各種時刻歴波形を示した。本加振においても、 Q_{dr} と $\Delta D_r / \Delta t$ の絶対値との相関が高いことが分かる。
- 図 2.2.1-54 に楕円加振 (1 回目) におけるものを図 2.2.1-52 と同様に示す。ここでも Q_{dr} と $\Delta D_r / \Delta t$ の相関がみられる。しかしながら $\Delta D_r / \Delta t$ がゼロになっても Q_{dr} の激減はみられない。円加振のように $\Delta D_r / \Delta t$ がゼロになるのは長継続時間にわたってではないことと関係があるのではないかと考えられる。

以上から、真円加振において降伏荷重ひいては履歴面積が激減するのは、原点からの変形量 (ベクトル長さ) D_r が一定の際であり、真円加振初期および終了前、基本特性試験のように D_r が変化する間はそれなりの降伏荷重および履歴面積が出ている。

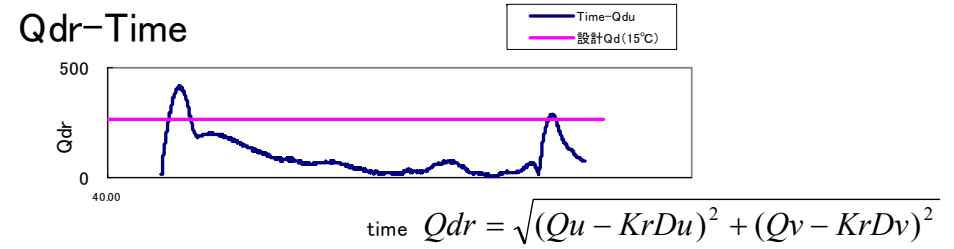


ゴム剛性 $Kr=1.6\text{kN/mm}$ を仮定

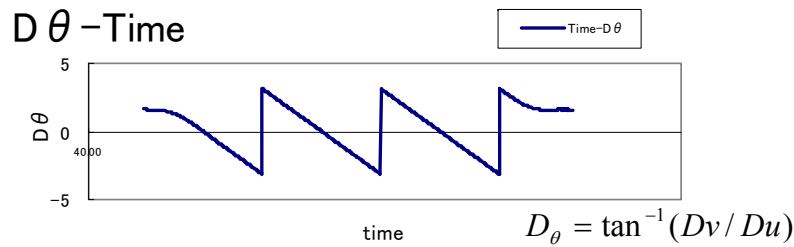
図 2.2.1-52(a) 真円加振（1回目）の変形・応力の軌跡と履歴曲線



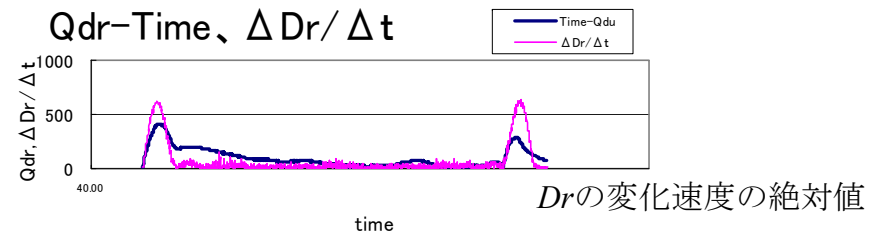
$$Dr = \sqrt{Du^2 + Dv^2}$$



$$Qdr = \sqrt{(Qu - KrDu)^2 + (Qv - KrDv)^2}$$



$$D\theta = \tan^{-1}(Dv/Du)$$



Dr の変化速度の絶対値

図 2.2.1-52(b) 真円加振（1回目）の変形および降伏荷重などの時刻歴波形

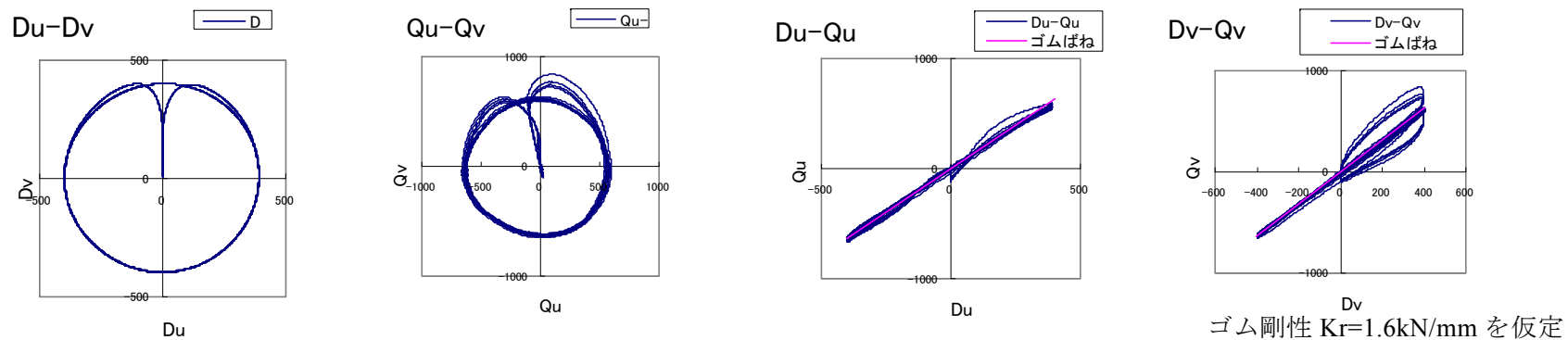


図 2.2.1-53(a)真円加振 (2~5 回目) の変形・応力の軌跡と履歴曲線

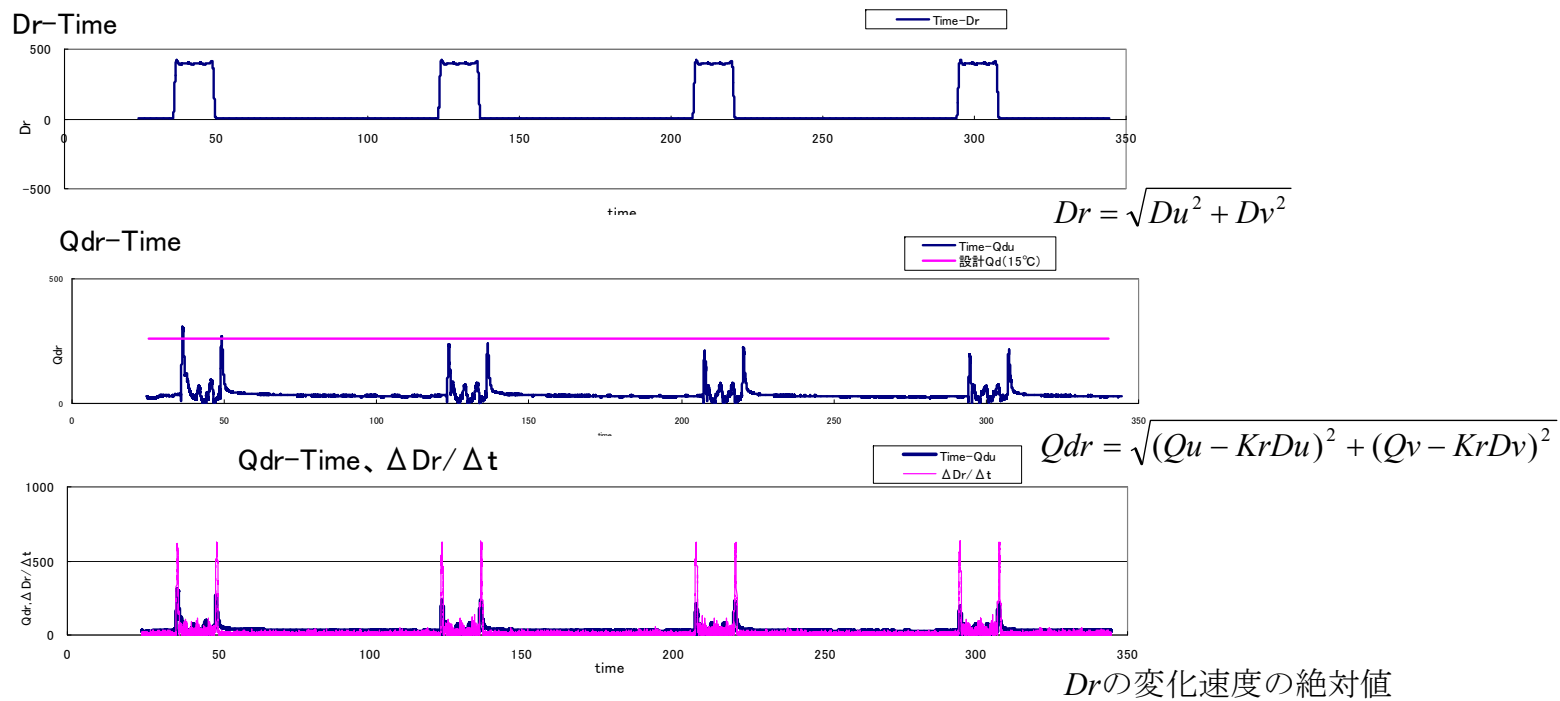


図 2.2.1-53(b)真円加振 (2~5 回目) の変形および降伏荷重などの時刻歴波形

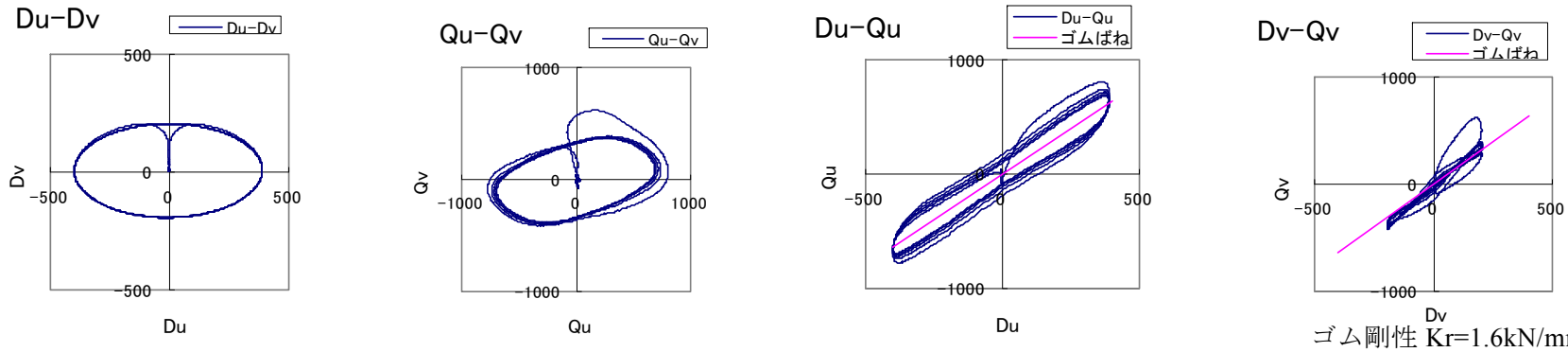


図 2.2.1-54(a)楕円加振（1回目）の変形・応力の軌跡と履歴曲線

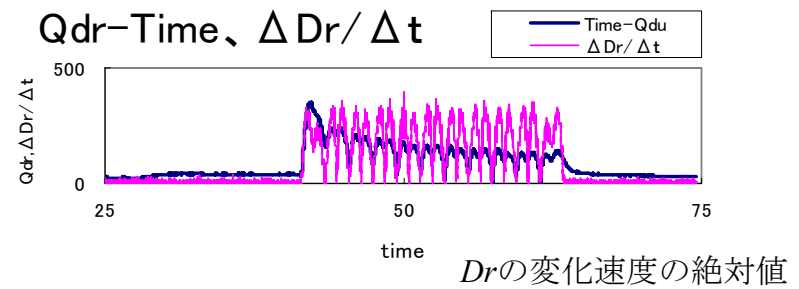
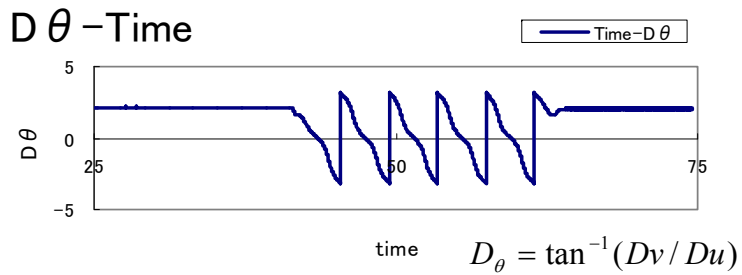
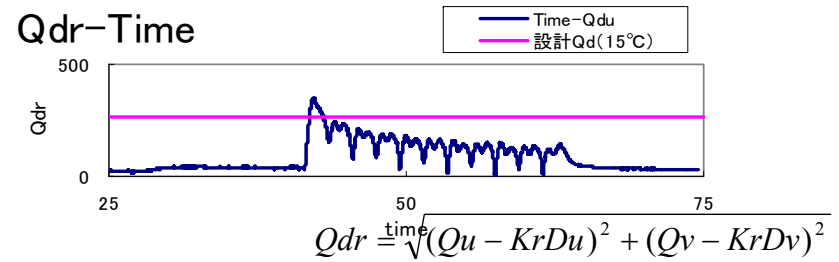
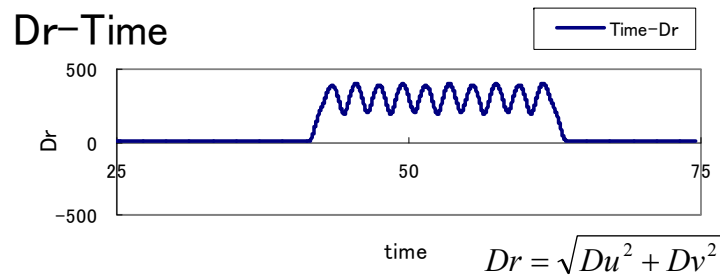


図 2.2.1-54(b)楕円加振（1回目）の変形および降伏荷重などの時刻歴波形

b) 既往実験に基づく考察

既往の LRB2 方向円加振実験 2 例と今回の実験結果の概要の比較を表 2.2.1-10 に示す。既往研究 2 例はあまり大きくない試験体を加振した結果であるが、大振幅や低面圧のものが含まれており、今回の実験で計測されたような荷重変形関係における履歴面積・降伏荷重の急激な低下は見られず、また 2 軸非線形を表すための MSS モデルによる解析により精度良く実験結果が再現されている。これらの実験との実験条件の差は、それほど小さくなく、強いて挙げれば、試験体の大きさ、温度上昇の量が既往に比べて極めて高い可能性があることであるが、原因を特定できる知見は既往実験からは得られなかった。

c) 本現象の原因に関する考察

先述の「真円加振において降伏荷重ひいては荷重変形関係における履歴面積が激減するのは、原点からの変形量（ベクトル長さ） D_r が一定の際であり、真円加振初期および終了前、基本特性試験のように D_r が変化する間はそれなりの降伏荷重および荷重変形関係における履歴面積が出ている。」ことを考えると、可能性のある原因として円加振時には鉛プラグが塑性変形せず、すなわち、鉛直軸回りに鉛プラグが回転することによって形状変化が生じない現象が生じていることが考えられる。図 2.2.1-55 に示すように 1 方向加振の場合には鉛プラグの形状変化が必ず生じるが、円加振の定常状態では、鉛プラグと周辺の積層ゴム部や鋼製フランジとの干渉がなければ鉛直軸回りに鉛プラグが回転するだけで、形状変化、塑性変形を受ける必要はない。しかしながらこのような現象は上述のように既往実験では見られないものであり、考えられる原因の一つにしか過ぎない。しかしこれ以外の考えられる原因は現在見当たらない。今回の実験と既往実験の大きな差は、温度上昇の差であり、熱膨張率の高い周辺部のゴム（線膨張率 $110 \times 10^{-6}/K$ ）が膨張し、熱膨張率が相対的に低い鉛（線膨張率 $29 \times 10^{-6}/K$ ）との間に空隙が生じ始めたためとの推測することも可能であるが、限られた実験結果であり原因は特定できず、今後の研究が必要である。

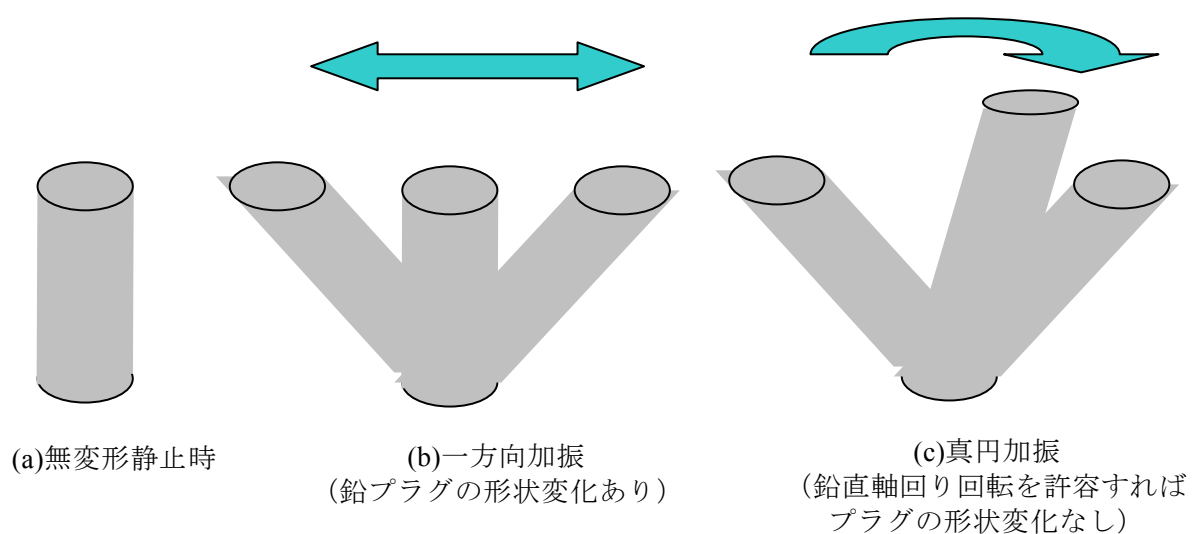


図 2.2.1-55 鉛プラグの形状変化の模式図

表 2.2.1-10 鉛プラグ入り積層ゴムの既往2方向加振実験結果との比較

試験体	実験加振条件	実験	1方向加振			楕円加振		円加振	
				X (長軸)	Y (短軸)	X (長軸)	Y (短軸)		
今回 実験	φ1000 鉛プラグ φ200 ゴム層厚さ = 198 mm S2 = 5.1	周期 4 秒 鉛直面圧 : 5MPa $\gamma=200\%$ (長軸) 1 方向: 5cyc×7 楕円: 5cyc×12 真円: 3cyc×7 ※断熱材あり	実験 全重ねが き						
				フランジ中央温度 開始時 28.6℃、終了時 95.8℃ ゴム表面温度 開始時 25.6℃、終了時 26.3℃	フランジ中央温度 開始時 43.2℃、終了時 121.4℃ ゴム表面温度 開始時 38.9℃、終了時 40.8℃	フランジ中央温度 開始時 31.0℃、終了時 70.1℃ ゴム表面温度 開始時 31.4℃、終了時 32.2℃			
		2 サイク ル目							
仲村 ほか 文献 2)	φ225 鉛プラグ φ40 ゴム層厚さ = 40.6 mm S2 = 5.54	加振速度 3cm/s 鉛直面圧 : 10MPa 各振幅 3 サイクル $\gamma \sim 400\%$ ※断熱材なし	実験						
				ゴム表面温度 開始時 19.7℃、 $\gamma=400$ 時 25.6℃	ゴム表面温度 開始時 21.0℃、 $\gamma=400$ 時 26.7℃	ゴム表面温度 開始時 22.1℃、 $\gamma=400$ 時 26.8℃			
		解析							
前田 ほか 文献 3)	φ500 鉛プラグ φ80 ゴム層厚さ = 174 mm S2 = 2.9	周期 2 秒 鉛直面圧 : 5MPa 各振幅 4 サイクル $\gamma \sim 80\%$ ※断熱材なし	実験						
				温度計測なし					
		解析 MSS HD モデル							

(8) 実験後の試験体状況

1) 熱電対の設置状況

1日目の加振終了後に、鉛中央を計測している熱電対の抜け出しが確認された(写真2.2.1-8)。抜け出し長さは約170mmであった。正弦波1方向加振で、加振中に鉛中央温度が低下する現象が現れており(図2.2.1-15参照)、加振初期から抜け出しが始まっていたと考えられる。

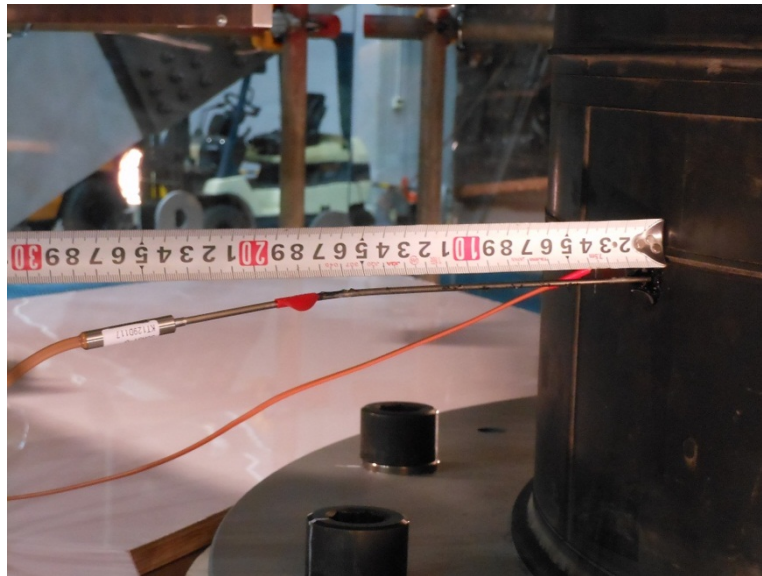


写真 2.2.1-8 鉛中央の熱電対の抜け出し状況 (1日目終了後)

2) 破断後の試験片飛散状況

積層ゴムの破断により、鉛片および内部鋼板が飛散した。飛散した鉛片および鋼板の写真を写真2.2.1-9に示す。ビデオによる観察から、試験片は破断後に変形を0に戻した際に飛散していることが確認されている。



(a)鉛プラグ



(b)内部鋼板

写真 2.2.1-9 破断後の飛散試験片

3) 実験後の試験体切断状況

試験後の試験体の内部状況を確認するため、試験体の切断を行った。破断試験により破断した試験体の下部側を、半割り体、1/4 割体の 2 つの計 3 体の部分にカットし観察した。カット部位を図 2.2.1-56 に、写真 2.2.1-10～写真 2.2.1-11 にカット後の試験体内部写真を示す。写真 2.2.1-10 より、鉛プラグが 3 層に分断されており、各ブロック間にはゴムを含む薄い層が介在している。この層の存在は破断時に生じたものではなく、真円あるいは、楕円の際の過酷な加振によって生じたものと考えられる。また、写真 2.2.1-11 に見られる最下部の鉛ブロックの上境界面は、先述の鉛プラグの鉛直軸回りの回転が生じやすい半球面になっており、先述の鉛プラグ（ブロック）がほぼ剛体のように回転する現象のようなものが生じて、減衰性の低下を招いた可能性が高いことを示唆している。

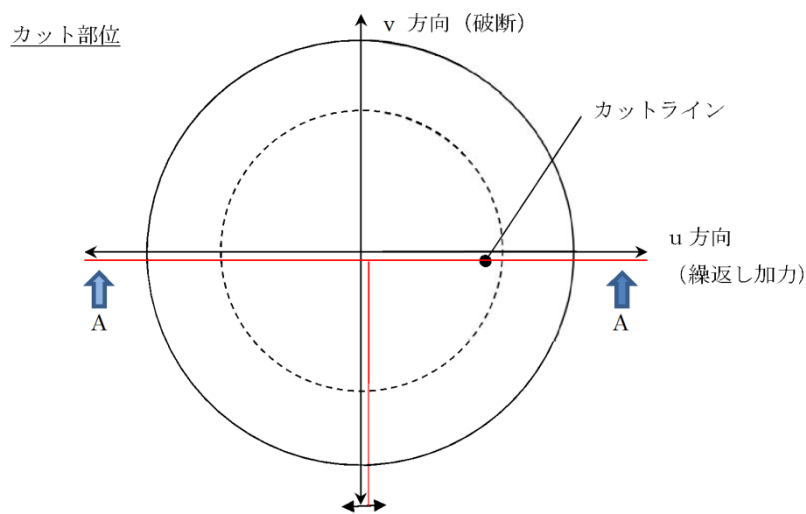


図 2.2.1-56 試験体カット部位



写真 2.2.1-9 半割り体写真 (A-A 矢視面)

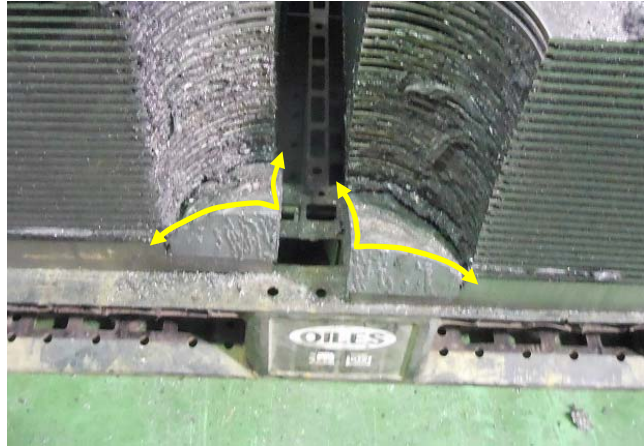


写真 2.2.1-10 1/4 割体 2 体写真 (逆 A-A 矢視面)

(9) まとめと今後の課題

長周期地震動に対する鉛プラグ入り積層ゴムの力学特性および性能を把握するため、直径φ1,000の実大鉛プラグ入り積層ゴムを用いて各種加振実験を実施した。以下に、本実験より得られた知見および今後の課題を記す。

1) 多数回繰り返しによる力学特性値の変化

各加振の前後に実施した基本特性試験より、加振による試験体温度の上昇とともに荷重変形関係における履歴面積が小さくなるが、温度低下に伴い、荷重変形関係も回復することが確認された。しかし、真円加振後に実施した基本特性試験の特性値は、他のケースに比べ低く、何らかの損傷が生じていた可能性が高い。

正弦波1方向加振では、繰り返し回数が増すごとに降伏荷重 Q_d が低下し履歴ループが小さくなっているものの、安定したループを描いていることが確認された。 Q_d は初期サイクルで大きく低下する傾向が見られたが、それ以降の低下は緩やかである。正弦波1方向多数回繰り返し加振（せん断ひずみ200%、35回繰り返し、累積変形約55m）では、 Q_d は55%まで低下した。 K_d の変化は小さく、変化量は最大で-4%程度であった。

地震応答波1方向・2方向加振の比較では、2方向加振および温度上昇の影響により、主梁方向の荷重変形関係が1方向加振よりも小さくなり、この現象は、受梁方向の振幅が大きいほど顕著であった。2方向加振では、回数ごとに荷重変形関係における履歴面積が小さくなり、6回の繰り返しで Q_d は初回の約70%まで低下した。 Q_d の低下に反比例して温度が上昇しており、正弦波加振と同様に、試験体の温度と Q_d の低下には負の相関があることが確認された。

正弦波2方向加振の楕円加振における主梁方向の荷重変形関係は、受梁方向の振幅の影響により Q_d は小さくなっているものの、安定した荷重変形関係を描いていた。楕円加振では、正弦波1方向加振の約2倍となる100mの累積変形を与えたところ、 Q_d は累積変形50m程度で40%程度まで低下した。しかし、それ以降も Q_d は大きく低下することはなかったことから、累積変形が大きくなる場合においても、 Q_d は際限なく低下することなく、ある一定のところに収束することが明らかとなった。

正弦波2方向加振の楕円加振の受梁方向加振、真円加振においては、主梁・受梁方向加振ともに履歴ループ面積の殆どない荷重変形関係が得られた。さらに、荷重変形関係は履歴ループが交差するケースも見られ、履歴吸収エネルギーや等価減衰定数がマイナスとなるサイクルもあった。試験体をカットした際の内部状況確認により、試験終了後に鉛プラグが3層に分断されていたことが確認され、真円加振あるいは楕円加振の過酷な加振によって分断が生じたものと推察されることから、鉛プラグがほぼ剛体のように回転する現象が生じて、減衰性の低下を招いた可能性が高いことを示唆している。

真円加振時に見られる減衰性能の顕著な低下は、過酷な加振によるものと考えられ、初期に実施された2方向地震応答波加振結果には見られない現象である。また、真円加振のように一定振幅が長く保たれる場合に生じるものと考えられ、実際の地震動では、本現象が長周期地震動による免震建築物の応答に及ぼす影響は大きくないと考えられる。

2) 多数回繰り返しによる温度上昇

表 2.2.1-11 に各実験における累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$ と温度上昇の関係を示す。これより、各加振における累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$ は $0.6 \sim 11 \times 10^6 (\text{kN/mm})$ で、これを鉛の熱容量で除した値は $32.5 \sim 623.4^\circ\text{C}$ である。実際の鉛プラグ部の温度上昇は、フランジ中央温度から推察すると、上記よりも低かったと考えられる。

正弦波 1 方向多数回繰り返し加振では、鉛中央温度は加振開始と同時に急上昇し、加振が終了すると直ちに温度が低下し始めていた。これに対し、鉛上部やフランジ中央の温度上昇は緩やかで、加振終了後も温度が上昇し続けていた。これは、鉛中央で発生した熱が、徐々に鉛内部を通してフランジに熱伝導されているためである。フランジ端部や被覆ゴム内部の温度はほとんど上昇しなかった。鉛中央の熱電対が加振中に抜け出したため、参考値ではあるが、鉛中央の温度は最大で 30°C から 137°C まで上昇した。

地震応答波 1 方向と 2 方向では、温度上昇に明確な差は現れなかった。2 方向加振開始時の試験体温度が高かったことや、受梁方向のせん断ひずみが 70% 程度と小さく温度上昇に寄与しなかったことが原因と推察する。

真円加振では履歴面積の殆どない荷重変形関係が得られており、同等の累積変形を与えたケースと比較して累積履歴吸収エネルギーがかなり小さい。それにも拘わらずフランジの温度は上昇している。この理由としては、真円加振では先述の鉛プラグの分断等の損傷が既に生じて鉛プラグにおける発熱分布や周囲への熱伝導性状が変化していたことが可能性として考えられる。

表 2.2.1-11 累積履歴吸収エネルギーと温度の比較

	累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$			$\Sigma \Delta W /$ 鉛熱容量	累積 変形	フランジ中央温度		
	主梁	受梁	全体			開始時	最高	増分
	(kN*mm)			($^\circ\text{C}$)	(m)	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)
正弦波 1 方向	-	-	1.0E+07	597.4	55.4	28.3	95.9	67.5
地震応答 1 方向	-	-	1.6E+06	94.2	10.1	33.4	49.8	16.4
地震応答 2 方向 (1 回目)	1.3E+06	9.4E+05	2.2E+06	126.5	15.0	42.6	64.4	21.8
地震応答 2 方向 (1~6 回目)	6.1E+06	4.7E+06	1.1E+07	623.4	92.8	42.6	92.5	49.9
楕円 (1 回目)	1.1E+06	7.1E+04	1.2E+06	69.2	10.0	43.0	64.9	21.9
楕円 (1~12 回目)	7.9E+06	-4.2E+05	7.4E+06	429.2	119.4	43.0	121.4	78.4
真円 (1 回目)	1.9E+05	3.8E+05	5.6E+05	32.5	8.2	31.0	48.0	17.0
真円 (1~7 回目)	1.8E+05	1.1E+06	1.2E+06	71.5	57.7	31.0	70.1	39.1

3) 今後の課題

本実験では、試験体が1体であったことや、時間の制約があり試験体の冷却時間が十分に取れなかったことから、想定される長周期地震動をはるかに超える過大な変位履歴を与えることとなった。それにより、円加振では既往研究では見られない現象が生じており、この現象の解明が今後必要である。

実験結果のシミュレーション解析結果では1方向加振結果（正弦波加振、地震応答波加振）や2方向加振結果のうち地震応答波加振については積層ゴムの内部温度や荷重変形関係、降伏荷重の変化について実験結果と解析結果とでよく一致した。2方向加振結果のうち楕円加振、真円加振については実験結果と解析結果とで乖離が見られた。実験時に見られた荷重変形関係の履歴面積が小さくなる現象のシミュレーション解析やその特性変化が地震応答に与える影響評価については今後の課題である。

参考文献

- 2.2.1-1) 竹中康雄、ほか:大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その9～その11）；日本建築学会学術講演梗概集（中国）、B-2、pp.397-402、2008.9
- 2.2.1-2) 仲村崇仁、ほか:鉛プラグ入り積層ゴムの水平2方向復元力特性に関する研究；日本建築学会構造系論文集、第681号、2012.11.
- 2.2.1-3) 前田祥三、ほか:建物の免震防振構法の開発（その19鉛コア積層ゴムの水平2軸加力実験とシミュレーション解析）、日本建築学会大会梗概、pp443-444、1989年10月

2.2.2 高減衰ゴム系積層ゴム

(1) はじめに

平成 22 年度に、高減衰ゴム系積層ゴムの縮小試験体(直径 250mm)による長振幅高速繰返し試験を実施した^{2.2.2-1)}。この実験結果より、繰返し加振によるゴム温度の上昇、温度変化による積層ゴムの剛性や減衰特性の変動、繰返し加振時の荷重履歴の影響を確認した。ここでは、縮小試験体の実験から得た繰返し特性の実大サイズへの適用性、水平 2 方向加振時の繰返し特性、および破断限界の確認を目的として、実大試験体(直径 1000mm)による長振幅高速繰返し試験を E-ディフェンスの大型震動台を用いて実施した。

(2) 試験日時と試験場所

・試験日時

2012 年 10 月 11 日：地震応答波加振(1 方向、2 方向)、楕円繰返し加振

2012 年 10 月 12 日：1 方向正弦波繰返し加振、真円繰返し加振、1 方向大振幅加振

・試験場所

独立行政法人 防災科学技術研究所 兵庫県耐震工学研究センター(E-ディフェンス)

