

# 論文 プレキャスト UFC パネル接着面のせん断すべり耐力に関する研究

渡邊 秀和\*1・向井 智久\*2・石岡 拓\*3

**要旨：**既往の研究では、既存建築物における耐震補強工法の開発の一つとして、鉄筋コンクリート造建築物の既存躯体に UFC パネルを接着する工法の開発が行われてきた。過去に実施した部材実験では、UFC パネルと既存躯体との接着面においてせん断すべり破壊が生じたことが報告されている。そこで本研究では、このせん断すべり耐力の検討を目的として、二面せん断実験を実施した。実験の結果、10 体の試験体中 6 体が既存 RC 部におけるせん断すべり破壊によって耐力が決定した。既往の評価法を用いて耐力を評価した結果、実験結果を安全に評価することができた。

**キーワード：**耐震補強, UFC パネル, せん断すべり破壊

## 1. はじめに

東日本大震災では、集合住宅の玄関周りの方立壁、庁舎建築物の開口周辺の非構造壁における被害が生じ、これらの被害により建築物の継続使用性に支障をきたす事例が報告されている。建築物の地震後継続使用性を確保するために、プレキャストの超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）パネルを既存躯体に接着する補強工法が提案されており、UFC パネルを用いることで、損傷低減や構造性能改善に効果があることが分かっている<sup>1, 2, 3)</sup>。文献 2) では本工法を用いた袖壁付き柱試験体の部材実験について報告されており、そのうち試験体 CW-SR は UFC パネルの剥落によって、最大耐力が決定したことが報告されている。この文献 2) の中で、既存躯体と UFC パネル間の接着面のせん断伝達によって応力が伝達されていることを仮定し、試験体の最大耐力の評価を行なっている。しかし、既存躯体と UFC パネル間の接着面のせん断耐力については、既往の文献からの引用によって決定しているため、本工法に即したせん断耐力の検討を行なう必要があるということが、文献 2) において報告されている。

そこで本研究では、UFC パネル接着面のせん断すべり耐力の検討を目的とした要素実験を行なった。本論文では、その要素実験の結果および検討の結果を報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体諸元

本研究では、文献 2) の袖壁付き柱部材の袖壁部分に UFC パネルが接着されている状態を想定して試験体製作を行った。本研究では、袖壁付き柱部材の袖壁部分全体が圧縮領域になると仮定し、袖壁付き柱試験体に貼付した最下部の UFC パネルを参考に、要素試験体の UFC

パネルの幅と高さを 440mm×315mm とした。

実験は、2017 年度と 2018 年度に二回実施した。2017 年度の実験では、接着面積と UFC パネルの厚さをパラメータとした 4 体の試験体を用いて実験を実施した。その結果 3 体の試験体において、既存 RC 部に加力方向に割裂ひび割れが発生してしまい、本研究で想定した破壊結果が得られなかった。ただし、B-30 だけは UFC パネルと既存 RC 部接着面のせん断すべり破壊が発生した。この結果を受けて、2018 年度はせん断すべり破壊を計画した 6 体の試験体を追加で作成し実験を行った。図-1 に試験体一覧図を示す。本研究で作成した試験体は、A シリーズ 4 体、B シリーズ 4 体、C シリーズ 2 体の合計 10 体である。それぞれのシリーズの既存 RC 部の試験体配筋図を図-2 に示す。試験体は、図-2 に示した既存 RC 部を 2 つ用意し、図-1 のように既存 RC 部の両面に UFC パネルで接着したものを 1 体の試験体としている。

