

第6章

端部増厚した分割 UFC パネル挟込工法を施した RC 造ピロティ柱の実験

6.1 はじめに

前章までの実験で用いた補強方法は、RC 柱部材の縮尺試験体に対し、1 枚の UFC パネルを接着剤により既存 RC 柱に貼り付ける工法であるが、UFC パネルを実大寸法に換算すると重量が大きく、施工性に課題があった。本工法の主要な目的の一つであるクイックリペアの観点からも、重機等を用いずに人力による施工が可能であれば、より実用性が高まることが期待される。

そこで本章では、非分割の UFC パネル、および分割した UFC パネルによる補強を施した RC 造柱試験体の構造実験を通して、UFC パネルを複数に分割して貼り付けた場合の補強効果への影響について検討する。UFC パネルを分割して貼り付けた場合でも、終局強度までパネルが分離せず、非分割の UFC パネルを貼り付けた場合と同等の補強効果を発揮することができるかどうかを確認することが本章の目的である。

6.2 実験概要

6.2.1 試験体概要

原試験体の概要を図6.2.1-1に、試験体諸元を表6.2.1-1に、試験体に用いた各種材料の材料試験結果および接着剤の特性（保証値）を表6.2.1-2にそれぞれ示す。原試験体は対象ピロティ柱の2階梁下までを1/3スケールで再現したものであり、第4章の実験で用いた原試験体と同寸法、同配筋のものである。試験体数は3体で、原試験体を共通因子として、既存柱部分の載荷方向の2面に貼り付けるUFCパネルの分割方法をパラメータとした。

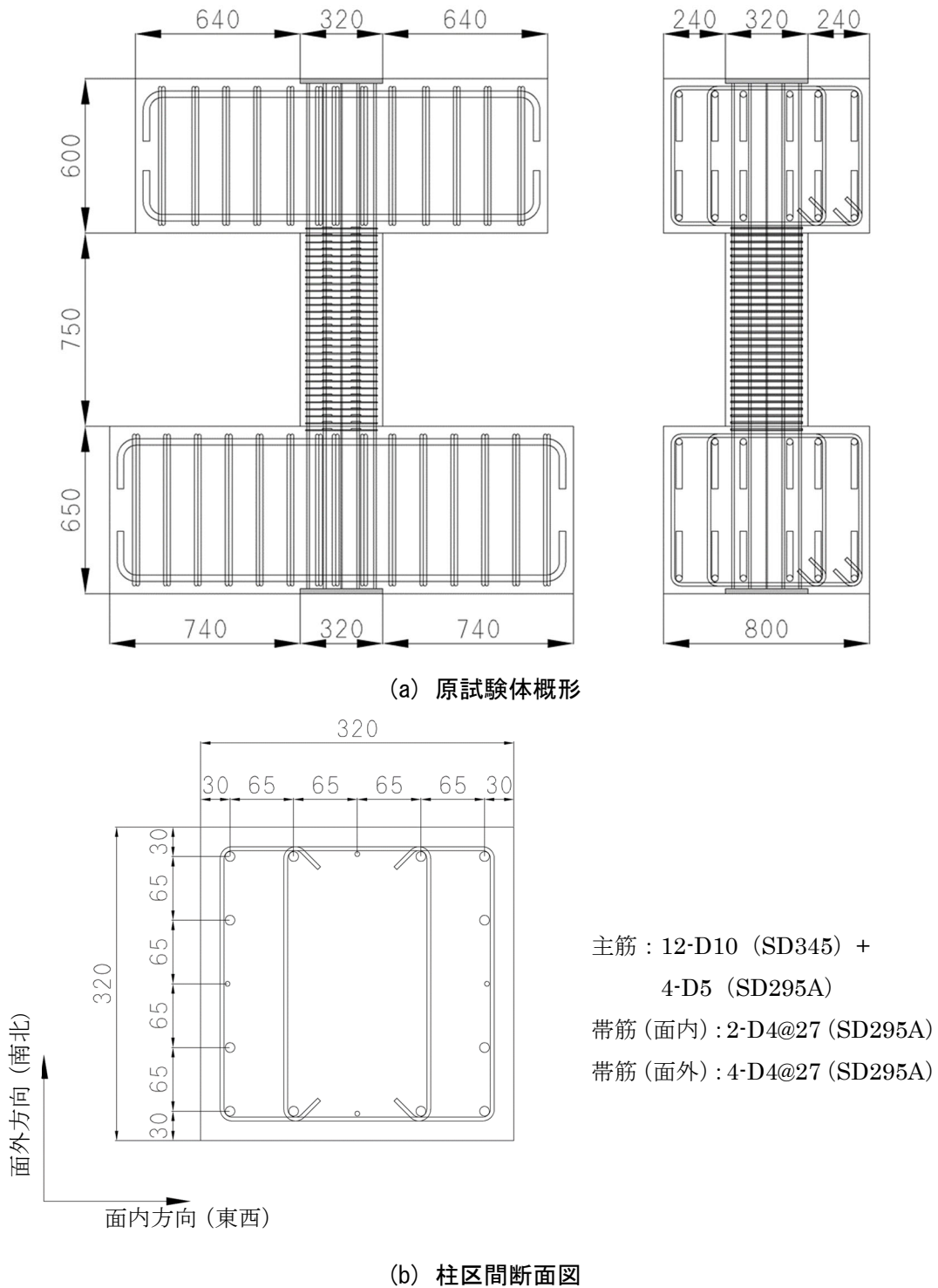


図6.2.1-1 原試験体の概要（単位 mm）

表 6. 2. 1-1 試験体諸元

試験体名	C2-UFC1	C2-UFC2	C2-UFC3
B：柱幅(mm)	320		
D：柱せい(mm)	320		
h ₀ ：内法高さ(mm)	750		
柱主筋/主筋比(%)	12-D10(SD345) + 4-D5(SD295A) / 0.922		
柱帯筋/帯筋比(%)	載荷方向：2-D4@27(SD295A) / 0.325 載荷直交方向：4-D4@27(SD295A) / 0.650		
せん断スパン比	1.17		
F _c ：コンクリート 設計基準強度(N/mm ²)	30		
UFCパネルの分割方法	非分割	縦方向：7分割	縦方向：7分割 横方向：4分割

表 6. 2. 1-2 材料試験結果

(a) コンクリート

試験体			材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度時歪 (%)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ポアソン比	密度 (t/m ³)
C2-UFC1	コンクリート	柱	46	33.2	29.9	0.203	2.61	0.20	2.28
		上スタブ	42	35.2	29.7	0.211	2.16	0.19	2.28
		下スタブ	50	35.0	33.1	0.190	2.63	0.18	2.32
	無収縮モルタル		32	139.6	37.1	0.452	6.98	-	-
C2-UFC2	コンクリート	柱	53	37.7	28.7	0.228	2.77	0.18	0.18
		上スタブ	49	35.1	30.8	0.210	2.35	0.20	0.20
		下スタブ	57	35.8	31.5	0.194	2.72	0.17	0.17
	無収縮モルタル		39	137.6	36.6	0.437	7.73	-	2.23
C2-UFC3	コンクリート	柱	62	35.6	29.6	0.209	2.23	0.15	2.27
		上スタブ	58	37.5	31.1	0.206	2.46	0.14	2.30
		下スタブ	66	36.7	29.5	0.222	2.92	0.17	2.27
	無収縮モルタル		48	138.4	37.1	0.457	-	-	2.23

※C2-UFC1のモルタルの密度計測、およびC2-UFC3のモルタルの割裂引張試験は実施できていない。

(b) UFC

	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ひび割れ強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
UFC	203	53.8	17.9	41.4

(c) 鉄筋

種類 (鋼種)	使用箇所	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (%)
D10 (SD345)	柱主筋	390.5	186.9	540.1	0.209
D5 (SD295A)		360.6	186.1	522.1	0.194
D4 (SD295A)	柱帯筋	342.9	165.3	502.1	0.208

(d) 接着剤 (保証値)

種類	引張せん断強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮弾性率 (N/mm ²)	コンクリート接着強度 (N/mm ²)
一般用エポキシ樹脂 無溶媒型、パテ状	10以上	50以上	1,000以上	1.5以上

以下に、補強試験体の概要を示す。

(1) C2-UFC1

C2-UFC1 の概要を図 6.2.1-2 に、UFC パネル図を図 6.2.1-3 にそれぞれ示す。C2-UFC1 は非分割の UFC パネルを貼り付けた試験体である。第 4 章での実験において用いた UFC パネルは、パネル中央部の厚さと端部拡幅部の厚さの比を 2 倍としていたが、実験の結果、端部目地モルタルの損傷があまり見られなかったこと、および第 2 章の FEM 解析による検討から、パネル中央部と端部拡幅部の厚さの比を 1.5 倍としても構造的に大きな影響を与えないと考えられることから、本実験ではパネル中央部の厚さを 25mm、端部拡幅部の厚さを 37.5mm としてパネル厚さの合理化を図っている。なお、厚さが増える部分には第 4 章での実験と同様に 1/4 の勾配ハンチを設けた。既存柱とパネルは厚さ 2mm のエポキシ樹脂系接着剤により接着し、パネルの上下端部 15mm の範囲には無収縮モルタルを充填した。パネルには貫通孔を設け、あらかじめ柱に設置したアンカーを用いて、ボルトとナットにより締め付けた状態で接着剤を硬化させた。なお、パネルへの押さえ込みに寄与しないように、接着剤硬化後、締め付けたナットとボルトを緩めた。

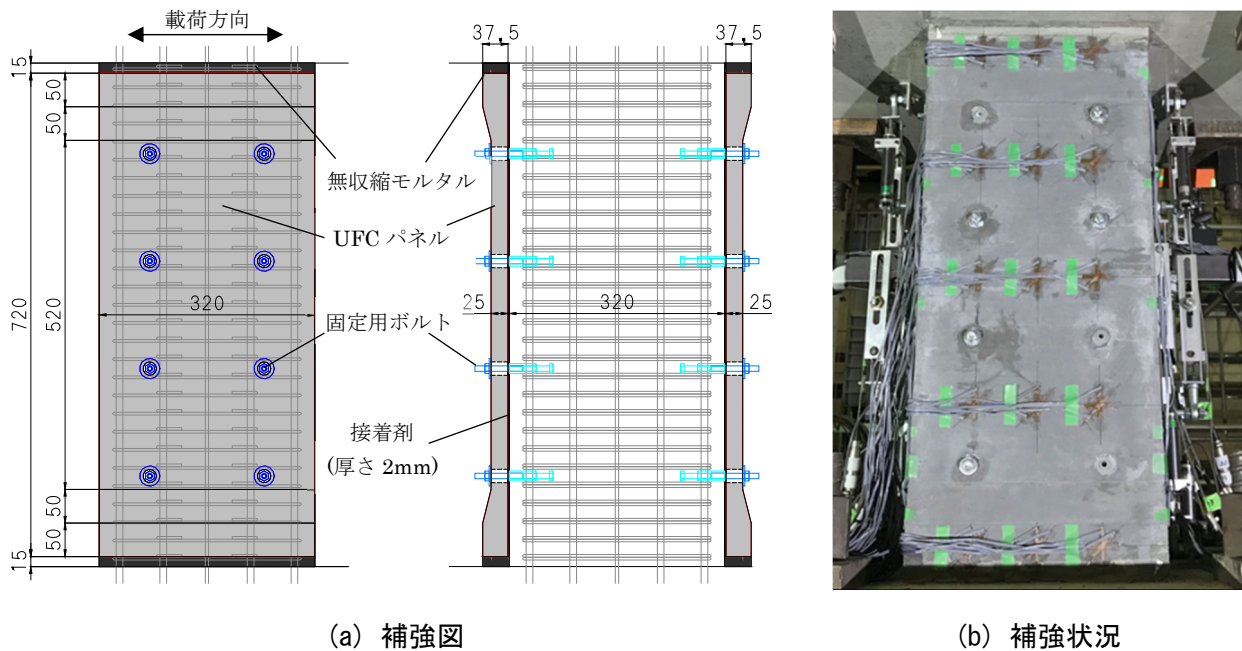


図 6.2.1-2 C2-UFC1 の補強概要 (単位 mm)

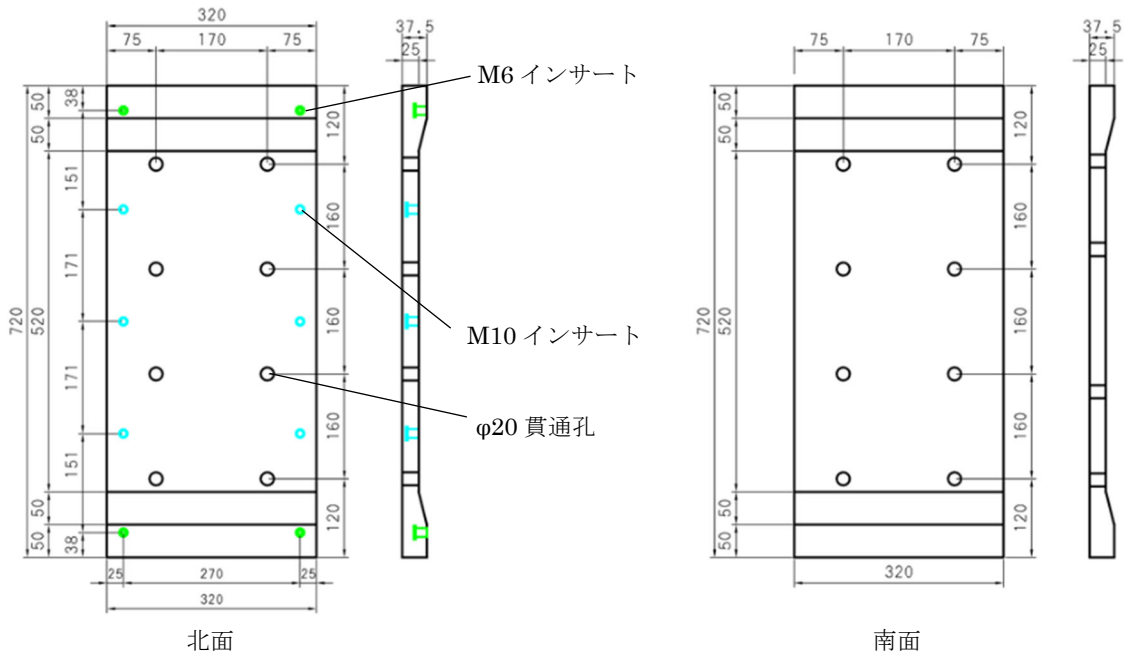
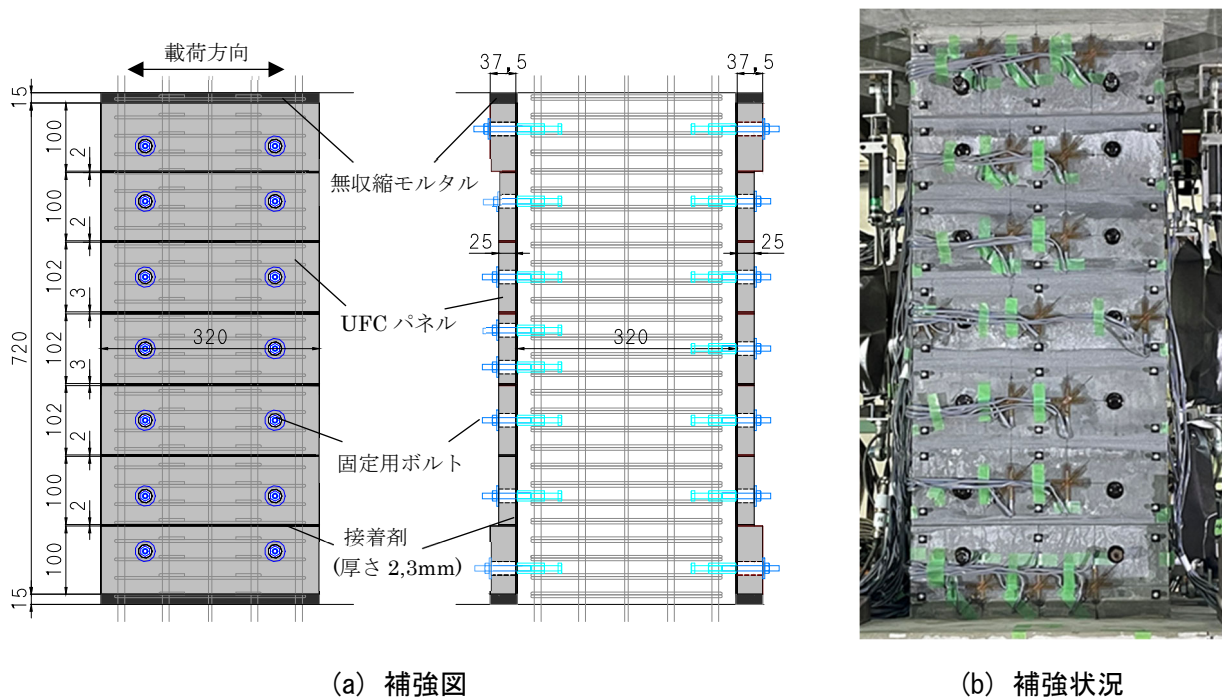


図 6.2.1-3 UFC パネル図 (C2-UFC1, 単位 mm)

(2) C2-UFC2

C2-UFC2 の概要を図 6.2.1-4 に、UFC パネル図を図 6.2.1-5 にそれぞれ示す。C2-UFC2 は UFC パネルを横方向に分割して貼り付けた試験体であり、C2-UFC1 の端部の増厚部およびテーパ部の高さの合計の 100mm を基準としてパネル 1 枚あたりの高さを割付け、縦方向に 7 分割とした。端部のパネル厚さを 37.5mm とし、その他のパネルの厚さは 25mm とした。既存柱とパネルの接着は C2-UFC1 と同様に厚さ 2mm のエポキシ樹脂系接着剤により接着し、パネル相互に関しても 2~3mm 厚のエポキシ樹脂系接着剤により接着した。端部には C2-UFC1 と同様に無収縮モルタルを充填している。



(a) 補強図

(b) 補強状況

図 6.2.1-4 C2-UFC2 の補強概要 (単位 mm)

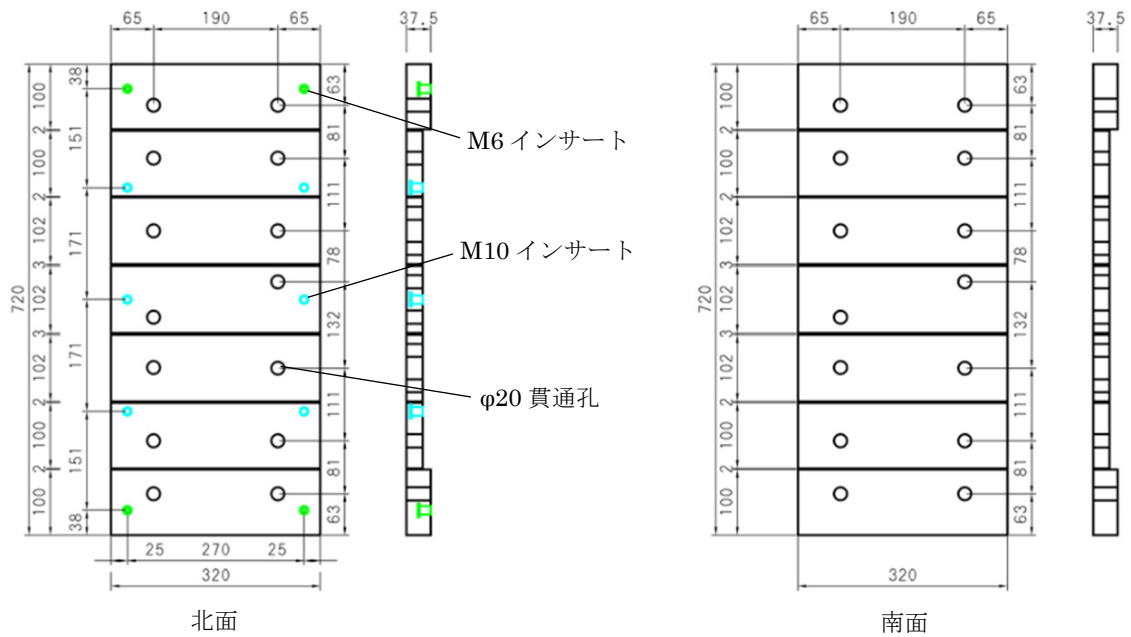
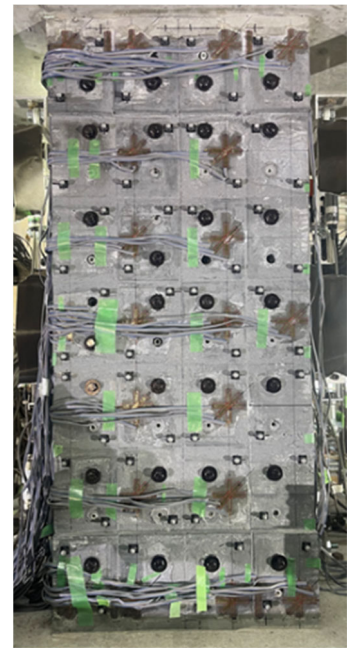
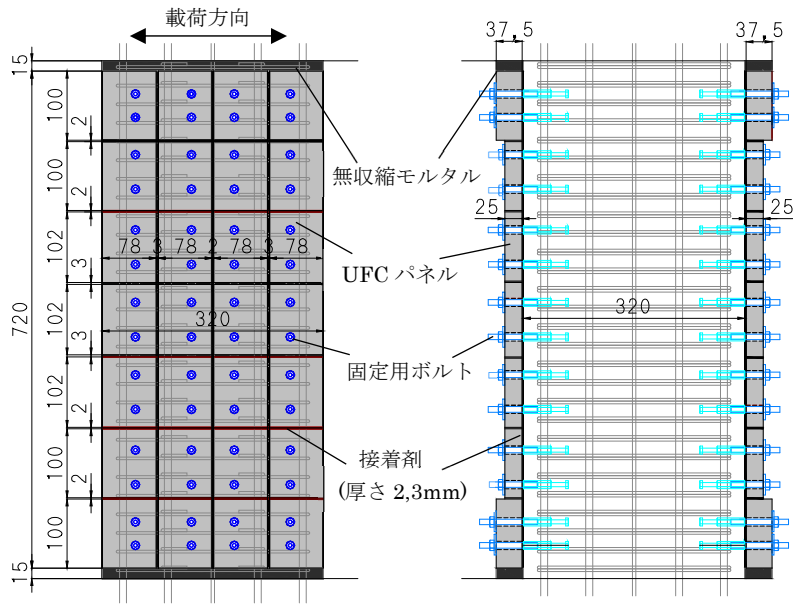


図 6.2.1-5 UFC パネル図 (C2-UFC2, 単位 mm)

(3) C2-UFC3

C2-UFC3 の概要を図 6.2.1-6 に、UFC パネル図を図 6.2.1-7 にそれぞれ示す。C2-UFC3 は UFC パネルを縦および横方向に分割して貼り付けた試験体であり、縦方向の分割方法は C2-UFC2 と同様とし、横方向にも分割を加えて縦方向 7 分割、横方向 4 分割とした。これは、実大スケールに換算した場合に、1 枚当たりのパネル質量が 25kg 以下となることを想定している。表 6.2.1-3 に各試験体に用いた UFC パネル 1 枚当たりの寸法および質量の一覧を示す。また、既存柱とパネル、およびパネル相互の接着、および上下端部の無収縮モルタルの充填は C2-UFC2 と同様であるが、既存柱とパネルとの固定用のボルトは C2-UFC1 および C2-UFC2 では M8 ボルトを用いたのに対し、C2-UFC3 では M6 ボルトを用いた。これは、パネル固定時にパネルの回転を防止するため、パネル 1 枚あたり 2 箇所以上に固定用ボルトを設置する必要があるが、C2-UFC3 では 1 枚当たりのパネル面積が小さいため、ボルト径を小さくして対処したためである。



(a) 補強図

(b) 補強状況

図 6.2.1-6 C2-UFC3 の補強概要 (単位 mm)

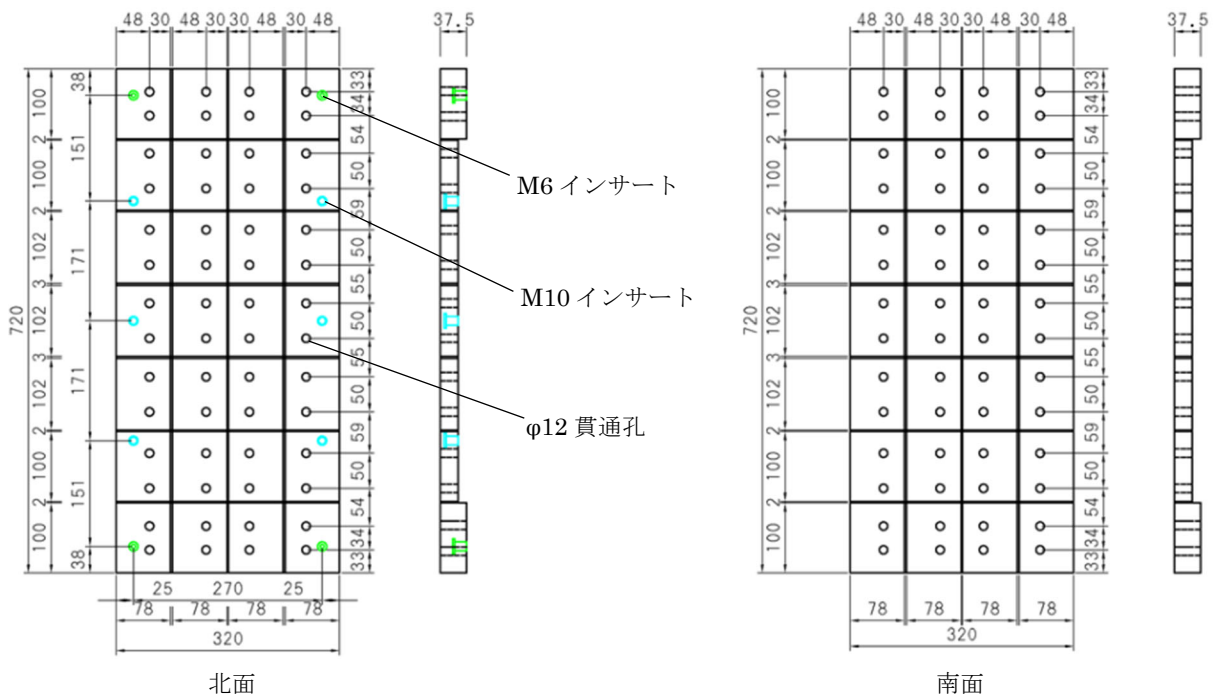


図 6.2.1-7 UFC パネル図 (C2-UFC3, 単位 mm)

表 6.2.1-3 UFC パネル寸法と質量

非分割試験体 C2-UFC1	中央		テーパ部		端部	
	1/3スケール	実スケール	1/3スケール	実スケール	1/3スケール	実スケール
UFCパネル厚さ (mm)	25	75	25~37.5	75~112.5	37.5	112.5
UFCパネル幅 (mm)	320	960	320	960	320	960
UFCパネル高さ (mm)	520	1560	50	150	50	150
UFCパネル密度 (t/m ³)	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82
1枚あたりのUFCパネル質量 (kg)					17.9	484.3

分割試験体 C2-UFC2	中央1		中央2		端部	
	1/3スケール	実スケール	1/3スケール	実スケール	1/3スケール	実スケール
UFCパネル厚さ (mm)	25	75	25	75	37.5	112.5
UFCパネル幅 (mm)	320	960	320	960	320	960
UFCパネル高さ (mm)	108	324	100	300	100	300
UFCパネル密度 (t/m ³)	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82
1枚あたりのUFCパネル 質量 (kg)	2.4	65.8	2.3	60.9	3.4	91.4

分割試験体 C2-UFC3	中央1		中央2		端部	
	1/3スケール	実スケール	1/3スケール	実スケール	1/3スケール	実スケール
UFCパネル厚さ (mm)	25	75	25	75	37.5	112.5
UFCパネル幅 (mm)	78	234	78	234	78	234
UFCパネル高さ (mm)	108	324	100	300	100	300
UFCパネル密度 (t/m ³)	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82
1枚あたりのUFCパネル 質量 (kg)	0.6	16.0	0.5	14.8	0.8	22.3

6.2.2 荷重計画

荷重装置図を図 6.2.2-1 に示す。鉛直に設置した 2 本の 1000kN ジャッキにより試験体の上下スタブの平行を維持し、かつ軸力を作用させた状態で、試験体柱部分のスパン中央高さにおいて 2000kN ジャッキにより水平力を与えた。軸力はピロティ架構の 1 階柱を想定して変動軸力とした。図 6.2.2-2 に軸力の荷重経路図を示す。長期軸力は文献[6-1]を基に $0.15B D f'_c$ とし、目標最大引張軸力は文献[6-2]を参考に $-0.75 A_g \sigma_y$ (A_g : 柱主筋全断面積, σ_y : 柱主筋降伏強度) とした。目標最大圧縮軸力は、長期軸力の 2 倍に $A_g \sigma_y$ を加えた値を丸めて $0.40 B D f'_c$ (B : 柱幅, D : 柱せい, f'_c : 材料試験結果に基づくコンクリートの圧縮強度) を作用させた。また、引張側では目標軸力時における試験体 RC 柱単体の曲げ終局耐力の $1/2$ ($0.5 Q_{mu}$) 時点、圧縮側では目標軸力時における試験体の RC 柱単体のせん断終局耐力の $1/2$ ($=0.5 Q_{su}$) 時点を折れ点とし、長期軸力時から線形に軸力を増減させた。表 6.2.2-1 に試験体 RC 柱単体の諸強度、表 6.2.2-2 に目標軸力の一覧を示す。無補強時の RC 柱単体は目標最大圧縮軸力時においてせん断破壊が先行する柱 (せん断余裕度 0.8) である。なお、試験体 RC 柱単体の曲げ終局耐力は 4.2.3 項に示される (式 4.2.3-2) および (式 4.2.3-4) を用いて算出し、せん断終局耐力は (式 4.2.3-7) を用いて算出した。

荷重は変位制御による正負交番繰り返し漸増荷重とし、上下スタブの相対水平変位を内法高さで除して算出した変形角 R を用いて、全試験体共通サイクルとして $R=0.03125\%$ で 1 回, $R=0.0625\%$, 0.125% , 0.25% , 0.5% , 0.75% , 1.0% , 1.5% , 2.0% , 3.0% においてそれぞれ正負 2 回繰り返した。荷重サイクルを図 6.2.2-3 に示す。

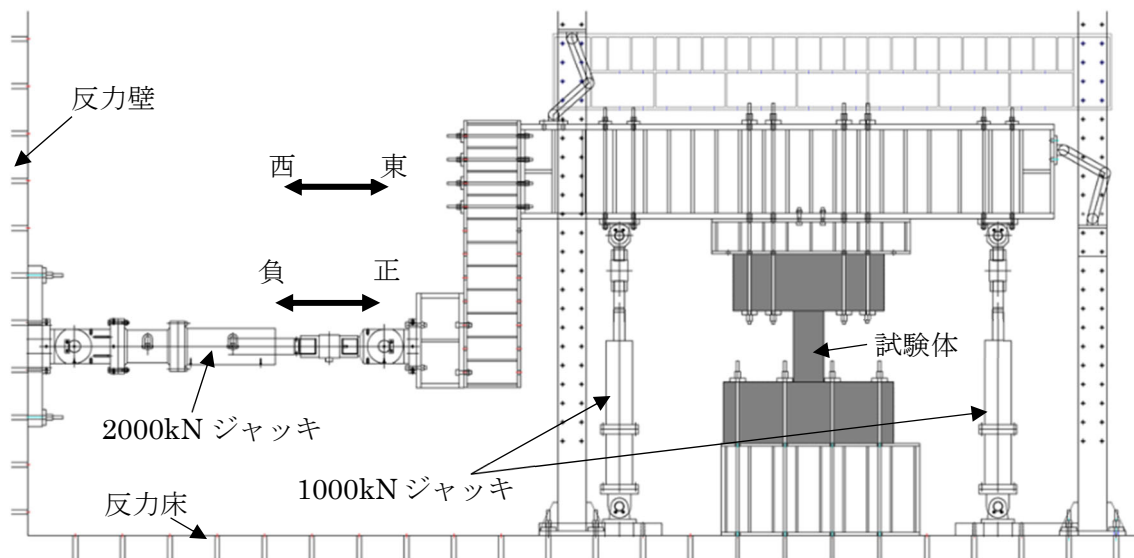


図 6.2.2-1 荷重装置図

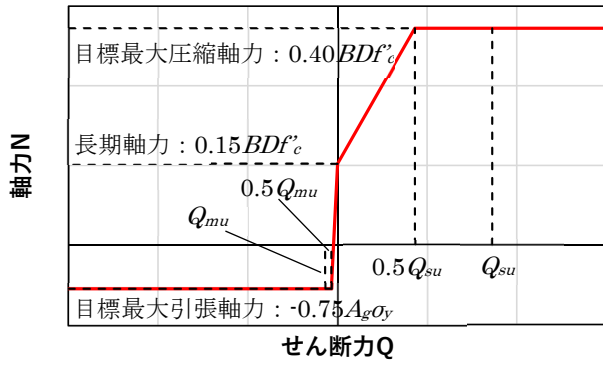


図 6.2.2-2 軸力荷経路

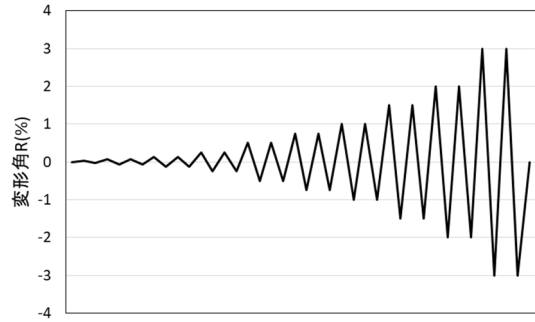


図 6.2.2-3 荷サイクル

表 6.2.2-1 試験体 RC 柱単体の諸強度

試験体		曲げ終局耐力 Q_{mu} (kN)	せん断終局耐力 Q_{su} (kN)	せん断余裕度
正側(圧縮側)	C2-UFC1	435	345	0.79
	C2-UFC2	480	374	0.78
	C2-UFC3	459	361	0.79
負側(引張側)	C2-UFC1	27.2	224	8.24
	C2-UFC2		239	8.81
	C2-UFC3		232	8.54

表 6.2.2-2 目標軸力の一覧

試験体	コンクリートの圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	長期軸力 $0.15BDf'_c$ (kN)	最大圧縮軸力 $0.40BDf'_c$ (kN)	最大引張軸力 $-0.75a_g \sigma_y$ (kN)
C2-UFC1	33.2	510	1360	-274
C2-UFC2	37.7	579	1544	
C2-UFC3	35.6	547	1458	

6.2.3 計測計画

本実験ではひずみゲージ，変位計，および光学式モーションキャプチャにより，試験体に生じるひずみや変形を計測した。以下に各計測項目について示す。

(1) ひずみゲージ

本実験において鉄筋に貼り付けたひずみゲージの位置図を図 6.2.3-1 に，UFC パネル表面に貼り付けたひずみゲージの位置図を図 6.2.3-2 にそれぞれ示す。鉄筋に貼り付けたひずみゲージは各試験体共通とし，UFC パネル表面に貼り付けたひずみゲージは，UFC パネルに設けた貫通孔との干渉を避けるよう各試験体において貼り付け位置を設定した。

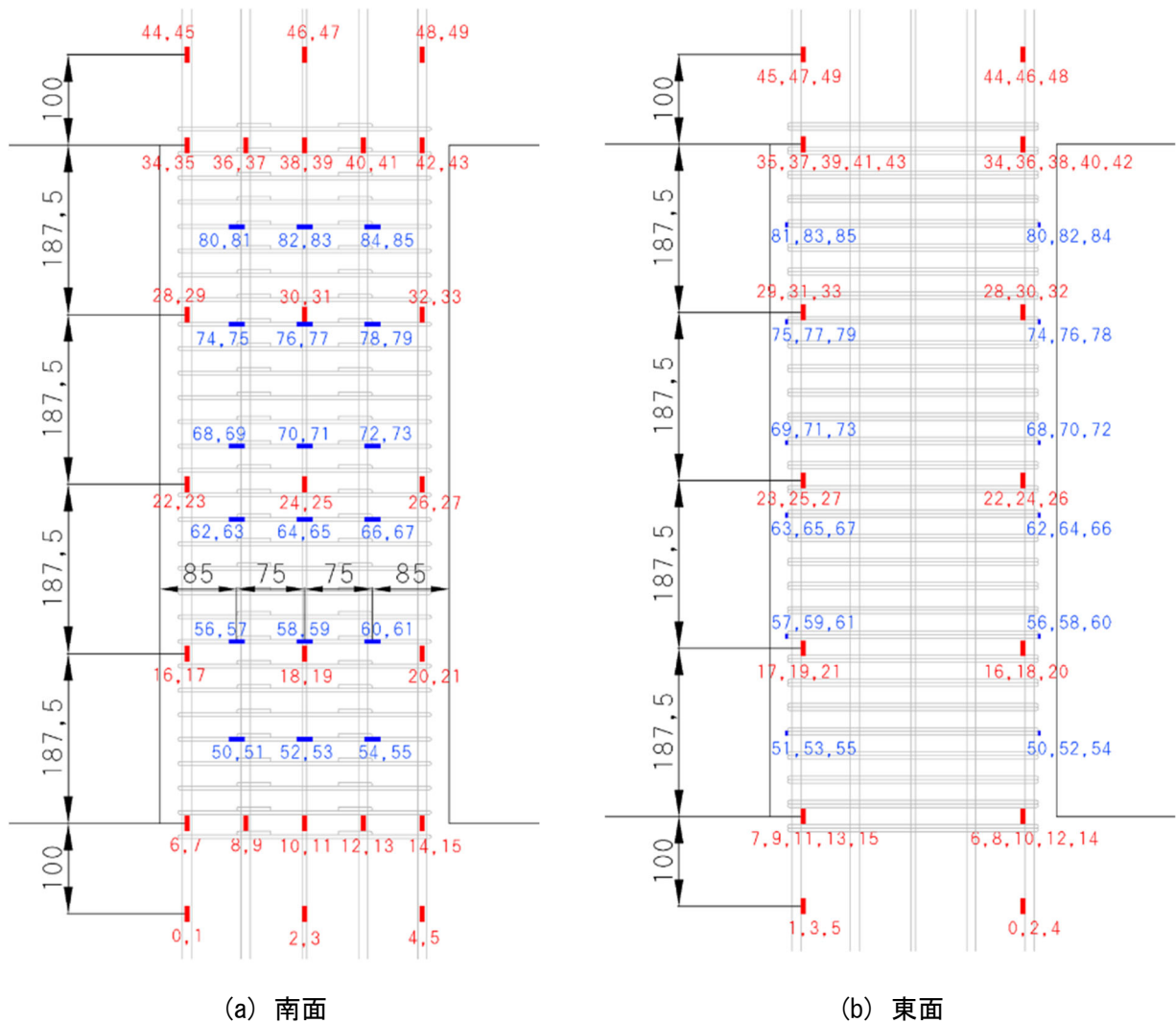
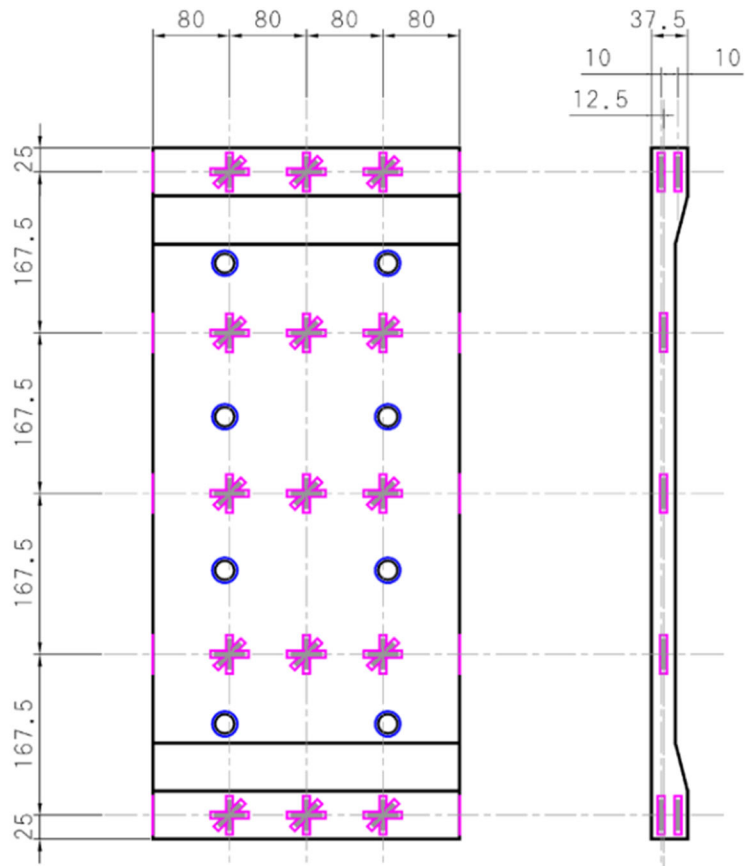
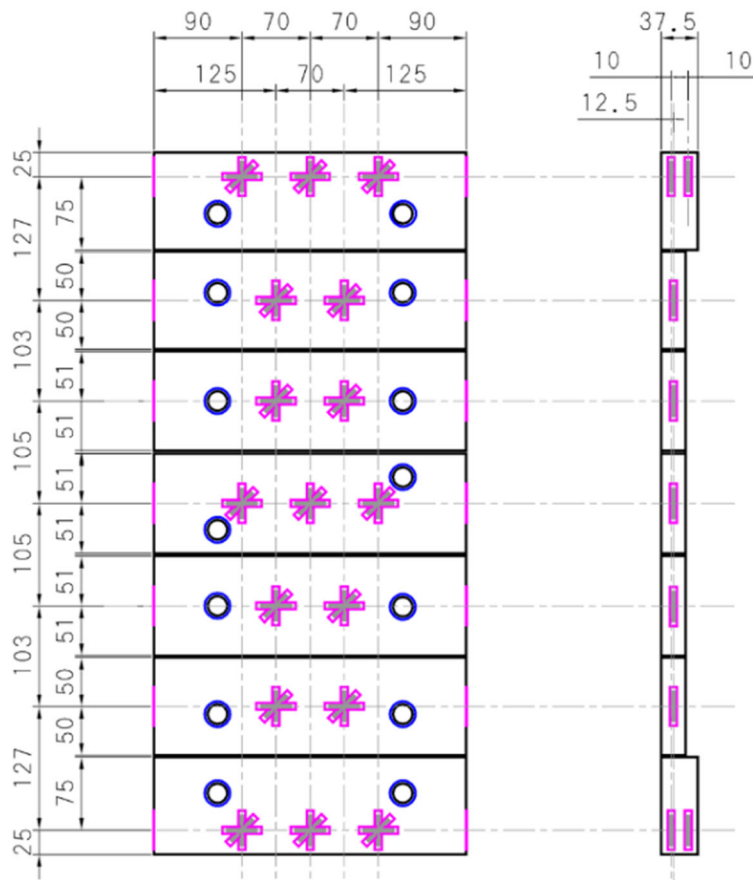


図 6.2.3-1 ひずみゲージ位置図（鉄筋）

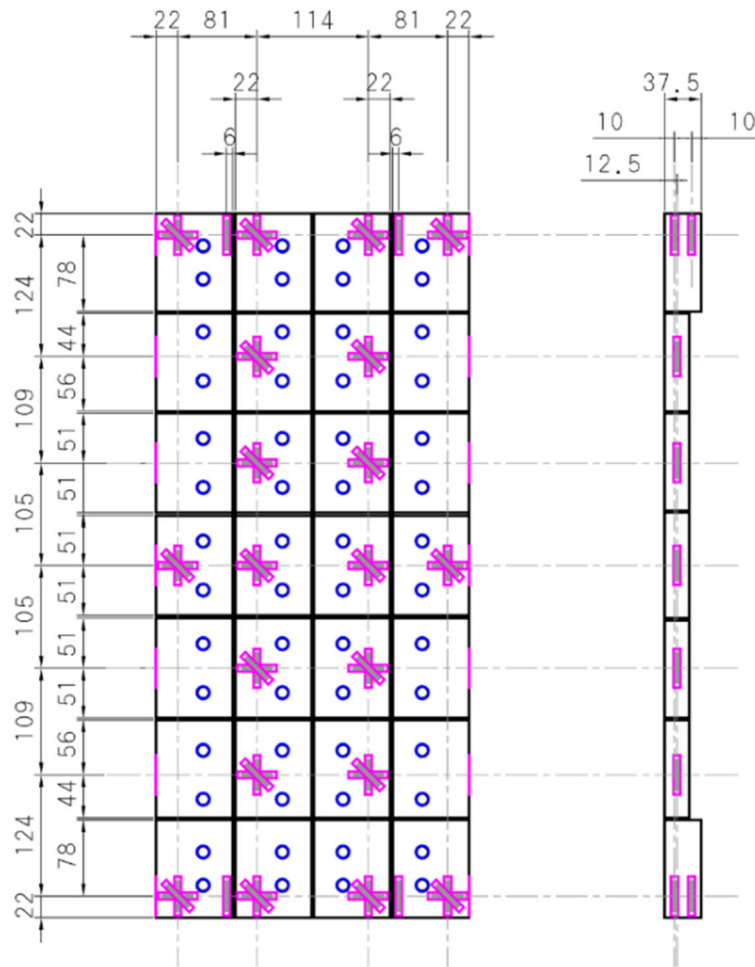


(a) C2-UFC1 (南面)



(b) C2-UFC2 (南面)

図 6.2.3-2 ひずみゲージ位置図 (UFC パネル表面)

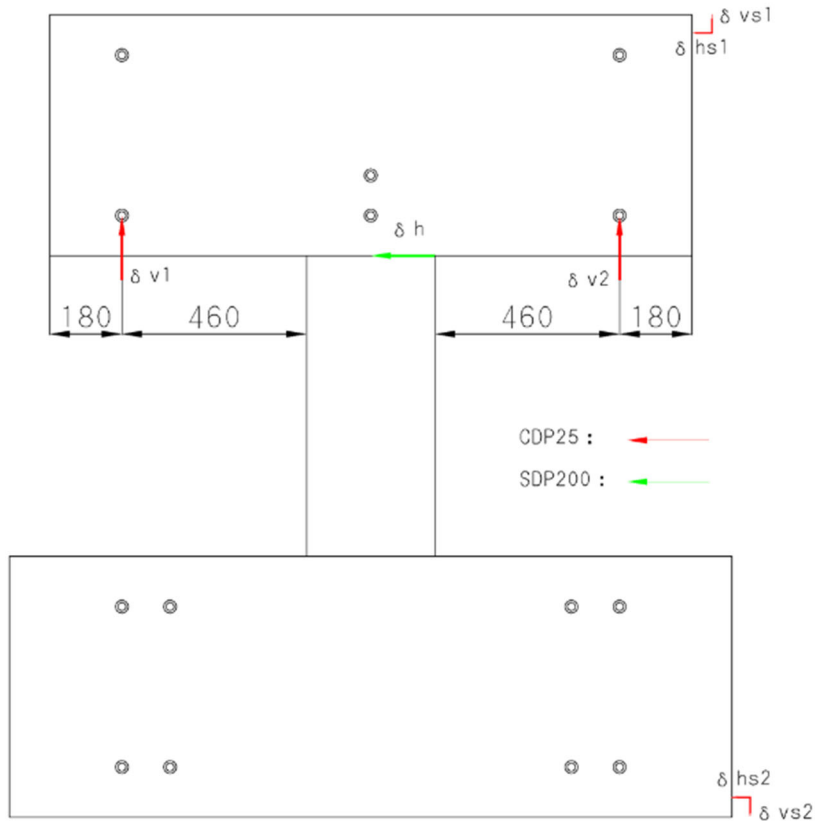


(c) C2-UFC3 (南面)

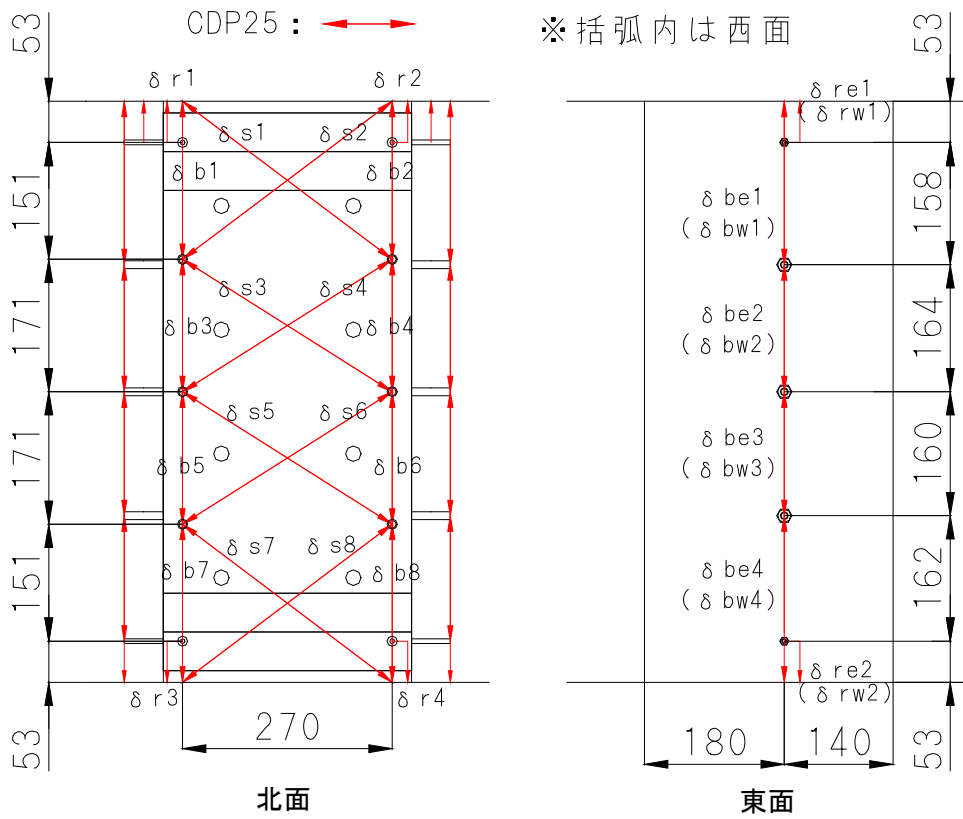
図 6.2.3-2 (続き) ひずみゲージ位置図 (UFC パネル表面)

(2) 変位計

変位計の位置図を図 6.2.3-3 に示す。変位計は上下スタブ、UFC パネルに設置したインサート、および柱東西面に設置したインサートに取り付けた。上スタブに取り付けた変位計 (δ_{v1} , δ_{v2}) は上スタブの平行維持のための制御に用いた。また、上スタブに取り付けた変位計 (δ_h) を用いて、柱に生じる変形角の制御を行った。柱区間に生じる曲げ変形、およびせん断変形は UFC パネル、および柱側面に取り付けた変位計 ($\delta_{b1} \sim \delta_{b8}$, $\delta_{s1} \sim \delta_{s8}$, $\delta_{be1} \sim \delta_{be4}$, $\delta_{bw1} \sim \delta_{bw4}$) を用いて算出した。また、UFC パネル、および柱側面の上下端部に取り付けた変位計 ($\delta_{r1} \sim \delta_{r4}$, δ_{re1} , δ_{re2} , δ_{rw1} , δ_{rw2}) を用いて端部の回転変形を算出した。さらに、C2-UFC2, C2-UFC3 に関しては、分割された UFC パネル間の離間を計測するため、パネル側面にパイ型変位計 ($\delta_{p1} \sim \delta_{p12}$) を取り付けた。

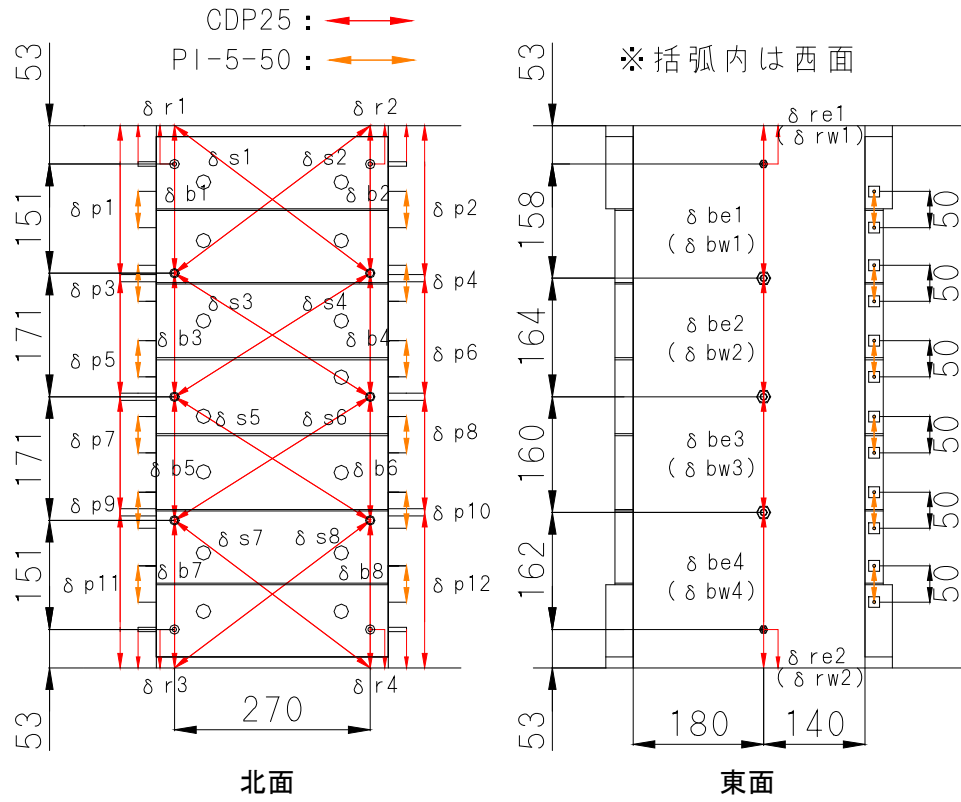


(a) 上下スタブ (各試験体共通)

