

論文 異なる構造性能を有する RC 造方立壁の損傷量比較

望月 勇杜*1・向井 智久*2・小原 拓*3・衣笠 秀行*4

要旨：本稿ではダブル配筋かつ端部に拘束域を持つ RC 造の方立壁，プレキャストプレストレス工法を用いた方立壁，UFC パネルを貼り付けた通常のシングル配筋の RC 造の方立壁の 3 体に対して静的載荷実験を行い，各試験体の破壊性状，損傷度-塑性率，修復労務量を比較し構造性能を評価した。比較した結果，塑性率に対する損傷度，サイクルごとの労務量ともにプレキャストプレストレス工法を用いた方立壁が優れており，UFC パネルを貼り付けたシングル配筋の方立壁は塑性率に対する損傷度，サイクルごとの労務量ともにダブル配筋の RC 造の方立壁と同等，またはそれ以上の性能を保有していた。

キーワード：方立壁，プレキャスト，プレストレストコンクリート，UFC パネル

1.はじめに

近年の大地震において，文献¹⁾に示されるように柱や梁のような主構造部材よりも構造性能の低い方立壁が大きく損傷する実例が多く示されており，これらの方立壁の損傷により窓やドアが歪むことで建物の継続使用性が阻害される。そのような問題に対して，既往の研究²⁾において損傷低減できる構造性能を持つ方立壁に対する検討もいくつかなされているものの，このような損傷を低減できる構造性能を有する RC 造の方立壁に対する損傷量の定量的評価に関する検討は十分とは言えない。

そこで本研究では，既往の研究から損傷低減できる構造性能を有する RC 造の方立壁 3 体に対して構造実験を行い，損傷低減効果に関する定量的評価を試みる。

2.実験概要

2.1 試験体概要

本実験における試験体を図-1 に，材料試験結果を表-1，2 に示す。方立壁試験体は全 3 体であり，基準試験体は従来型の鉄筋コンクリート造壁（以下，RC 壁）とし，損傷低減を目的とした圧着型アンボンド PCaPC 造壁（以下，PC 壁）及び UFC パネル貼付け RC 造壁（以下，UFC 壁）である。壁せい及び壁高さは各試験体で共通とし，それぞれ 900mm，2300mm とする。また，全試験体に 864kN の一定軸力（RC 壁で軸力比 0.2）を導入し，曲げ終局耐力は文献^{3,4,5)}を参考におおむね一致するように設計している。RC 壁と PC 壁の縦筋はダブル配筋とし，壁厚は 200mm である。また，PC 壁の PC 鋼棒は Φ17C 種を 2 本用いており，初期緊張力は一本あたり 123kN，合計 246kN である。さらに，PC 壁は上下両端部にモルタ

表-1 コンクリート系材料試験結果

材料		ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
コンクリート	RC	25.5	25.1	2.27
	PC	36.2	77.3	4.58
	UFC	24.0	28.4	2.56
無収縮モルタル	PC	36.9	106.9	3.98
	UFC	34.3	110.5	13.2
接着剤	UFC	5.73	50.0	13.2

表-2 鉄筋材料試験結果

鉄筋・PC 鋼棒径	ヤング係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D10	195	337	464
D13	191	362	578
Φ17	207	1184	1283

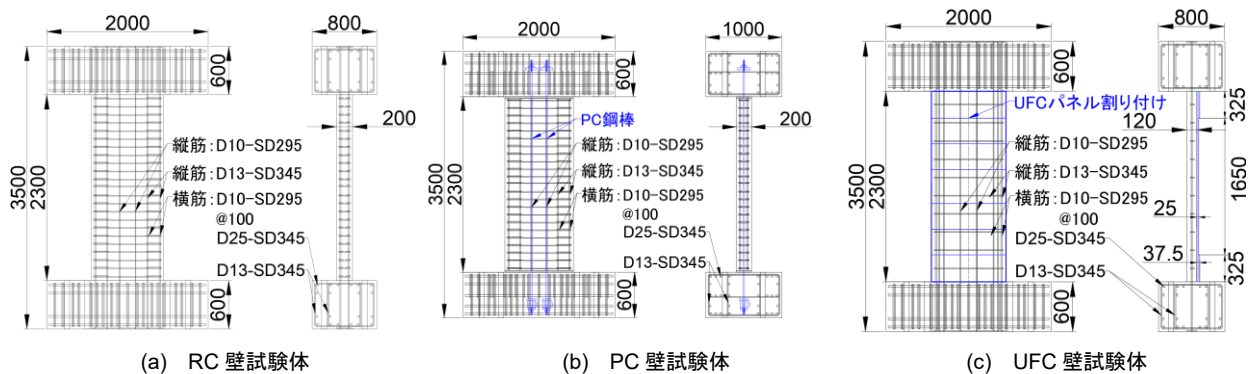


図-1 試験体配筋

*1 東京理科大学 創域理工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 国土交通省 国土技術政策総合研究所 構造基準研究室 室長 博士 (工学) (正会員)