(3) 試験体

試験体は、直径 1000mm の高減衰ゴム系積層ゴム(ブリヂストン X0.6R^{2.2.2-2)})1 体である。表 2.2.2-1 に、試験体の諸元を示す。また、図 2.2.2-1 に試験体形状を示す。試験体の上フランジには、試験体温度計測用の熱電対を配線するために幅・深さとも 10mm の溝が設けられている。また、加振時に試験体に発生する熱が周辺治具に伝達しないよう、試験体の上下に断熱板を設置した。断熱板には標準高温用断熱板(D-M-E 双葉、厚さ 10mm)を使用した。表 2.2.2-2 に、断熱板の仕様を示す。写真 2.2.2-1 に、試験体の設置状況を示す。

表 2.2.2-1 高減衰ゴム系積層ゴム試験体概要

	外径 (mm)	内径 (mm)	ゴム層厚	内部鋼板厚 (mm)	S1	S2
実大	1000	25	6.7mm×30 層=201mm	4.4	36.4	4.98

$$G_{eq} (\gamma=100\%時) = 0.620\text{N/mm}^2$$

表 2.2.2-2 断熱板の仕様

圧縮強度	338 (N/mm ²) (24℃の場合) 103 (N/mm ²) (285℃の場合)
吸水性	0.06%
熱伝導率	0.274W/(m・k) (24℃の場合) 0.303W/(m・k) (220℃の場合)
難燃性	94V-0(自己消化性)
最高使用温度	285℃
材質	アルミニウムカーボネート+グラスファイバー+ 不飽和ポリエステル

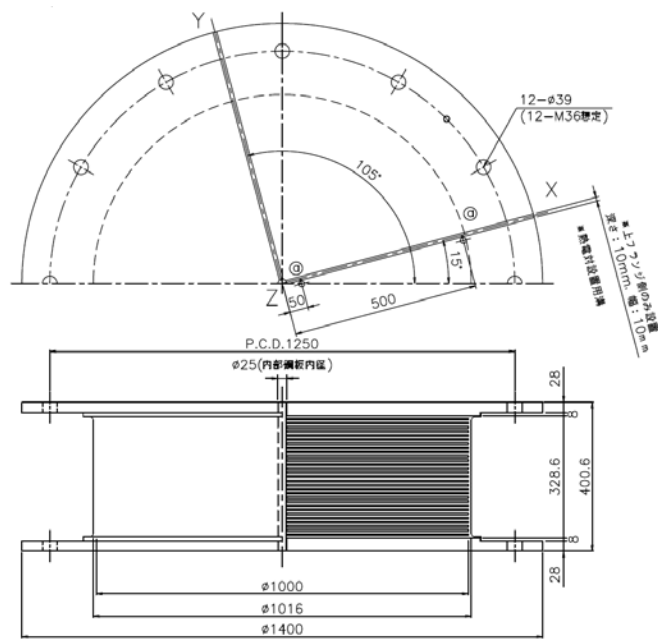


図 2.2.2-1 高減衰ゴム系積層ゴム試験体形状

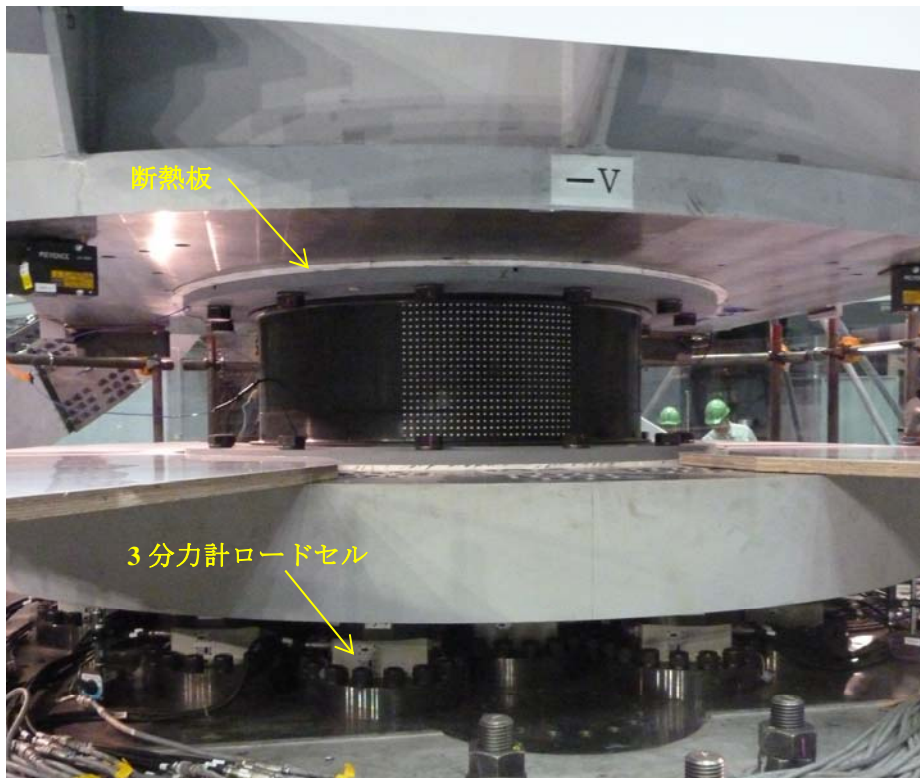


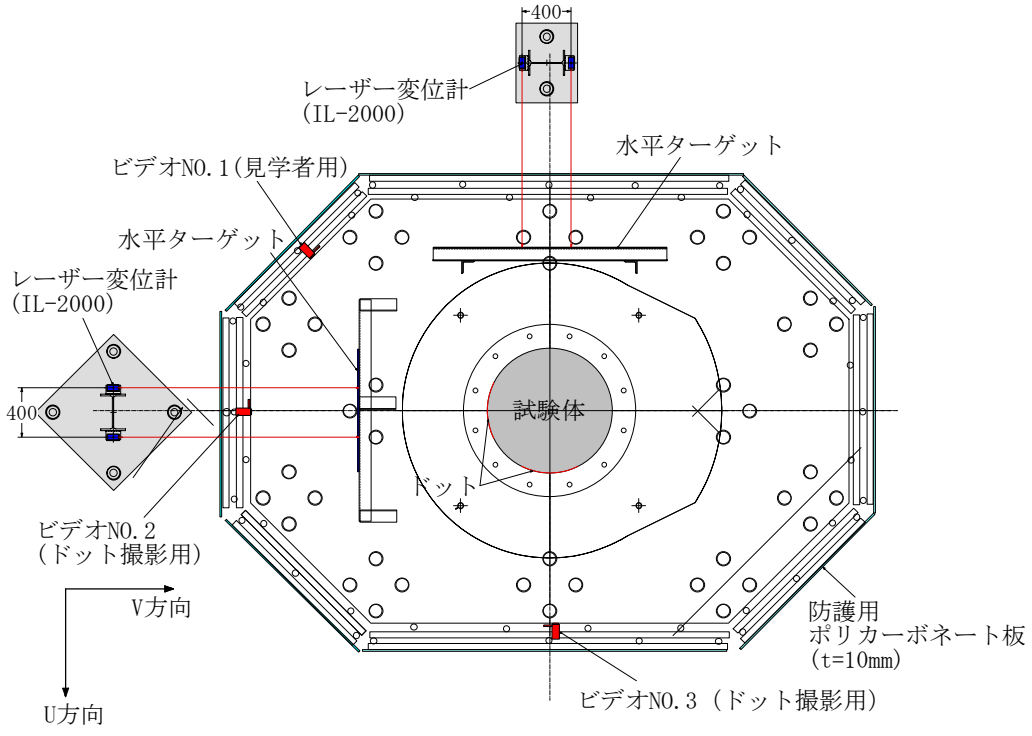
写真 2.2.2-1 高減衰ゴム系積層ゴム試験体設置状況

(4) 計測項目と計測方法

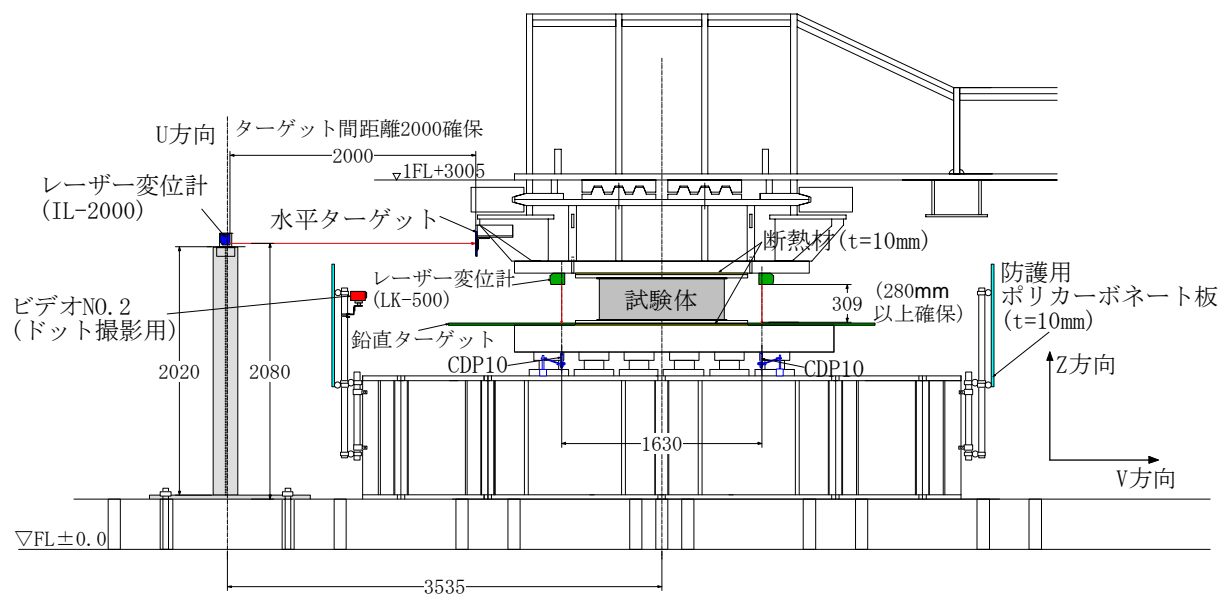
計測項目と各センサーについては、以下の通りである。

- ・水平・鉛直荷重： 3分力計ロードセル(共和電業 LSM-700KM) ×31 台
- ・水平変位： レーザー変位計(IL-2000) ×4 台
- ・鉛直変位： レーザー変位計(LK-500) ×4 台
歪ゲージ型変位計(CDP-10) ×4 台
- ・温度： (試験体) K 型熱電対(DK65T)×14 点、放射温度計(HIOKI3444)×1 点
(雰囲気温度) T 型熱電対×1 点
- ・ねじれ変形： 試験体にドットを描きビデオ撮影(水平 27 点×鉛直 20 点 @15mm)

水平荷重、および鉛直荷重は下部ブロックと試験体固定プレート下部の間に固定された 31 台の 3 分力計ロードセルにより測定して計測値を合算し、水平方向については U、V 方向成分に変換した。水平変位は、U、V 各方向 2 台ずつのレーザー変位計にて測定し、2 台の平均値を試験体の変位とした。鉛直変位は、上部ブロックと試験体固定プレート上部に設置したターゲット板の間の鉛直変位をレーザー変位計にて測定した。また、試験体固定プレートと下部ブロックの間の鉛直変位を歪ゲージ型変位計にて測定して、両者の間に相対変位が生じていないか確認した。試験体温度については、ゴムの高さ中心に 4 点、上フランジの上下面に 5 点ずつ設置した熱電対にてゴム内部とフランジ温度を測定し、放射温度計にてゴム表面温度を測定した。さらに、2 方向加振により発生するねじれひずみを計測するためゴムの表面にドットを描いてビデオ撮影し、画像解析によりねじれひずみの算出を行った。図 2.2.2-2 に試験体周りの計測機の配置図を、図 2.2.2-3 に 3 分力計ロードセルの配置図を、図 2.2.2-3 に試験体の熱電対設置位置を示す。



(a) 計測機器平面配置図



(b) 計測機器立面配置図

図 2.2.2-2 試験体周り計測器配置図

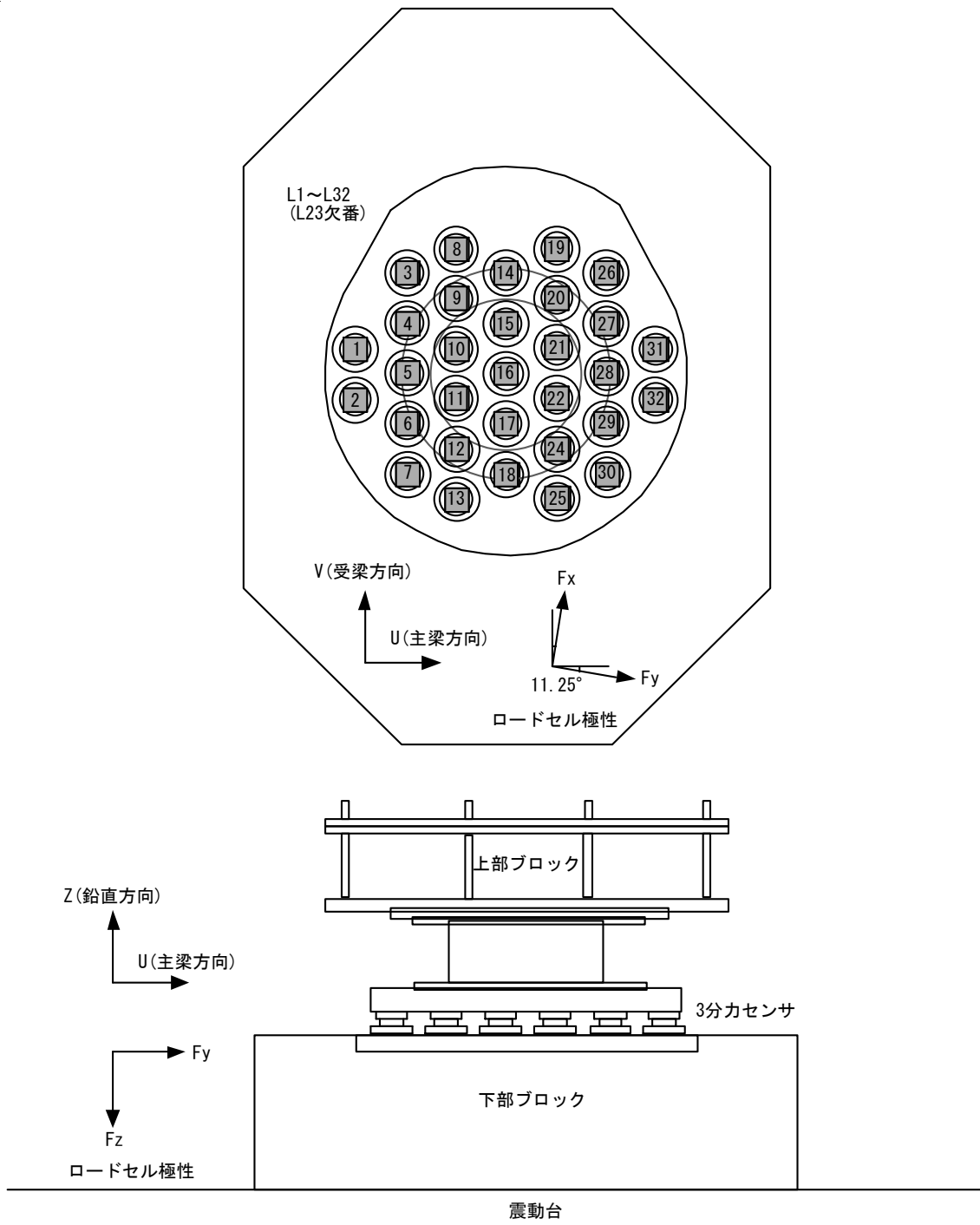


図 2.2.2-3 3 分力計ロードセル配置図

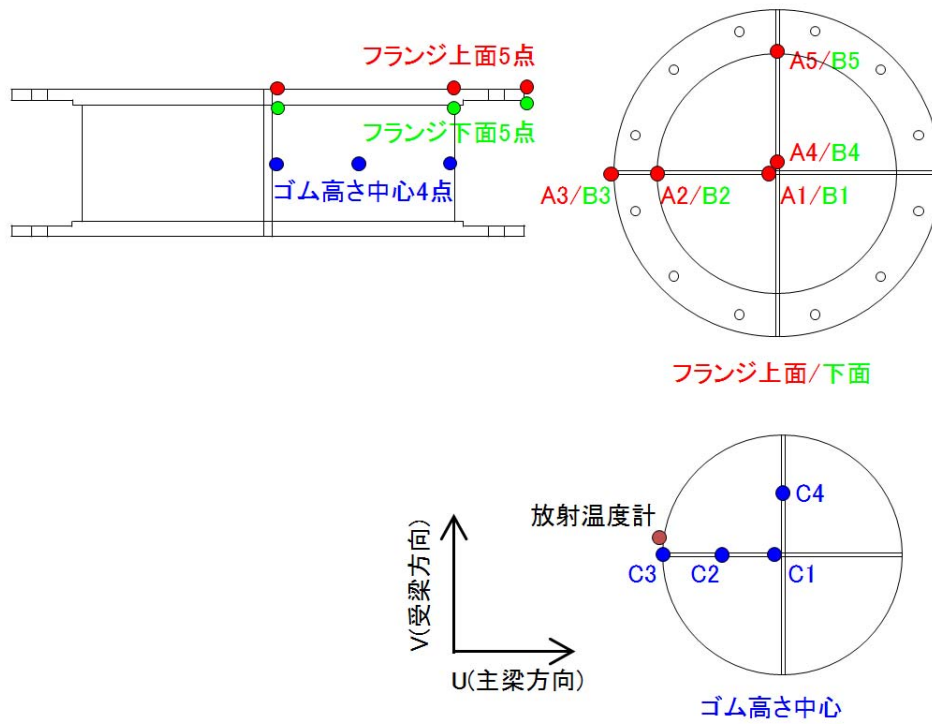


図 2.2.2-4 試験体温度計測点

(5) 加振ケース

加振ケースとして、以下の4つのケースを設定した。

(1) 水平1方向多数回繰返し加振 (正弦波加振)

積層ゴムサイズの違いによるスケール効果を確認するため、平成22年度実施の縮小試験体の実験結果^{2.2.2-1)}と比較できる加振ケースとして、振幅 $\gamma=200\%$ で累積変形量100mまで。

(2) 水平2方向多数回繰返し加振 (楕円加振、真円加振)

2方向加振時の特性把握、および水平1方向加振時との履歴特性変化、温度上昇傾向、エネルギー吸収量の違いを把握する。高減衰ゴム系積層ゴムは特に水平2方向加振時にねじれひずみが生じることが知られている。多数回繰返し加振時のねじれひずみの影響を確認するため、楕円加振およびねじれの発生が大きい真円加振も実施する。

(3) 地震応答波加振

水平1方向、および水平2方向の地震応答波加振を実施し、ランダム波による入力エネルギーと特性変動を把握する。また、解析モデルのランダム波への適用性の検証に用いる。

(4) 大振幅加振

実大免震部材の大変形時の履歴ループの確認、および破断挙動を確認する。振幅700mm($\gamma=350\%$)から50mmずつ振幅を漸増した正弦波による加振を行い、最大で振幅900mm($\gamma=450\%$)まで加振する。ただし、破断方向を定めるため振幅850mm以上は、+850mm～-800mm、+900mm～-800mmと片振幅のみ漸増する。

表2.2.2-3に、高減衰ゴム系積層ゴム試験体の加振ケース一覧を示す。震動台の上昇により、所定の面圧(5N/mm²または3N/mm²)を載荷した状態で水平1方向、または水平2方向の加振を実施した。地震応答波加振、1方向加振、楕円加振は各ケースで累積変形量が100mに達するまで繰返し加振を実施し、真円加振については、累積変形量が50mに達するまで繰返し加振を実施した。ただし、震動台のアクムレータ蓄圧および加振準備のため、1方向、楕円加振は5サイクル毎、真円加振は3サイクル毎に約1分間のインターバル時間をはさんだ。大振幅加振は、所定の振幅における2サイクルの繰返し加振とした。ただし、大振幅加振については、実験時に大振幅試験の前に行った真円加振により、試験体に内部剥離が確認されたため、大振幅試験は振幅400mm($\gamma=200\%$)から実施し、振幅500mm($\gamma=250\%$)で破断に至ったため、それ以上の振幅の試験は実施していない。また、各加振ケースの間には、加振周期4.0秒、振幅200mm($\gamma=100\%$)の基本特性加振を行った。実験全体としては、累積変形量で合計400m弱となる非常に厳しい加振ケースとなっている。図2.2.2-5に、加振に用いた変位波形を示す。波形は試験体位置における変位波形であり、入力においては震動台中心点の波形に変換して入力した。

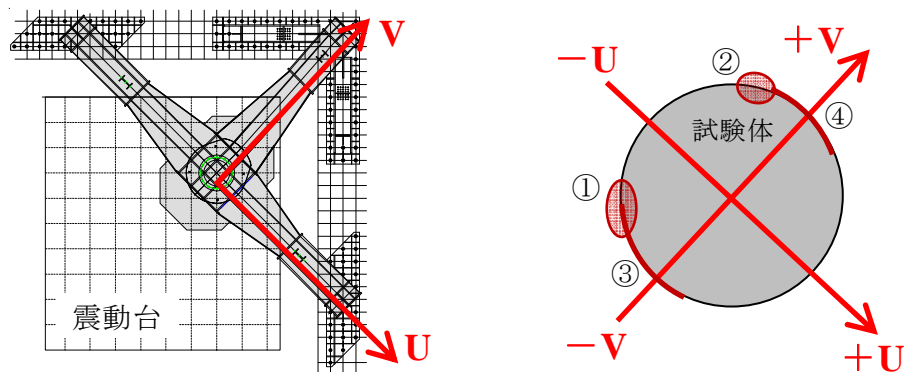
表 2.2.2-3 高減衰ゴム系積層ゴム実験ケース一覧

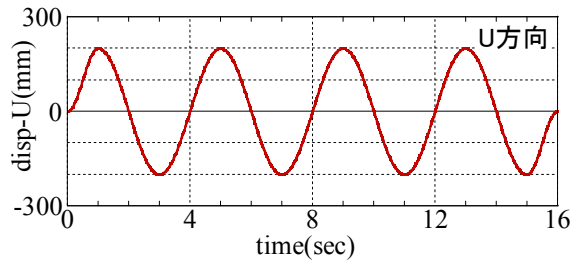
加振 日程	試験条件	面圧 (N/mm ²) (3925kN)	加振 方向	ひずみ (%)	変位 (mm)	換算 速度 (cm/s)	サイクル 数	累積変形 (m)	損傷状況
10月11日	基本特性①	5.0 (3925kN)	U	100	200	31.4	4	3	
	地震応答波 (1方向)	5.0 (3925kN)	U	Tk-NS(最大変位200mm) × 1回				10.5m	
	地震応答波 (1方向)	5.0 (3925kN)	V	Tk-EW(最大変位268mm) × 1回				14.6m	
	地震応答波 (2方向)	5.0 (3925kN)	U	Tk-NS(最大変位200mm) × 4回				19.2m × 4回	
			V	Tk-EW(最大変位268mm) × 4回				=83.2m	
	基本特性②	5.0 (3925kN)	U	100	200	31.4	4	3	
	冷却30分								
水平2方向繰返し 楕円	5.0 (3925kN)	U	200	400	62.8	60	116		
		V	100	200	31.4	(5cyc.×12)			
基本特性③	5.0 (3925kN)	U	100	200	31.4	4	3		
冷却約17時間									
10月12日	基本特性④	5.0 (3925kN)	U	100	200	31.4	4	3	
	水平1方向繰返し 正弦波	5.0 (3925kN)	U	200	400	62.8	60	96	
							(5cyc.×12)		
	基本特性⑤	5.0 (3925kN)	U	100	200	31.4	4	3	
冷却100分									
水平2方向繰返し 真円	5.0 (3925kN)	U	200	400	62.8	21	53	3回目に上端①に 内部剥離の兆候。 4回目に上端②に 内部剥離の兆候。 その後、加振により 内部剥離拡大。	
		V	200	400	62.8	(3cyc.×7)			
基本特性⑥	5.0 (3925kN)	U	100	200	31.4	4	3		
冷却60分									
大振幅	3.0 (2355kN)	V	200	400	62.8	2cyc.	3	ゴムに剥離が発生した ため、200%から加振 開始。 上端③および④に おいて、被覆ゴム破裂。 ゴム破断により 実施せず。	
		V	250	500	78.5	2cyc.	7		
		V	300	600	94.2	2cyc.	12		
		V	350	700	110.0	2cyc.	18		
		V	375	750	117.8	2cyc.	24		
		V	400	800	125.7	2cyc.	30		
		V	425	850	133.5	2cyc.	37		
V	450	900	141.4	2cyc.	44				

加振周期 4.0 秒

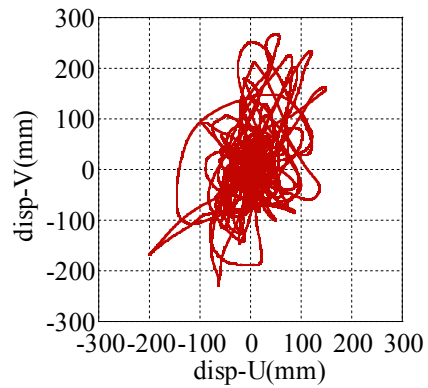
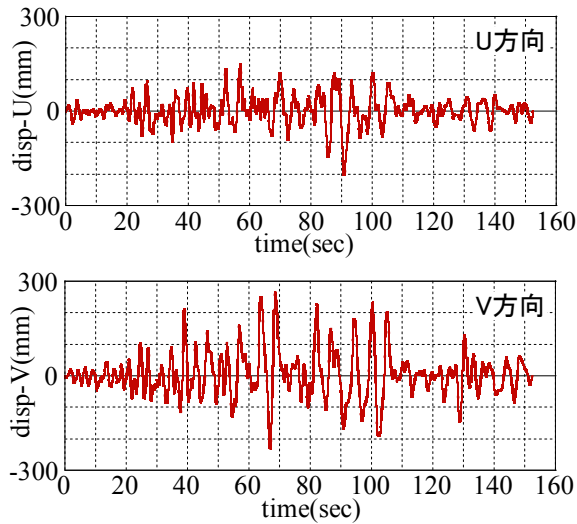
U : 主梁方向

V : 受梁方向

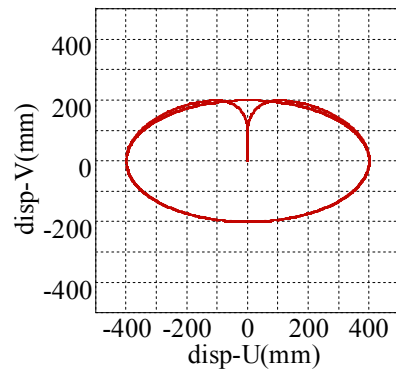
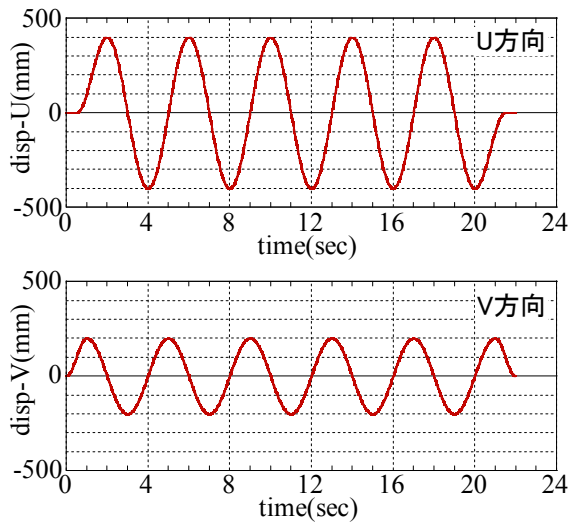




(a) 基本特性の加振波(V,Z 方向はゼロ)

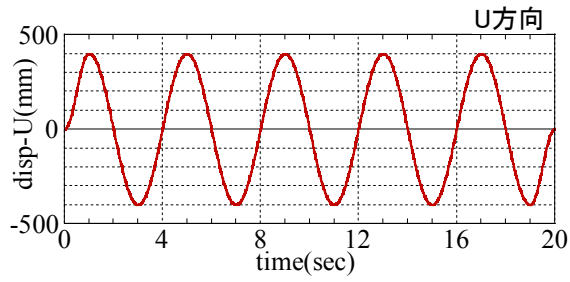


(b) 地震応答波の加振波(Z 方向はゼロ)およびオービット

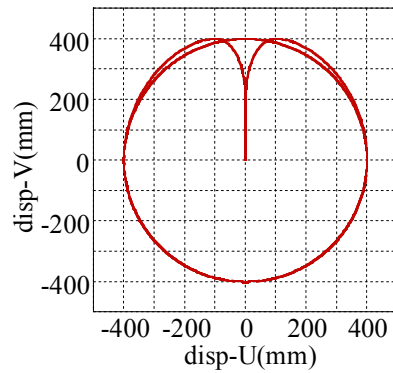
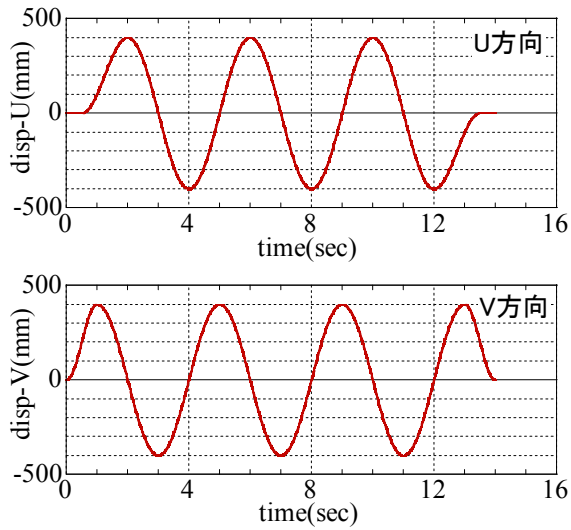


(c) 楕円加振の加振波(Z 方向はゼロ)およびオービット

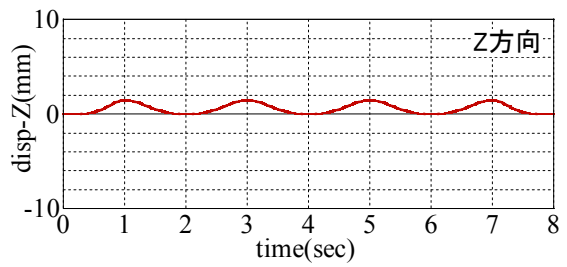
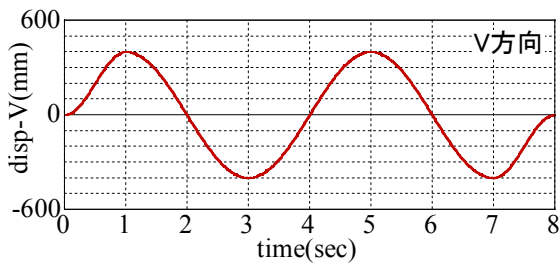
図 2.2.2-5 加振に用いた変位波形(試験体位置)



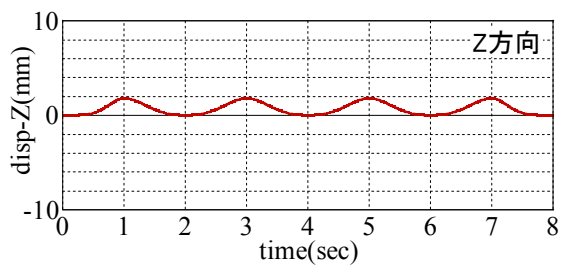
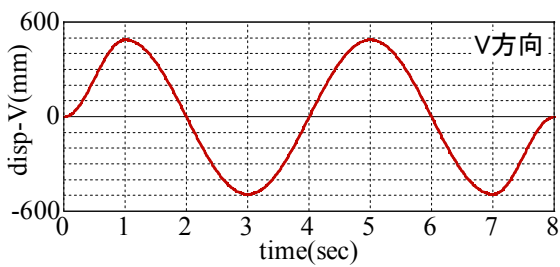
(d) 1 方向加振の加振波(V,Z 方向はゼロ)



(e) 真円加振の加振波(Z 方向はゼロ)およびオービット



(f) 大振幅加振($\pm 400\text{mm}$)の加振波(U 方向はゼロ)



(g) 大振幅加振($\pm 500\text{mm}$)の加振波(U 方向はゼロ)

図 2.2.2-5 加振に用いた変位波形(試験体位置)

(6) 実験結果

6.1) 試験体の損傷状況

表 2.2.2-3 の損傷状況欄に、ビデオ観察による試験体の損傷状況を記す。真円加振の 3 回目(7～9 サイクル目)において、表 2.2.2-3 の試験体図の①位置の上フランジ直下において、内部剥離の兆候が確認された(写真 2.2.2-2(a))。この剥離はその後の真円加振により、③の方向へと拡大している(写真 2.2.2-2(b))。また、真円加振の 4 回目(10～12 サイクル目)において、試験体図の②位置の上フランジ直下において内部剥離の兆候が確認された(写真 2.2.2-3(a))。この剥離兆候はその後の加振で④の方向へやや伸展している(写真 2.2.2-3(b))。その後、せん断ひずみ 250% における大振幅試験において、内部剥離が拡大していた試験体図③、および④位置の上フランジ直下において被覆ゴムが破裂し破断に至った(写真 2.2.2-4)。

本実験においては、試験体が 1 体のみであり、また試験体の冷却に十分な時間をとれなかったことから、試験体に内部剥離の兆候が確認された真円加振時には、試験体は既に 300m 以上の累積変形を経験しており、また、加振開始時の試験体温度もゴム部で 50℃以上と高温であった。従って、本実験における試験体の破断は、高温状態で厳しい加振ケースを繰り返したことによる試験体の疲労の影響が大きいと推測され、疲労を蓄積していないバージンな試験体とは破断傾向が異なると考えられる。



(a) 3 サイクル×3 回目(-U 側より)



(b) 3 サイクル×7 回目(-V 側より)

写真 2.2.2-2 真円加振時 試験体-V 側の損傷状況



(a) 3 サイクル×4 回目(+V 側より)