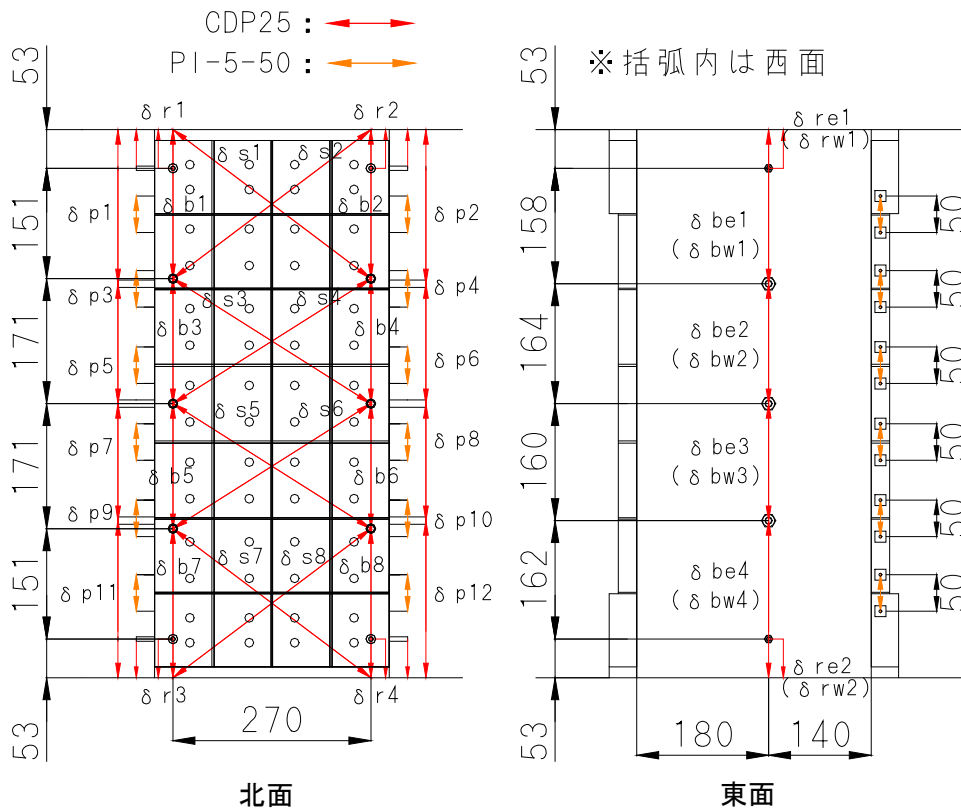


(b) C2-UFC1

図 6. 2. 3-3 変位計位置図



(c) C2-UFC2



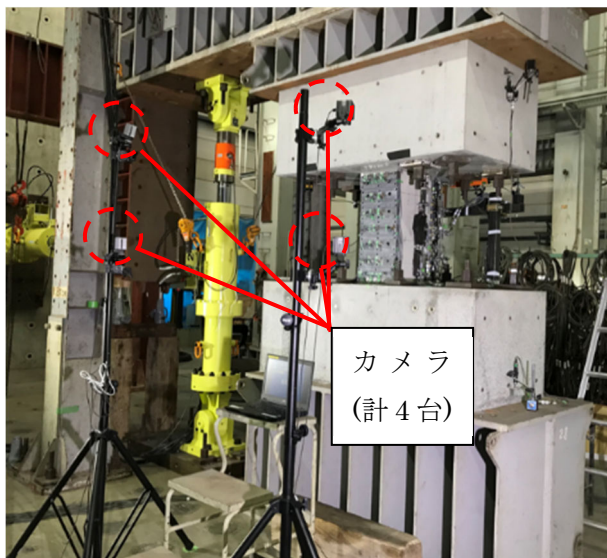
(d) C2-UFC3

図 6.2.3-3 (続き) 変位計位置図

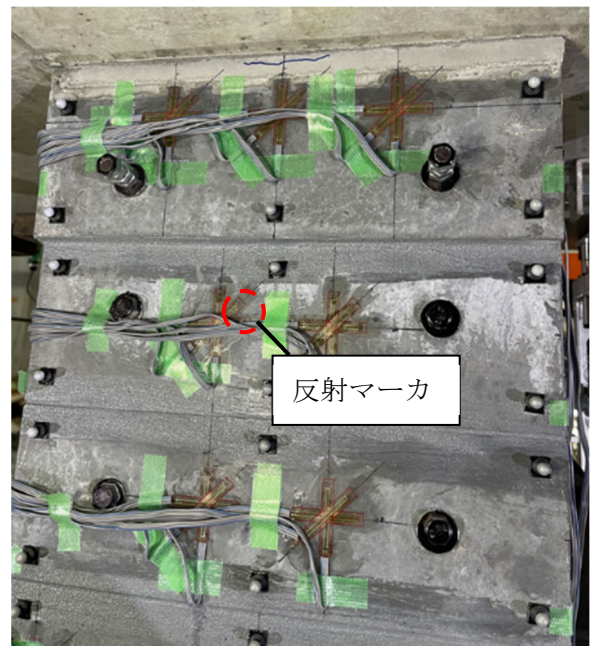
(3) 光学式モーショキャプチャ

複数に分割された UFC パネルの挙動を把握するため、光学式モーショキャプチャによる計測を行った。この計測手法は、UFC パネルの表面に専用の反射マーカ（直径 6.4mm の球形）を取り付け、試験体の周囲に設置した専用のカメラ（OptiTrack PrimeX13）4 台により、マーカの 3 次元位置情報を計測する手法である。光学式モーショキャプチャの計測状況を図 6.2.3-4 に示す。計測対象は柱区間の表面 1 面であり、計測面は 0.32m×0.75m で、計測範囲の上部が最大で 15mm～30mm 程度動く。試験体中心位置から半径 2m の円上に 2 箇所カメラスタンドを設置し、1 カ所につき 2 台の専用カメラを上下方向に設置し、計測面を撮影した。計測面の範囲が狭く、また UFC パネルも面積が小さいので、使用する反射マーカは最小の 6.4mm とする。OptiTrack PrimeX13 を試験体計測面から 2.0m の位置に設置した場合の計測エリアと各方向の計測精度は、表 6.2.3-1 のように計算できる。なお、UFC パネルにはボルトが設置されているが、このボルトが光を反射しないように黒い塗料を塗り付けた。

各試験体に設置した反射マーカの設置位置図を図 6.2.3-5 に示す。計測用マーカは C2-UFC2 では UFC パネルの隅角部および中央部にパネル 1 枚あたり 5～6 箇所設置し、C2-UFC3 では UFC パネルの隅角部にパネル 1 枚あたり 2 箇所設置した。また、計測マーカは UFC パネルの隅から縦横それぞれ 15mm 内側の場所に設置した。マーカどうしを 30mm 離す必要があるため、図面ではマーカの周りに半径 15mm の円を描いている。また、図中に示すように反射マーカごとに名称を付けた（ただし、C2-UFC3 は図中に名称の記載するスペースが無いいため名前の文頭の「OT」を省略して描いている）。



(a) カメラ設置状況



(b) マーカ設置状況

図 6.2.3-4 光学式モーショキャプチャの計測状況

表 6.2.3-1 計測精度などの計算結果

OptiTrack PrimeX 13, 反射マーカ 6.4mm

水平視野角	56 [度]	計測可能エリア(水平長さ)	2.13 [m]
垂直視野角	46 [度]	計測可能エリア(鉛直長さ)	1.70 [m]
水平解像度	1280 [pixel]	期待精度 (水平)	0.033 [mm]
垂直解像度	1024 [pixel]	期待精度 (鉛直)	0.033 [mm]
マーカサイズ	6.4 [mm]	保証精度 (水平)	0.199 [mm]
カメラ設置距離	2.0 [m]	保証精度 (鉛直)	0.199 [mm]
計測面(水平長さ)	0.35 [m]	必要マーカサイズ	5.0 [mm]
計測面(鉛直長さ)	0.75 [m]		

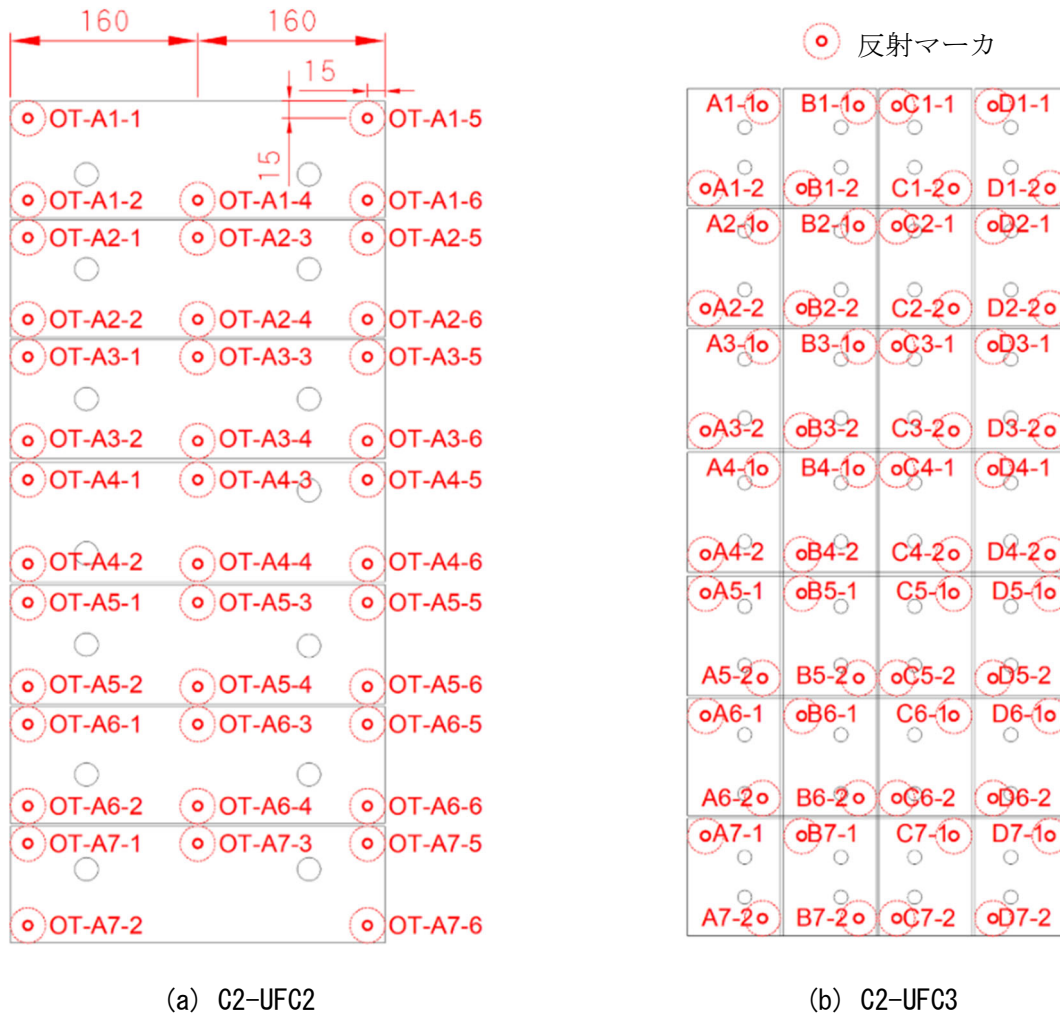


図 6.2.3-5 反射マーカの設置位置

UFC パネルが剛体変位すると仮定し、光学式モーションキャプチャで計測したデータからパネルの変位を計算する方法を下記のように示す。

ある 2 次元平面における任意形状の剛体が移動した場合、図 6. 2. 3-6 のように剛体は回転中心 $C(x, y)$ から $C'(x+c\delta_x, y+c\delta_y)$ の位置に並進移動 (X 方向に $c\delta_x$, Y 方向に $c\delta_y$) し、また C' を中心に回転 ($c\theta$) する。この時、剛体上の任意の点 $i(x, y)$ は点 $i'(x+i\delta_x, y+i\delta_y)$ に移動する。この移動量は、回転中心位置の並進変位 ($c\delta_x, c\delta_y$) と回転角 ($c\theta$) がわかれば、(式 6. 2. 3-1) 及び (式 6. 2. 3-2) で計算できる。

$${}_i\delta_x = {}_c\delta_x + (\cos {}_c\theta - 1)({}_i x - {}_c x) - \sin {}_c\theta({}_i y - {}_c y) \quad (\text{式 6. 2. 3-1})$$

$${}_i\delta_y = {}_c\delta_y + (\cos {}_c\theta - 1)({}_i y - {}_c y) + \sin {}_c\theta({}_i x - {}_c x) \quad (\text{式 6. 2. 3-2})$$

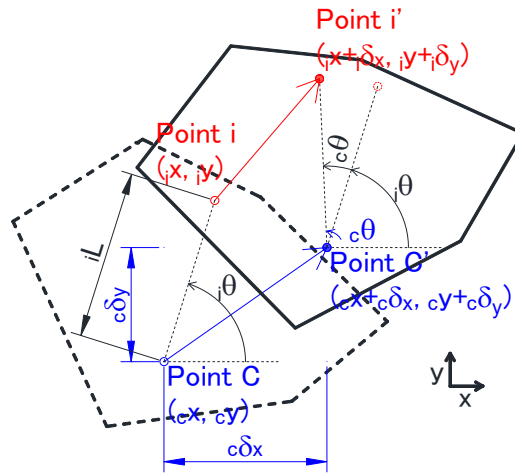


図 6. 2. 3-6 任意形状の剛体の変形

ここで、図 6. 2. 3-5 のように UFC パネル 1 枚につき 2 点以上 ($i=1, 2$) の計測点で計測した場合、パネルの図心位置を回転中心 C として計算すると図 6. 2. 3-5 のように 2 点の計測点は図心について対称に設置しているので、図心での x 方向変位 $c\delta_x$, y 方向変位 $c\delta_y$, 回転角 $c\theta$ は、(式 6. 2. 3-3) 及び (式 6. 2. 3-4) で計算できる。なお、C2-UFC2 では、図心に対し対称な 2 点の計測点 (例えば、上から 2 段目のパネルの場合では、「OT-A2-1, OT-A2-6」「OT-A2-2, OT-A2-5」「OT-A2-3, OT-A2-4」の 3 つの組み合わせ) を用いて図心での x 方向変位 $c\delta_x$, y 方向変位 $c\delta_y$, 回転角 $c\theta$ を計算する。

$${}_c\delta_x = \frac{{}_1\delta_x + {}_2\delta_x}{2}, \quad {}_c\delta_y = \frac{{}_1\delta_y + {}_2\delta_y}{2}, \quad {}_c\theta = \arctan\left(\frac{h}{w}\right) - \arctan\left(\frac{h + {}_2\delta_y - {}_1\delta_y}{w + {}_2\delta_x - {}_1\delta_x}\right) \quad (\text{式 6. 2. 3-3})$$

$${}_c\theta = \arctan\left(\frac{h}{w}\right) - \arctan\left(\frac{h + {}_2\delta_y - {}_1\delta_y}{w + {}_2\delta_x - {}_1\delta_x}\right) \quad (\text{式 6. 2. 3-4})$$

ここで、 h : 計測点 2 点の y 方向計測点間距離, w : 計測点 2 点の x 方向計測点間距離である。

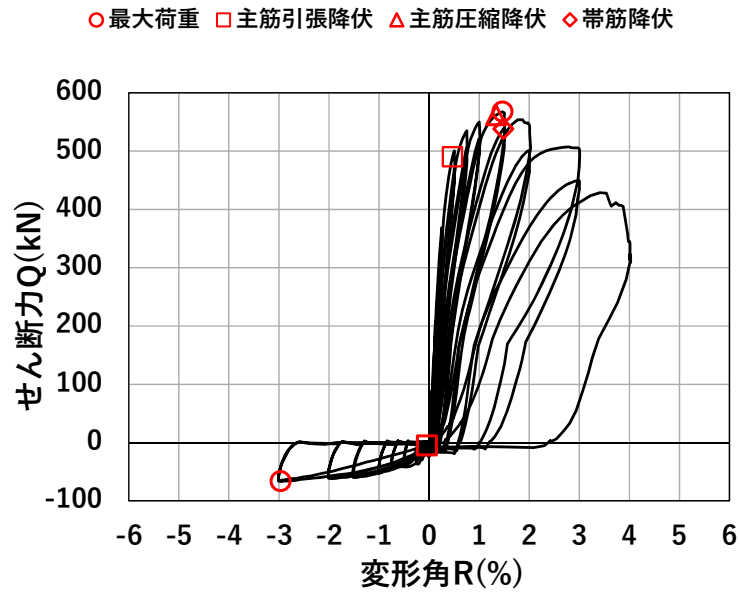
6.3 実験結果

6.3.1 水平荷重 Q –変形角 R 関係

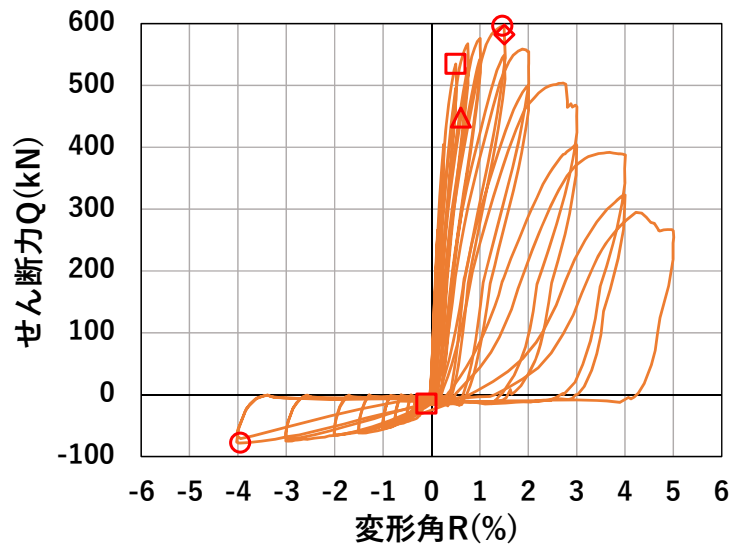
各試験体の水平荷重 Q –変形角 R 関係を鉄筋の降伏状況とともに図 6.3.1-1 に、各試験体の特性点の一覧を表 6.3.1-1 にそれぞれ示す。C2-UFC1 の最大耐力は正側で 567.6kN、負側で-66.7kN であった。負荷側において $R=0.0625\%$ サイクルで主筋が引張降伏し、正荷側においては $R=0.5\%$ サイクルで主筋の引張降伏が確認された。その後、 $R=1.5\%$ サイクルにおいて主筋の圧縮降伏、および帯筋の降伏が確認され、最大耐力に至った。 $R=+4.0\%$ のピーク手前では北面の UFC パネルのせん断ひび割れの発生に伴う耐力低下が見られた。

次に、C2-UFC2 の最大耐力は正側で+596.0kN、負側で-78.1kN であった。負荷側において $R=0.125\%$ サイクルで主筋が引張降伏し、正荷側においては $R=0.5\%$ サイクルで主筋の引張降伏が確認された。その後 $R=1.0\%$ サイクルにおいて主筋が圧縮降伏し、 $R=1.5\%$ サイクルにおいて帯筋の降伏が確認され最大耐力に至った。最大耐力以降、各変形角ピーク時の荷重は低下するものの、 $R=+5.0\%$ まで急激な耐力低下は見られなかった。

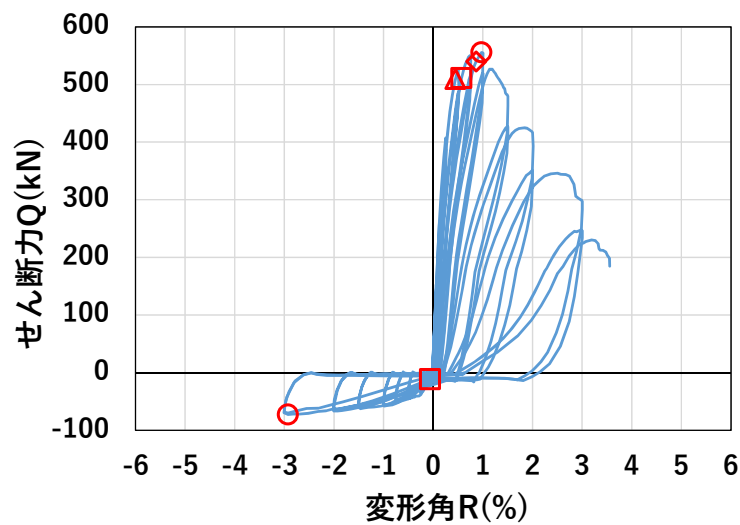
続いて、C2-UFC3 の最大耐力は正側で+555.7kN、負側で-72.8kN であった。負荷側において $R=0.0625\%$ サイクルで主筋が引張降伏し、正荷側においては $R=0.75\%$ サイクルで主筋の引張降伏、および圧縮降伏が確認された。その後 $R=1.0\%$ サイクルにおいて帯筋の降伏が確認され最大耐力に至った。最大耐力以降、各変形角ピーク時の荷重の低下が大きく、 $R=+4.0\%$ ピークに向かう途中で UFC パネルのせん断破壊に伴う急激な荷重低下が生じ、軸力を保持できなくなったため載荷を終了した。



(a) C2-UFC1



(b) C2-UFC2



(c) C2-UFC3

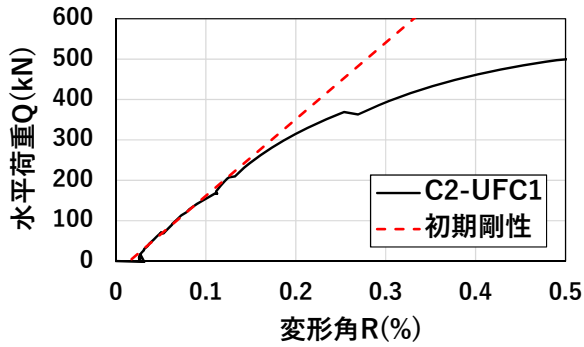
図 6.3.1-1 水平荷重 Q —変形角 R 関係

表 6.3.1-1 各試験体の特性点一覧

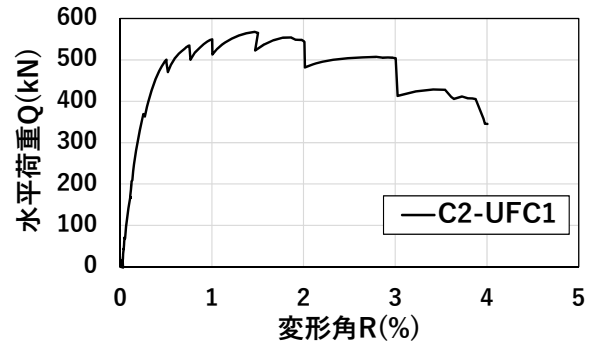
		正側		負側	
		変形角 (%)	荷重(kN)	変形角 (%)	荷重(kN)
C2-UFC1	最大荷重	1.466	567.6	-2.963	-66.7
	主筋引張降伏	0.469	490.2	-0.044	-5.24
	主筋圧縮降伏	1.338	561.7	-	-
	帯筋降伏	1.481	538	-	-
C2-UFC2	最大荷重	1.470	596.0	-3.95	-78.1
	主筋引張降伏	0.502	534.4	-0.099	-14.7
	主筋圧縮降伏	0.609	447.8	-	-
	帯筋降伏	1.507	582.2	-	-
C2-UFC3	最大荷重	0.970	555.7	-2.926	-72.8
	主筋引張降伏	0.568	511.0	-0.061	-11.5
	主筋圧縮降伏	0.448	509.9	-	-
	帯筋降伏	0.862	539.9	-	-

6.3.2 初期剛性

各試験体の水平荷重 Q –変形角 R 関係における正載荷時の包絡線，および初期剛性を図 6.3.2-1，図 6.3.2-2，および図 6.3.2-3 に示す。また，各試験体の初期剛性の一覧を表 6.3.2-1 に示す。初期剛性は $R=+0.0625\%$ サイクルの水平荷重–変形関係から算出した。各試験体における初期剛性は概ね同程度であり，パネル分割による影響は見られなかった。

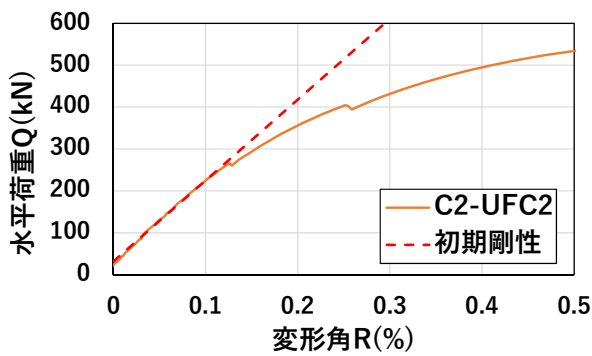


(a) 小変形域

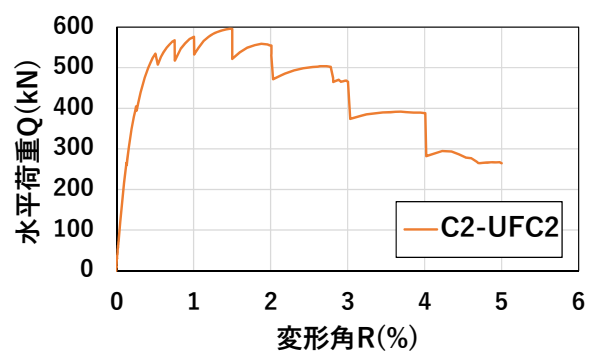


(b) 全体

図 6.3.2-1 正載荷時の包絡線および初期剛性 (C2-UFC1)

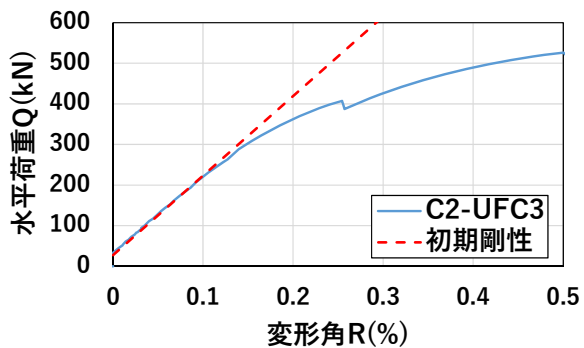


(a) 小変形域

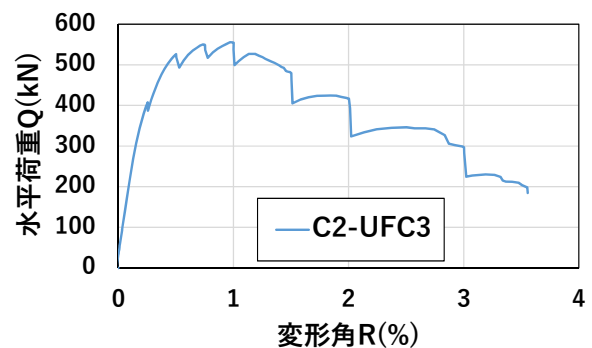


(b) 全体

図 6.3.2-2 正載荷時の包絡線および初期剛性 (C2-UFC2)



(a) 小変形域



(b) 全体

図 6.3.2-3 正載荷時の包絡線および初期剛性 (C2-UFC3)

表 6.3.2-1 各試験体における初期剛性の一覧

	C2-UFC1	C2-UFC2	C2-UFC3
初期剛性 (kN/mm)	252.8	257.3	261.2

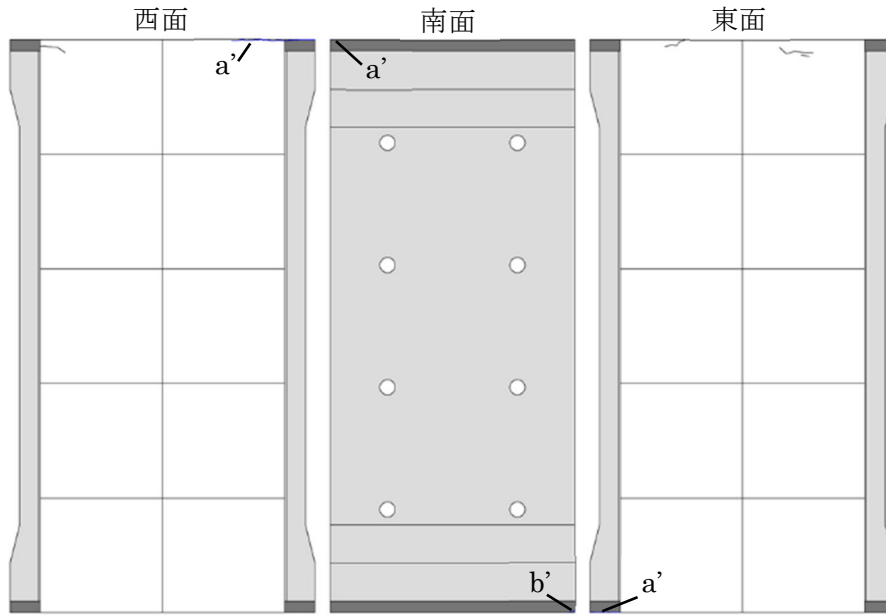
6.3.3 損傷性状

各変形角サイクルのひび割れ図、ビデオカメラで撮影したひび割れ状況写真を C2-UFC1 は図 6.3.3-1 に、C2-UFC2 は図 6.3.3-2 に、C2-UFC3 は図 6.3.3-3 にそれぞれ示す。C2-UFC2、および C2-UFC3 は光学式モーションキャプチャによる各変形角 1 サイクル目ピーク時の UFC パネルの変形状況を併せて示す。光学式モーションキャプチャによる変形状況は、6.2.3 項に示した手法により、C2-UFC2 では各パネルに設置した左上と右下の 2 点の計測点（例えば上から 1 段目のパネルなら、「OT-A1-1」と「OT-A1-6」の 2 点）を用い、C2-UFC3 では各パネルに設置した 2 点の計測点の計測結果を基に算出した。なお、パネルに損傷が生じると剛体変形の仮定が成り立たないため、実験において目視により著しい損傷を確認したパネルは消去している。また、各変形角 2 サイクル目のピーク時、および除荷時に計測した代表的なひび割れのひび割れ幅を C2-UFC1 は表 6.3.3-1 に、C2-UFC2 は表 6.3.3-2 に、C2-UFC3 は表 6.3.3-3 にそれぞれ示す。図 6.3.3-1 ひび割れ図中の黒線は初期ひび割れを、青線は正載荷時のひび割れを、赤線は負載荷時のひび割れを、斜線部はカバーコンクリートの剥落をそれぞれ示す。ひび割れ幅は各変形角 2 サイクル目のピーク時、および除荷時にクラックスケール（最小目盛 0.03mm）を用いて計測した。

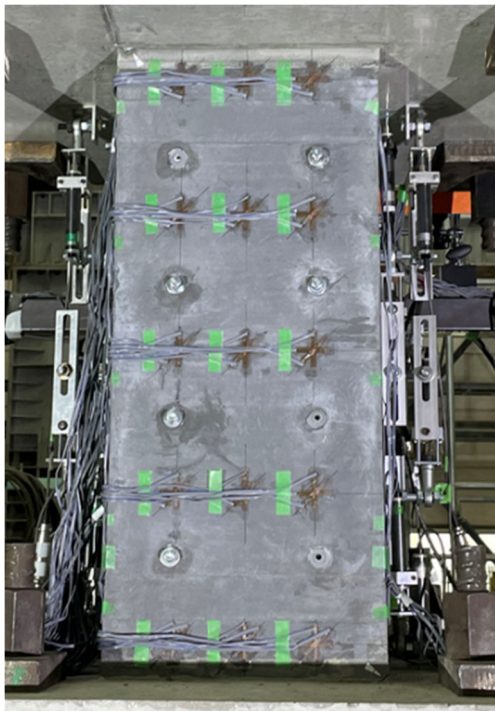
C2-UFC1 に関して、負載荷側では、 $R=-0.0625\%$ において柱端部に曲げひび割れが発生し、その後変形角が大きくなるにつれ、曲げひび割れの範囲が大きくなった。正載荷側では、 $R=+0.25\%$ において柱端部に曲げひび割れが発生し、その後 $R=1.5\%$ サイクルでは、主筋に沿った縦ひび割れ、および柱と UFC パネルの界面に沿った縦ひび割れが発生した。UFC パネルを貼り付けた南面は、目地モルタルと上下スタブとの界面、および目地モルタルと UFC パネルとの界面において開きが生じ、変形角が大きくなるにつれ、開きの範囲および大きさが大きくなった。 $R=3.0\%$ サイクルでは、主筋の座屈により、広範囲にわたって柱東西面のカバーコンクリートが剥落し、 $R=+4.0\%$ のピーク付近において、北面の UFC パネルにせん断ひび割れが生じた。

C2-UFC2 に関して、負載荷側では C2-UFC1 と同様に、 $R=-0.0625\%$ において柱端部に曲げひび割れが発生し、その後変形角が大きくなるにつれ、曲げひび割れの範囲が大きくなった。正載荷側では、 $R=+0.25\%$ において柱端部に曲げひび割れが発生した。その後 $R=1.0\%$ サイクルでは、主筋に沿った縦ひび割れ、および柱と UFC パネルの界面に沿った縦ひび割れが発生した。南面に関しては、目地モルタルと上下スタブとの界面、および目地モルタルと UFC パネルとの界面における開きに加えて、 $R=1.5\%$ サイクル以降、上端および下端から 1 枚目と 2 枚目のパネルの界面においても開きが生じた。その後、 $R=+3.0\%$ において、上端から 1 枚目のパネル、および下端から 2 枚目のパネルにおいてせん断ひび割れが生じた。

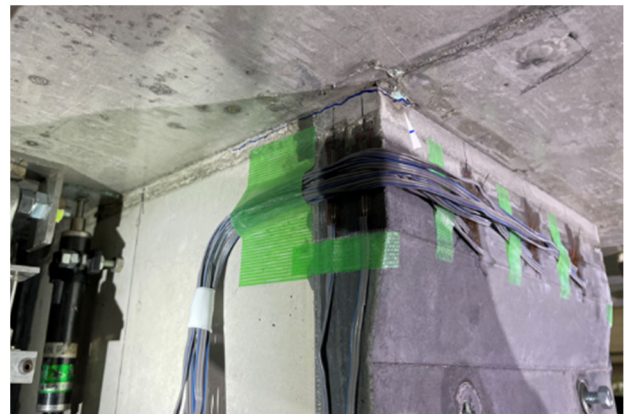
C2-UFC3 に関して、負載荷側では C2-UFC1、C2-UFC2 と同様に、 $R=-0.0625\%$ において柱端部に曲げひび割れが発生し、その後変形角が大きくなるにつれ、曲げひび割れの範囲が大きくなった。正載荷側では、 $R=+0.25\%$ において柱端部に曲げひび割れが発生し、その後 $R=1.5\%$ サイクルでは、主筋に沿った縦ひび割れ、および柱と UFC パネルの界面に沿った縦ひび割れが発生した。南面に関しては、目地モルタルと上下スタブとの界面、および目地モルタルと UFC パネルとの界面における開きに加えて、 $R=0.75\%$ サイクルでは、パネル間の横目地および縦目地に沿った開きが生じた。その後 $R=1.0\%$ サイクルには一部のパネルにせん断ひび割れが生じ、 $R=3.0\%$ サイクルでは複数のパネルにせん断ひび割れが生じた。



(i) ひび割れ図 (R=0.0625%)



南面



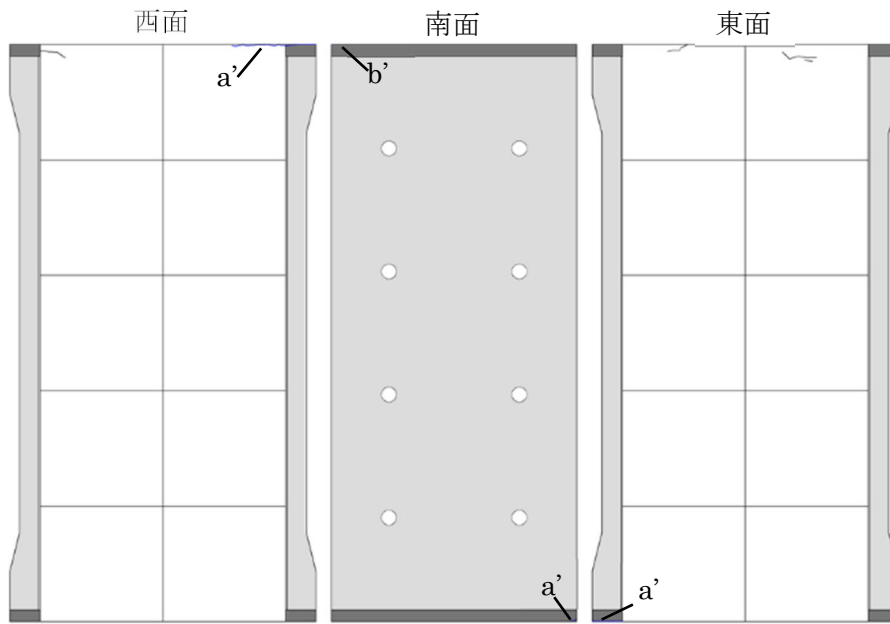
南西面 (柱頭付近)

(ii) 実験状況写真

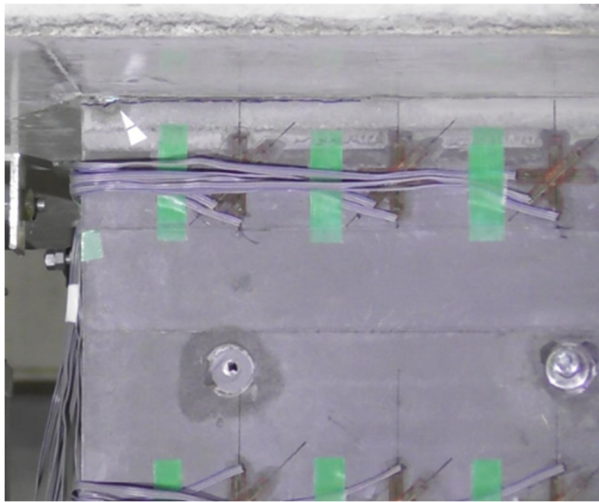
図 6.3.3-1(a) 損傷状況 (R=0.0625%, C2-UFC1)

表 6.3.3-1(a) ひび割れ幅 (R=0.0625%, C2-UFC1)

0.0625%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
a	/	/	a'	0.15	閉じ	a	/	/	a'	0.15	閉じ	a	/	/	a'	0.25	閉じ	
b	/	/	b'	/	/	b	/	/	b'	0.15	閉じ	b	/	/	b'	/	/	



(i) ひび割れ図 (R=0.125%)



南面 (柱頭付近)



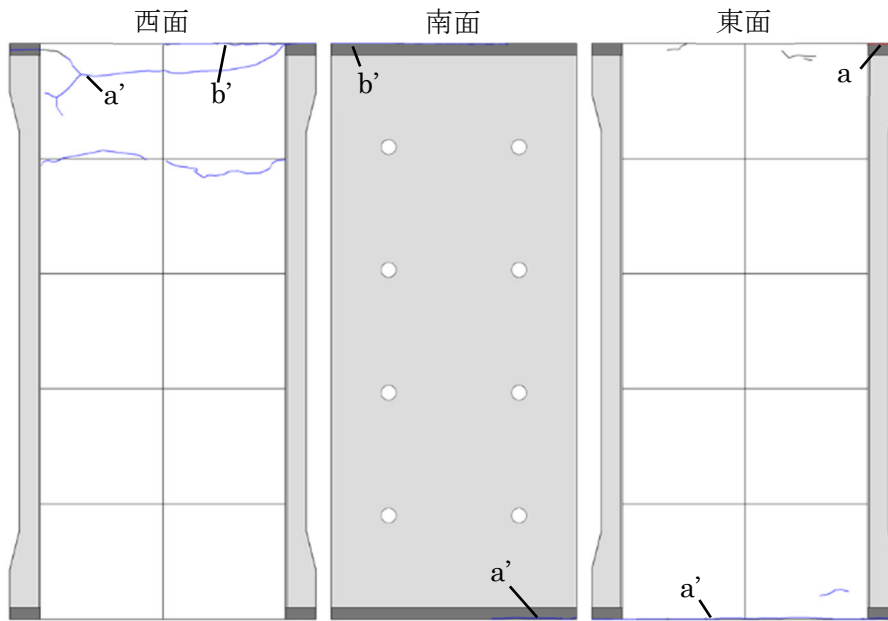
南面 (柱脚付近)

(ii) 実験状況写真

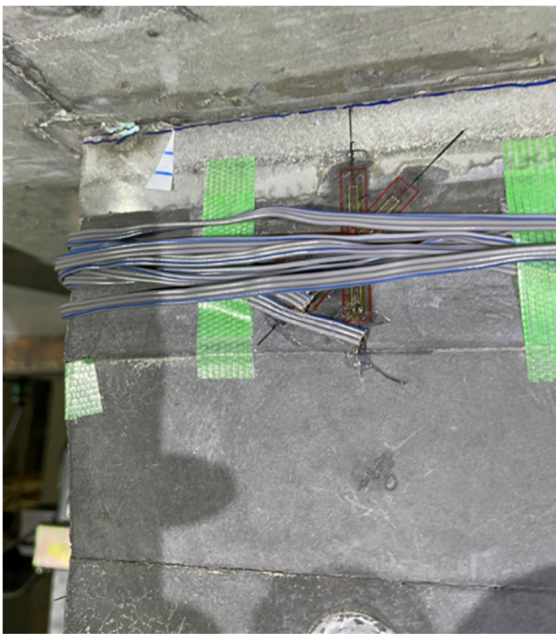
図 6.3.3-1(b) 損傷状況 (R=0.125%, C2-UFC1)

表 6.3.3-1(b) ひび割れ幅 (R=0.125%, C2-UFC1)

0.125%	西面						南面						東面							
	正側			負側			正側			負側			正側			負側				
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時		
a	/	/	/	a'	1.0	閉じ	a	/	/	/	a'	0.3	閉じ	a	/	/	/	a'	0.45	閉じ
b	/	/	/	b'	/	/	b	/	/	/	b'	0.35	閉じ	b	/	/	/	b'	/	/



(i) ひび割れ図 (R=0.25%)



南面 (柱頭付近)



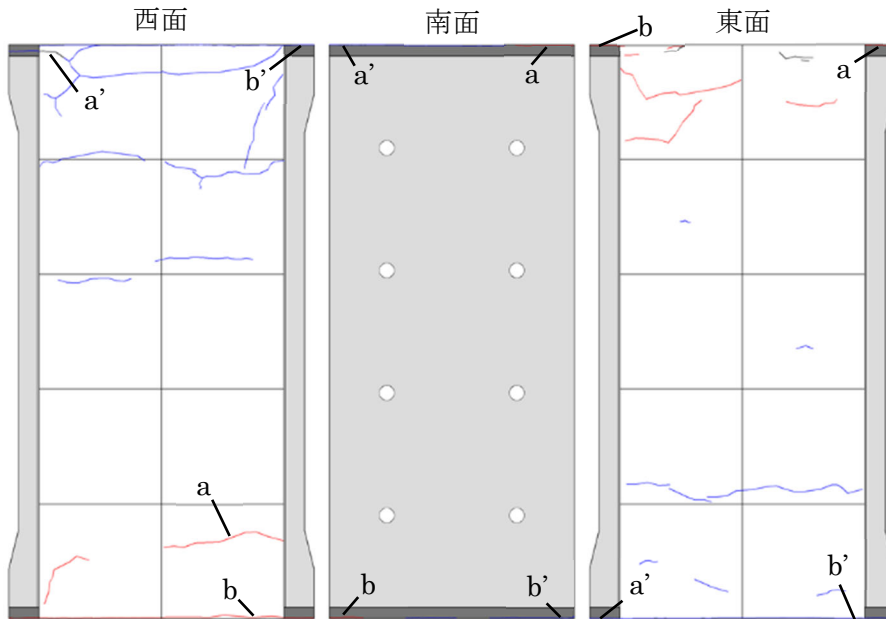
南面 (柱脚付近)

(ii) 実験状況写真

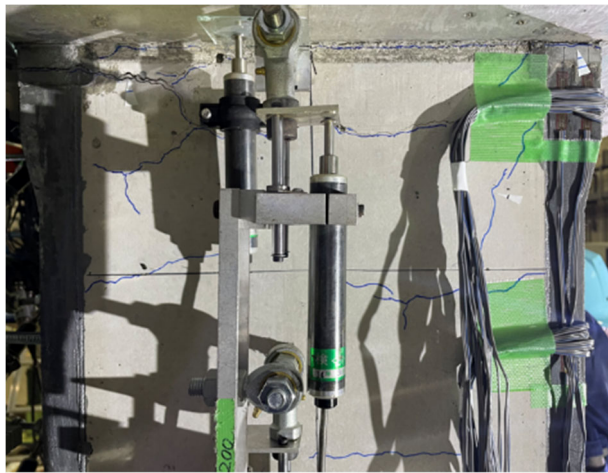
図 6.3.3-1(c) 損傷状況 (R=0.25%, C2-UFC1)

表 6.3.3-1(c) ひび割れ幅 (R=0.25%, C2-UFC1)

0.25%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	/	/	a'	0.6	0.5	a	/	/	a'	0.6	閉じ	a	0.1	閉じ	a'	1.20	閉じ
	b	/	/	b'	0.4	閉じ	b	/	/	b'	0.4	閉じ	b	/	/	b'	/	/



(i) ひび割れ図 (R=0.5%)



西面 (柱頭付近)



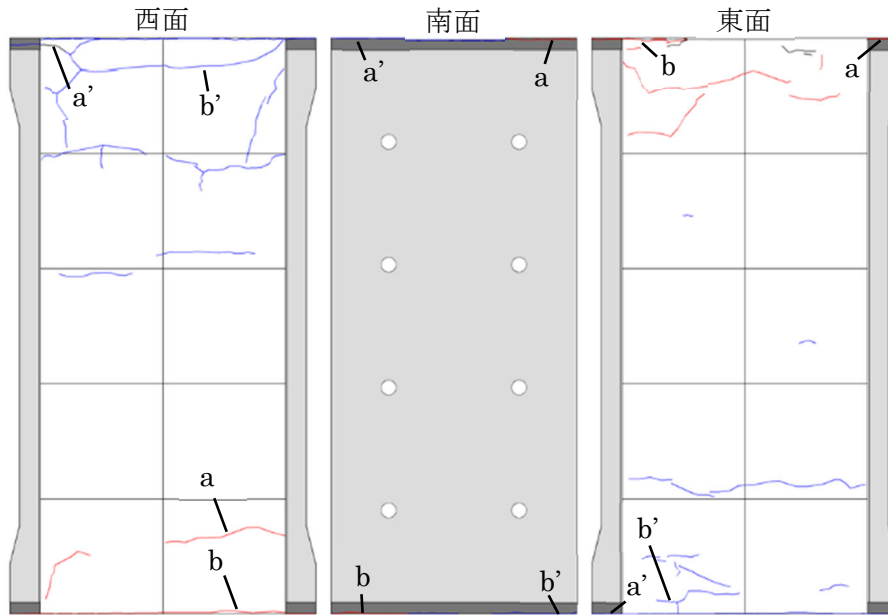
東面

(ii) 実験状況写真

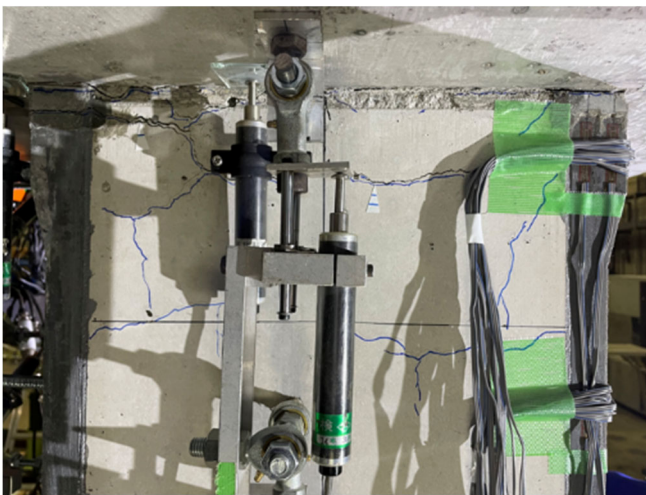
図 6.3.3-1 (d) 損傷状況 (R=0.5%, C2-UFC1)

表 6.3.3-1 (d) ひび割れ幅 (R=0.5%, C2-UFC1)

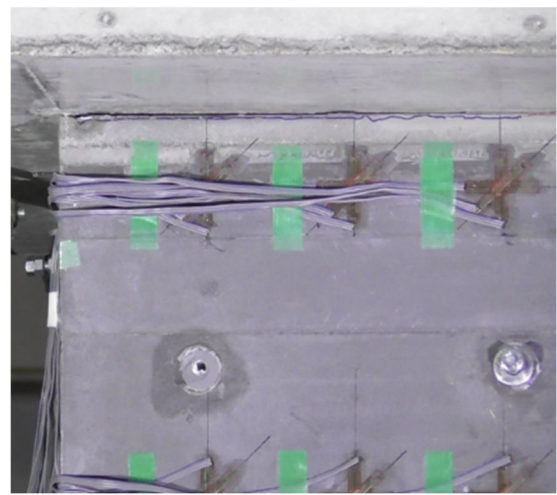
0.50%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	0.4	0.4	a'	1.0	0.5	a	0.75	閉じ	a'	1.5	閉じ	a	0.65	閉じ	a'	2.20	閉じ
	b	0.3	閉じ	b'	0.9	0.15	b	0.35	閉じ	b'	1.5	0.04	b	0.4	閉じ	b'	0.8	閉じ



(i) ひび割れ図 (R=0.75%)



西面 (柱頭付近)



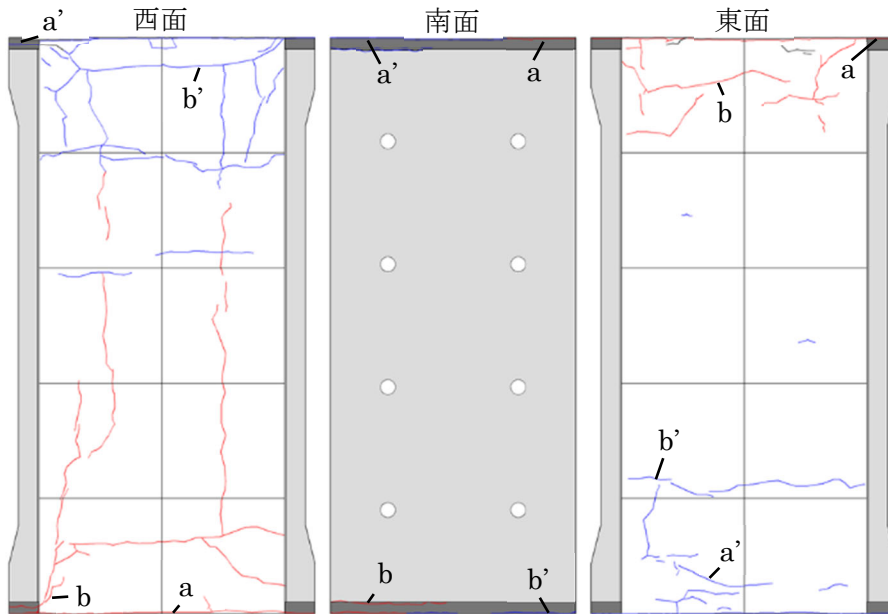
南面 (柱頭付近)

(ii) 実験状況写真

図 6.3.3-1(e) 損傷状況 (R=0.75%, C2-UFC1)

表 6.3.3-1(e) ひび割れ幅 (R=0.75%, C2-UFC1)

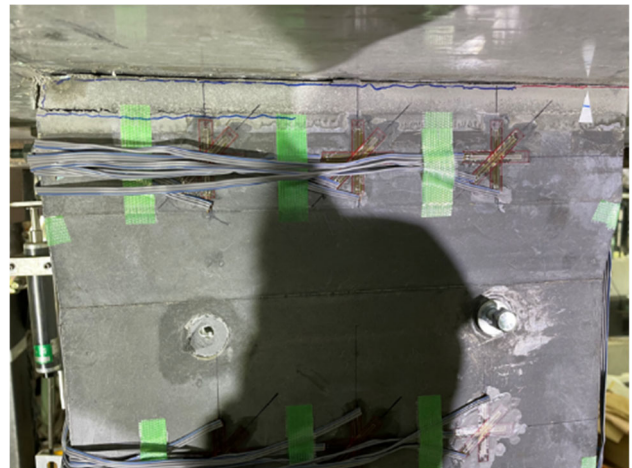
0.75%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	0.5	0.4	a'	1.0	0.5	a	0.75	閉じ	a'	1.8	閉じ	a	0.95	閉じ	a'	2.20	0.25
	b	0.4	閉じ	b'	0.8	0.2	b	0.35	閉じ	b'	1.5	0.2	b	0.8	閉じ	b'	0.25	閉じ



(i) ひび割れ図 (R=1.0%)



西面 (柱脚付近)



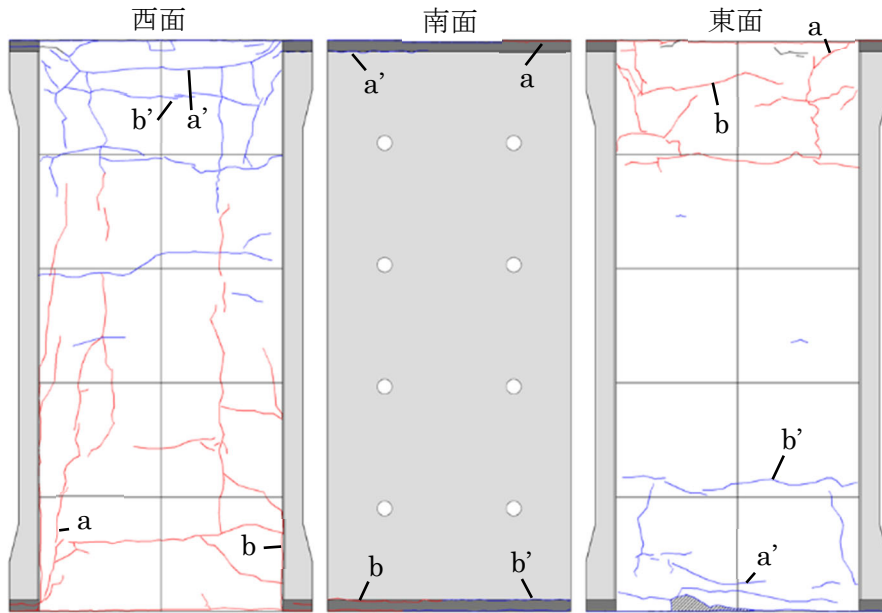
南面 (柱頭付近)