*3 国土交通省 国土技術政策総合研究所 構造基準研究室 主任研究官 博士 (工学) (正会員)

*4 東京理科大学 創域理工学部建築学科 教授 博士 (工学) (正会員)

ル目地を有する。PC 壁のコンクリート強度は、RC 壁と曲げ耐力が合うように RC 壁より高い強度となっている。UFC 壁の鉄筋は通常の非構造壁を対象としシングル配筋、壁厚は 120 mm である。また、既往の研究⁹⁾より UFC パネルの横分割貼り付けしたものは 1 枚貼りのものと遜色ない構造耐力が発揮されることから、横分割で設置しており、その厚さは上下両端部に設置したものが 37.5mm であり、それ以外の部分では 25.0 mm である。さらに、UFC パネル間および上下両端部にはモルタル目地を設ける。

2.2. 加力計画

図-2 に荷重装置を示す。試験体頂部に設置した水平ジャッキにより試験体に水平力を与え、逆対称荷重を行った。壁頂部水平変位を壁高さ(=2300mm)で除した値を部材角 R とし、 $R=0.0625(\%)$ を 1 サイクル、 $R=0.125, 0.25, 0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0(\%)$ の各サイクルをそれぞれ 2 サイクルずつ行い、その後一方荷重($R=6.0\%$)を行う。なお、RC 壁と UFC 壁は $R=2.5\%$ 付近で急激に耐力低下し

ため実験を終了した。

2.3. 計測計画

実験では試験体に取り付けた変位計から変位を、壁の鉄筋、PC 鋼棒に貼り付けたひずみゲージからひずみをそれぞれ測定した。鉄筋、PC 鋼棒のひずみゲージ貼付位置を図-3 に、変位計設置位置を図-4 に示す。また、各サイクルピーク時・除荷時に最大幅を持つ曲げ・せん断・縦ひび割れの計測を、各負荷 2 サイクル目除荷時に詳細なひび割れ幅の計測を目視で行った。試験体正面から水