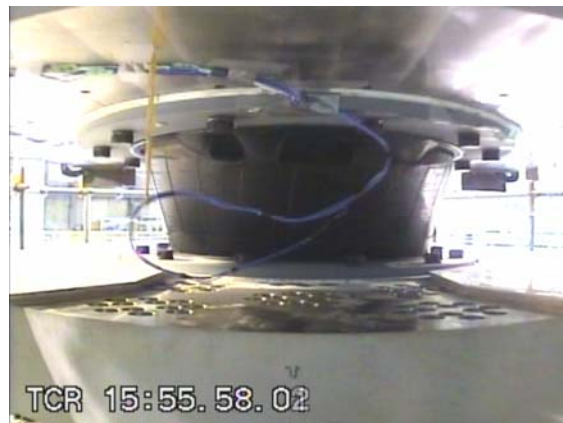


(b) 3 サイクル×7 回目(+V 側より)

写真 2.2.2-3 真円加振時 試験体+V 側の損傷状況



(a) 大振幅±500mm 2 サイクル目
(-V 側より)



(b) 大振幅±500mm 1 サイクル目
(+V 側より)

写真 2.2.2-4 大振幅±500mm 加振時 試験体の損傷状況

6.2) 荷重変形関係

図 2.2.2-6～2.2.2-10 に、実験結果の荷重変形関係を示す。

図 2.2.2-6 に示す、地震応答波加振の荷重変形関係において、水平 1 方向入力時の荷重変形関係と水平 2 方向同時入力時の NS,EW 各成分の荷重変形関係は、おおよそ同様の形状を示している。ただし、1 方向 NS 入力時の荷重変形関係(図 2.2.2-6(a))と、2 方向同時入力時の NS 成分の荷重変形関係(図 2.2.2-6(c))を比較すると、2 方向同時入力時の荷重変形関係において変位ゼロ付近のループがやや膨らんでいることから、2 方向入力の影響がわずかに現れていることが確認できる。

図 2.2.2-7 に示す、楕円加振時の荷重変形関係は、長軸方向については 1 方向加振時の荷重変形関係に近いが、ハードニングをほとんど生じないループとなっている。短軸方向については、変位ゼロ付近でループが膨らむ形状となっており、1 方向加振時のループ形状とは全く異なる。長軸、短軸のループとも、繰返し加振により荷重切片値の低下が明確に現れているが、最大変形時の荷重には大きな低下は生じていない。

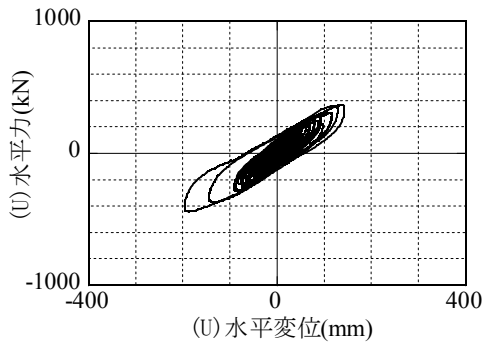
図 2.2.2-8 に示す、1 方向正弦波加振時の荷重変形関係は、最大変形の 400mm 付近でややハードニングを生じるループ形状となっている。繰返し加振により、最大変形時の荷重の低下が明確に現れている。

図 2.2.2-9 に示す、真円加振時の荷重変形関係は、U,V 各方向成分とも変位ゼロ付近が膨らんだ紡錘形のループ形状となっている。繰返しにより、荷重切片値が低下しているが、最大変形時の荷重の低下は比較的小さい。また、真円加振の 3 サイクル×3 回目の加振において、試験体に内部剥離の兆候が現れ、加振が進むにつれ剥離が伸展していったが、履歴ループには試験体の損傷の影響は見られず、健全なループ形状を維持している。

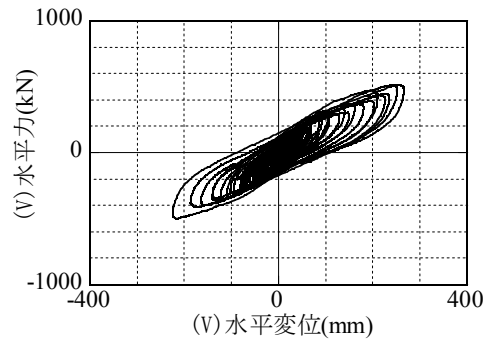
図 2.2.2-10 に、大振幅加振の荷重変形関係を示す。大振幅加振は、真円加振により試験体が損傷を受けた後に実施した試験であるが、荷重変形関係は健全なループ形状を維持している。

図 2.2.2-10(b)に示す、被覆ゴムの破裂が生じた大振幅±500mm 加振の履歴ループにおいては、破裂による影響は履歴ループ上に明確に現れておらず、安定したループ形状を保ったまま原点に戻っている。

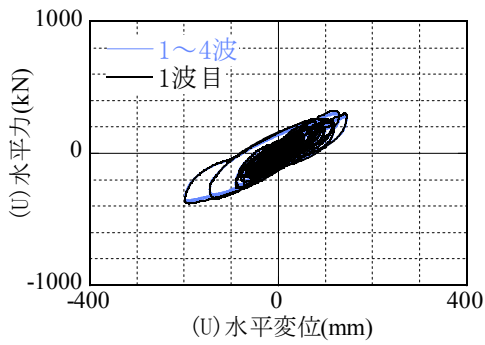
以上より、水平 2 方向加振時には、直交する 2 方向の各成分の荷重変形関係は、直交方向の加力の影響からループ形状が 1 方向加振時とは異なることを確認した。ただし、地震応答波のようなランダム波においては、楕円加振や真円加振に比べて荷重変形関係への 2 方向入力の影響は少なかった。また、試験体に内部剥離が生じてても荷重変形関係は安定した履歴ループを維持していたことから、試験体に多少の損傷が生じてても、ただちに装置性能を喪失するものではないと言える。



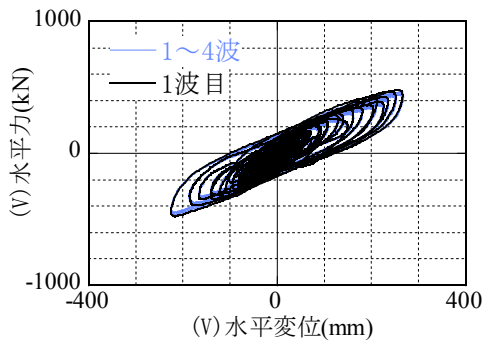
(a) 1 方向 NS 入力



(b) 1 方向 EW 入力

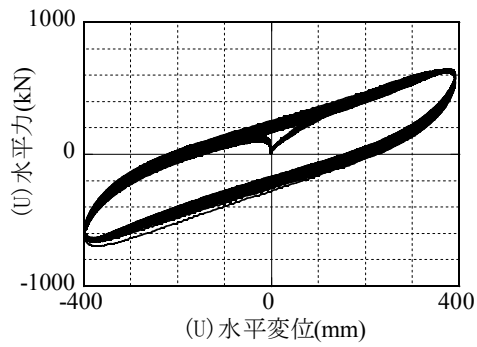


(c) 2 方向同時入力 NS 成分

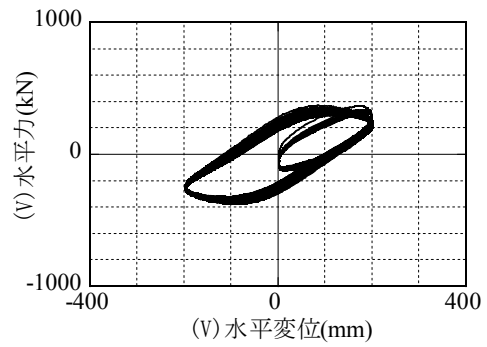


(d) 2 方向同時入力 EW 成分

図 2.2.2-6 地震応答波加振の荷重変形関係



(a) U 方向成分(長軸方向)



(b) V 方向成分(短軸方向)

図 2.2.2-7 楕円加振(5 サイクル×12 回)の荷重変形関係

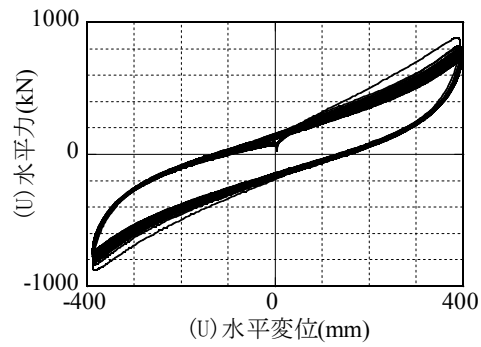


図 2.2.2-8 1 方向正弦波加振(5 サイクル×12 回)の荷重変形関係

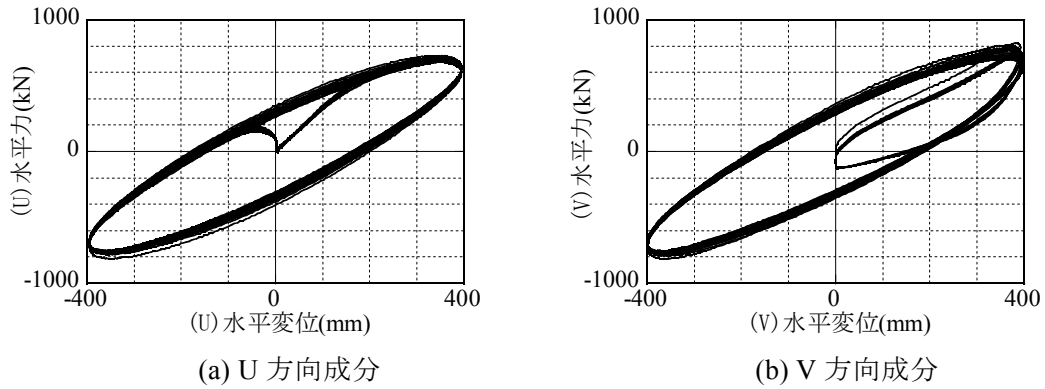


図 2.2.2-9 真円加振(3 サイクル×7 回)の荷重変形関係

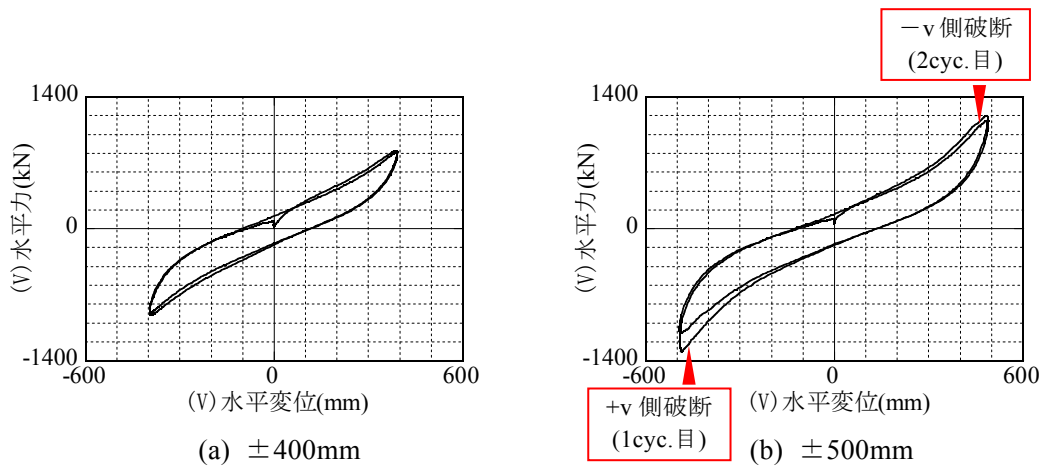


図 2.2.2-10 大振幅加振(2 サイクル)の荷重変形関係

6.3) 試験体の温度推移

図 2.2.2-11～2.2.2-16 に、実験時の試験体の温度変化を示す。

図 2.2.2-11 に示す、地震応答波の 1 方向入力時において、試験体のゴム温度は NS 方向入力で 1.3℃、EW 方向入力で 2.7℃上昇した。EW 方向入力時に、試験体中心部のゴム温度を測定する熱電対 C1 が断線し計測不能となった。図 2.2.2-12 に示す、地震応答波の 2 方向同時入力時においては、4 回連続入力の 1 回目の入力で 3.6℃ゴム温度が上昇した。地震応答波 2 方向の 4 回連続入力の 2 回目で、試験体のゴム部分の中心温度を測定する 2 点の熱電対のうちの 1 点である C4 が断線し計測不能となった。地震応答波加振は、1 方向入力と 2 方向入力を合わせて累積変形量 100m に達する加振であるが、この加振によるゴムの温度上昇は約 13℃と比較的小さかった。

図 2.2.2-13 に、楕円加振時の試験体の温度変化を示す。楕円加振時においては、インターバルをはさまない 5 サイクルの加振で 10℃弱ゴム部の中心温度が上昇し、ゴム部中心温度は最高 74℃まで上昇した。ただし、放射温度計によるゴムの表面温度は 52℃であった。フランジは、楕円繰返し加振により中央部の上面、下面で 7℃程度温度が上昇したが、最外端ではほとんど温度変化が生じなかった。楕円加振の 5 サイクル×8 回目の入力において、ゴムの表面温度を測定する熱電対 C3 の値が、これまでほぼ一致していた放射温度計の値よりも小さくなり、加振中においても温度が低下している。このことから、この時に熱電対 C3 が抜け出てしまったと考えられ、値は出ているものの適切に計測できていないと見られる。

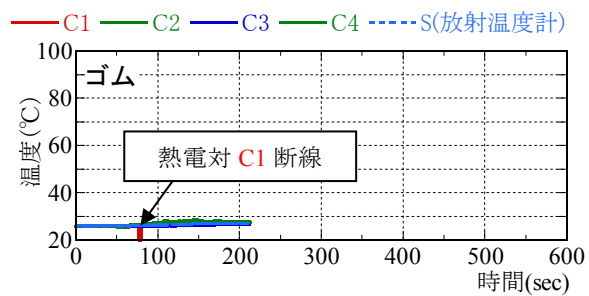
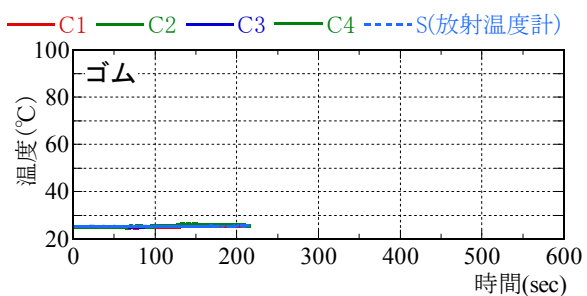
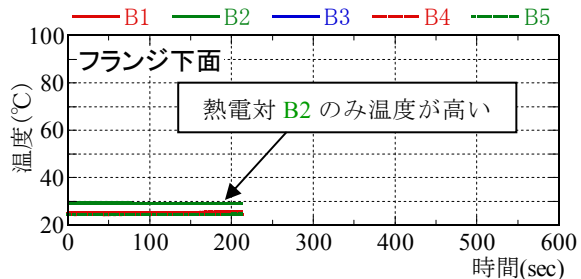
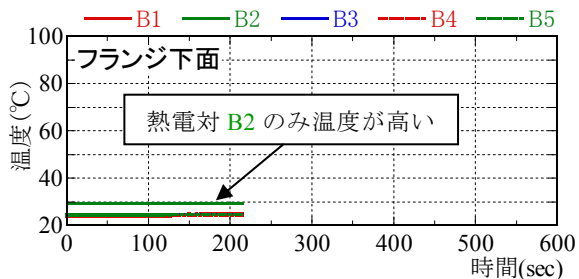
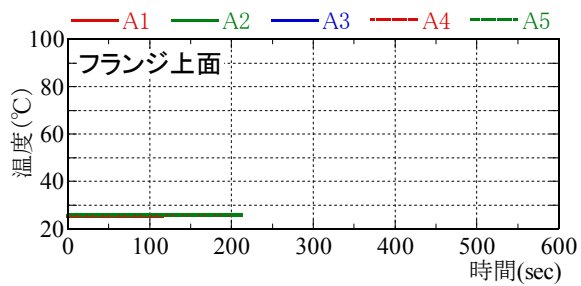
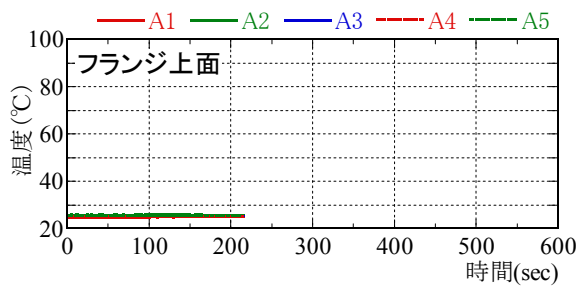
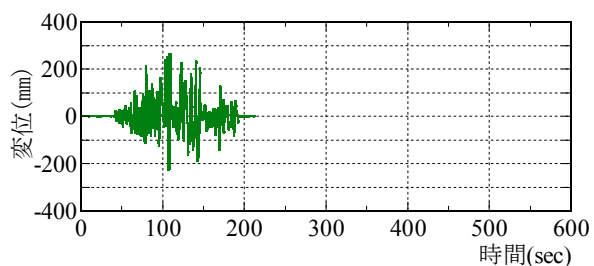
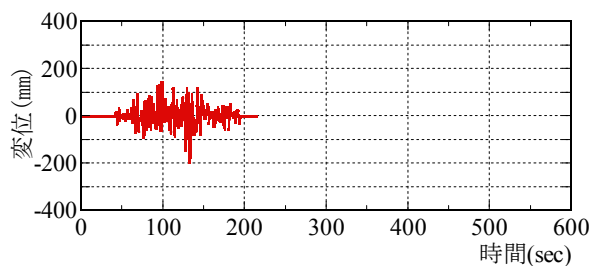
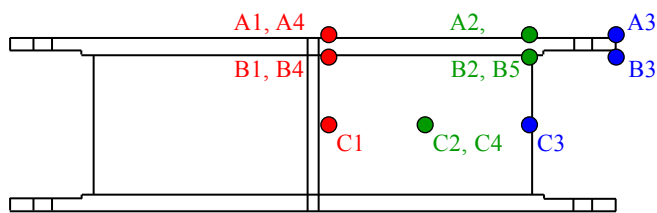
図 2.2.2-14 に、1 日目の加振終了時からの試験体の温度低下を示す。ゴム中心部の温度低下は非常に緩やかで、加振により 70℃程度まで上昇した温度は約 14 時間後においても 40℃程度までしか低下しなかった。

図 2.2.2-15 に示す、1 方向正弦波繰返し加振においては、インターバルをはさまない 5 サイクルの加振で 5℃程度ゴム部の中心温度が上昇し、ゴム部中心温度は最高 59℃まで上昇した。放射温度計によるゴム表面温度は、最高 43℃であった。

図 2.2.2-16 に示す、真円加振においては、インターバルをはさまない 3 サイクルの加振で 10℃強ゴム部の中心温度が上昇し、ゴム部中心温度は最高 86℃まで上昇した。放射温度計によるゴム表面温度は最高 53℃であった。

図 2.2.2-17 に、各加振ケースの単位ゴム体積当たりの累積エネルギー E/V と温度増分の関係と比較して示す。1 方向正弦波加振、楕円加振、真円加振といった正弦波による繰返し加振は累積エネルギーと温度増分の関係がほぼ等しいが、地震応答波加振は正弦波による繰返し加振と比較すると、同じエネルギー量でも温度上昇が小さい。これは、正弦波による繰返し加振は大振幅によるエネルギーが連続的に入力されるのに対し、地震応答波においては、大振幅によるエネルギー入力は数回、断続的に生じるためと考えられる。

以上より、地震応答波による試験体の温度上昇は比較的小さく、1 方向繰返し加振、楕円加振、真円加振といった正弦波の繰返しによる加振はエネルギーが連続的に入力され続けるため、試験体の温度上昇に対して非常に厳しい条件であることがわかる。



(a) 1方向 NS 入力

(b) 1方向 EW 入力

図 2.2.2-11 地震応答波加振(1 方向入力)時の変位時刻歴と試験体の温度推移

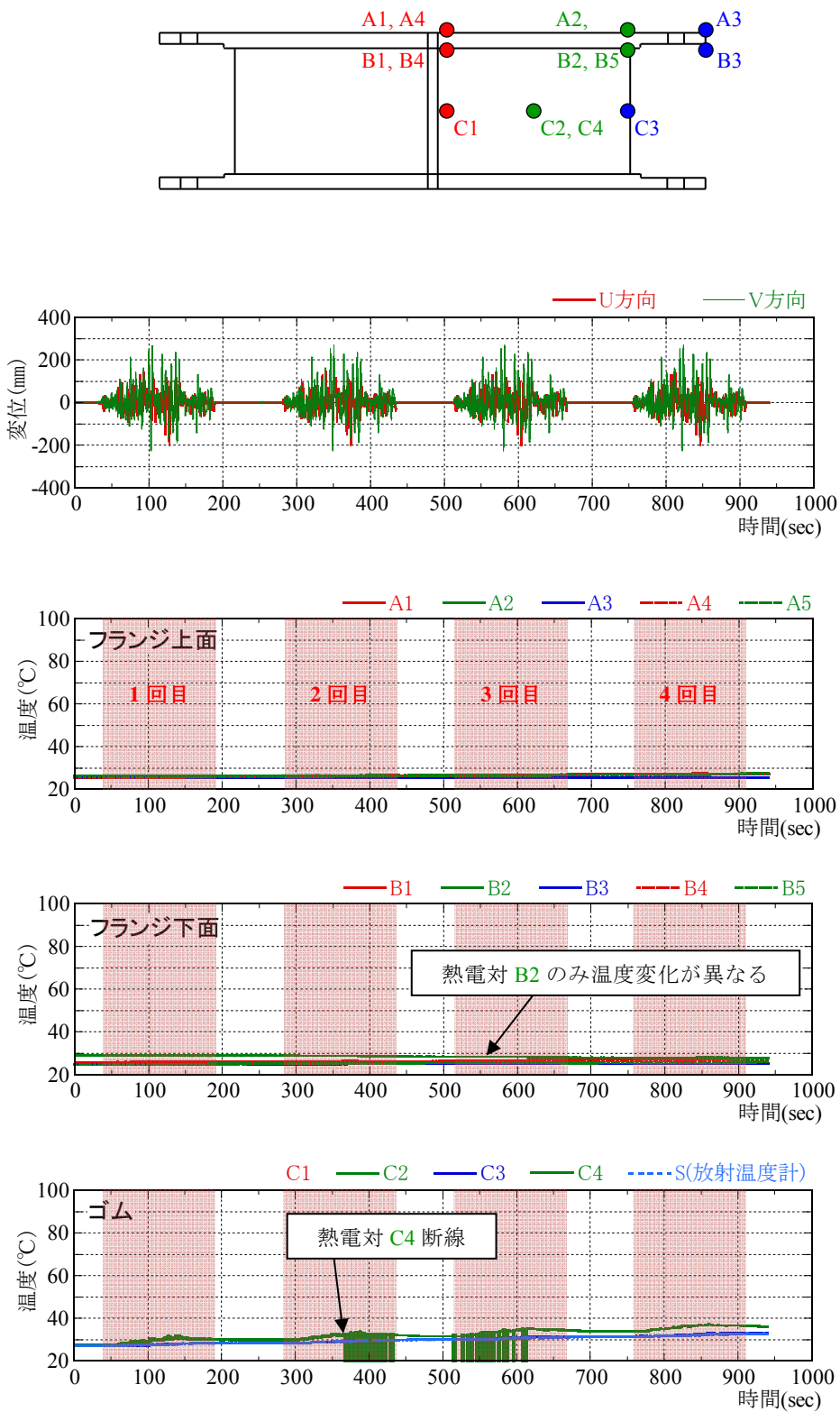
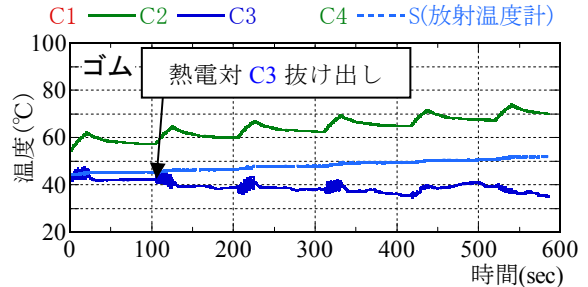
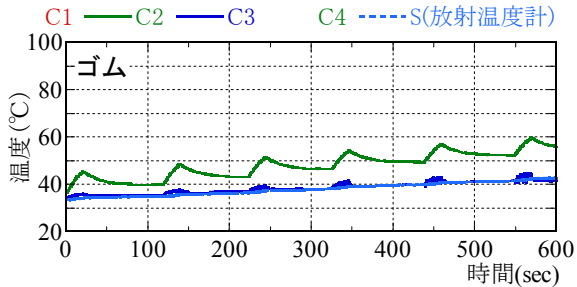
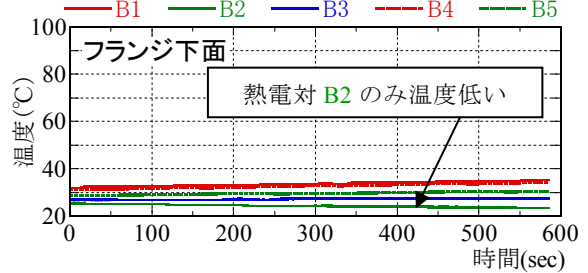
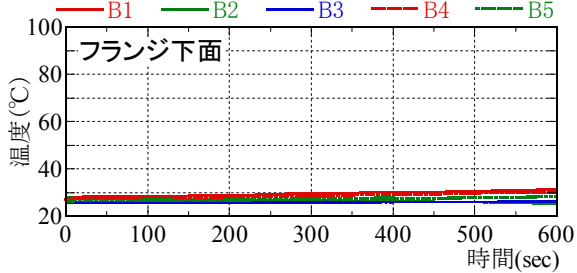
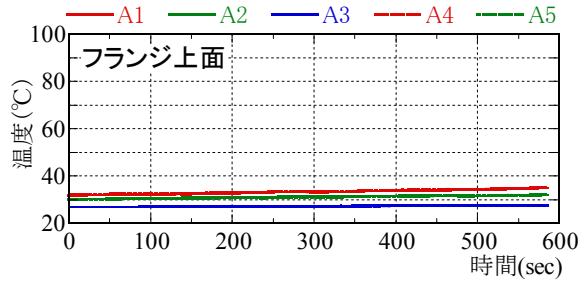
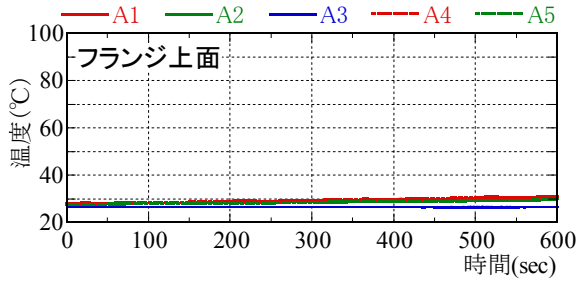
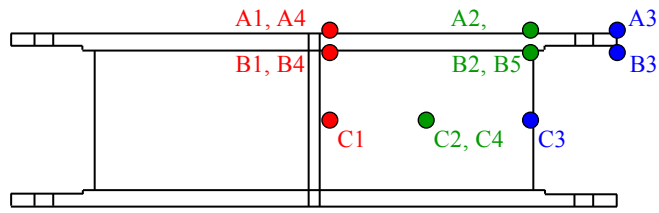


図 2.2.2-12 地震応答波加振(2方向同時入力)時の変位時刻歴と試験体の温度推移



(a) 5 サイクル×1~6 回目

(b) 5 サイクル×7~12 回目

図 2.2.2-13 楕円加振時の試験体の温度推移

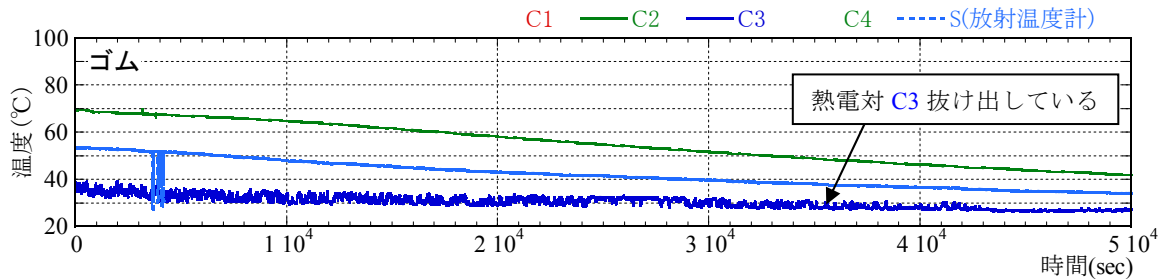
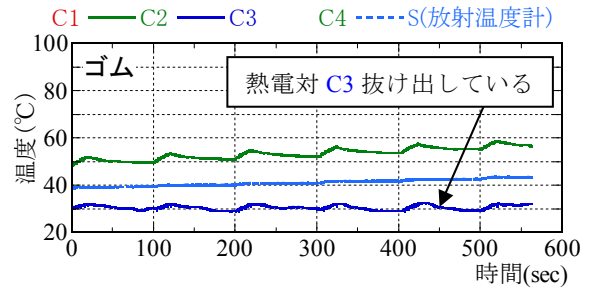
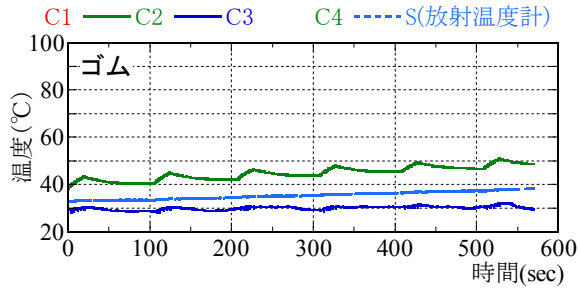
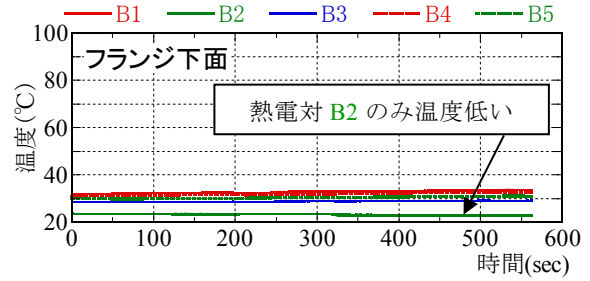
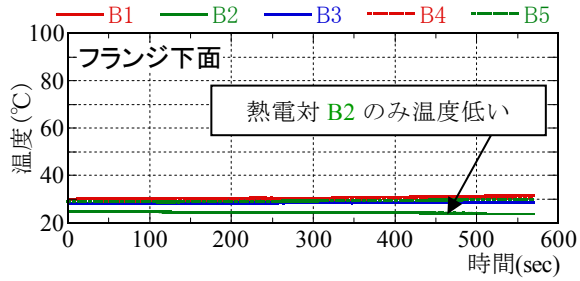
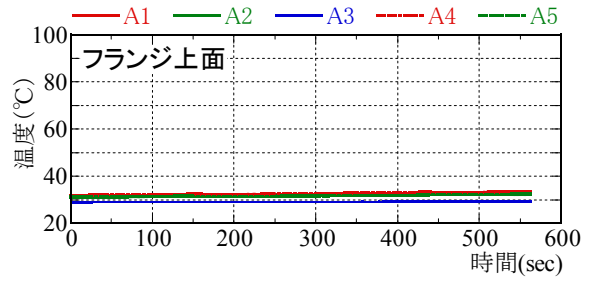
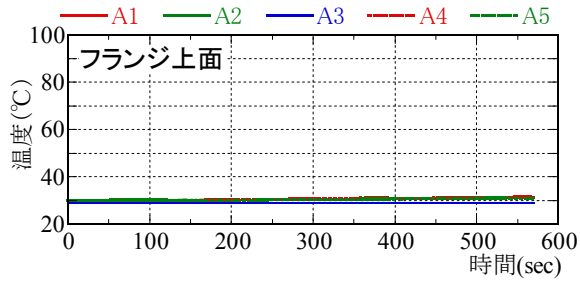
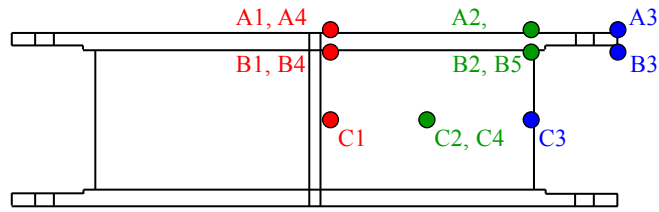


図 2.2.2-14 1 日目加振終了後の試験体の温度低下



(a) 5 サイクル×1~6 回目

(b) 5 サイクル×7~12 回目

図 2.2.2-15 1 方向正弦波加振時の試験体の温度推移

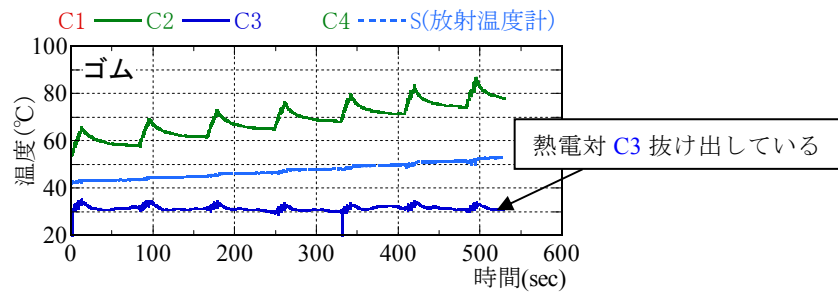
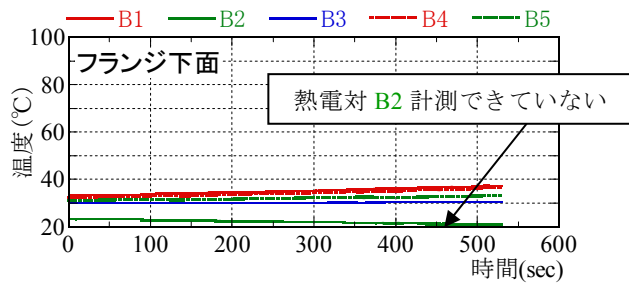
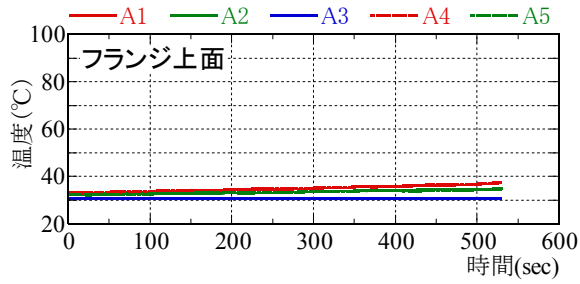
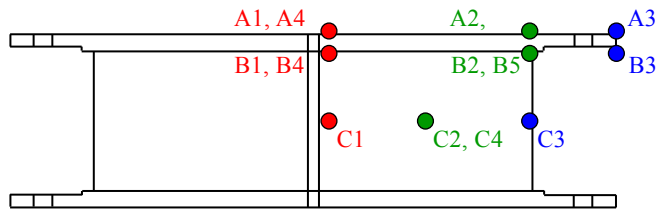