(ii) 実験状況写真

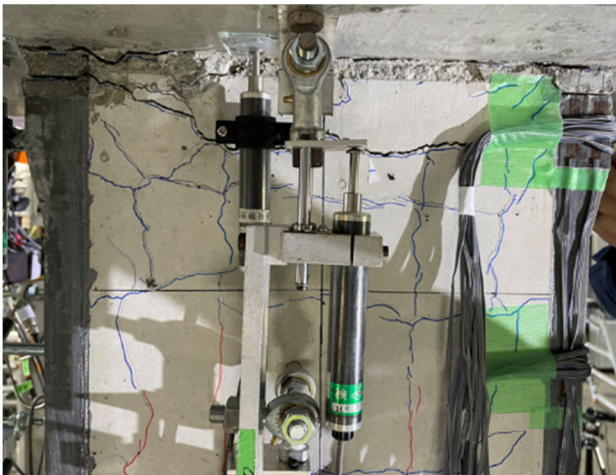
図 6. 3. 3-1 (f) 損傷状況 (R=1.0%, C2-UFC1)

表 6. 3. 3-1 (f) ひび割れ幅 (R=1.0%, C2-UFC1)

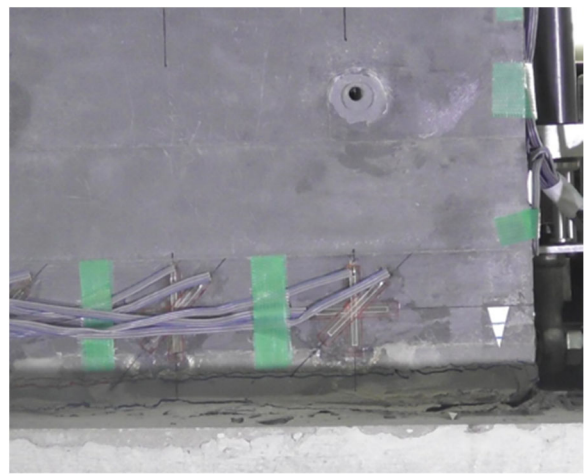
1.0%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	0.65	0.3	a'	2.2	閉じ	a	1.3	閉じ	a'	0.9	閉じ	a	1.2	0.15	a'	0.3	閉じ
	b	0.5	0.2	b'	1.6	0.15	b	0.3	閉じ	b'	2.02	閉じ	b	0.2	閉じ	b'	0.25	閉じ



(i) ひび割れ図 (R=1.5%)



西面 (柱頭付近)



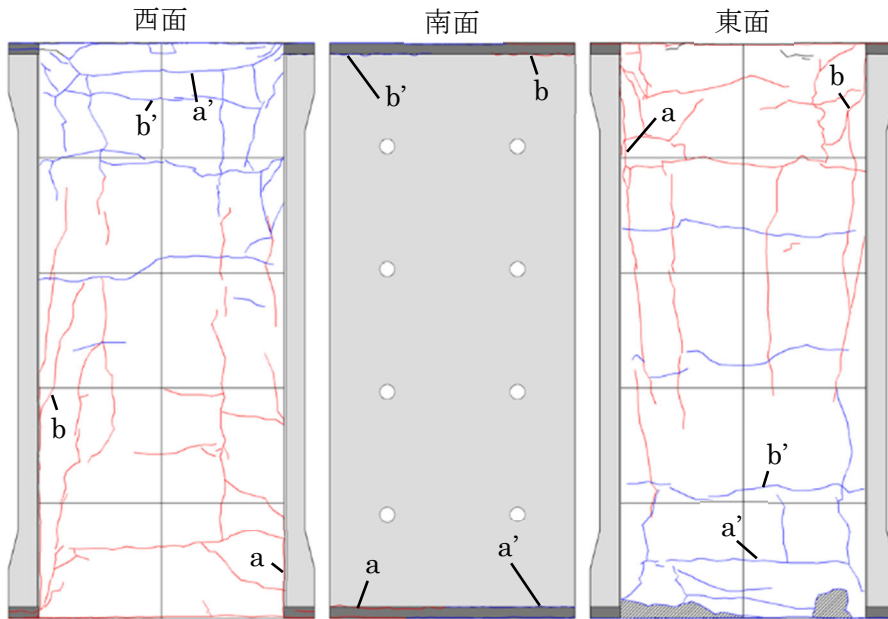
南面 (柱脚付近)

(ii) 実験状況写真

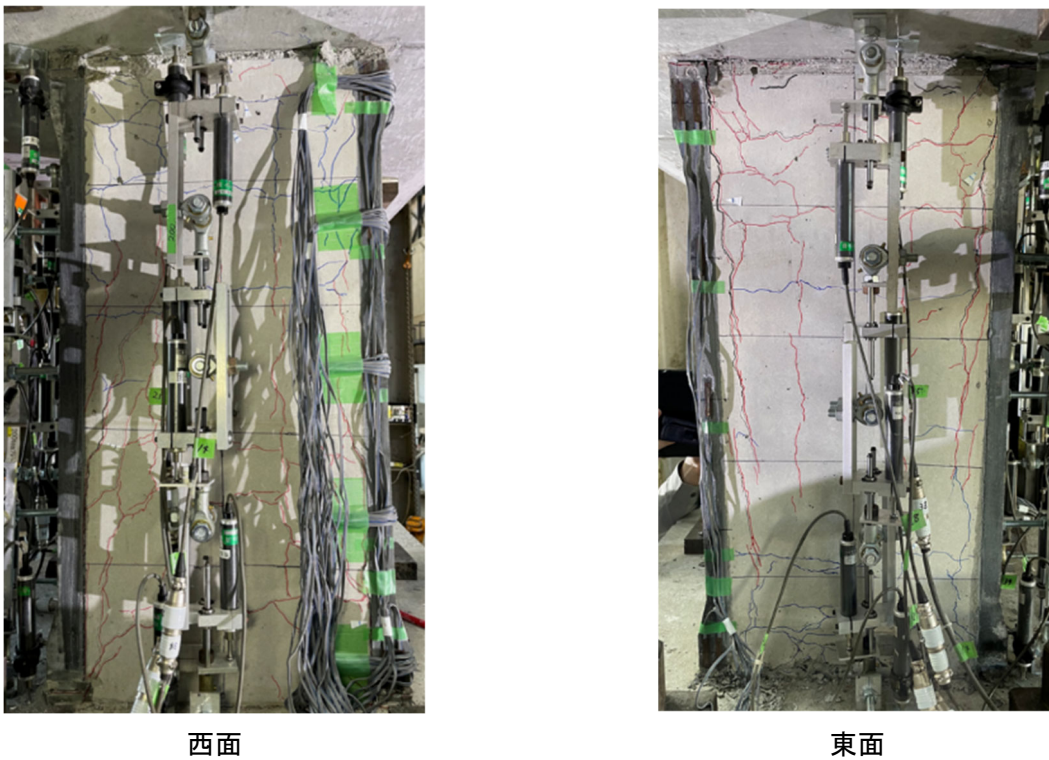
図 6.3.3-1(g) 損傷状況 (R=1.5%, C2-UFC1)

表 6.3.3-1(g) ひび割れ幅 (R=1.5%, C2-UFC1)

1.5%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
a	0.75	0.25	a'	2.2	0.2	a	1.7	閉じ	a'	1.5	0.08	a	0.45	0.1	a'	0.55	閉じ	
b	0.5	0.2	b'	0.3	0.15	b	0.85	0.15	b'	0.6	0.45	b	0.25	閉じ	b'	0.3	閉じ	



(i) ひび割れ図 (R=2.0%)

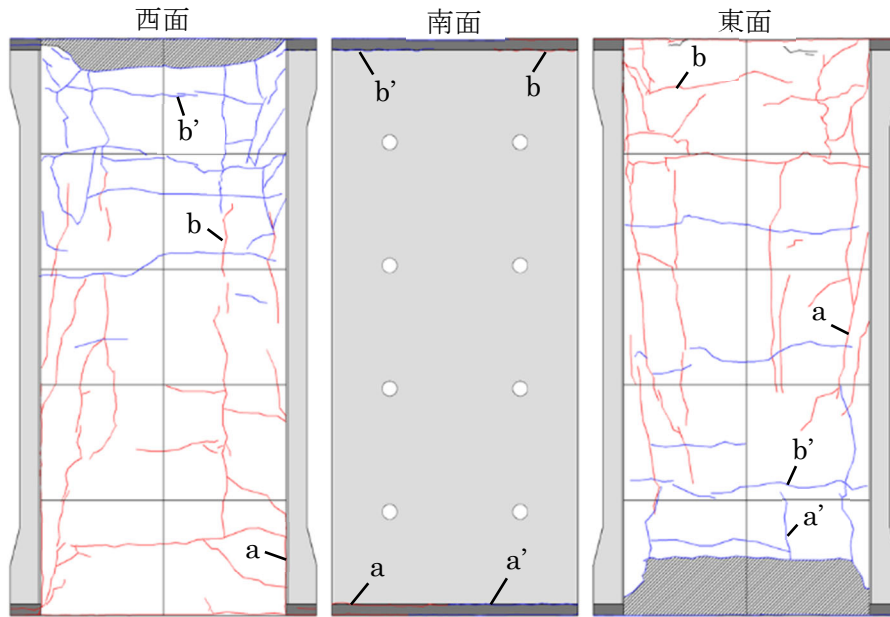


(ii) 実験状況写真

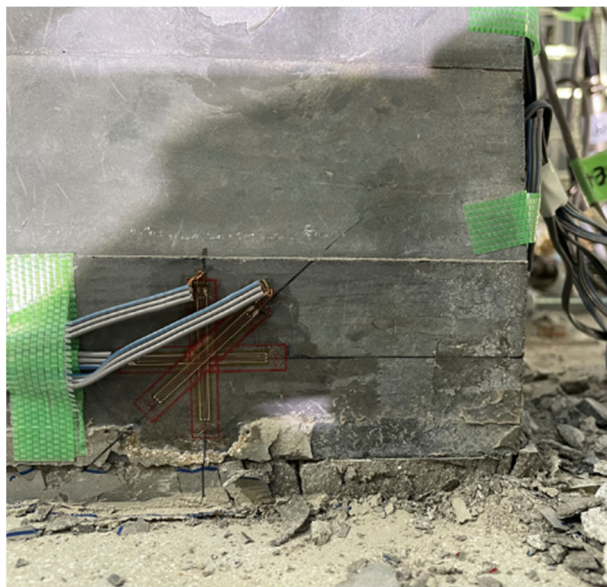
図 6. 3. 3-1 (h) 損傷状況 (R=2.0%, C2-UFC1)

表 6. 3. 3-1 (h) ひび割れ幅 (R=2.0%, C2-UFC1)

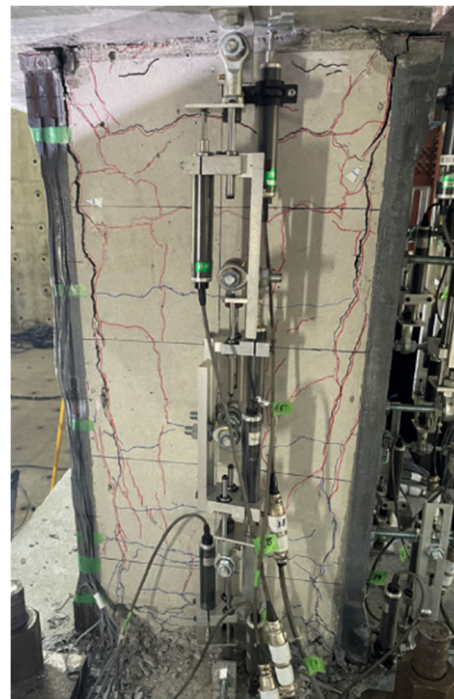
2.0%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	2.0	1.0	a'	2.2	0.85	a	2.2	0.6	a'	1.5	0.25	a	1.6	1.3	a'	1.9	0.2
	b	1.5	1.0	b'	1.7	0.45	b	0.45	閉じ	b'	0.4	0.15	b	1.4	0.95	b'	0.9	0.06



(i) ひび割れ図 (R=3.0%)



南面 (柱脚付近)



東面

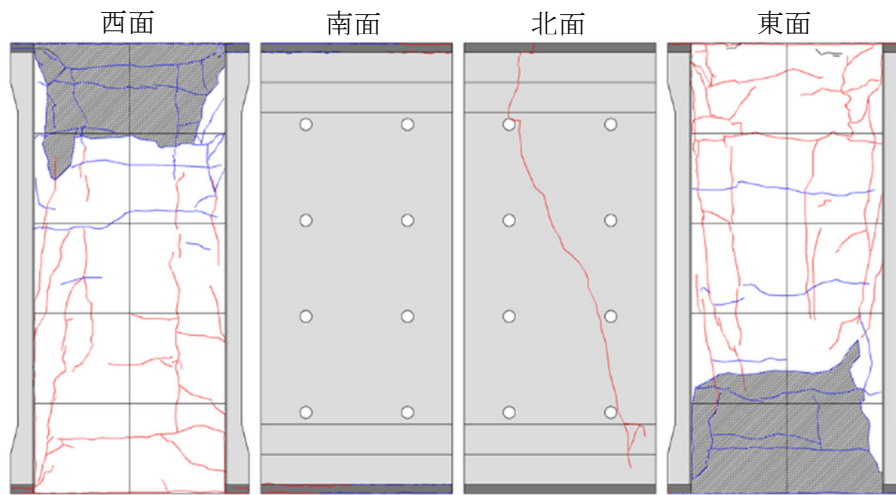
(ii) 実験状況写真

図 6.3.3-1(i) 損傷状況 (R=3.0%, C2-UFC1)

表 6.3.3-1(i) ひび割れ幅 (R=3.0%, C2-UFC1)

3.0%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	4.0	2.2	a'	-	-	a	4.0	1.1	a'	1.4	-	a	1.3	0.9	a'	2.5	-
	b	1.0	0.75	b'	4.0	-	b	-	閉じ	b'	-	-	b	1.2	0.25	b'	1.5	-

表中ハイフンは剥落により計測不可であったことを示す



(i) ひび割れ図 (載荷終了後)

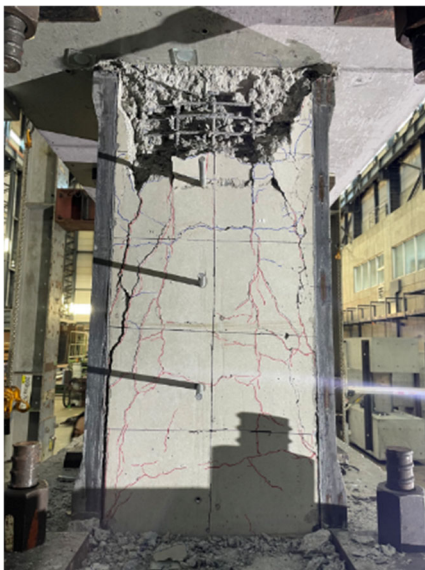
南面



北面



西面

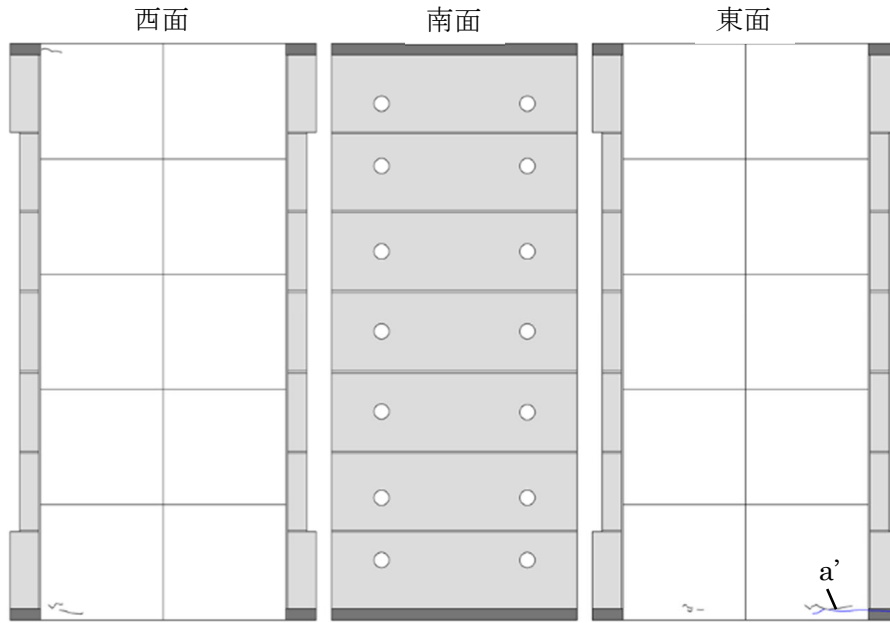


東面



(ii) 実験状況写真

図 6.3.3-1(j) 最終破壊状況 (C2-UFC1)



(i) ひび割れ図 (R=0.0625%)



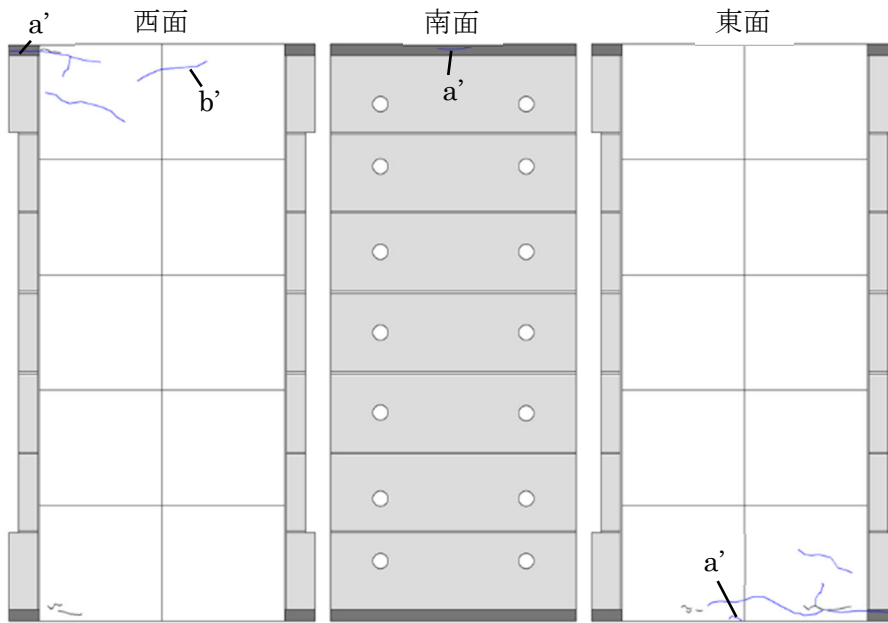
南西面

(ii) 実験状況写真

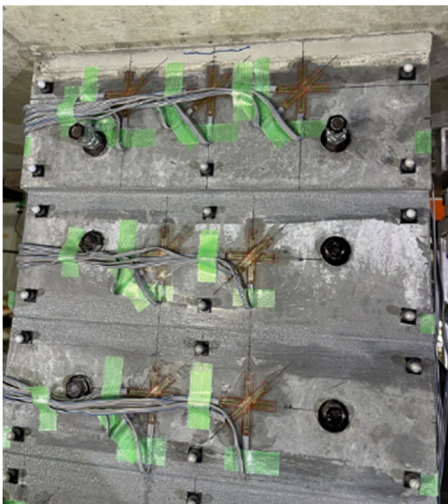
図 6.3.3-2(a) 損傷状況 (R=0.0625%, C2-UFC2)

表 6.3.3-2(a) ひび割れ幅 (R=0.0625%, C2-UFC2)

0.0625%	西面						南面						東面						
	正側			負側			正側			負側			正側			負側			
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	
a	/	/	/	a'	/	/	a	/	/	/	a'	/	/	a	/	/	a'	0.15	閉じ
b	/	/	/	b'	/	/	b	/	/	/	b'	/	/	b	/	/	b'	/	/

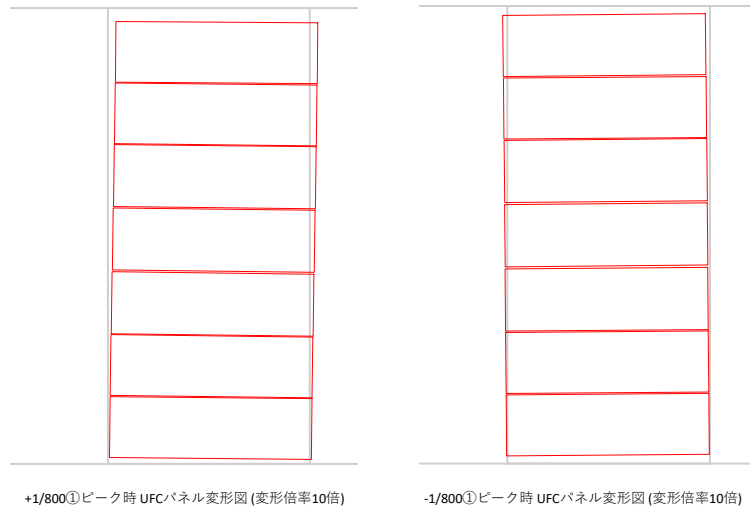


(i) ひび割れ図 (R=0.125%)



南面 (柱頭付近)

(ii) 実験状況写真



(a) 正側

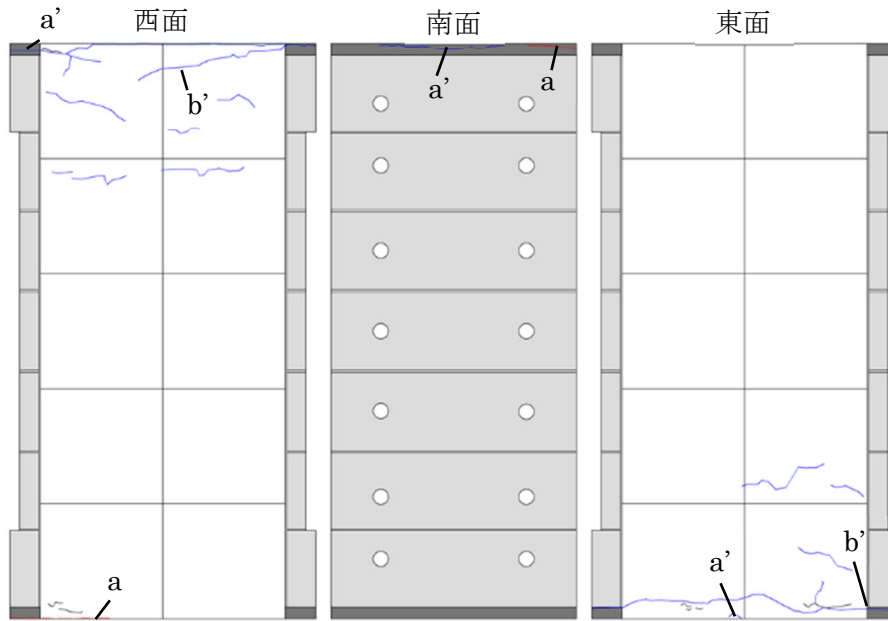
(b) 負側

(iii) 光学式モーショキャプチャの計測状況

図 6.3.3-2(b) 損傷状況 (R=0.125%, C2-UFC2)

表 6.3.3-2(b) ひび割れ幅 (R=0.125%, C2-UFC2)

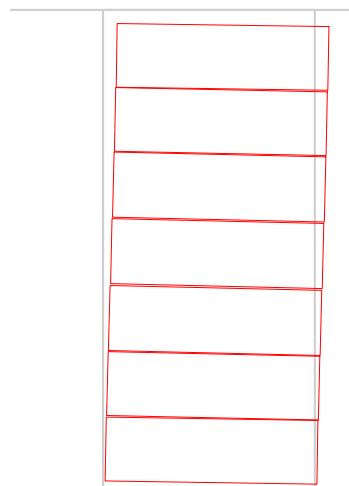
0.125%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
a	/	/	a'	0.35	閉じ	a	/	/	a'	0.1	閉じ	a	/	/	a'	0.2	0.04	
b	/	/	b'	0.15	閉じ	b	/	/	b'	/	/	b	/	/	b'	/	/	



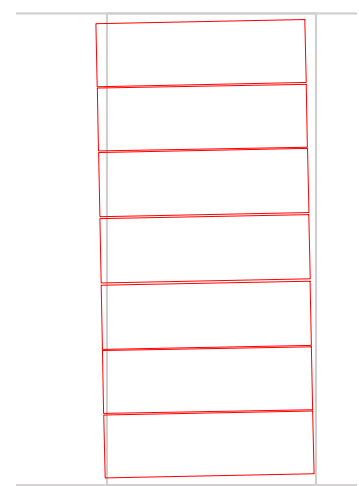
(i) ひび割れ図 (R=0.25%)



西面
(ii) 実験状況写真



+1/400①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)



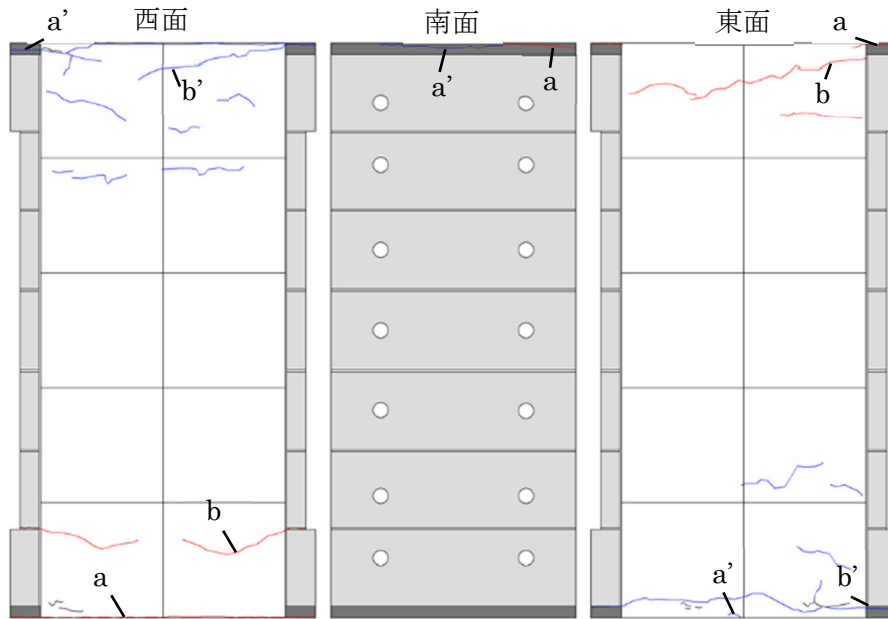
-1/400①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

(a) 正側 (b) 負側
(iii) 光学式モーションキャプチャの計測状況

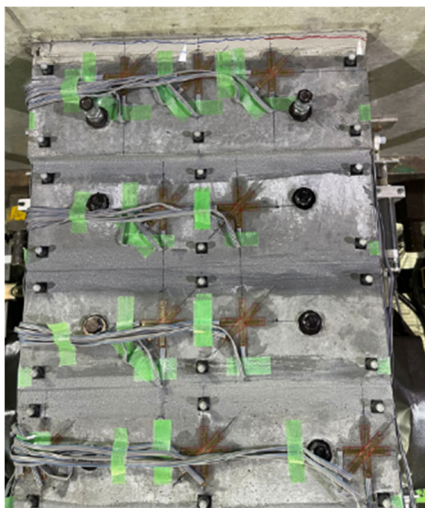
図 6.3.3-2(c) 損傷状況 (R=0.25%, C2-UFC2)

表 6.3.3-2(c) ひび割れ幅 (R=0.25%, C2-UFC2)

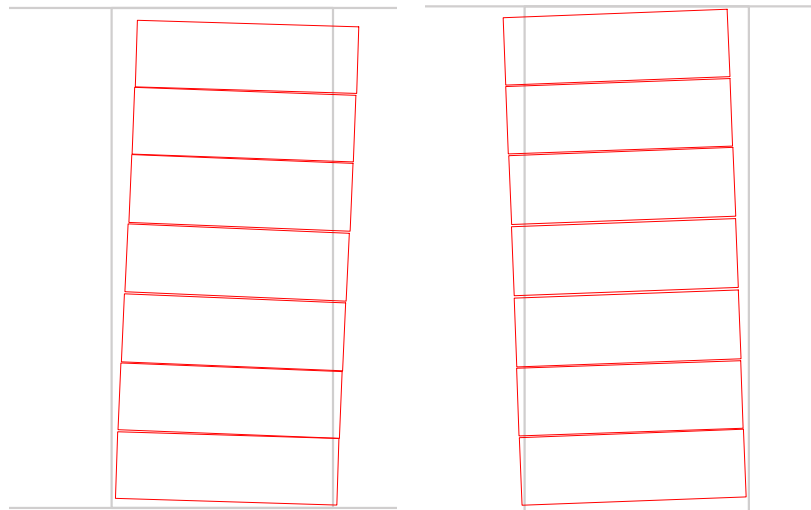
0.25%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	0.2	閉じ	a'	0.6	0.1	a	0.1	閉じ	a'	0.25	閉じ	a	/	/	a'	0.35	0.1
	b	/	/	b'	0.25	閉じ	b	/	/	b'	/	/	b	/	/	b'	0.15	閉じ



(i) ひび割れ図 (R=0.5%)



南面 (柱頭付近)



+1/200①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

-1/200①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

(a) 正側

(b) 負側

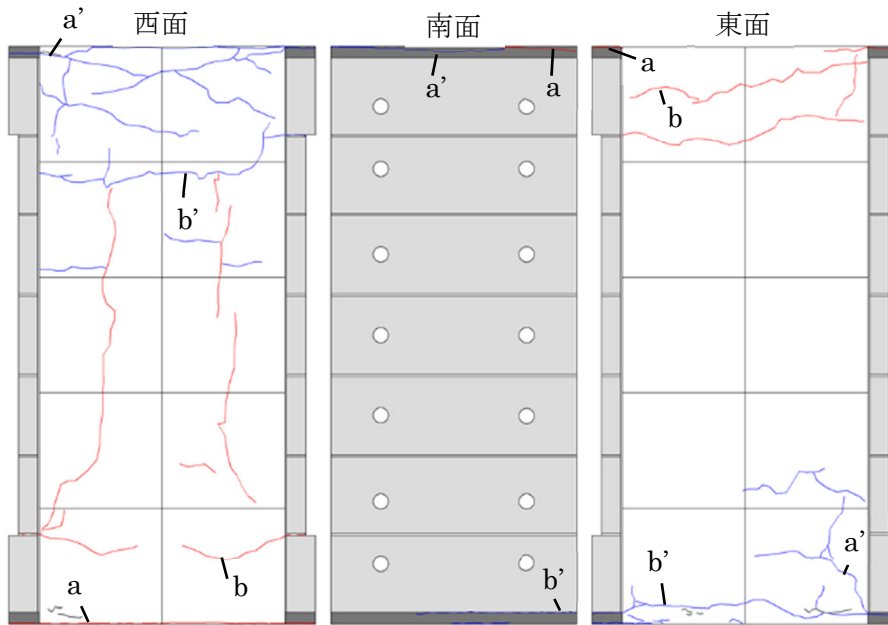
(ii) 実験状況写真

(iii) 光学式モーションキャプチャの計測状況

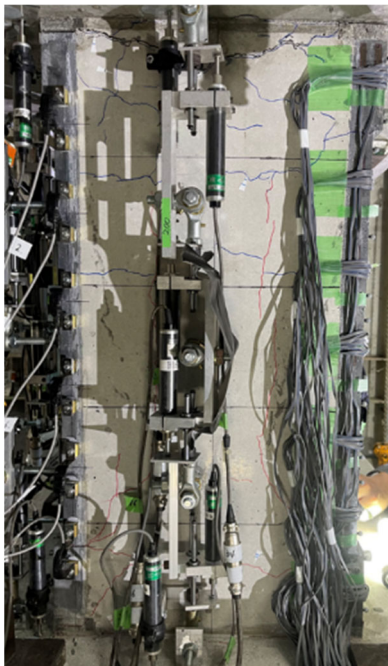
図 6.3.3-2 (d) 損傷状況 (R=0.5%, C2-UFC2)

表 6.3.3-2 (d) ひび割れ幅 (R=0.5%, C2-UFC2)

0.50%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	0.45	0.1	a'	0.8	0.15	a	0.55	閉じ	a'	0.2	閉じ	a	0.35	0.2	a'	0.35	0.15
	b	0.2	閉じ	b'	0.6	0.15	b	/	/	b'	/	/	b	0.08	閉じ	b'	0.2	閉じ

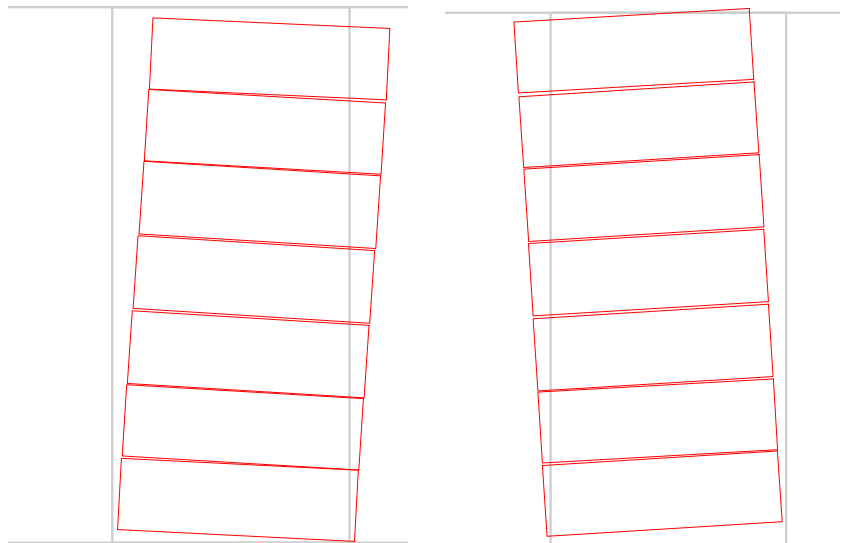


(i) ひび割れ図 (R=0.75%)



西面

(ii) 実験状況写真



+1/133①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

-1/133①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

(a) 正側

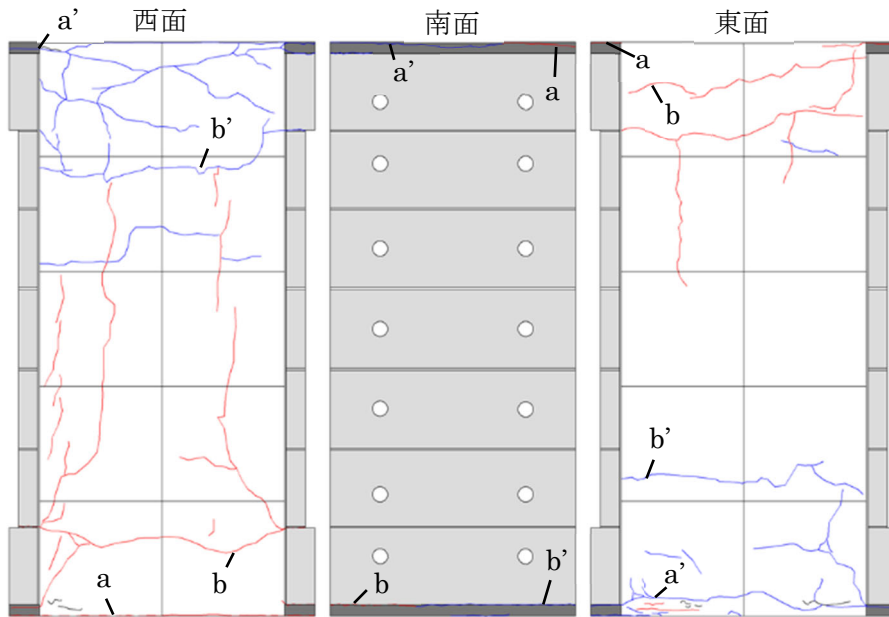
(b) 負側

(iii) 光学式モーションキャプチャの計測状況

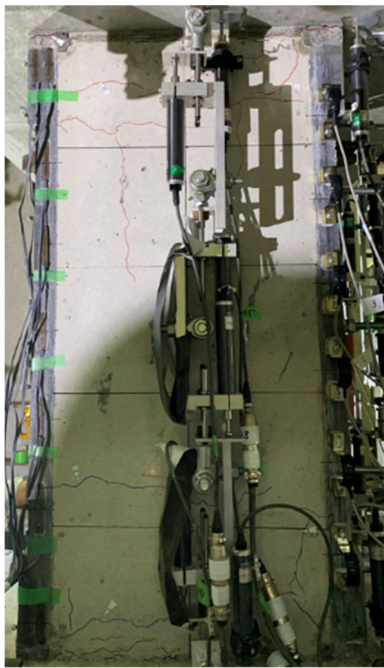
図 6.3.3-2(e) 損傷状況 (R=0.75%, C2-UFC2)

表 6.3.3-2(e) ひび割れ幅 (R=0.75%, C2-UFC2)

0.75%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	0.7	0.15	a'	1.6	0.15	a	0.8	0.04	a'	0.45	閉じ	a	0.7	0.1	a'	0.5	0.08
	b	0.2	閉じ	b'	0.2	閉じ	b	/	/	b'	0.8	閉じ	b	0.06	閉じ	b'	0.1	閉じ

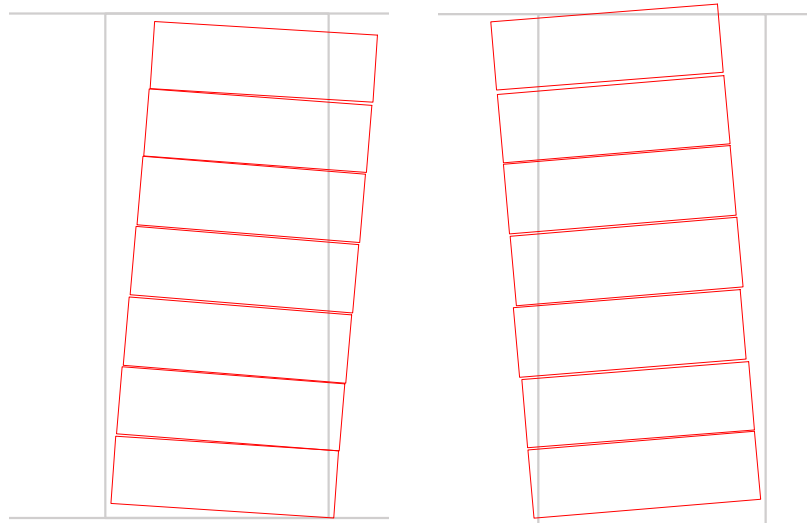


(i) ひび割れ図 (R=1.0%)



東面

(ii) 実験状況写真



+1/100①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

-1/100①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

(a) 正側

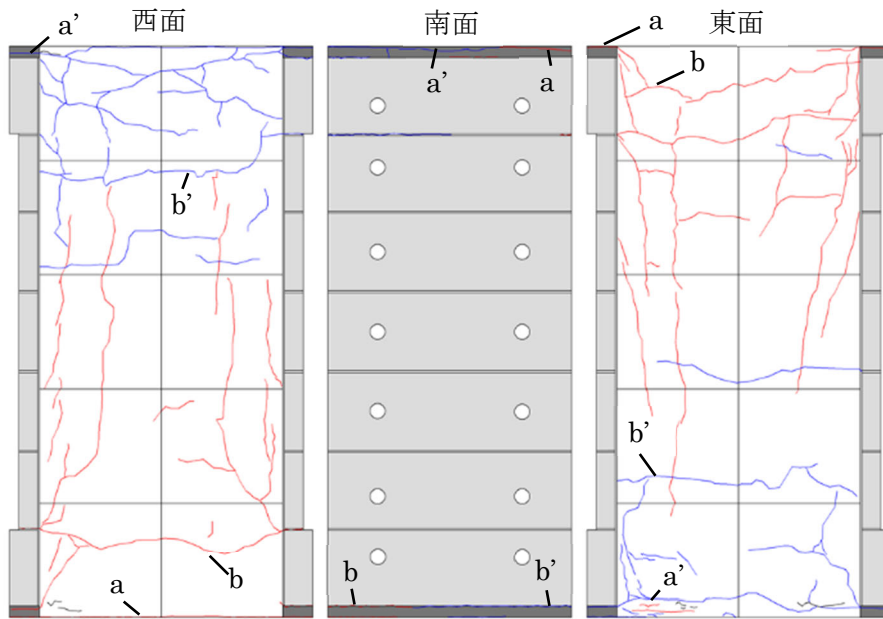
(b) 負側

(iii) 光学式モーションキャプチャの計測状況

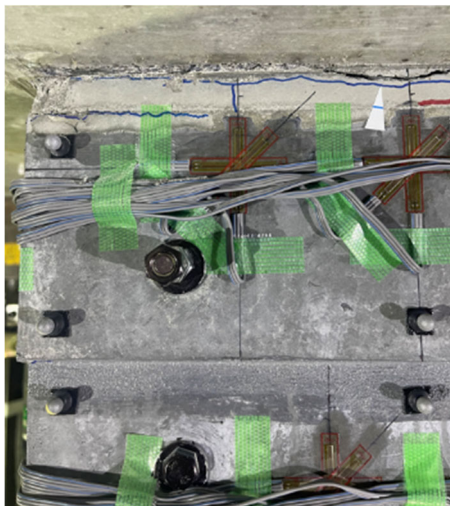
図 6.3.3-2(f) 損傷状況 (R=1.0%, C2-UFC2)

表 6.3.3-2(f) ひび割れ幅 (R=1.0%, C2-UFC2)

1.0%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	0.9	0.2	a'	2.2	0.4	a	1.3	0.08	a'	1.3	閉じ	a	0.75	0.15	a'	1.1	0.15
	b	0.25	閉じ	b'	0.3	閉じ	b	0.03	0.03	b'	0.75	閉じ	b	0.1	0.03	b'	0.15	閉じ

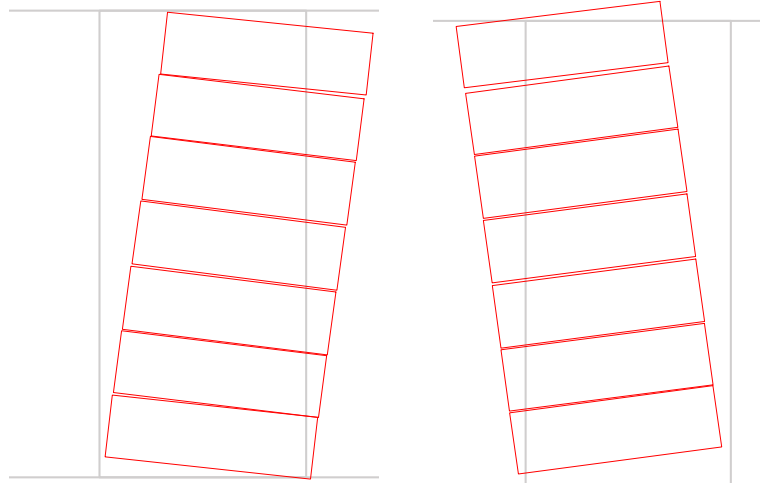


(i) ひび割れ図 (R=1.5%)



南面 (柱頭付近)

(ii) 実験状況写真



+1/67①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

-1/67①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

(a) 正側

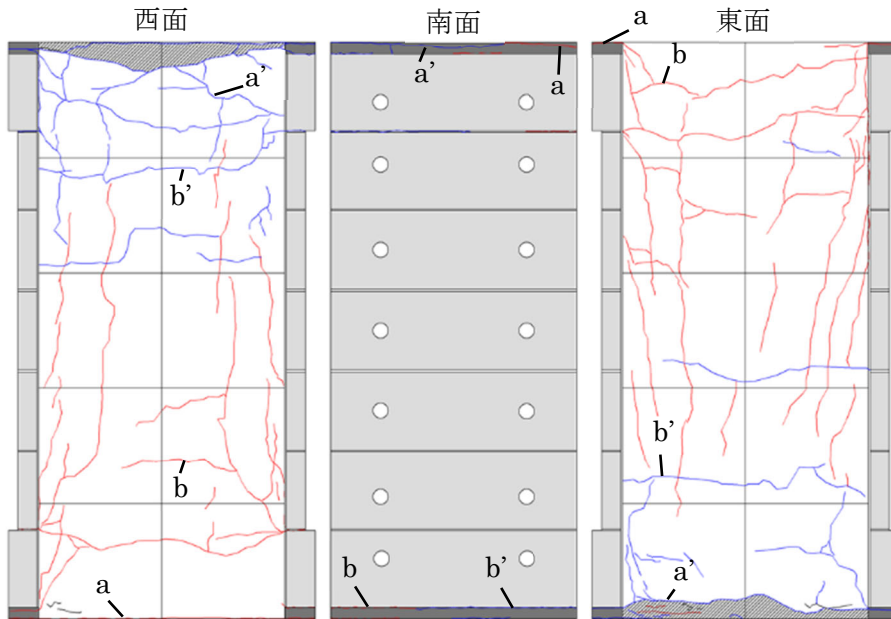
(b) 負側

(iii) 光学式モーションキャプチャの計測状況

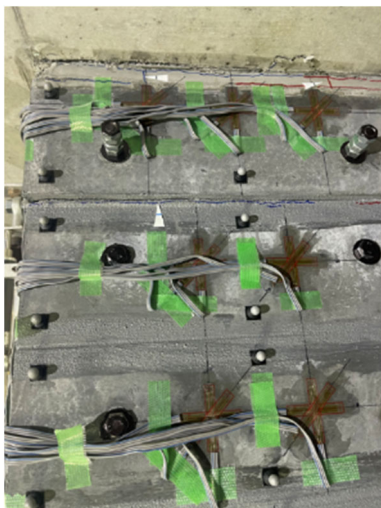
図 6. 3. 3-2 (g) 損傷状況 (R=1. 5%, C2-UFC2)

表 6. 3. 3-2 (g) ひび割れ幅 (R=1. 5%, C2-UFC2)

1.5%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	1.0	0.15	a'	0.25	閉じ	a	2.1	0.1	a'	0.15	閉じ	a	1.4	0.35	a'	2.0	0.3
	b	0.25	0.04	b'	0.3	0.15	b	0.03	閉じ	b'	1.7	0.15	b	0.2	0.04	b'	0.2	閉じ

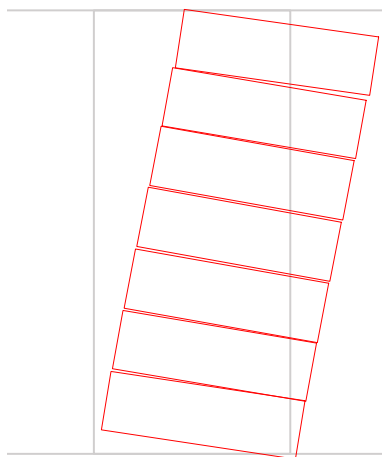


(i) ひび割れ図 (R=2.0%)



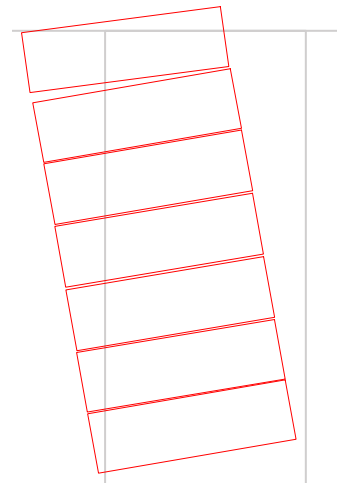
南面 (柱頭付近)

(ii) 実験状況写真



+1/50①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

(a) 正側



-1/50②ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

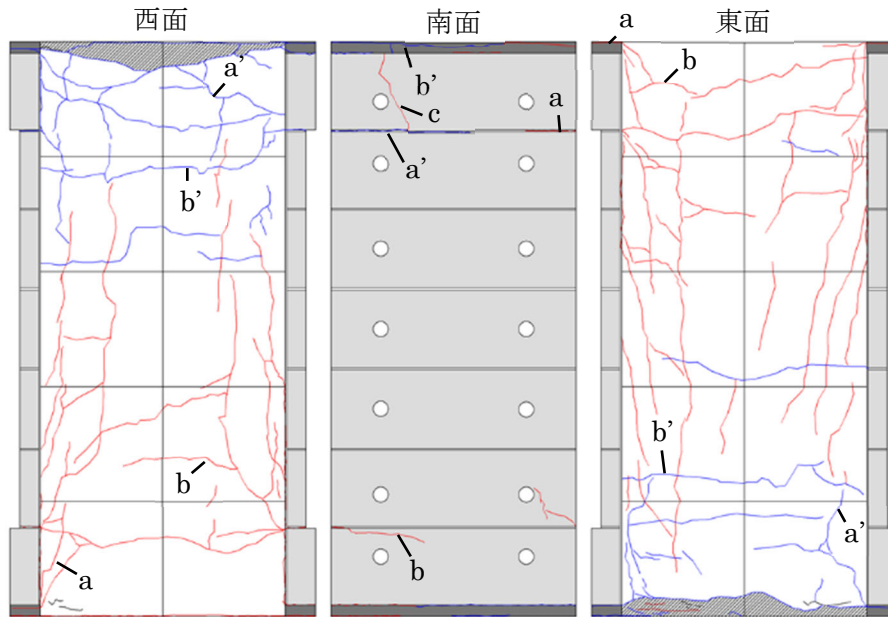
(b) 負側

(iii) 光学式モーションキャプチャの計測状況

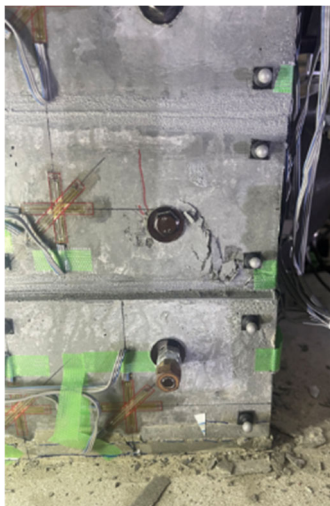
図 6. 3. 3-2 (h) 損傷状況 (R=2.0%, C2-UFC2)

表 6. 3. 3-2 (h) ひび割れ幅 (R=2.0%, C2-UFC2)

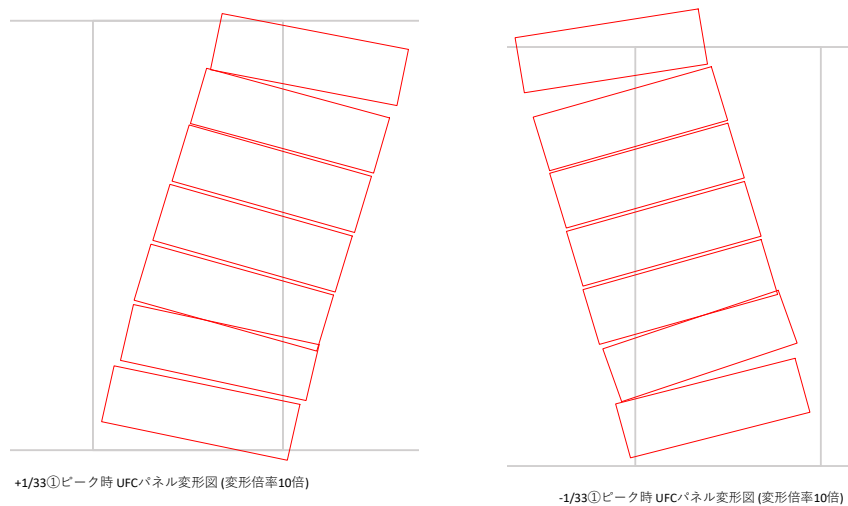
2.0%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	0.5	0.2	a'	0.25	0.35	a	2.2	-	a'	0.8	閉じ	a	2.2	0.25	a'	3.0	0.65
	b	0.3	0.08	b'	1.0	0.08	b	0.04	閉じ	b'	2.5	0.15	b	0.4	0.1	b'	0.45	閉じ



(i) ひび割れ図 (R=3.0%)



南面 (柱脚付近)
(ii) 実験状況写真



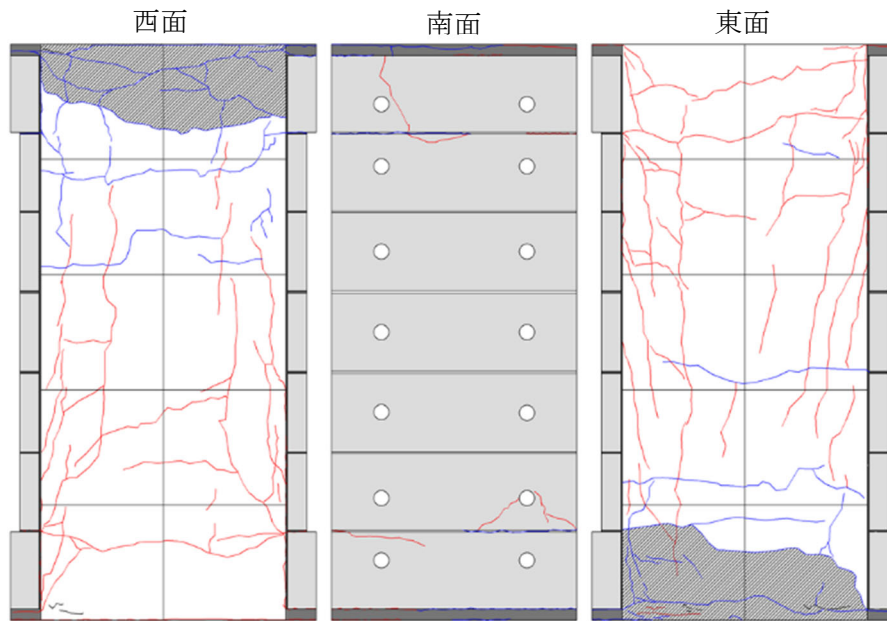
(a) 正側 (b) 負側
(iii) 光学式モーショントラッキングの計測状況

図 6.3.3-2(i) 損傷状況 (R=3.0%, C2-UFC2)

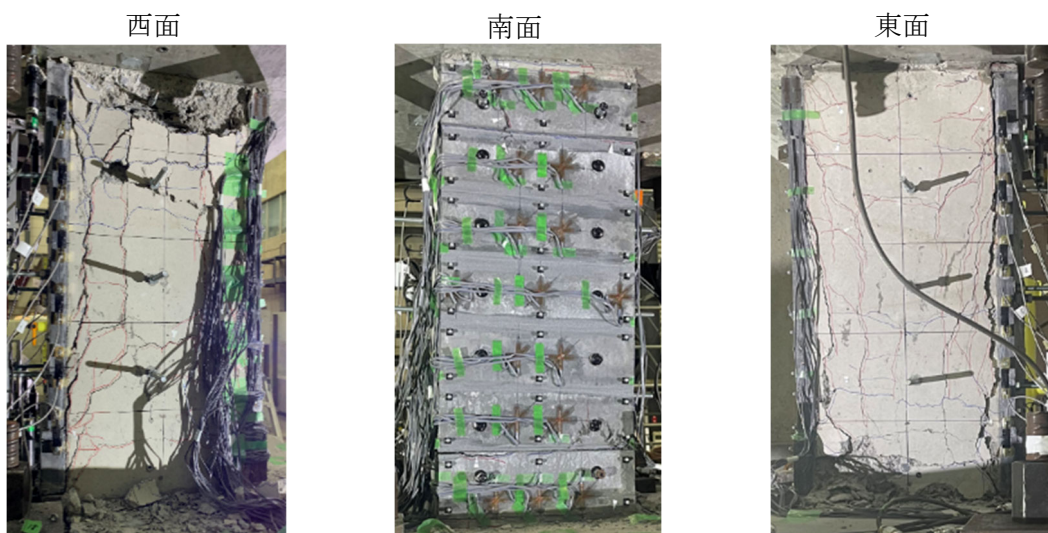
表 6.3.3-2(i) ひび割れ幅 (R=3.0%, C2-UFC2)