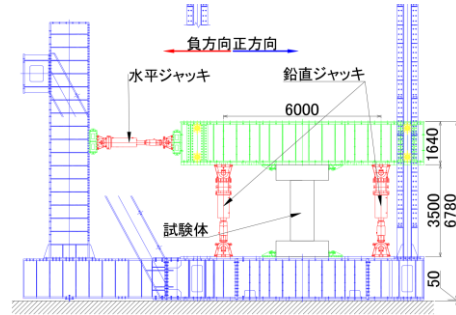


図-2 荷重装置

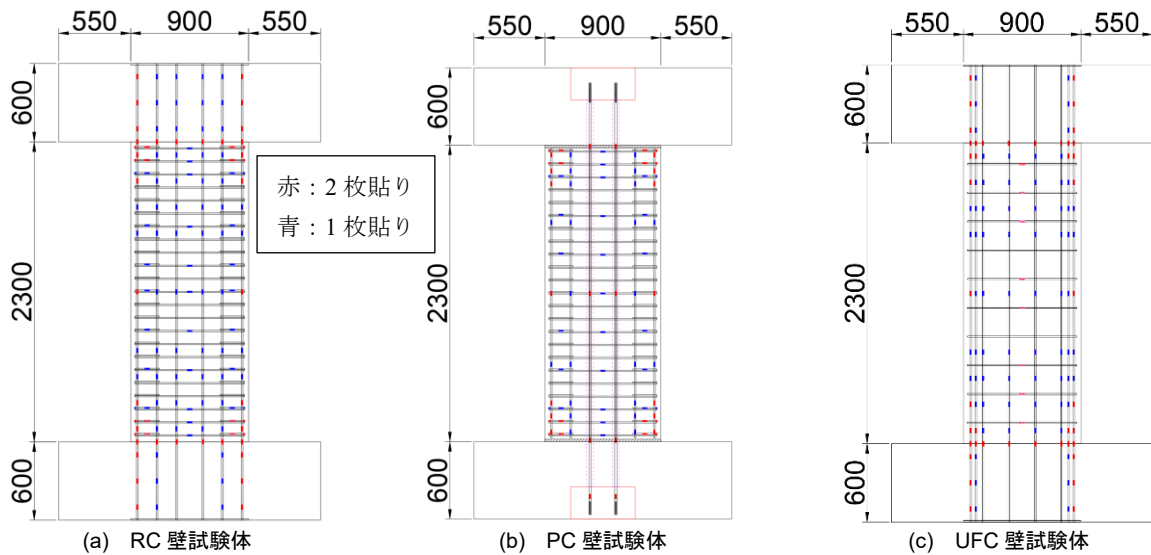


図-3 ひずみゲージ配置図

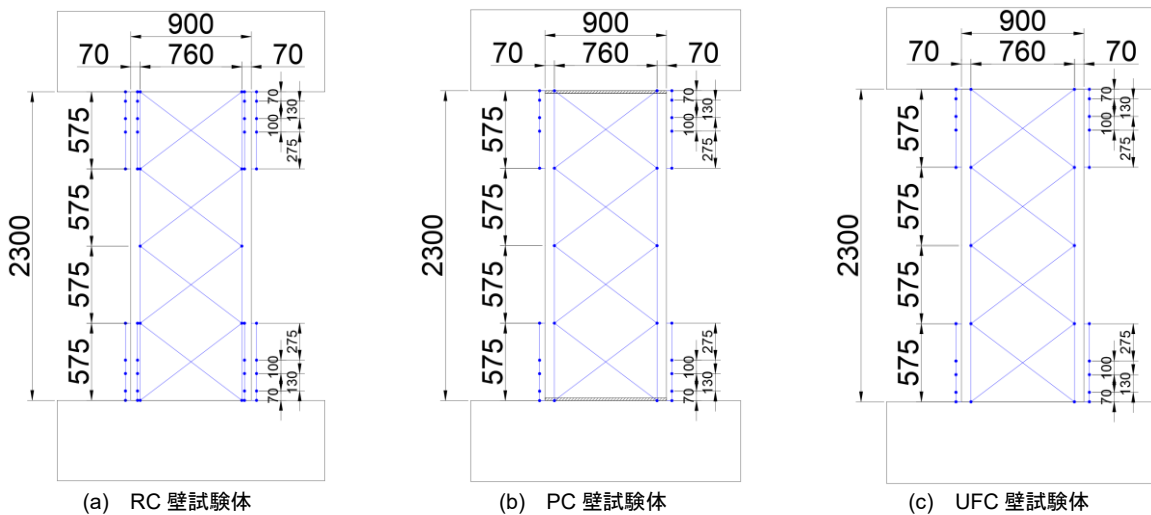


図-4 変位計配置図

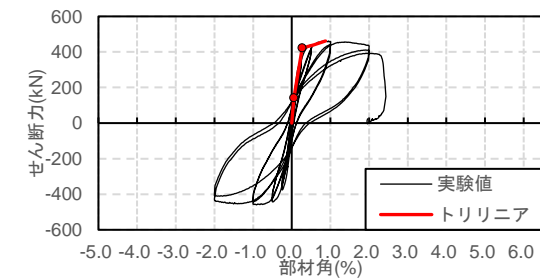
平距離で 5m の位置に高解像度カメラを設置し、各サイクルで撮影を行った。なお、ここで撮影した画像から除荷時に試験体書き込んだひび割れを読み取りひび割れ図を作成する。

3.実験による損傷状況

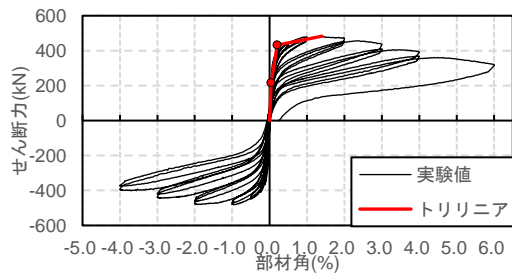
3.1 荷重変形関係

各試験体の部材角ごとの損傷状況を表-3~5 に示す。また、実験より得られた各試験体の骨格曲線および実験結果のトリリニア化曲線を図-5 に示す。なお、ここで示すせん断力は 2 台の水平ジャッキにより加力された力の水平方向成分と、4 台の鉛直ジャッキにより加力された力の水平方向成分の合計である。トリリニア化の手法(図-6 参照)は a. ~g. に示す。実験で得られたせん断力-部材角関係と実験結果の包絡線をトリリニア化した。