図 2.2.2-16 真円加振時(3 サイクル×7 回)の試験体の温度推移

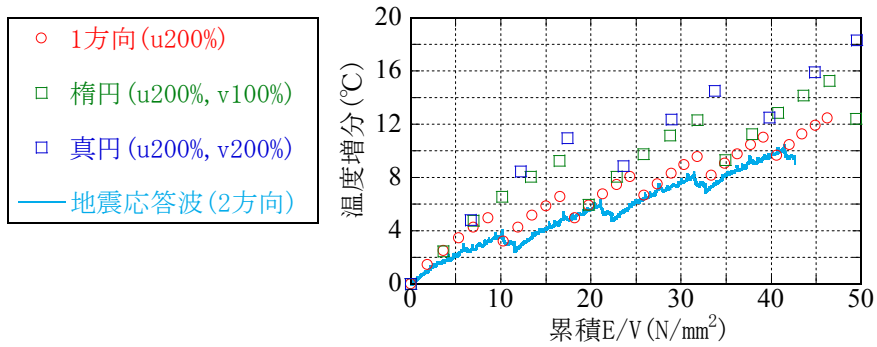


図 2.2.2-17 加振ケースによる温度増分の比較

6.4) 基本特性の変化

図 2.2.2-18 に、各加振ケース間に実施した基本特性試験の荷重変形関係を示す。1 日目に行った基本特性①～③を比較すると、加振が進むにつれて履歴ループが細くなり、また最大変形時の荷重が小さくなっているのがわかる。1 日目の加振により、試験体のゴム温度は 70°C 程度まで上昇した。基本特性③から④の間は約 17 時間の冷却時間をはさんでいるが、試験体の温度は 40°C 弱までしか低下せず、履歴ループも基本特性①の状態までは復帰していない。2 日目に行った基本特性④～⑥を比較すると、基本特性⑤、⑥とも④よりもややループが細くなっている。ただし、最大変形時の荷重は⑤よりも⑥の方が大きい。

表 2.2.2-4 に、各基本特性の 3 サイクル目の等価剛性 K_{eq} 、等価減衰定数 H_{eq} を示す。表中の温度は、3 サイクル目の加振開始時の温度である。実験値においては、 K_{eq} 、 H_{eq} とも温度が高いほど低下する傾向があるが、基本特性⑥(76°C)においては、基本特性⑤(57°C)よりも K_{eq} が大きい。また、表中には実験値を温度補正して 20°C 時の値に換算した温度補正值も示す。試験体温度が技術資料^{2.2.2-2)}の温度補正式の適用範囲(-10°C～40°C)を超えているため、補正には縮小試験体の実験結果を基に平成 23 年度に提案した、以下の実験式^{2.2.2-3)}を用いる。

$$\left. \begin{aligned} K_{eq}' &= C_K \cdot K_{eq} \\ C_K &= 1.288 - 0.0144T \quad (T \leq 20^\circ\text{C}) \\ C_K &= 1.668 - 0.548 \log(T - 3.45) \quad (T > 20^\circ\text{C}) \end{aligned} \right\} \quad (2.2.2-1)$$

$$\left. \begin{aligned} H_{eq}' &= C_H \cdot H_{eq} \\ C_H &= (-0.0065T + 1.130) \end{aligned} \right\} \quad (2.2.2-2)$$

K_{eq}' 、 H_{eq}' を実験値として、 K_{eq}'/C_K 、 H_{eq}'/C_H により 20°C 時の K_{eq} 、 H_{eq} を算出する。温度補正值の K_{eq} は、地震応答波加振後の基本特性②および 1 方向加振後の基本特性⑤の値は、その前の基本特性の値よりも小さくなっている。しかし、楕円加振後の基本特性③および真円加振後の基本特性⑥の値は、その前の基本特性の値よりも大きくなっており、2 方向加振後に等価剛性が大きくなる傾向が見られる。温度補正值の H_{eq} は、1 日目の値(基本特性①～③)に対し、2 日目の値(基本特性④～⑥)の方が平均的にやや小さくなっており、これは 1 日目の加振による疲労の影響と考えられる。

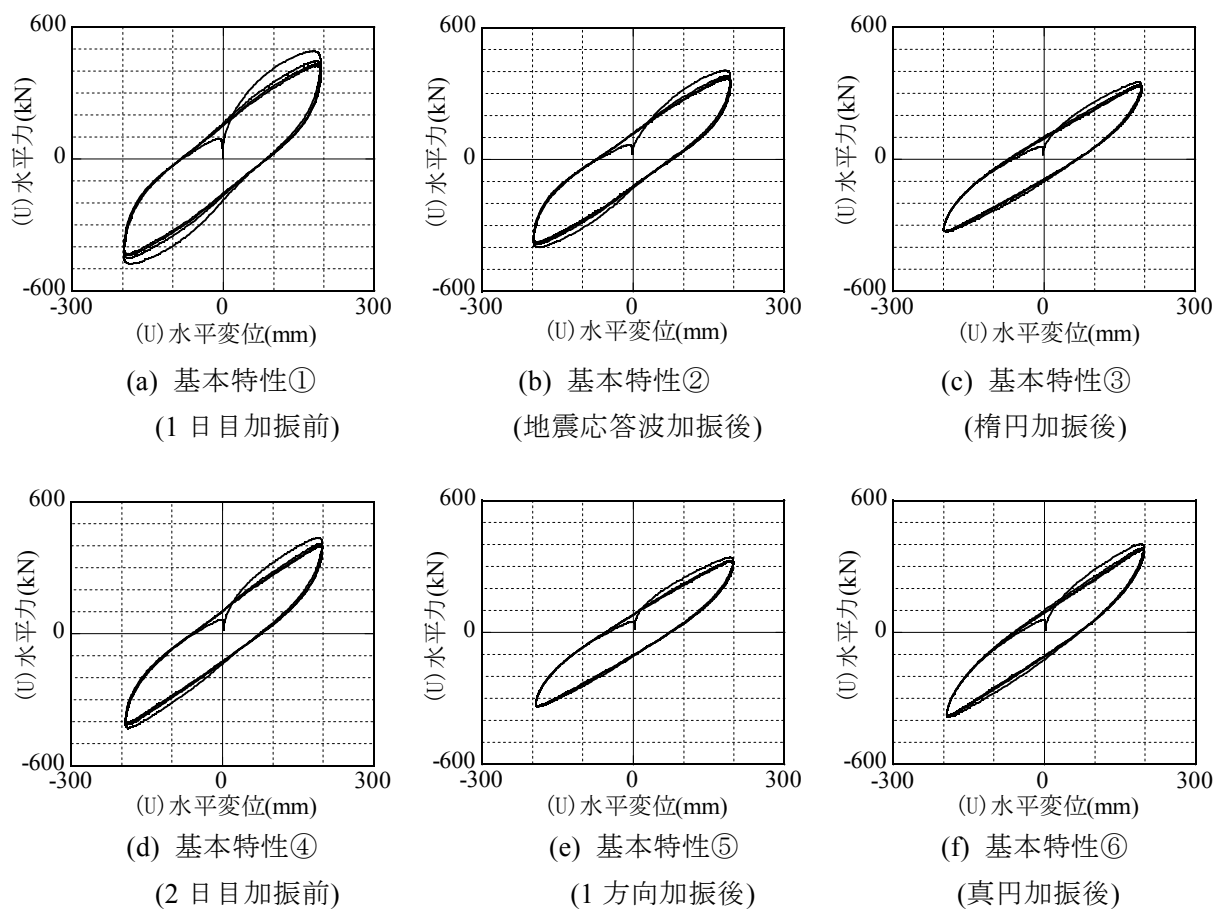


図 2.2.2-18 基本特性の荷重変形関係

表 2.2.2-4 基本特性の荷重変形関係の特性値 (3 サイクル目)

加振ケース	実験値			温度補正值	
	C2 温度 (°C)	K_{eq} (kN/mm)	H_{eq}	K_{eq} (kN/mm)	H_{eq}
基本特性①	24.9	2.23	0.21	2.38	0.21
基本特性②	36.8	1.92	0.18	2.31	0.21
基本特性③	70.0	1.69	0.15	2.53	0.22
基本特性④	38.9	2.07	0.16	2.53	0.18
基本特性⑤	56.7	1.69	0.15	2.33	0.20
基本特性⑥	76.2	1.94	0.14	2.99	0.22

6.5) 破断面の確認

真円加振において内部剥離、およびその後の大振幅加振において被覆ゴムの破れが生じたので、実験後の試験体を切断し試験体の内部の状態を確認した。図 2.2.2-19 に、切断部位を示す。大振幅加振の加振方向である V 方向に沿って試験体を 2 分割し、その後フランジとゴムが分離していると推定した範囲で試験体を再分割した。

写真 2.2.2-5 に、切断面の様子を示す。剥離が生じたのは上端の第 1 層のみであり、他層は健全な状態を維持していた。

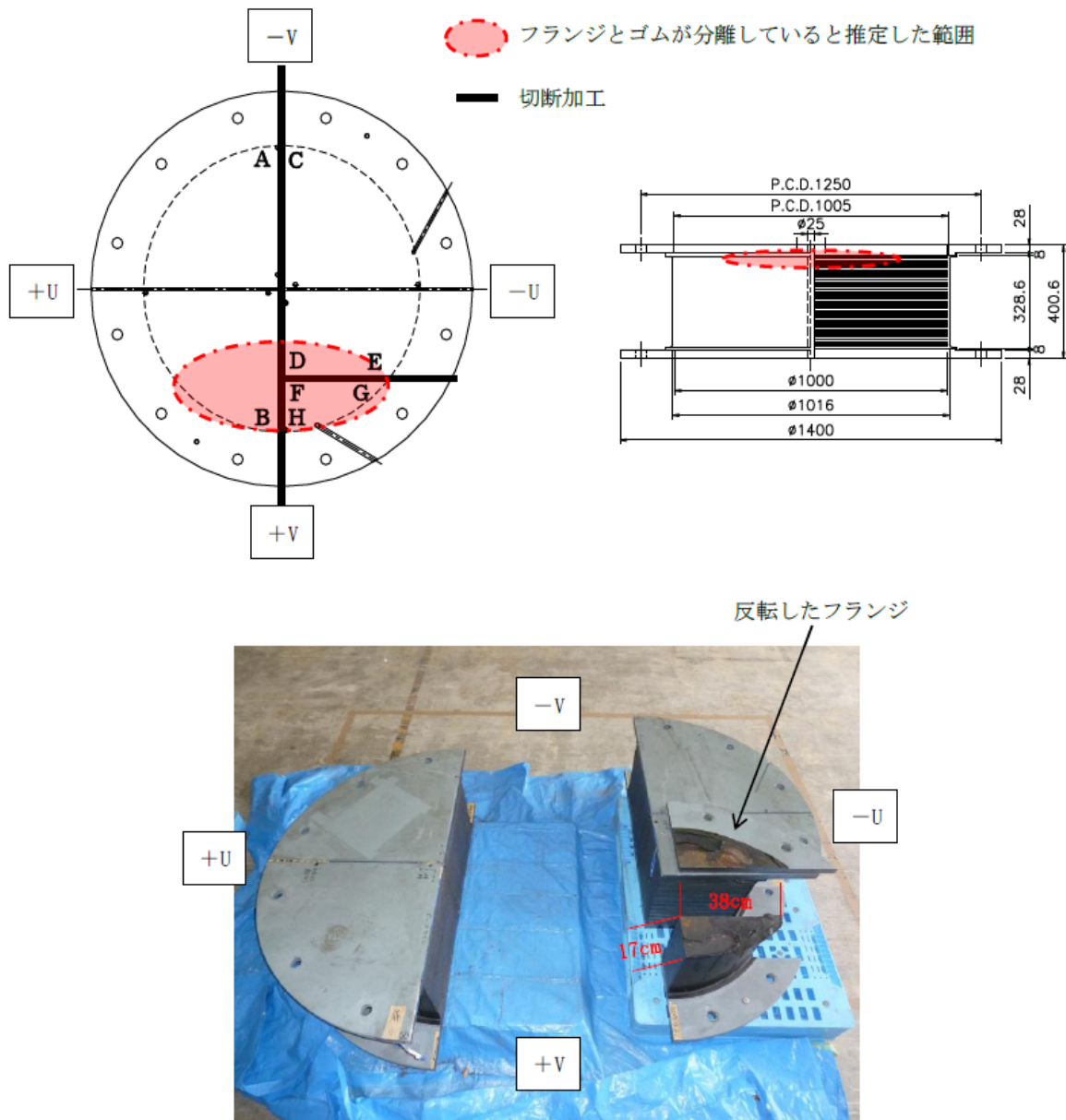
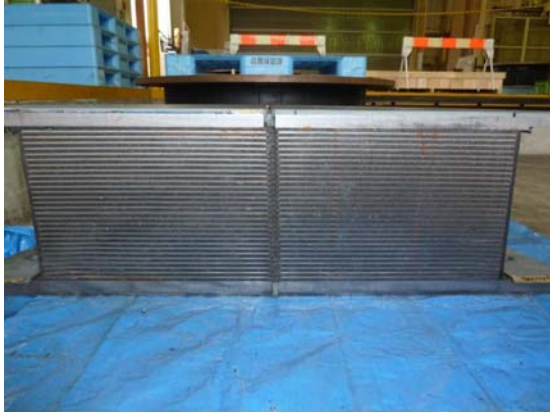


図 2.2.2-19 試験体の切断部位



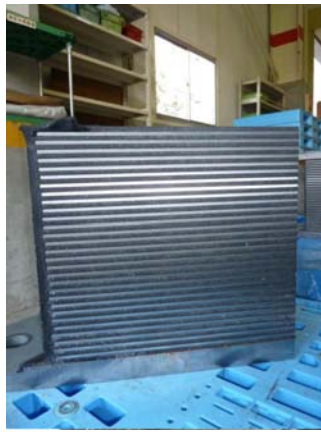
(a) A-B 断面



(b) C-D 断面



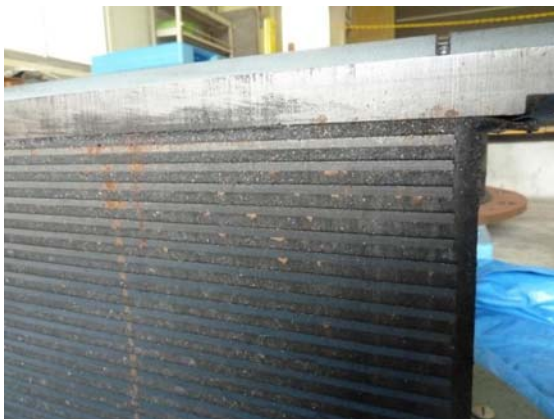
(c) D-E 断面



(d) F-G 断面



(e) F-H 断面



(f) A 付近拡大



(g) B 付近拡大

写真 2.2.2-5 実験終了後の試験体の切断面



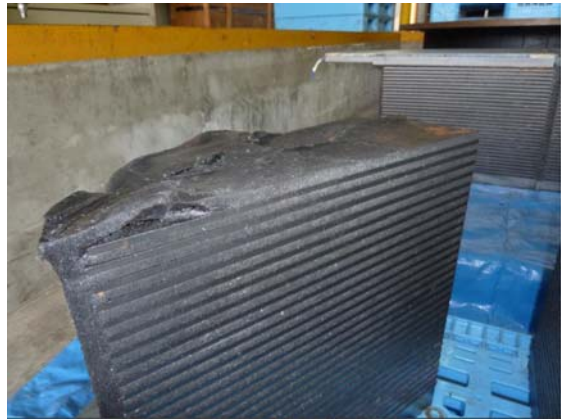
(h) D 付近拡大



(i) E 付近拡大



(j) F-H 拡大



(k) G 付近拡大



(l) 左：反転したフランジ、右：ゴム破断面
(※オレンジ色の部分は水系切削液により生じた錆)

写真 2.2.2-5 実験終了後の試験体の切断面

(7) 1 方向特性の縮小試験体(250φ)と実大試験体(1000φ)の比較

平成 22 年度に実施した縮小試験体(250φ)の実験結果^{2.2.2-1)}と、実大試験体(1000φ)の実験結果の 1 方向繰返し特性を比較する。比較には、実大試験体の水平 1 方向繰返し加振($\gamma=200\%$, 5cyc. \times 12 回)と、縮小試験体の限界 3($\gamma=200\%$, 250cyc.)の実験結果を用いる。表 2.2.2-5 に、縮小と実大の試験体諸元を示す。ただし、縮小と実大で実験条件が同一でないため、両者の実験条件を比較し必要な補正を行う。

表 2.2.2-5 高減衰ゴム系積層ゴム試験体概要

	外径 (mm)	内径 (mm)	ゴム層厚	内部鋼板厚 (mm)	S1	S2
縮小	250	10	1.7mm \times 30 層=51mm	1.2	35.3	4.9
実大	1000	25	6.7mm \times 30 層=201mm	4.4	36.4	4.98

$$G_{eq}(\gamma=100\%時) = 0.620\text{N/mm}^2$$

7.1) 実験条件の違いによる補正值の検討

■ 製品ばらつき

縮小試験体と実大試験体の製品検査の結果から、製品ばらつきによる両者の特性値の差を確認する。縮小試験体は計 4 体を実験に使用したが、限界3の試験ケースを実施した試験体 1 について比較を行う。面圧 15N/mm²、せん断ひずみ $\gamma=\pm 100\%$ の製品検査結果を表 2.2.2-6 に示す。表 2.2.2-6 は、技術資料^{2.2.2-2)}に基づく温度および速度による補正を行った値である。等価減衰定数 H_{eq} は、両者でほぼ同値である。等価せん断弾性係数 G_{eq} は、縮小が設計値より+、実大が設計値より-であるため、実大は縮小より 6%小さい値となっている。

表 2.2.2-6 縮小と実大の製品検査結果比較

	K_{eq} (kN/mm ²)	G_{eq} (N/mm ²)	H_{eq}	対設計値 K_{eq}	対設計値 H_{eq}
設計値	(縮) 0.596 (実) 2.420	0.620	0.240	—	—
縮小	0.609	0.633	0.254	+2.2%	+5.7%
実大	2.329	0.596	0.253	-3.8%	+5.4%

■ 実験実施時の基本特性

実験実施時の最初に加振した基本特性(製品検査以外の経験変形なし)の結果を比較し、実験時の加振周期 4.0 秒による基本特性の差を確認する。ただし、縮小と実大で温度および面圧の条件が異なるためこれを補正する。温度の補正については、技術資料^{2.2.2-2)}の温度補正式を用いる。面圧の補正については、実大試験体の製品検査時に 3、5、15N/mm²の 3 水準の面圧にて実施した結果を用いて、面圧 5N/mm²で実施した実大試験体の結果を 15N/mm²に補正して縮小試験体と条件を合わせる。表 2.2.2-7 に実大試験体の 3 水準の面圧下の検査結果を示す。面圧

5N/mm²と15N/mm²の結果を比較すると、等価剛性はほぼ同じだが、等価減衰定数は面圧5N/mm²時は面圧15N/mm²時よりも1割程度小さいため、この差を補正值として補正を行う。また、製品検査結果より縮小と実大の間で等価せん断弾性係数にばらつきが見られたのでこれを補正し、製品ばらつきの影響を除く。以上の補正を行った実験時の最初の基本特性試験について、表2.2.2-8に等価せん断弾性係数 G_{eq} の比較を、表2.2.2-9に等価減衰定数 H_{eq} の比較を示す。 G_{eq} は実大が縮小よりも6.5%大きく、 H_{eq} は実大が縮小よりも3%小さくなっている。

表 2.2.2-7 実大試験体の製品検査結果

面圧(N/mm ²)	K_{eq} (kN/mm)	$K_{eq}/K_{eq}(15)$	H_{eq}	$H_{eq}/H_{eq}(15)$
3.0	2.265	0.985	0.225	0.974
5.0	2.299	1.000	0.231	1.000
15.0	2.329	1.013	0.253	1.095

表 2.2.2-8 縮小と実大の最初の基本特性の等価せん断弾性係数 G_{eq} 比較

	面圧 (N/mm ²)	温度 (°C)	実験値 (N/mm ²)	製品ばらつき 補正	面圧 補正	温度 補正	補正值 (N/mm ²)
縮小	15	20	0.585	-2.2%	-	0%	0.572
実大	5	25.3	0.571	+3.8%	-	+2.9%	0.610

※ G_{eq} は面圧依存性なしとする。

表 2.2.2-9 縮小と実大の最初の基本特性の等価減衰定数 H_{eq} 比較

	面圧 (N/mm ²)	温度 (°C)	実験値	製品ばらつき 補正	面圧 補正	温度 補正	補正值
縮小	15	20	0.238	-	-	0%	0.238
実大	5	25.3	0.206	-	+9.5%	+2.0%	0.230

※ H_{eq} の面圧依存性は、実大の製品検査結果より補正值を設定。

■ 経験変形の違い

表2.2.2-10に、縮小試験体と実大試験体が、比較に用いる $\gamma=\pm 200\%$ の加振ケース前に経験した加振ケースと累積変形量を示す(製品検査分は省略)。両者とも200m以上の累積変形を経験している。ただし、縮小試験体は水平1方向の加振のみであるのに対し、実大試験体は水平2方向の地震応答波、および楕円加振を経験している。5.4)の基本特性の変化において、楕円加振や真円加振後には等価剛性が大きくなる傾向が見られたことから、縮小、実大の $\gamma=\pm 200\%$ での1方向繰返し加振の直前に実施した基本特性を比較し、経験変形による試験体状態のばらつきを確認する。ただし、温度、面圧の条件が異なるため、実験実施時の基本特性を比較する際

と同様の補正を行って比較する。表 2.2.2-11 に等価せん断弾性係数 G_{eq} 、表 2.2.2-12 に等価減衰定数 H_{eq} の実大試験体と縮小試験体の値を比較して示す。 G_{eq} は実大が縮小よりも 26%大きく、 H_{eq} は実大が縮小よりも 5%小さい。

表 2.2.2-10 縮小と実大の累積経験変形量の比較

縮小試験体		実大試験体	
加振ケース	累積変形量(m)	加振ケース	累積変形量(m)
基本特性 (100%×4cyc.)	0.8	基本特性 (100%×4cyc.)	3.2
限界 1 (50%×1000cyc.)	104.0	地震応答 NS	11.3
(直後)基本特性 (100%×4cyc.)	0.8	地震応答 EW	15.3
(後)基本特性 (100%×4cyc.)	0.8	地震応答 2 方向	83.2
基本特性 (100%×4cyc.)	0.8	基本特性 (100%×4cyc.)	3.2
限界 2 (100%×500cyc.)	102.0	楕円 60cyc.	116.0
(直後)基本特性 (100%×4cyc.)	0.8	基本特性 (100%×4cyc.)	3.2
(後)基本特性 (100%×4cyc.)	0.8	基本特性 (100%×4cyc.)	3.2
基本特性 (100%×4cyc.)	0.8		
計	211.7	計	238.6

表 2.2.2-11 縮小と実大の $\gamma=200\%$ 繰返し加振直前の基本特性の等価せん断弾性係数 G_{eq} 比較

	面圧 (N/mm ²)	温度 (°C)	実験値 (N/mm ²)	製品ばらつき 補正	面圧 補正	温度 補正	補正值 (N/mm ²)
縮小	15	23	0.514	-2.2%	-	+1.6%	0.510
実大	5	39.2	0.530	+3.8%	-	+17.0%	0.643

※ G_{eq} は面圧依存性なしとする。

表 2.2.2-12 縮小と実大の $\gamma=200\%$ 繰返し加振直前の基本特性の等価減衰定数 H_{eq} 比較

	面圧 (N/mm ²)	温度 (°C)	実験値	製品ばらつき 補正	面圧 補正	温度 補正	補正值
縮小	15	23	0.207	-	-	+1.0%	0.209
実大	5	39.2	0.161	-	+9.5%	+13.0%	0.199

※ H_{eq} の面圧依存性は、実大の製品検査結果より補正值を設定。

7.2) 実験条件の違いを考慮した縮小と実大の復元力特性値の比較

7.1)より、縮小試験体と実大試験体の実験条件の違いとして、面圧の違い、製品ばらつき、実験実施時の基本特性の違い、経験変形の違いを考慮すると、実大試験体の実験結果に表 2.2.2-13 のような補正が必要と考えられる。図 2.2.2-20 に、 $\gamma=\pm 200\%$ による繰返し加振実験結果の K_{eq} と H_{eq} の温度による推移を縮小試験体と実大試験体の結果を比較して示す。実大試験体の結果は、補正前の値と表 2.2.2-13 による補正後の値を両方示す。補正前の実大試験体の結果は縮小試験体の結果と差があるが、補正後の値は縮小試験体の結果におおよそ一致している。

図 2.2.2-21 に、縮小試験体の実験結果を基に提案した^{2.2.2-3)}、試験体の代表温度による復元力特性値の低下率評価式と、実大実験結果の復元力特性値の低下率を比較して示す。提案評価式を式(2.2.2-1)～式(2.2.2-3)に示す (式(2.2.2-1)と式(2.2.2-2)は再掲)。

$$\left. \begin{aligned} K_{eq}' &= C_K \cdot K_{eq} \\ C_K &= 1.288 - 0.0144T \quad (T \leq 20^\circ\text{C}) \\ C_K &= 1.668 - 0.548 \log(T - 3.45) \quad (T > 20^\circ\text{C}) \end{aligned} \right\} \quad (2.2.2-1)$$

$$\left. \begin{aligned} H_{eq}' &= C_H \cdot H_{eq} \\ C_H &= (-0.0065T + 1.130) \end{aligned} \right\} \quad (2.2.2-2)$$

$$\left. \begin{aligned} u' &= C_u \cdot u \\ C_u &= (-0.0065T + 1.130) \end{aligned} \right\} \quad (2.2.2-3)$$

この時の試験体温度 T は、ゴムの平均温度を代表する値として、ゴム部中心温度(C2)の値を用いている。実大試験体の実験結果は、表 2.2.2-13 に示す補正を行った値である。水平 1 方向繰返し試験の 3 サイクル目の特性値の 20°C 換算値を基準値として低下率を算出している。降伏荷重特性係数 u については、 H_{eq} と同様の補正值を用いている。提案式は、実大試験体の実験結果とよく一致しており、実大サイズにおいても提案式による復元力特性値の低下率の評価が可能であると確認できる。

表 2.2.2-13 実験条件による縮小試験体と実大試験体の実験結果の差

	等価せん断弾性係数 G_{eq}	等価減衰定数 H_{eq}
面圧の違い	0%	+9.5%
製品ばらつき	+6%	0%
基本特性の違い	-6.5%	+3.3%
経験変形の違い	-26%	+5%
計	-25.5%	+17.8%

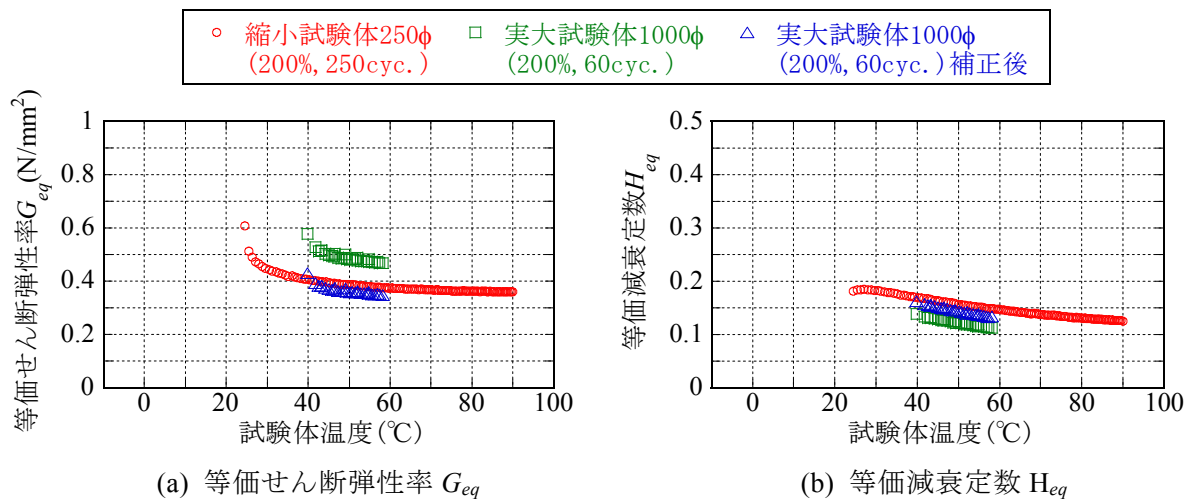


図 2.2.2-20 $\gamma=200\%$ の繰返し加振による試験体温度と G_{eq} 、 H_{eq} の関係

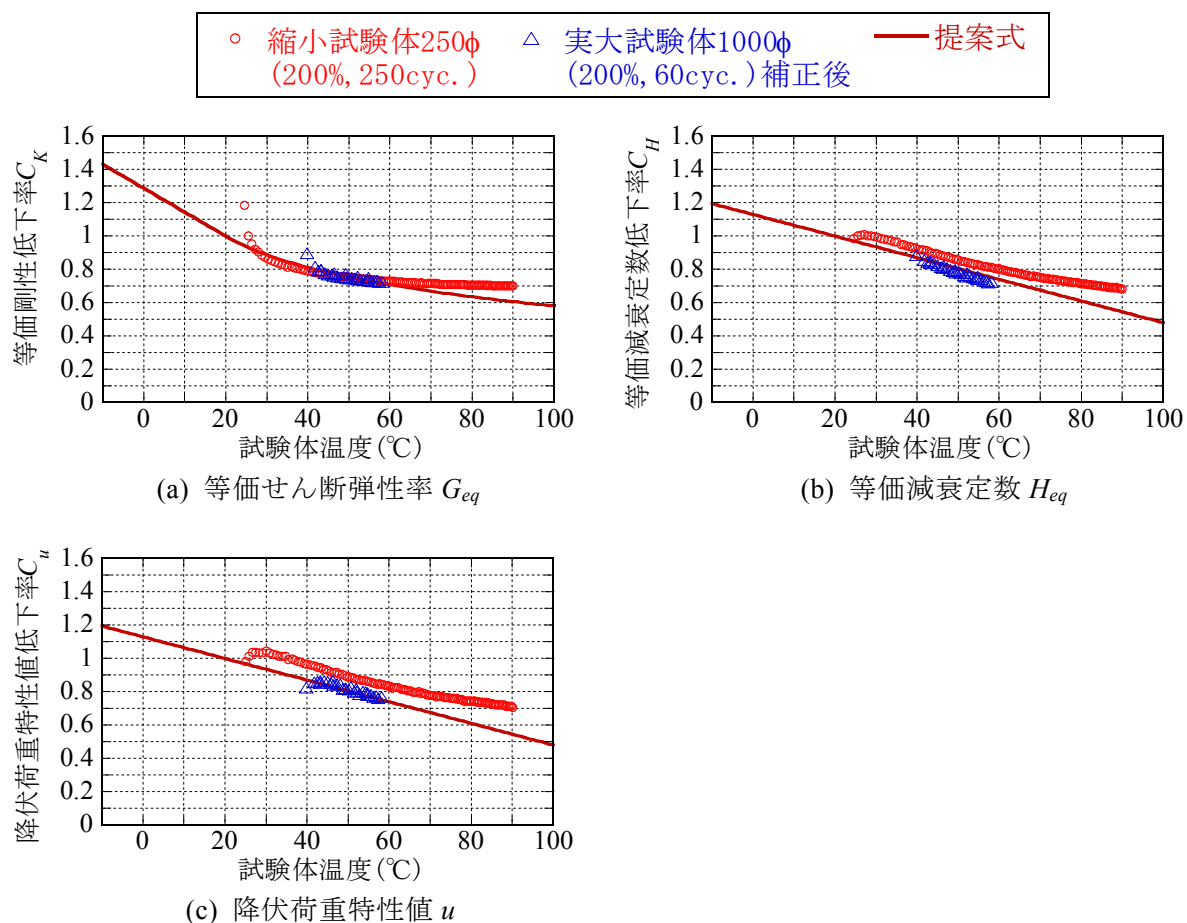


図 2.2.2-21 実大試験体の繰返し加振時の試験体温度と復元力特性値の低下率の関係

7.3) 縮小と実大の吸収エネルギーと試験体温度の関係

図 2.2.2-22 に、縮小試験体と実大試験体の 1 方向繰返し加振時のサイクル数と累積吸収エネルギーの関係を示す。累積吸収エネルギーは単位ゴム体積当たりのエネルギー量 E/V で表している。図 2.2.2-22 中オレンジ色で示す実大試験体($\gamma=200\%$, 60cyc. 加振)の累積吸収エネルギーは、青色で示す縮小試験体の $\gamma=200\%$ による繰返し加振の実験結果よりも小さな値を示している。ただし実験条件の違いから、表 2.2.2-13 に示すように実大試験体の実験値を縮小と比較するには、等価減衰定数で+17.8%の補正が必要であるため、エネルギーについても同様の補正値を用いる。図 2.2.2-22 中ピンク色で示すのが補正を行った実大試験体の値であり、縮小試験体の結果よりもやや小さいが近い値を示している。このことから、加振による単位ゴム体積当たりの累積吸収エネルギーは、加振ひずみ振幅が同じであれば縮小と実大でほぼ同等の値となることが確認できる。

図 2.2.2-23 に、縮小試験体と実大試験体の 1 方向繰返し加振時の累積吸収エネルギー E/V と試験体の温度上昇の関係を示す。試験体温度は、ゴム部中心(C2)の温度である。縮小試験体の累積 E/V と温度上昇の関係は、吸収エネルギー全てが温度上昇に寄与すると仮定した場合のゴムと鋼板の熱容量から算出される理論値に近い値を示しているが、実大試験体のインターバルをはさまない連続 5 サイクル加振による温度上昇は、ゴムの熱容量のみから算出される理論値にほぼ一致した上昇を示している。この累積 E/V と試験体温度上昇の関係の、実大と縮小の間の違いの原因を検討するため、FEM による熱伝導解析を実施した。