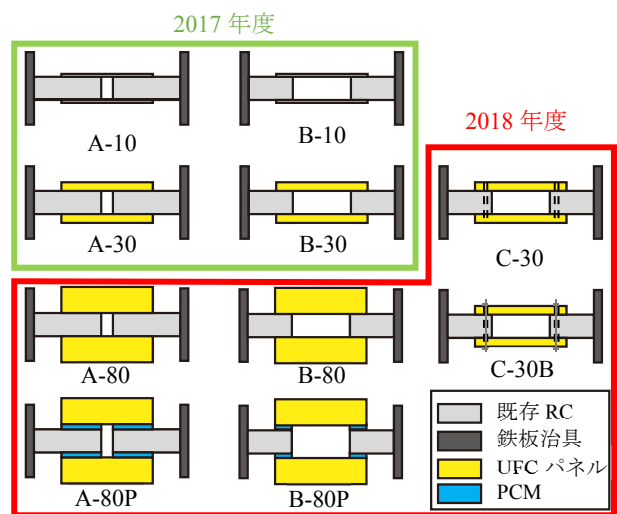
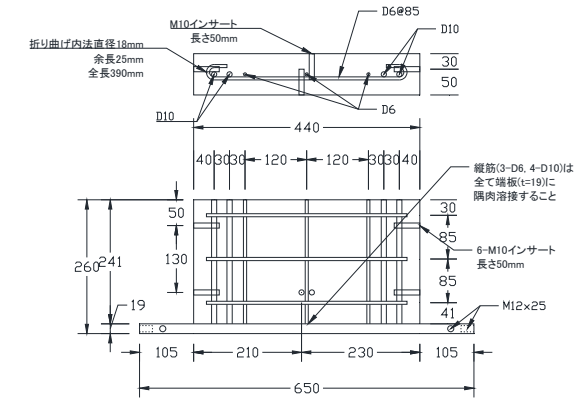


図-1 試験体一覧図

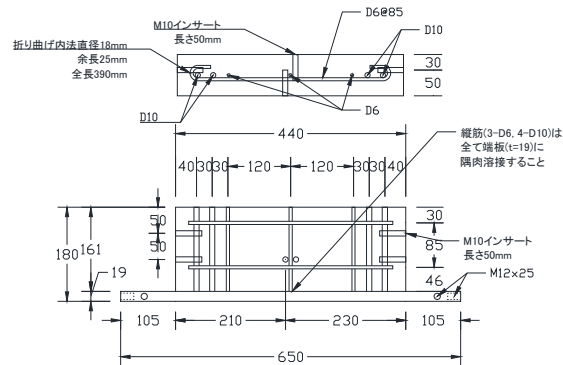
\*1 国立研究開発法人 建築研究所 構造研究グループ 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

\*2 国立研究開発法人 建築研究所 構造研究グループ 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

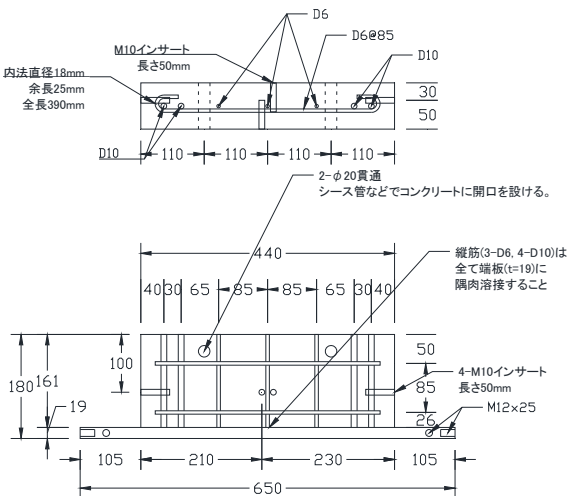
\*3 戸田建設株式会社 技術開発センター 修士 (工学) (正会員)



(a) A シリーズ (単位: mm)



(b) B シリーズ (単位: mm)



(c) C シリーズ (単位: mm)

図-2 試験体配筋図

試験体概要を表-1 に示す。試験体のパラメータは、UFC パネルの接着面積、UFC パネルの厚さ、面外方向に拘束するボルトの有無、ポリマーセメントモルタル（以下、PCM とする）の有無であり、それぞれの影響についての検討を行う。既往の研究<sup>2,3)</sup>では、UFC パネル接着時にボルトを用いて接着を行っているため、C-30（ボルトなし）および C-30B（ボルト有り）を作成し、ボルト（M10、強度区分 10.9）の面外拘束効果の影響を確認する。既往の施工実験<sup>4)</sup>では RC 既存躯体において不陸が

あったため、不陸調整材として PCM が必要であった。そこで RC 既存部と接着材との間に PCM を用いる A-80P、B-80P を作成し、不陸調整材を使用した場合の接着面のせん断すべり耐力を検討する試験体とした。材料試験結果を表-2 に示す。

表-1 試験体諸元

(a) 2017 年度シリーズ

試験体名	A-10	A-30	B-10	B-30
UFCパネル	440mm×315mm			
UFCパネル穴	穴なし			
UFCパネル厚さ	10mm	30mm	10mm	30mm
UFCパネル接着面	440mm×275mm	440mm×115mm		
接着面積 (mm <sup>2</sup> )	121000	50600		
コンクリート圧縮強度	22.5MPa			