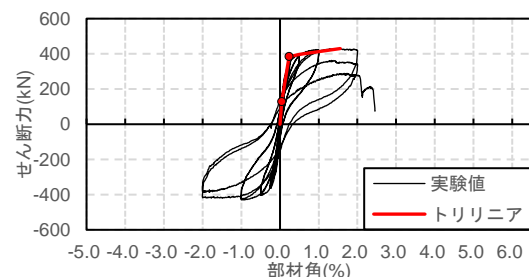
- 降伏点(=第2折れ点)の回転角 θ_y を未知数とする。
- 元の曲線の顕著な折れ曲がり点を仮の降伏点とし、その回転角を δ_y' と置く。
- 元の曲線の $2\delta_y' \sim 4\delta_y'$ 間の終局強度点までの範囲について、最小2乗法によって回帰直線を求める。
- cで得られた直線上に真の降伏点があると仮定し、降伏モーメント Q_y を δ_y の関数として表す。



(a) RC 壁試験体



(b) PC 壁試験体



(c) UFC 壁試験体
図-5 骨格曲線比較

e. RC 壁, UFC 壁では一般に用いられるひび割れ耐力と降伏耐力の比率(ここでは文献⁷⁾記載の 3.0 とした)から、第 1 折れ点のモーメント Q_c は $Q_y/3.0$ とし、PC 壁では文献⁴⁾に示された方法による計算値を元に第 1 折れ点のモーメント Q_c を設定する。

f. $2\delta_y'$ における消費エネルギー E が、元の曲線による消費エネルギーと等価となるとし、 δ_y を含む方程式(式 1)を立てる。

g. 計測された包絡線に近いグラフとなるように繰り返し δ_y を計算する。

$$E_{at2\delta_y'} = \int_0^{2\delta_y'} Qd\delta \quad (式 1)$$

上記の方法により求められた第 2 折れ点は RC 壁, PC 壁, UFC 壁でそれぞれ $R=0.27\%$, 0.21% , 0.23% とおおむね一致していた。

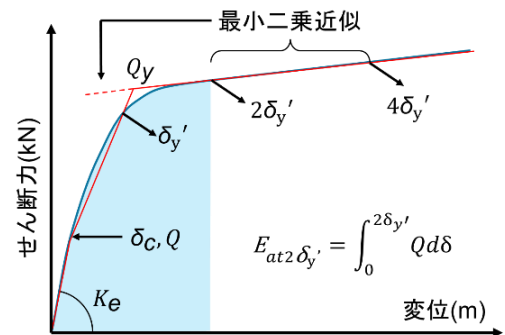


図-6 トリリニア化手法

表-3 RC 壁損傷進展

サイクル	主な損傷状況
R=0.125%	下端部に曲げひび割れが発生
R=0.25%	せん断ひび割れが発生
R=0.32%	縦筋が初めて引張降伏
R=0.50%	圧縮力による縦ひび割れが発生
R=0.62%	縦筋が初めて圧縮降伏
R=1.0%	コンクリートの圧縮破壊が発生
R=2.50%	急激に耐力低下, 端部の縦筋は座屈

表-4 PC 壁損傷進展

サイクル	主な損傷状況
R=0.125%	下端部に曲げひび割れが発生
R=0.50%	圧縮力による縦ひび割れが発生
R=1.00%	コンクリートの圧縮破壊が発生
R=1.28%	縦筋が初めて圧縮降伏
R=1.50%	緩やかに耐力低下し始める
R=1.57%	横筋が初めて引張降伏
R=2.57%	PC 鋼棒が初めて引張降伏

表-5 UFC 壁損傷進展

サイクル	主な損傷状況
R=0.125%	下端部に曲げひび割れが発生
R=0.19%	縦筋が初めて引張降伏
R=0.25%	剪断ひび割れが発生
R=0.50%	圧縮力による縦ひび割れが発生
R=1.00%	コンクリートの圧縮破壊が発生
R=2.50%	急激に耐力低下, 端部の縦筋は座屈