3.0%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	0.9	0.35	a'	2.2	-	a	1.0	0.2	a'	3.5	0.75	a	0.35	0.08	a'	1.2	1.2
	b	0.45	0.15	b'	2.0	-	b	0.7	0.2	b'	4.5	0.15	b	0.4	0.15	b'	1.5	0.06
	c	/	/	c'	/	/	c	2.2	2.2	c'	/	/	c	/	/	c'	/	/

表中ハイフンは剥落により計測不可であったことを示す

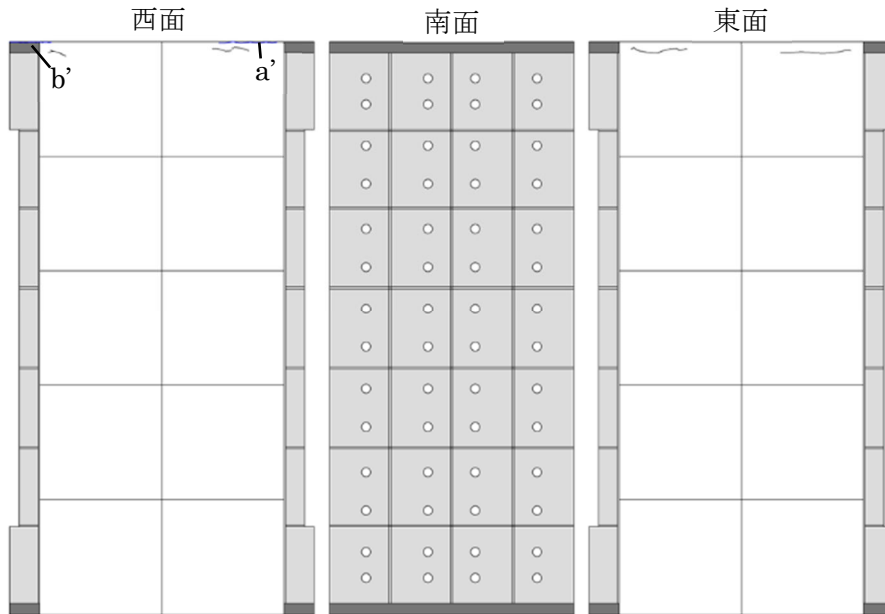


(i) ひび割れ図 (載荷終了後)

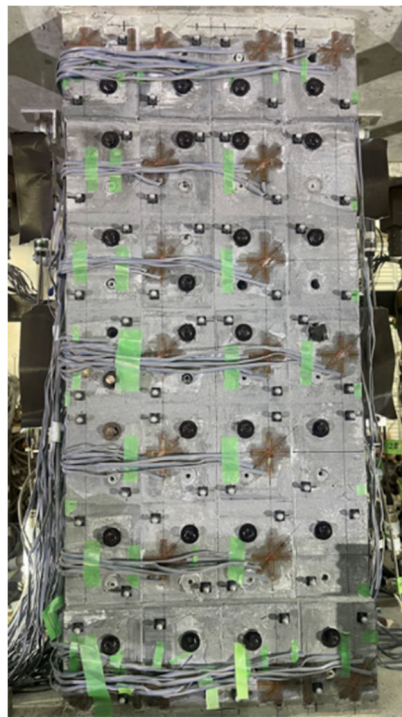


(ii) 実験状況写真

図 6.3.3-2(j) 最終破壊状況 (C2-UFC2)



(i) ひび割れ図 (R=0.0625%)



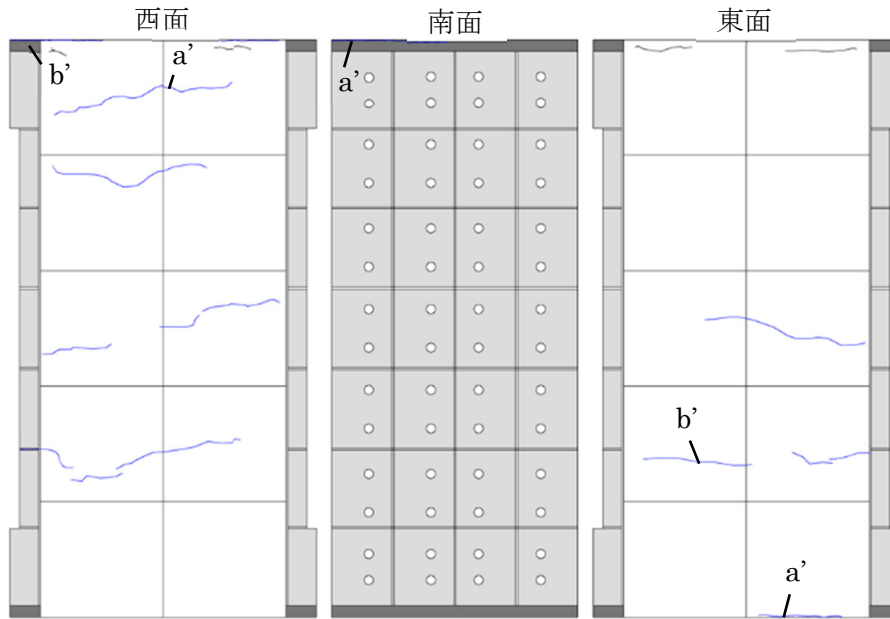
南面

(ii) 実験状況写真

図 6.3.3-3(a) 損傷状況 (R=0.0625%, C2-UFC3)

表 6.3.3-3(a) ひび割れ幅 (R=0.0625%, C2-UFC3)

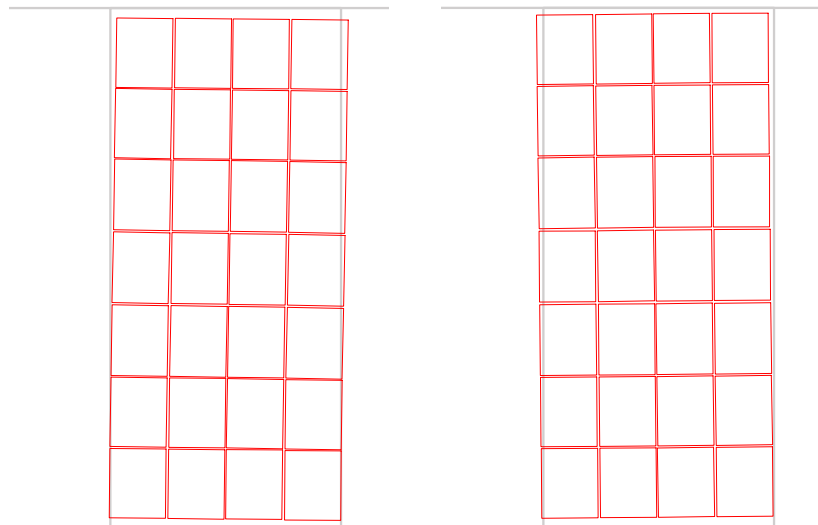
0.0625%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	/	/	a'	0.2	閉じ	a	/	/	a'	/	/	a	/	/	a'	/	/
	b	/	/	b'	0.15	閉じ	b	/	/	b'	/	/	b	/	/	b'	/	/



(i) ひび割れ図 (R=0.125%)



東面
(ii) 実験状況写真



+1/800①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

-1/800①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

(a) 正側

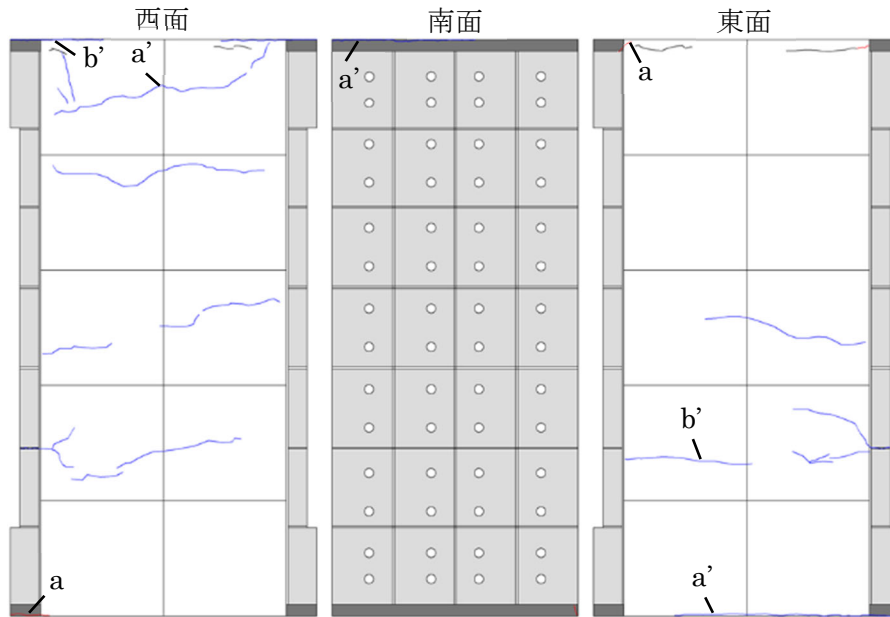
(b) 負側

(iii) 光学式モーショキャプチャの計測状況

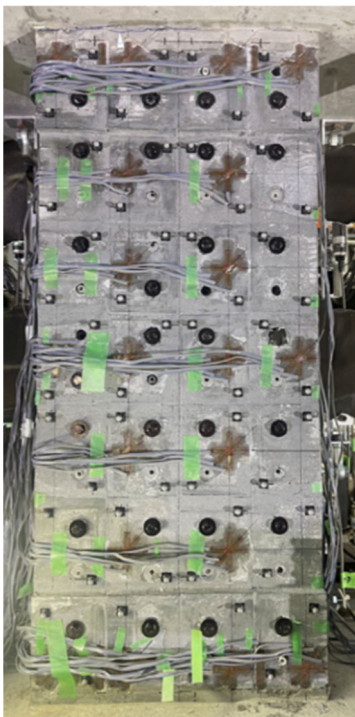
図 6.3.3-3(b) 損傷状況 (R=0.125%, C2-UFC3)

表 6.3.3-3(b) ひび割れ幅 (R=0.125%, C2-UFC3)

0.125%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	/	/	a'	0.2	閉じ	a	/	/	a'	0.04	閉じ	a	/	/	a'	0.1	閉じ
	b	/	/	b'	0.35	閉じ	b	/	/	b'	/	/	b	/	/	b'	0.08	閉じ

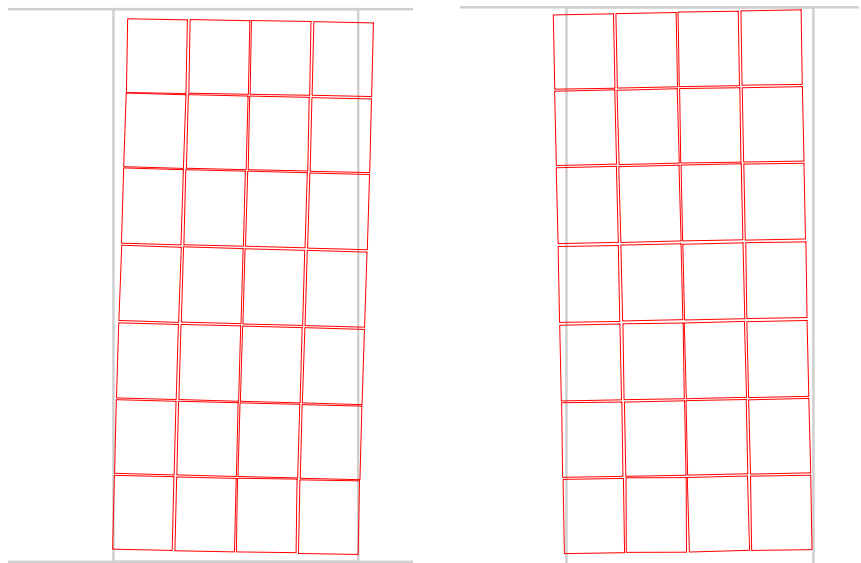


(i) ひび割れ図 (R=0.25%)



南面

(ii) 実験状況写真



+1/400①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

-1/400①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

(a) 正側

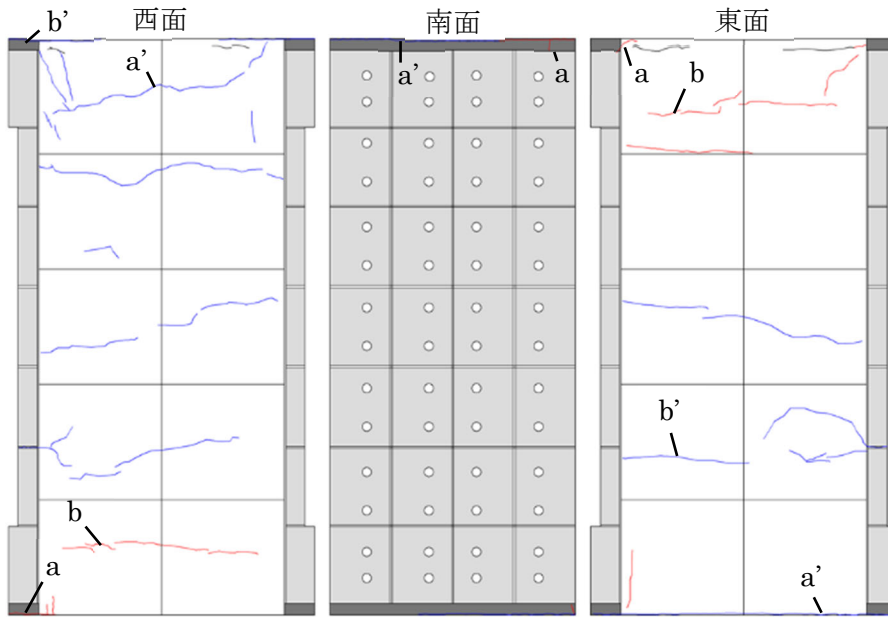
(b) 負側

(iii) 光学式モーションキャプチャの計測状況

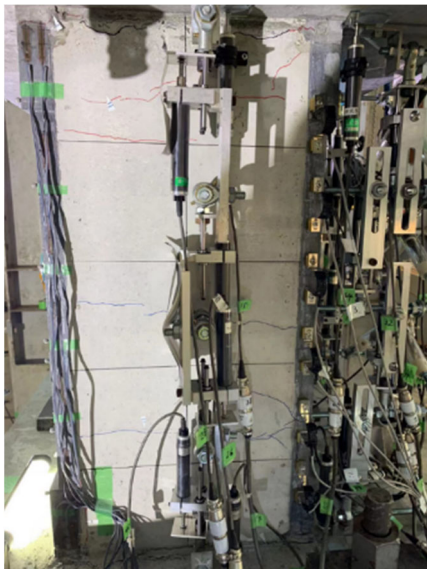
図 6.3.3-3(c) 損傷状況 (R=0.25%, C2-UFC3)

表 6.3.3-3(c) ひび割れ幅 (R=0.25%, C2-UFC3)

0.25%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	0.2	閉じ	a'	0.2	閉じ	a	/	/	a'	0.06	閉じ	a	0.04	閉じ	a'	0.1	閉じ
	b	/	/	b'	0.5	閉じ	b	/	/	b'	/	/	b	/	/	b'	0.08	閉じ

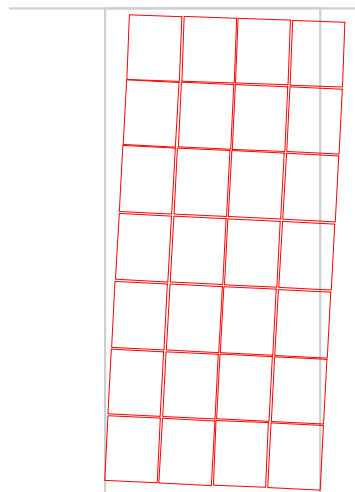


(i) ひび割れ図 (R=0.5%)



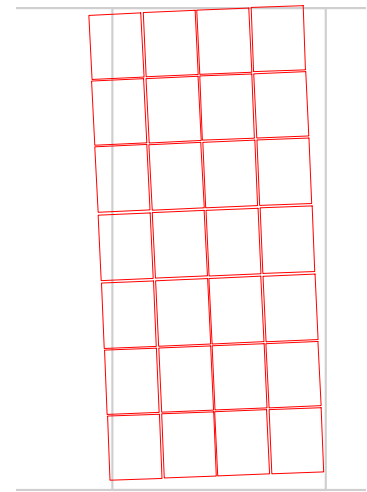
東面

(ii) 実験状況写真



+1/200①ピーク時UFCパネル変形図(変形倍率10倍)

(a) 正側



-1/200①ピーク時UFCパネル変形図(変形倍率10倍)

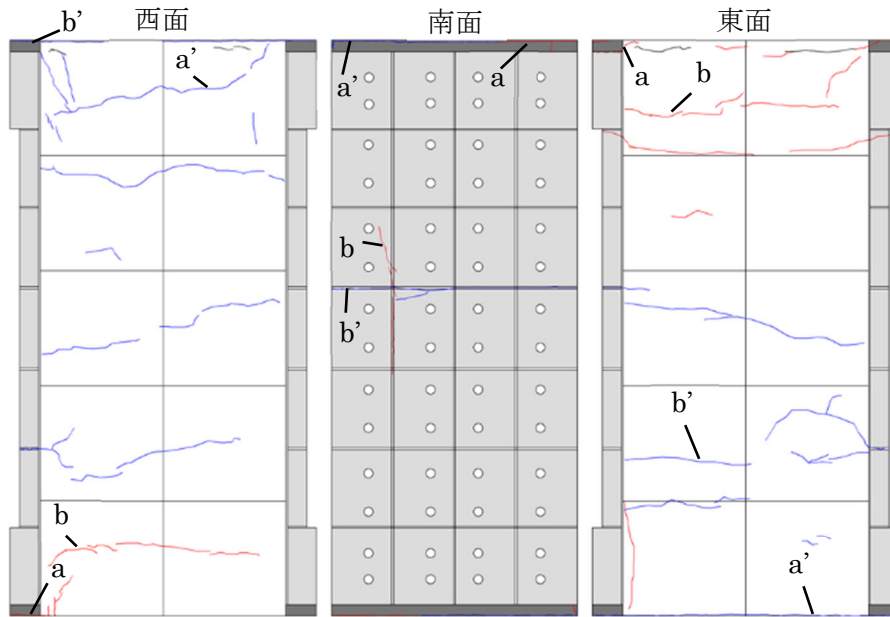
(b) 負側

(iii) 光学式モーショキャプチャの計測状況

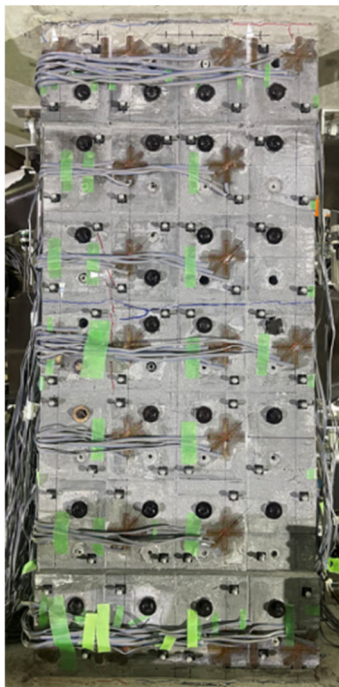
図 6.3.3-3(d) 損傷状況 (R=0.5%, C2-UFC3)

表 6.3.3-3(d) ひび割れ幅 (R=0.5%, C2-UFC3)

0.50%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
a	0.35	0.08	a'	0.45	閉じ	a	0.06	閉じ	a'	0.3	0.03	a	0.3	閉じ	a'	0.35	0.15	
b	0.2	閉じ	b'	1.0	0.2	b	/	/	b'	/	/	b	0.04	閉じ	b'	0.1	閉じ	

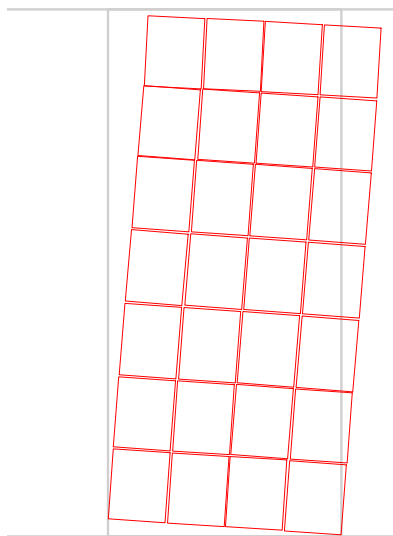


(i) ひび割れ図 (R=0.75%)



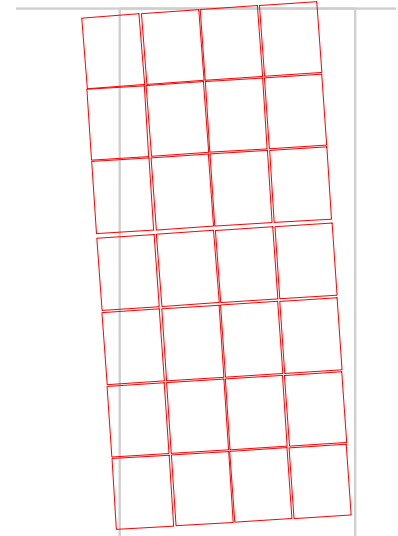
南面

(ii) 実験状況写真



+1/133①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

(a) 正側



-1/133①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

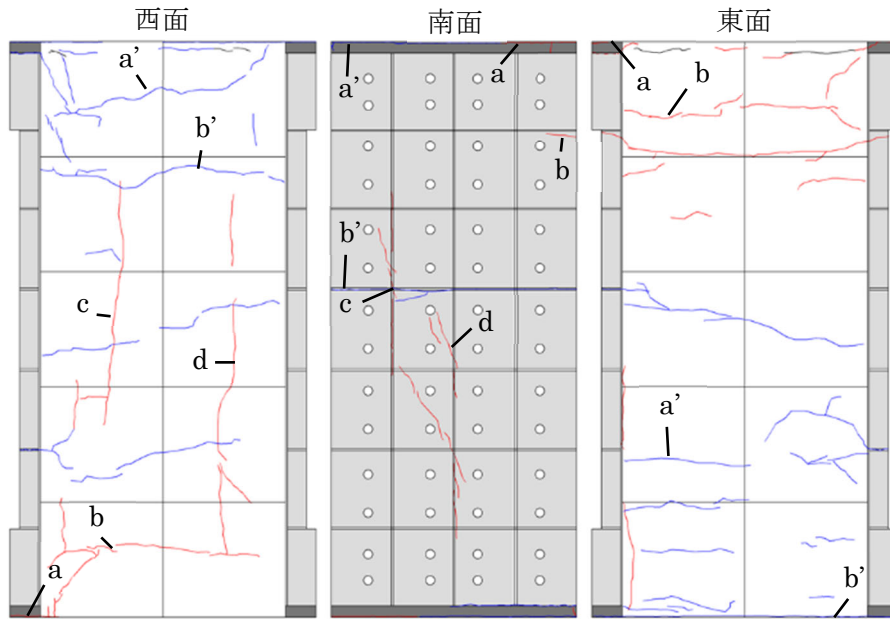
(b) 負側

(iii) 光学式モーションキャプチャの計測状況

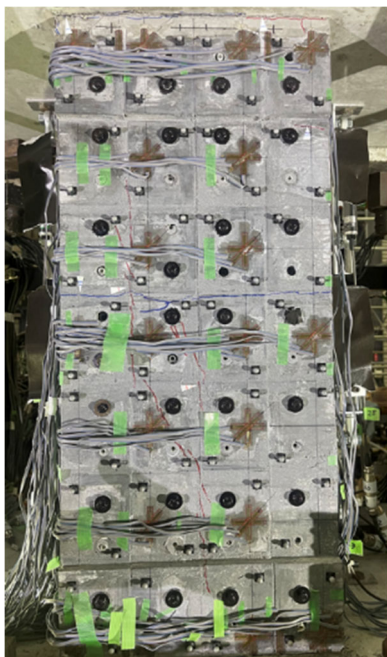
図 6.3.3-3(e) 損傷状況 (R=0.75%, C2-UFC3)

表 6.3.3-3(e) ひび割れ幅 (R=0.75%, C2-UFC3)

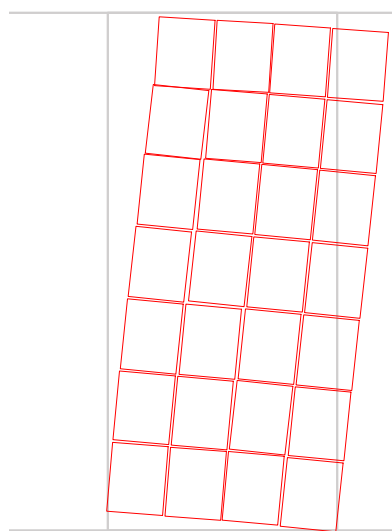
0.75%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	0.65	0.25	a'	0.6	0.1	a	0.3	閉じ	a'	2.0	0.2	a	0.5	0.03	a'	0.35	0.15
	b	0.25	0.04	b'	1.7	0.3	b	0.04	0.03	b'	0.3	閉じ	b	0.1	閉じ	b'	0.15	閉じ



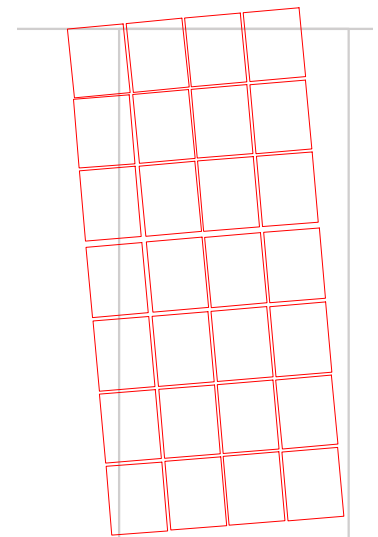
(i) ひび割れ図 (R=1.0%)



南面
(ii) 実験状況写真



+1/100①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)



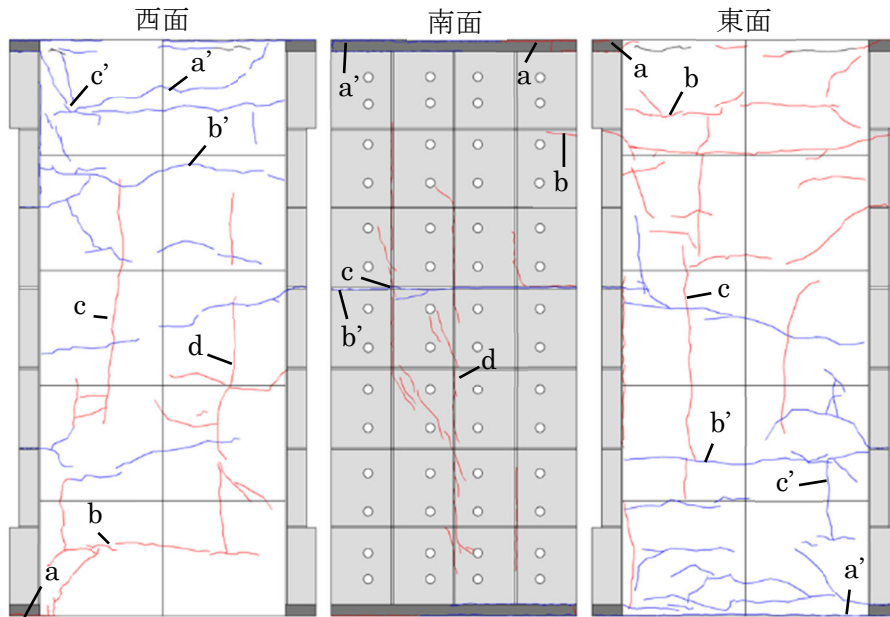
-1/100①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

(a) 正側 (b) 負側
(iii) 光学式モーショキャプチャの計測状況

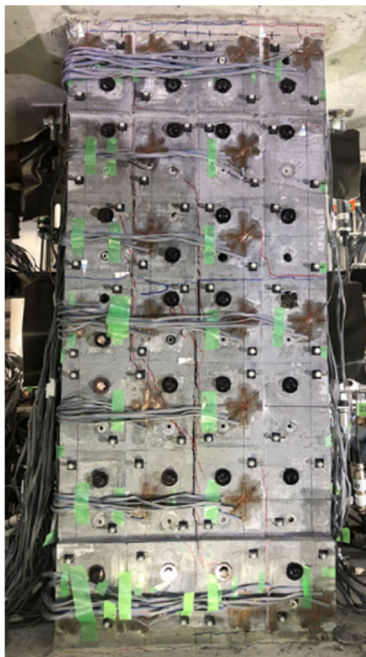
図 6.3.3-3(f) 損傷状況 (R=1.0%, C2-UFC3)

表 6.3.3-3(f) ひび割れ幅 (R=1.0%, C2-UFC3)

1.0%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	0.75	0.25	a'	0.8	0.25	a	0.4	0.03	a'	2.0	0.2	a	0.75	0.03	a'	0.85	0.25
	b	0.4	0.08	b'	0.3	閉じ	b	0.06	閉じ	b'	0.35	閉じ	b	0.1	閉じ	b'	0.15	閉じ
	c	0.25	0.25	c'	/	/	c	0.4	0.15	c'	/	/	c	/	/	c'	/	/
	d	0.15	0.15	d'	/	/	d	0.15	0.03	d'	/	/	d	/	/	d'	/	/

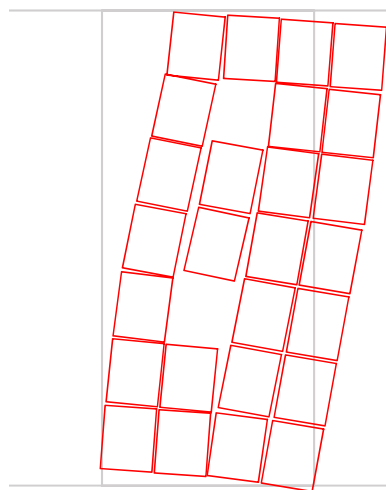


(i) ひび割れ図 (R=1.5%)

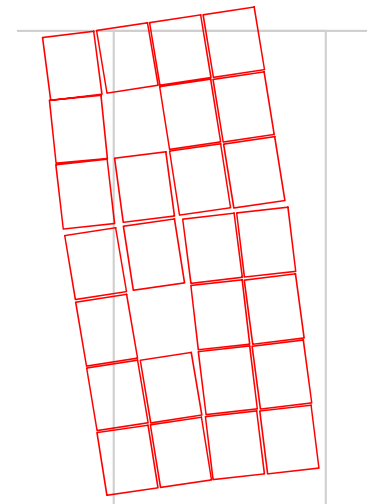


南面

(ii) 実験状況写真



+1/67①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)



-1/67①ピーク時 UFCパネル変形図 (変形倍率10倍)

(a) 正側

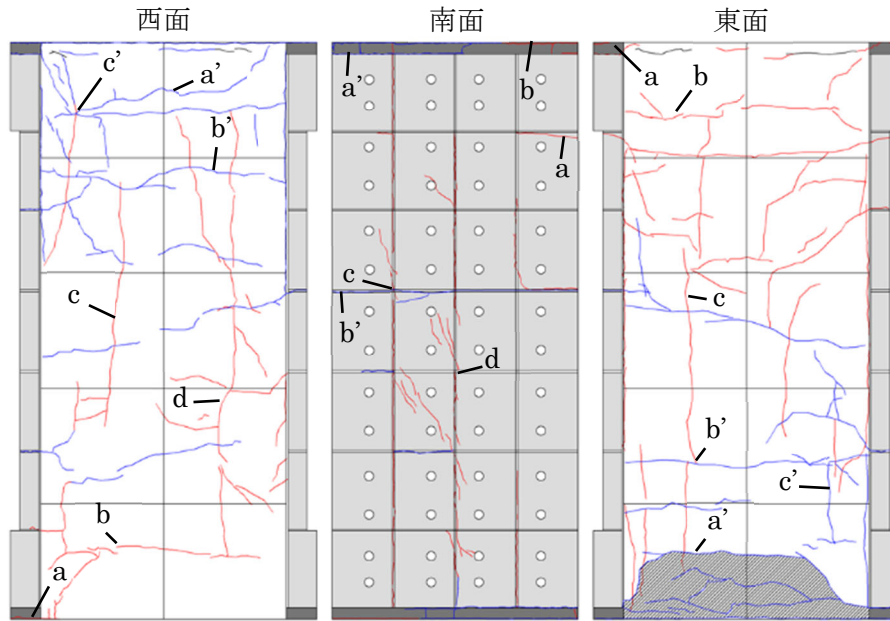
(b) 負側

(iii) 光学式モーションキャプチャの計測状況

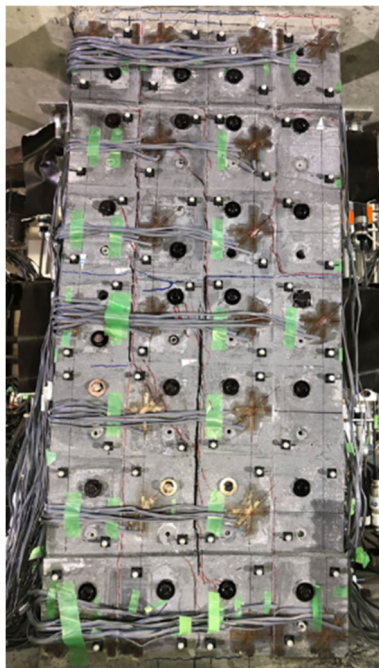
図 6.3.3-3(g) 損傷状況 (R=1.5%, C2-UFC3)

表 6.3.3-3(g) ひび割れ幅 (R=1.5%, C2-UFC3)

	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
1.5%	a	0.3	0.04	a'	0.7	0.15	a	0.4	閉じ	a'	5.0	0.2	a	0.55	0.08	a'	0.75	0.45
	b	0.1	閉じ	b'	0.4	0.08	b	0.3	0.1	b'	0.45	閉じ	b	0.04	閉じ	b'	0.5	0.06
	c	0.25	0.15	c'	1.8	0.3	c	2.0	0.95	c'	/	/	c	0.15	0.04	c'	0.3	0.1
	d	0.25	0.1	d'	/	/	d	1.4	0.7	d'	/	/	d	/	/	d'	/	/

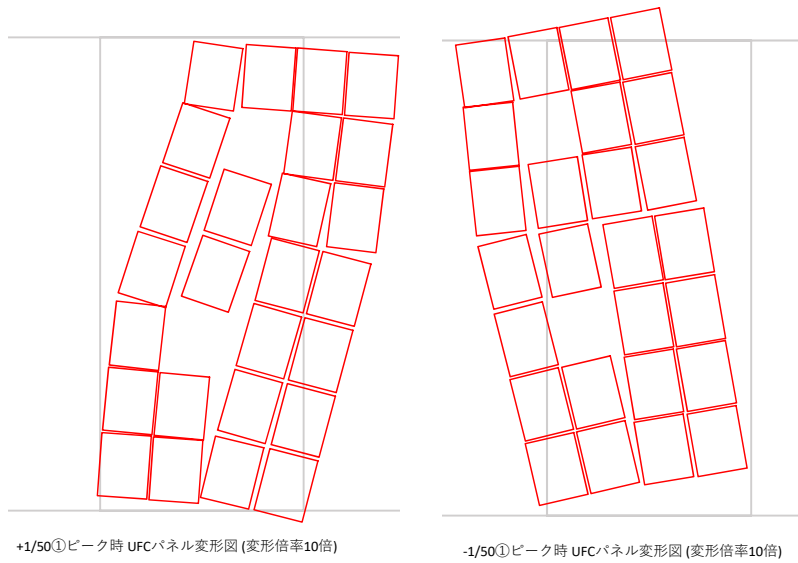


(i) ひび割れ図 (R=2.0%)



南面

(ii) 実験状況写真



(a) 正側

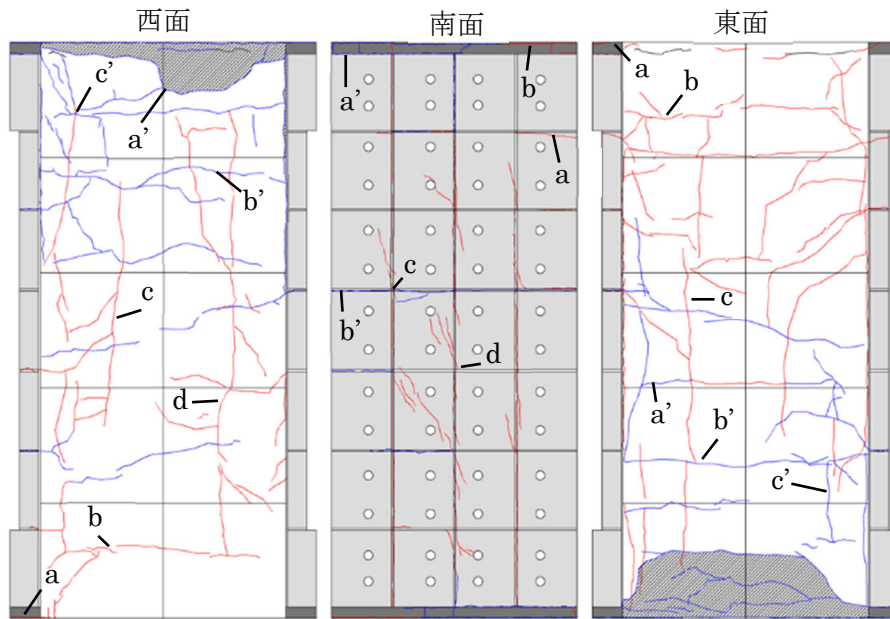
(b) 負側

(iii) 光学式モーションキャプチャの計測状況

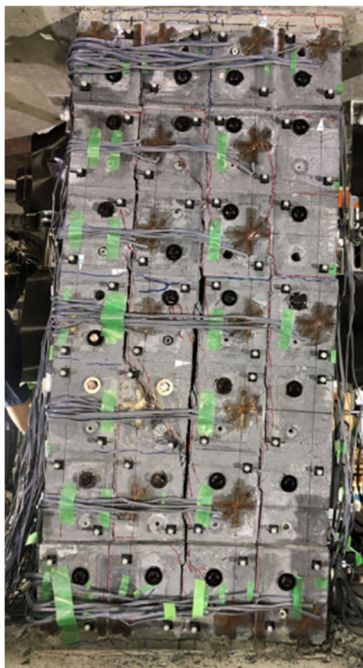
図 6.3.3-3(h) 損傷状況 (R=2.0%, C2-UFC3)

表 6.3.3-3(h) ひび割れ幅 (R=2.0%, C2-UFC3)

2.0%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	0.35	0.15	a'	0.6	0.2	a	0.9	閉じ	a'	2.5	0.4	a	0.15	0.08	a'	2.2	1.5
	b	0.2	閉じ	b'	1.3	0.55	b	0.4	0.2	b'	0.7	0.1	b	0.1	0.03	b'	1.6	0.1
	c	0.4	0.25	c'	2.2	0.4	c	5.0	4.0	c'	/	/	c	0.15	0.06	c'	0.9	0.85
	d	0.25	0.1	d'	/	/	d	2.2	1.4	d'	/	/	d	/	/	d'	/	/

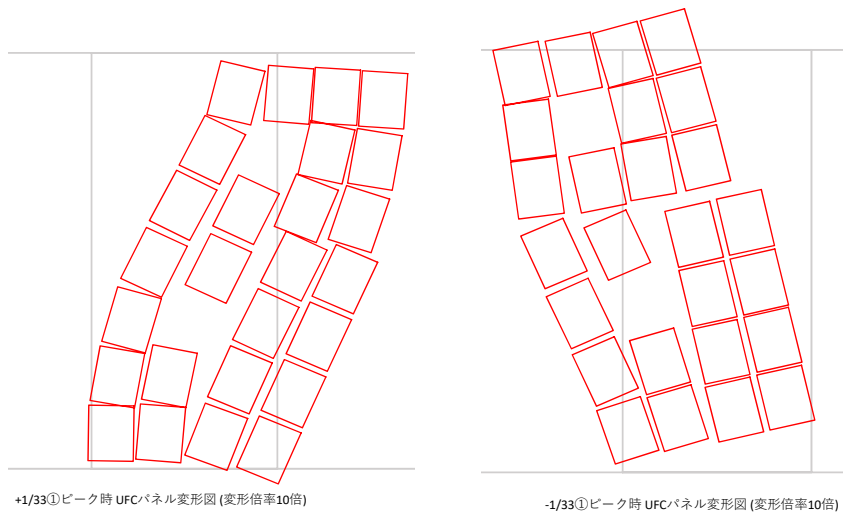


(i) ひび割れ図 (R=3.0%)



南面

(ii) 実験状況写真



(a) 正側

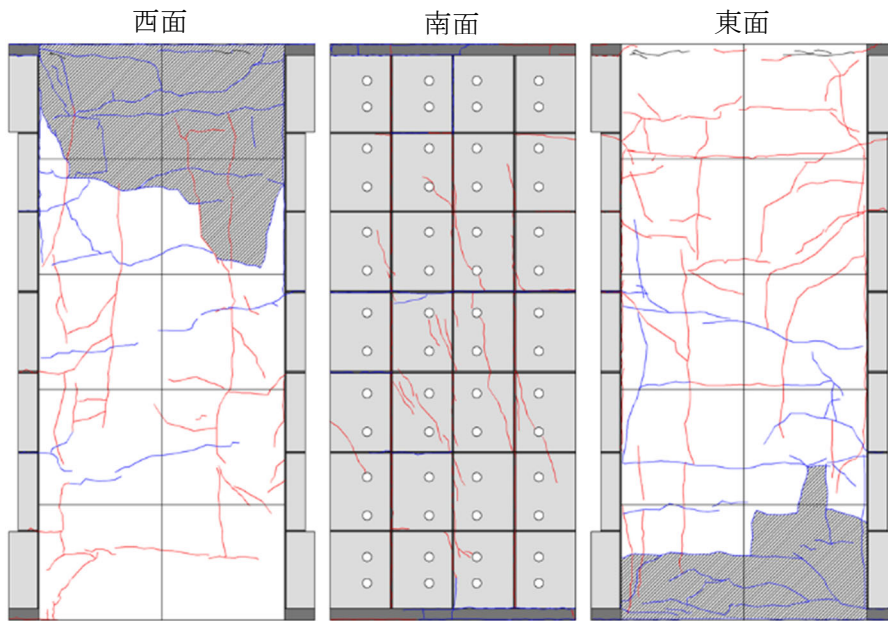
(b) 負側

(iii) 光学式モーショキャプチャの計測状況

図 6.3.3-3(i) 損傷状況 (R=3.0%, C2-UFC3)

表 6.3.3-3(i) ひび割れ幅 (R=3.0%, C2-UFC3)

3.0%	西面						南面						東面					
	正側			負側			正側			負側			正側			負側		
	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時	記号	ピーク時	除荷時
	a	0.65	0.35	a'	-	-	a	0.3	0.6	a'	-	-	a	0.15	0.08	a'	1.3	0.03
	b	0.15	-	b'	1.6	6.0	b	-	-	b'	-	-	b	0.15	0.04	b'	1.6	0.03
	c	0.9	0.55	c'	5.0	0.4	c	7.0	6.0	c'	/	/	c	0.2	0.1	c'	1.4	0.1
	d	0.2	0.1	d'	/	/	d	2.5	2.2	d'	/	/	d	/	/	d'	/	/



(i) ひび割れ図 (載荷終了後)



西面



南面



東面

(ii) 実験状況写真

図 6.3.3-3(j) 最終破壊状況 (C2-UFC3)

6.3.4 ひずみ分布

ひずみゲージを貼り付けた柱主筋の位置，および主筋番号を図 6.3.4-1 に示す。また，各試験体の正負それぞれ 1 回目の変形角ピークにおける，主筋のひずみの高さ方向の分布をそれぞれの主筋について図 6.3.4-2～図 6.3.4-4 に示す。なお，図中の赤破線は主筋の降伏ひずみ（D10：2090 μ ，D5：1938 μ ）を示している。また，各変形角サイクルにおける，各試験体の主筋，および帯筋の降伏状況を図 6.3.4-5 に示す。なお，図中に示す鉄筋の降伏箇所は図 6.3.4-1 に示す北構面および南構面における主筋の降伏状況を併せて示している。

正載荷側では C2-UFC1，および C2-UFC2 は R=0.5%，C2-UFC3 は R=0.75% サイクルで柱頭，および柱脚において引張側主筋が引張降伏した。また，C2-UFC1 は R=1.5%，C2-UFC2 は R=1.0%，C2-UFC3 は R=0.5% サイクルで柱頭，および柱脚において圧縮側主筋の圧縮降伏が確認された。負載荷側では C2-UFC1，および C2-UFC3 は R=0.0625%，C2-UFC2 は R=0.125% サイクルで中央の細径の主筋が柱頭，および柱脚において降伏し，その後，C2-UFC1，および C2-UFC2 は R=0.125%，C2-UFC2 は R=0.25% サイクルにおいて，引張側主筋が降伏した。また，負載荷側において，変形角が大きくなるにつれ，降伏する範囲が柱頭，および柱脚から柱スパン中央に向かって広がっていった。また，C2-UFC1，および C2-UFC2 は R=1.5%，C2-UFC3 は R=1.0% サイクルにおいて帯筋が降伏した。その後変形角が大きくなるにつれ，帯筋が降伏する範囲が広がっていった。

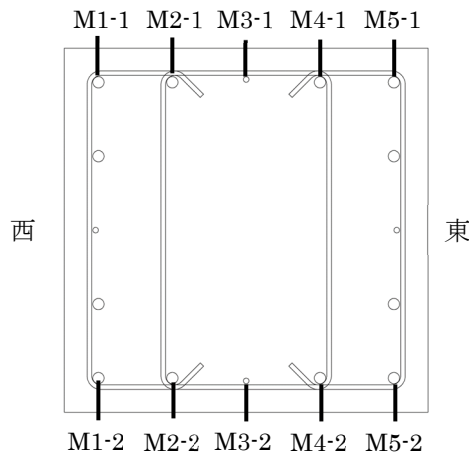


図 6.3.4-1 ひずみゲージを貼り付けた主筋の位置，および主筋番号

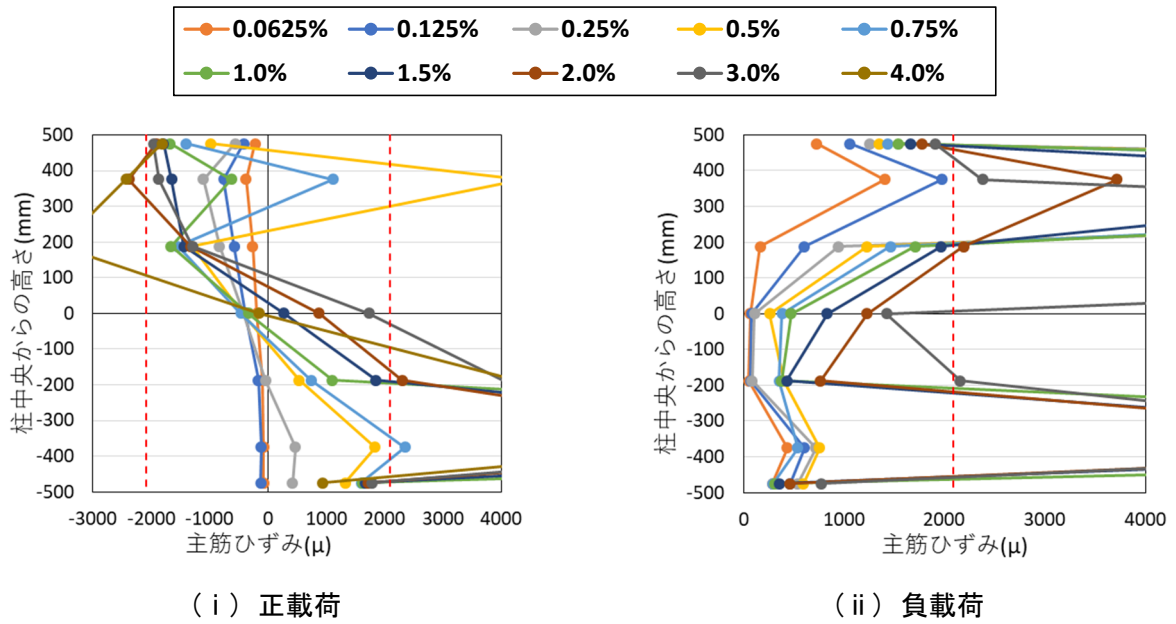


図 6.3.4-2(a) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC1, M1-1)

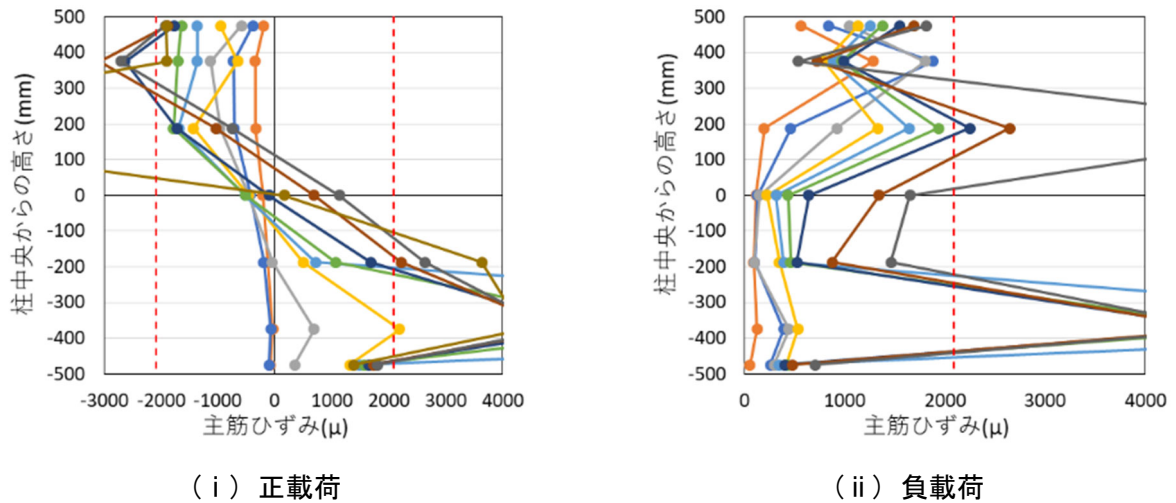


図 6.3.4-2(b) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC1, M1-2)

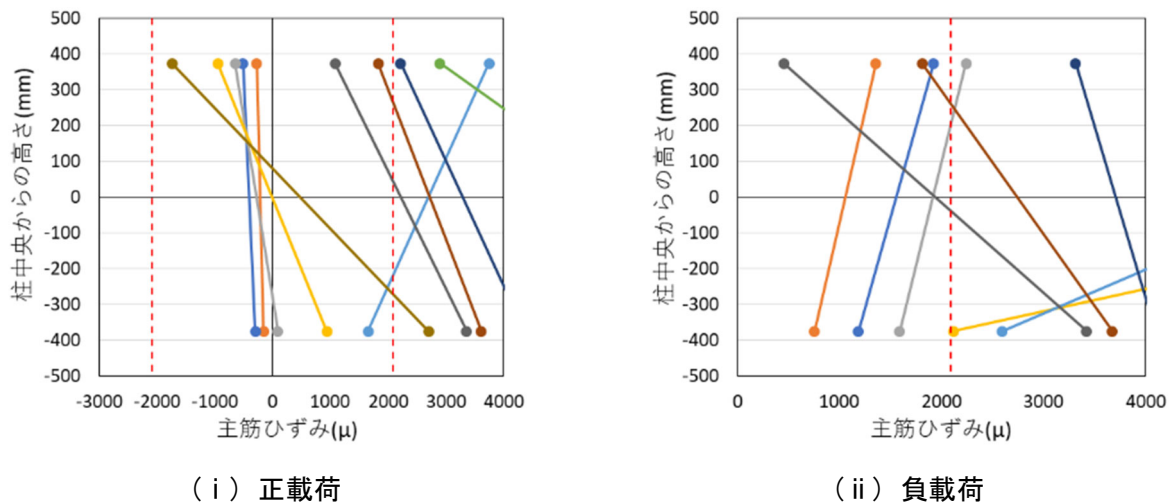


図 6.3.4-2(c) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC1, M2-1)

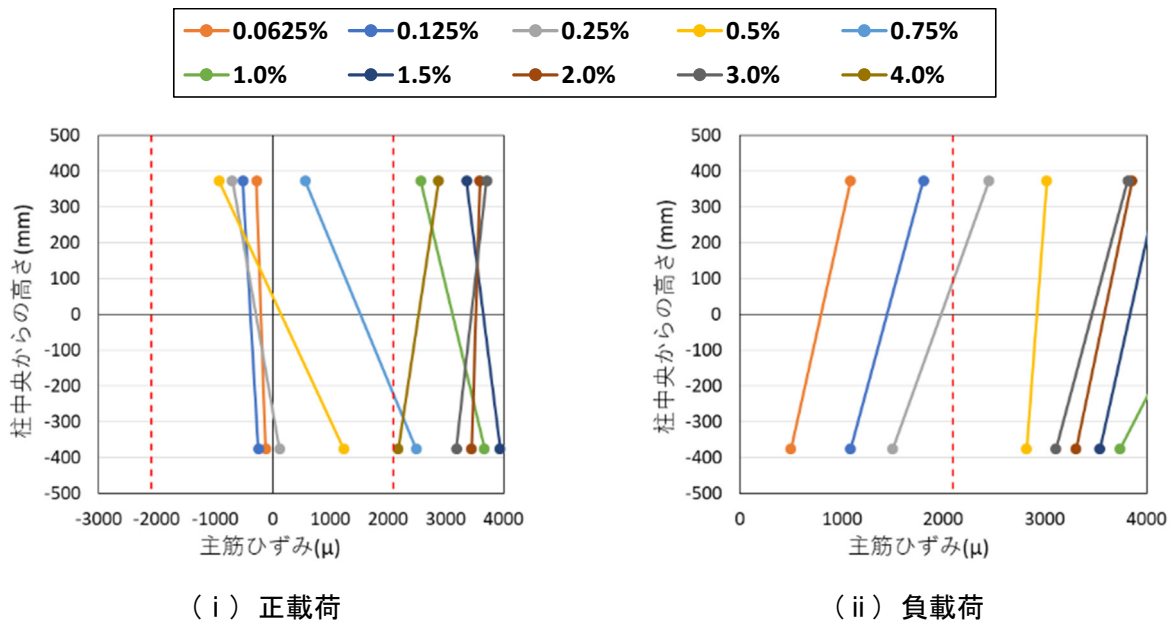


図 6.3.4-2(d) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC1, M2-2)

