

# 論文 高強度コンクリートを用いた PCa 圧着接合部のせん断伝達耐力に関する実験的研究

高津 比呂人<sup>\*1</sup>・上林 厚志<sup>\*2</sup>・太田 義弘<sup>\*3</sup>・木村 秀樹<sup>\*4</sup>

**要旨:** Fc100 を超える超高強度コンクリートを用いて、圧着応力度をパラメータとし、PCaPC 圧着接合部を模擬した 1 面せん断試験を実施した。その結果、圧着応力の増加に従って、せん断伝達耐力も線形的に上昇し、せん断摩擦を想定した場合の摩擦係数値は、全ての試験体で、日本建築学会 PC 規準の設計用摩擦係数値 ( $\mu = 0.5$ ) を上回った。また、剛体ばねモデル (RBSM) を用いた離散化極限解析では、目地部モルタルの高さ/幅比が非常に小さいことによる、見かけの圧縮強度の増大を考慮する事で、せん断伝達耐力や破壊性状を比較的精度良く追跡することが可能である事がわかった。

**キーワード:** 超高強度コンクリート, 圧着接合, せん断伝達耐力, RBSM, 破壊モード

## 1. はじめに

プレキャストプレストレストコンクリート (以下、PCaPC) 圧着接合部では、接合面に導入された圧縮力 (P) により生じる摩擦抵抗によって、せん断力 ( $Q = \mu P$ ) が伝達される。例えば日本建築学会プレストレストコンクリート設計施工規準<sup>1)</sup> (以下、PC 規準) では、平滑な接合面の 1 面せん断実験結果に基づき設計用摩擦係数 ( $\mu$ ) を 0.5 と規定している。

PC 規準では、圧着応力の比較的小さい  $10 \text{ N/mm}^2$  以下の実験結果に基づいて摩擦係数を規定しており、その接合面の破壊様相は目地部界面の滑り破壊となる。しかしながら、接合面の圧着応力が大きくなると、その破壊様相は圧着接合面の目地部に注入された無収縮モルタルやその近傍のコンクリートの圧縮破壊あるいはせん断破壊が想定されるため、現行の設計式による評価が危険側となる可能性がある。

一方、高強度コンクリートを用い、高圧着応力による圧着接合を可能とすることにより、現状よりさらに小さな断面寸法や長スパンの部材

を設計することが可能になることが考えられるが、高強度・高圧着に関する知見は、Fc70 以下の田中らの研究<sup>2)</sup>があるのみである。

そこで、本研究では Fc100 を超える超高強度コンクリートを用いた PCaPC 圧着接合部のせん断伝達耐力の把握を目的とした 1 面せん断実験を行い、剛体ばねモデル (RBSM) を用いた離散化極限解析<sup>3)</sup>の適用性を検証した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体一覧を表-1に、試験体形状を図-1に示す。L字型試験体を各々別々に製作した後、接合面間に厚さ 20mm の無収縮モルタルを注入

表-1 試験体一覧

試験体名	コンクリート 目標圧縮強度 Fc [N/mm <sup>2</sup> ]	モルタル 目標圧縮強度 Fm [N/mm <sup>2</sup> ]	圧着応力
Fc100-02	100	100	0.2Fm
Fc100-05			0.5Fm
Fc100-07			0.7Fm
Fc200-02	200	200	0.2Fm
Fc200-05			0.5Fm
Fc200-07			0.7Fm

\*1 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設技術開発部 研究員 工修 (正会員)

\*2 (株) 竹中工務店 技術研究所 先端研究開発部 主任研究員 工修 (正会員)

\*3 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設技術開発部 主任研究員 工修 (正会員)

\*4 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設技術開発部 主任研究員 工博 (正会員)

し一体化した。接合面は鋼製型枠による平滑仕上げとし、接合面積Aは150mm×100mmとした。

実験パラメータはコンクリートおよびモルタルの圧縮強度と、圧着応力（モルタルの実圧縮強度の0.2, 0.5, 0.7倍）とした。接合面を貫通するPC鋼材は配置せず、外部からの圧縮力により圧着応力を与えた。

## 2.2 加力・測定方法

加力装置の概要を図-2に示す。圧着力  $P_c$  を試験体上部鉛直方向に設置したジャッキにより所定の荷重まで加えた後、水平方向のジャッキでせん断力を与えた。ロードセルにより荷重の測定を、試験体表裏両面に設置した変位計により上下試験体間の鉛直方向・水平方向の相対変位（各々、滑り変位・分離変位）を計測した。図-3に変位計取付状況を示す。なお、滑り支承の摩擦係数は  $5.6 \times 10^{-3}$  と小さく、ここでは鉛直力により生じる水平摩擦力は無視した。