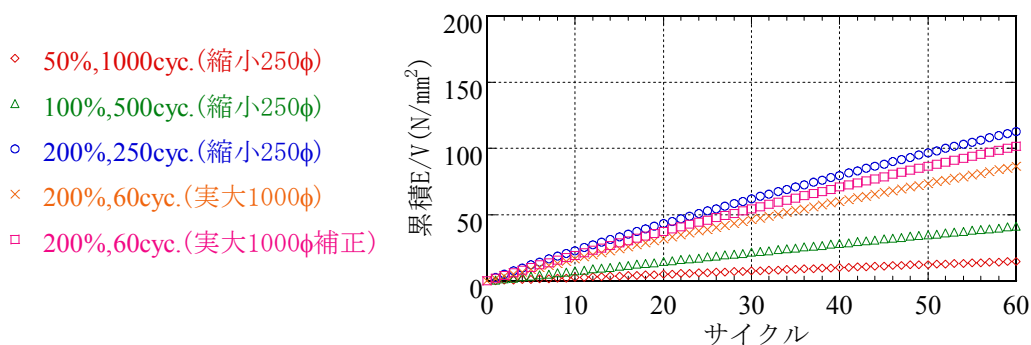


図 2.2.2-22 縮小と実大のサイクル数による累積吸収エネルギー推移の比較

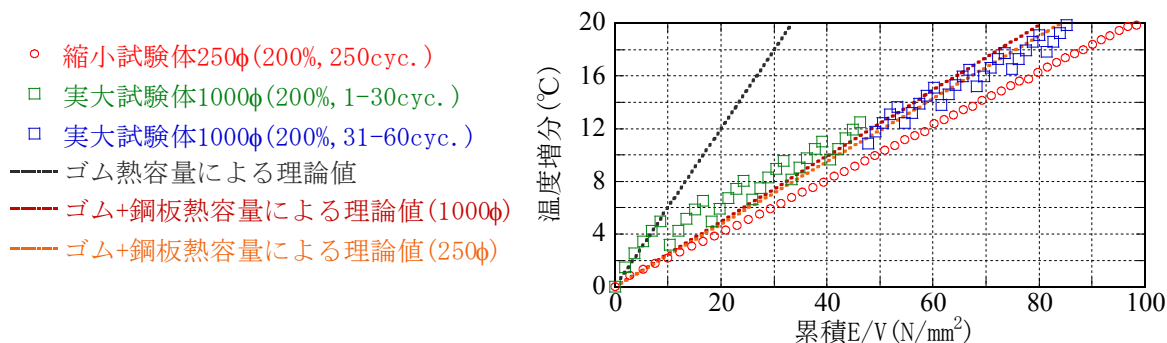


図 2.2.2-23 縮小と実大の累積吸収エネルギーと温度上昇の関係

図 2.2.2-24 に、縮小試験体モデルと実大試験体モデルの解析モデルを示す。また、解析モデルの形状を表 2.2.2-14 に、解析に用いた物性値を表 2.2.2-15 に示す。解析条件は、 $\gamma=200\%$ の 1 方向繰返し加振(加振周期 4.0 秒、50 サイクル)を想定し、200 秒間に積層ゴム内部で一様に発熱すると仮定した。発熱量は、高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R)の $\gamma=200\%$ 変形時における G_{eq} 、 H_{eq} の基準値から算出される単位体積当たりのエネルギー吸収量 $\Delta W(=2\pi G_{eq}H_{eq})$ を用いた。図 2.2.2-25 に、解析結果の試験体温度推移を示す。縮小試験体は、加振中にゴムと鋼板がほぼ同時に温度上昇しているのに対し、実大試験体は鋼板がゴムよりもやや遅れて温度上昇している。図 2.2.2-26 に、解析結果による累積 E/V と温度上昇の関係を示す。縮小試験体は、累積 E/V に対してゴムと鋼板が同等に温度上昇し、ゴムと鋼板の熱容量から算出される理論値にほぼ一致しているが、実大試験体は、鋼板の温度上昇がやや遅れるため加振初期においては理論値よりも大きな温度上昇となっている。

以上より、同じ累積 E/V に対し、実大の実験結果が縮小の実験結果よりも大きな温度上昇を示したのは、実大試験体においては鋼板の温度上昇がゴムの温度上昇よりも遅れるために、加振初期においてはほぼゴムのみの熱容量で温度上昇しているためと考えられる。実大実験は 5 サイクルごとにインターバルをとっているため、実験結果としては加振初期の温度勾配の大きい部分のみが現れていると考えられる。

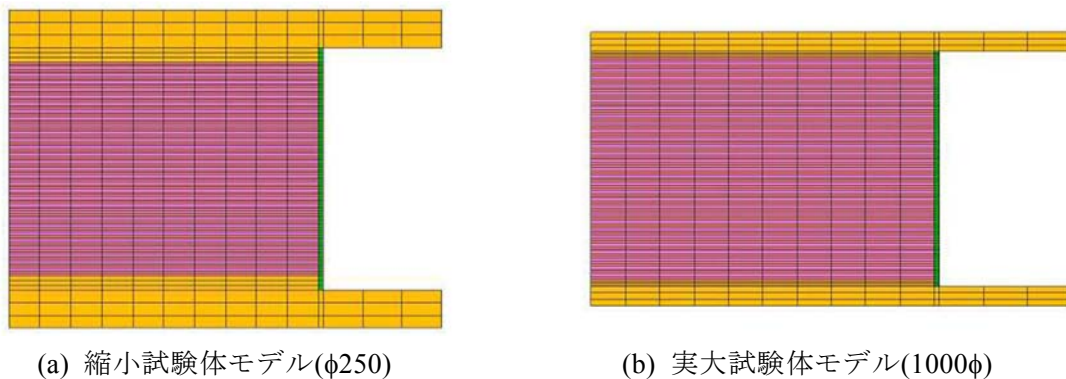


図 2.2.2-24 FEM 解析モデル(軸対称モデル)

表 2.2.2-14 解析モデルの形状

	φ 250	φ 1000
ゴム外径/内径(mm)	250/0	1000/0
ゴム 1 層厚さ(mm)	1.7	6.7
ゴム積層数	30	30
鋼板厚さ(mm)	1.2	4.4
フランジ中央部厚さ/端部厚さ(mm)	21/15	36/28
フランジ外径(mm)	460	1400
外皮ゴム厚さ(mm)	2	8

表 2.2.2-15 解析に用いた物性値

	密度(kg/m ³)	比熱(J/kg・K)	熱伝導率(W/m・K)
内部ゴム	1.15×10 ³	1.45×10 ³	0.310
外皮ゴム	1.15×10 ³	1.88×10 ³	0.289
内部鋼板、フランジ	7.86×10 ³	4.73×10 ²	51.6

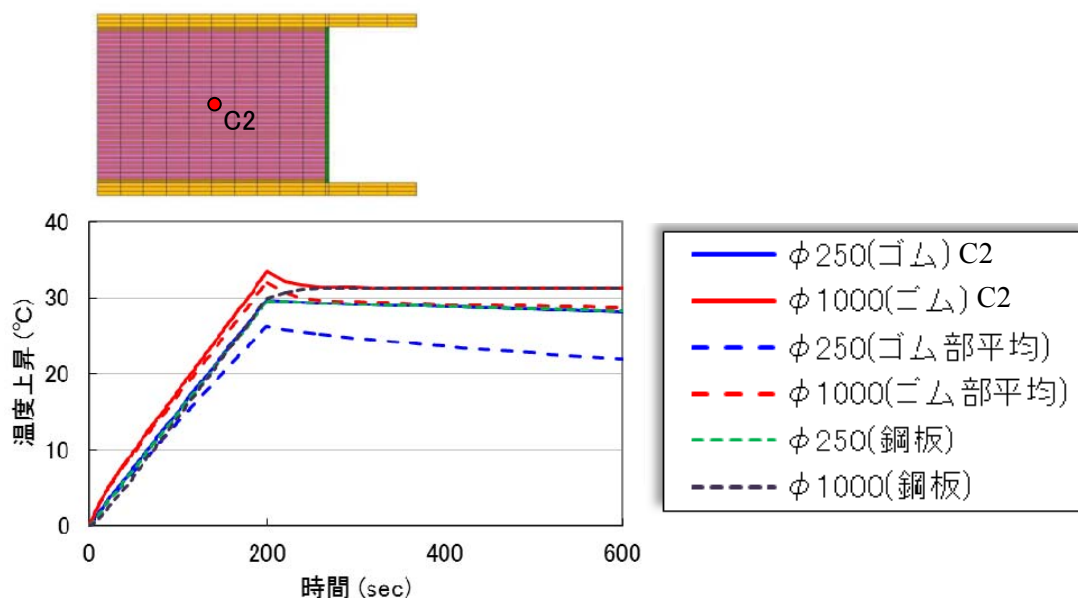


図 2.2.2-25 FEM による熱伝導解析結果の試験体温度推移

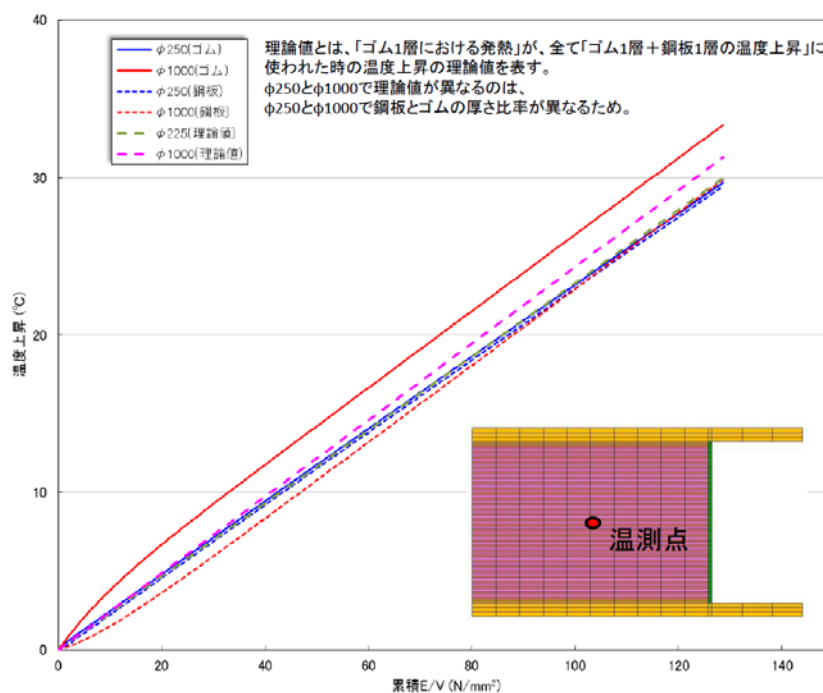


図 2.2.2-26 FEM による熱伝導解析結果の累積 E/V と試験体温度上昇の関係

縮小試験体の実験結果を基に作成した高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し特性を考慮した解析モデルは、試験体温度の算出にゴムと鋼板の熱容量の和を用いている。しかし、実大試験体においては加振初期にはほぼゴムのみの熱容量で温度上昇していることが明らかとなった。図 2.2.2-26 より、加振が続き累積エネルギーが大きくなると、実大試験体においても温度上昇はゴムと鋼板の熱容量の和による理論値の勾配に近くなると考えられるが、長周期地震動により入力されるエネルギーは 25N/mm^2 以下の範囲と予測されることから、地震応答を検討する場合には加振初期の影響が大きいと考えられる。ただし、ゴムの熱容量のみで温度を評価するとエネルギー量の大きな加振に対し、温度を過大に評価してしまう。以上より、ゴムと鋼板の温度上昇に差が生じるような実大サイズの高減衰ゴム系積層ゴムに対しては、以下のような2折れ線で累積エネルギーと試験体温度の関係を評価する。

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{E_{eff}}{C_R} & (E/V \leq 10.0\text{N/mm}^2) \\ T &= \frac{E_{eff}}{(C_R + C_S)} & (E/V > 10.0\text{N/mm}^2) \end{aligned} \right\} \quad (2.2.2-4)$$

ここで、 T は試験体温度、 E_{eff} はゴムの温度上昇に寄与する有効エネルギー、 C_R はゴムの熱容量、 C_S は鋼板の熱容量である。図 2.2.2-27 に、式(2.2.2-4)で表される累積エネルギーと試験体温度の関係を実験結果と比較して示す。

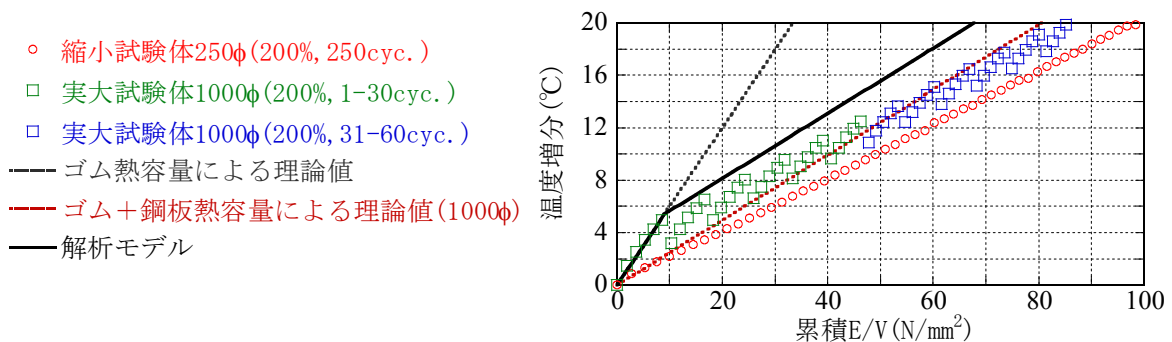


図 2.2.2-27 解析モデルに用いる累積 E/V と試験体温度の関係

7.4) 縮小と実大の放熱特性の比較

図 2.2.2-28 に、縮小試験体と実大試験体の加振終了後のゴム温度の低下を比較して示す。縮小試験体については、実験結果から作成したゴム温度低下の回帰式^{2.2.2-3)}である。実大試験体の温度低下は、縮小試験体に比べて非常に緩やかで 3 時間程度経過しても 5°C 程度しか温度は低下していない。ここで、同一の材料における熱伝導方程式において、縮尺率の 2 乗が時間の縮尺に比例するとして、実大試験体(1000φ)と縮小試験体(250φ)の縮尺率 $1000/250 = 4.0 \rightarrow (4.0)^2 = 16.0 \rightarrow$ 実大試験体の時間軸を 1/16 としてみると、実大試験体の温度低下は縮小試験体の温度低下回帰式とほぼ一致する。従って、放熱については相似則を適用することで試験体のサイズを考慮することが可能であると考えられる。

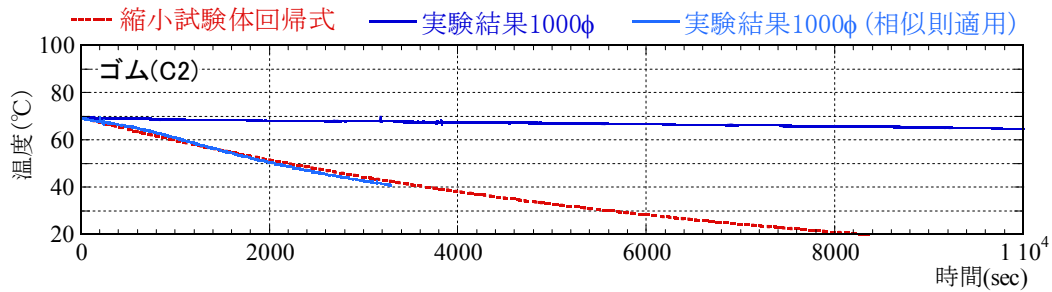
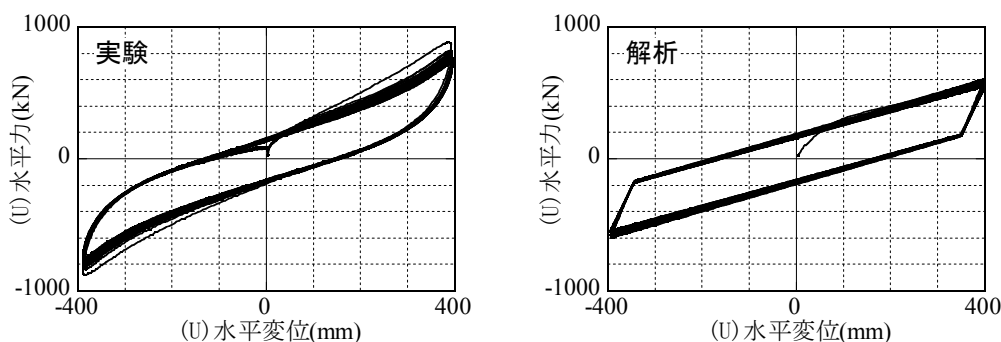


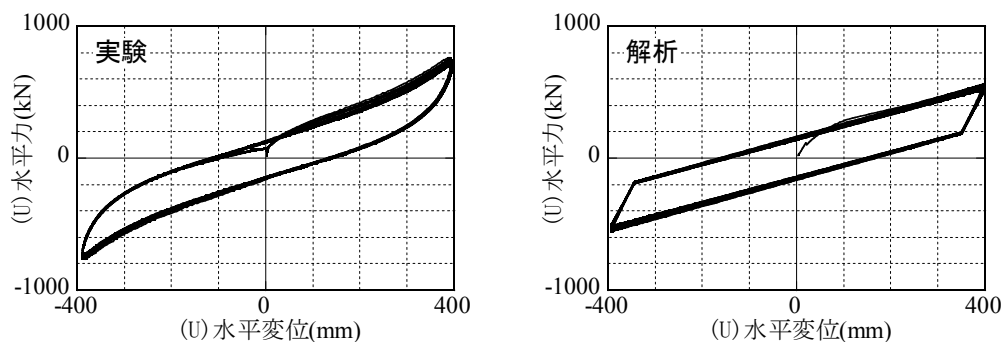
図 2.2.2-28 縮小試験体と実大試験体の加振後の温度低下の比較

(8) 繰返し特性を考慮した解析結果と1方向繰返し加振実験結果の比較

図 2.2.2-29 に、1 方向繰返し加振の実験結果と解析結果の荷重変形関係を比較して示す。解析は、縮小試験体の実験結果から作成した解析モデル^{2.2.2-3)}を用いた。ただし、有効エネルギーと温度の関係には、式(2.2.2-4)を用いた。解析モデルはハードニングを考慮していないため、解析結果の最大荷重は実験結果よりも小さいが、繰返し加振による最大荷重の低下を表現できている。図 2.2.2-30 に、1 方向繰返し加振の実験結果と解析結果のゴム温度の変化を比較して示す。解析結果は、インターバル時の温度低下が実験結果よりも小さいため、全体的に温度を高めめに評価しているが、繰返し加振によるおおよその温度変化を再現できている。

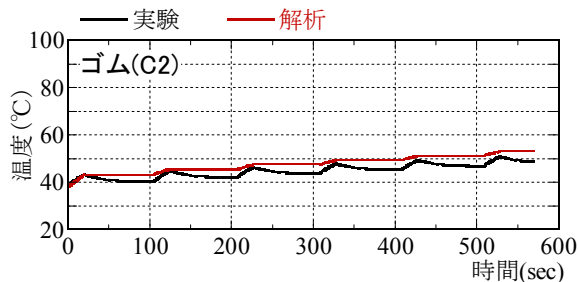


(a) 1 方向繰返し加振 5 サイクル×1~6 回

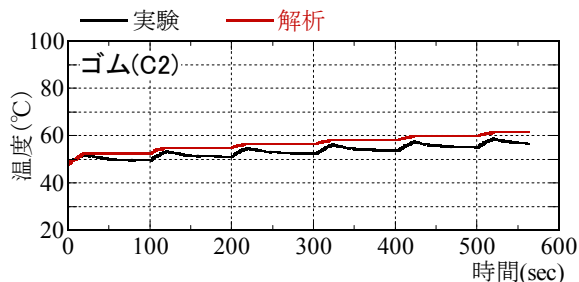


(b) 1 方向繰返し加振 5 サイクル×7~12 回

図 2.2.2-29 実験結果と解析結果の1方向繰返し加振の荷重変形関係の比較



(a) 1 方向繰返し加振 5 サイクル×1~6 回



(b) 1 方向繰返し加振 5 サイクル×7~12 回

図 2.2.2-30 実験結果と解析結果の1方向繰返し加振のゴム温度変化の比較

(9) ねじれひずみの算出

9.1) ねじれひずみの算出方法

試験体に描いたドットを撮影した画像より、楕円加振時、および真円加振時に試験体に生じたねじれひずみの算出を行った。楕円加振については 1/30 秒ごとに画像解析を行い、真円加振については加振速度が速く、動きが大きいため連続的に画像解析を行うことが困難であるため、静止画により 1/3 秒ごとに画像解析を行った。

せん断変形を除いたねじれ変形を、図 2.2.2-31 に示すように高さ z の二次関数で近似し、求めた二次関数を変形量 u で微分する。ねじれひずみは、積層ゴムの上下端($z = \pm H/2$)で最大となり、ねじれひずみの評価にはこの最大値を用いる。式(2.2.2-5)～式(2.2.2-7)に、ねじれひずみの算出式を示す。

$$u = a_2 z^2 + a_0 \quad (2.2.2-5)$$

$$\gamma_s = \frac{du}{dz} = 2a_2 z \quad (2.2.2-6)$$

$$\gamma_s = \alpha a_2 H \quad (2.2.2-7)$$

ここで、 u はねじれ変形量、 z は高さ方向の位置、 γ_s はねじれひずみ、 α は補正項(ゴム層総厚に対する積層ゴム高さの比)、 H はゴム層厚である。

試験体上のドットの画像は、図 2.2.2-32(a)に示すように、積層ゴムがカメラに近づいた時に上部の数点が画面上から消失してしまう。よって、せん断変形を求めるための最上部の点を使用できない時刻がある。そこで、上部の点が画面上から消失している場合の計測を、図 2.2.2-33 に示す。まず、計測できた一番上部の点(上から 4 つ目の④点と、それに対応する下から 4 番目の⑩点を直線で結ぶ。せん断変形が線形に変形していると仮定し、先ほどの直線と平行な直線を最下部の⑳点を通るように引く。これをせん断変形として、せん断変形を除いたねじれひずみを、式(2.2.2-5)～式(2.2.2-7)を使用して算出する。画像解析には、図 2.2.2-34 に、赤線で示した二列を使用する。

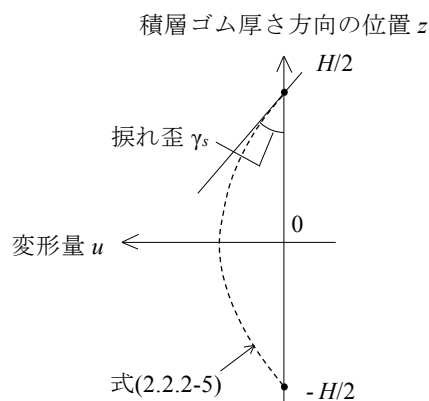


図 2.2.2-31 変形量 u の高さ方向分布



(a) カメラに近い時



(b) カメラから遠い時

図 2.2.2-32 積層ゴム位置による見え方の違い

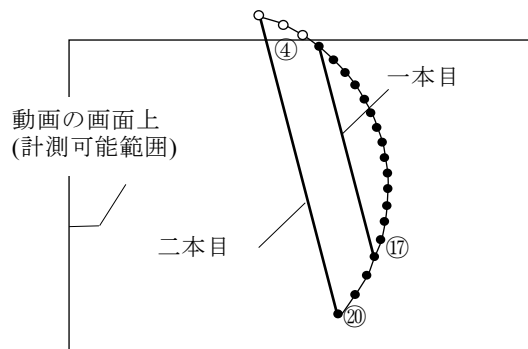


図 2.2.2-33 上部点消失時のせん断変形の算出方法

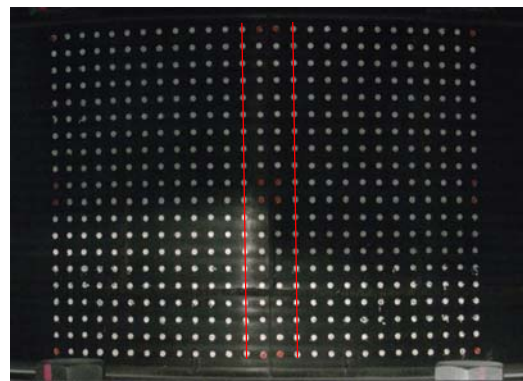


図 2.2.2-34 画像解析に使用する二列

9.2)ねじれひずみの遠近補正

加振中の動画は一方向で撮影しているため、図 2.2.2-32 に示すように、試験体がカメラに近づいた状態(図 2.2.2-32(a))と、カメラから遠ざかった状態(図 2.2.2-32(b))では試験体上部のドットの間隔が大きく異なる。従って、画像解析にあたっては遠近補正を行う必要がある。図 2.2.2-35 に、図 2.2.2-34 に示す二列から算出した楕円加振の 3 回目におけるねじれひずみの時刻歴を比較して示す。図 2.2.2-35 において、左右の列のねじれひずみの時刻歴波形は、ほぼ一致している。また、図 2.2.2-36 に、常に計測できている上から 4 番目の④点と、下から 4 番目の⑰点の高さの時刻歴波形を、左右二列で比較して示す。図 2.2.2-36 より、左右二列とも加振中に高さが正弦波のように変動している。以上より、遠近補正としては横方向については必要ないが、高さ方向について補正が必要であることが確認できる。

図 2.2.2-37 に、遠近補正を考慮したねじれひずみ算出方法を示す。図 2.2.2-37(a)に示すように、試験体の上から 4 点目の④点と、下から 4 点目の⑰点の間の高さを z_a とする。この高さを基準として、図 2.2.2-37(b)に示すように、加振中の各時刻における④点と⑰点の間の高さ z_b の比 β をとる(式(2.2.2-8))。横幅は変動せずに高さのみが変動していることから、同じ比 β だけ横幅に乘じることにより、実試験体のねじれ変形と割合を同じにする。式(2.2.2-9)～式(2.2.2-11)に、遠近補正を考慮したねじれひずみの算出式を示す。式(2.2.2-5)～式(2.2.2-7)に示すねじれの算出式に、式(2.2.2-8)で算出される補正係数 β を乘じることによって遠近補正を行う。

$$\beta = z_b / z_a \quad (2.2.2-8)$$

$$u' = \beta u = \beta(a_2 z^2 + a_0) \quad (2.2.2-9)$$

$$\gamma_s = \frac{du'}{dz} = 2\beta a_2 z \quad (2.2.2-10)$$

$$\gamma_s = \alpha \beta a_2 H \quad (2.2.2-11)$$

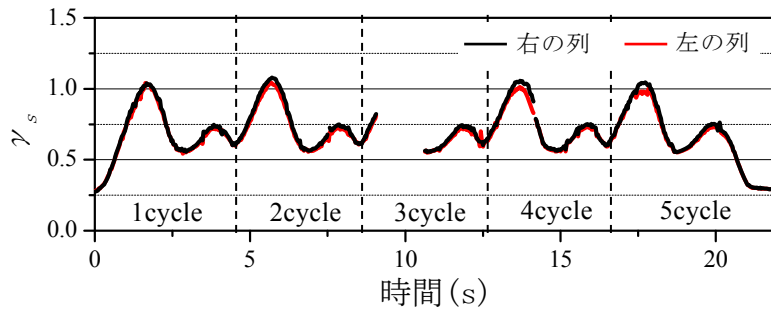


図 2.2.2-35 列ごとのねじれひずみの時刻歴

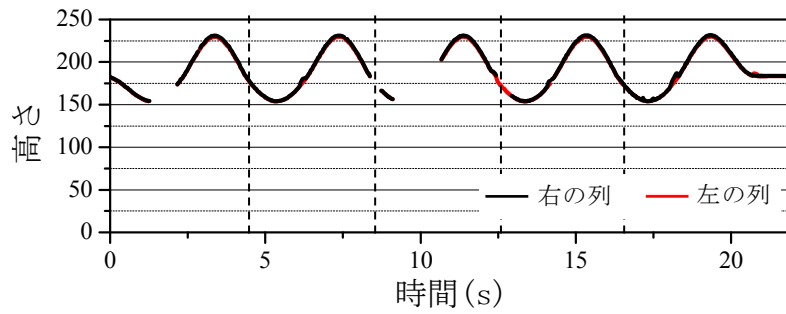
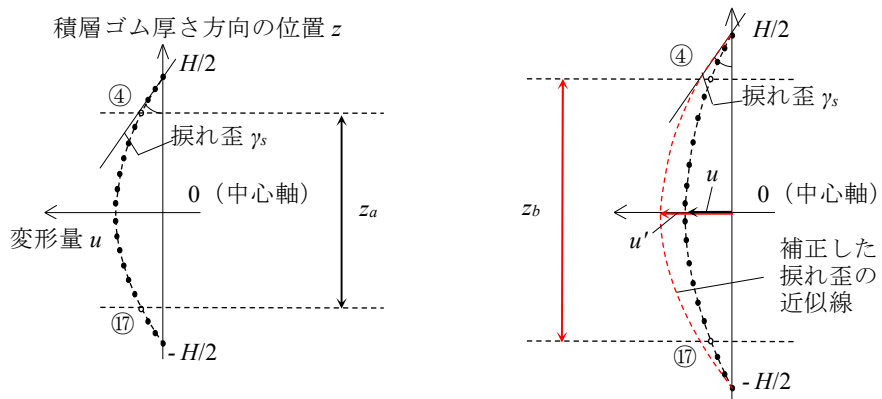


図 2.2.2-36 上から4点目と下から4点目の間の高さの時刻歴



(a) 実試験体の捩れ変形

(b) 画面上の捩れ変形

図 2.2.2-37 遠近補正を考慮したねじれひずみの算出方法

9.3) 楕円加振および真円加振のねじれひずみ

図 2.2.2-38 に、楕円加振の 1,2,3,6,9,12 回目のねじれひずみの時刻歴を示す。このねじれひずみは、図 2.2.2-34 に示す二列のうち右側の列を使用して算出した値である。また、図 2.2.2-39 に、真円加振の 1,2,4,7 回目のねじれひずみの時刻歴を示す。真円加振では、横方向への移動によりドットが画面上から消失することがあるため、一つの基準列だけで全時刻のねじれひずみを求めることはできない。図 2.2.2-35 より、列ごとにねじれひずみの差があまりないことから、基準列が画面上から消失してしまった場合は、計測できる基準列に一番近い列を使用してねじれひずみを算出している。ねじれひずみは、遠近補正を行ったものと、遠近補正を行わなかったものを比較して示す。図 2.2.2-38 に示す、楕円加振時のねじれひずみにおいては、遠近補正を行わない場合は 1 サイクルにおける二つの極大値の大きさが異なるが、遠近補正を行った場合は 1 サイクルにおける二つの極大値の大きさが近い値を示す。また、図 2.2.2-39 に示す、真円加振時のねじれひずみにおいては、遠近補正を行わない場合は加振中のねじれひずみが正弦波のように変動するが、遠近補正を行った場合は加振中のねじれひずみはほぼ一定値となるフラットな波形を示している。