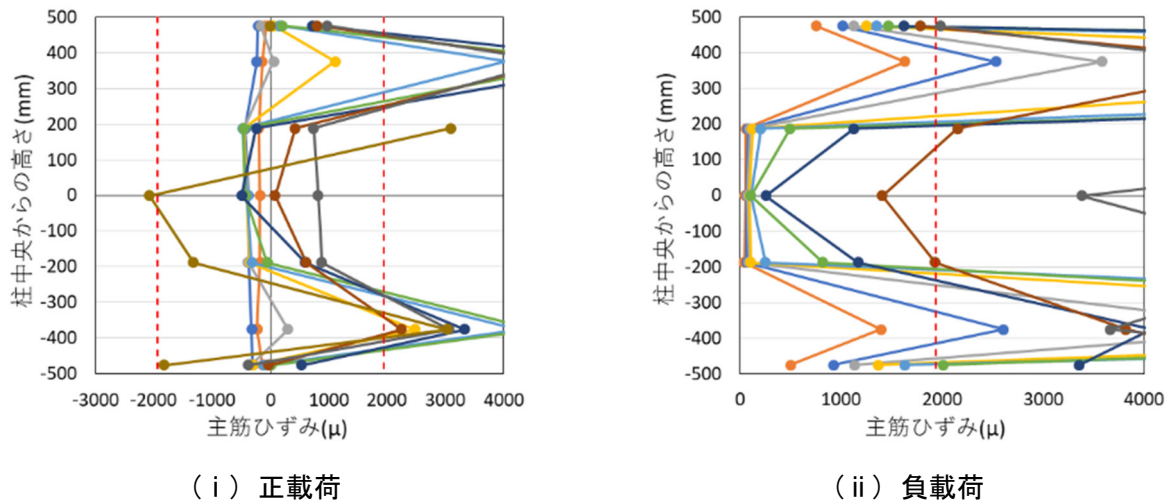


図 6.3.4-2(e) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC1, M3-1)

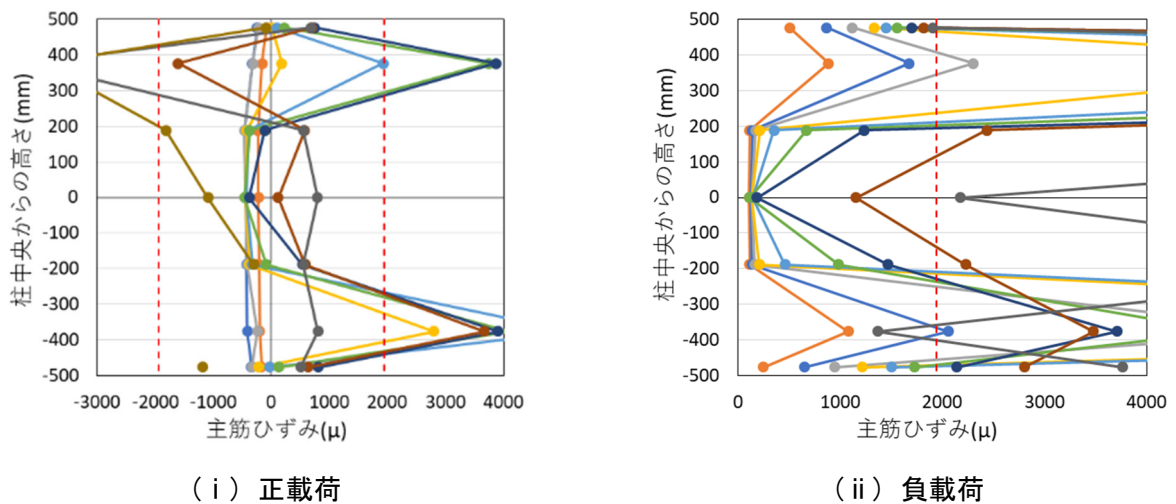
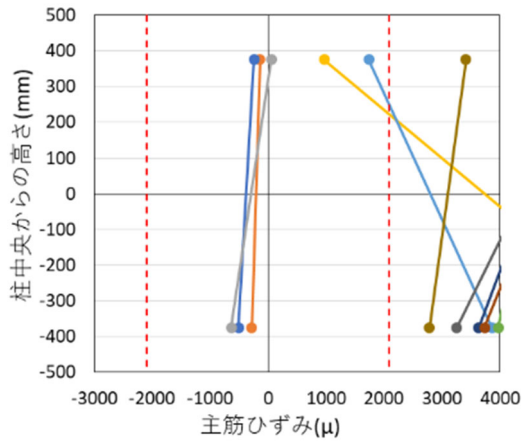
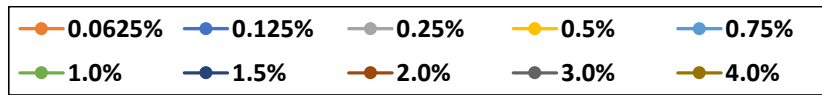
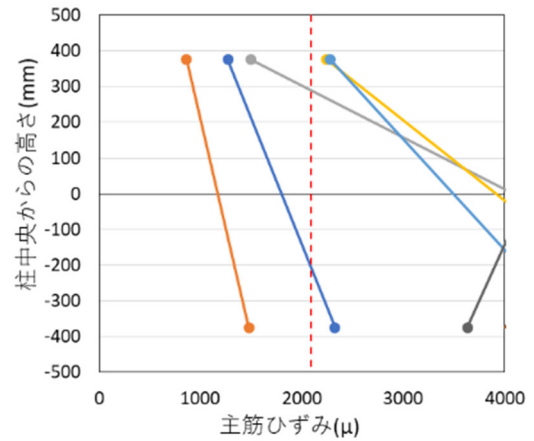


図 6.3.4-2(f) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC1, M3-2)

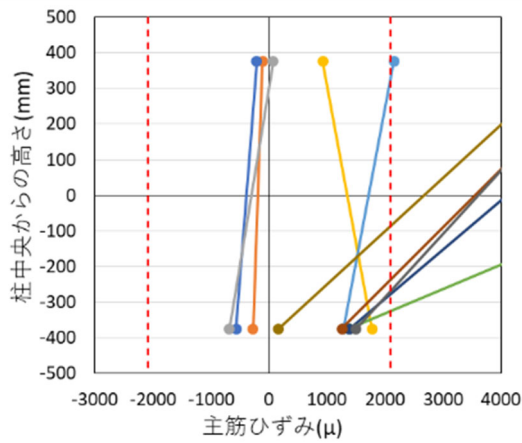


(i) 正載荷

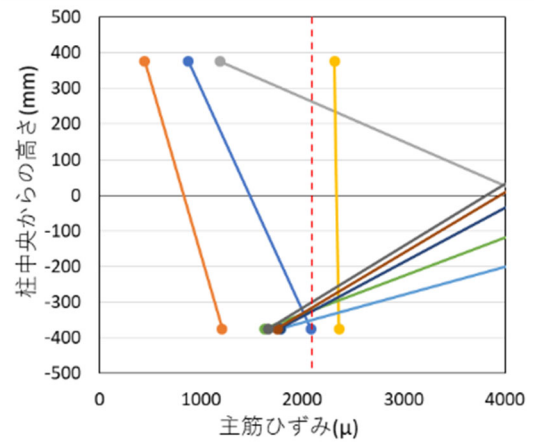


(ii) 負載荷

図 6.3.4-2(g) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC1, M4-1)

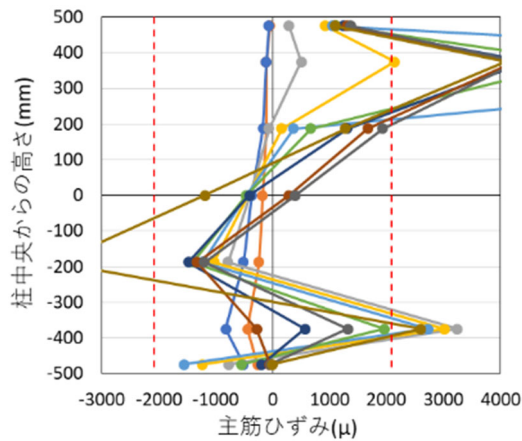


(i) 正載荷

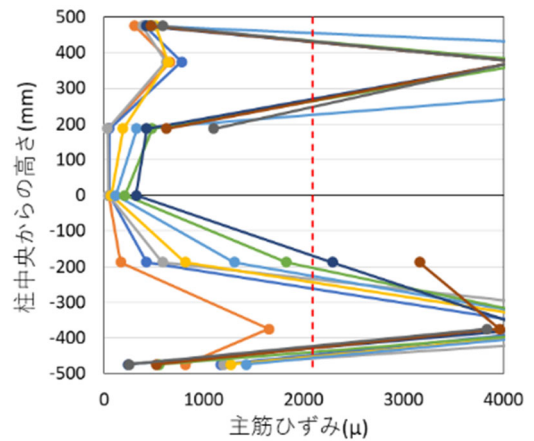


(ii) 負載荷

図 6.3.4-2(h) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC1, M4-2)



(i) 正載荷



(ii) 負載荷

図 6.3.4-2(i) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC1, M5-1)

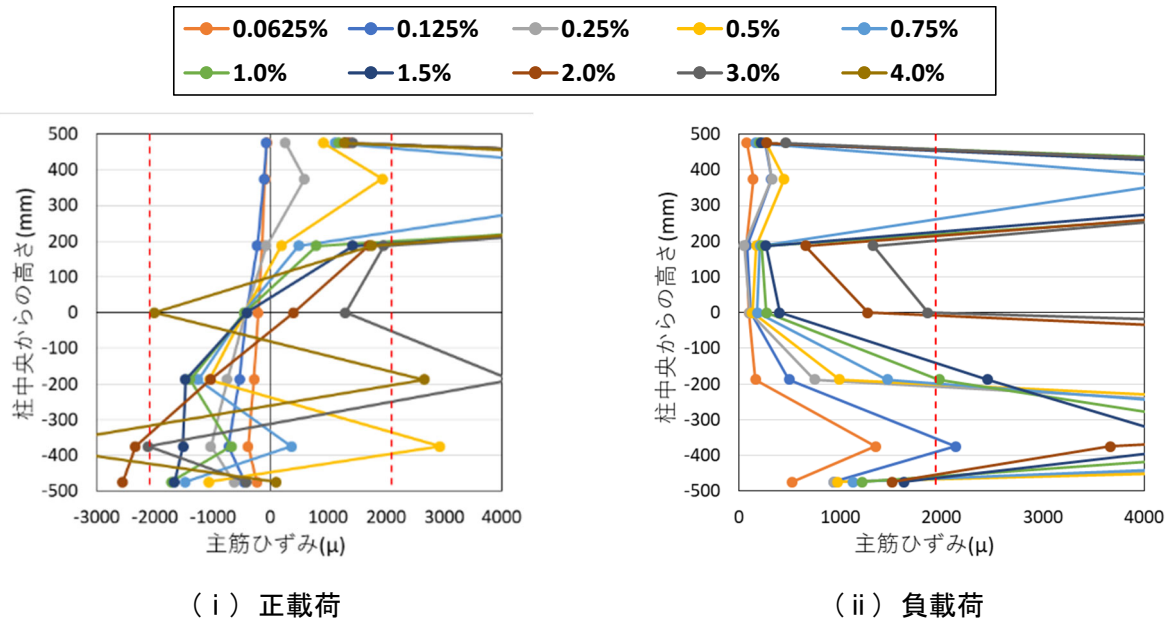


図 6. 3. 4-2(j) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC1, M5-2)

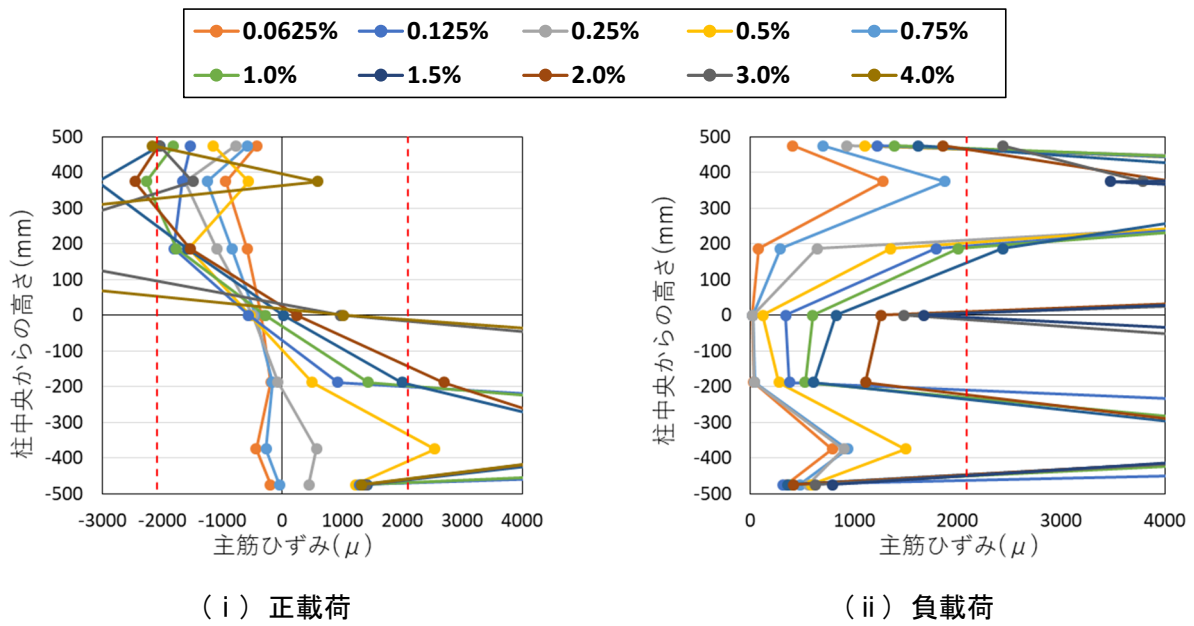


図 6. 3. 4-3(a) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC2, M1-1)

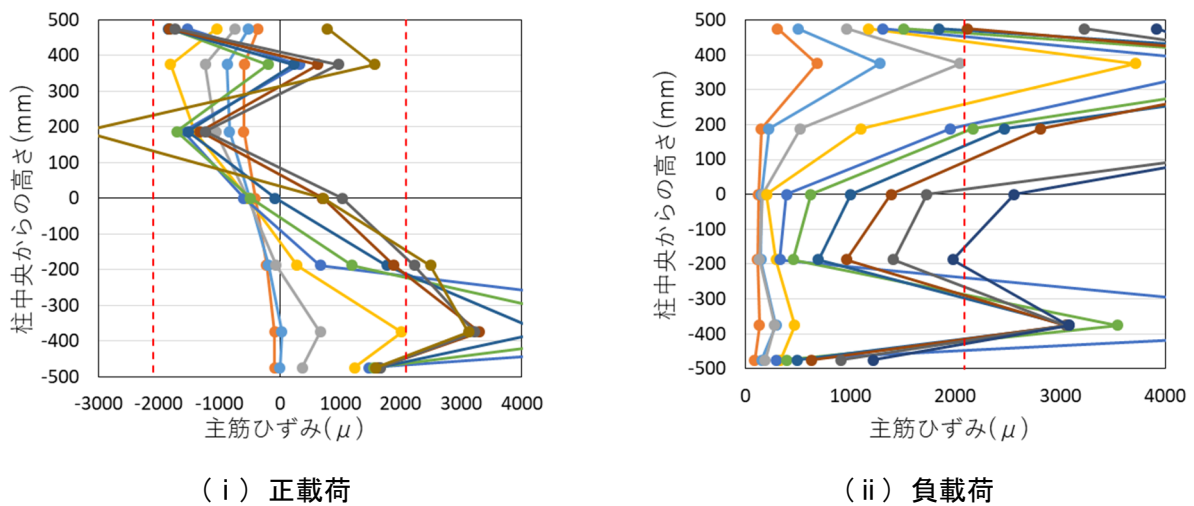


図 6. 3. 4-3(b) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC2, M1-2)

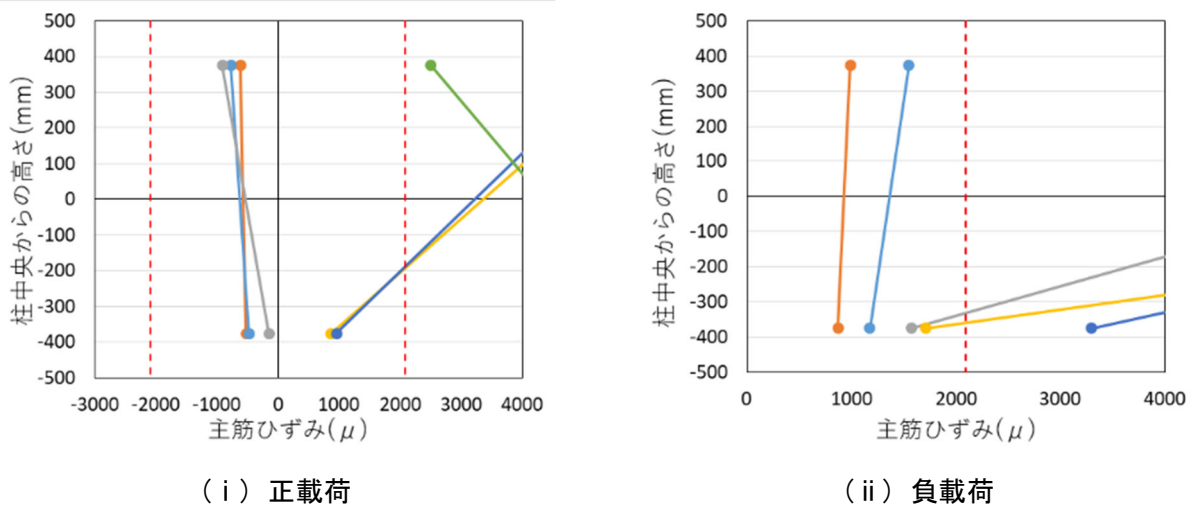


図 6. 3. 4-3(c) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC2, M2-1)

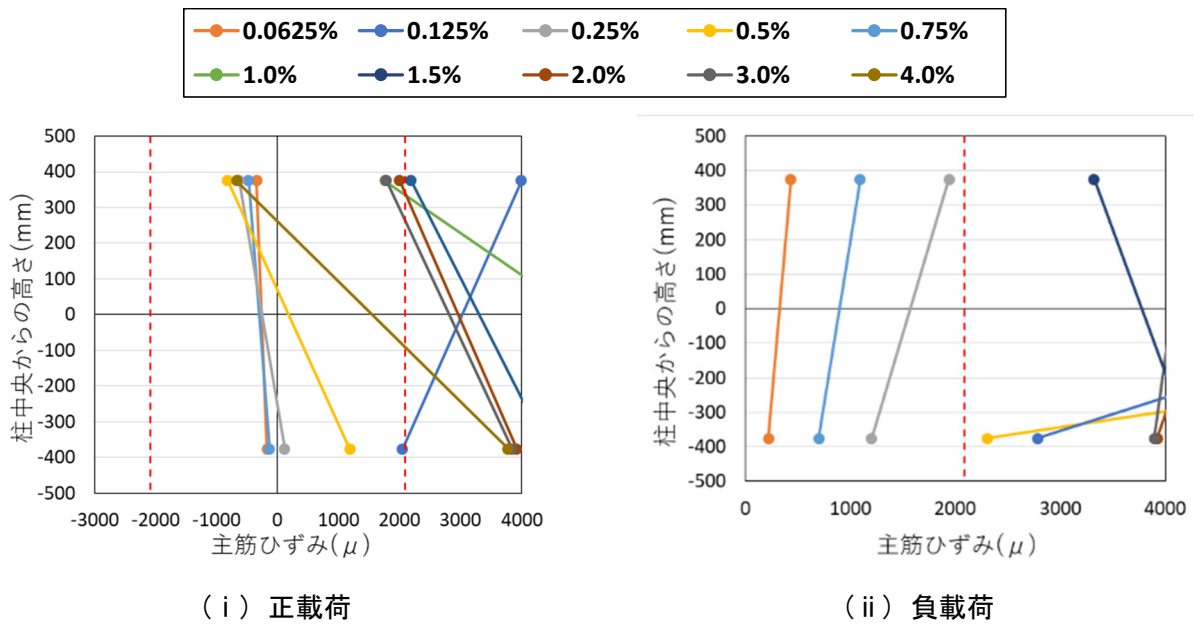


図 6.3.4-3(d) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC2, M2-2)

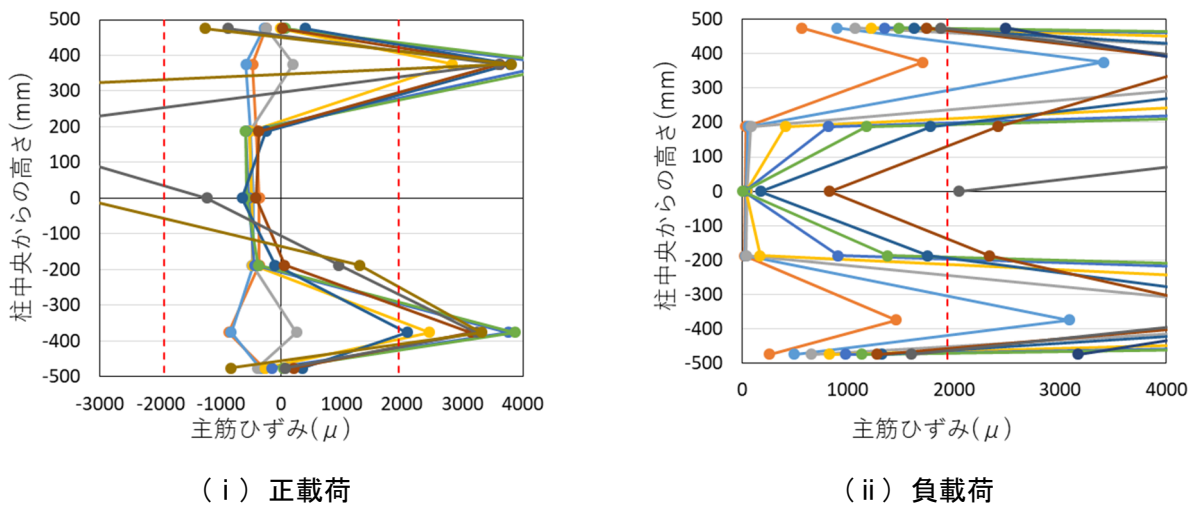


図 6.3.4-3(e) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC2, M3-1)

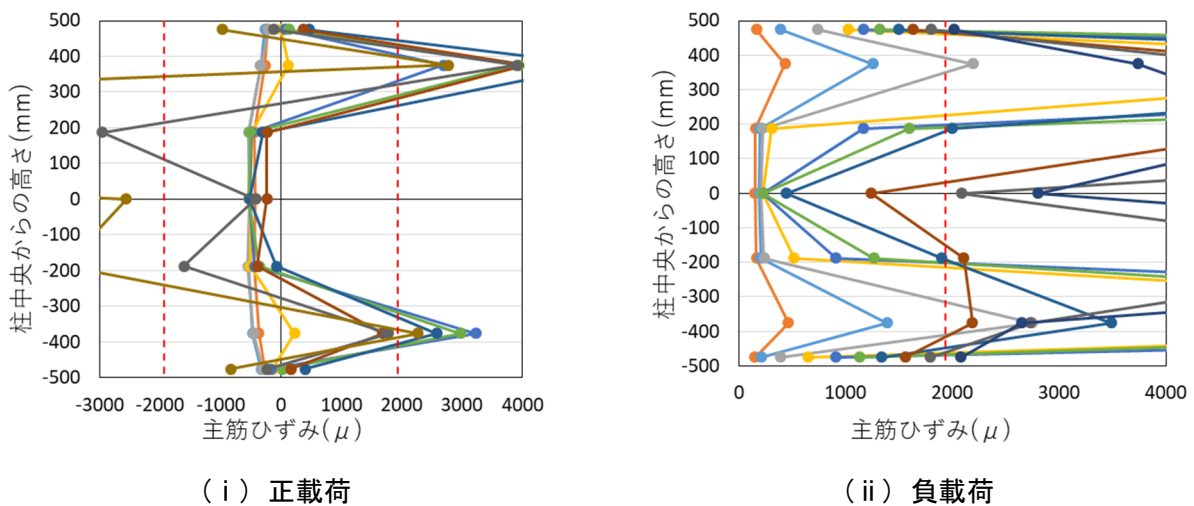
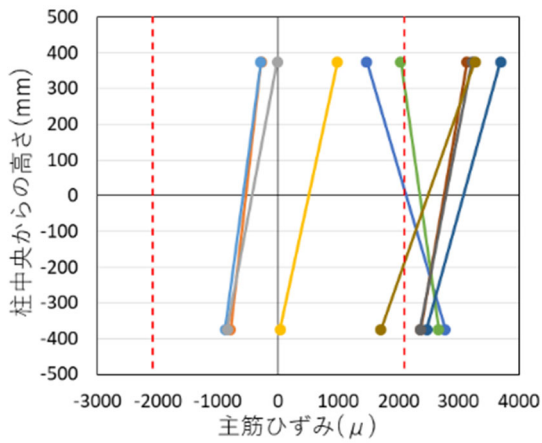
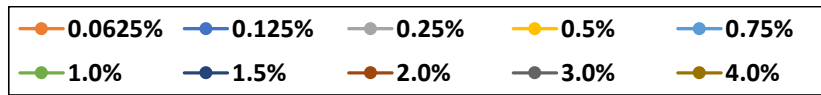
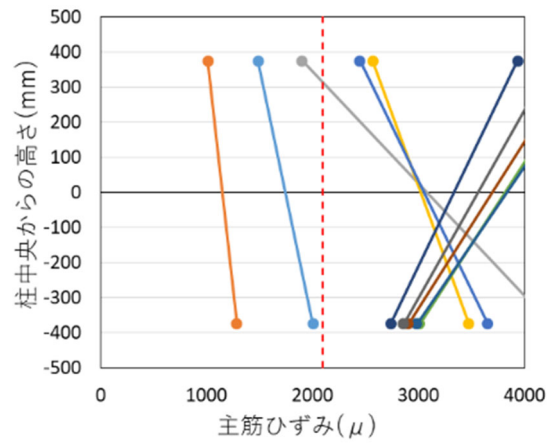


図 6.3.4-3(f) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC2, M3-2)

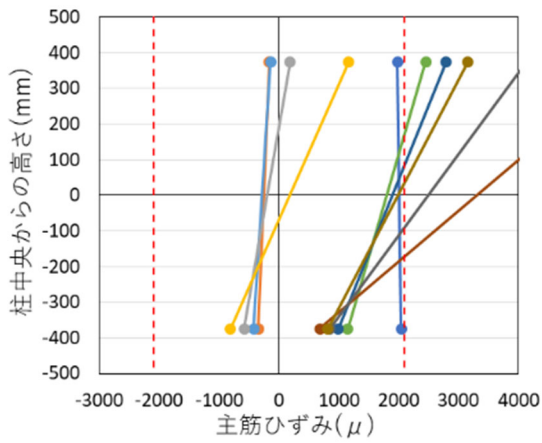


(i) 正載荷

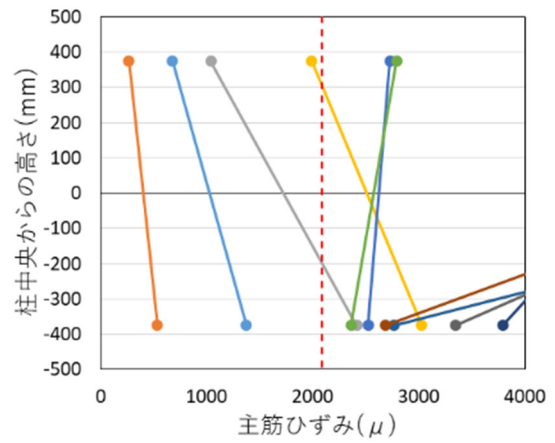


(ii) 負載荷

図 6. 3. 4-3(g) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC2, M4-1)

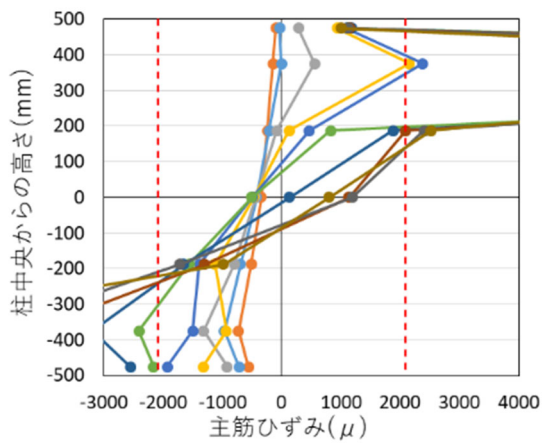


(i) 正載荷

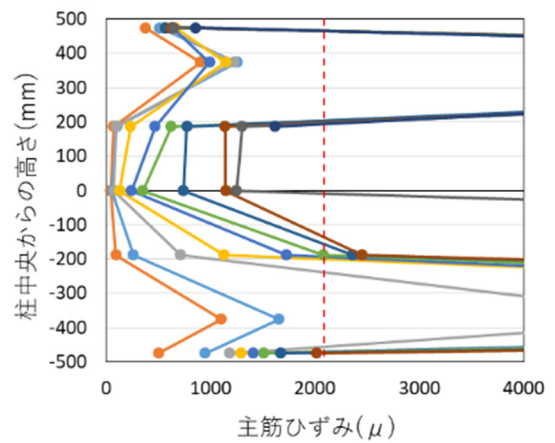


(ii) 負載荷

図 6. 3. 4-3(h) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC2, M4-2)

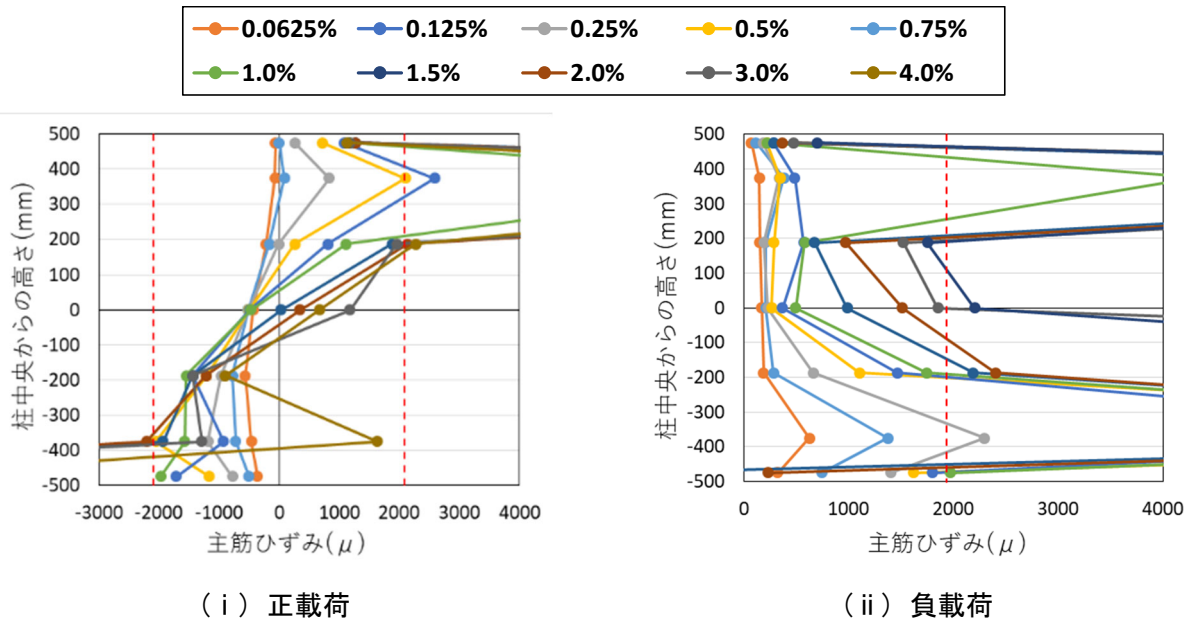


(i) 正載荷



(ii) 負載荷

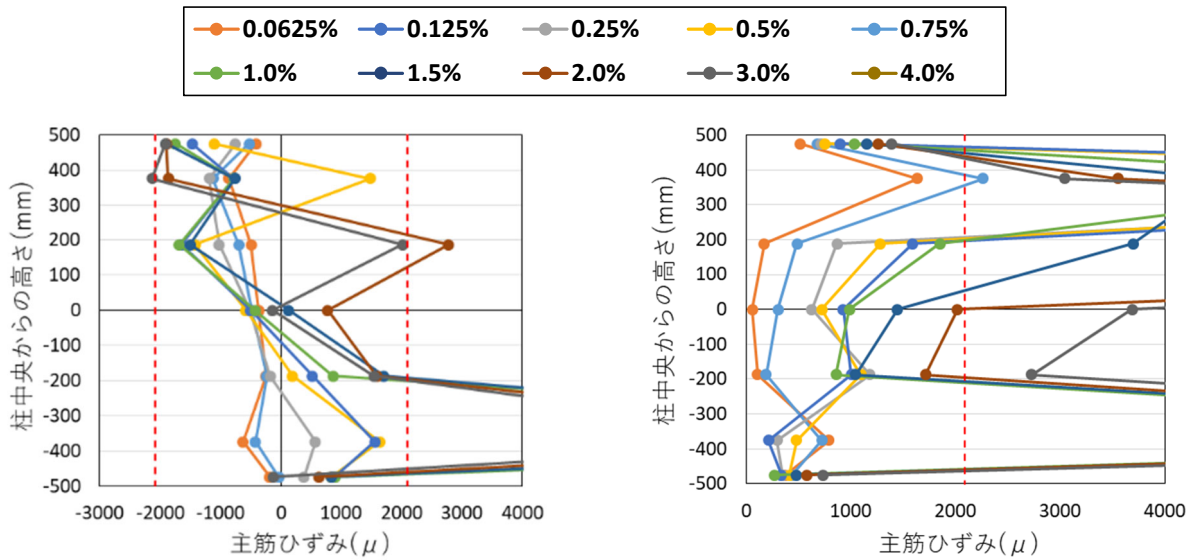
図 6. 3. 4-3(i) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC2, M5-1)



(i) 正載荷

(ii) 負載荷

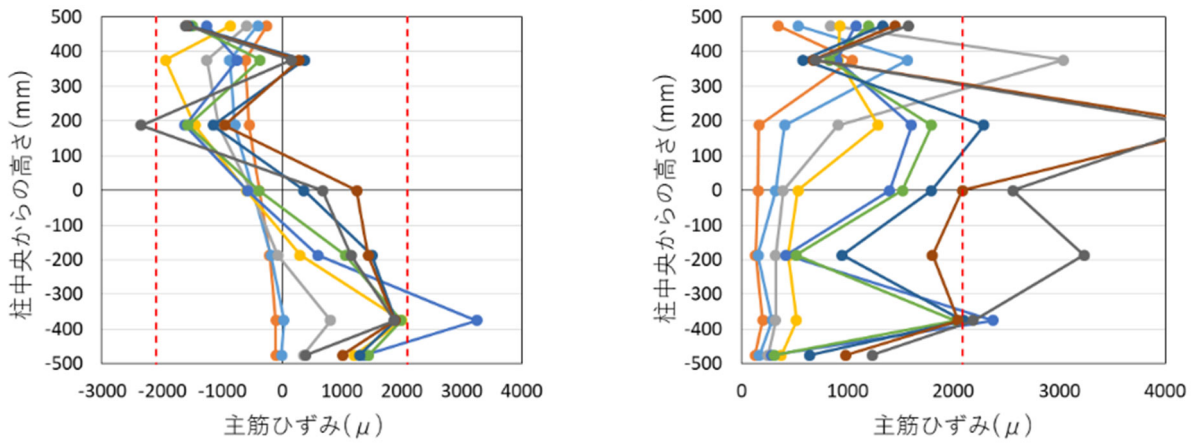
図 6. 3. 4-3(j) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC2, M5-2)



(i) 正載荷

(ii) 負載荷

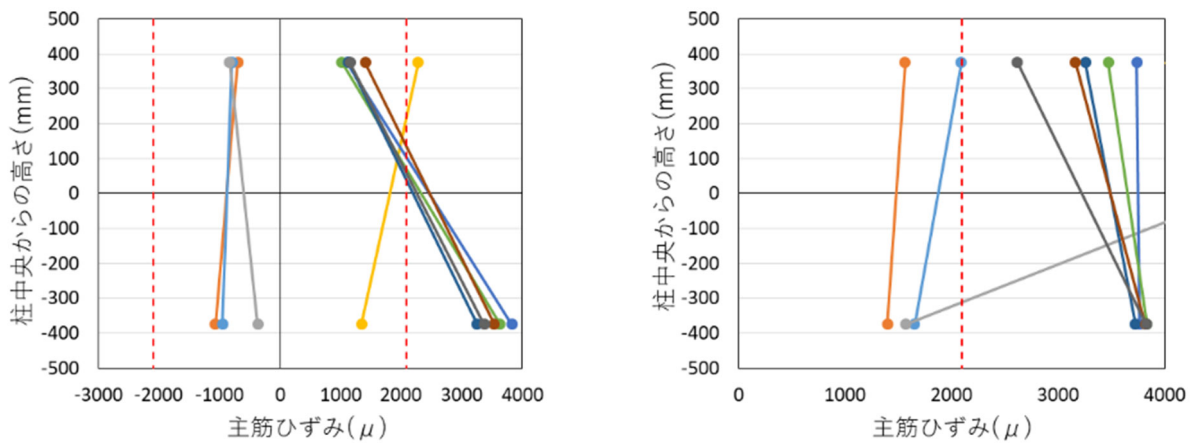
図 6. 3. 4-4(a) 主筋のひずみ分布 (C2-UFC3, M1-1)



(i) 正載荷

(ii) 負載荷

図 6. 3. 4-4(b) 主筋のひずみ分布 (C2-UFC3, M1-2)



(i) 正載荷

(ii) 負載荷

図 6. 3. 4-4(c) 主筋のひずみ分布 (C2-UFC3, M2-1)

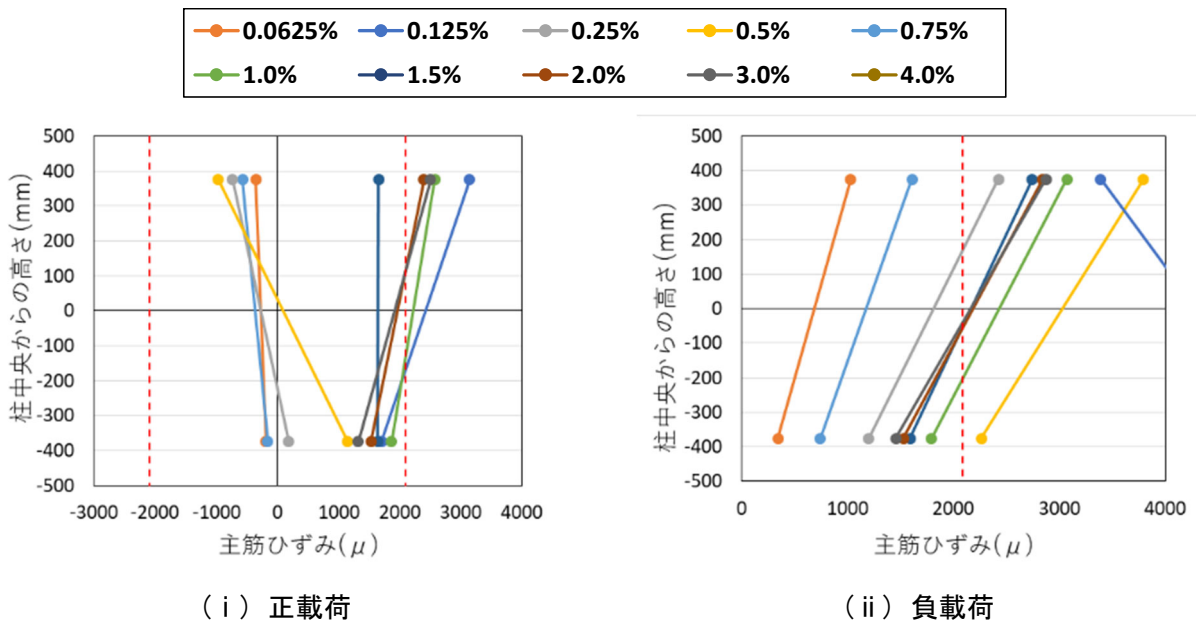


図 6.3.4-4(d) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC3, M2-2)

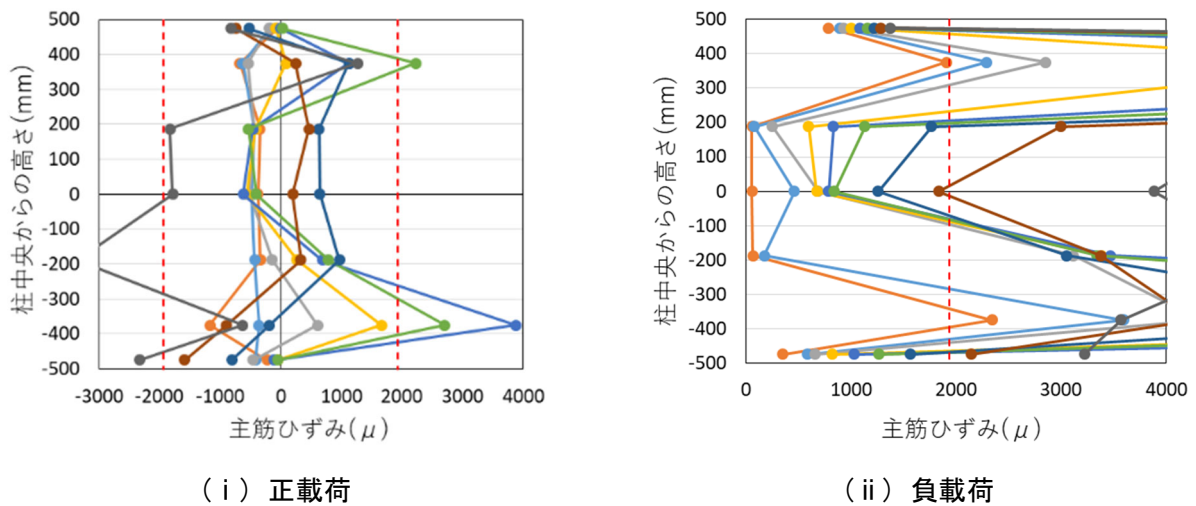


図 6.3.4-4(e) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC3, M3-1)

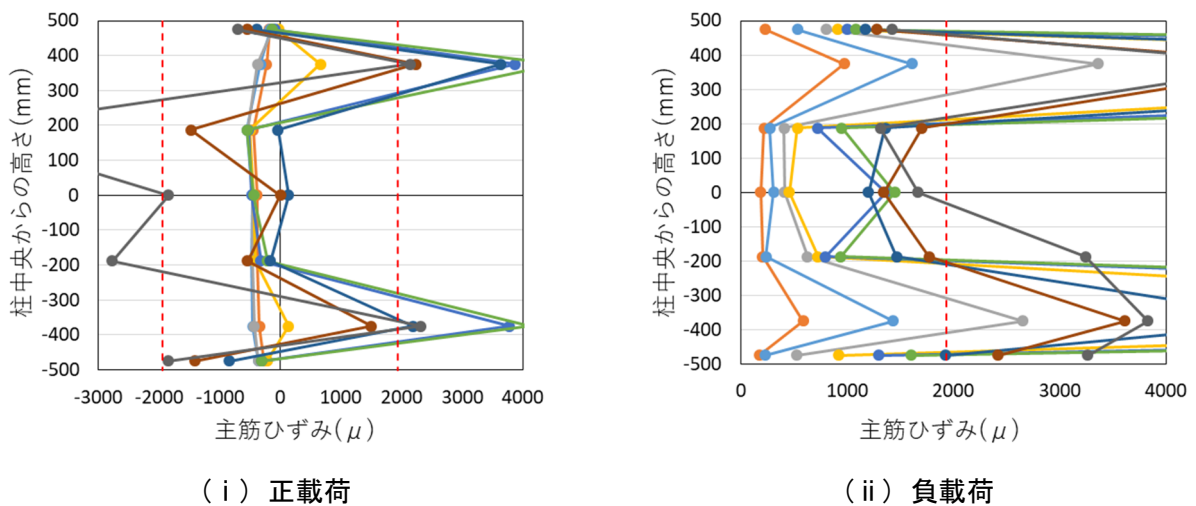


図 6.3.4-4(f) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC3, M3-2)

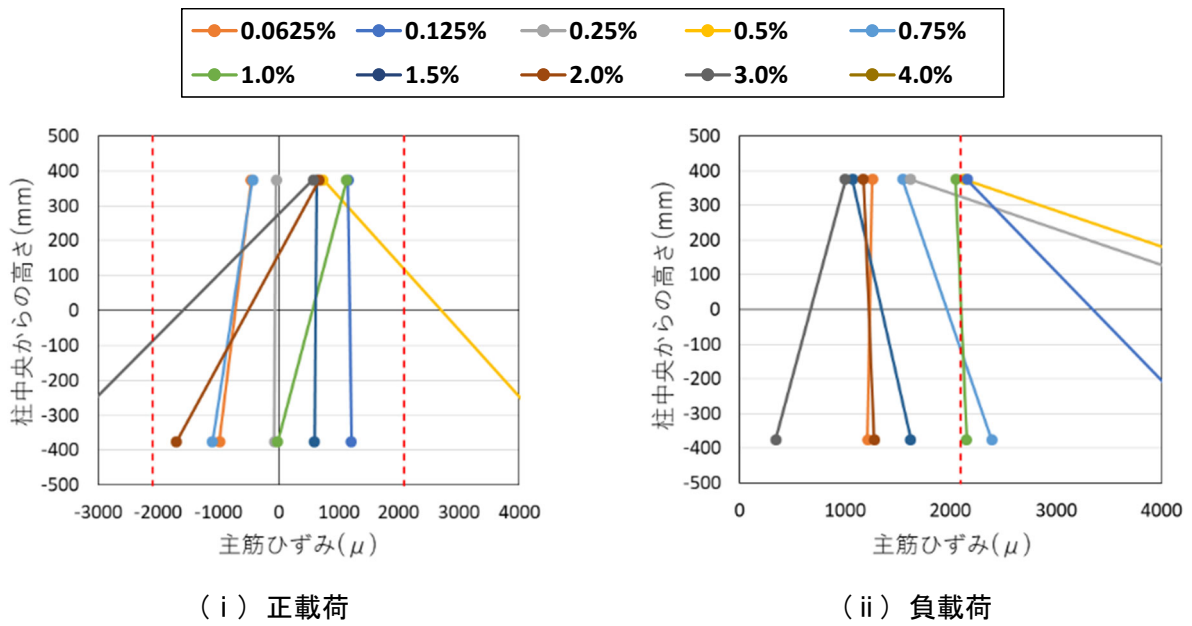


図 6.3.4-4(g) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC3, M4-1)

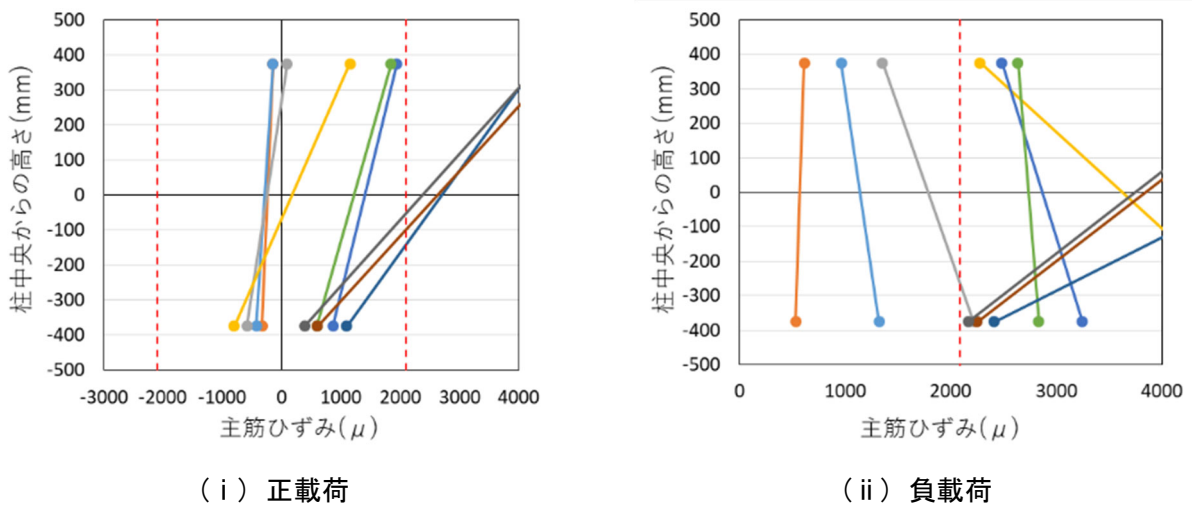


図 6.3.4-4(h) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC3, M4-2)

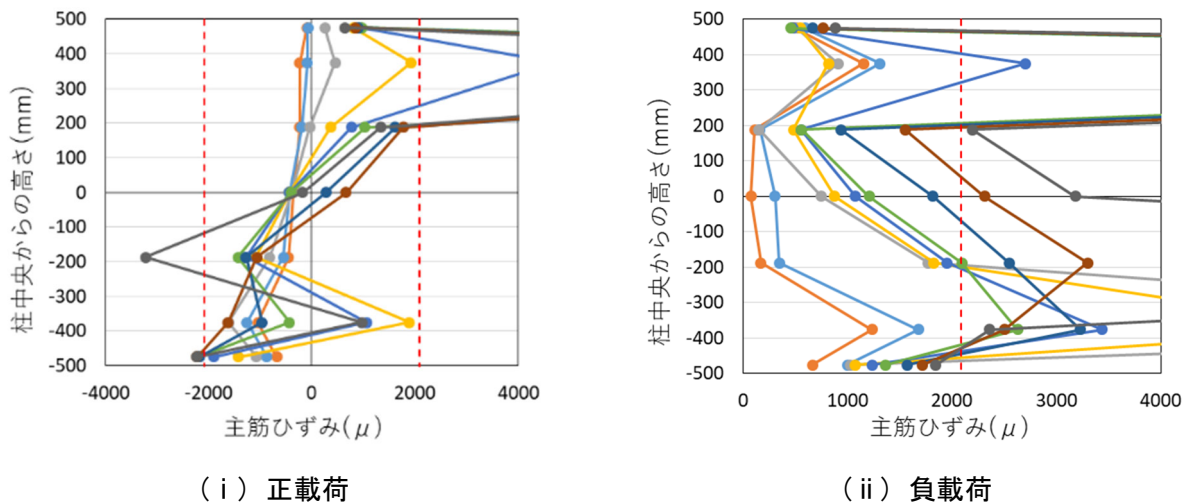


図 6.3.4-4(i) 主筋のひずみ分布 (G2-UFC3, M5-1)

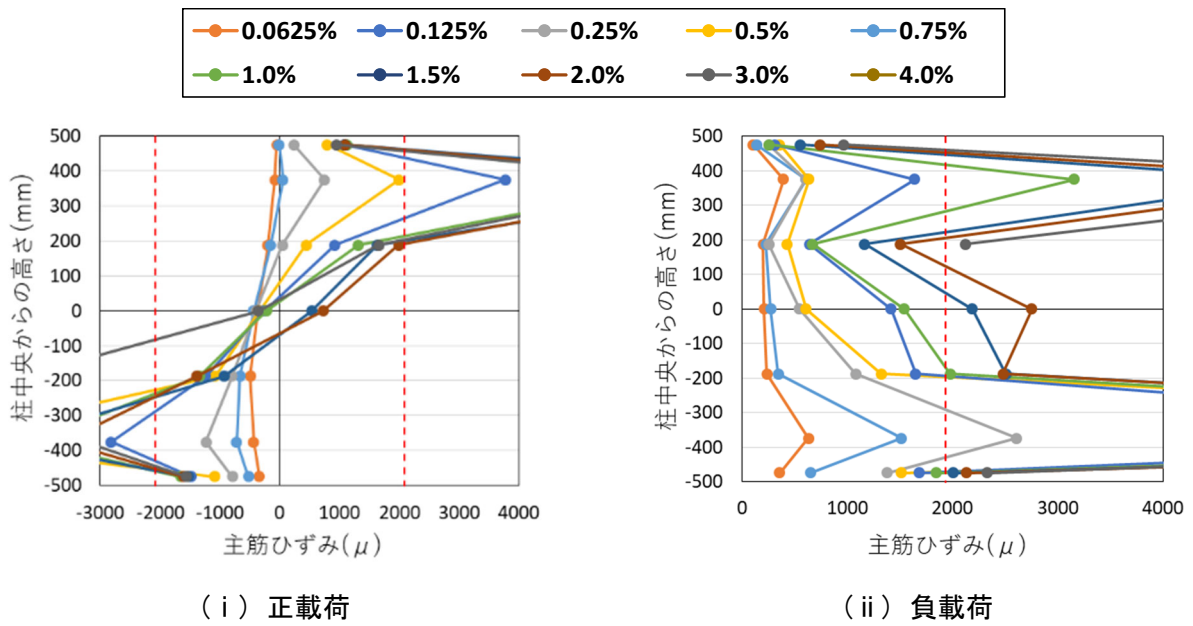


図 6.3.4-4(j) 主筋のひずみ分布 (C2-UFC3, M5-2)