(b) 2018 年度シリーズ

試験体名	A-80	A-80P	B-80	B-80P	C-30	C-30B
UFCパネル	440mm×315mm					
UFCパネル穴	穴なし				4-φ20	
UFCパネル厚さ	80mm	80mm	80mm	80mm	30mm	30mm
UFCパネル接着面	440mm×240mm	440mm×115mm	440mm×115mm	440mm×115mm		
接着面積 (mm <sup>2</sup> )	105600	50600	50600	49343		
コンクリート圧縮強度	26.7MPa					

表-2 材料特性一覧

(a) コンクリート

	使用部位	ヤング係数 ( $\times 10^3 \text{N/mm}^2$ )	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	割裂強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	備考
2017年度シリーズ	既存RC部	24.8	22.5	2.11	材齢 43 日
2018年度シリーズ	既存RC部	23.9	26.7	2.35	材齢 45 日

(b) PCM 材料特性

	使用部位	ヤング係数 ( $\times 10^3 \text{N/mm}^2$ )	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	割裂強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	備考
2018年度シリーズ	断面補修材	16.6	35.8	3.10	材齢 34 日

(c) UFC パネル材料特性

	使用部位	ヤング係数 ( $\times 10^3 \text{N/mm}^2$ )	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	曲げ強度 ( $\text{N/mm}^2$ )
2017年度シリーズ	UFCパネル	-	228	33.3
2018年度シリーズ	UFCパネル	56.2	256	54.1

(d) 接着剤材料特性

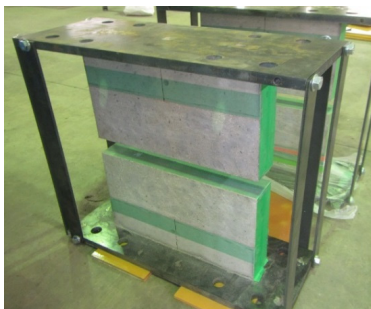
項目	単位	試験条件	保証値	試験値
比重 (固化物)	-	23°C	1.65~1.85	1.69
可使用時間	分	23°C	30以上	91
粘度 (混合物)	mPa・s	23°C	パテ状	パテ状
引張せん断強度	$\text{N/mm}^2$	23°Cで 7日間 養生	10以上	18.8
コンクリート接着強度	$\text{N/mm}^2$		1.5以上	4.5
圧縮強度	$\text{N/mm}^2$		50以上	69.2
圧縮弾性率	$\text{N/mm}^2$		1,000以上	4,750

## 2.2 UFC パネルの接着方法

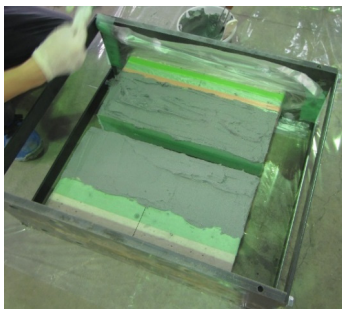
A-80P、B-80P 以外の試験体は、既存 RC 部の両側にエポキシ樹脂系の接着材を用いて UFC パネルを接着した。UFC パネルの施工前に、写真-1(a)に示すように試験体の RC 部が所定の位置を保持出来るように鉄骨治具を用いて固定した。その後、写真-1(b)に示すように試験体

を横向きにして、パネルの貼り付け位置に接着材を2mm程度塗付けた。ただし、このパネルの貼り付け位置には部材実験の時と同じように、あらかじめ#24のサンドペーパーを用いて目荒らしている。なお、UFCパネルのRC部との貼り付け面は、UFCパネルのプレキャスト時の打設面とした。その後、接着材の強度が十分に発現するまで、UFCパネルとRC部を緊結した状態を保持した。ボルト穴を設けたCシリーズでは、ボルト穴に接着剤が入らないように、穴部分を養生して施工を行った。

A-80P、B-80Pは、既存RC部を打設後に、脱型・目荒らしの後、UFCパネル接着の前にPCMの塗りつけを行った。既存RC部打設後11日目に、専用のプライマー塗布後、写真-1(c)に示すように金属コテを用いてPCMを10mm程度の厚さで塗付けた。その後既存RC部打設後28日目で、UFCパネルの貼り付けを行った。ただし、PCMを塗付け後にPCMの目荒らしは行わなかった。UFCパネルの貼り付け手順は、他の試験体と同様に行ったが、接着材厚さは5mmとした。