## 2.3 材料特性

Fc100, Fc200 のコンクリートにはシリカフェームセメントを用い、水結合材比はそれぞれ13.0%, 25.0%とした。なお、Fc200 コンクリートには試験体の脆性破壊防止のため鋼繊維を混入（体積比1%）した。スランプフローはそれぞれ580mm×570mm, 490mm×465mmであった。図-4にFc200のスランプ試験状況を示す。

目地部モルタルの調合は試し練りにより決定した。コンクリートおよびモルタルの実験時における材料試験結果を表-2に示す。

## 3. 実験結果

### 3.1 せん断力-滑り変位関係

全ての試験体で、せん断伝達耐力  $Q_y$ （ここでは、最初のピーク点と定義）に達すると同時に激しい音を立て、滑り変位が大きく進む様子が

表-2 材料特性

試験体名	コンクリート 圧縮強度 $f_c'$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 $E_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	モルタル 圧縮強度 $\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 $E_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Fc100-2,5,7	147.3	$4.35 \times 10^4$	120.2	$3.47 \times 10^4$
Fc200-2,5,7	188.0	$4.46 \times 10^4$	182.7	$5.40 \times 10^4$

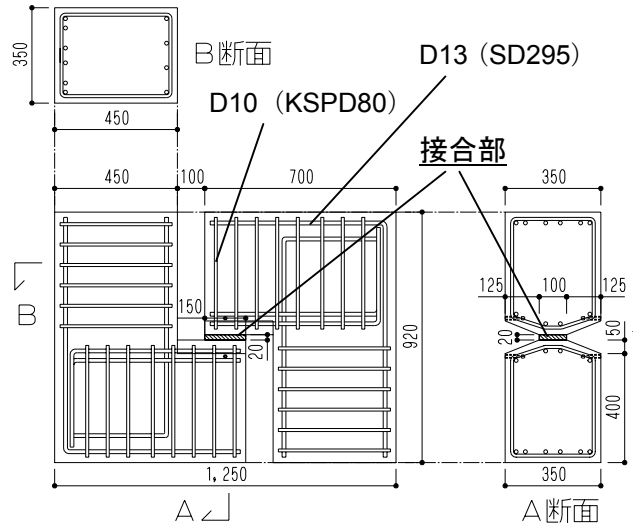


図-1 試験体形状 (Fc100-5, Fc200-5)

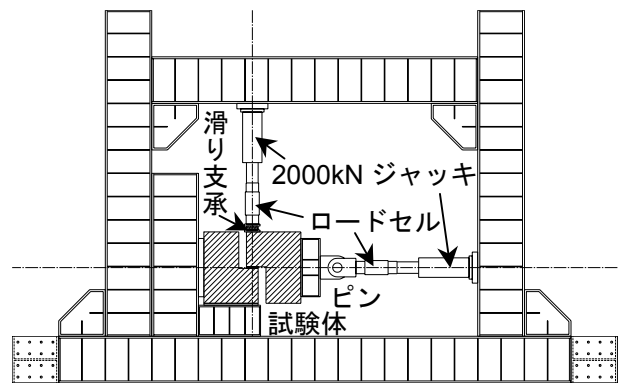


図-2 加力装置



図-3 変位計取付状況

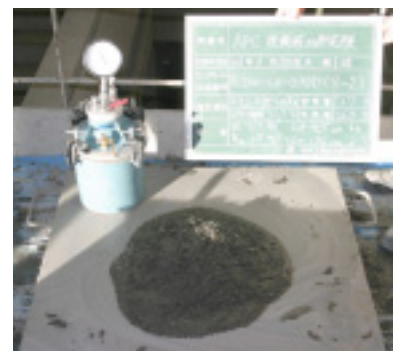


図-4 スランプ試験 (Fc200)

観測された。なお、Fc200-7 試験体では圧着力の加力中に、試験部分に圧壊による縦ひび割れが多数観測されたため、圧着力の加力を中断し、圧着応力  $0.65 \sigma_m$  にてせん断力の加力を開始した。せん断力と滑り変位の関係を図-5に、実験結果の一覧を表-3に示す。