● 正載荷時 主筋引張降伏 ● 正載荷時 主筋圧縮降伏 ● 負載荷時 主筋引張降伏 ● 帯筋降伏

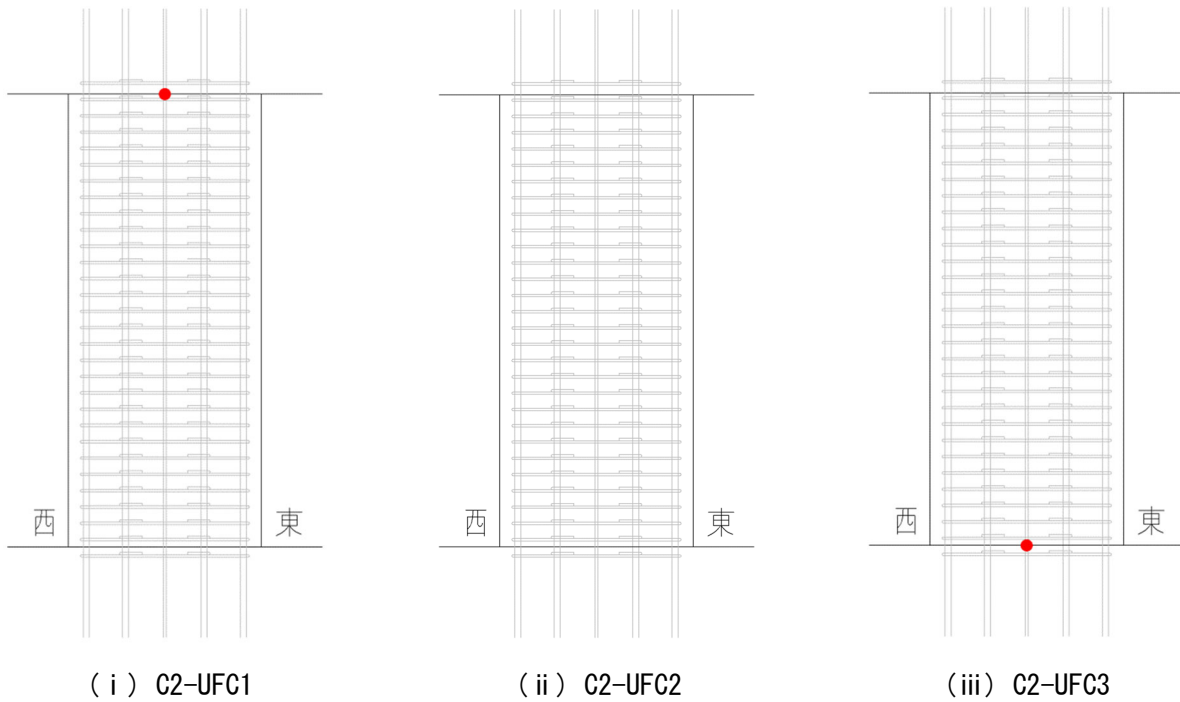


図 6.3.4-5(a) 鉄筋の降伏状況 (R=0.0625%)

● 正載荷時 主筋引張降伏 ● 正載荷時 主筋圧縮降伏 ● 負載荷時 主筋引張降伏 ● 帯筋降伏

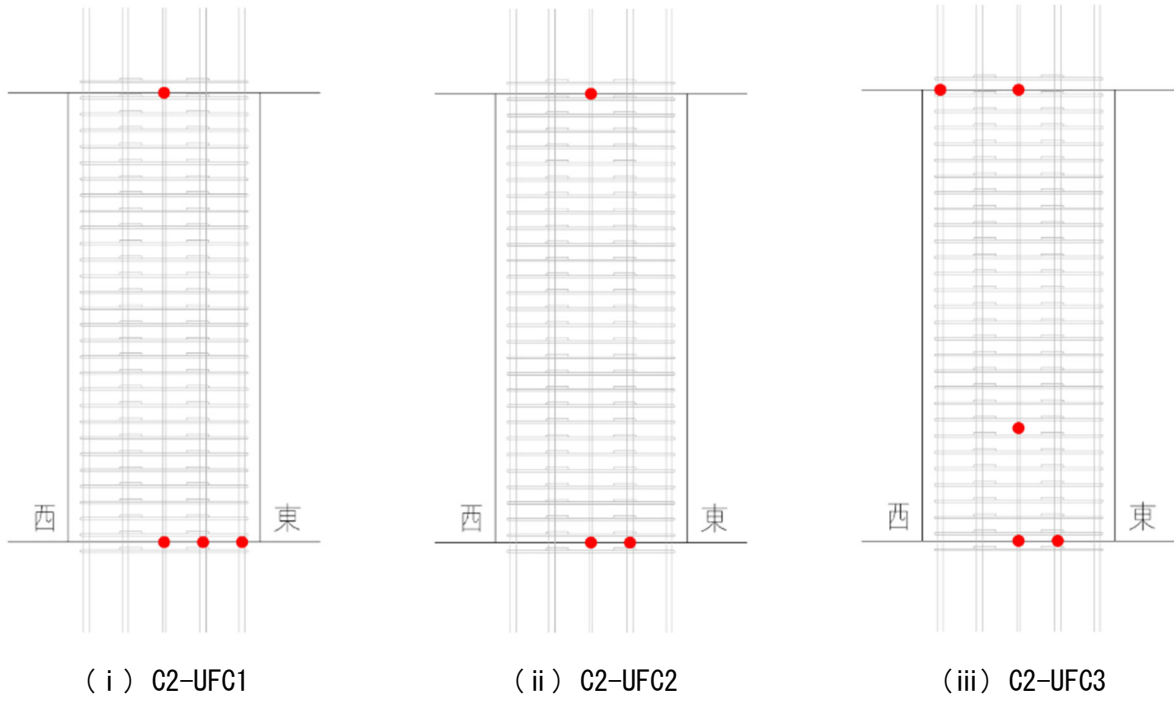


図 6.3.4-5(b) 鉄筋の降伏状況 (R=0.125%)

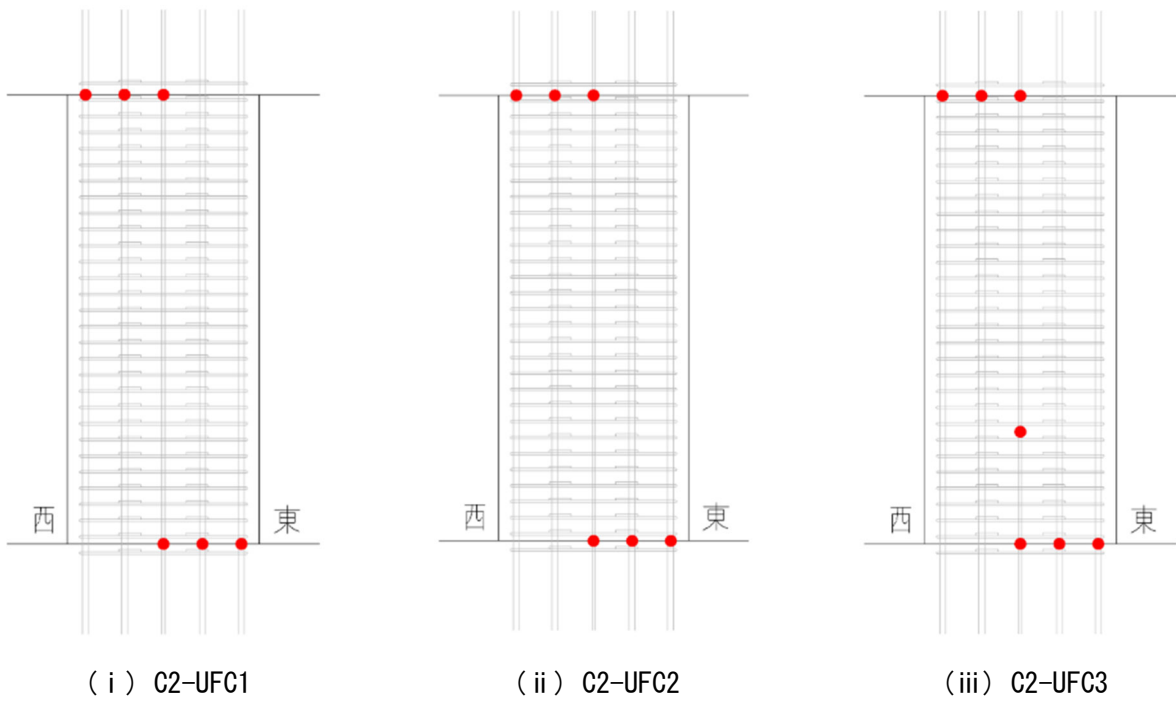


図 6.3.4-5(c) 鉄筋の降伏状況 (R=0.25%)

● 正載荷時 主筋引張降伏 ● 正載荷時 主筋圧縮降伏 ● 負載荷時 主筋引張降伏 ● 帯筋降伏

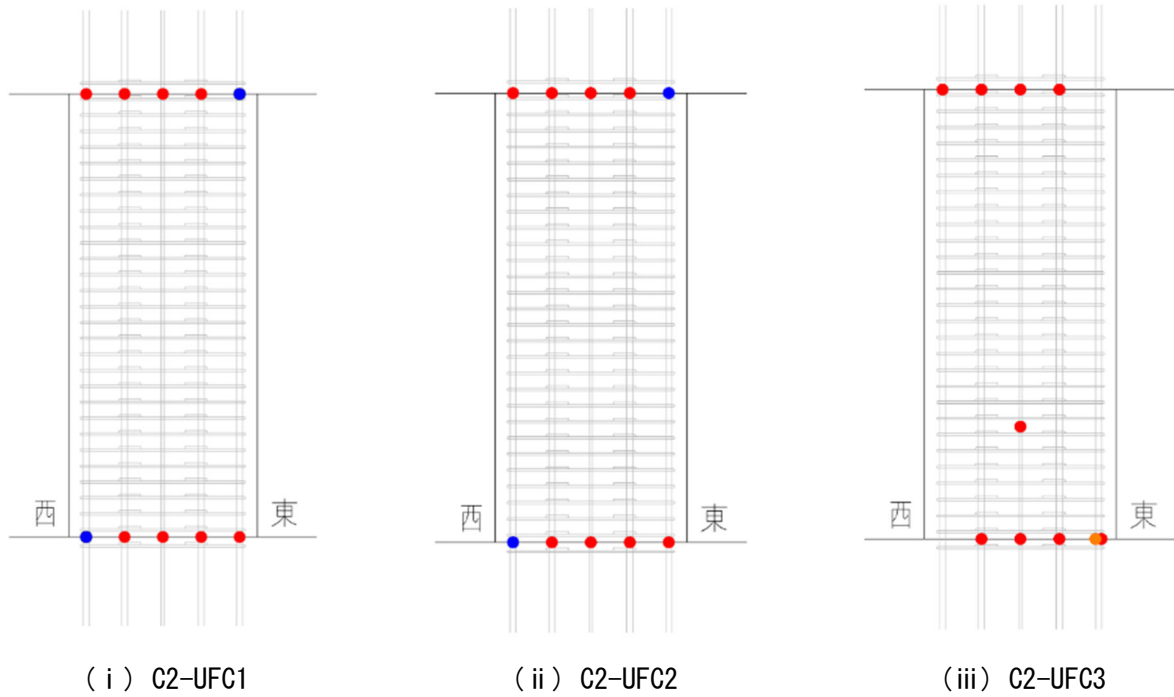


図 6.3.4-5(d) 鉄筋の降伏状況 (R=0.5%)

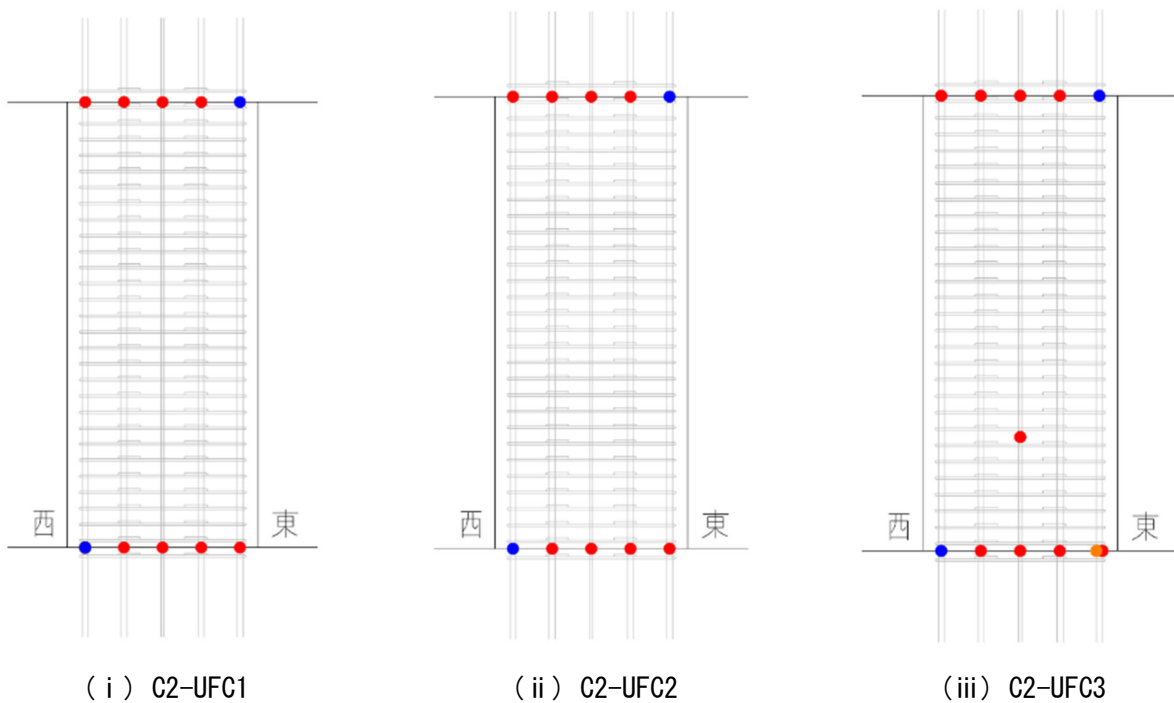


図 6.3.4-5(e) 鉄筋の降伏状況 (R=0.75%)

● 正載荷時 主筋引張降伏 ● 正載荷時 主筋圧縮降伏 ● 負載荷時 主筋引張降伏 ● 帯筋降伏

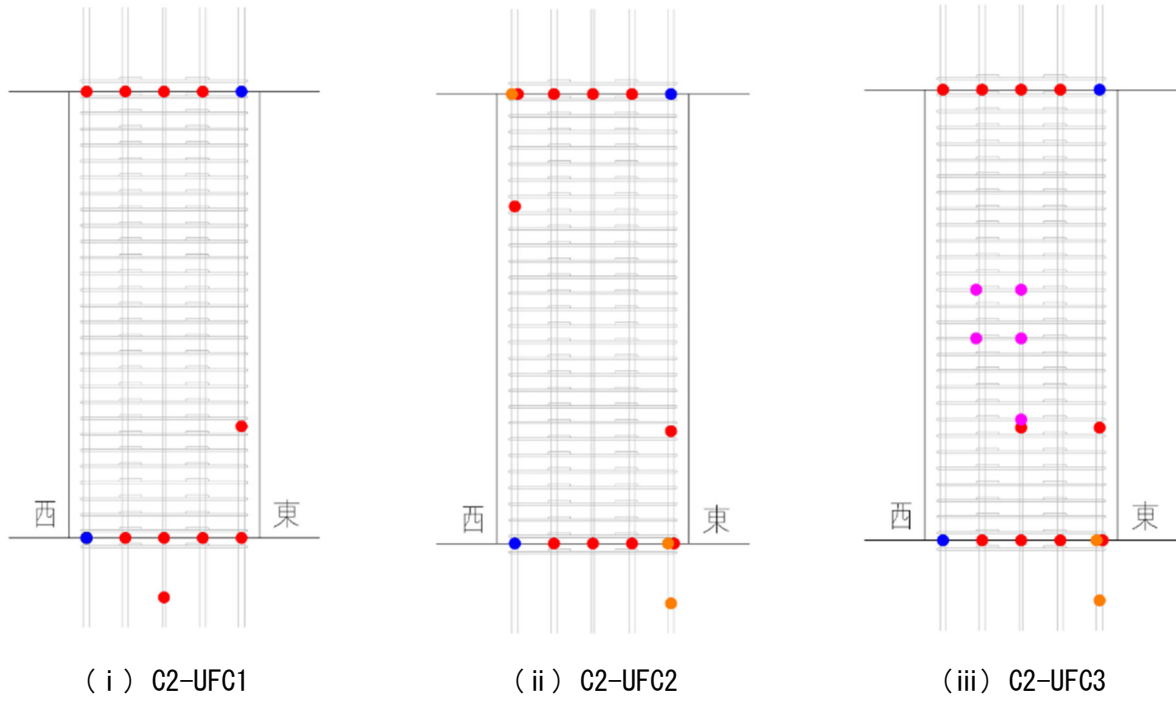


図 6.3.4-5 (f) 鉄筋の降伏状況 (R=1.0%)

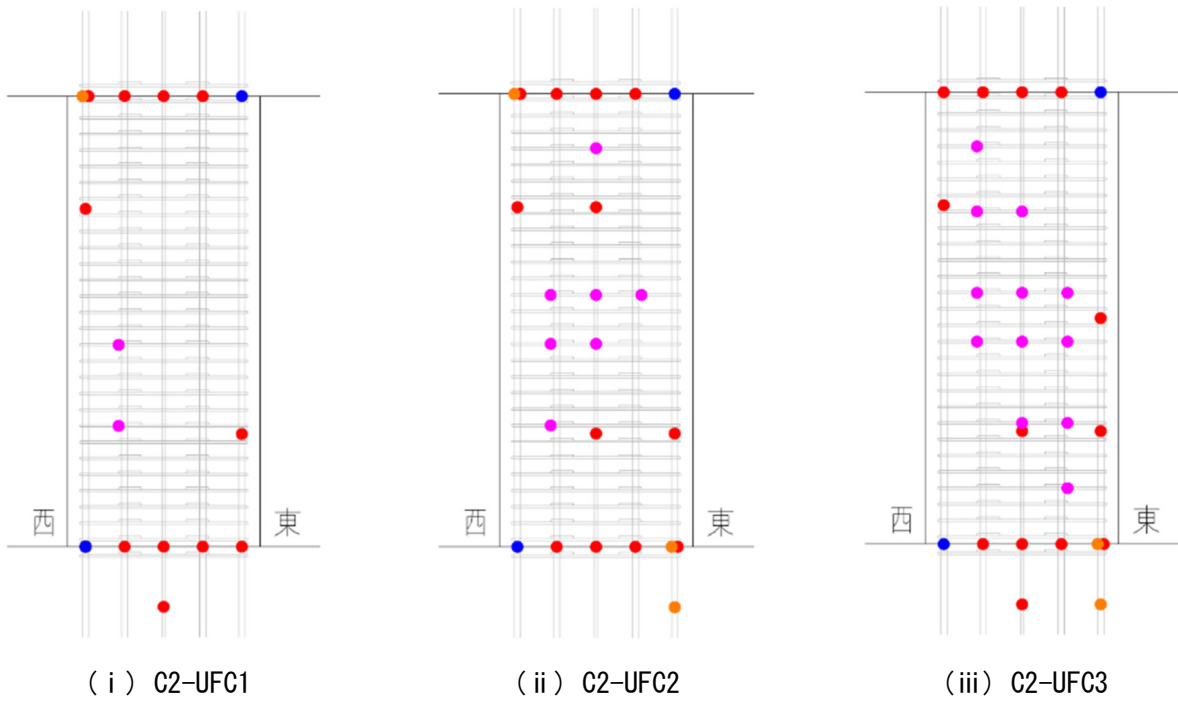


図 6.3.4-5 (g) 鉄筋の降伏状況 (R=1.5%)

● 正載荷時 主筋引張降伏 ● 正載荷時 主筋圧縮降伏 ● 負載荷時 主筋引張降伏 ● 帯筋降伏

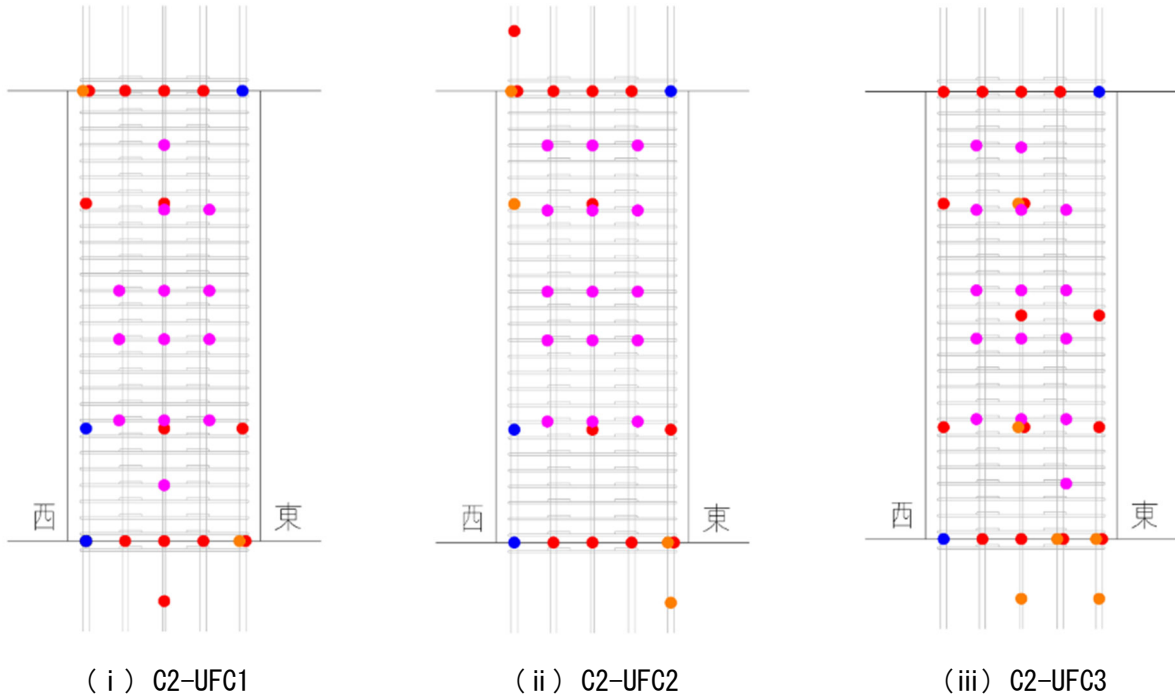


図 6.3.4-5(h) 鉄筋の降伏状況 (R=2.0%)

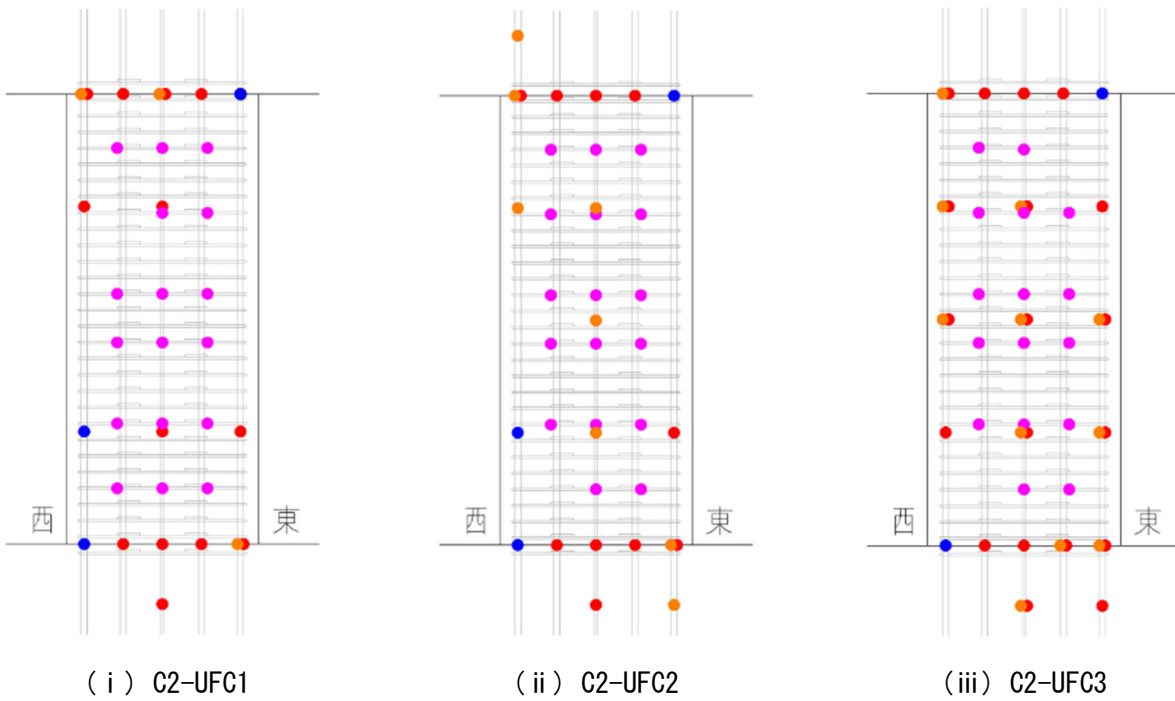


図 6.3.4-5(i) 鉄筋の降伏状況 (R=3.0%)

6.3.5 主応力分布

各試験体の UFC パネルについて、各変形角サイクル正側 1 回目ピーク時の最大主応力、最小主応力、および鉛直応力の分布を図 6.3.5-1 に示す。最大主応力 σ_{max} 、最小主応力 σ_{min} 、および主応力方向までの角度 ϕ_p は、UFC パネルに貼り付けたひずみゲージの値から(式 6.3.5-1)～(式 6.3.5-5)を用いて算出した。ただし、最大主応力が文献[6-3]に示される(式 6.3.5-6)により算出した UFC パネルの引張強度を超える場合は、引張強度を最大主応力とした。また、パネル側面、および C2-UFC3 の四隅のパネルに貼り付けた鉛直方向のひずみゲージの値に UFC パネルのヤング係数を乗じることで鉛直方向応力を算出した。図中、赤線が最小主応力を、青線が最大主応力を示している。

C2-UFC1 はパネル中央部の厚みが 25mm の箇所において、対角線に沿った圧縮ストラットが形成されていた。C2-UFC2 に関しても C2-UFC1 と同様に、パネル中央部の厚みが 25mm の箇所において対角線に沿った圧縮ストラットが形成されていたが、その主応力の大きさは、同一変形角サイクルの C2-UFC1 に生じた主応力の大きさよりも小さかった。一方 C2-UFC3 は、局所的に大きな圧縮応力が生じており、 $R=1.0\%$ サイクル付近からパネル個々の主応力の連続性が失われていた。

またパネル側面の鉛直応力に関して、C2-UFC1、C2-UFC2 共に正載荷において圧縮側になる上下端部において変形角が大きくなるにつれ、徐々に圧縮応力が大きくなっているのに対し、C2-UFC3 は $R=0.5\%$ サイクル付近から、下端部の圧縮側の圧縮応力の増加は見られなかった。これらのことから、C2-UFC1、および C2-UFC2 は概ね同様の挙動を示したのに対し、C2-UFC3 はパネル個々が分離し、パネルの一体性が失われたことによって、パネルが負担する応力が小さくなったと考えられる。

$$\sigma_{max} = \frac{E_{ufc}}{1-\nu^2}(\varepsilon_{max} + \nu\varepsilon_{min}) \quad (\text{式 6.3.5-1})$$

$$\sigma_{min} = \frac{E_{ufc}}{1-\nu^2}(\varepsilon_{min} + \nu\varepsilon_{max}) \quad (\text{式 6.3.5-2})$$

$$\phi_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{2\varepsilon_d - (\varepsilon_h + \varepsilon_v)}{\varepsilon_h - \varepsilon_v} \right\} \quad (\text{式 6.3.5-3})$$

$$\varepsilon_{max} = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_h + \varepsilon_v + \sqrt{2\{(\varepsilon_h - \varepsilon_d)^2 + (\varepsilon_v - \varepsilon_d)^2\}} \right] \quad (\text{式 6.3.5-4})$$

$$\varepsilon_{min} = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_h + \varepsilon_v - \sqrt{2\{(\varepsilon_h - \varepsilon_d)^2 + (\varepsilon_v - \varepsilon_d)^2\}} \right] \quad (\text{式 6.3.5-5})$$

$$\sigma_T = \frac{\sigma_b}{2.59} - 1.54 \quad (\text{式 6.3.5-6})$$

ここで、 ε_{max} : 最大主ひずみ

ε_{min} : 最小主ひずみ

ε_h : パネル水平方向のひずみ

ε_v : パネル鉛直方向のひずみ

ε_d : パネル水平方向から反時計回りに 45°回転した方向のひずみ

E_{ufc} : UFC のヤング係数 (N/mm²)

ν : UFC のポアソン比 (文献[6-3]より 0.2 とする)

σ_T : UFC の引張強度 (N/mm²)

σ_b : UFC の曲げ強度 (N/mm²)

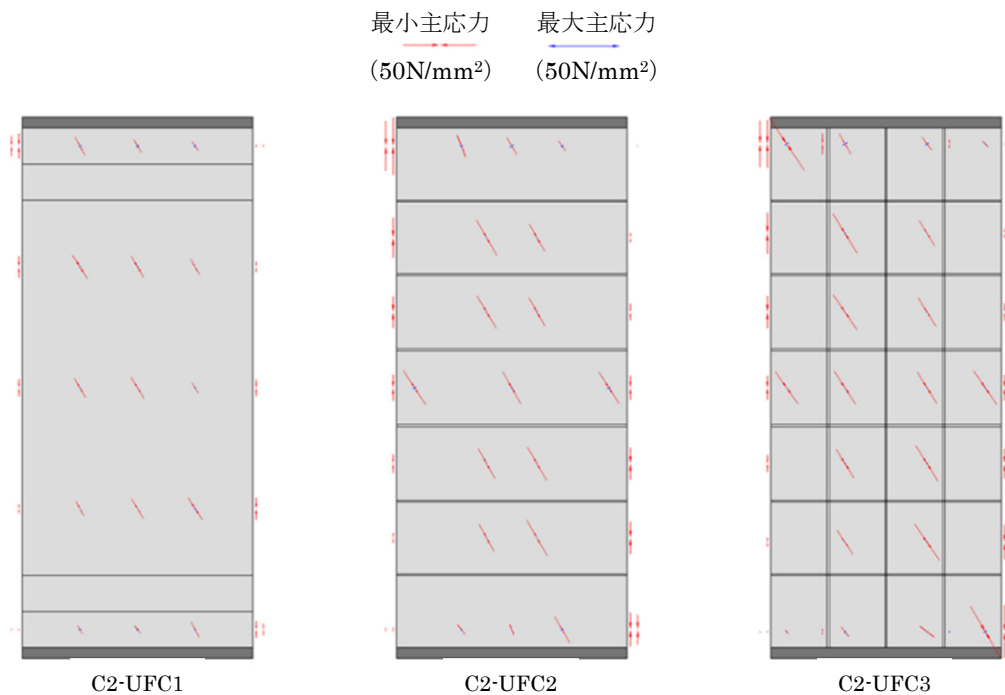


図 6. 3. 5-1 (a) UFC パネルの主応力分布 (R=0. 0625%)

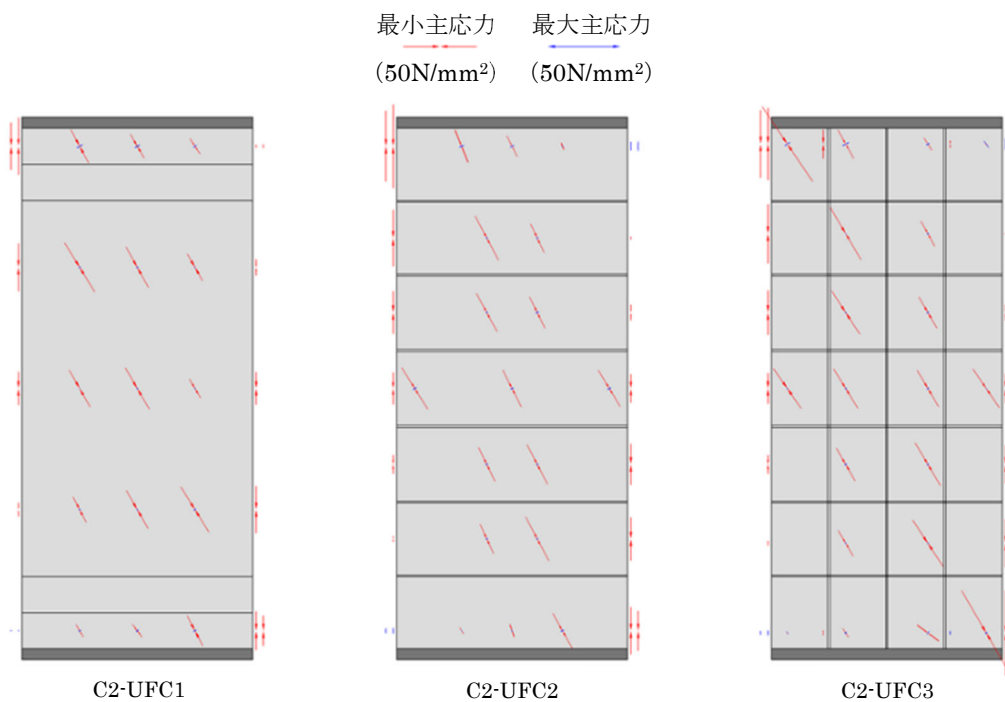


図 6. 3. 5-1 (b) UFC パネルの主応力分布 (R=0. 125%)

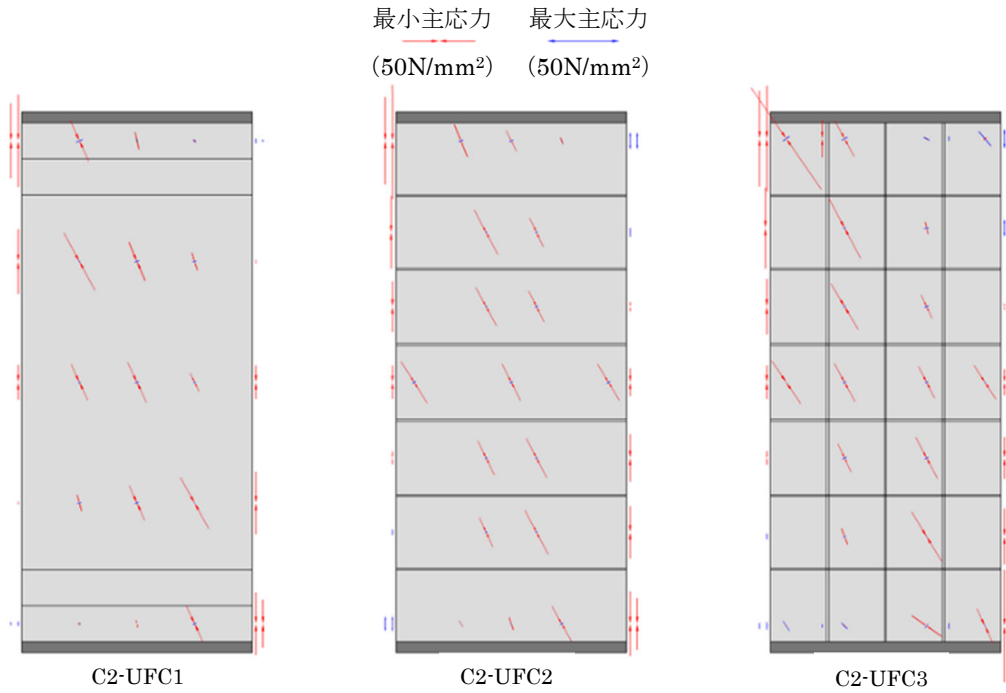


図 6. 3. 5-1 (c) UFC パネルの主応力分布 (R=0. 25%)

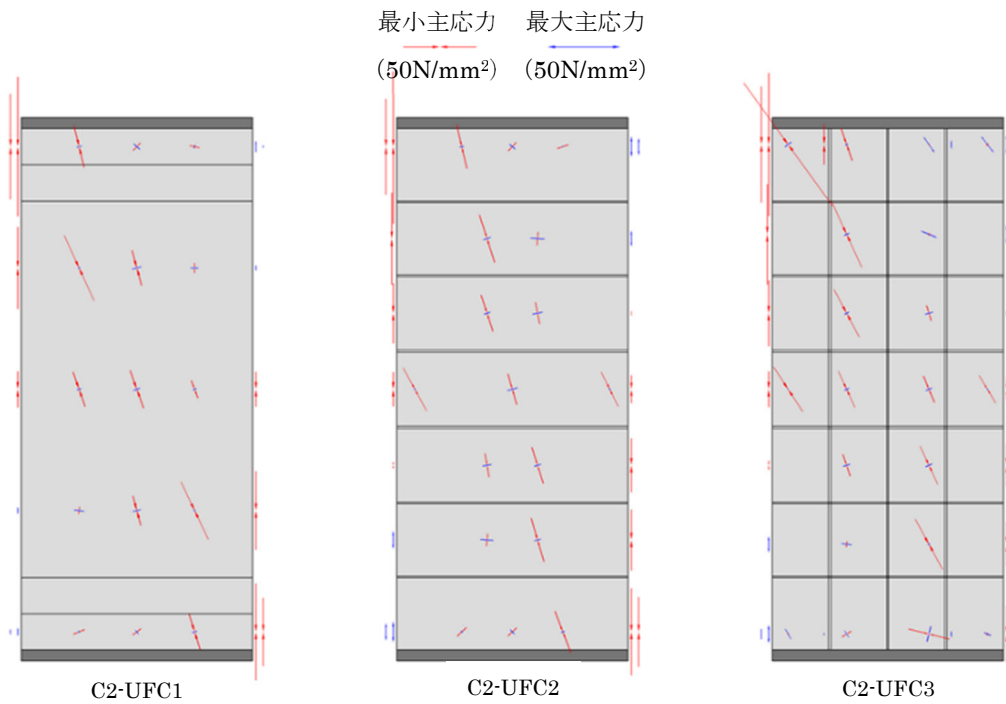


図 6. 3. 5-1 (d) UFC パネルの主応力分布 (R=0. 5%)

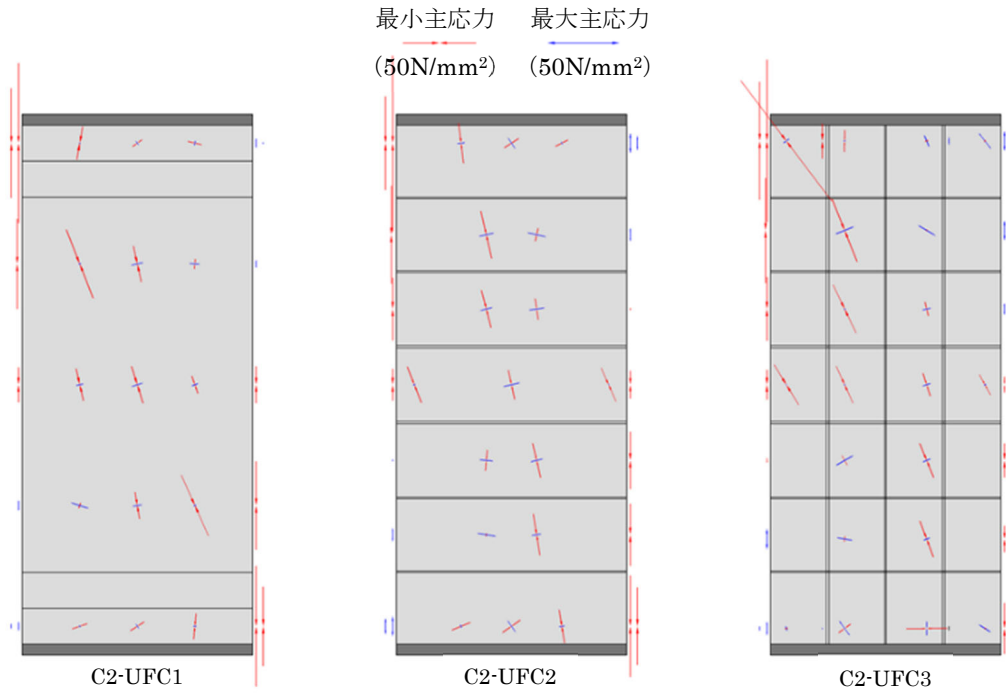


図 6. 3. 5-1 (e) UFC パネルの主応力分布 (R=0. 75%)

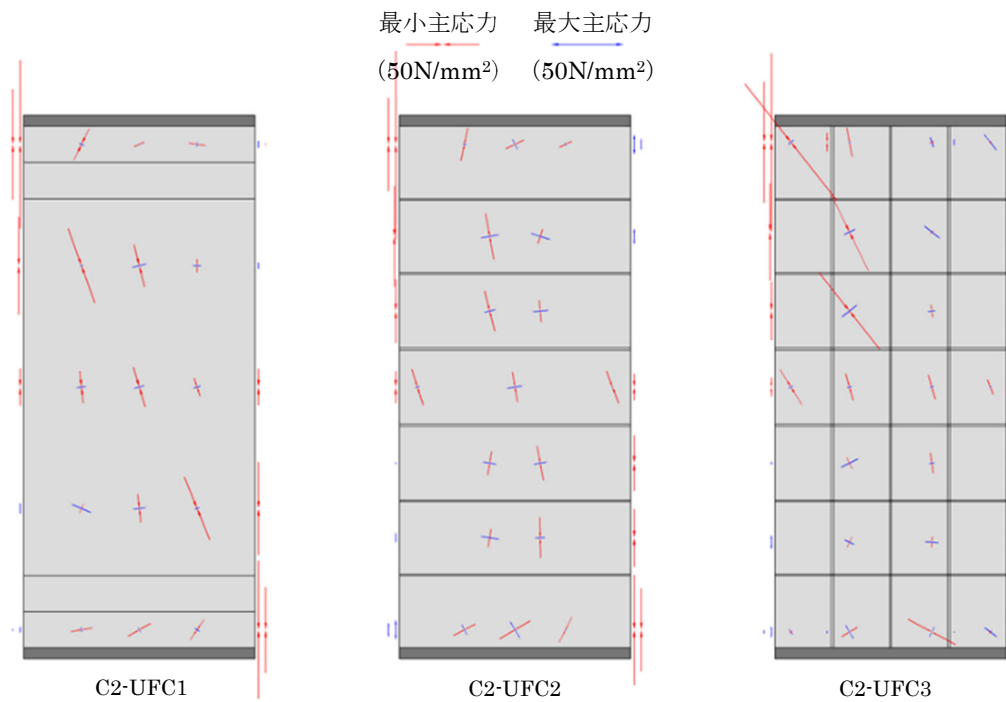


図 6. 3. 5-1 (f) UFC パネルの主応力分布 (R=1. 0%)

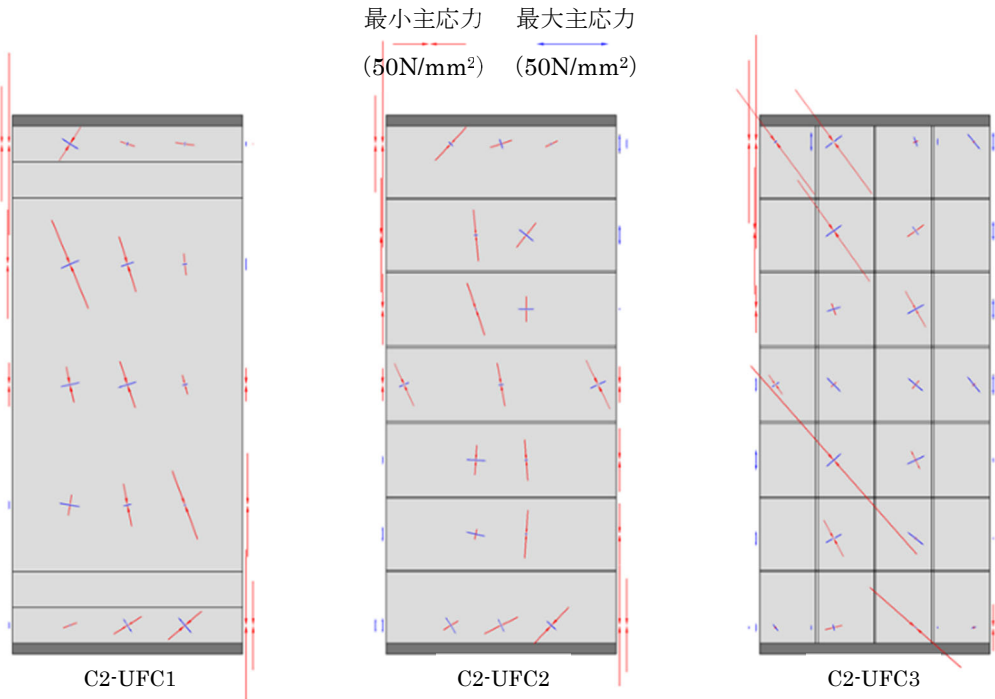


図 6.3.5-1 (g) UFC パネルの主応力分布 (R=1.5%)

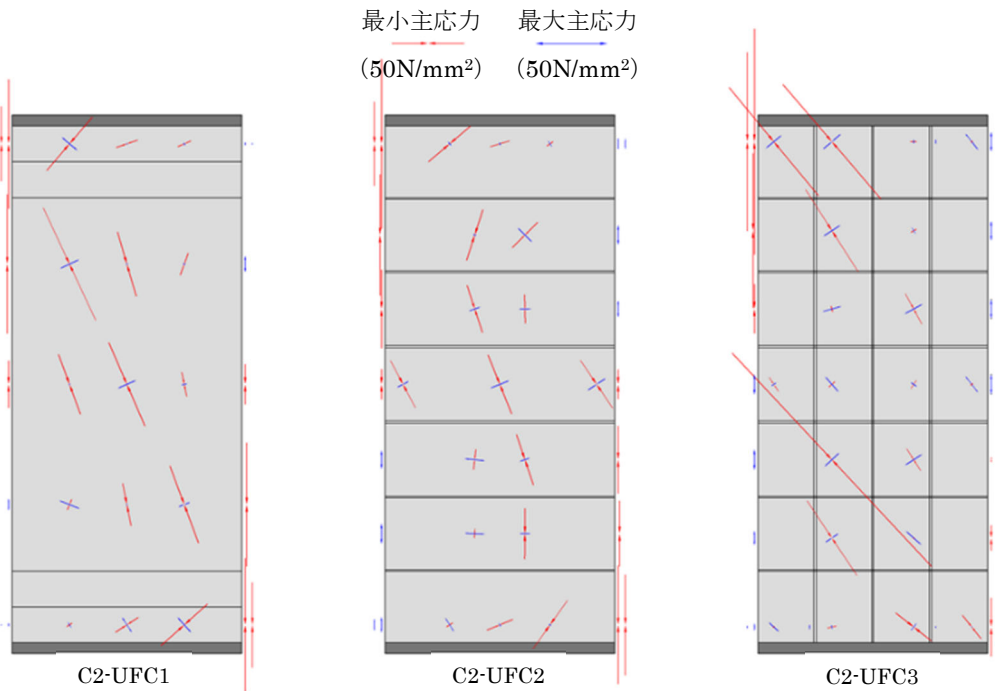


図 6.3.5-1 (h) UFC パネルの主応力分布 (R=2.0%)

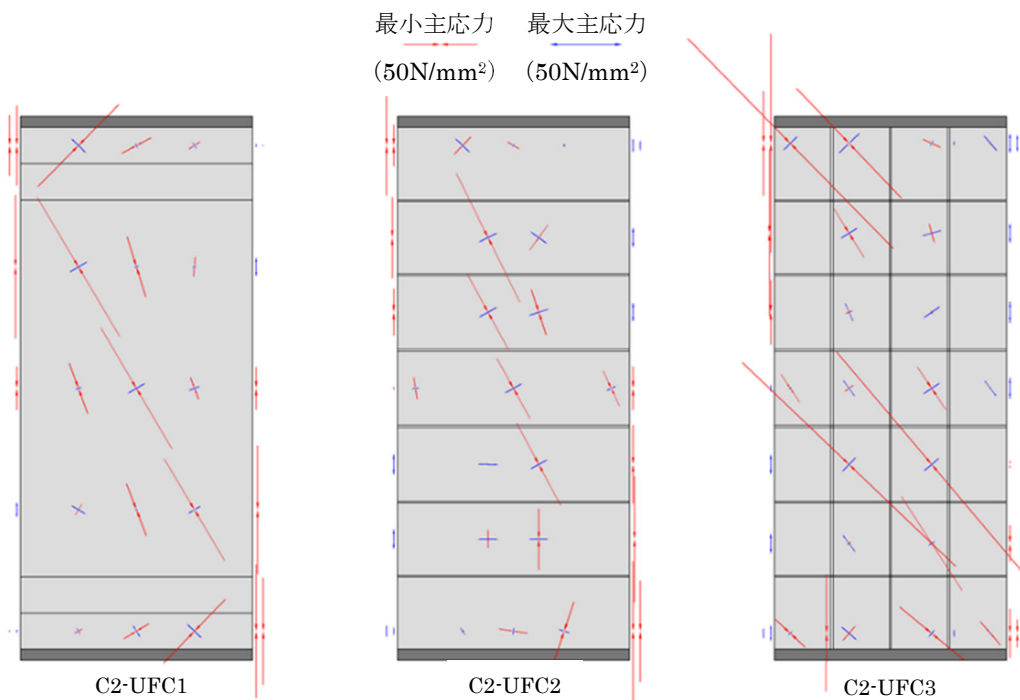


図 6.3.5-1(i) UFC パネルの主応力分布 (R=3.0%)

6.3.6 変形性状

(1) 曲率分布

各試験体の各変形角ピーク時における曲率分布に関して、UFC パネル面（北面）に設置した変位計（ $\delta_{b1} \sim \delta_{b8}$ ）から得られた曲率分布を図 6.3.6-1～図 6.3.6-3 に、柱側面（東西面）に設置した変位計（ $\delta_{be1} \sim \delta_{be4}$, $\delta_{bw1} \sim \delta_{bw4}$ ）から得られた曲率分布を図 6.3.6-4～図 6.3.6-6 にそれぞれ示す。なお、曲率の高さ方向の分布は、変位計を設置した各区間の中心高さにおいて表示している。

各試験体共に、上下端部に曲率が集中していた。また、UFC パネル面に設置した変位計から算出した曲率分布と、柱側面に設置した変位計から算出した曲率分布は、各試験体共に $R=1.0\%$ 程度までは概ね一致したが、 $R=1.5\%$ 以降は C2-UFC3 を除き、柱側面に設置した変位計から算出した曲率の方が小さかった。これは、UFC パネルと既存柱との分離や、パネル相互の開きにより、UFC パネル面に設置した変位計では変形を過大に評価してしまったと考えられる。C2-UFC3 において、UFC パネル面に設置した変位計から算出した曲率分布が $R=1.0\%$ あたりから頭打ちとなっているのは、 $R=1.0\%$ サイクル以降、パネル個々の分離、およびパネルの損傷の影響により、UFC パネルが既存柱の変形に追随できなくなったことによるものだと考えられる。また、各試験体の柱側面に設置した変位計から算出した曲率分布を比較すると、 $R=1.0\%$ 程度までは概ね同様の曲率分布であるが、 $R=1.5\%$ 以降、柱上下端部において C2-UFC1 が最も曲率が大きく、C2-UFC3 が最も曲率が小さかった。

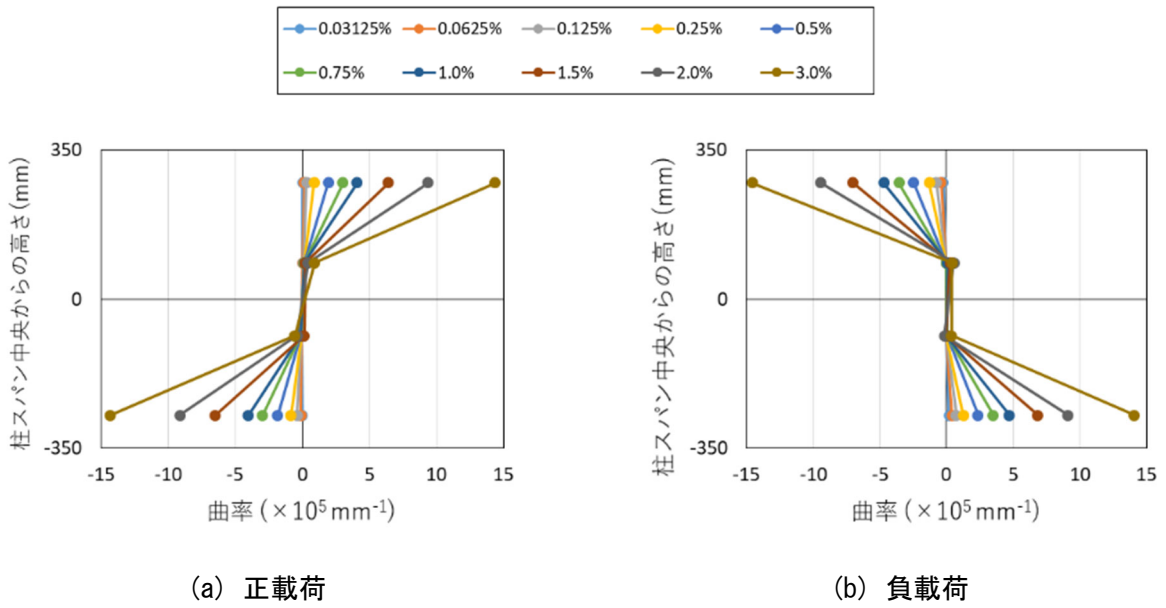


図 6.3.6-1 曲率分布 (C2-UFC1, UFC パネル面)

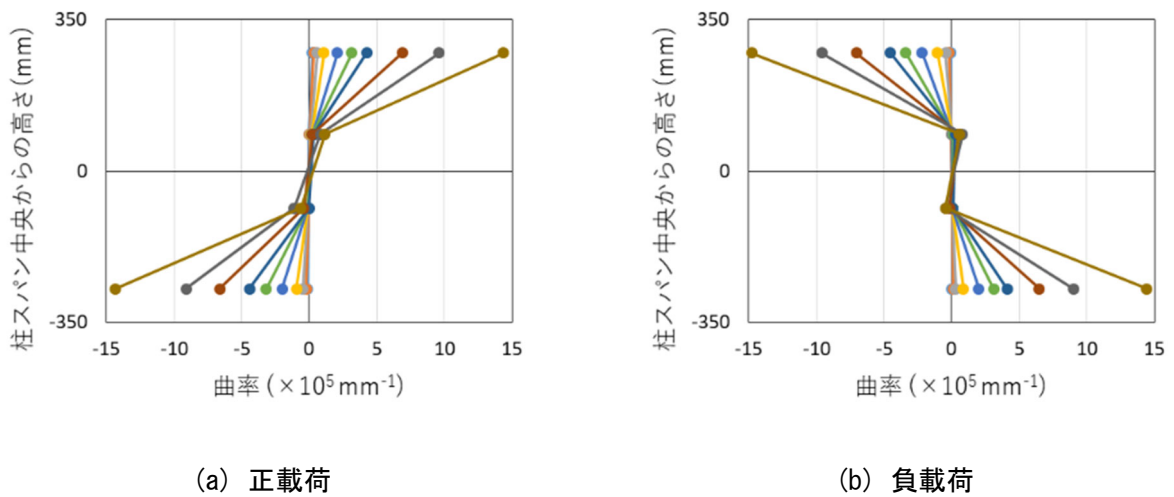


図 6.3.6-2 曲率分布 (C2-UFC2, UFC パネル面)