3.2 損傷性状

3.2.1 ひび割れ及び浮き・剥落性状

各試験体のひび割れ状況は図-7に示す。なお、残留ひび割れを赤、浮きを黄色、剥落を緑で示す。曲げひび割れ、圧縮力による縦ひび割れの発生が確認されたのは全試験体ともにそれぞれ $R=0.125\%$ 、 $R=0.5\%$ であった。RC壁と UFC壁はともにせん断ひび割れが主だつて進展しており、最大ひび割れ幅の推移もおおむね一致していた。さらに、特に $R=1.0\%$ から $R=2.0\%$ にかけてひび割れ長さが劇的に増加したことが共通している。また、RC壁のサイクルごとの合計ひび割れ長さは UFC壁よりも長く、 $R=1.0\%$ までは UFC壁の 2.7~4.0 倍、 $R=2.0\%$ では 1.1 倍の長さであった。PC壁は他の 2 体と比較してサイクルごとのひび割れ長さが短く、サイクルごとのひび割れ長さが最も長い RC壁の 0.04~0.07 倍程度の長さであり、せん断ひび割れは発生せず圧縮力による縦ひび割れとわずかな曲げひび割れが発生するのみであった。また、除荷時の残留ひび割れ幅も他の 2 体よりも小さかった。かぶりコンクリートの浮き・剥落は RC壁、PC壁、UFC壁でそれぞれ $R=1.0\%$ 、 $R=1.0\%$ 、 $R=0.5\%$ で初めて確認され、サイクルごとの比較では UFC壁が最も激しく、次いで RC壁の損傷が進行していた。そして、PC壁は他二つよりも損傷の進行が緩やかであり、最も損傷が激しい UFC壁の 0.25~0.38 倍程度の面積であった。

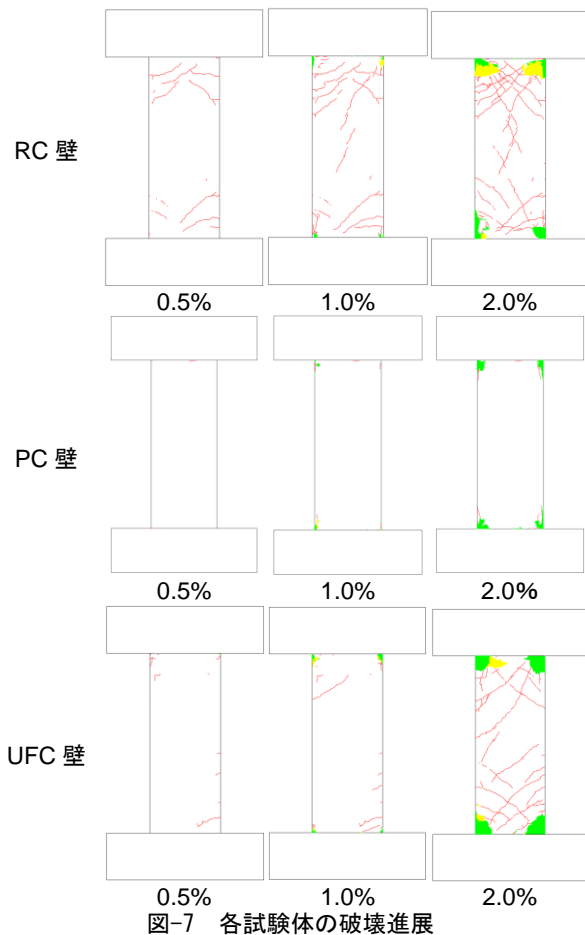


図-7 各試験体の破壊進展

3.2.2 鉄筋降伏性状

各試験体の鉄筋降伏状況を図-8に示す。RC壁は $R=0.32\%$ で下端縦筋(D13)、PC壁は $R=1.57\%$ で下端側面の横筋、UFC壁は $R=0.19\%$ で下端縦筋(D10)が初めて引張降伏した。さらに、RC壁は $R=0.62\%$ で下端スタブ内縦筋(D13)が圧縮降伏、PC壁は $R=1.28\%$ で上端縦筋(D13)が圧縮降伏した。また、RC壁と UFC壁は主に縦筋が降伏しており、サイクルの進展とともに降伏範囲が鉛直方向中央に向け拡大し、耐力低下時点で両端部から 500mm 程度までの縦筋が全体的に降伏していた。一方、PC壁は主に端部拘束筋が降伏しているものの、初降伏からの進展は緩やかであり、実験終了時点でも両端部から 200mm 程度までの試験体の四隅の拘束筋が降伏するに留まった。PC壁の PC鋼棒は $R=2.57\%$ で初めて降伏し、 $R=3.57\%$ までに 2 本の PC鋼棒のすべての計測点において降伏が確認された。

3.2.3 等価粘性減衰定数

各試験体の等価粘性減衰定数 h を図-9に示す。RC壁と UFC壁はおおむね一致しており、荷重開始から $R=0.125\%$ にかけて新規ひび割れの発生に伴い値がやや減少し、 $R=0.125\%$ 以降はひび割れの進展、鉄筋の降伏に