(a) 試験体固定状況 (A-10)



(b) 接着材塗付け (A-10)



(c) PCM塗付け (A-80P)

写真-1 UFCパネルの接着施工手順

### 2.3 加力方法

実験は図-3に示すような、自己釣り合い型の荷重フレームを用いて行った。この時、油圧ジャッキの軸芯と試験体の軸芯が一致するように、試験体端部の鉄板治具(厚さ19mm)と荷重用の鉄骨治具を緊結・固定した。その後、荷重装置に取り付けた油圧ジャッキを用いて、試験体の中央に圧縮力を作用させた。このとき、試験体の既存RC部とUFCパネル間の接合面にはせん断力が作用する。実験では、一方向の押し切り荷重を行った。また、図-4に変位計取付状況を示す。試験体の軸変形はこの2本の変位計の平均値とした。

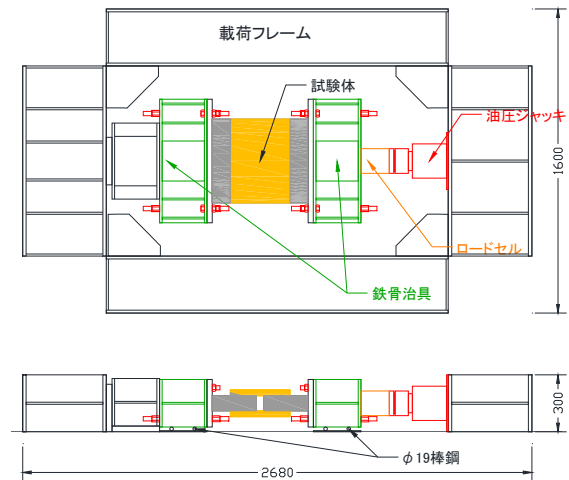


図-3 荷重装置および試験体設置状況 (A-30の例)

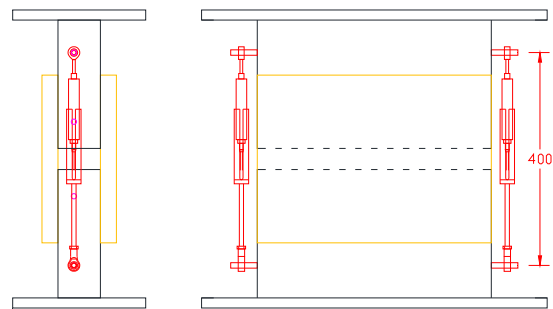


図-4 変位計取付状況 (A-30の例)

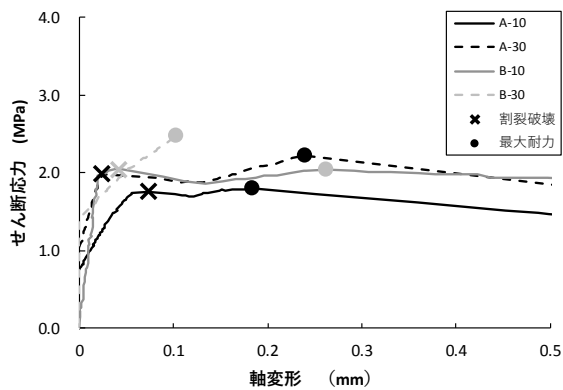
### 3. 実験経過および破壊性状

図-5に2017年度に実施した試験体の荷重変形関係を示す。試験体の荷重は、UFCパネルの貼り付け面積で除した、平均せん断応力として示している。B-30以外の3体は、それぞれ×の場所で既存RC部加力方向に割裂ひび割れが生じて割裂破壊が起こった(写真-2(b),(c))。その後、UFCパネルが面外方向にはらみ出すような湾曲するような挙動が見られた。試験体のせん断応力は変形が進むにつれ徐々に上昇し、軸変形が0.2mm程度で最大耐力を記録した。試験終了後、UFCパネルに加力方向と