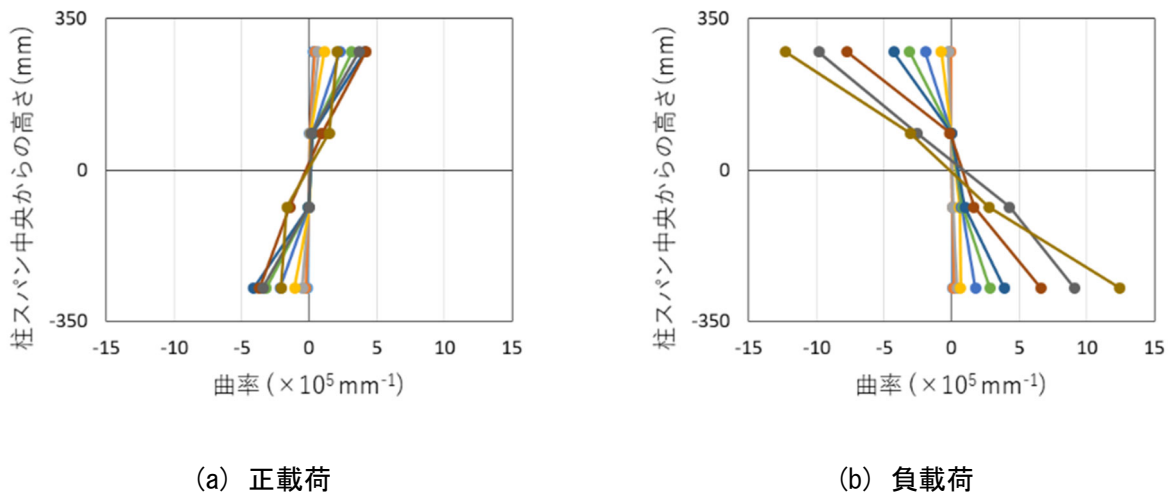


図 6.3.6-3 曲率分布 (C2-UFC3, UFC パネル面)

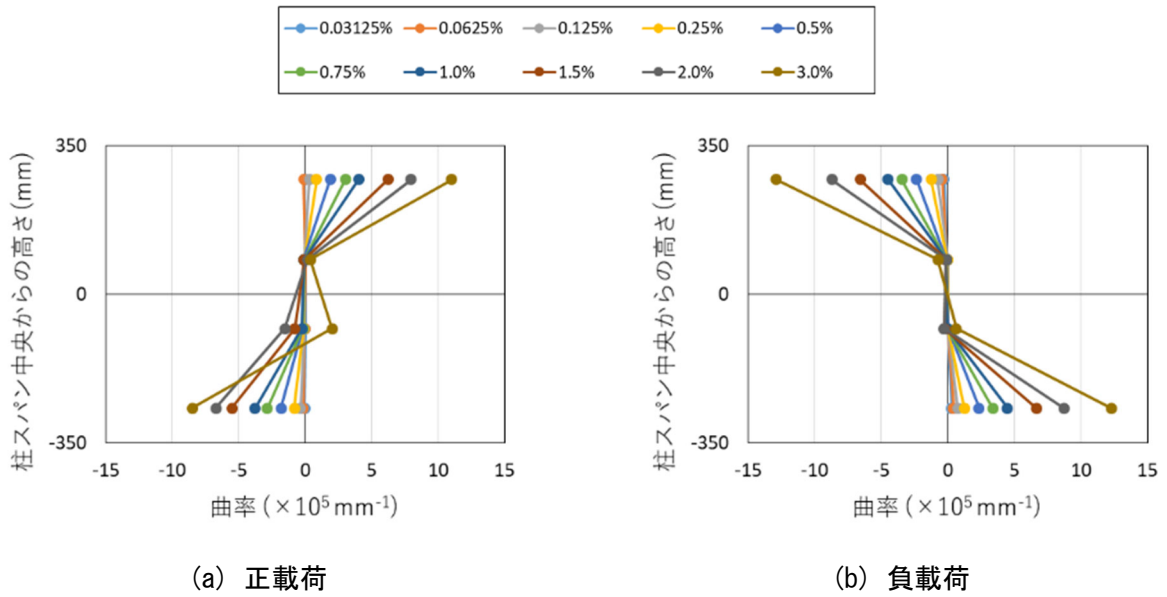


図 6.3.6-4 曲率分布 (C2-UFC1, 柱側面)

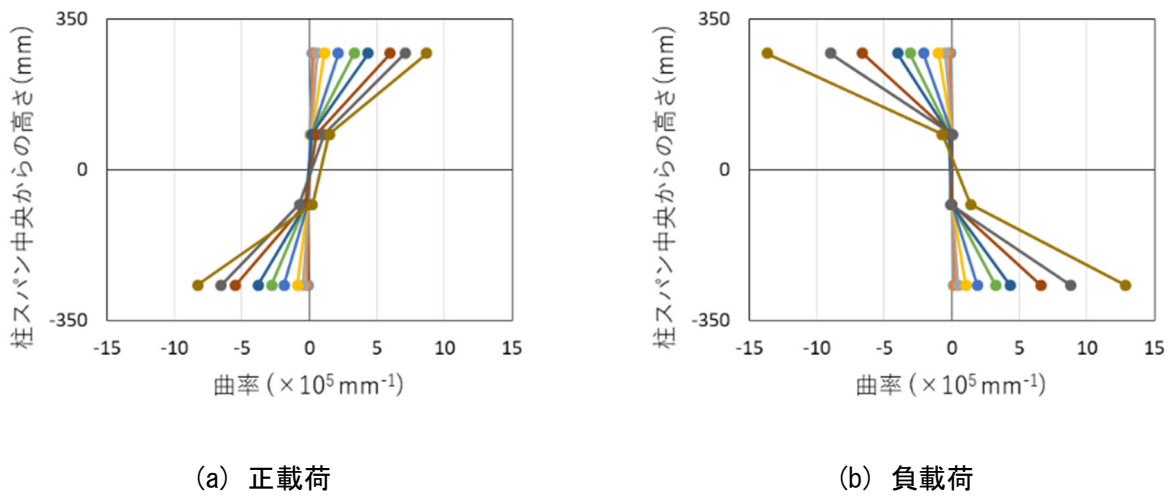


図 6.3.6-5 曲率分布 (C2-UFC2, 柱側面)

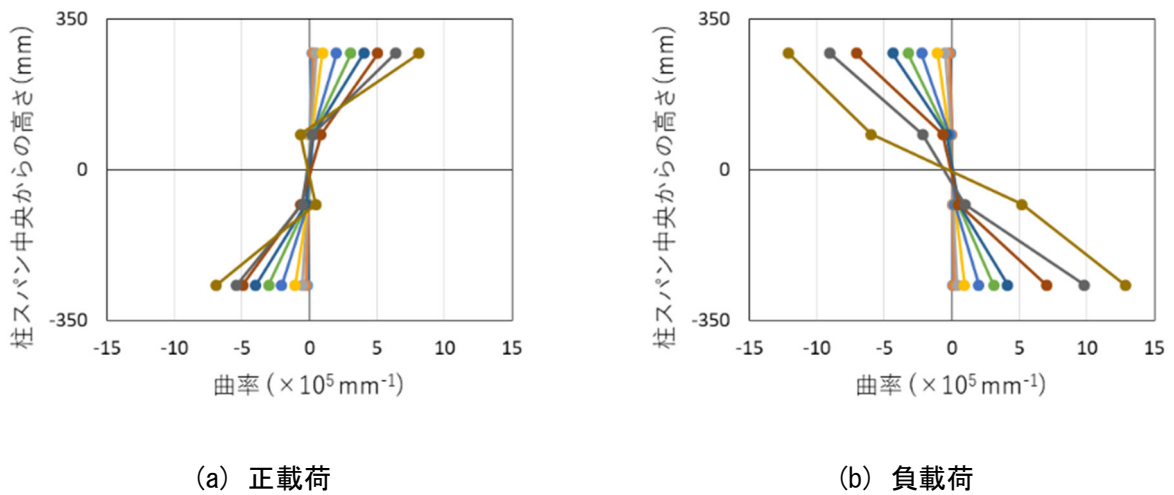


図 6.3.6-6 曲率分布 (C2-UFC3, 柱側面)

(2) せん断変形角分布

各試験体の各変形角ピーク時における、UFC パネル面に設置した変位計 ($\delta_{s1} \sim \delta_{s8}$) を用いて算出したせん断変形角の分布を図 6.3.6-7～図 6.3.6-9 に示す。せん断変形角の高さ方向の分布も曲率分布と同様に、変位計を設置した各区間の中心高さにおいて表示している。

せん断変形角分布も曲率分布と同様に、 $R=1.0\%$ までは各試験体において同様のせん断変形角分布であったが、 $R=1.5\%$ 以降、各試験体で違いが見られ、変位計を UFC パネル面に設置していることから、UFC パネルを分割して貼り付けた C2-UFC2 と C2-UFC3 では、パネル相互の開きの影響により、変形を過大に評価したと考えられる。

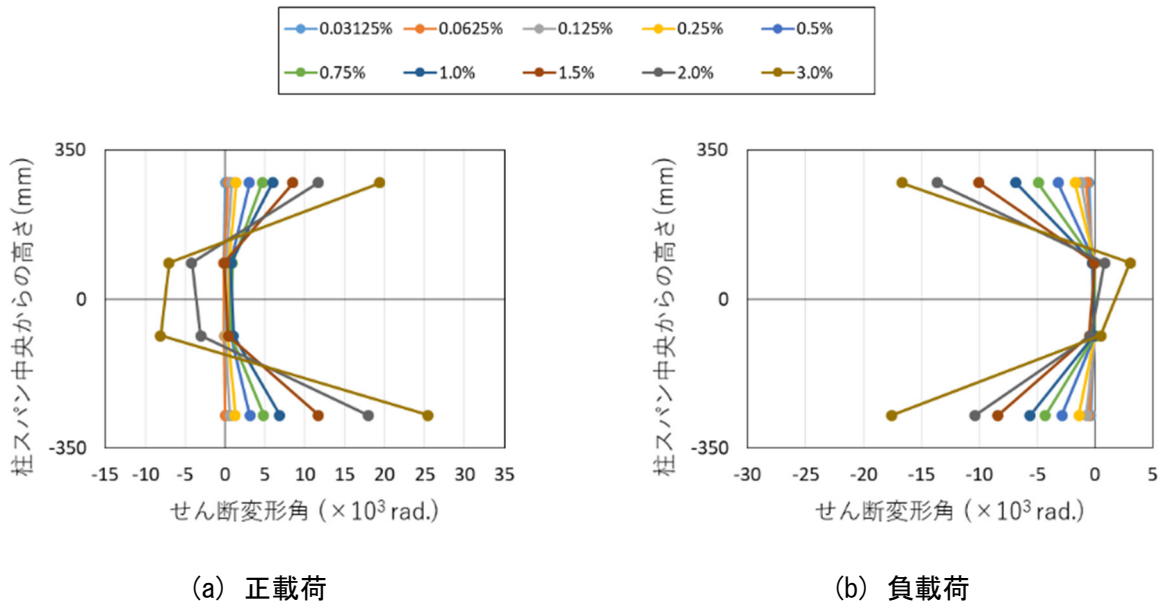


図 6. 3. 6-7 せん断変形角分布 (C2-UFC1)

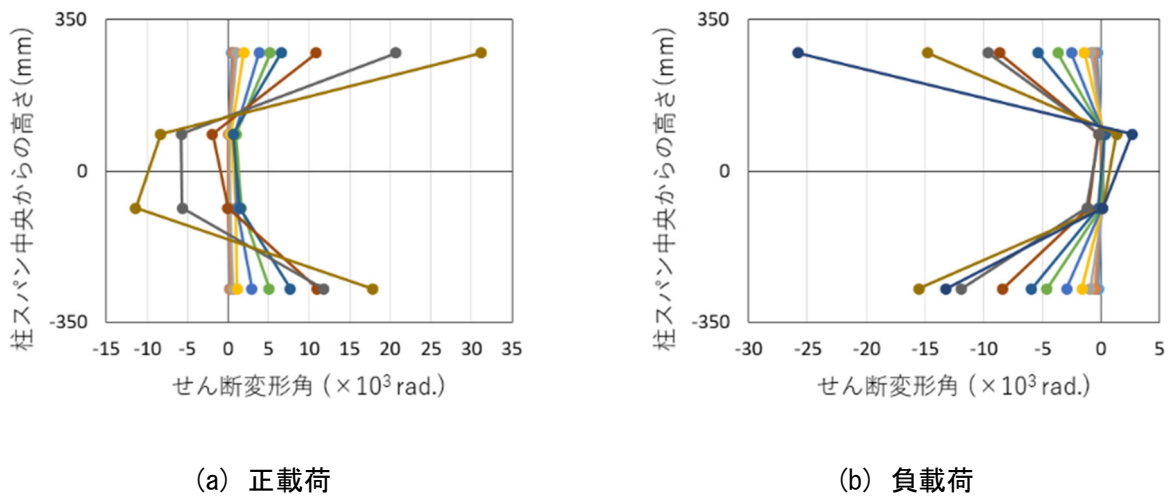


図 6. 3. 6-8 せん断変形角分布 (C2-UFC2)

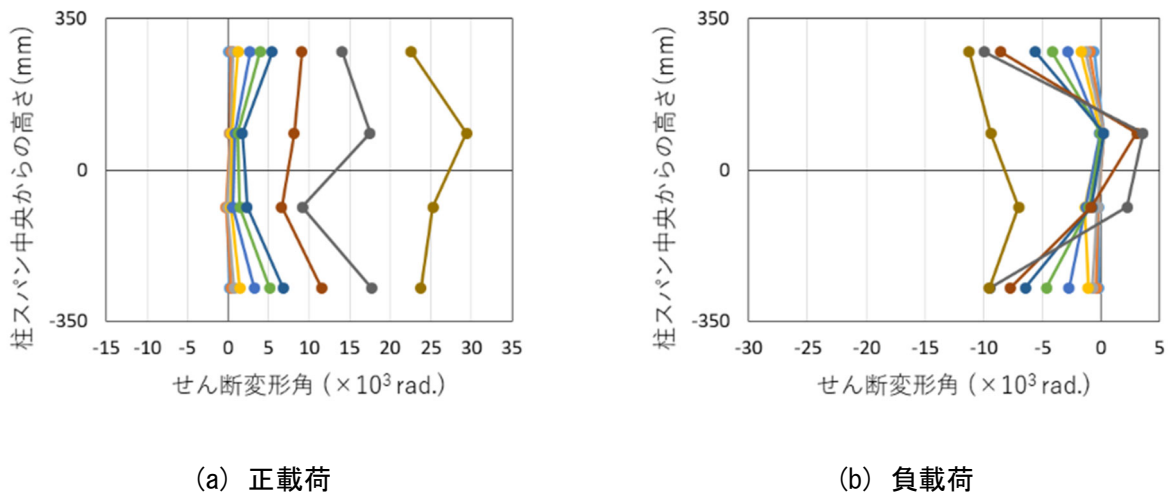


図 6. 3. 6-9 せん断変形角分布 (C2-UFC3)

(3) 柱端部回転角

各試験体の各変形角ピーク時において、柱側面の上下端部に設置した変位計 (δ_{re1} , δ_{re2} , δ_{rw1} , δ_{rw2}) を用いて算出した柱端部回転角の分布を図 6.3.6-10～図 6.3.6-12 に示す。

正載荷側の柱上下端部の回転角に関しては、曲率分布と同様に、 $R=1.0\%$ までは各試験体共に同様の回転角分布を示したが、 $R=1.5\%$ 以降は、C2-UFC1 が最も大きく、C2-UFC3 の回転角は最も小さかった。なお、 $R=3.0\%$ サイクルにおいて、C2-UFC2、および C2-UFC3 の回転角が大きくなっているが、これは、柱側面の正載荷時に圧縮側となる上下端部において、カバーコンクリートに浮きが生じ、変位計に接触していたことが原因と考えられる。また、負載荷側に関しては、回転角の大きさ、および反曲点高さにばらつきがあり、定性的な違いは見られなかった。

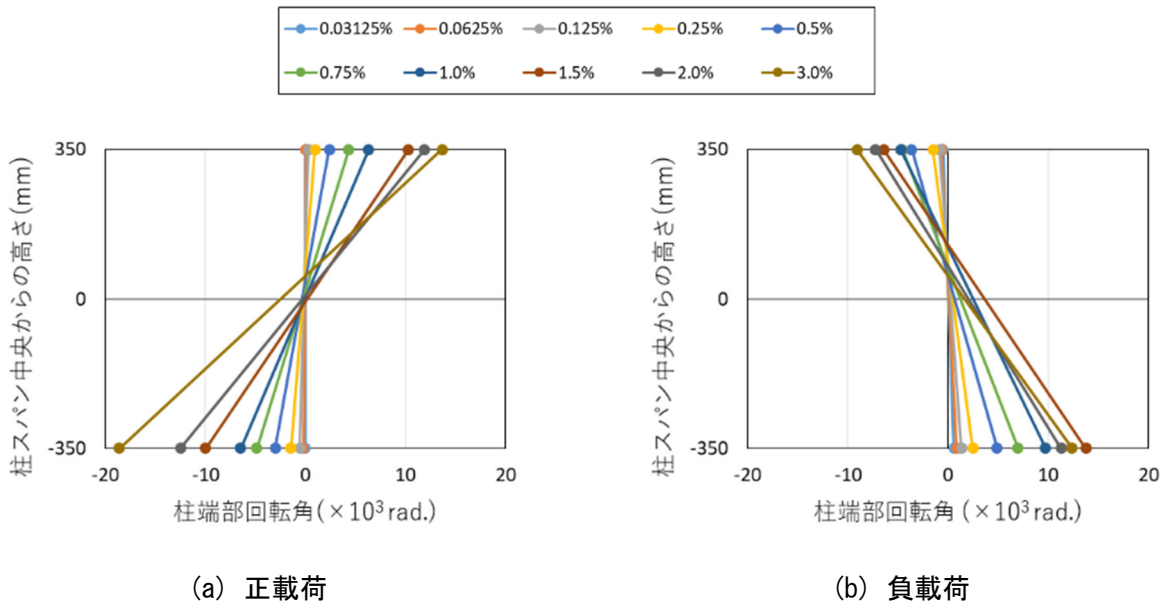


図 6.3.6-10 柱端部回転角分布 (C2-UFC1, 柱側面)

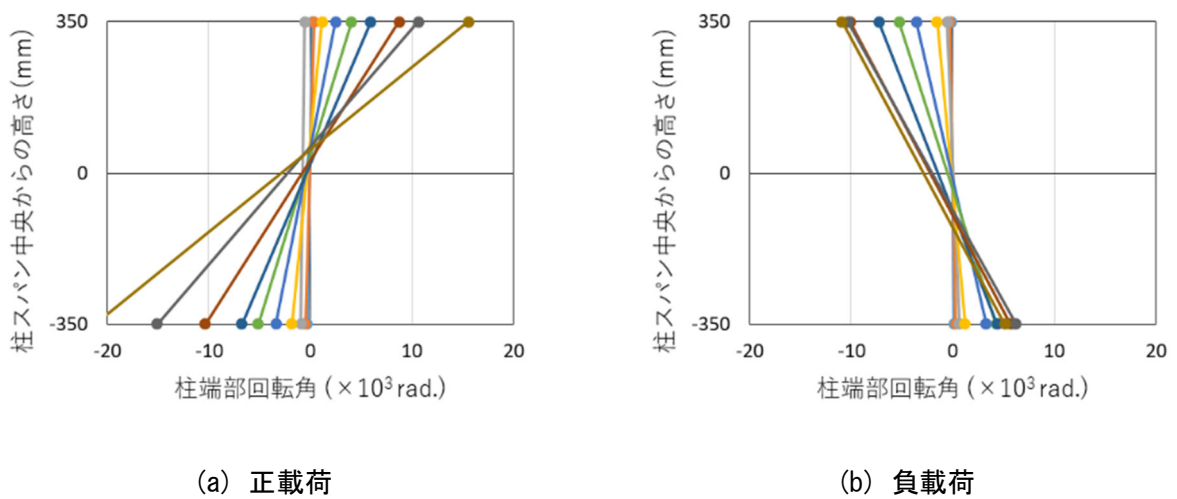


図 6.3.6-11 柱端部回転角分布 (C2-UFC2, 柱側面)

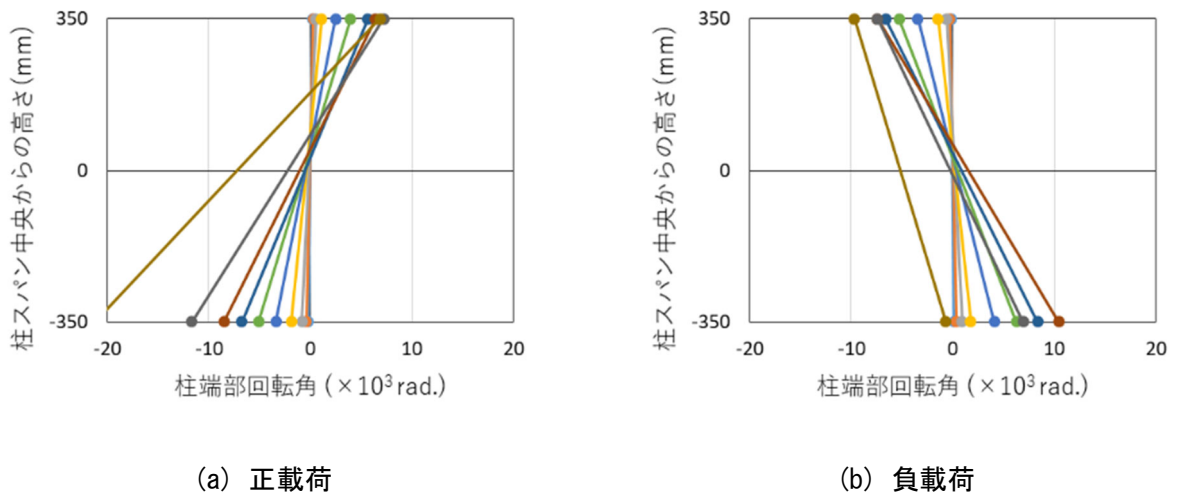


図 6.3.6-12 柱端部回転角分布 (C2-UFC3, 柱側面)

(4) 柱端部における目地部鉛直方向変位

各試験体の各変形角ピーク時において、UFC パネル面の上下端部に設置した変位計 ($\delta_{r1} \sim \delta_{r4}$) による目地部の鉛直方向変位の分布を図 6.3.6-13～図 6.3.6-15 に示す。また、各変形角サイクルの正側ピーク時における、圧縮縁から中立軸位置までの深さを表 6.3.6-1 に示す。なお、圧縮縁から中立軸位置までの深さは上下端部の平均値を示している。

柱端部における目地部鉛直方向変位に関しても、正側 $R=1.0\%$ までは、各試験体において同様の傾向を示した。正側 $R=1.5\%$ 以降、C2-UFC1、および C2-UFC2 は変形角が大きくなるにつれ、目地部の開きが大きくなるのに対し、C2-UFC3 は目地部の開きの増加が見られなかった。負荷荷側に関しても、C2-UFC1、および C2-UFC2 は同様の傾向を示した一方、C2-UFC3 は他試験体に比べ、目地部の開きが小さかった。これらのことから、C2-UFC3 では $R=1.5\%$ サイクル以降、柱端部における目地部の開きよりも、パネル間の目地における開きが支配的となっていることが伺える。

また、C2-UFC1、および C2-UFC2 の圧縮縁から中立軸位置までの深さは、 $R=1.5\%$ までは徐々に減少し、 $R=2.0\%$ 以降徐々に増加しているのに対し、C2-UFC3 は $R=1.0\%$ まで徐々に減少し、 $R=1.5\%$ 以降徐々に増加しており、各試験体共に、最大耐力を迎えた変形角サイクルを境目として、柱端部目地の圧壊の兆候が見られる。

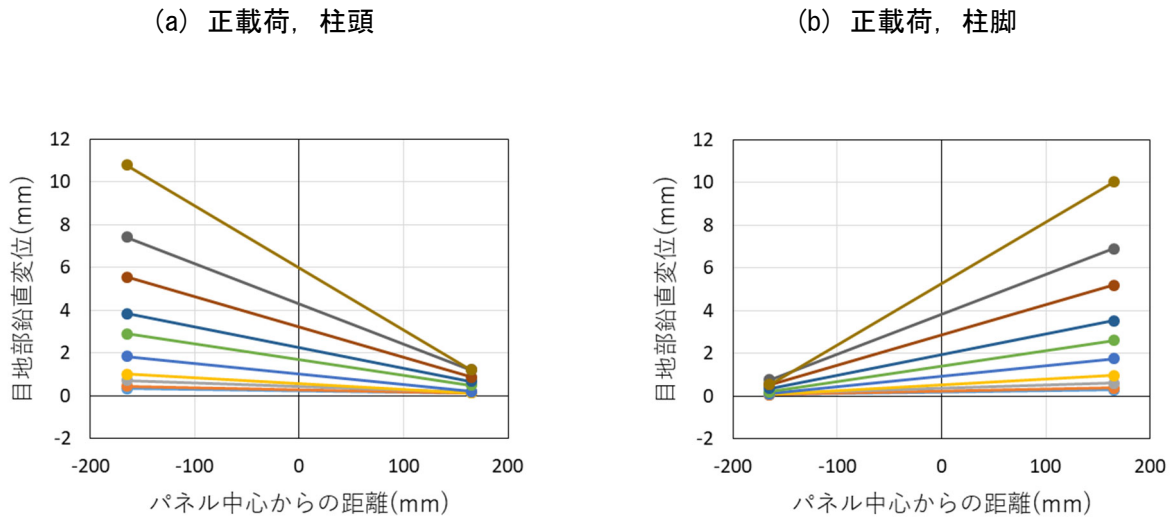
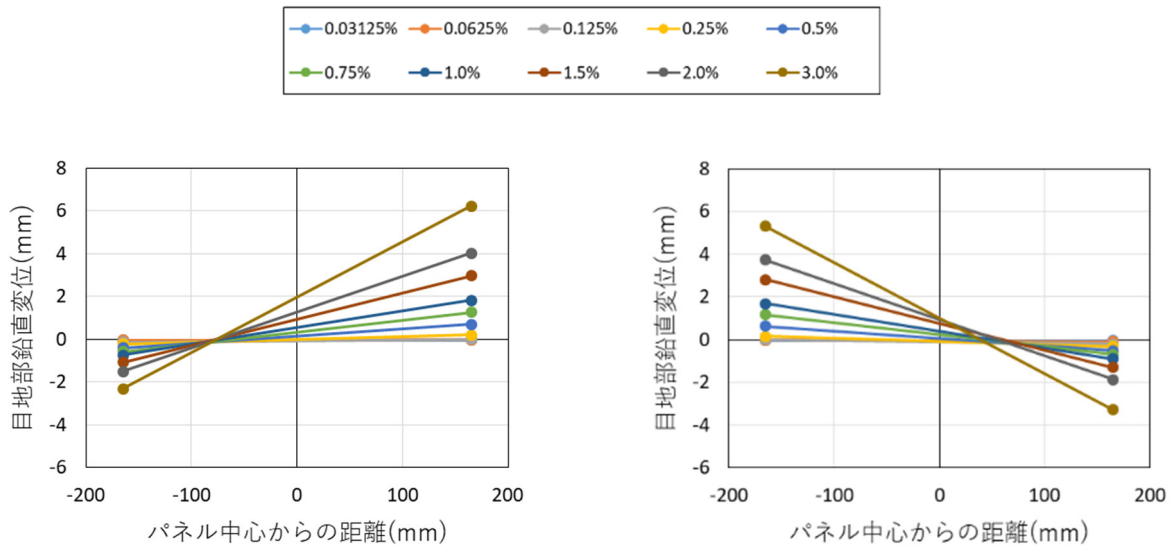


図 6.3.6-13 目地部鉛直方向変位分布 (C2-UFC1, UFC パネル面)

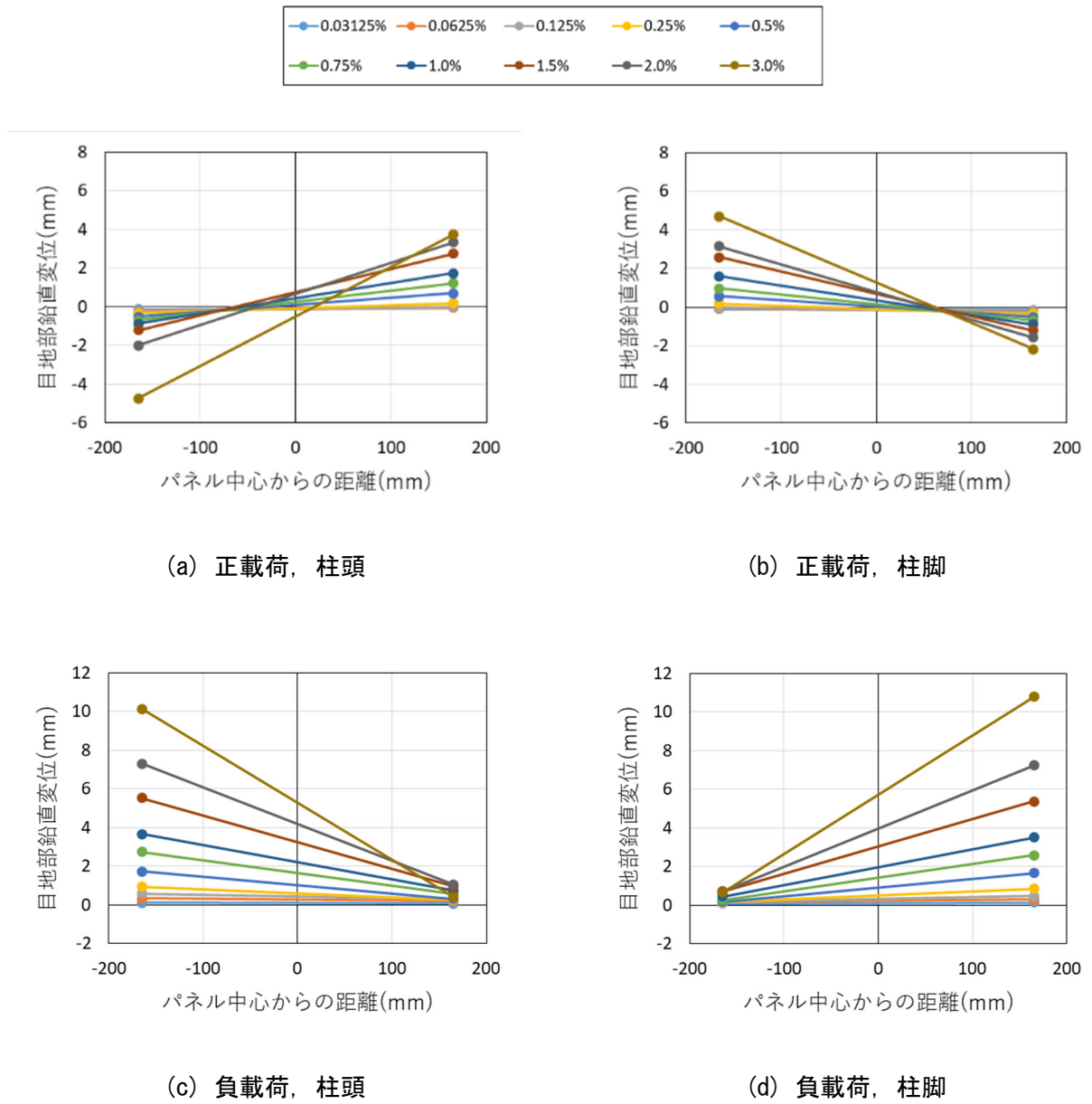
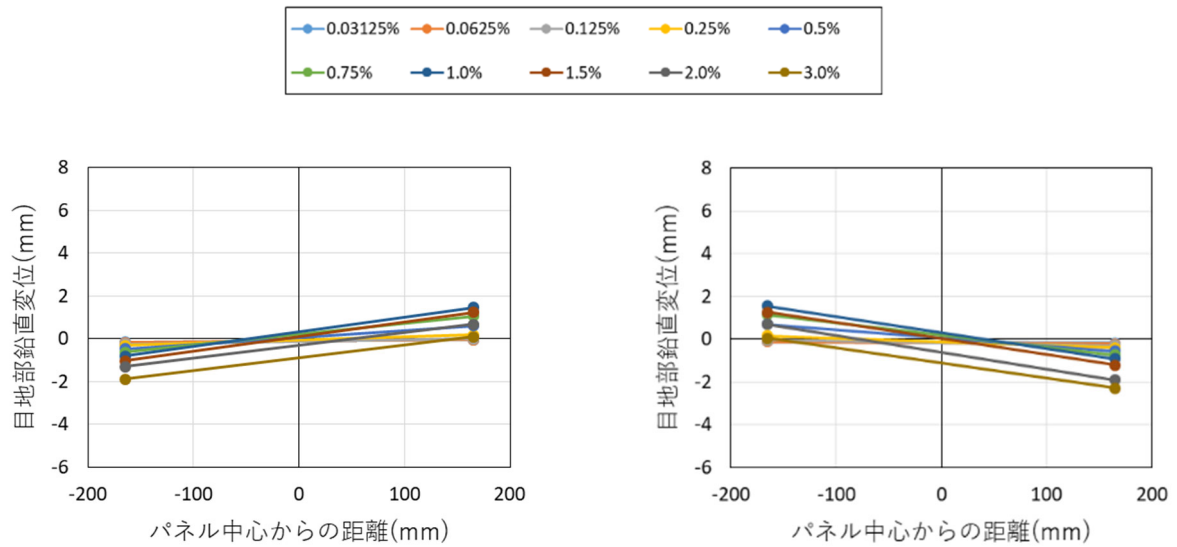
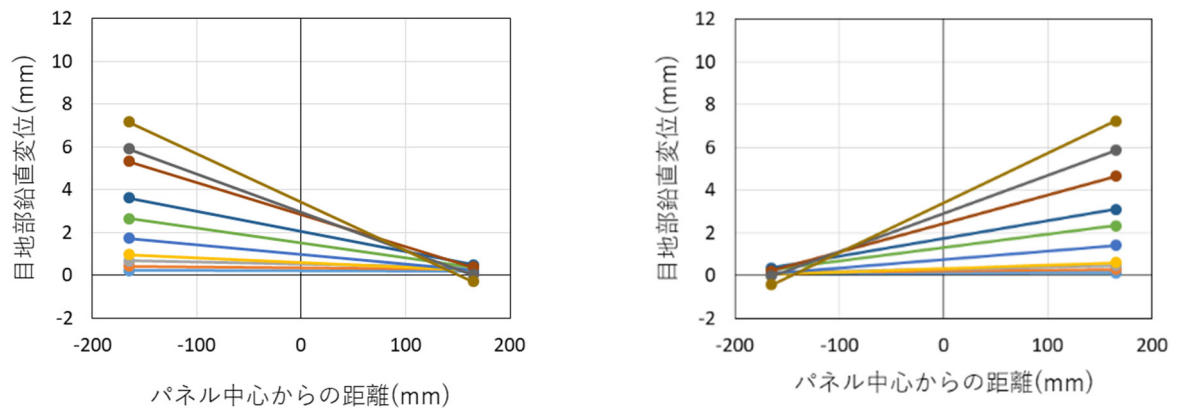


図 6.3.6-14 目地部鉛直方向変位分布 (C2-UFC2, UFC パネル面)



(a) 正載荷, 柱頭

(b) 正載荷, 柱脚



(c) 負載荷, 柱頭

(d) 負載荷, 柱脚

図 6.3.6-15 目地部鉛直方向変位分布 (C2-UFC3, UFC パネル面)

表 6.3.6-1 各変形角正側ピーク時の圧縮縁から中立軸位置までの深さ

試験体	圧縮縁から中立軸までの深さ(mm)									
	変形角									
	0.03125%	0.0625%	0.125%	0.25%	0.5%	0.75%	1.0%	1.5%	2.0%	3.0%
C2-UFC1	1073	395	318	192	133	113	105	96	100	108
C2-UFC2	561	443	330	214	149	129	114	102	117	144
C2-UFC3	596	490	356	218	144	125	119	156	229	318

(5) 変形分離

各試験体の各変形角ピークにおける、全体変形に占める曲げ変形、およびせん断変形成分の推移を図 6.3.6-16～図 6.3.6-18 に示す。曲げ変形成分は柱側面に設置した変位計 ($\delta_{be1} \sim \delta_{be4}$, $\delta_{bw1} \sim \delta_{bw4}$) により得られた曲率から算出し、せん断変形成分は全体変形と上記の曲げ変形成分の差として算出した。また、各試験体の各変形角ピークにおける、全体変形に対するせん断変形成分が占める割合を表 6.3.6-2 に示す。

正荷荷においてせん断変形成分の全体変形に占める割合は、各試験体とも $R=1.0\%$ までは概ね同程度で推移しているが、 $R=1.0\%$ で最大耐力を迎えた C2-UFC3 は、 $R=1.5\%$ 以降、せん断変形が占める割合は増加している。また、 $R=1.5\%$ で最大耐力を迎えた C2-UFC1、および C2-UFC2 が $R=1.5\%$ までは概ね同程度で推移しており、 $R=2.0\%$ 以降、せん断変形が占める割合は増加しているが、その値は C2-UFC3 よりも小さい。一方、負荷荷においては各試験体であまり違いは見られず、変形角が大きくなってもせん断変形が占める割合は 3 割程度に留まった。

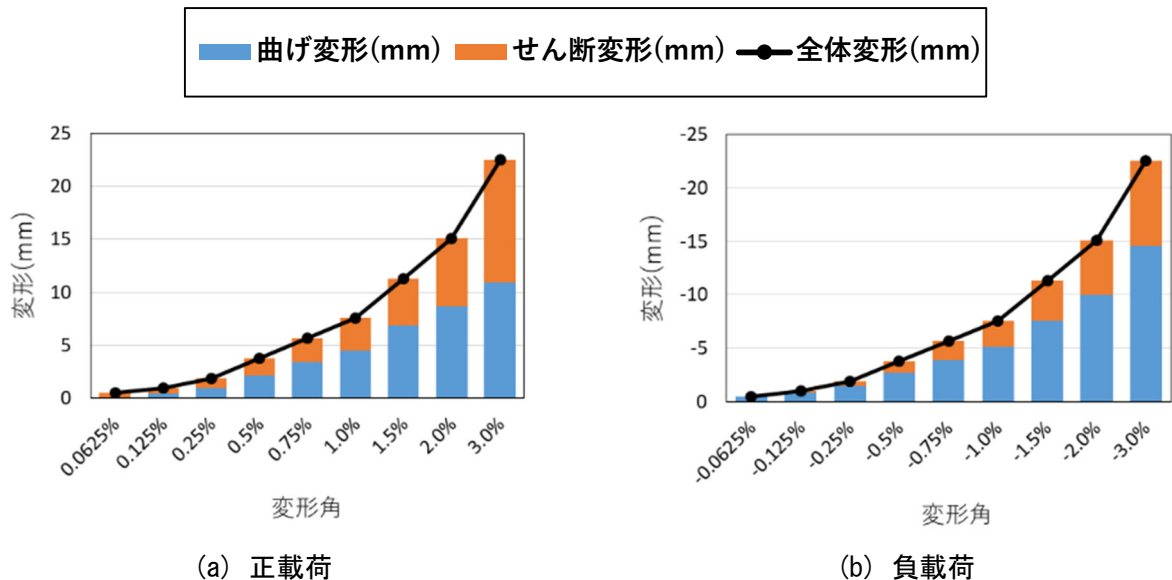


図 6.3.6-16 全体変形に占める曲げ変形、およびせん断変形成分の推移 (C2-UFC1)

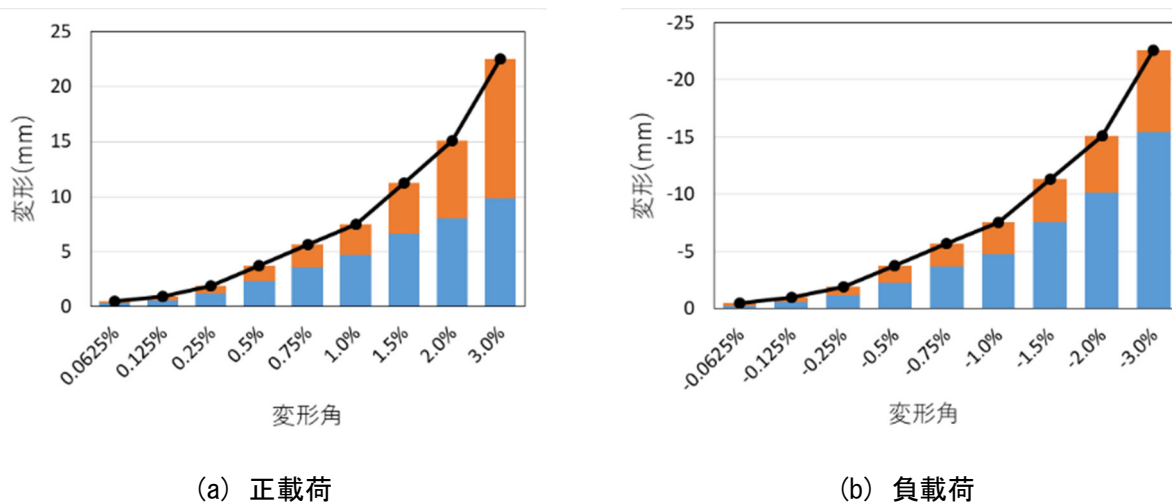
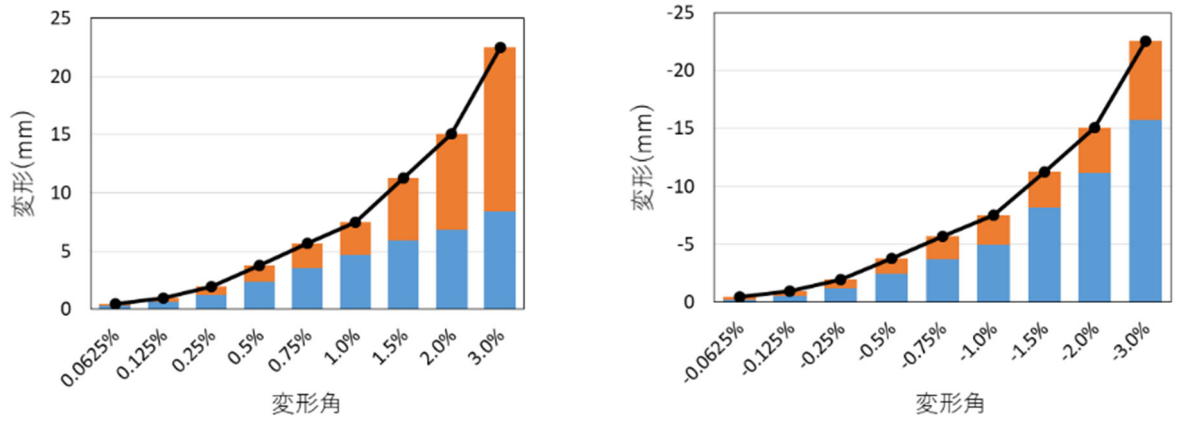


図 6.3.6-17 全体変形に占める曲げ変形、およびせん断変形成分の推移 (C2-UFC2)



(a) 正載荷

(b) 負載荷

図 6.3.6-18 全体変形に占める曲げ変形，およびせん断変形成分の推移 (C2-UFC3)

表 6.3.6-2 全体変形に占めるせん断変形成分の割合

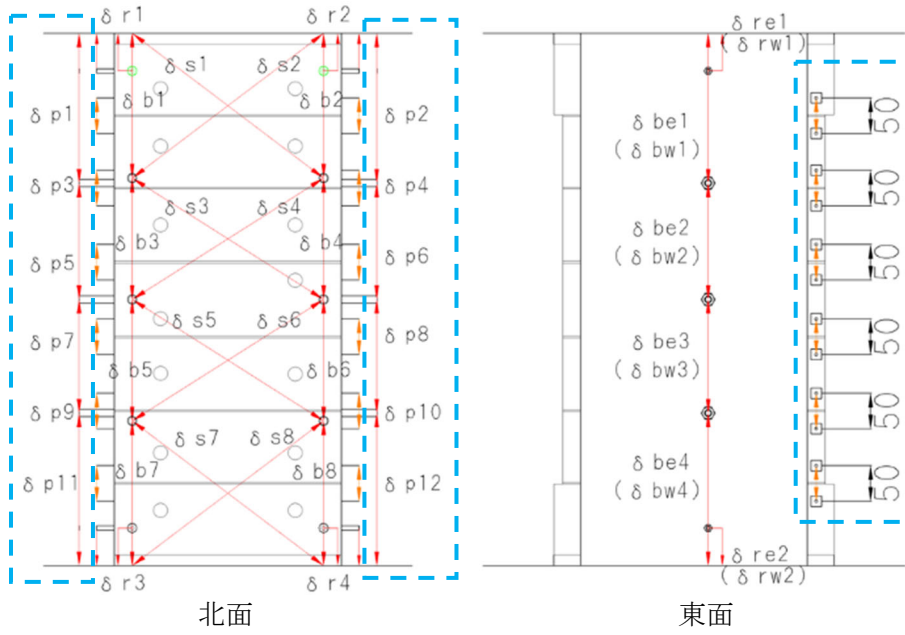
試験体	せん断変形の割合									
	変形角 (正載荷)									
	0.0625%	0.125%	0.25%	0.5%	0.75%	1.0%	1.5%	2.0%	3.0%	
C2-UFC1	0.96	0.58	0.49	0.44	0.41	0.40	0.40	0.43	0.51	
C2-UFC2	0.30	0.34	0.38	0.38	0.37	0.37	0.41	0.47	0.56	
C2-UFC3	0.30	0.36	0.38	0.37	0.38	0.38	0.48	0.55	0.63	
試験体	変形角 (負載荷)									
	-0.0625%	-0.125%	-0.25%	-0.5%	-0.75%	-1.0%	-1.5%	-2.0%	-3.0%	
C2-UFC1	-0.05	0.17	0.24	0.29	0.31	0.32	0.33	0.34	0.36	
C2-UFC2	0.49	0.41	0.39	0.40	0.36	0.37	0.33	0.33	0.32	
C2-UFC3	0.54	0.45	0.38	0.34	0.35	0.34	0.27	0.26	0.30	

(6) パネル間変位

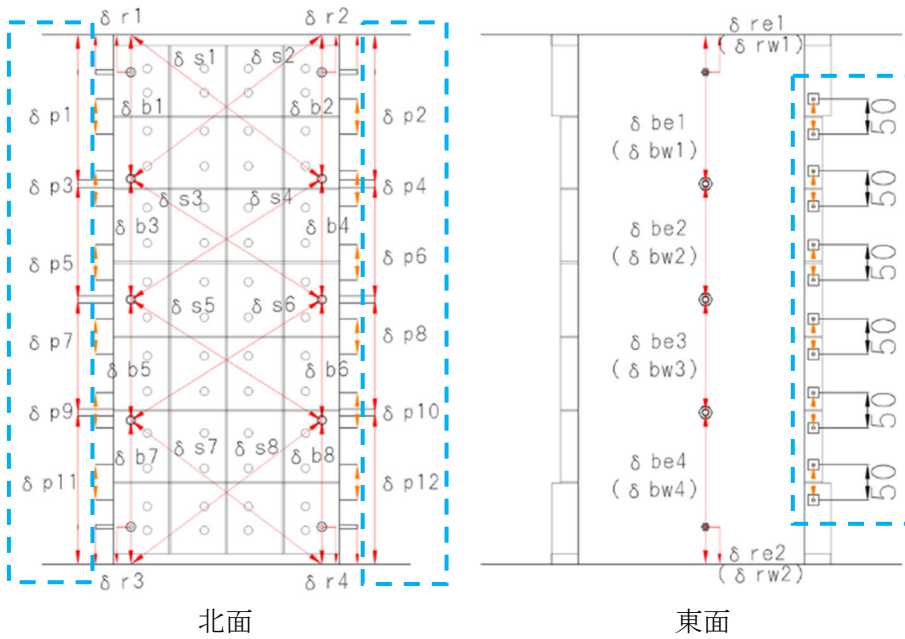
C2-UFC2, C2-UFC3 において, 図 6.3.6-19 中に示す位置に設置したパイゲージ ($\delta_{p11} \sim \delta_{p12}$) により得られた, パネル水平目地間の変位を図 6.3.6-20~図 6.3.6-23 に示す。図中, 正側がパネル水平目地間の開きを, 負側がパネル水平目地間の縮みを示している。

正載荷において, C2-UFC2 では変形角が大きくなるにつれ, 西面の最下段のパネルと下から 2 段目のパネル間の開き (δ_{p12}) が大きくなっているのに対し, 東面ではパネル水平目地間の開きはあまり生じていないことから, 東面においては, パネル間の開きよりも, パネルと上端部の目地との開きが支配的であったと考えられる。また, C2-UFC のパネル水平目地間の開きは高さ方向になだらかに分布しており, 中央高さ付近ではパネル間にほとんど開きが生じていなかった一方, C2-UFC3 の正載荷では西面, 東面共に高さ方向の分布にばらつきが見られ, 中央高さ付近においてもパネル間に開きが生じていた。これは, C2-UFC3 では水平方向の分割に加え, 鉛直方向にも分割したことにより, パネル個々に回転変形が生じたことによるものだと考えられる。

また, C2-UFC2 の負載荷側では, $R=3.0\%$ に至るまでパネル水平目地間の変形は小さく, パネル間の開きよりも, パネルと上下端部の目地の開きが支配的であったと考えられる。一方, C2-UFC3 の負載荷側においては, 西面においては最上段から 2 段目のパネルと 3 段目のパネル間の開き (δ_{p1}) が, 東面においては最下段から 2 段目のパネルと 3 段目のパネル間の開き (δ_{p9}) が大きかった。

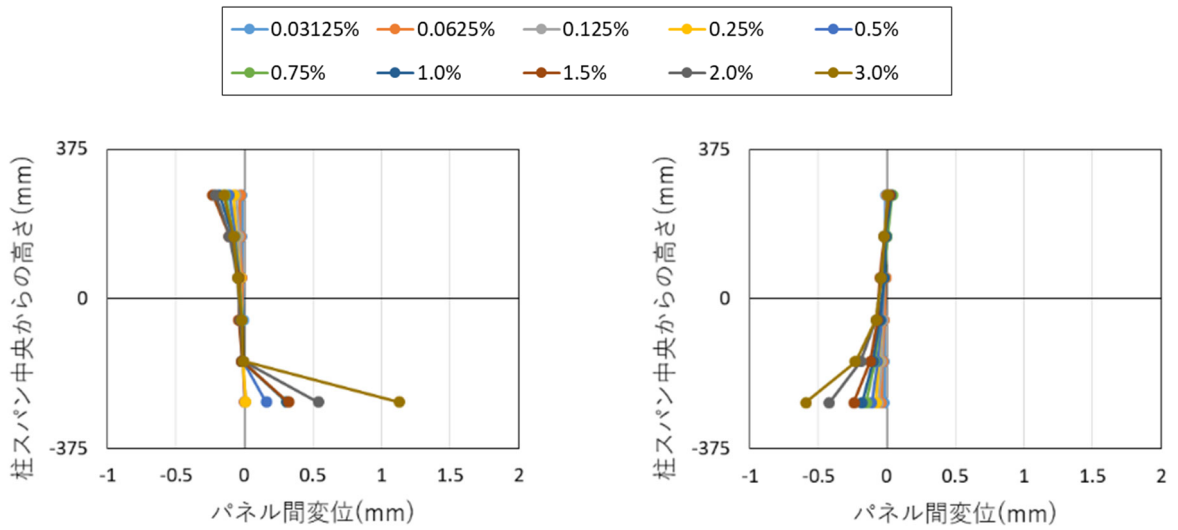


(a) C2-UFC2



(b) C2-UFC3

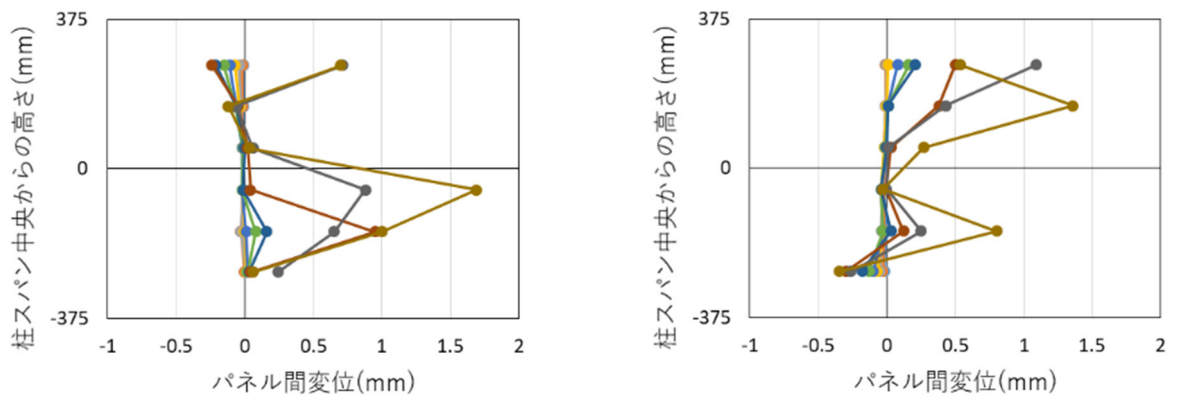
図 6.3.6-19 パイゲージの設置位置



(a) 西面

(b) 東面

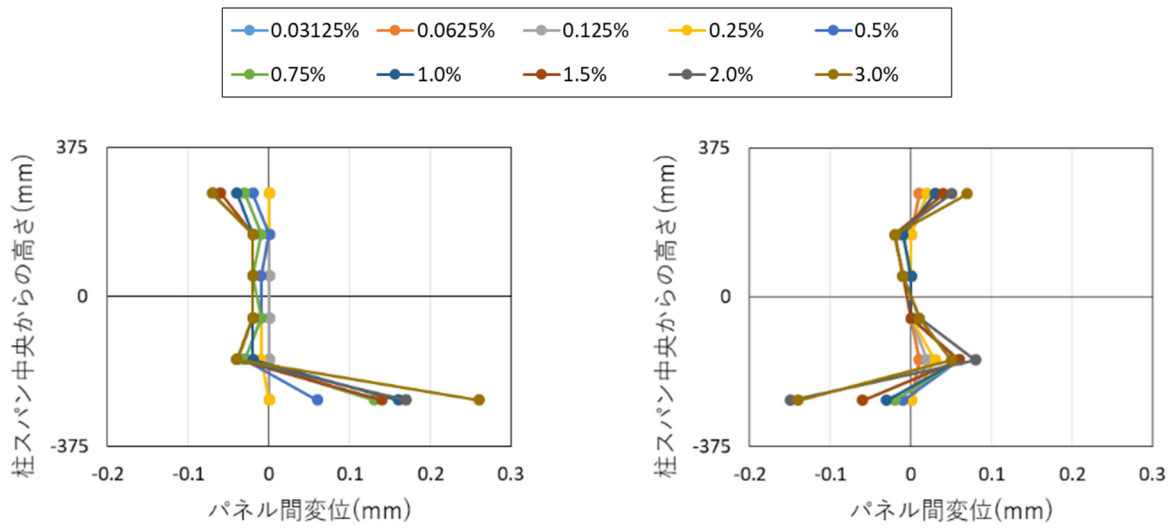
図 6.3.6-20 パネル水平目地間の変位 (C2-UFC2, 正載荷)