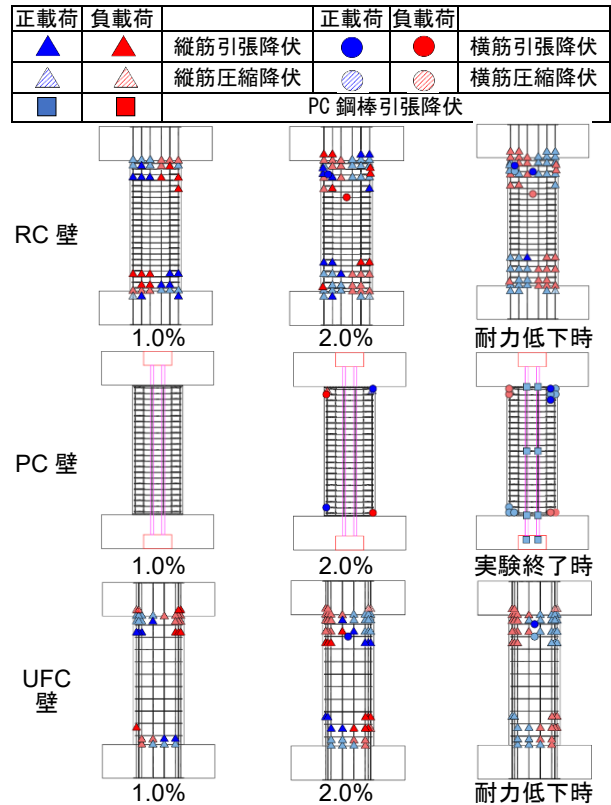


図-8 各試験体の破壊進展

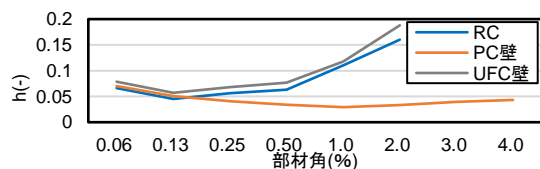


図-9 等価粘性減衰定数比較

表-6 各損傷度の評価方法 (*は残留ひび割れ幅を示す)

損傷度	I	II	III	IV	V
文献 ⁹⁾	ひび割れ発生	梁主筋降伏または0.2mm以上*	1mm以上*	かぶりコンクリートの剥落	鉄筋座屈
文献 ⁴⁾	0.2mm以下*	0.2mm~0.5mm*	0.5mm~1mm*	1mm以上*	PC鋼棒破断
提案手法	ひび割れ発生	0.2mm以上*	1mm以上*	かぶりコンクリートの剥落	PC鋼棒破断

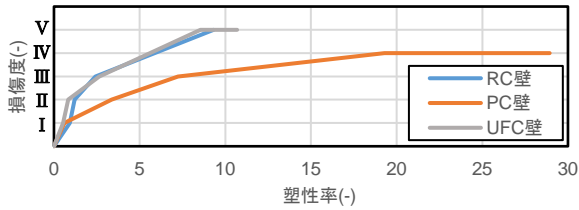


図-10 損傷度-塑性率比較

伴い値が上昇し、さらに、R=1.0%以降コンクリートの圧壊も進行したことでさらに値の上昇に寄与したものと考えられる。PC壁はRC壁、UFC壁よりも全体的に値が下回っており、他2体の試験体と異なりR=0.13%以降ほとんどひび割れが発生しなかったことから、履歴エネルギー吸収が少ないことがわかる。また、PC壁はR=1.0%以降に鉄筋降伏やコンクリート圧壊が進行したため値の上昇が起こったと考えられるが、どちらの損傷の進展もRC壁、UFC壁より抑えられていたため、値の上昇は緩やかであったと考えられる。

4. 損傷度と塑性率の関係

4.1 損傷度の定義

各試験体に対し、部材損傷度の評価を行う。本検討で用いる評価手法一覧を表-6に示す。RC壁及びUFC壁においては文献⁹⁾に示された評価手法を用いる。PC壁においては文献⁴⁾に示されたものがあるが、これは損傷度I~IVまでをひび割れ幅のみで評価しているが、実験で明らかになりコンクリートの剥落損傷が目立ったことから損傷度の評価方法としてコンクリートの圧縮時の損傷を考慮した上で、RC壁・UFC壁と同様の損傷状態で比較することを目的に、文献⁹⁾に示された評価手法をPC構造に適用して評価する。主筋降伏はひずみゲージのデータより判断し、かぶりコンクリートの剥落はかぶりコンクリートの大部分が剥落し主筋が露出した状態とする。残留ひび割れ幅はサイクルごとに計測した値を直線で結ぶことでサイクル間を補間する。表-7に荷重-変形角関係の実験値のトリリニア化による第2折れ点時の部材角を示す。