以降では、遠近補正を行ったねじれひずみを用いて検討を行う。

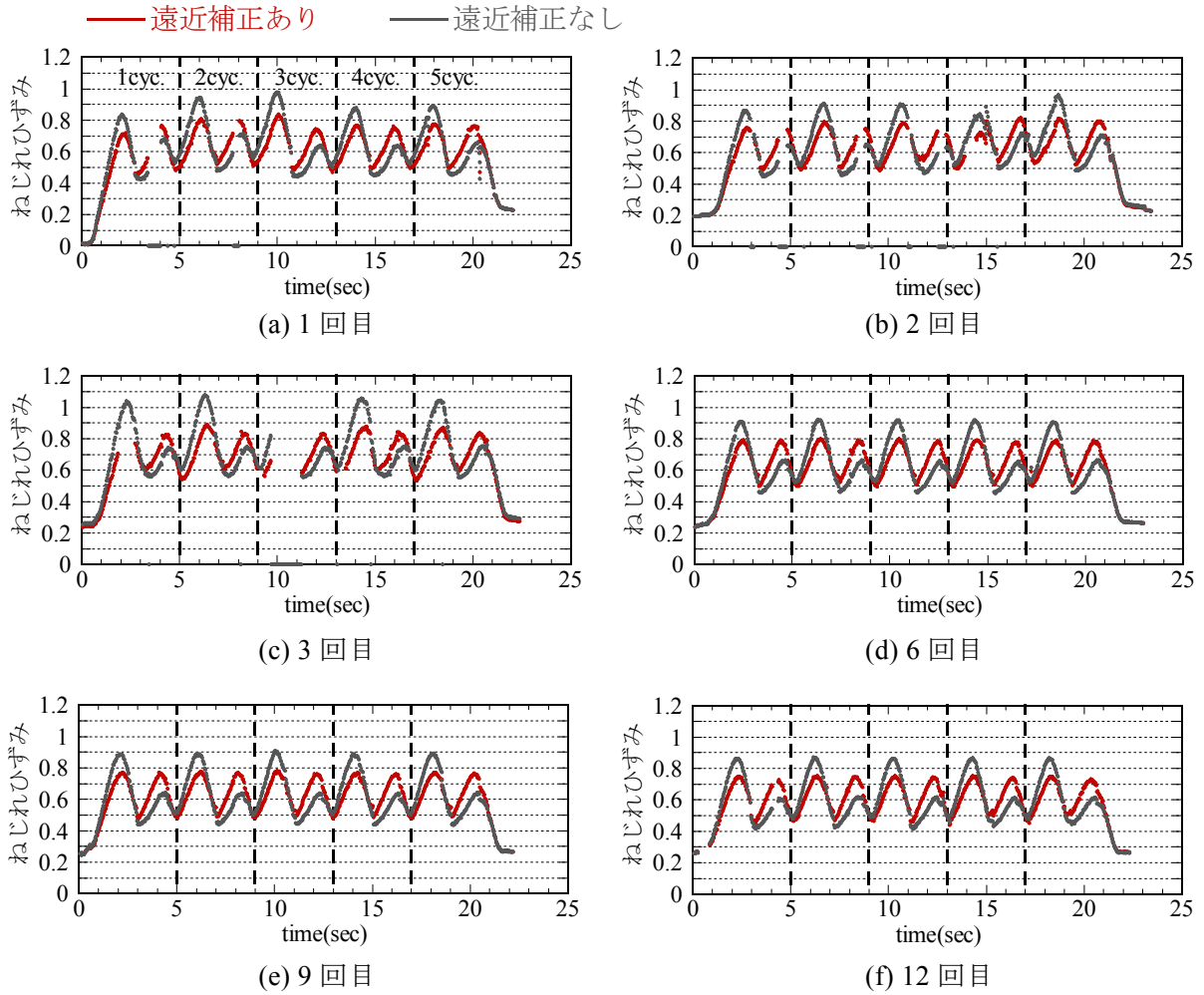


図 2.2.2-38 楕円加振におけるねじれひずみの時刻歴

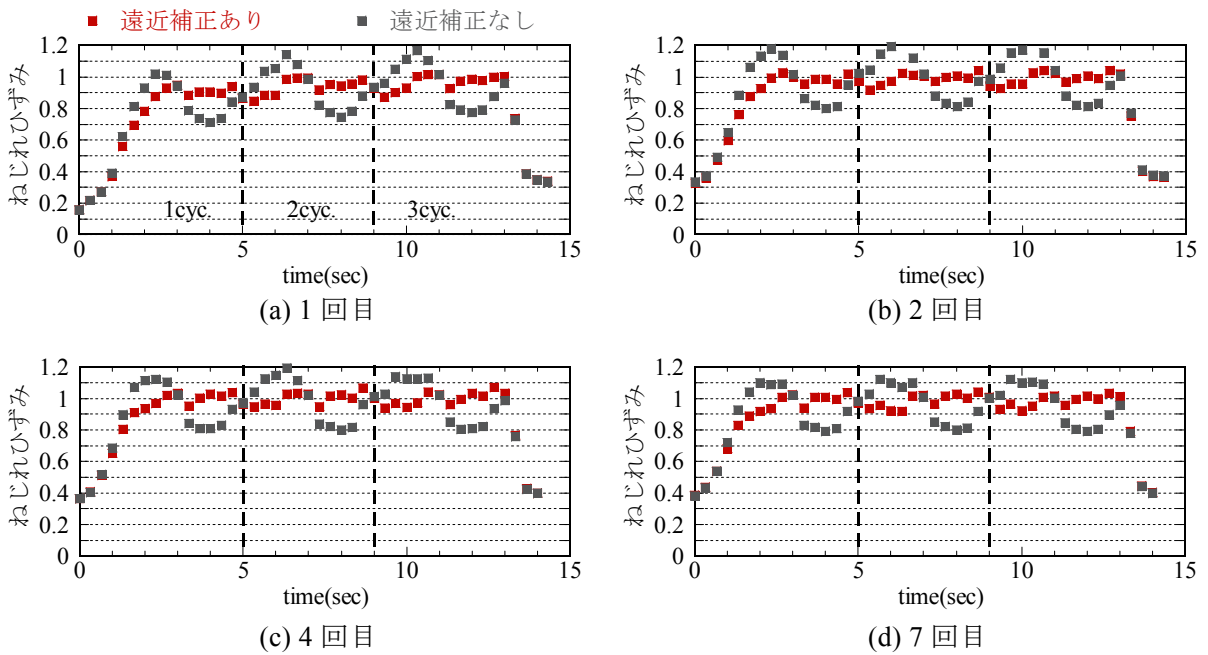


図 2.2.2-39 真円加振におけるねじれひずみの時刻歴

(10) 加振時の局所的な応力度とひずみ度

加振時に試験体に生じる応力度を以下のように算出する。

■ 軸方向応力度 σ_z

軸応力度 $\sigma_p = P / A$

曲げ応力度 $\sigma_m = M(D/2 + \delta/2) / I$

$M = Qh / 2$

軸方向応力度 $\sigma_z = \sigma_p + \sigma_m$

ただし、圧縮荷重の大部分は有効支持部で支持されるため、引張側端部の軸応力度 σ_p はゼロと仮定すると、

軸方向応力度 $\sigma_z = \sigma_m$

A : 積層ゴム断面積

I : 断面二次モーメント

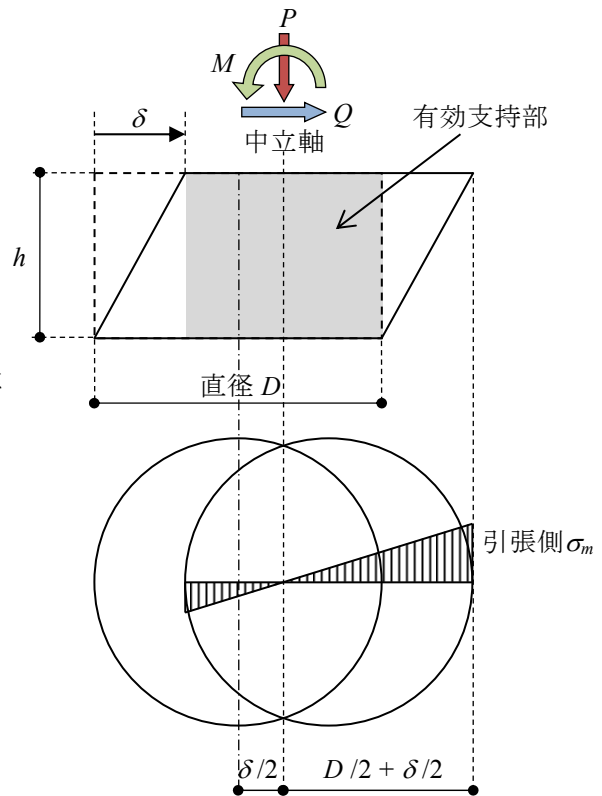


図 2.2.2-40 試験体に生じる軸方向応力度概念図

■ せん断応力度 τ

せん断力 Q を弾性成分 F_γ と減衰成分 F_θ に分解する。

せん断応力度 $\tau_\gamma = Q / A$

ねじれ応力度 $\tau_\theta = Mt (D/2) / I_p$

$Mt = F_\theta \text{sqrt}(\delta_u^2 + \delta_v^2) / 2$

せん断応力度とねじれ応力度の方向が一致する最外端で合計のせん断応力度が最大となるので、

せん断応力度 $\tau = \tau_\gamma + \tau_\theta$

I_p : 極断面二次モーメント

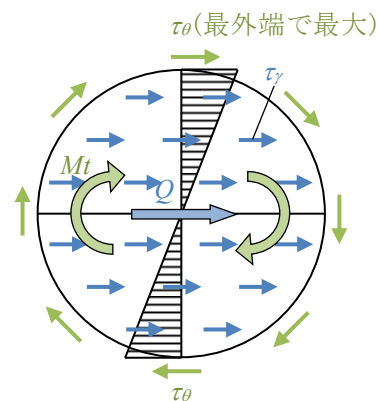
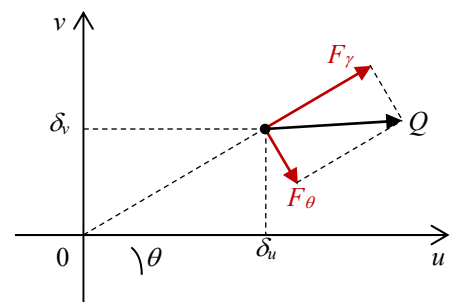


図 2.2.2-41 試験体に生じるせん断応力度概念図

図 2.2.2-42 に、1 方向加振のひずみ、荷重、応力度の時刻歴推移を示す。図 2.2.2-42 は、5 サイクルずつ全 12 回の加振のうち 1 回目の加振の結果である。U 方向への 1 方向加振であるため、ひずみは γ_u のみが $\pm 200\%$ の推移を示している。荷重としては、減衰成分 F_d が生じないため、ねじれモーメントも生じていない。曲げ応力度による軸方向応力度は、 $0 \sim 2\text{N/mm}^2$ の間を推移しており、引張側端部では平均して 1N/mm^2 程度の引張応力度が作用していると考えられる。

図 2.2.2-43～2.2.2-48 に、楕円加振の 5 サイクルずつ全 12 回の加振のうち、1、2、3、6、9、12 回目のひずみ、荷重、応力度の時刻歴推移を示す。楕円加振は $\gamma_u = \pm 200\%$ 、 $\gamma_v = \pm 100\%$ で推移しており、 γ_u と γ_v の重ね合わせは $100 \sim 200\%$ の間の繰返しせん断ひずみとなっている。ねじれひずみは各サイクルの最大時で 80% 程度生じており、せん断ひずみとねじれひずみの合計は最大時で約 280% となっている。曲げ応力度による軸方向応力度は、 1N/mm^2 付近で推移している。図 2.2.2-49～2.2.2-51 に、楕円加振のねじれひずみ、ねじれモーメント、水平力の全 12 回の加振による推移を示している。ねじれひずみは 3 回目までは増加傾向を示しているが、6 回目以降は減少傾向に転じている。ねじれモーメントおよび水平力の減衰成分 F_d は、加振が進むにつれ減少している。水平力の弾性成分 F_e は、全加振にわたりほぼ一定値を保っている。

図 2.2.2-52～2.2.2-55 に、真円加振の 3 サイクルずつ全 7 回の加振のうち、1、2、4、7 回目のひずみ、荷重、応力度の時刻歴推移を示す。真円加振は $\gamma_u = \pm 200\%$ 、 $\gamma_v = \pm 200\%$ で推移しており、 γ_u と γ_v の重ね合わせは 200% の一定ひずみとなっている。ねじれひずみは、加振中約 100% でほぼ一定値を保っており、せん断ひずみとねじれひずみの合計は加振中 300% 程度の一定値である。曲げ応力度による軸方向応力度は、 2N/mm^2 弱の一定値を示している。図 2.2.2-56～2.2.2-58 に、真円加振のねじれひずみ、ねじれモーメント、水平力の全 7 回の加振による推移を示している。ねじれひずみは、1 回目よりも 2 回目の方がやや増加しているが、2 回目以降はほぼ一定である。ねじれモーメント、および水平力の減衰成分 F_d は加振が進むにつれて減少している。水平力の弾性成分 F_e は、全 7 回ともほぼ一定値を保っている。

図 2.2.2-59 に、積層ゴムの破断限界例^{2.2.2-4)}を示す。圧縮応力度が作用している状態では、積層ゴムの破断限界はせん断ひずみ 400% より大きいが、引張応力下では破断限界のせん断ひずみは 400% よりも小さくなる。せん断変形時には有効支持部が軸力の大部分を負担し、引張側端部は軸力をほぼ負担しないことから、軸力による圧縮応力度をゼロと仮定して各加振による引張側端部の局所的な最大応力状態を図 2.2.2-59 中にプロットする。真円加振時における上端部のゴムの剥離は、このような局所的な引張せん断状態が一因と考えられる。ただし、図 2.2.2-59 に示す破断限界は、積層ゴムに一定の引張荷重をかけた状態でせん断変形を与えた場合の、積層ゴムとしての破断限界であるため、今回の加振時とは荷重状態が異なる。また、高減衰ゴム系積層ゴムの種類が今回使用したタイプとは異なることから、比較はあくまで参考程度に留まる。

本実験においては、試験体が 1 体のみであり、試験体の冷却に十分な時間をとれなかったことから、試験体に内部剥離の兆候が確認された真円加振時には、試験体は既に 300m 以上の累積変形を経験しており、また、加振開始時の試験体温度もゴム部で 50°C 以上と高温であった。従って、本実験における試験体の損傷には、高温状態で厳しい加振ケースを繰返したことによる試験体の疲労の影響が大きいと推測され、疲労を蓄積していないバージンな試験体とは破断傾向が異なると考えられる。長周期地震動を想定した免震の応答量は累積変形量で $20 \sim 30\text{m}$ と

されており、本試験体は楕円加振を含む厳しい加振ケースでその 10 倍の 300m 以上まで損傷を生じず、健全な履歴ループを維持していたことから、長周期地震動に対して十分な繰返し耐久性を保持していると言える。