(a) 西面

(b) 東面

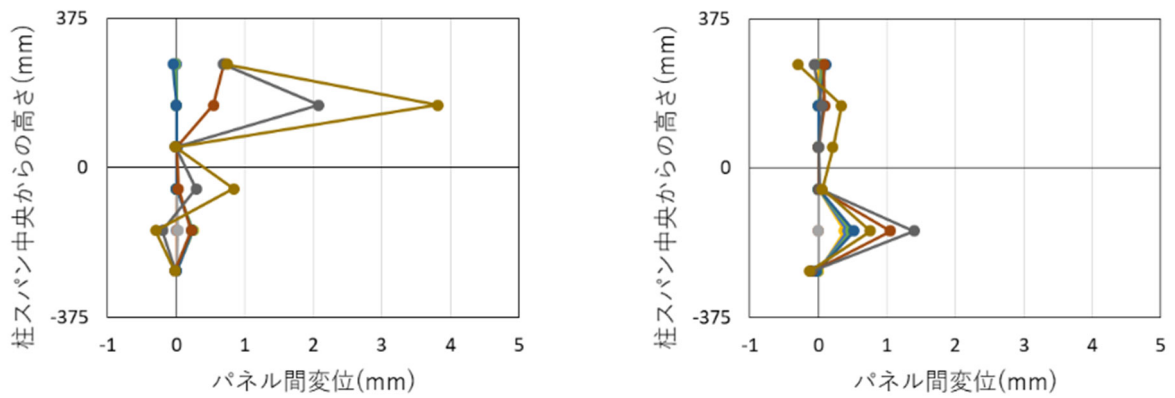
図 6.3.6-21 パネル水平目地間の変位 (C2-UFC3, 正載荷)



(a) 西面

(b) 東面

図 6.3.6-22 パネル水平目地間の変位 (C2-UFC2, 負載荷)



(a) 西面

(b) 東面

図 6.3.6-23 パネル水平目地間の変位 (C2-UFC3, 負載荷)

6.3.7 光学式モーションキャプチャの精度検証

光学式モーションキャプチャで計測されたデータの精度を検証するために、歪みゲージ式変位計 (CDP-25, SDP-200D など) の計測値と比較し、その計測誤差などについての検証を行った。

(1) 試験体の全体変形

試験体の上下スタブの相対水平変形を全体水平変形 δ_h 、試験体の上下スタブの相対鉛直変形を全体鉛直変形 δ_v 、上下スタブの相対回転角を θ_s とし、それぞれの計測結果を図 6.3.7-1～図 6.3.7-3 に示す。図 6.3.7-1、図 6.3.7-2 に示すように、全体水平変形 δ_h と全体鉛直変形 δ_v は光学式モーションキャプチャで計測されたデータと歪みゲージ式変位計で計測されたデータは同じ挙動をしていた。一方で、上下スタブの相対回転角 θ_s は、実験では歪みゲージ式変位計で計測された値を一定に保つように制御していたが、光学式モーションキャプチャで計測されたデータではそれとは違いスタブが回転している計測結果が得られている。図 6.3.7-3 を見ると、この光学式モーションキャプチャで計測されたデータはある程度の傾きを持った挙動が見られる。これは歪みゲージ式変位計のターゲットを設置するときの水平精度と、光学式モーションキャプチャのキャリブレーション時の水平精度との差が影響していると考えられる。

具体的な計測誤差として、図 6.3.7-4 に水平変形と鉛直変形の誤差のグラフを示す。また表 6.3.7-1 に計測誤差の一覧を示す。図 6.3.7-4 を見ると、水平変形の誤差は変形が大きくなるほど誤差が蓄積されるような結果だった。一方で鉛直変形では、軸力が大きく切り替わる水平変形が小さい範囲で誤差が大きく変化しているような結果であった。表 6.3.7-1 に示すように、C2-UFC2 試験体では水平変形、鉛直変形、回転角の誤差はそれぞれ 0.89mm, 2.83mm, $0.84 \times 10^{-3} \text{rad}$ となった。同様に C2-UFC3 試験体では水平変形、鉛直変形、回転角の誤差はそれぞれ 1.58mm, 2.66mm, $0.88 \times 10^{-3} \text{rad}$ となった。表 6.3.7-2 に示す光学式モーションキャプチャの計測精度 (保証精度 0.199mm, 期待精度 0.033mm) と比べると変形誤差が大きくなった。なお、歪みゲージ式変位計による計測は試験体の北面で行っているのに対し、光学式モーションキャプチャによる計測は試験体の南面で行っていることから、この計測誤差には加力に伴う試験体のねじれ等の影響が含まれていると考えられる。

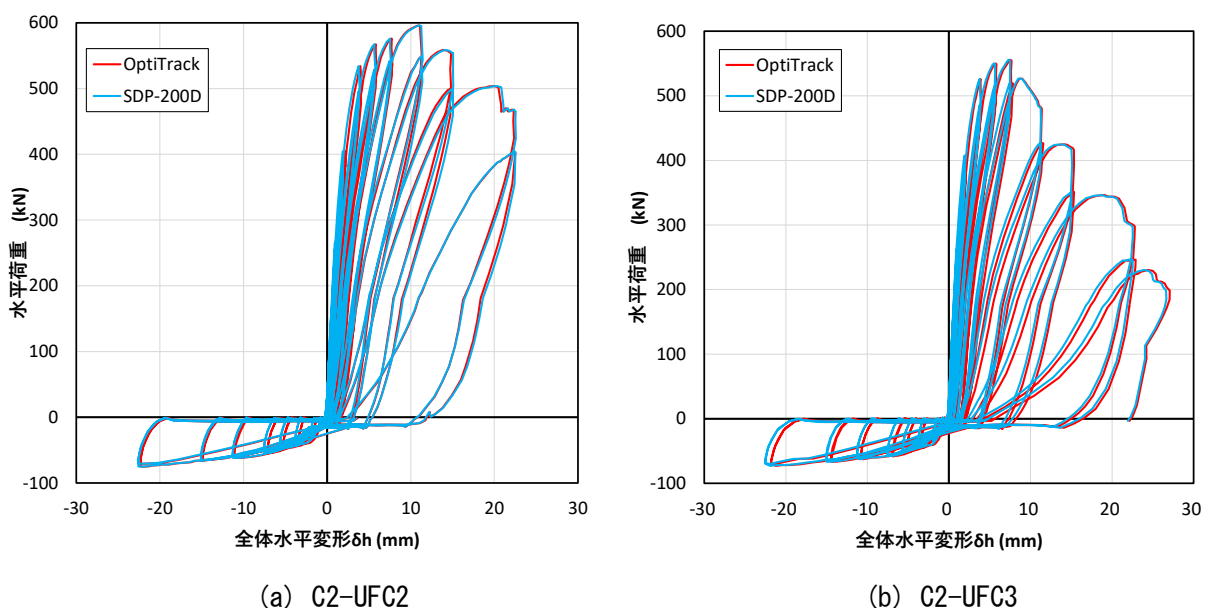


図 6.3.7-1 水平荷重—全体水平変形 δ_h 関係

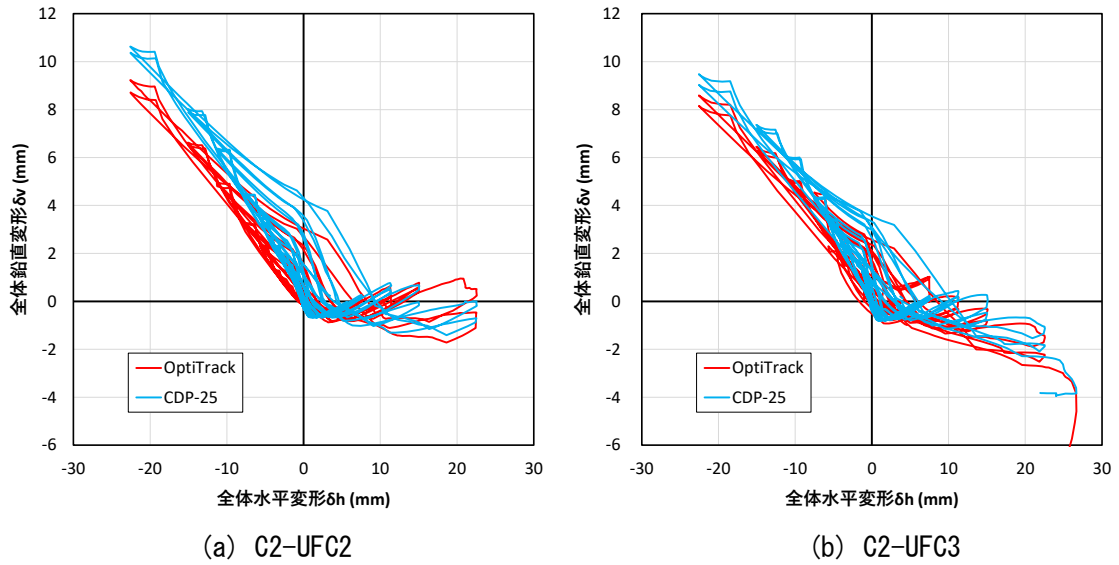


図 6.3.7-2 全体鉛直変形 δ_v —全体水平変形 δ_h 関係

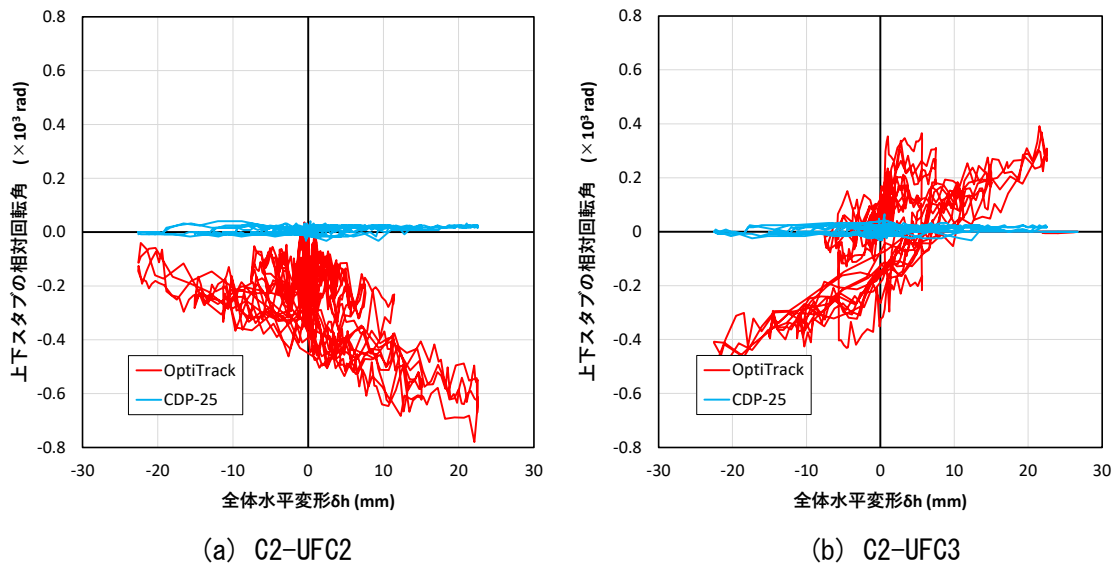


図 6.3.7-3 上下スタブの相対回転角 θ_s —全体水平変形 δ_h 関係

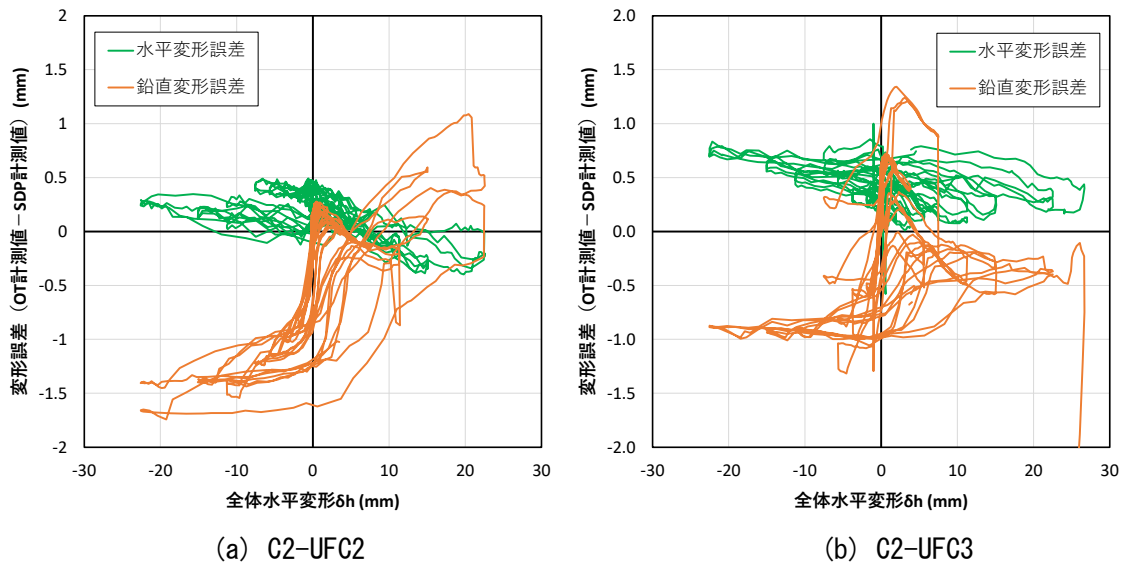


図 6.3.7-4 変形誤差－全体水平変形 δ_h 関係

表 6.3.7-1 誤差一覧

	C2-UFC2			C2-UFC3		
	最大	最小	最大-最小	最大	最小	最大-最小
水平変形誤差 (mm)	0.49	-0.40	0.89	1.00	-0.58	1.58
鉛直変形誤差 (mm)	1.09	-1.74	2.83	1.34	-1.32	2.66
回転角誤差 ($\times 10^3$ rad)	0.04	-0.80	0.84	0.37	-0.52	0.88

表 6.3.7-2 光学式モーションキャプチャの計測精度

OptiTrack PrimeX 13, 反射マーカ－ 6.4mm

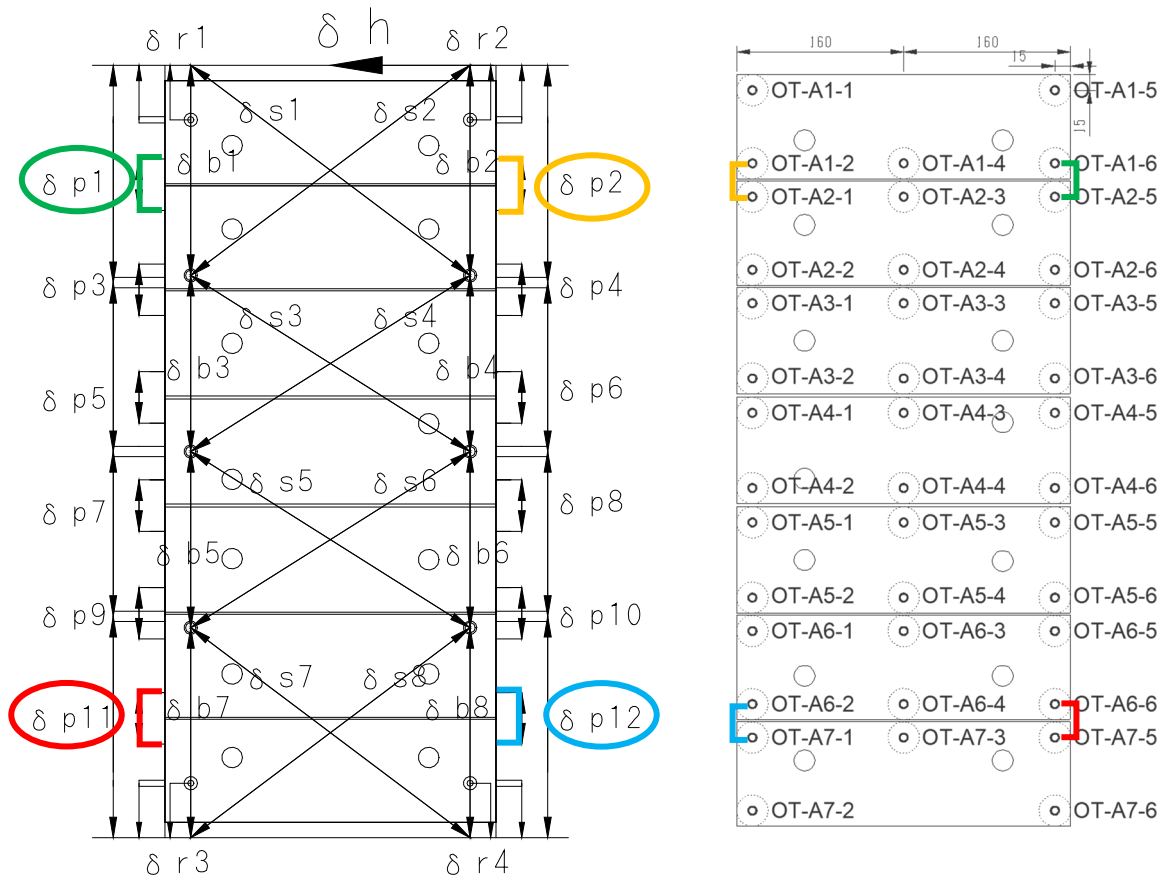
水平視野角	56 [度]
垂直視野角	46 [度]
水平解像度	1280 [pixel]
垂直解像度	1024 [pixel]
マーカ－サイズ	6.4 [mm]
カメラ設置距離	2.0 [m]
計測面(水平長さ)	0.35 [m]
計測面(鉛直長さ)	0.75 [m]

計測可能エリア(水平長さ)	2.13 [m]
計測可能エリア(鉛直長さ)	1.70 [m]
期待精度 (水平)	0.033 [mm]
期待精度 (鉛直)	0.033 [mm]
保証精度 (水平)	0.199 [mm]
保証精度 (鉛直)	0.199 [mm]
必要マーカサイズ	5.0 [mm]

(2) UFC パネル間水平目地の変形

C2-UFC2 試験体の UFC パネル間の水平目地の変形の計測結果を用いて、光学式モーショキャプチャの計測精度の検証を行う。図 6.3.7-5 に、パイゲージ計測位置と光学式モーショキャプチャの計測位置をそれぞれ示す。検証の対象としたのは、図 6.3.7-5 に示した緑黄赤青の 4 箇所（ $\delta p1$, $\delta p2$, $\delta p11$, $\delta p12$ ）の計測結果である。それぞれの計測ではほぼ同じ箇所での目地の変形を計測しているが、北面と南面で計測位置は違っており、同じパネルを計測したわけではない。

図 6.3.7-6 にその計測結果を示す。東下（赤色）での計測結果は、パイゲージの計測値で -0.6mm 程度まではほぼ同じ変形であった。また、西下（青色）での計測結果は、計測値の誤差は大きいものの同じような挙動を示している。しかし、東上（緑色）および西上（黄色）の計測結果では、光学式モーショキャプチャの計測値と比べると、パイゲージの計測値が小さな結果となった。これらの計測値の差は、同じパネルで計測しているわけではなく、北面と南面で計測位置が異なっているためと考えられる。このことから、これらの計測結果を用いて光学式モーショキャプチャの計測精度の検証は実施できないことがわかった。



(a) パイゲージ計測位置（北面） (b) 光学式モーショキャプチャ計測位置（南面）

図 6.3.7-5 UFC パネル間の水平目地の変形

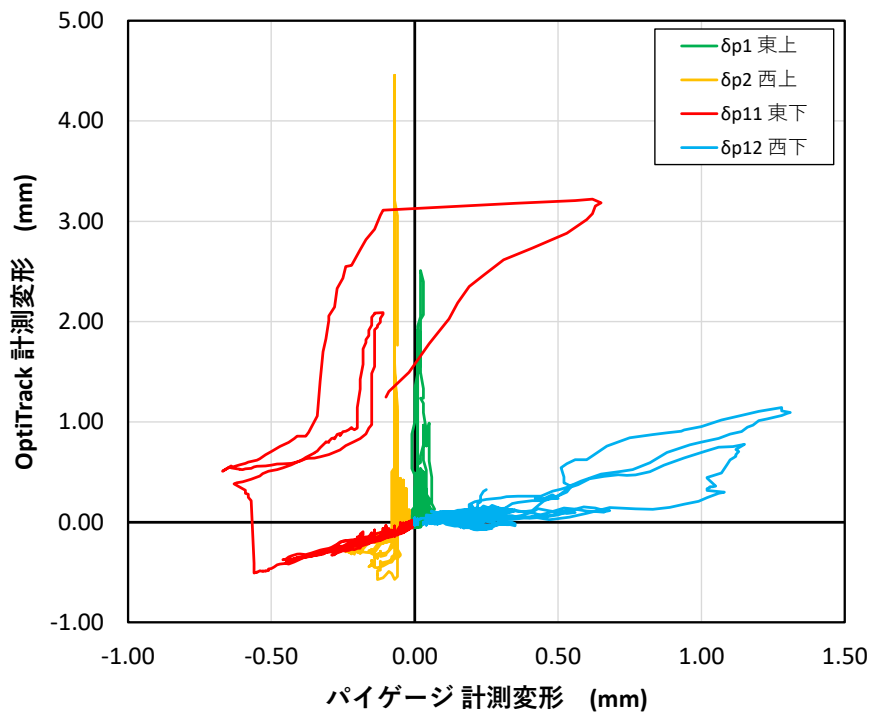


図 6. 3. 7-6 UFC パネル間水平目地の変形計測結果

(3) 同一 UFC パネル内のクロスチェック

UFC パネルの変形は、UFC パネルの光学式モーショキャプチャ計測点のうちの 2 点の計測点を用いて UFC パネルの水平変位、鉛直変位、回転角を求める。一方、C2-UFC2 試験体では、UFC パネルに 5~6 点の光学式モーショキャプチャ計測点を設置したので、計算に用いる計測点 2 点の選択によって複数の UFC パネルの水平変位、鉛直変位、回転角の値が計算できる。UFC パネルが剛体でかつ計測精度が良ければこれら複数の計測結果は一致するはずである。そこで、同一 UFC パネルの計測結果のクロスチェックを行うことで、UFC パネルの計測精度の検証を行う。UFC パネルの水平変位および鉛直変位は、パネル中心部の変形を求めるので、図 6.3.7-7 のような A6 パネルの場合は「OT-A6-1, OT-A6-6」「OT-A6-2, OT-A6-5」「OT-A6-3, OT-A6-4」の 3 つの組み合わせの 2 点を用いることで計算できる。また、UFC パネルの回転角は、図 6.3.7-7 の 6 点のうちどの 2 点を選んでも同じ値になるはずなので、6C2=15 通りの組み合わせで計算できる。

ここで、あるステップ、ある UFC パネルにおける、UFC パネルの水平変位のパネル内誤差は、3 つの組み合わせによって計算した UFC パネルの水平変位 3 つの値の最大値から最小値を引いた値と定義する。また、鉛直変位についても同様である。また、あるステップ、ある UFC パネルにおける、UFC パネルの回転角のパネル内誤差は、15 通りの組み合わせによって計算した UFC パネルの回転角 15 個の値の最大値から最小値を引いた値と定義する。計算例として、図 6.3.7-8 に A4 パネルの水平変位および鉛直変位の計算結果を示す。3 つの計算結果はほぼ同じ挙動を示している。また、図 6.3.7-9 に水平変位および鉛直変位のパネル内誤差を示す。3 つの計測値の平均値に比べるとパネル内誤差が小さいことがわかる。

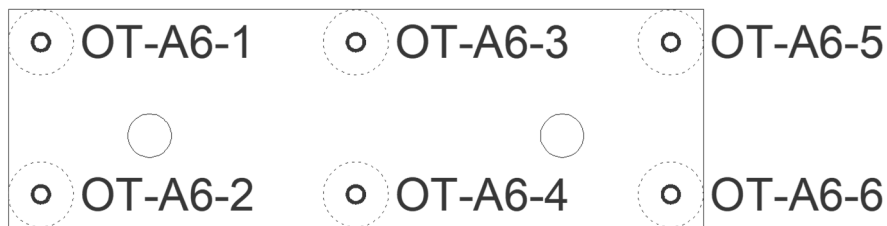


図 6.3.7-7 UFC パネルの OptiTrack 計測点

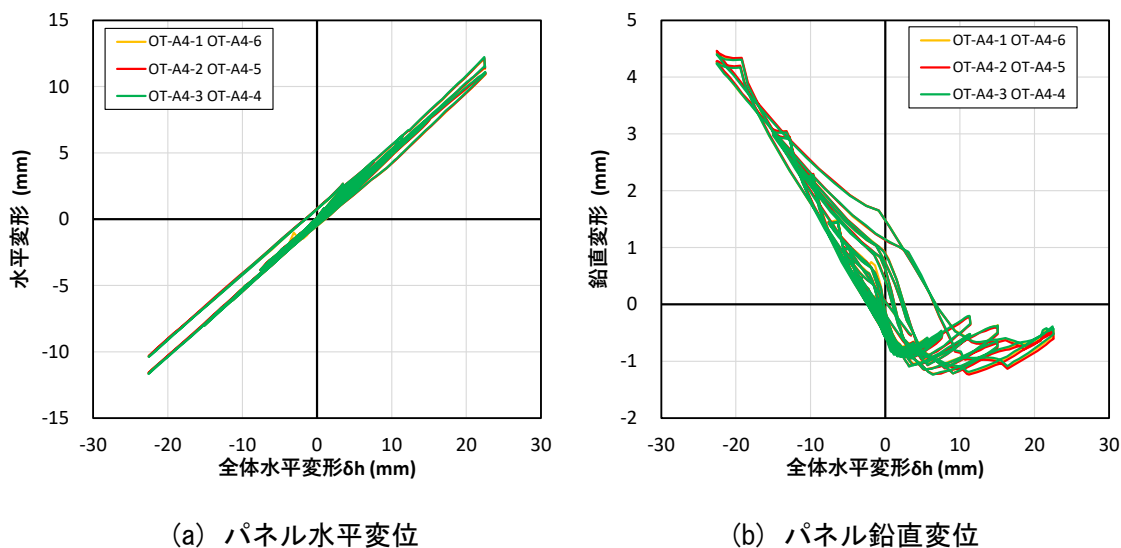


図 6.3.7-8 UFC パネル A4 の計算結果

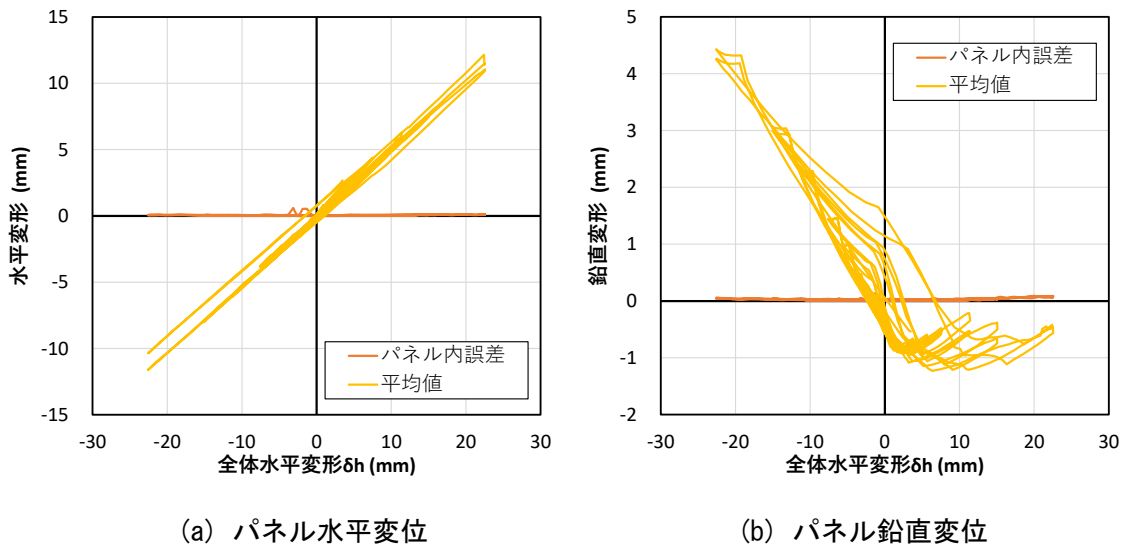


図 6.3.7-9 UFC パネル A4 のパネル内誤差

同じように、図 6.3.7-10 に UFC パネル回転角のパネル内誤差の計算結果を示す。A1 パネルおよび A6 パネルは、载荷中にパネルが破壊されたため、剛体の仮定が成立しなくなり、誤差が大きくなっていることがわかる。しかしそれ以外のパネルは、15 個の計測値の平均値に比べるとパネル内誤差は小さいことがわかった。表 6.3.7-3 にパネル内誤差の最大値一覧を示す。パネル内誤差の最大値とは、各ステップで計算したパネル内誤差の、計測ステップ内での最大値である。それを各パネルで計算し、载荷中にパネルが破壊された A1 パネルおよび A6 パネルを除いて平均した値とその中の最大値を表 6.3.7-3 の下二段に示す。パネル内誤差は、水平変位で最大 0.598mm、鉛直変位で最大 0.323mm となった。これは、OptiTrack の保証精度保証精度 0.199mm の 1.5 倍～3.0 倍程度である。

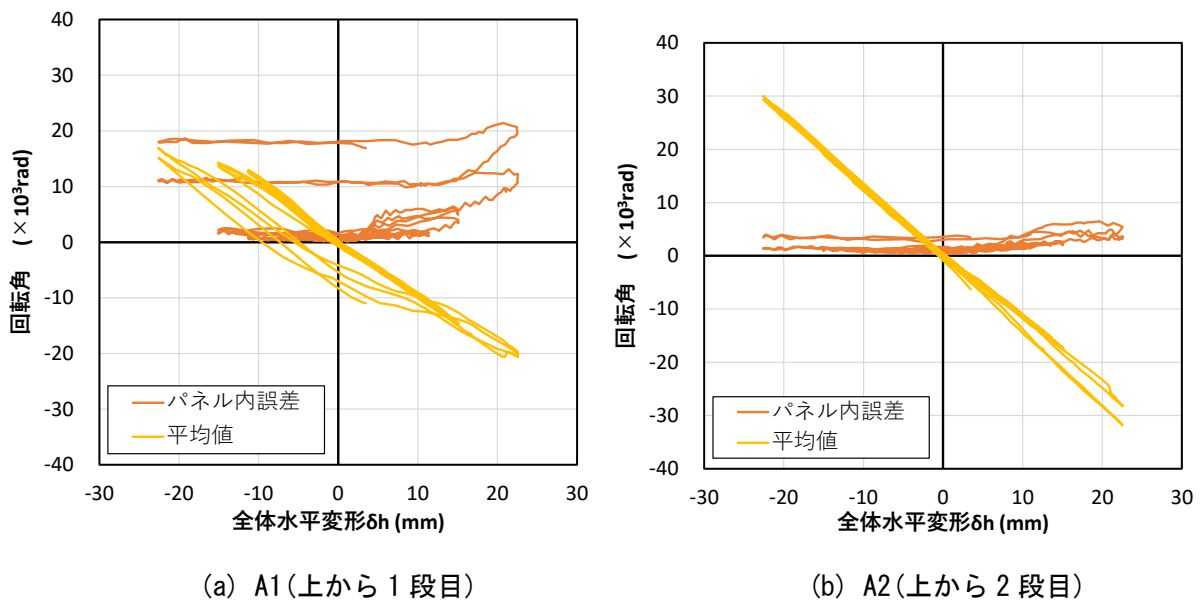
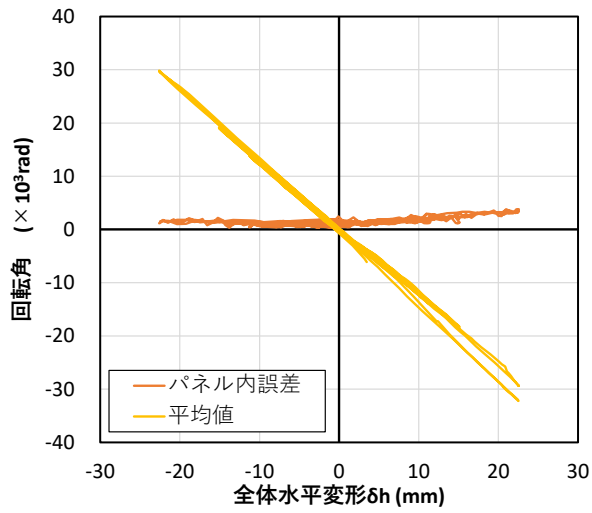
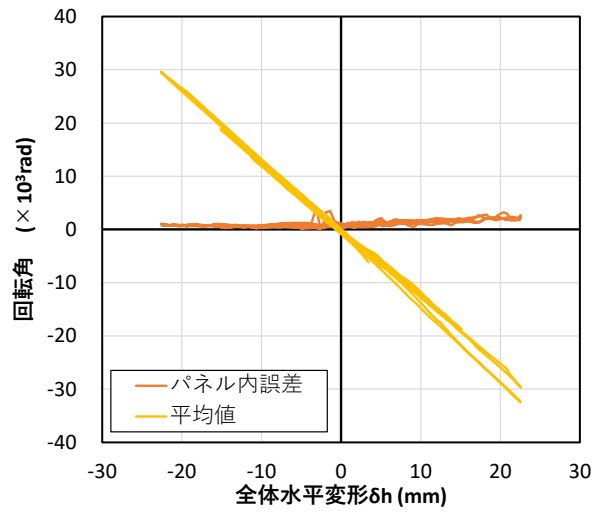


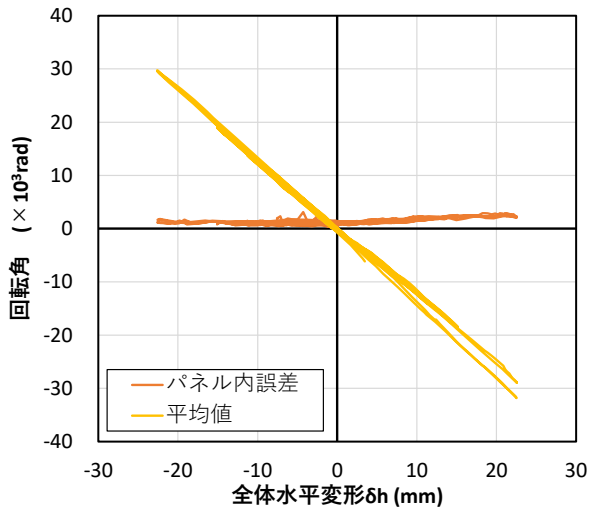
図 6.3.7-10 UFC パネルの回転角計算結果



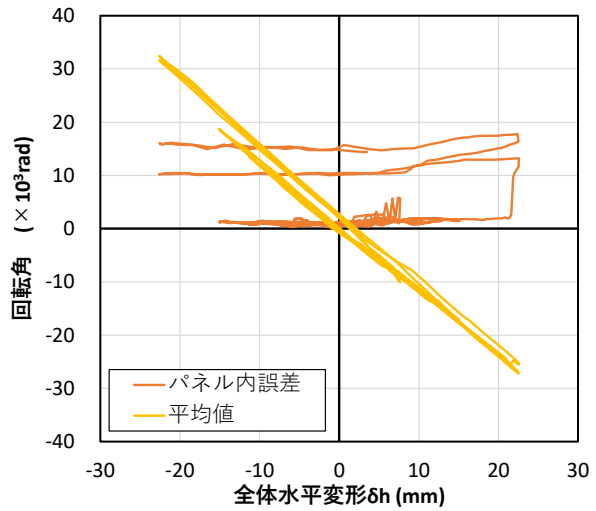
(c) A3(上から3段目)



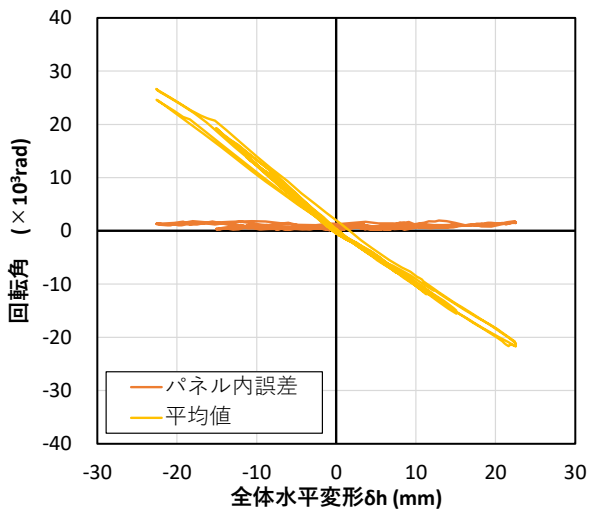
(d) A4(上から4段目)



(e) A5(上から4段目)



(f) A6(上から6段目)



(g) A7(上から7段目)

図 6.3.7-10 (続き) UFCパネルの回転角計算結果

表 6.3.7-3 パネル内誤差の最大値一覧

	水平変位 パネル内誤差 最大値	鉛直変位 パネル内誤差 最大値	回転 パネル内誤差 最大値
	mm	mm	rad($\times 10^3$)
パネルA1	0.756	0.089	21.43
パネルA2	0.176	0.323	6.50
パネルA3	0.094	0.109	3.81
パネルA4	0.598	0.136	4.07
パネルA5	0.490	0.155	3.14
パネルA6	1.031	1.074	31.00
パネルA7	0.067	0.059	1.93
2~5, 7平均	0.285	0.156	3.89
2~5, 7最大	0.598	0.323	6.50

6.4 考察

各試験体の正載荷、および負載荷の水平荷重－変形角関係における包絡線の比較を図 6.4-1 に示す。図の縦軸は試験体に生じた水平荷重を、正載荷側は RC 柱単体のせん断終局耐力の計算値で、負載荷側は RC 柱単体の曲げ終局耐力の計算値で除すことで基準化している。また、表 6.4-1 に正載荷時における各試験体の初期剛性、実験時の最大耐力、最大耐力時の変形角、RC 柱単体のせん断終局耐力の計算値、および耐力増加率の一覧を示す。なお、せん断終局耐力の計算値、および曲げ終局耐力の計算値は、6.2.2 項で示した目標圧縮軸力時のせん断終局耐力、および目標引張軸力時の曲げ終局耐力であり、耐力増加率は実験時の最大耐力を RC 柱単体のせん断終局耐力の計算値で除すことで算出している。

図 6.4-1、および表 6.4-1 より、正載荷において $R=1.0\%$ サイクルまでは各試験体の水平荷重－変形角関係に大きな違いは見られなかった。また、初期剛性も各試験体で概ね同程度であり、パネルを分割して貼り付けた場合であっても、非分割のパネルを貼り付けた場合と同程度の補強効果が得られたと考えられる。一方、 $R=1.0\%$ サイクル以降は各試験体で水平荷重－変形角関係に違いが見られ、C2-UFC3 では $R=1.0\%$ サイクルで最大耐力を迎えた後、他の試験体に比べ急激な耐力低下を示した。また、C2-UFC2 についても C2-UFC3 ほどではないものの、C2-UFC1 に比べ $R=1.5\%$ サイクルで最大耐力を迎えた後の耐力低下が大きい。耐力増加率についても、C2-UFC1 が最も耐力増加率が大きく、C2-UFC2、C2-UFC3 の順に耐力増加率は小さかった。負載荷側に関しては、各試験体の包絡線は概ね一致しており、パネル分割による影響は小さいと考えられる。

また、正載荷時の C2-UFC1 の補強率に対する C2-UFC2、C2-UFC3 の補強率の割合を表 6.4-2 に示す。補強率は、各変形角サイクルピーク時の耐力を、RC 柱単体のせん断終局耐力の計算値で除した値とし、補強率の割合は、C2-UFC1 の補強率に対する C2-UFC2、および C2-UFC3 それぞれの補強率の比と定義した。表 6.4-2 より、 $R=1.0\%$ までの各試験体の耐力は概ね同程度であり、 $R=1.0\%$ において、C2-UFC1 に比べて C2-UFC2 では 3%、C2-UFC3 では 6% の耐力低下に留まった。一方、C2-UFC3 は $R=1.5\%$ 以降、急激に耐力低下しており、C2-UFC2 についても、最大耐力を迎えた $R=1.5\%$ までは概ね C2-UFC1 の耐力と同程度であるが、最大耐力以降の耐力低下は C2-UFC1 に比べ大きい。以上より、本実験で用いた分割方法においては、横方向のみの分割、および縦・横方向の分割共に、最大耐力への影響は小さいと考えられるが、最大耐力後の耐力低下には影響が見られ、 $R=3.0\%$ において、パネルを横方向に分割した C2-UFC2 では 15% 程度、パネルを縦および横方向に分割した C2-UFC3 では 46% 程度の耐力低下が見られた。

次に、図 6.3.5-1(f) に示すように、C2-UFC3 において最大耐力を迎えた変形角である $R=1.0\%$ ピーク時の各試験体の UFC パネルの主応力分布を比較すると、C2-UFC1、および C2-UFC2 はパネルの対角線に沿って圧縮ストラットが形成されているのに対し、C2-UFC3 では局所的に大きな最小主応力が生じていることから、C2-UFC3 ではパネル相互の応力伝達が他試験体に比べて小さかったと考えられる。これは 6.3.3 項で示したように、 $R=0.75\%$ サイクルにおいて、パネル間の縦目地、および横目地に沿った開きが生じてパネルが分離し、パネル個々が個別の挙動を示したことによるものだと考えられる。C2-UFC3 の帯筋が他試験体比べ早期に降伏し、最大耐力時の変形角が小さかったことから、 $R=1.0\%$ サイクル以降において、パネルが負担するせん断力が小さくなり、相対的に既存 RC 柱が負担するせん断力が大きくなったことが、最大耐力以降の靱性能の低下につながったと考えられる。

一方、C2-UFC2 に関しては、鉄筋の降伏状況や変形状態において、概ね C2-UFC1 と同様の性状を示したが、図 6.3.5-1(h) に示すように、C2-UFC1 と C2-UFC2 が最大耐力を迎えた後の変形角である $R=2.0\%$ の UFC パネルの主応力分布を比較すると、C2-UFC1、C2-UFC2 共に、パネル厚が小さい区間

第6章 端部増厚した分割 UFC パネル挟込工法を施した RC 造ピロティ柱の実験

において対角線状の圧縮ストラットが形成されているが、C2-UFC2 の最小主応力は、C2-UFC1 と比べて小さい。これは、C2-UFC1 はパネル端部の断面拡幅部から中央部にかけて、テーパによりなだらかにパネルの断面が変化するのにに対し、C2-UFC2 はパネルの分割位置において厚みが増加するため、断面切り替わり位置において局所的な応力が発生し、パネル中央部への応力伝達が C2-UFC1 に比べ小さかったことが原因だと考えられる。また、6.3.3 項で示したように、C2-UFC2 においてパネル厚が変化する分割位置付近において、局所的なパネルの損傷が見られたことから、断面切り替わり位置において局所的な応力が発生していたことが伺える。 $R=2.0\%$ サイクル以降、C2-UFC2 のパネル中央部の負担せん断力が C2-UFC1 に比べ小さく、相対的に既存 RC 柱の負担するせん断力が大きくなったことが最大耐力後の耐力低下につながったと考えられる。

また、パネルと既存柱の付着性がパネルの主応力に影響を及ぼすと考えられるが、本実験においては、C2-UFC1 において損傷が生じなかった南面のパネルでは、載荷終了までパネルに生じる最小主応力が増加していたこと、およびパネルを分割した C2-UFC2, C2-UFC3 ではパネルおよびパネル間目地に損傷が生じた変形角サイクル以降 (C2-UFC2 では $R=3.0\%$ 以降、C2-UFC3 では $R=0.75\%$ 以降) において最小主応力の低下が見られたことから、各試験体において、パネル接着面は十分な付着性を有しており、パネルを分割した試験体ではパネル、およびパネル間目地の損傷がパネルの主応力に大きな影響を与えたと考えられる。

なお、本補強工法では、UFC パネルを柱に圧着・固定するための貫通孔をパネルに設ける必要があるが、貫通孔の大きさによっては、期待した補強効果が得られない可能性がある。そのため、本章の実験で用いた UFC パネルの断面欠損率を上回らないよう、貫通孔の位置を設定する必要がある。具体的には、図 6.4.2 に示すように、UFC パネルの柱幅方向の断面に対し、最もパネルの断面積が小さい断面において、(欠損部の断面積) / (UFC パネルの断面積) が本実験試験体の最大値 (図 6.4.2 に示す C2-UFC3 試験体の最大断面欠損率 0.15) を上回らないよう貫通孔の位置を計画しなければならない。断面欠損率が本実験試験体の値を上回る場合には、別途、補強効果に関する検討が必要であると考えられる。

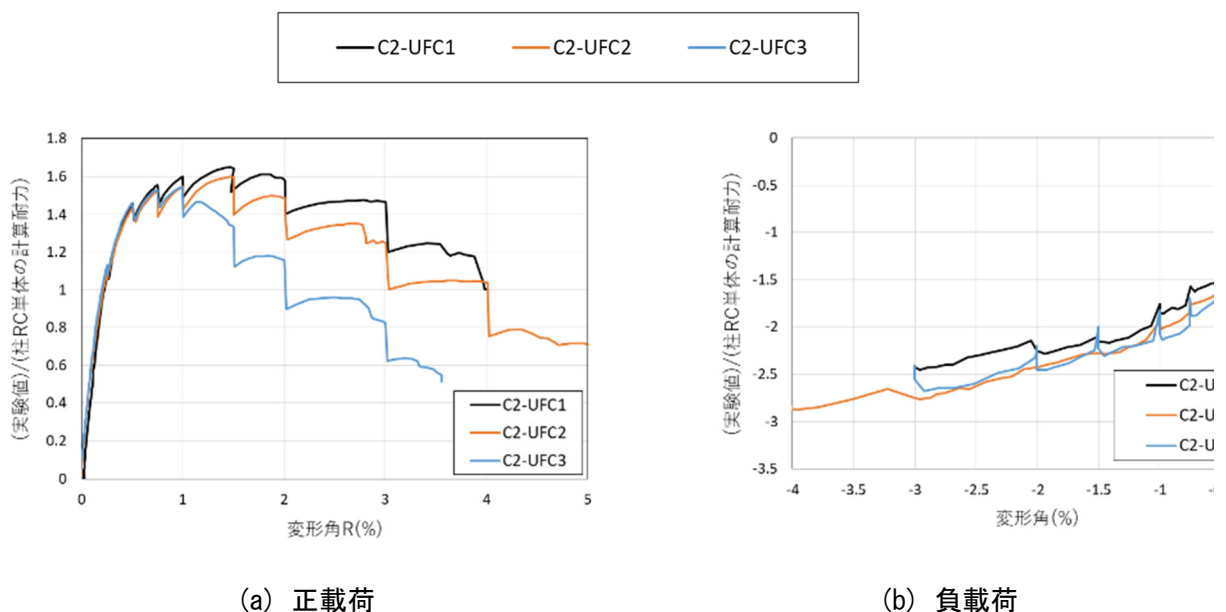


図 6.4-1 水平荷重—変形角関係の包絡線の比較

表 6.4-1 各試験体の耐力増加率の一覧

試験体	初期剛性 (kN/mm)	実験時最大耐力 Q_{\max}^+ (kN)	最大耐力時の変形角 R_{\max}^+ (%)	せん断終局耐力 の計算値 Q_{Su} (kN)	耐力増加率
C2-UFC1	252.8	567.6	1.466	345.2	1.64
C2-UFC2	257.3	596.0	1.470	374.4	1.59
C2-UFC3	261.2	555.7	0.970	360.8	1.54

表 6.4-2 C2-UFC1 を基準とした補強率の割合の一覧

試験体	C2-UFC1を基準とした補強率の割合										
	0.03125%	0.0625%	0.125%	0.25%	0.5%	0.75%	1.0%	1.5%	2.0%	3.0%	4.0%
C2-UFC1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
C2-UFC2	3.06	1.58	1.18	1.01	1.00	0.98	0.97	0.97	0.90	0.85	1.04
C2-UFC3	3.29	1.61	1.21	1.06	1.00	0.96	0.94	0.78	0.69	0.54	

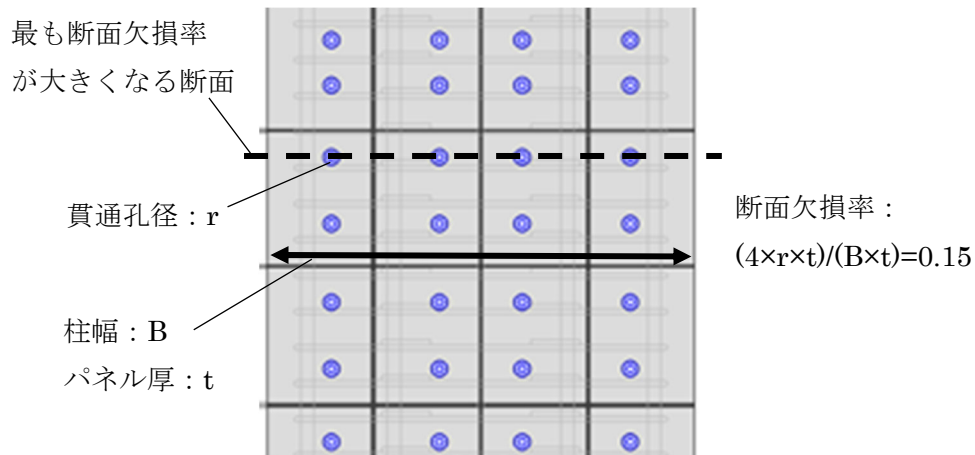


図 6.4-2 断面欠損率の算定 (C2-UFC3)

6.5 結論

本章では、RC 造ピロティ柱を対象に、非分割の UFC パネルによる補強を施した試験体と、分割した UFC パネルによる補強を施した試験体の静的載荷実験を通して、UFC パネルの分割による補強効果への影響について検討した。以下に、得られた知見を示す。

- ・ 非分割の UFC パネルを貼り付けた試験体である C2-UFC1 に比べ、UFC パネルを横方向にのみ分割して貼り付けた試験体である C2-UFC2, および UFC パネルを縦、並びに横方向に分割して貼り付けた試験体である C2-UFC3 は、水平荷重-変形角関係において、変形角 $R=1.0\%$ 程度まで、剛性および耐力は概ね同程度であり、UFC パネルを分割して貼り付けた場合でも、非分割と同程度の補強効果が得られた。
- ・ 一方、C2-UFC2 は変形角 $R=1.5\%$ サイクルにて最大耐力を迎えた後、その後の耐力低下が C2-UFC1 に比べて大きかった。また、C2-UFC3 は他の試験体に比べ早期に柱帯筋が降伏したことで最大耐力時の変形角が小さかった。最大耐力以降の耐力低下も大きく、他の試験体に比べ靱性能が小さかった。耐力増加率(実験時最大耐力/RC 柱単体のせん断終局耐力の計算値)は、C2-UFC1, C2-UFC2, C2-UFC3 の順に大きく、分割によって最大耐力の低下が見られた。
- ・ UFC パネル面の損傷状況、UFC パネル表面の主応力分布、および光学式モーションキャプチャによる計測結果から、C2-UFC3 は最大耐力を迎えた変形角サイクル付近において、パネル間の縦目地、および横目地に開きが生じたことによってパネルが分離し、パネル個々が個別の挙動を示したことによってパネルの負担せん断力が小さくなり、相対的に既存 RC 柱の負担せん断力が大きくなったことが、最大耐力以降の靱性能の低下につながったと考えられる。
- ・ C2-UFC2 は鉄筋の降伏状況や変形性状において、C2-UFC1 と概ね同様の性状を示した。一方で、UFC パネル面の損傷状況、および主応力分布より、C2-UFC2 では、パネルの断面が変化する断面切り替わり位置において局所的に応力が集中し、パネル中央部への応力伝達が C2-UFC1 に比べ小さかったことによって、相対的に既存 RC 柱の負担せん断力が大きくなり、最大耐力以降の耐力低下につながったと考えられる。
- ・ 横方向のみの分割、および縦・横方向の分割共に、最大耐力への分割による影響は小さいと考えられるが、最大耐力後の耐力低下には影響が見られ、 $R=3.0\%$ において、C2-UFC2 では 15% 程度、C2-UFC3 では 46% 程度の耐力低下が見られた。
- ・ 光学式モーションキャプチャによる試験体の全体変形の計測結果は、歪ゲージ式変位計による計測結果と概ね同じ挙動を示すことを確認した。しかしながら、歪ゲージ式変位計による計測位置と光学式モーションキャプチャによる計測位置が試験体の北面と南面で異なっていることも影響し、光学式モーションキャプチャによる全体変形の計測と歪ゲージ式変位計による全体変形の計測の誤差は、保証精度 0.199mm に比べて大きい結果となった。

以上より、本実験で用いた分割方法の範囲においては、UFC パネルを横方向にのみ分割して貼り付けた補強、および UFC パネルを縦、および横方向に分割して貼り付けた補強ともに、終局強度までパネルが分離することなく、非分割の UFC パネルを貼り付けた補強と同程度の補強効果を得られることを確認した。一方、分割方法によっては最大耐力以降の変形性能が低下する可能性があることについては留意する必要があると考えられる。

参考文献

- [6-1] 谷昌典ほか：2016年熊本地震で被災したピロティ形式 RC 造集合住宅の有限要素解析，日本建築学会技術報告集，Vol.25，No.59，pp.171-176，2019
- [6-2] 国土交通省国土技術政策総合研究所，国立研究開発法人建築研究所監修：2020年版建築物の構造関係技術基準解説書，2020
- [6-3] 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2008