4.2 損傷度-塑性率の分析

図-10に各損傷度到達時点の塑性率を示す。損傷度Iの到達点はひび割れ発生点であるが、発生した変形角をピンポイントで特定することは難しく、今回の計測ではひび割れが目視で初めて確認されたサイクルとしている。RC壁とUFC壁の損傷度II到達はどちらも縦筋の降伏によるものであり、到達する塑性率もほぼ一致していた。

表-7 第2折れ点時部材角

RC壁	PC壁	UFC壁
0.27%	0.21%	0.23%

表-8 ひび割れと剥落損傷の修復時間係数

損傷の種類	修復時間係数β
ひび割れ幅0.2mm未満	$\beta_1=0.03(\text{人日/m})$
ひび割れ幅0.2mm以上	$\beta_2=0.24(\text{人日/m})$
コンクリート剥落	$\beta_3=7.1(\text{人日/m}^2)$

また、その後の損傷度III、IV、Vの到達に到達する塑性率もほぼ一致している。シングル配筋で壁厚も薄い方立壁に対してUFCパネルを貼り付けたUFC壁はダブル配筋でより壁厚の厚い本実験におけるRC壁と同等まで性能を引き上げられたことが確認できる。PC壁は他の2体と比較すると、損傷度Iに到達する塑性率はほぼ同じであるものの、その後の損傷度II、III、IVへ到達する塑性率は4倍程度の差が生まれている。

5. 修復に要する労務量

5.1 部材の修復労務量の計算方法

本論では部材に生じる各種損傷を定量評価するために、文献⁹⁾による部材修復労務量に着目する。部材の修復労務量Lは、発生した各種の損傷についての労務量を総和することにより次式で算出される。

$$L = \sum(Q_i \times \beta_i) \quad (\text{式} 2)$$

ここで、 Q_i は損傷の種類ごとの施工数量である。また、 β_i は修復時間係数であり、(国研)建築研究所の研究プロジェクト¹⁰⁾により作成された修復性評価データベースのうち、ひび割れ幅0.2mm未満、0.2mm以上及びコンクリートの剥落の3種の損傷の β_i を用いて以下の式で計算する。なお、本研究で用いた β_i は表-8に示す。

$$L = Q_1(m) \times \beta_1 + Q_2(m) \times \beta_2 + Q_3(m^2) \times \beta_3 \quad (\text{式} 3)$$

ここで、 Q_1 :ひび割れ幅0.2mm未満のひび割れ長さ(m)

Q_2 :ひび割れ幅0.2mm以上のひび割れ長さ(m)

Q_3 :剥落面積(m²)

5.2 部材の修復労務量の分析

図-11に上記の方法により算出した各試験体の部材修復時間-部材角関係を示し、一般的なRC方立壁の最大耐力が発揮される部材角R=0.5~1.0%の結果を拡大したものを図-12に示す。なお、棒グラフは損傷の種類による部材修復労務量の内訳を示しており、折れ線グラフは各損傷の労務量の合計を示している。また、PC壁はPC鋼棒降伏前までのサイクルを示す。

全試験体に共通する傾向として図-11より、R=1.0%で

ひび割れによる労務量が大きく増加し、 $R=2.0\%$ で浮き・剥落による労務量が大きく増加することが挙げられる。サイクルごとのひび割れ労務量は RC 壁が 3 体の試験体の中で最も大きく、サイクルごとの浮き・剥落による労務量は UFC 壁が最も大きい。

図-12 より、 $R=0.5, 1.0\%$ 時点の挙動に着目すると、UFC 壁の全体労務量はそれぞれ RC 壁の 0.24 倍、0.52 倍に抑えられており、この範囲内では UFC 壁は RC 壁を上回る損傷抑制効果を発揮できる。図-11 より $R=2.0\%$ サイクルでの RC 壁と UFC 壁を比較すると、相対的に労務量増加に影響の少ない幅 0.2mm 未満のひび割れ長さは RC 壁が長いものの、幅 0.2mm 以上のひび割れは同程度であり、剥落による労務量は UFC 壁の方が大きいことから、UFC 壁と RC 壁の合計された労務量は同程度である。PC 壁はサイクルごとのひび割れおよび浮き・剥落による労務量が 3 体の中で最も小さく、PC 壁の 2.0%時点での合計労務量は RC 壁・UFC 壁と比べ 0.25 倍程度にとどまった。