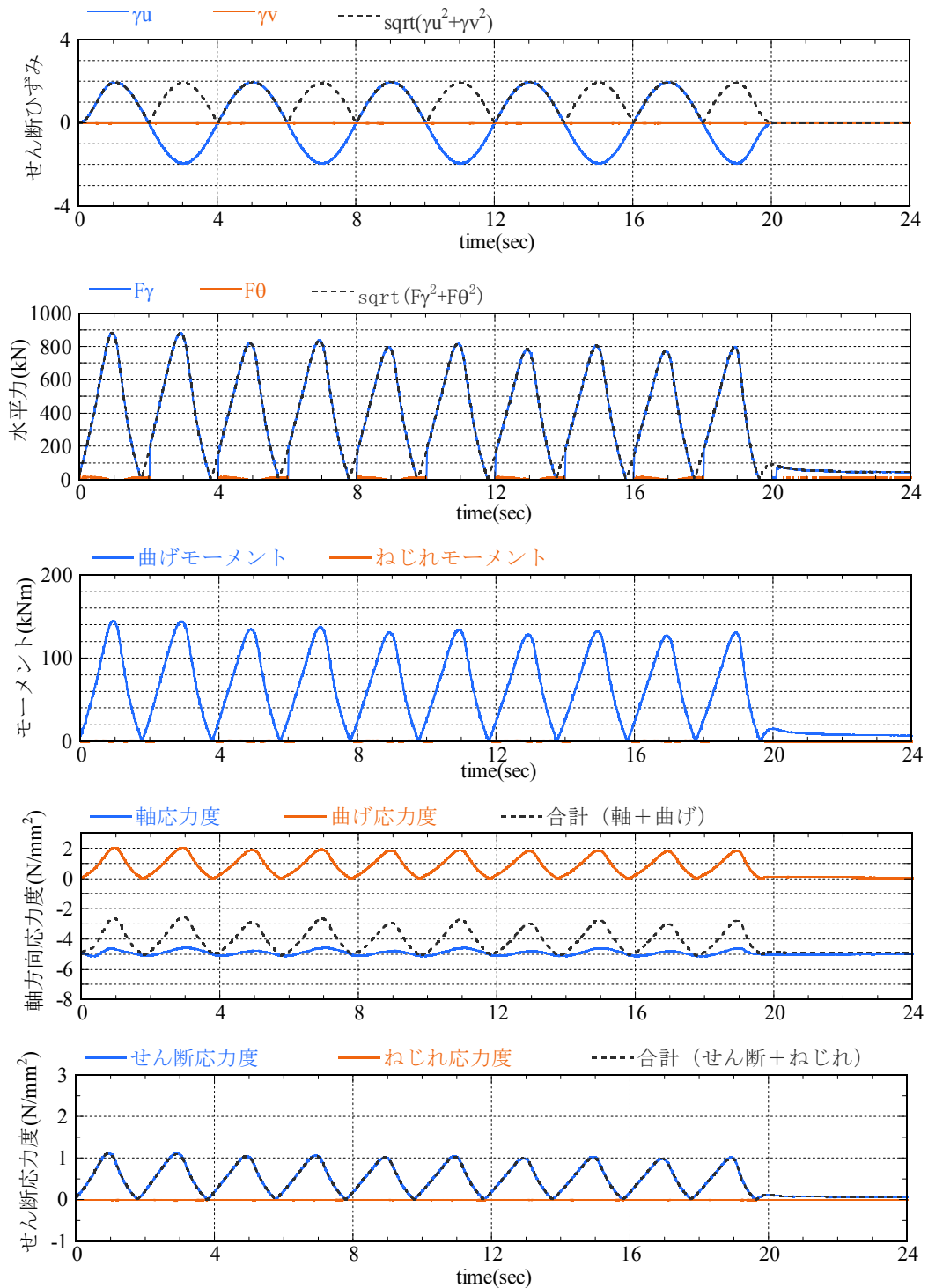


図 2.2.2-42 1 方向加振 ±400mm(u)×5 サイクル 1 回目

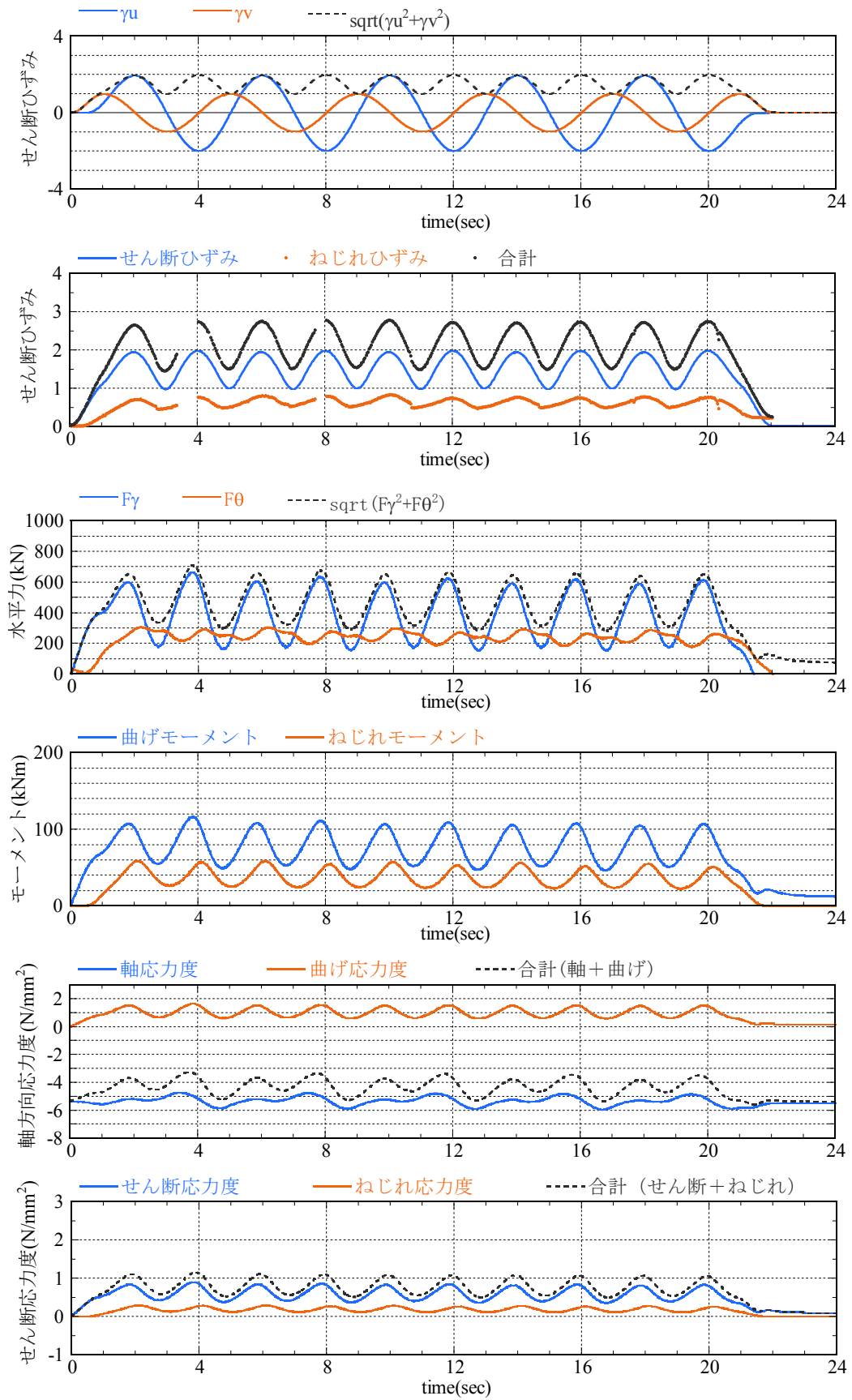


図 2.2.2-43 楕円加振 $\pm 400\text{mm}(u) / \pm 200\text{mm}(v) \times 5$ サイクル 1 回目

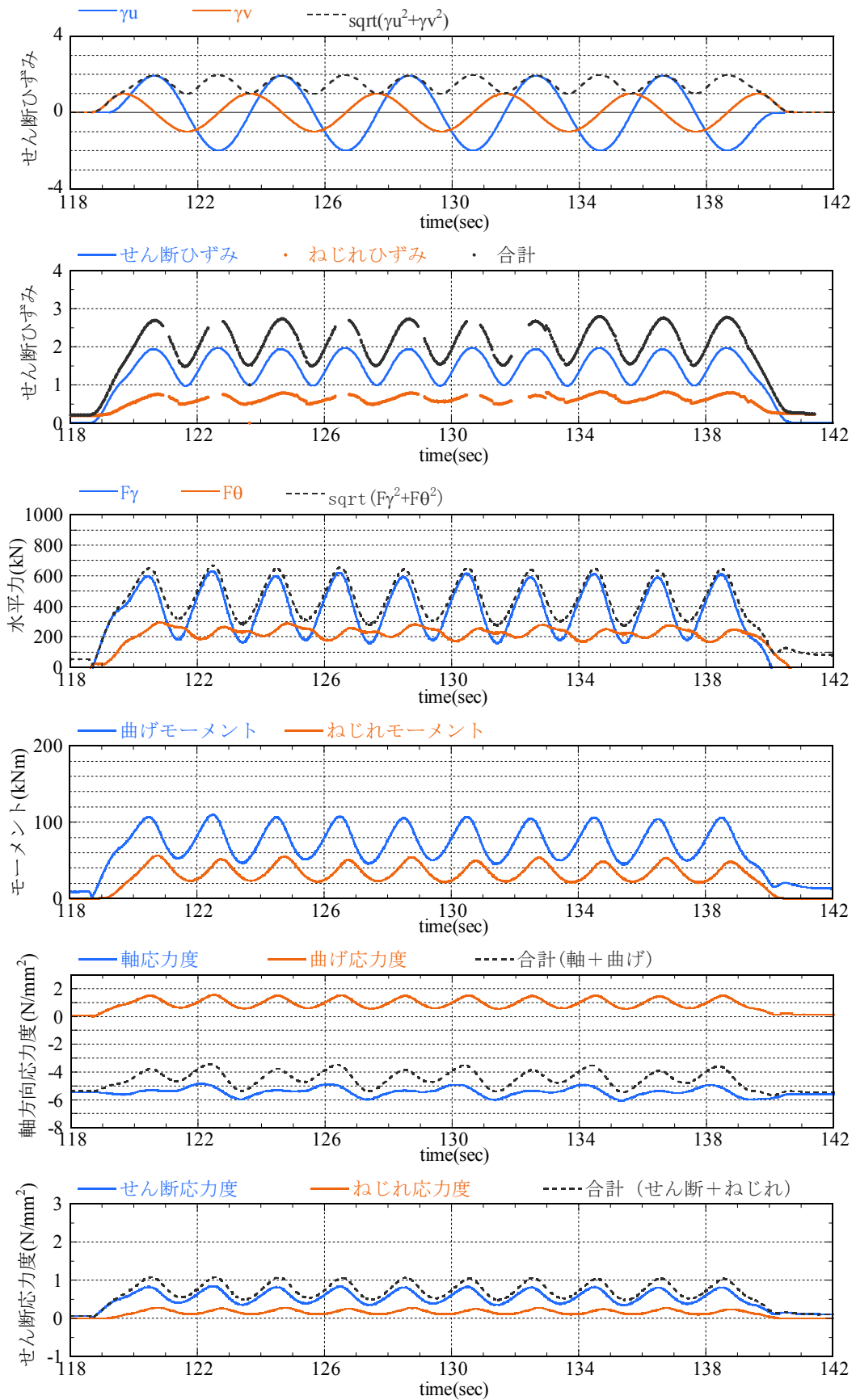


図 2.2.2-44 楕円加振 $\pm 400\text{mm}(u) / \pm 200\text{mm}(v) \times 5$ サイクル 2 回目

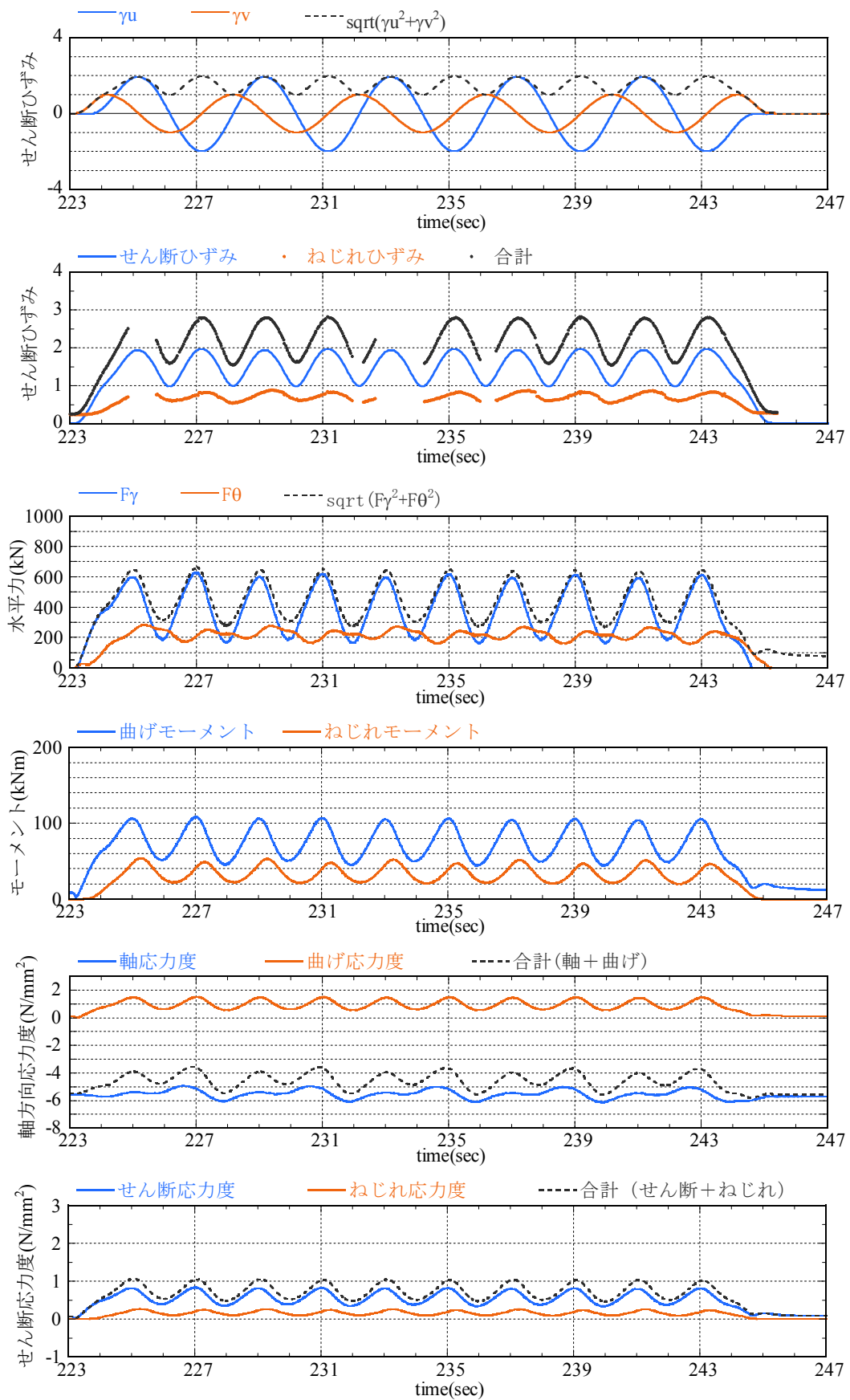


図 2.2.2-45 楕円加振 $\pm 400\text{mm}(u) / \pm 200\text{mm}(v) \times 5$ サイクル 3 回目

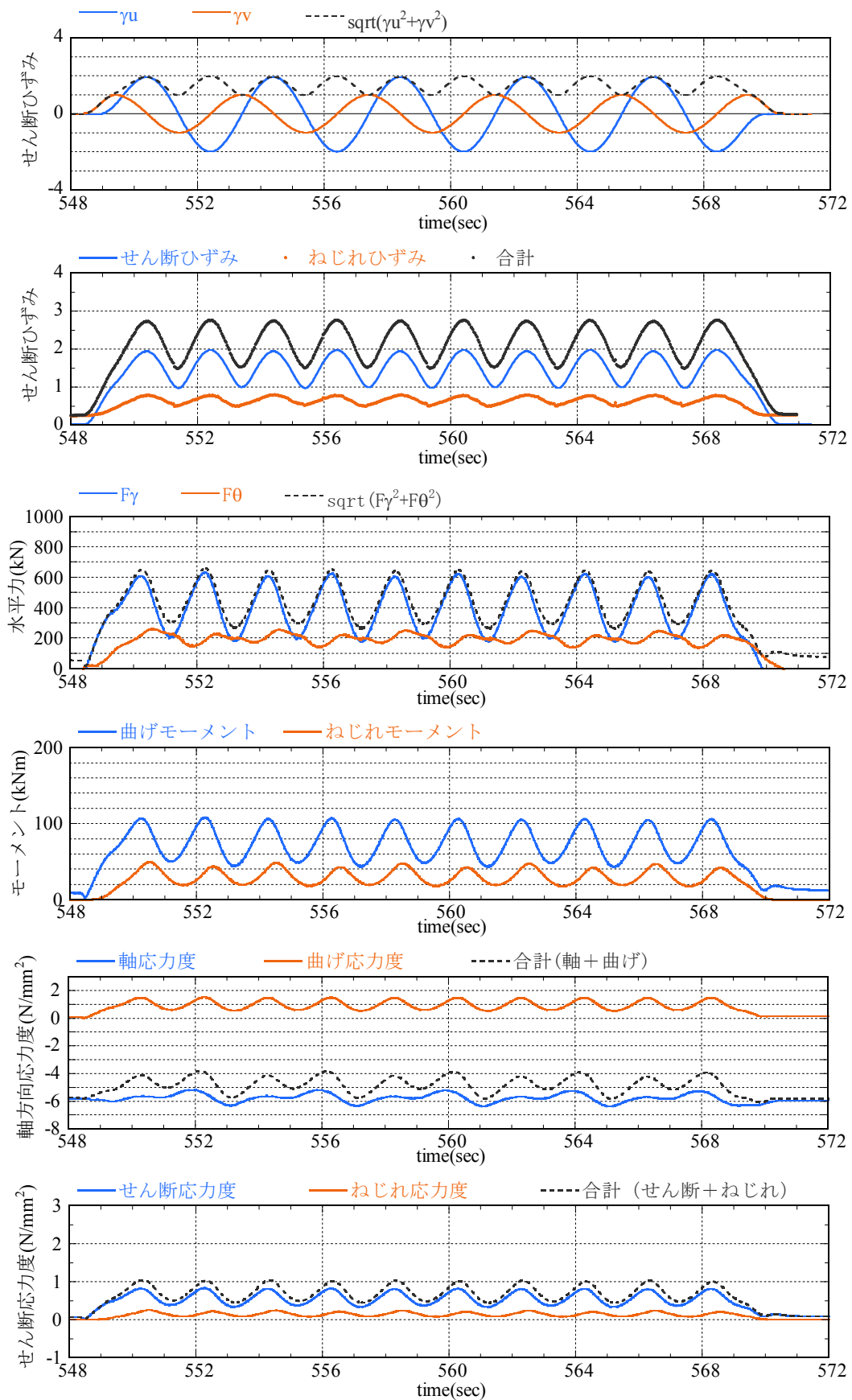


図 2.2.2-46 楕円加振 $\pm 400\text{mm}(u) / \pm 200\text{mm}(v) \times 5$ サイクル 6 回目

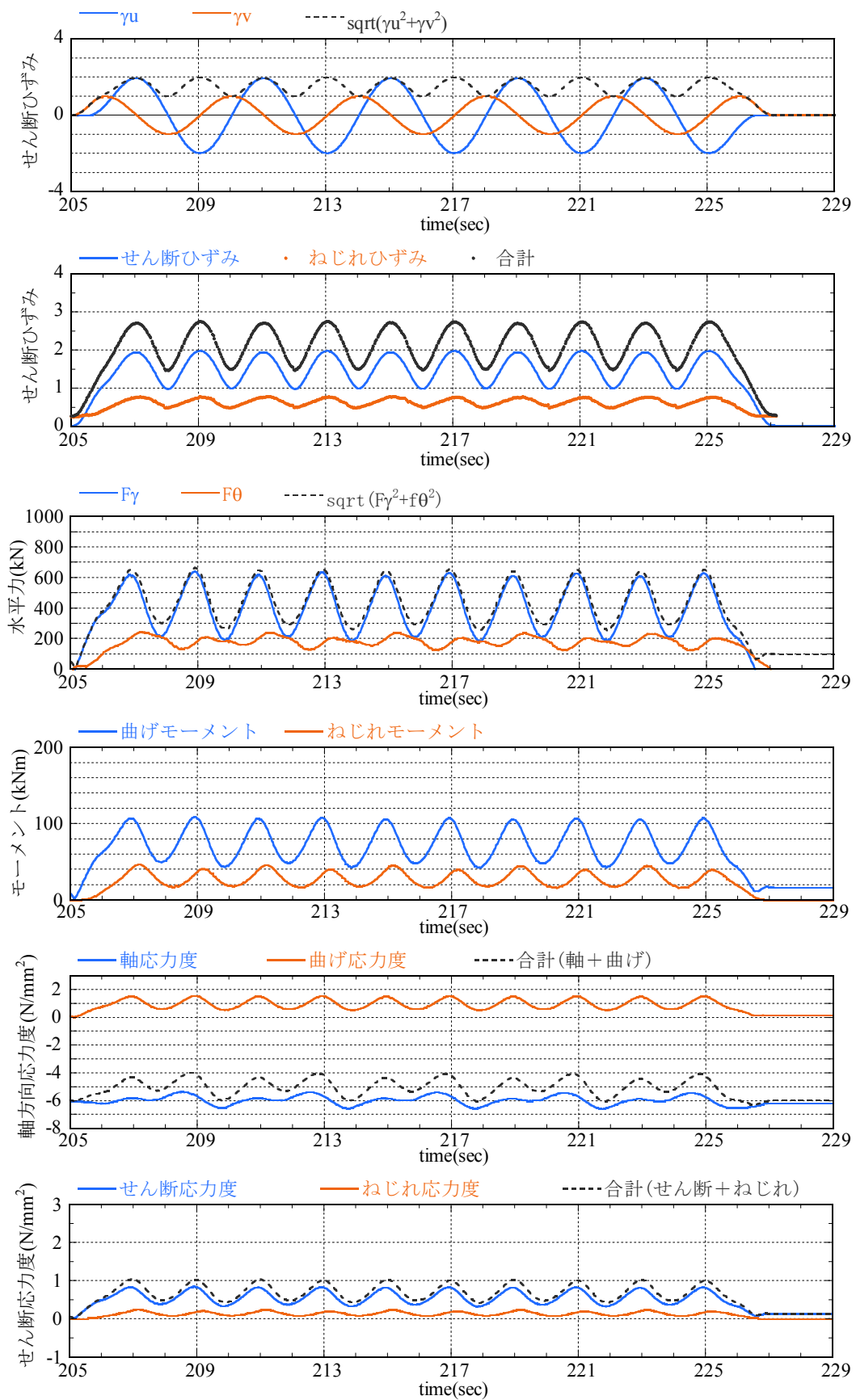


図 2.2.2-47 楕円加振 $\pm 400\text{mm}(u) / \pm 200\text{mm}(v) \times 5$ サイクル 9 回目

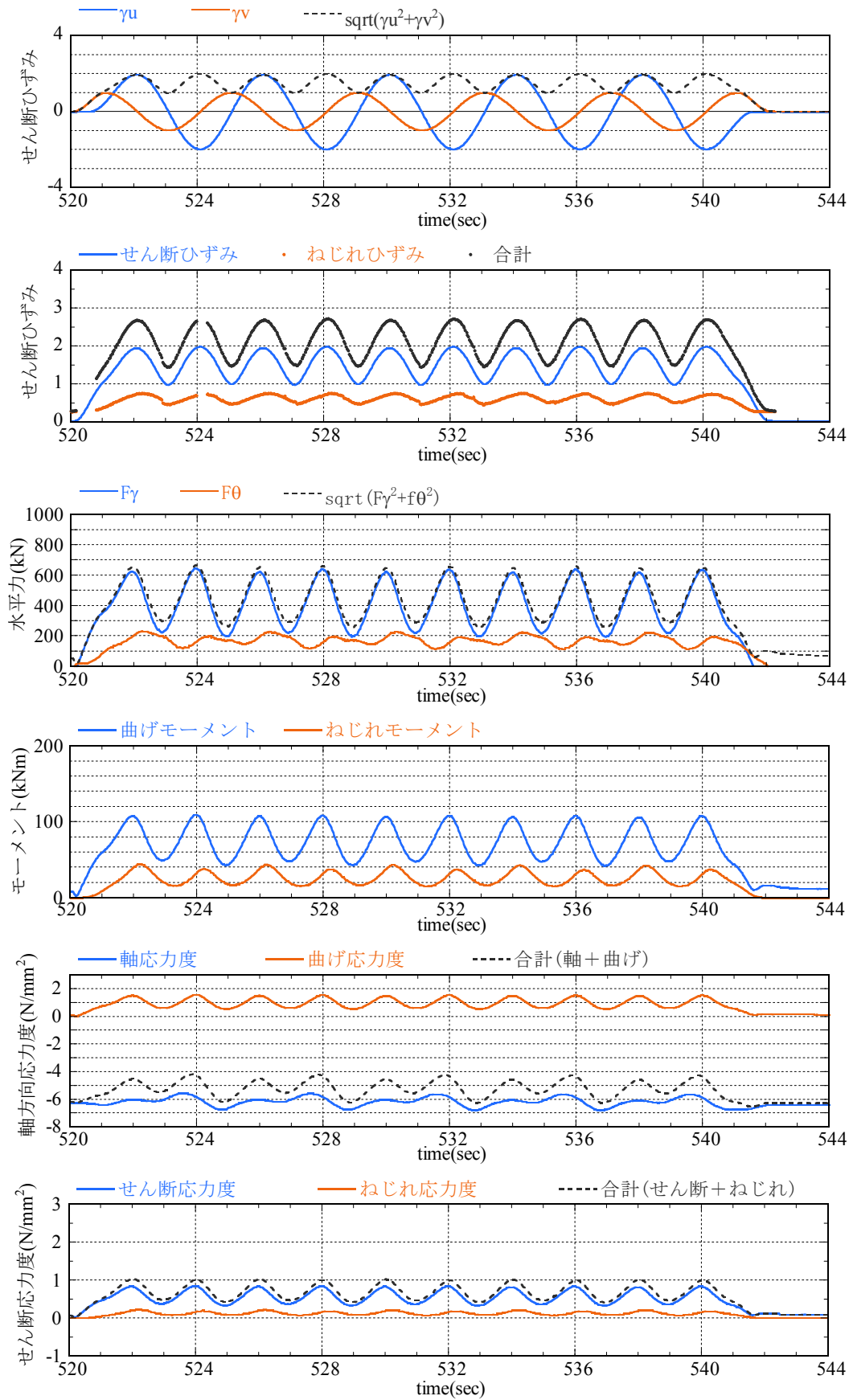


図 2.2.2-48 楕円加振 $\pm 400\text{mm}(u) / \pm 200\text{mm}(v) \times 5$ サイクル 12 回目

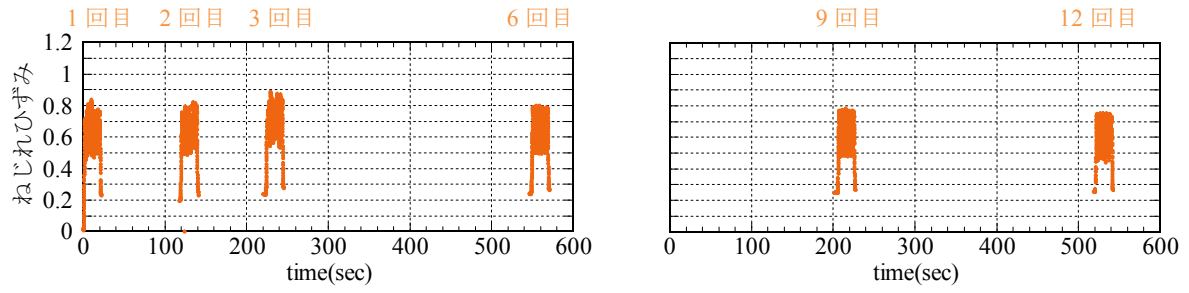


図 2.2.2-49 楕円加振のねじれひずみ推移

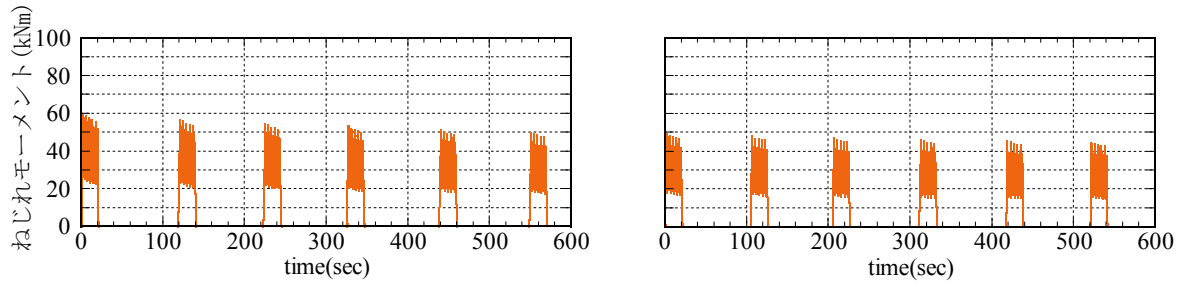


図 2.2.2-50 楕円加振のねじれモーメント推移

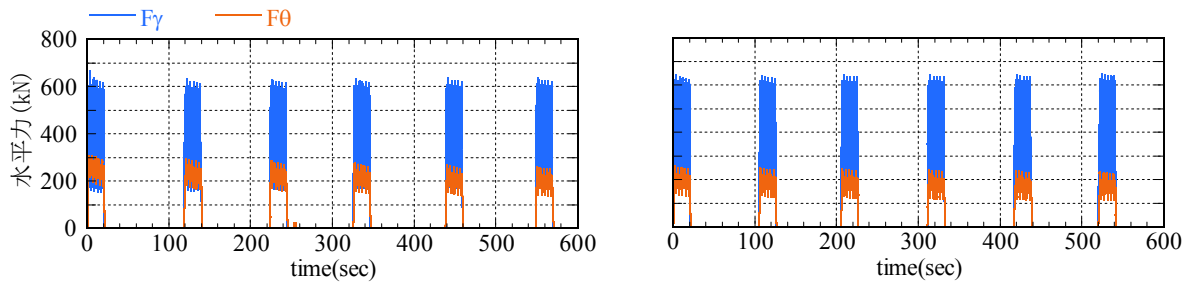


図 2.2.2-51 楕円加振の水平力推移

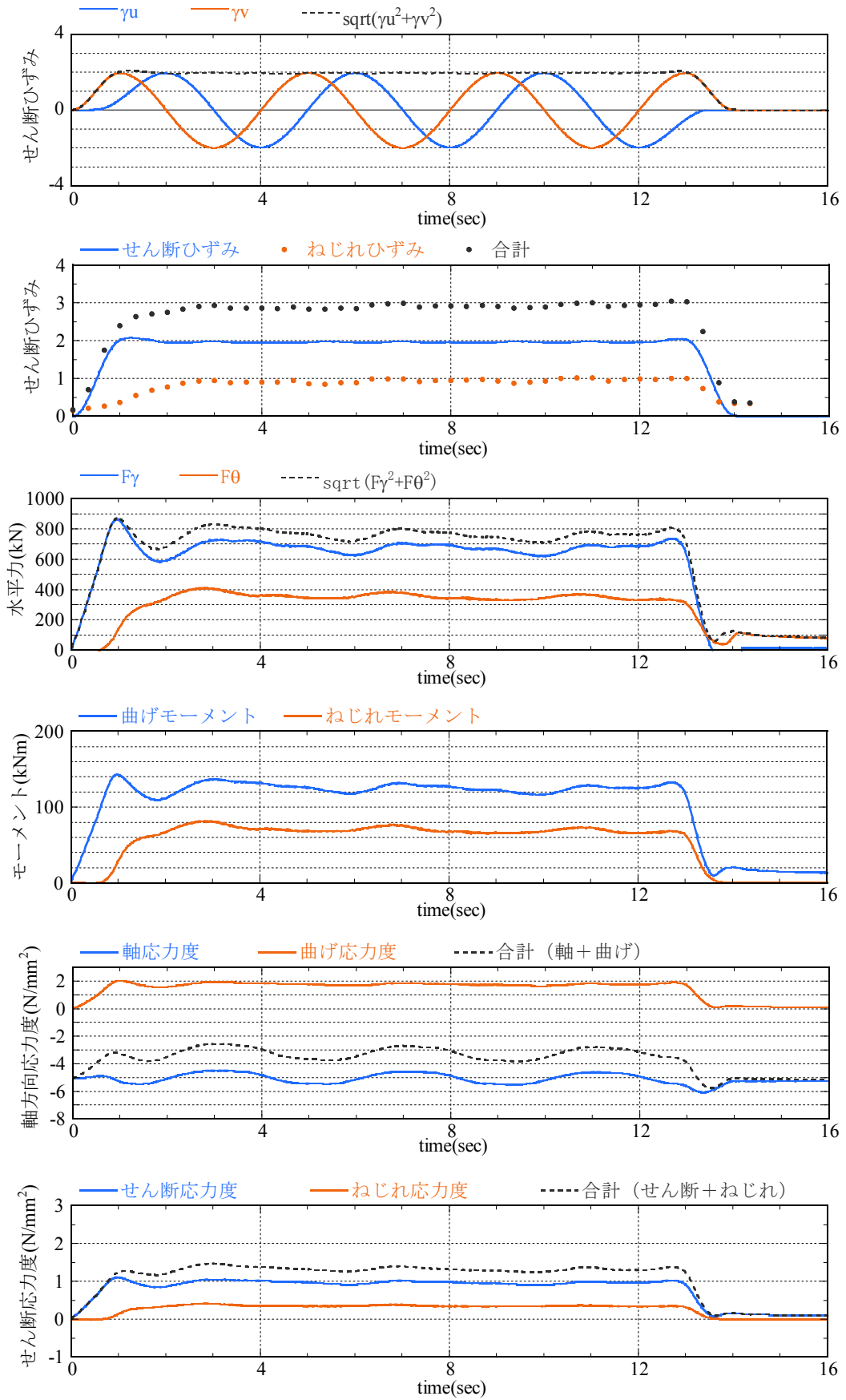


図 2.2.2-52 真円加振 $\pm 400\text{mm}(u) / \pm 400\text{mm}(v) \times 3$ サイクル 1 回目

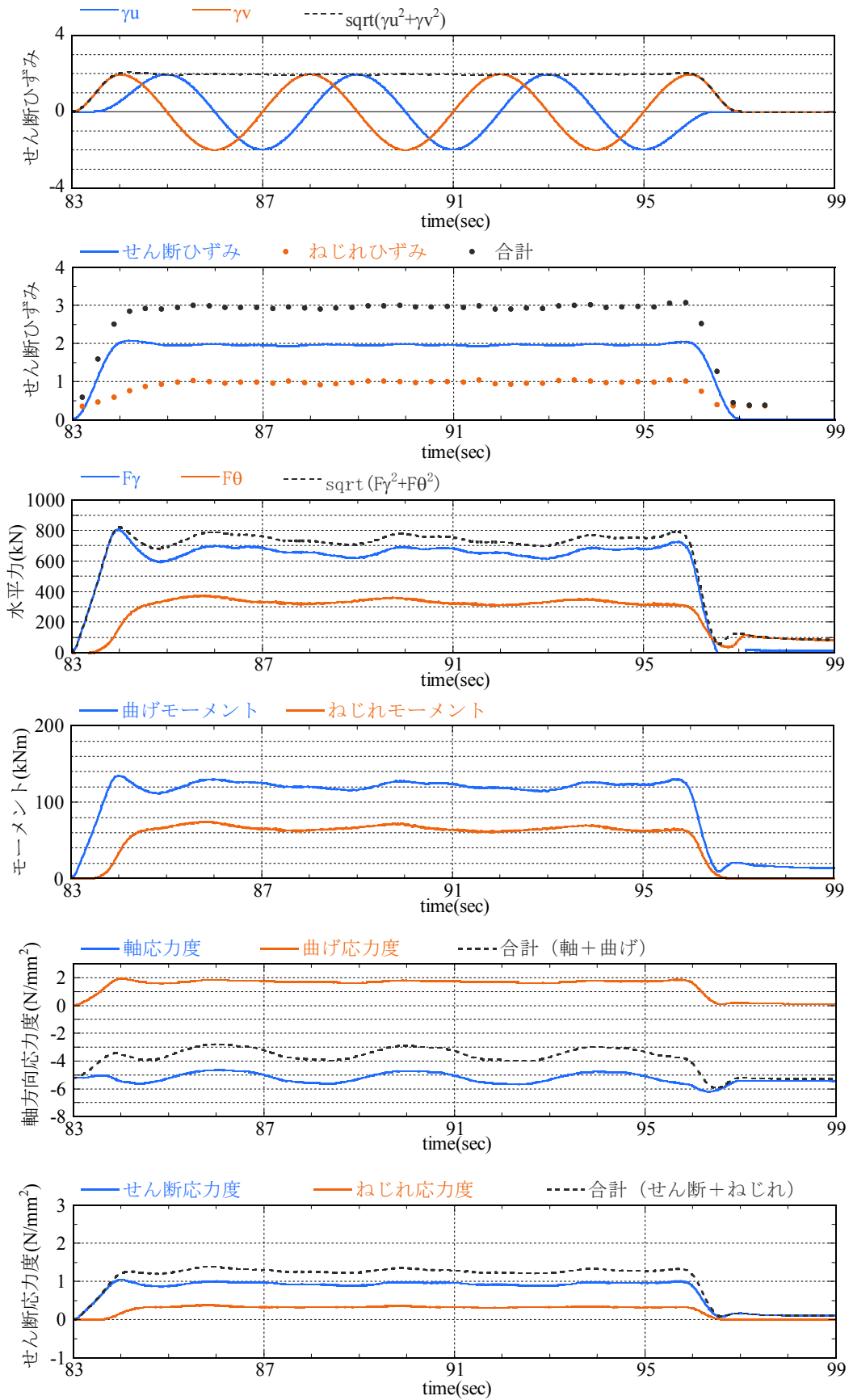


図 2.2.2-53 真円加振 $\pm 400\text{mm}(u) / \pm 400\text{mm}(v) \times 3$ サイクル 2 回目

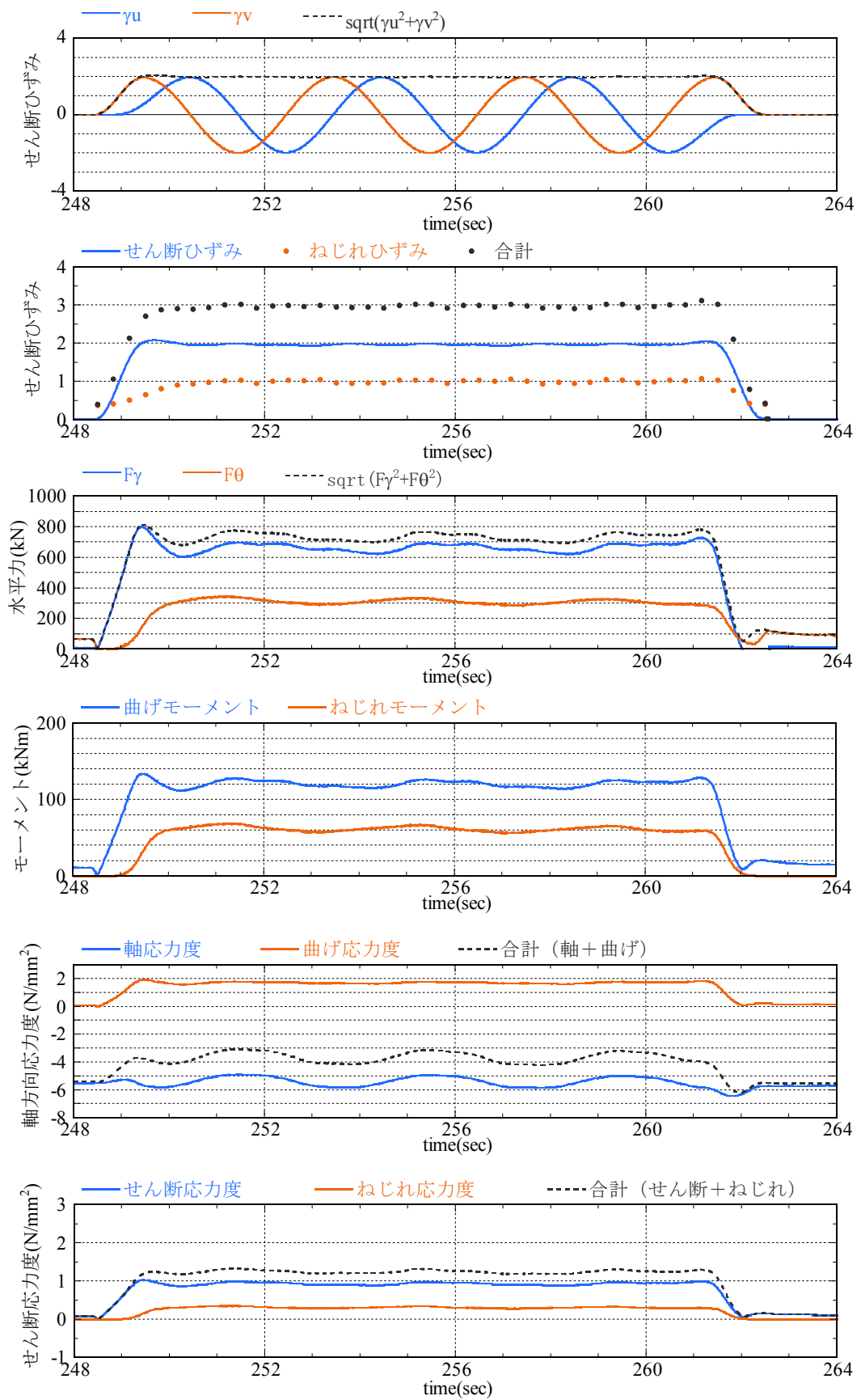


図 2.2.2-54 真円加振 $\pm 400mm(u) / \pm 400mm(v) \times 3$ サイクル 4 回目

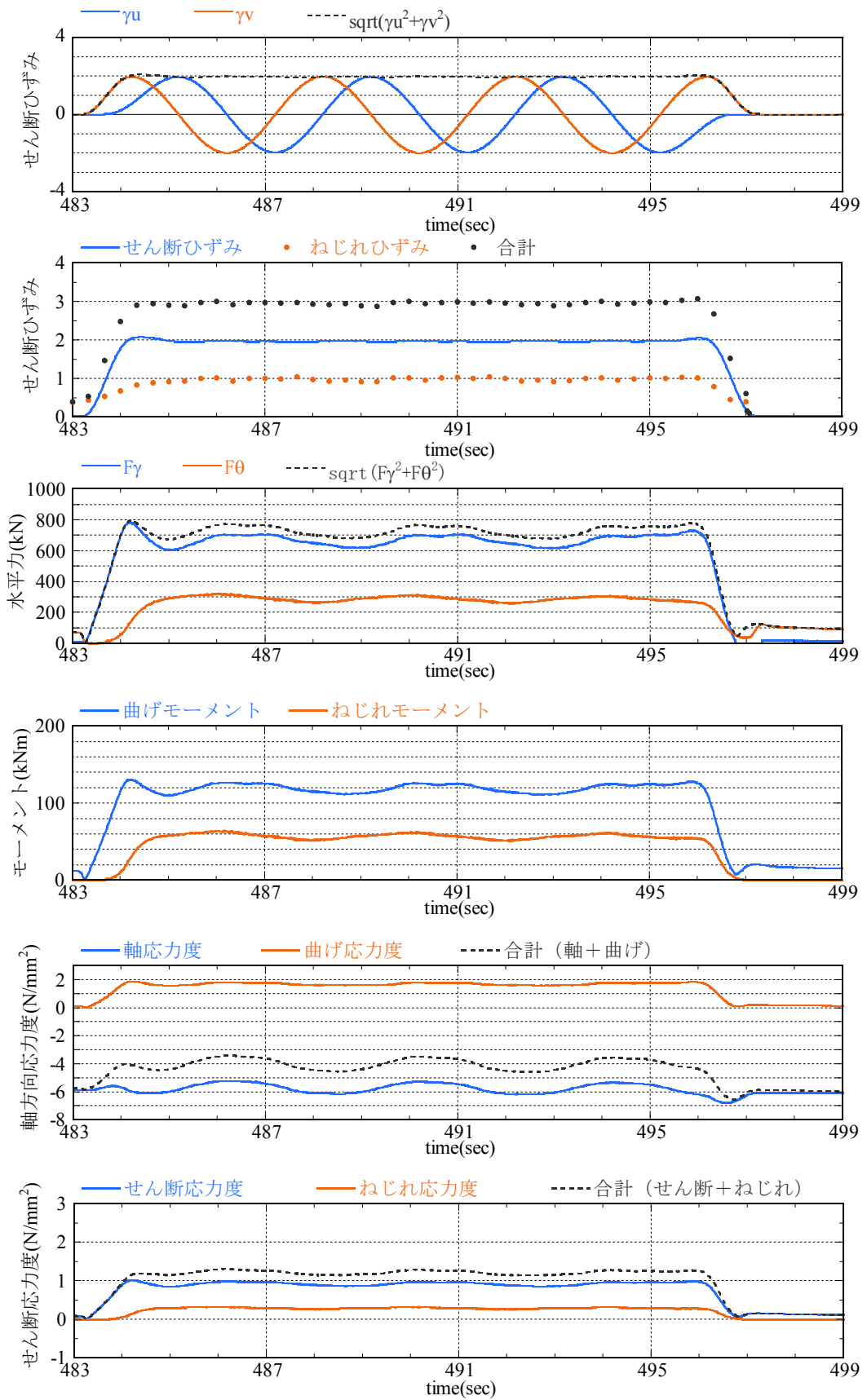


図 2.2.2-55 真円加振 $\pm 400\text{mm}(u) / \pm 400\text{mm}(v) \times 3$ サイクル 7 回目

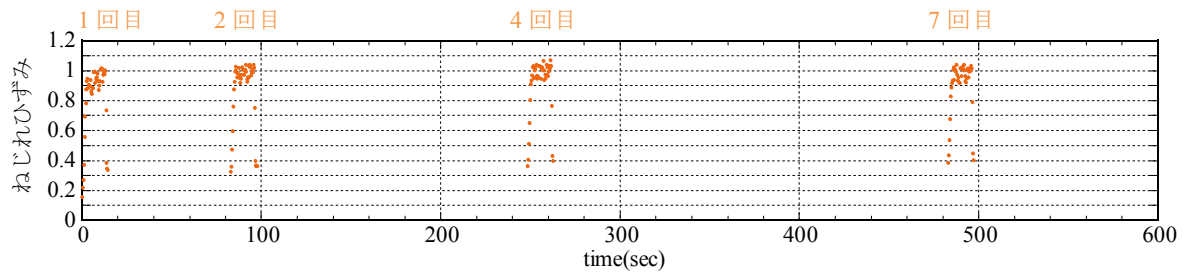


図 2.2.2-56 真円加振のねじれひずみ推移

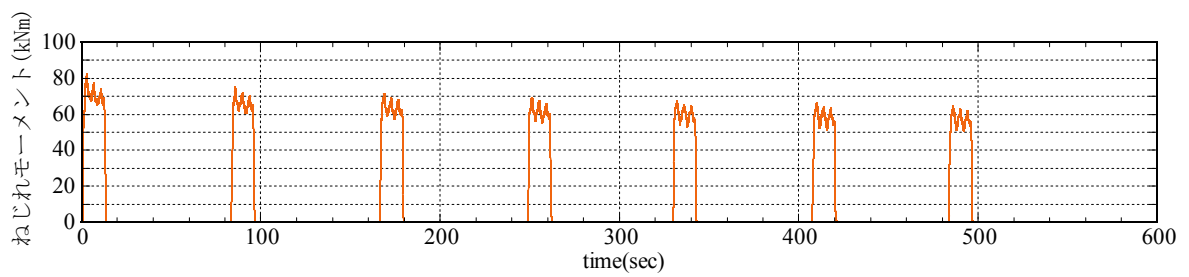


図 2.2.2-57 真円加振のねじれモーメント推移

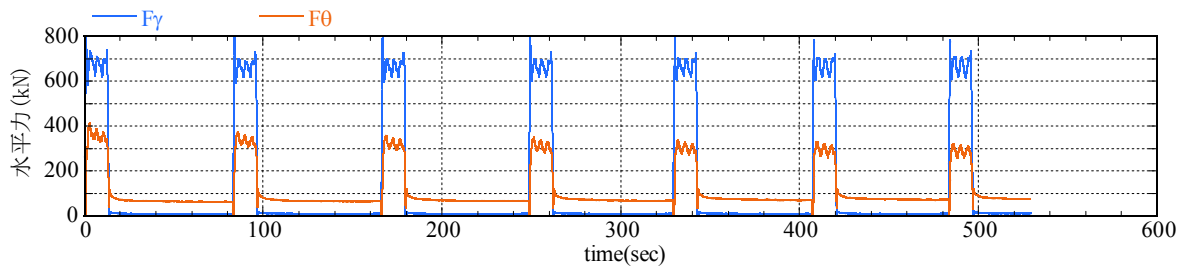
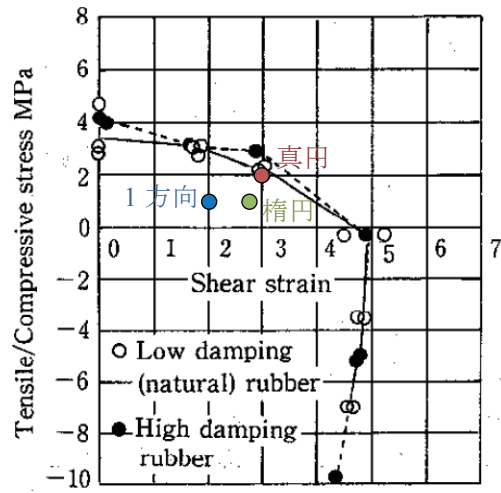


図 2.2.2-58 真円加振の水平力推移



破断限界(高減衰積層ゴムと低減衰積層ゴムの比較)

(高減衰： $H_s = 60$ 、 $225-3.0 \times 23$ 、 $S_1 = 18.75$ 、 $S_2 = 3.2$)
 (低減衰： $H_s = 40$ 、 $240-2.4 \times 27$ 、 $S_1 = 25$ 、 $S_2 = 3.7$)

図 2.2.2-59 積層ゴムの破断限界例^{2.2.2-4)}

(※図は、一定の引張荷重をかけた状態でせん断変形を与えた時の破断限界であり、本実験とは荷重状態が異なるため、比較はあくまで参考である。)

(11) 1 方向入力と 2 方向入力のエネルギー比較

図 2.2.2-60 に、楕円加振、および真円加振の累積変形量に対する累積エネルギー量を 1 方向加振と比較して示す。楕円、真円加振時には累積変形量を各方向成分の和とした場合も、平面上の変位軌跡の長さとした場合も同じ変形量時の 1 方向加振のエネルギー量よりも大きなエネルギー吸収量となっている。しかし、図 2.2.2-61 に示すように、地震応答波加振においては 2 方向加振時の各方向成分のエネルギー量は 1 方向入力時のエネルギーに一致し、1 方向入力時のエネルギーの和が 2 方向加振時のエネルギーの総和に一致している。これは地震応答波の場合、楕円加振や真円加振のような極端な 2 方向加力状態にならないためと考えられる。図 2.2.2-62 に、各加振ケースの UV 方向成分のループ形状を比較して示す。楕円、真円加振においては直交方向の加振の影響から、ループ形状は 1 方向加振時と異なる形状を示し、ループ面積が増大している。地震応答波加振においては、1 方向入力時と 2 方向入力時の各方向成分はほぼ同様の形状を示し、直交方向の加振の影響が小さい。

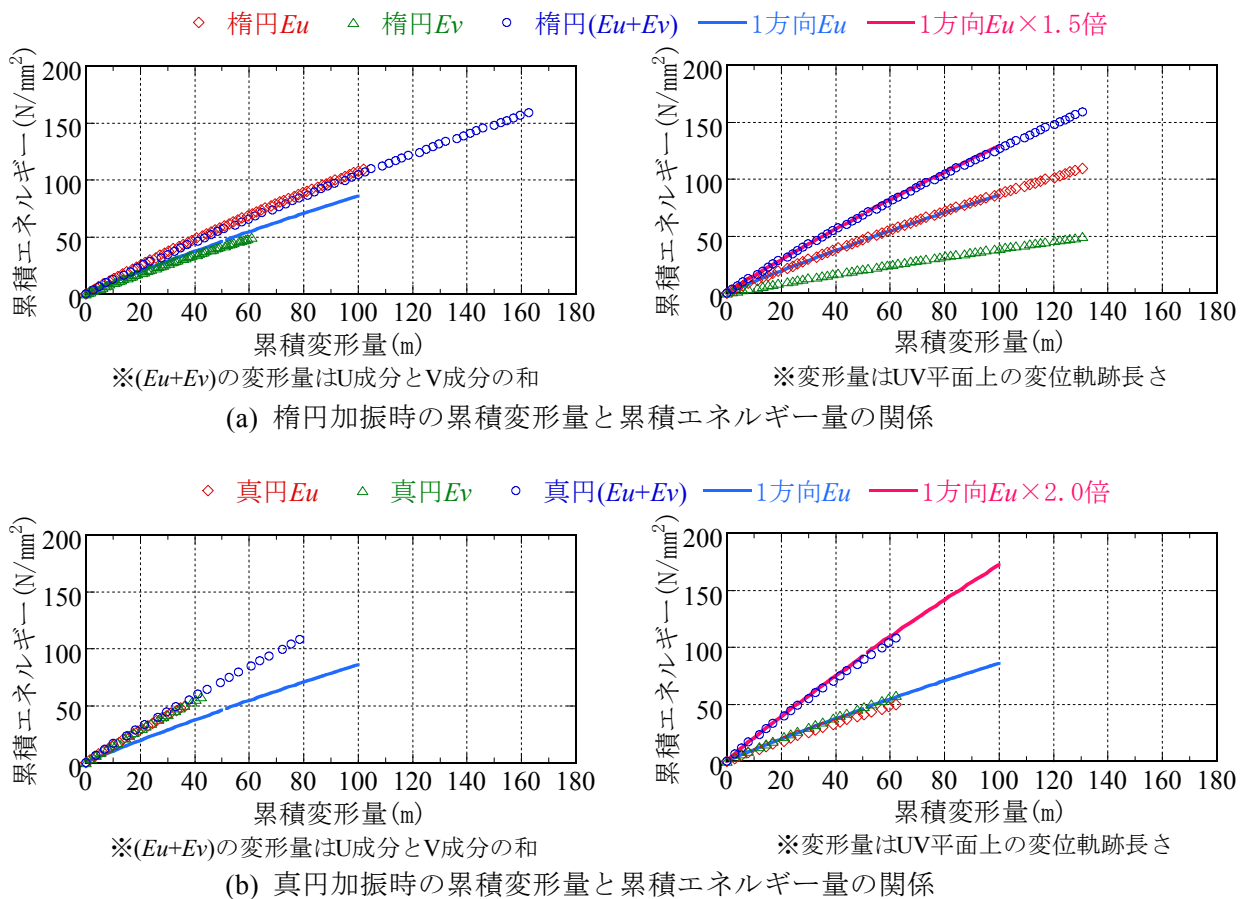
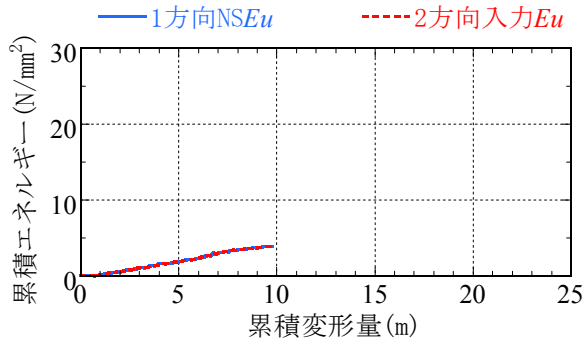
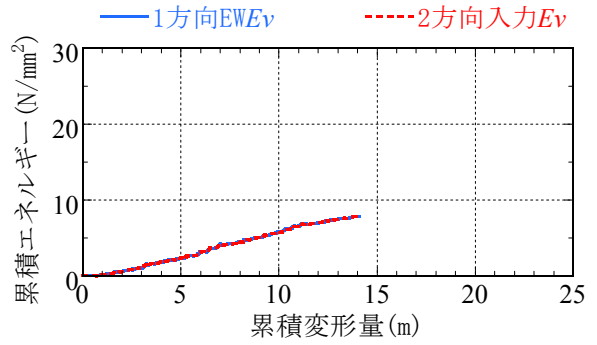