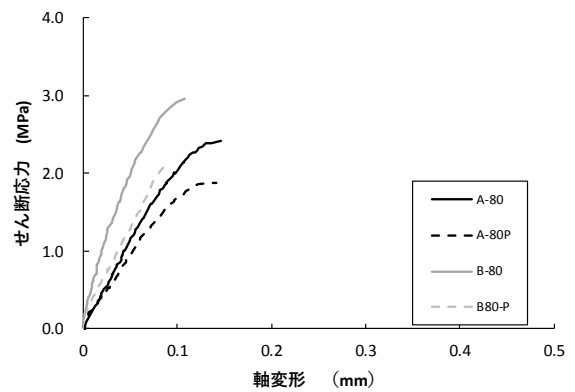
直交する面外曲げひび割れの発生を確認した（写真－2(a)）。このことから、試験体中央部の UFC パネルと RC 既存部とが接着していない部分の剛性およびひび割れ耐力が小さかったために、この試験体中央部で破壊が起き、設計時に想定していた UFC パネル接着面のせん断すべり破壊とならなかった。この破壊は、本研究で目的としている袖壁付き柱部材の袖壁部分を模擬した接着面ではない箇所の破壊である。また、既往の袖壁付き柱部材でもこのような UFC パネルの曲げ破壊は報告されておらず、このような破壊は UFC パネルを袖壁付き柱部材に貼付ける補強では発生しないものであるため、耐力評価は行わないこととする。一方、B-30 では、加力方向のひび割れが発生する前に接着剤と既存 RC 部の接着面において既存 RC 部が削りとられるように、せん断すべり破壊が発生し、UFC パネルが既存 RC 部から脆性的に剥離したため、実験を終了した。

図－6(a), (b)に 2018 年度に実施した試験体の荷重変形関係を示す。一部の試験体に、加力方向の小さな割裂ひび割れが見られたものの、全ての試験体がせん断すべり破壊によって試験体の最大耐力が決定した。A-80, B-80, B-80P, C-30, C-30B は B-30 と同様に、接着剤と既存 RC 部の接着面における既存 RC 部の損傷によって、せん断すべり破壊が発生した（写真－3）。

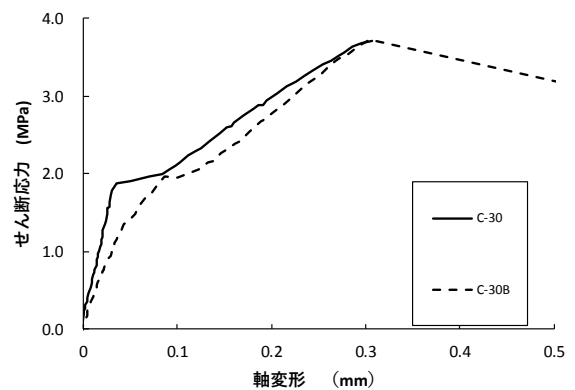
一方で、PCM を使用した A-80P では、片面（写真－4(a) の上側）は接着剤と UFC パネルの接着面において UFC パネルを削り取るような破壊であった。もう片面（写真－4(a) の下側）では接着剤と既存 RC 部の接着面において既存 RC 部が削りとられるような破壊と、PCM と接着剤との剥離の破壊が混在していた。このように A-80P の破壊面を一つに断定することが出来ず、複雑な破壊となったため、本研究では A-80P の破壊性状を定義せず、耐力評価は行わないこととする。



図－5 荷重－変形関係(2017年度試験体)



(a) 2018 年度試験体 A シリーズ, B シリーズ

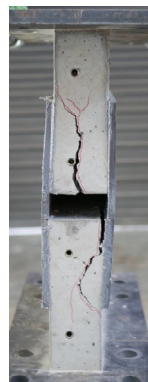


(b) 2018 年度試験体 C シリーズ

図－6 荷重－変形関係



(a) 試験体上面

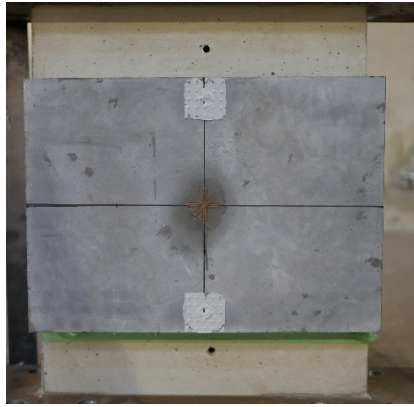


(b) 左側側面



(c) 右側側面

写真－2 最終破壊状況 (A-10)