6.まとめ

損傷低減できる構造性能を有する RC 造方立壁に対して構造実験を行い、損傷低減効果に関する定量的評価を行い得られた知見を以下に示す。

- ・実験による骨格曲線をトリリニア化した際の第 2 折れ点の部材角はすべての試験体でおおむね一致していた。RC 壁と UFC 壁の等価粘性減衰定数はおおむね一致しており、PC 壁は他 2 体と比較して全体的に小さい値となった。PC 壁は他の 2 体と比較してひび割れ、浮き・剥落の進展が大きく抑えられており、サイクルごとのひび割れ長さが最も長い RC 壁の 0.04~0.07 倍程度の長さ、サイクルごとの浮き・剥落面積が最も広い UFC 壁の 0.25~0.38 倍の面積であった。

- ・RC 壁と UFC 壁の損傷度と塑性率の関係には相関がみられ、全ての損傷度で到達する塑性率はほぼ一致しており、UFC パネルを貼り付けたシングル配筋の RC 躯体部分に対する損傷抑制効果が確認された。PC 壁は他の 2 体と比較すると、損傷度 I に到達する塑性率はほぼ同じであるが、損傷度 II, III, IV への到達する塑性率は 4.0 倍程度大きく PC 壁の損傷低減効果が明らかとなった。

- ・ $R=0.5\%, 1.0\%$ に着目すると UFC 壁の全体労務量はそれぞれ RC 壁の 0.24 倍、0.52 倍に抑えられており、この変形領域では UFC 壁は RC 壁を上回る損傷抑制効果を発揮できる。PC 壁はひび割れ労務量、浮き・剥落労務量が 3 体の中で最も小さく、 $R=2.0\%$ 時点での合計労務量は RC 壁・UFC 壁のもの 0.25 倍にとどまった。

謝辞

本研究は、国土技術政策総合研究所において実施され

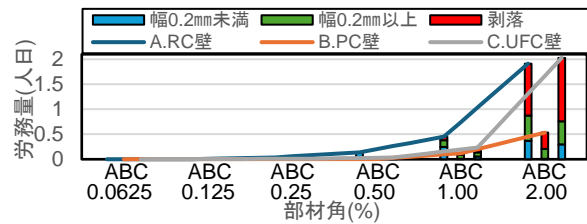


図-11 労務量比較

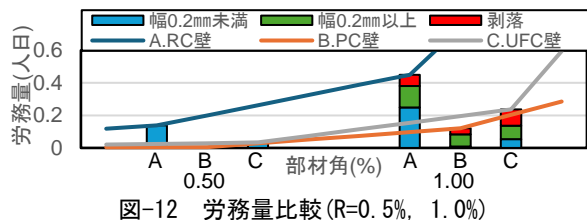


図-12 労務量比較 ($R=0.5\%, 1.0\%$)

ている総合技術開発プロジェクト「社会環境の変化に対応した住宅・建築物の性能評価技術の開発」の一環で実施されたものである。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1)国土技術政策総合研究所，建築研究所：熊本地震建築物被害調査報告（速報），2016.9
- 2)谷昌典，Eko Yuniarsyah，向井智久，河野進：損傷低減及び構造性能改善を目指した RC 方立壁の実大実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，2015
- 3)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の性能評価型設計施工 指針(案)・同解説，2015
- 4)日本建築学会：プレストレストコンクリート造建築物の性能評価型設計施工指針(案)・同解説，日本建築学会，2015.2
- 5)三角和歩，向井智久，渡辺秀和，衣笠秀行：UFC パネルを用いて補強された RC 造ピロティ架構の構造性能 評価のための解析モデルに関する研究，日本建築学会技術報告集，Vol.28，No.69，667-672，2022.6
- 6)服部翼，向井智久，渡辺秀和，谷昌典：分割 UFC パネルで補強した RC 造ピロティ柱に関する実験研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.2，2022
- 7)建設省大臣官房技術調査室監修，建築研究振興協会編：鉄筋コンクリート造建築物の性能評価ガイドライン，技法堂出版，2000.8
- 8)国土交通省住宅局建築指導課：震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針，日本建築防災学会，2005.12
- 9)衣笠秀行，向井智久：建築物の地震後機能回復性の観点からの損傷評価指標，日本建築学会構造系論文集，Vol.84，No.757，pp.425-435，2019.3
- 10)向井智久，ほか 4 名：災害後の建築物の機能維持・早期回復を目指した構造性能評価システムの開発 成果報告書，建築研究所 BRI Proceedings No.20，2011.1