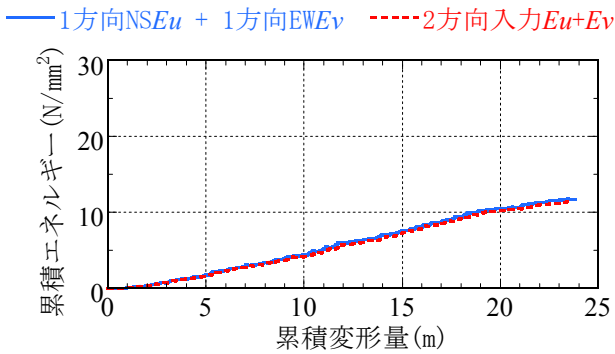
図 2.2.2-60 実大実験の 2 方向加振ケースの累積変形量と累積エネルギーの関係



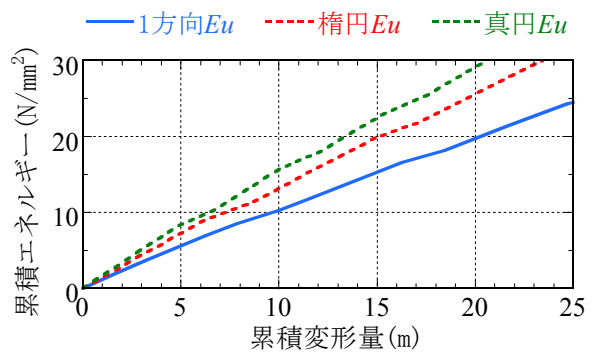
(a) 地震応答波 U 方向成分比較



(b) 地震応答波 V 方向成分比較

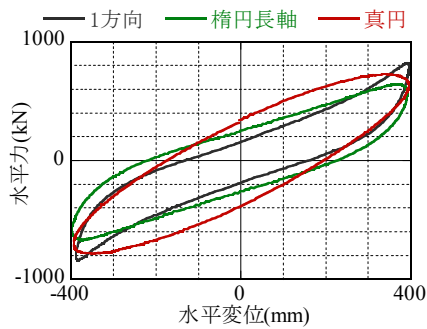


※累積変形量はU成分とV成分の和
(c) 地震応答波 UV 成分の和の比較

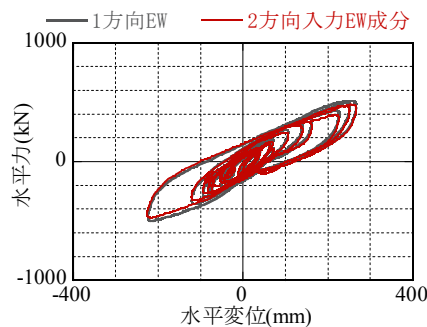
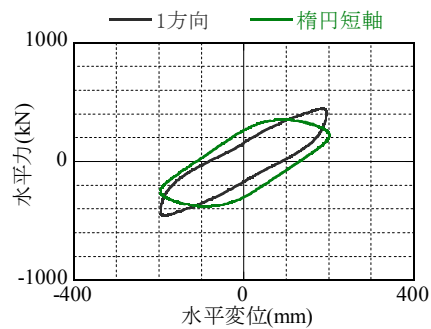


(d) 正弦波繰返し加振 U 方向成分比較

図 2.2.2-61 累積変形量と累積エネルギーの関係の 1 方向入力時と 2 方向入力時の比較



(a) 1 方向、楕円、真円 (2 サイクル目のループ)



(b) 地震応答波加振 (最大変形時を含む 40 秒間)

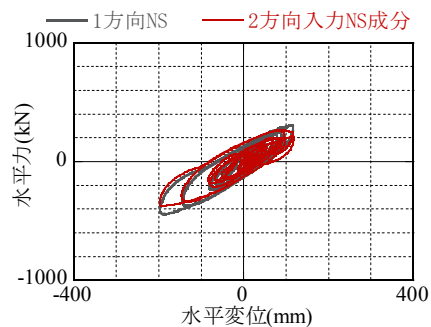


図 2.2.2-62 各加振ケースの UV 方向成分のループ形状比較

(12) 2方向加振実験のシミュレーション解析

地震応答波の2方向同時入力加振、楕円加振、真円加振について、実験のシミュレーション解析を行う。解析モデルとしては、MSSモデルに漸減荷重を考慮した修正バリエーションモデル^{2.2.2-3)}を復元力として適用したモデル、および高減衰ゴム系積層ゴムの水平2方向変形に対応した解析モデルである変形履歴積分型の復元力モデル^{2.2.2-5)}の2種類の解析モデルを用いる。ここでは、解析モデルの2方向加振時のループ形状の再現性を確認することを目的とするため、解析に用いる両モデルとも繰返し変形による特性変動は考慮しない。ただし、加振により温度が上昇した状態で行った実験結果と解析結果を比較するため、MSSモデルについては加振開始時の温度から式(2.2.2-1)～式(2.2.2-3)を用いて、 K_{eq} , H_{eq} , u の温度補正を行い、補正值を用いて解析を行った。表2.2.2-16に、MSSモデルによる解析時に用いた K_{eq} , H_{eq} , u の補正值を示す。また、変形履歴積分型の復元力モデルについては、最初に行った基本特性①の実験結果に合うように材料パラメータを設定した。表2.2.2-17に、変形履歴積分型復元力モデルによる解析で用いた材料パラメータを示す。

図2.2.2-63に、基本特性①の実験結果と2種類の解析モデルによる解析結果を比較して示す。MSSモデルによる解析結果は、復元力モデルがバイリニア型であるためループ面積が実験結果よりも大きい、最大荷重や荷重切片は実験結果と対応している。変形履歴積分型モデルについては、基本特性①のループ形状を精度良く再現している。以上より、1方向加振については両者とも実験結果を表現可能であることが確認できる。

図2.2.2-64に、地震応答波の2方向同時加振の実験結果と解析結果を比較して示す。地震応答波は、2方向加振の履歴ループへの影響が小さく、両解析モデルともループ形状を良く再現できている。図2.2.2-65に、楕円加振時の実験結果と解析結果を比較して示す。長軸方向(U方向)については、両解析モデルとも実験結果を追跡できているが、短軸方向(V方向)については、変形履歴積分型モデルによる解析は、変位ゼロ付近でのループの膨らみを表現できているが、MSSモデルによる解析は、ループ形状は似ているがループの膨らみを再現できていない。図2.2.2-66に、真円加振時の実験結果と解析結果を比較して示す。変形履歴積分型モデルによる解析は、2方向加振の影響により全体的に膨らんだループを再現している。一方、MSSモデルによる解析は、実験結果の膨らんだループ形状を再現することができていない。

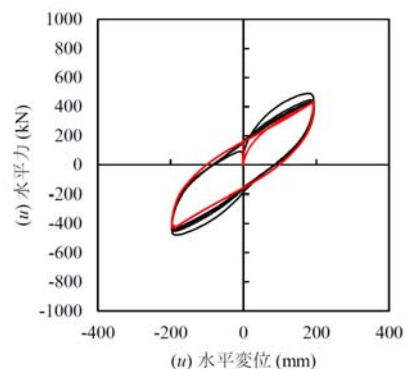
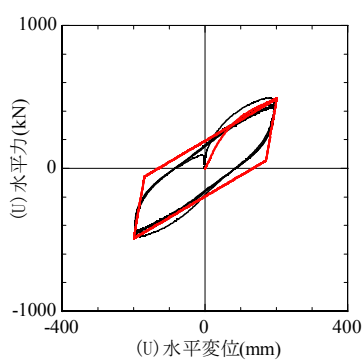
以上より、高減衰ゴム系積層ゴムの2方向加振時に、直交方向の加力の影響により変化する履歴ループ形状は、MSSモデルでは再現することができない。高減衰ゴム系積層ゴムの2方向加振時の解析には、変形履歴積分型モデル等2方向加振に対応した解析モデルを用いる必要がある。

表 2.2.2-16 MSS モデルによる解析で用いた復元力特性値の温度による補正值

	加振開始時温度 (°C)	K_{eq} 補正值	H_{eq} 補正值	u 補正值
(基準温度)	20	1.000	1.000	1.000
基本特性①	24	0.949	0.974	0.974
地震2方向加振	27	0.916	0.955	0.955
楕円加振	36	0.839	0.896	0.896
真円加振	54	0.734	0.779	0.779

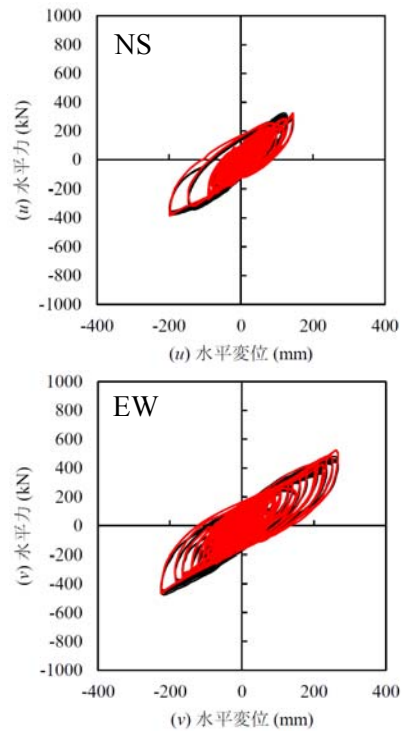
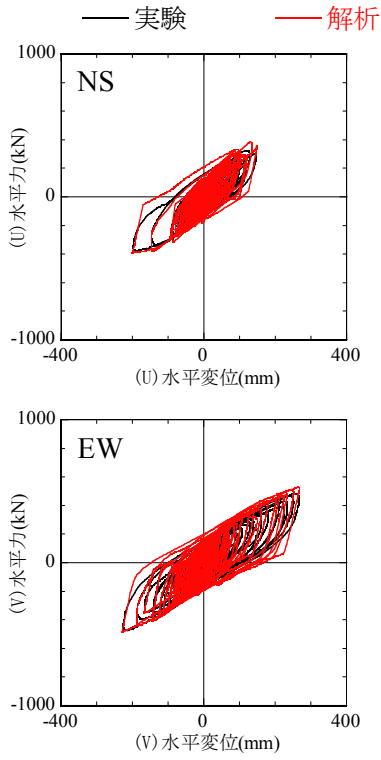
表 2.2.2-17 変形履歴積分型復元力モデルによる解析で用いた材料パラメータ

a (N/mm ²)	b (N/mm ²)	c_1 (N/mm ²)	l_1	c_2 (N/mm ²)	l_2	θ	β
0.7253	0.02820	2.372	0.03006	0.3758	0.3592	0.3696	0.4578



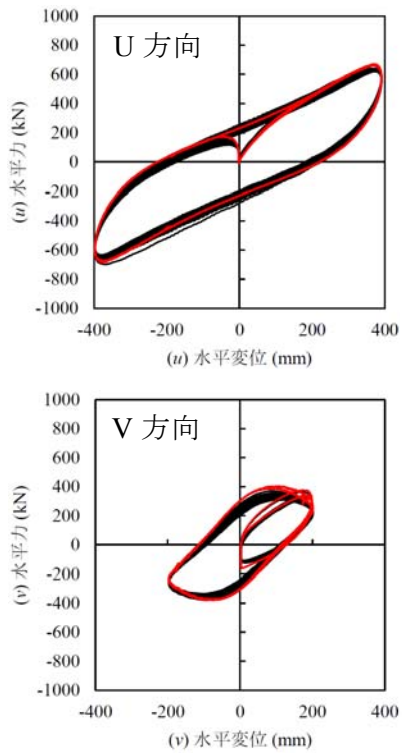
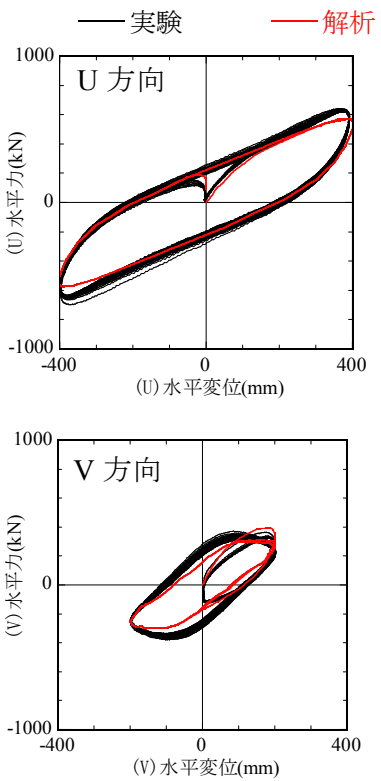
(a) MSS モデルによる解析結果 (b) 変形履歴積分型モデルによる解析結果

図 2.2.2-63 基本特性①の実験結果と解析結果の比較



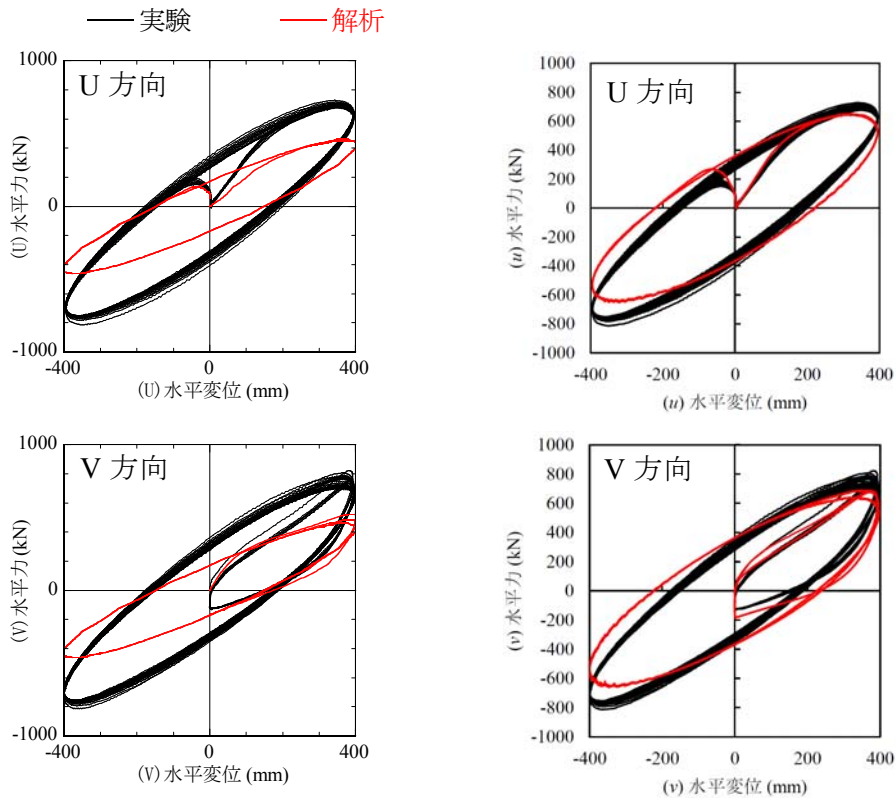
(a) MSS モデルによる解析結果 (b) 変形履歴積分型モデルによる解析結果

図 2.2.2-64 地震応答波 2 方向入力の実験結果と解析結果の比較



(a) MSS モデルによる解析結果 (b) 変形履歴積分型モデルによる解析結果

図 2.2.2-65 楕円加振の実験結果と解析結果の比較



(a) MSS モデルによる解析結果 (b) 変形履歴積分型モデルによる解析結果

図 2.2.2-66 真円加振の実験結果と解析結果の比較

13) まとめ

長周期地震動に対する高減衰ゴム系積層ゴムの力学特性の把握を目的として、直径φ1000の実大試験体による長振幅高速繰返し試験をE-ディフェンスの大型震動台を用いて実施した。加振ケースとしては、水平1方向多数回繰返し加振、水平2方向多数回繰返し加振(楕円加振および真円加振)、地震応答波加振(水平1方向および2方向)、大振幅加振の4ケースを実施した。

13.1) 多数回繰返しによる力学特性の変化

水平1方向繰返し加振、水平2方向繰返し加振とも、加振によるゴム温度の上昇とともに履歴ループが細くなった。1方向繰返し加振時には、最大変位時の荷重の低下が顕著であるが、2方向加振時では最大変位時の荷重はあまり低下せず、荷重切片の低下が見られた。2方向繰返し加振時の水平力の推移においては、弾性成分は全加振にわたりほぼ一定であったが、減衰成分は加振が進むにつれて減少する傾向が見られた。

また、各加振ケースの間に実施した、基本特性試験の履歴ループを比較すると、加振による温度上昇とともに最大荷重の低下とループ面積の減少が見られた。上昇した温度が低下することで、特性の回復が見られたが、加振1日目と加振2日目の基本特性を比較すると等価減衰定数が2日目の方が平均的に小さく、繰返しによる疲労の影響と考えられる。

13.2) 多数回繰返しによる温度上昇

地震応答波の1方向入力によるゴム温度(試験体ゴム部中心温度)の上昇は、NS入力時で1.3℃、EW入力時で2.7℃、2方向同時入力時で3.6℃であった。また、地震応答波2方向の4回連続入力によるゴム温度の上昇は13℃であり、最高ゴム温度は37℃であった。水平1方向繰返し加振によるゴム温度の上昇は、インターバルをはさまない5サイクル加振で5℃程度であり、5サイクル×12回の加振により、ゴム温度は59℃まで上昇した。楕円加振によるゴム温度の上昇は、インターバルをはさまない5サイクル加振で10℃弱であり、5サイクル×12回の加振でゴム温度は74℃まで上昇した。真円加振によるゴム温度の上昇は、インターバルをはさまない3サイクル加振で10℃強であり、3サイクル×7回の加振でゴム温度は86℃まで上昇した。

1方向、2方向入力とも正弦波の繰返し加振は、大振幅によるエネルギーが連続的に入力され続けるため、試験体の温度上昇が大きい。一方、地震応答波は大振幅によるエネルギーの入力は数回、断続的に生じるため試験体の温度上昇は、正弦波に比べると小さい。

13.3) 2方向加振による影響

楕円加振、真円加振においては、直交方向の加振の影響から、1方向加振時と比較して履歴ループ形状の顕著な変化が見られた。一方、地震応答波加振においては、1方向入力時と2方向同時入力時の履歴ループ形状の違いはわずかであり、2方向加振の影響は非常に小さかった。また、楕円加振、真円加振時に見られるループ形状の変化は、MSSモデルでは表現することができない。高減衰ゴム系積層ゴムの2方向加振時の解析を行うには、2方向加振時の復元力特性を考慮した解析モデルを用いる必要がある。

楕円加振、真円加振においては、ねじれひずみの発生が確認され、画像解析による最大ねじれひずみは楕円加振時で約80%、真円加振時で約100%であった。また、加振終了後の試験体

においてもねじれひずみの残留が見られた。

13.4) 試験体の損傷状況

本実験においては、真円加振の3サイクル×3回目の加振で上フランジ直下に内部剥離の兆候が見られ、その後の加振により内部剥離の拡大と被覆ゴムの破れが生じた。真円加振による局所的な引張せん断状態が損傷の要因と考えられる。ただし、本実験は試験体が1体のみであり、また試験体の冷却に十分な時間を確保できなかったことから、試験体に内部剥離の兆候が確認された真円加振時には、試験体は既に300m以上の累積変形を経験しており、加振開始時のゴム温度も50℃以上と高温であった。従って、本実験における試験体の損傷は、高温状態で厳しい加振ケースを繰り返したことによる試験体の疲労の影響が大きいと推測される。長周期地震動を想定した免震の応答量は累積変形量で20~30mとされており、本試験体は楕円加振等を含む厳しい加振ケースでその10倍の300mまで損傷を生じなかった。また、内部剥離が生じた後も履歴ループは健全な形状を維持していた。

13.5) 今後の課題

本実験は、試験体1体で複数の加振ケースを実施し、また試験体の冷却時間も十分に確保できなかったことから、高温状態において、想定される長周期地震動を大きく超える変位履歴を与えるという、非常に厳しい実験条件となった。そのため、本実験による力学特性および損傷状況には過酷な加振による疲労の影響が多分に含まれていると考えられる。今後は、2方向加振時の繰り返しによる特性変動と限界性能、および疲労の蓄積による特性変動と限界性能を分離して評価できるよう、複数の試験体を用いた検討が必要である。

また、縮小試験体との比較によるスケール効果の確認においても、縮小試験体と実大試験体の実験条件が同一でないことから、比較には実験値に対して様々な補正が必要であった。スケール効果を厳密に確認するためには、縮小試験体と実大試験体でできる限り同条件での実験を実施する必要がある。

高減衰ゴム系積層ゴムの2方向加振時の復元力特性を評価するには、直交方向の加振の影響で変化する履歴ループを再現可能な復元力モデルが必要である。2方向加振時の繰り返し依存性を評価するためには、高減衰ゴム系積層ゴムの2方向加振時の荷重変形関係を表現可能な復元力モデルを用いて、繰り返しによる特性変動を取り入れた解析を行う必要がある。

謝辞

本項「2.2.2 高減衰ゴム系積層ゴム」の執筆にあたりまして、実験データの分析・解析につきまして以下の方々にご助力頂きました。高減衰ゴム系積層ゴムの FEM による熱伝導解析は、株式会社ブリヂストンの森隆浩氏に実施して頂きました。画像解析によるねじれひずみの算出は、東京理科大学の柿沼貴博氏および下菌真志氏に実施して頂きました。変位履歴積分型の復元力モデルを用いた実験のシミュレーション解析は、株式会社ブリヂストンの加藤秀章氏に実施して頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 2.2.2-1) 山本祥江他：長周期地震動に対する免震部材の多数回繰返し実験 その 3：高減衰積層ゴム，日本建築学会学術講演梗概集，659-660，2011.08.
- 2.2.2-2) 株式会社ブリヂストン：高減衰ゴム系積層ゴム支承(X0.6R)技術資料
- 2.2.2-3) 山本祥江他：長周期地震動に対する免震部材のモデル化と免震建築物の応答評価 その 4：高減衰積層ゴムのモデル化と地震応答解析，日本建築学会学術講演梗概集，381-382，2012.09.
- 2.2.2-4) 鈴木重信他：建物免震用の高減衰積層ゴムに関する研究：第 2 報，破断限界，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 56, No. 523, pp.667-672, 1990.
- 2.2.2-5) 加藤秀章他：変形履歴積分型復元力モデルを用いた高減衰積層ゴム免震構造物の地震応答解析，日本建築学会構造工学論文集，Vol.58B, 231-240, 2012.03.

2.3 まとめと課題

2.3.1 まとめ

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査のクライテリア設定へ向けて、多数回繰り返し加力実験に基づく実大免震部材の特性評価を行うことを目的として、積層ゴム系実大支承（鉛プラグ入り積層ゴムおよび高減衰ゴム系積層ゴム）の動的・多数回繰り返し加振実験を実施した。本実験で得られた知見は、以下の通りまとめられる。

（１）実験手法について

- ・先行してE-ディフェンスで実施した実大免震部材加力実験の方法（第IV部参照）を踏襲することを基本とし、実験条件の優先順位を長時間・大振幅動的繰り返し加力、鉛直載荷、水平2方向加力、破断実験の順として、試験体や試験条件の先行実験との差異を考慮して実験計画を立案した。
- ・本実験では、積層ゴム試験体の高さを考慮して中立軸位置を従来の高さ（着座状態から540mm）から変更（同240mm）して運用した。新中立位置への変更運用にあたっては、事前に非積載状態における震動台の試加振により震動台が不安定状態になるなどの問題が発生しないことを確認した。
- ・試験体の破断に備えて、試験体の周囲（下部ブロック上面の外縁部）をポリカーボネード製の防護壁で遮る計画とした。

（２）実大部材実験

長周期地震動に対する積層ゴム系支承の力学特性および性能を把握するため、直径φ1000の実大試験体を用いて各種加振実験を実施した。以下に、本実験より得られた知見を記す。

1) 鉛プラグ入り積層ゴム

- ・多数回繰り返しによる力学特性値の変化

各加振の前後に実施した基本特性試験より、加振による試験体温度の上昇とともに履歴ループが小さくなるが、温度低下に伴い、履歴ループも回復することが確認された。しかし、真円加振後に実施した基本特性試験の特性値は、他のケースに比べ低く、何らかの損傷が生じていた可能性が高い。

正弦波1方向加振では、繰り返し回数が増すごとに降伏荷重 Q_d が低下し履歴ループが小さくなっているものの、安定したループを描いていることが確認された。 Q_d は初期サイクルで大きく低下する傾向が見られたが、それ以降の低下は緩やかである。正弦波1方向多数回繰り返し加振（せん断ひずみ200%、35回繰り返し、累積変形約55mm）では、 Q_d は55%まで低下した。2次剛性 K_d の変化は小さく、変化量は最大で-4%程度であった。

地震応答波1方向・2方向加振の比較では、2方向加振および温度上昇の影響により、主梁方向の履歴曲線が1方向加振よりも小さくなり、この現象は、受梁方向の振幅が大きいほど顕著であった。2方向加振では、回数ごとに履歴曲線が小さくなり、6回の繰り返しで Q_d は初回の約70%まで低下した。 Q_d の低下に反比例して温度が上昇しており、正弦波加振と同様に、試験体の温度と Q_d の低下には負の相関があることが確認された。

正弦波 2 方向加振の楕円加振における主梁方向の荷重-変形関係は、受梁方向の振幅の影響により Qd は小さくなっているものの、安定した履歴曲線を描いていた。楕円加振では、正弦波 1 方向加振の約 2 倍となる 100m の累積変形を与えたところ、Qd は累積変形 50m 程度で 40%程度まで低下した。しかし、それ以降も Qd は大きく低下することはなかったことから、累積変形が大きくなる場合においても、Qd は際限なく低下することなく、ある一定のところ収束することが明らかとなった。

- ・ 2 方向加振による影響

正弦波 2 方向加振の楕円加振の受梁方向加振、真円加振においては、主梁・受梁方向加振ともに履歴ループ面積の殆どない履歴曲線が得られた。さらに、荷重-変形関係はループが交差するケースも見られ、履歴吸収エネルギーや等価減衰定数がマイナスとなるサイクルもあった。3.4.1(7)3) 章より、試験終了後に鉛プラグが 3 層に分断されていたことが確認され、真円加振あるいは楕円加振の過酷な加振によって分断が生じたものと推察されることから、鉛プラグがほぼ剛体のように回転する現象が生じて、減衰性の低下を招いた可能性が高いことを示唆している。

真円加振時に見られる減衰性能の顕著な低下は、過酷な加振によるものと考えられ、初期に実施された 2 方向地震応答波加振結果には見られない現象である。また、真円加振のように一定振幅が長く保たれる場合に生じるものと考えられ、実際の地震動では、本現象が長周期地震動による免震建物応答に及ぼす影響は大きくないと考えられる。

- ・ 多数回繰返しによる温度上昇

各加振における累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$ は $0.6 \sim 11 \times 10^6 (\text{kN/mm})$ で、これを鉛の熱容量で除した値は $32.5 \sim 623.4^\circ\text{C}$ である。実際の鉛プラグ部の温度上昇は、フランジ中央温度から推察すると、上記よりも低かったと考えられる。

正弦波 1 方向多数回繰返し加振では、鉛中央温度は加振開始と同時に急上昇し、加振が終了すると直ちに温度が低下し始めていた。これに対し、鉛上部やフランジ中央の温度上昇は緩やかで、加振終了後も温度が上昇し続けていた。これは、鉛中央で発生した熱が、徐々に鉛内部を通過してフランジに熱伝導されているためである。フランジ端部や被覆ゴム内部の温度はほとんど上昇しなかった。鉛中央の熱電対が加振中に抜け出したため、参考値ではあるが、鉛中央の温度は最大で 30°C から 137°C まで上昇した。

地震応答波 1 方向と 2 方向では、温度上昇に明確な差は現れなかった。2 方向加振開始時の試験体温度が高かったことや、受梁方向のせん断ひずみが 70%程度と小さく温度上昇に寄与しなかったことが原因と推察する。

真円加振では履歴面積の殆どない履歴曲線が得られており、同等の累積変形を与えたケースと比較して累積履歴吸収エネルギーがかなり小さい。それにも拘わらずフランジの温度は上昇している。この理由としては、真円加振では先述の鉛プラグの分断等の損傷が既に生じて鉛プラグにおける発熱分布や周囲への熱伝達性状が変化していたことが可能性として考えられる。

2) 高減衰ゴム系積層ゴム

- ・ 多数回繰返しによる力学特性の変化

水平 1 方向繰返し加振、水平 2 方向繰返し加振とも、加振によるゴム温度の上昇とともに履歴ループが細くなった。1 方向繰返し加振時には、最大変位時の荷重の低下が顕著であるが、2 方向

加振時では最大変位時の荷重はあまり低下せず、荷重切片の低下が見られた。2 方向繰返し加振時の水平力の推移においては、弾性成分は全加振にわたりほぼ一定であったが、減衰成分は加振が進むにつれて減少する傾向が見られた。

また、各加振ケースの間に実施した、基本特性試験の履歴ループを比較すると、加振による温度上昇とともに最大荷重の低下とループ面積の減少が見られた。上昇した温度が低下することで、特性の回復が見られたが、加振 1 日目と加振 2 日目の基本特性を比較すると等価減衰定数が 2 日目の方が平均的に小さく、繰返しによる疲労の影響と考えられる。

- ・ 多数回繰返しによる温度上昇

地震応答波の 1 方向入力によるゴム温度(試験体ゴム部中心温度)の上昇は、NS 入力時で 1.3℃、EW 入力時で 2.7℃、2 方向同時入力時で 3.6℃であった。また、地震応答波 2 方向の 4 回連続入力によるゴム温度の上昇は 13℃であり、最高ゴム温度は 37℃であった。水平 1 方向繰返し加振によるゴム温度の上昇は、インターバルをはさまない 5 サイクル加振で 5℃程度であり、5 サイクル×12 回の加振により、ゴム温度は 59℃まで上昇した。楕円加振によるゴム温度の上昇は、インターバルをはさまない 5 サイクル加振で 10℃弱であり、5 サイクル×12 回の加振でゴム温度は 74℃まで上昇した。真円加振によるゴム温度の上昇は、インターバルをはさまない 3 サイクル加振で 10℃強であり、3 サイクル×7 回の加振でゴム温度は 86℃まで上昇した。

1 方向、2 方向入力とも正弦波の繰返し加振は、大振幅によるエネルギーが連続的に入力され続けるため、試験体の温度上昇が大きい。一方、地震応答波は大振幅によるエネルギーの入力は数回、断続的に生じるため試験体の温度上昇は、正弦波に比べると小さい。

- ・ 2 方向加振による影響

楕円加振、真円加振においては、直交方向の加振の影響から、1 方向加振時と比較して履歴ループ形状の顕著な変化が見られた。一方、地震応答波加振においては、1 方向入力時と 2 方向同時入力時の履歴ループ形状の違いはわずかであり、2 方向加振の影響は非常に小さかった。また、楕円加振、真円加振時に見られるループ形状の変化は、MSS モデルでは表現することができない。高減衰ゴム系積層ゴムの 2 方向加振時の解析を行うには、2 方向加振時の復元力特性を考慮した解析モデルを用いる必要がある。

楕円加振、真円加振においては、ねじれひずみの発生が確認され、画像解析による最大ねじれひずみは楕円加振時で約 80%、真円加振時で約 100%であった。また、加振終了後の試験体においてもねじれひずみの残留が見られた。

- ・ 試験体の損傷状況

本実験においては、真円加振の 3 サイクル×3 回目の加振で上フランジ直下に内部剥離の兆候が見られ、その後の加振により内部剥離の拡大と被覆ゴムの破れが生じた。真円加振による局所的な引張せん断状態が損傷の要因と考えられる。ただし、本実験は試験体が 1 体のみであり、また試験体の冷却に十分な時間を確保できなかったことから、試験体に内部剥離の兆候が確認された真円加振時には、試験体は既に 300m 以上の累積変形を経験しており、加振開始時のゴム温度も 50℃以上と高温であった。従って、本実験における試験体の損傷は、高温状態で厳しい加振ケースを繰り返したことによる試験体の疲労の影響が大きいと推測される。長周期地震動を想定した免震の応答量は累積変形量で 20~30m とされており、本試験体は楕円加振等を含む厳しい加振ケースでその 10 倍の 300m まで損傷を生じなかった。また、内部剥離が生じた後も履歴ループは

健全な形状を維持していた。

2.3.2 課題

以下に、本実験より得られた実大部材実験に関する課題を記す。

1) 鉛プラグ入り積層ゴム

本実験では、試験体が 1 体であったことや、時間の制約があり試験体の冷却時間が十分に取れなかったことから、想定される長周期地震動をはるかに超える過大な変位履歴を与えることとなった。それにより、円加振では既往研究では見られない現象が生じており、この現象の解明が今後必要である。

実験結果のシミュレーション解析結果では 1 方向加振結果（正弦波加振、地震応答波加振）や 2 方向加振結果のうち地震応答波加振については積層ゴムの内部温度や荷重変形関係、降伏荷重の変化について実験結果と解析結果とでよく一致した。2 方向加振結果のうち楕円加振、真円加振については実験結果と解析結果とで乖離が見られた。実験時に見られた荷重変形関係の履歴面積が小さくなる現象のシミュレーション解析やその特性変化が地震応答に与える影響評価については今後の課題である。

2) 高減衰ゴム系積層ゴム

本実験は、試験体 1 体で複数の加振ケースを実施し、また試験体の冷却時間も十分に確保できなかったことから、高温状態において、想定される長周期地震動を大きく超える変位履歴を与えるという、非常に厳しい実験条件となった。そのため、本実験による力学特性および損傷状況には過酷な加振による疲労の影響が多分に含まれていると考えられる。今後は、2 方向加振時の繰返しによる特性変動と限界性能、および疲労の蓄積による特性変動と限界性能を分離して評価できるよう、複数の試験体を用いた検討が必要である。

また、縮小試験体との比較によるスケール効果の確認においても、縮小試験体と実大試験体の実験条件が同一でないことから、比較には実験値に対して様々な補正が必要であった。スケール効果を厳密に確認するためには、縮小試験体と実大試験体でできる限り同条件での実験を実施する必要がある。

高減衰ゴム系積層ゴムの 2 方向加振時の復元力特性を評価するには、直交方向の加振の影響で変化する履歴ループを再現可能な復元力モデルが必要である。2 方向加振時の繰返し依存性を評価するためには、高減衰ゴム系積層ゴムの 2 方向加振時の荷重変形関係を表現可能な復元力モデルを用いて、繰返しによる特性変動を取り入れた解析を行う必要がある。