### 3.2 破壊性状

図-6にせん断伝達耐力直前・直後の写真を示す。比較的圧着力の小さい Fc100-2, Fc200-2 試験体（圧着応力  $0.2 \sigma_m$ ）ではせん断伝達耐力に達する直前まで、目地モルタル部には可視ひび割れは発生せず、せん断伝達耐力時にコンクリートとモルタルの界面で滑りが生じる様子が確認された。（破壊モード：目地界面の滑り破壊）

Fc100-5, Fc200-5 試験体（圧着応力  $0.5 \sigma_m$ ）ではせん断伝達耐力直前に目地を横断する斜め方向のひび割れを目視で確認することができた。Fc100-5 ではせん断伝達耐力時に界面で滑りが生じる様子が確認できたが、Fc200-5 ではせん断伝達耐力時に目地部のせん断破壊が生じ、目地部モルタルの一部が飛散したものの導入圧着力は保持し続けた。（破壊モード：目地部せん断破壊+界面の滑り破壊）

一方、圧着力の非常に大きい Fc100-7, Fc200-7 試験体（圧着応力  $0.7 \sigma_m$ ,  $0.65 \sigma_m$ ）では圧着力の加力中に圧壊による縦ひび割れが目地部全体

にわたって生じた。その後、せん断力の加力により目地中央部を横切るひび割れが成長し、そ

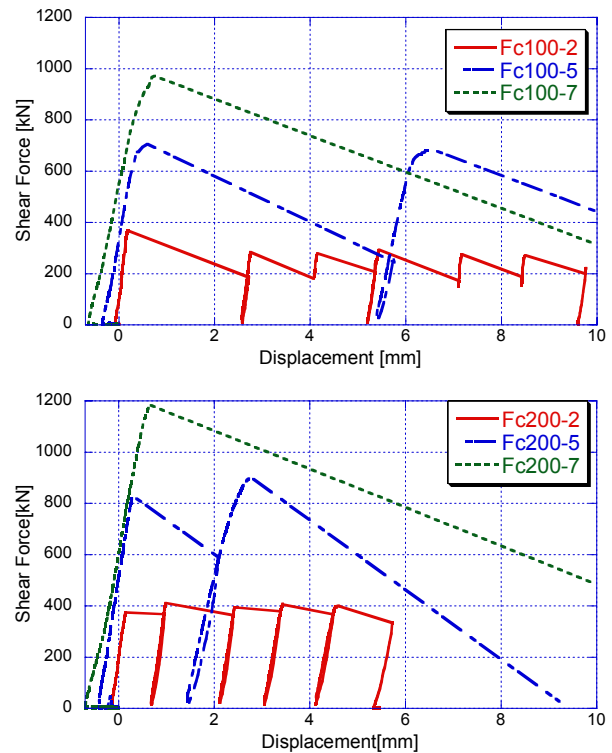


図-5 せん断力-滑り変位関係

表-3 実験結果一覧

試験体名	せん断伝達耐力 $Q_y$ [kN]	滑り変位 [mm]	圧着力 $P_c$ [kN]
Fc100-2	367.7	0.19	357.0
Fc100-5	706.1	0.60	899.3
Fc100-7	971.8	0.75	1286.6
Fc200-2	373.6	0.14	552.1
Fc200-5	829.6	0.30	1363.1
Fc200-7	1183.7	0.66	1784.8