(a) 試験体上面

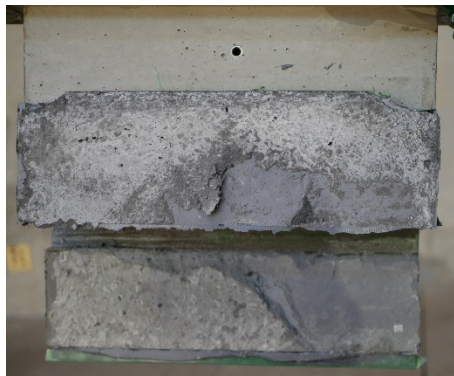


(b) 左側側面

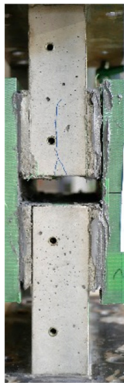


(c) 右側側面

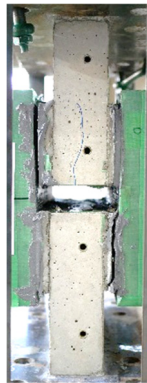
写真-3 最終破壊状況 (A-80)



(a) 試験体上面



(b) 左側側面



(c) 右側側面

写真-4 最終破壊状況 (A-80P)

## 4. 実験の考察

### 4.1 試験体ごとの比較

実験結果一覧を表-3に示す。表-3より、試験体ごとに比較して得られた知見を下記に示す。

#### (1) 接着面積の比較

A-80とB-80を比べると、接着面積が小さいB-80の平均せん断応力実験値が大きくなった。これは、パネル接着面の縁部分に応力が集中していることが原因の一つと考えられる。例えば村越ら<sup>5)</sup>は、高力ボルト接着接合継手の2面せん断実験において、接着剤層のせん断応力分布を計測した結果、接着面の縁部分のせん断応力が大きくなっていることを報告している。この報告を参考に、図-7のように縁部分に応力が大きく、パネルの中央部分では一定となるせん断応力分布を仮定する。この分布では、応力が大きい縁部分が試験体耐力に有利に働き、この部分でせん断力をより多く負担できる。これは、接着面積が小さいB-80では、A-80と比べると応力が大きい縁部分が全接着面積に対して相対的に広いため、平均せん断応力が大きくなった実験結果と整合する。

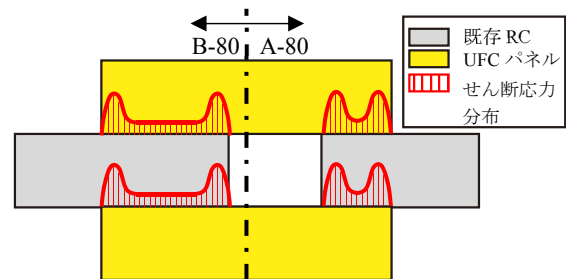


図-7 せん断応力分布の仮定 (模式図)

#### (2) 不陸調整材の影響

B-80とB-80Pを比べると、不陸調整材を用いたB-80Pの実験値が小さくなった。また、A-80Pでは、既存RC部以外の場所でもせん断すべり破壊が起こっている。

#### (3) ボルトの影響

C-30とC-30Bを比べると、試験体の耐力がほぼ一緒となりまた破壊性状も同様であった。今回の実験のようにせん断すべり破壊する場合は、耐力にボルトの影響がないと考えられる。

#### (4) 試験体に設けた穴の影響

B-30とC-30を比べて、試験体に設けた穴の影響を調べる。コンクリートの打設時期が異なるため、それぞれの最大せん断応力を既存RC部コンクリートの一軸圧縮強度の平方根で除すと、B-30で0.522、C-30試験体で0.718となり、穴が設けられたC-30の方が大きな値となった。これは、図-7のようにパネルの縁だけでなく、穴の縁部分のせん断応力が大きくなっていることが原因の一つと考えられる。

表-3 実験結果および計算値一覧

(a) 2017 年度シリーズ

試験体名	A-10	A-30	B-10	B-30
最大耐力 (kN)	217.1	269.4	103.9	125.2
最大耐力時平均せん断応力 (N/mm <sup>2</sup> )	1.79	2.23	2.05	2.47
割裂ひび割れ時平均せん断応力 (N/mm <sup>2</sup> )	1.76	1.98	2.05	-
破壊性状	割裂	割裂	割裂	せん断
計算せん断応力 (N/mm <sup>2</sup> )	-	-	-	1.57
実/計	-	-	-	1.58

(b) 2018 年度シリーズ

試験体名	A-80	A-80P	B-80	B-80P	C-30	C-30B
最大耐力 (kN)	255.4	197.5	149.8	106.6	183.1	183.5
最大耐力時平均せん断応力 (N/mm <sup>2</sup> )	2.42	1.87	2.96	2.11	3.71	3.72
割裂ひび割れ時平均せん断応力 (N/mm <sup>2</sup> )	-	-	-	-	-	-
破壊性状	せん断	不明	せん断	せん断	せん断	せん断
計算せん断応力 (N/mm <sup>2</sup> )	1.71	-	1.71	1.71	1.71	1.71
実/計	1.42	-	1.74	1.24	2.18	2.18

#### 4.2 試験体の耐力評価

##### (1) 計算値と平均せん断応力との比較

文献2)で提案されている式(1)を用いて、既存 RC 部におけるせん断すべり破壊した6体の試験体について耐力評価を行った。

$$\tau_s = 0.33\sqrt{\sigma_B} \quad (1)$$

$\tau_s$ : せん断すべり耐力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_B$ : 既存 RC 部コンクリートの一軸圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

計算結果を表-3に示す。実験値/計算値が1.24~2.18とばらつきはあるものの、全ての試験体で安全側に評価出来た。実験値/計算値がばらつくのは、4.1節(1)で示したようにパネルの縁部分の応力集中により、パネル接着面積に依存して平均せん断応力が変わることが原因と考えられる。

##### (2) パネル縁部分の応力集中の影響を除いた検討

ここでは、本研究で仮定した図-7の分布において、パネルの中央部のせん断応力が一定となる部分を取り出して耐力評価を行う。このことにより、パネル接着面積に依存しない耐力評価を実施する。両試験体のパネル接着面の縁部分は図-7のように同様の応力状態だと仮定し、接着面積の差の部分の応力評価を行うことで、応力集中の影響を除いたせん断すべり耐力を計算できる。A-80の耐力(255.4kN)からB-80の耐力(149.8kN)を引いた105.6kNを両試験体の接着面積の差(55000mm<sup>2</sup>)で除すと、1.92N/mm<sup>2</sup>となる。この応力は、計算値1.71N/mm<sup>2</sup>の1.12倍となり安全側に評価出来た。

一方、不陸調整材を用いた試験体では、応力集中の影響を除いたせん断すべり耐力の検討は実施出来なかった。

#### 5. まとめ

UFC パネル接着面のせん断すべり耐力の検討を目的として、10体の試験体を用いて実験を行なった。得られた知見を以下に示す。

- (1) B-30, A-80, B-80, B-80P, C-30, C30B は、設計時の想定通りに試験体は接着剤と既存 RC 部の接着面における既存 RC 部の損傷によって、せん断すべり破壊が発生した。一方で、不陸調整材を使用した試験体 A-80P では、既存 RC 部以外の場所でもせん断すべり破壊が発生した。
- (2) 既往の計算式を用いて、パネルの縁部分の応力集中の影響を除いたせん断応力実験結果との比較を行った結果、実験値/計算値が1.12倍となり安全側に評価出来た。

#### 謝辞

本研究は、平成29年度住宅・建築物高度化事業「地震後の継続使用性に資する RC 造非耐力壁の損傷低減技術の開発」および(国研)建築研究所指定課題「既存建築物の地震後継続使用のための耐震性評価技術の開発」により実施しました。また、UFC パネル製作と接着には、太平洋セメント(株)及び三菱樹脂インフラテック(株)にご協力頂きました。ここに記して謝意を示します。

#### 参考文献

- 1) 古谷祐希ほか：壁付き RC 造架構を対象とした UFC パネルによる損傷軽減型耐震補強工法の開発 その1~その4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.583-590, 2016.8
- 2) 坂下雅信, 向井智久, 谷昌典, 石岡拓: 分割したプレキャスト UFC パネルをブレース状に貼り付けた RC 造部材の耐震補強効果に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 39, No.2, pp. 895-900, 2017
- 3) 内田崇彦ほか：壁付き RC 造架構を対象とした UFC パネルによる損傷軽減型耐震補強工法の施工合理化に向けた部材実験 その1~その4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.291-298, 2017.8
- 4) 石岡拓ほか：壁付き RC 造架構を対象とした UFC パネルによる損傷軽減型耐震補強工法の施工合理化に向けた部材実験 (その10) 実用化に向けた施工試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.399-400, 2018.9
- 5) 村越潤, 田中良樹, 吉田英二: 高力ボルト接着接合継手を用いた補強技術に関する研究, 平成23年度土木研究所成果報告書, 2011