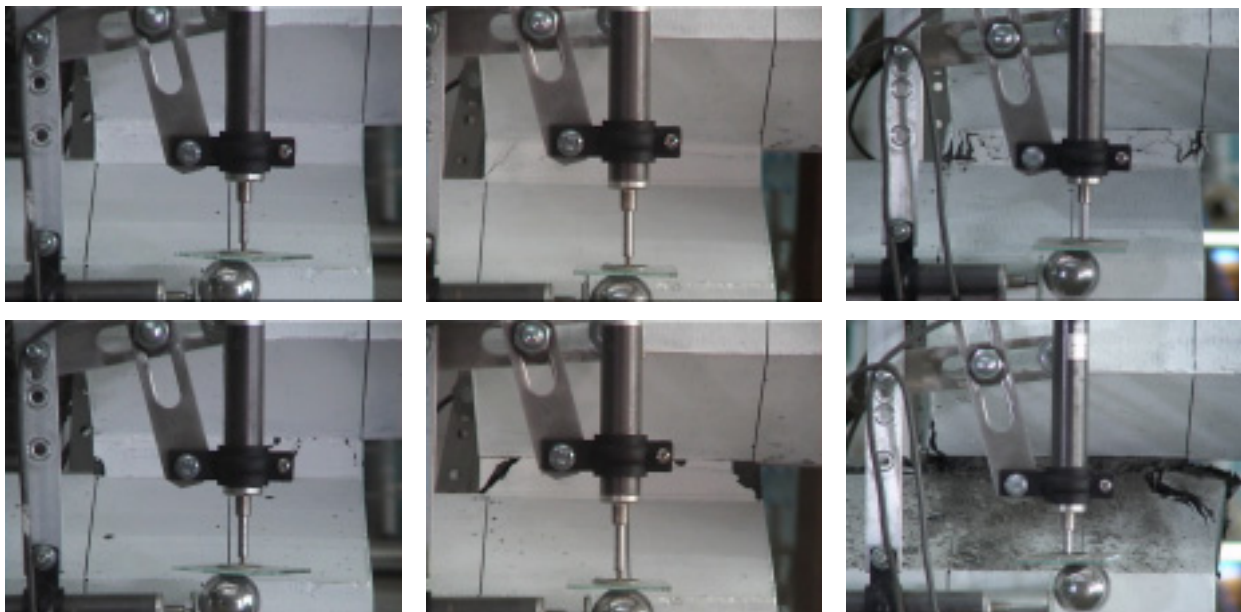


図-6 実験写真（上：耐力直前，下：耐力直後，左：Fc200-2，中：Fc100-5，右：Fc200-7）

れが全体に拡がってせん断伝達耐力を迎えた。せん断伝達耐力と同時に、目地部モルタルが潰れ、その衝撃によりコンクリート部分にも破損が及んだ。(破壊モード：目地部せん断破壊)

### 3.3 せん断応力-圧着応力関係

モルタル圧縮強度 ( $\sigma_m$ ) により無次元化したせん断伝達応力  $\tau_y (=Q_y/A)$  と圧着応力  $\sigma_c (=P_c/A)$  の関係を図-7に示す。図には圧着接合面に関する既往の一面せん断実験結果<sup>2),4)~6)</sup>を併記した。これらは、何れも目地に無収縮モルタルを介在させ、平滑なコンクリート面同士を結合させたものである。全ての試験体で材料強度や圧着応力の大きさに関わらず、摩擦係数  $\mu > 0.5$  となり、圧着応力の増加に従って、せん断伝達耐力も線形的に増加する傾向が見られた。ただし、 $\sigma_c > 0.3 \sigma_m$  では目地部にせん断破壊が発生しているので、せん断摩擦に基づいた PC 規準の設計式による評価には注意が必要である。

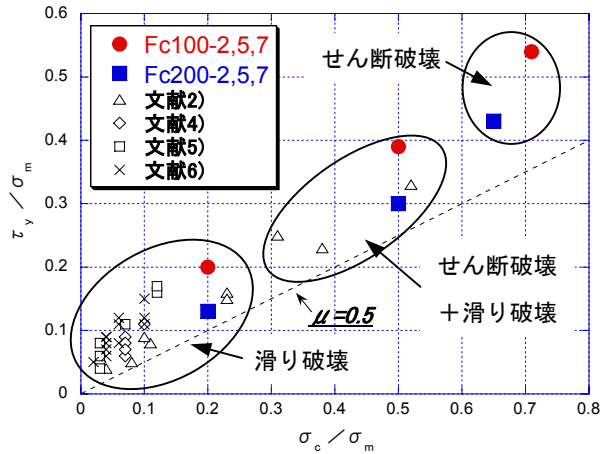


図-7 無次元化したせん断応力-圧着応力関係

## 4. RBSM 解析

### 4.1 解析手法とモデル

解析には、川井により提案された剛体ばねモデル (RBSM : Rigid-Bodies-Spring-Model) を用いた。図-8に要素分割図を示す。

コンクリート及びモルタルの応力-ひずみ関係を図-9に示す。一軸圧縮試験での応力-ひずみ曲線をトリリニアにより近似し、その折れ点を圧縮一次降伏点  $0.5fc'(\sigma_m)$ ・圧縮二次降伏点  $0.95fc'(\sigma_m)$ とした<sup>7)</sup>。ヤング係数( $E_c, E_m$ )と圧縮強度 ( $fc', \sigma_m$ ) には表-2の値を用い、剛性低下率  $\beta$  と終局ひずみ  $\epsilon_{cc} (\epsilon_{cm})$  は、表-4に示す値とした。引張強度  $f_t$  は  $0.56 \cdot (fc')^{1/2}$  (モルタルでは、 $0.56 \cdot (\sigma_m)^{1/2}$ ) [ $N/mm^2$ ]とした<sup>8)</sup>。

また、コンクリート及びモルタルの降伏破壊

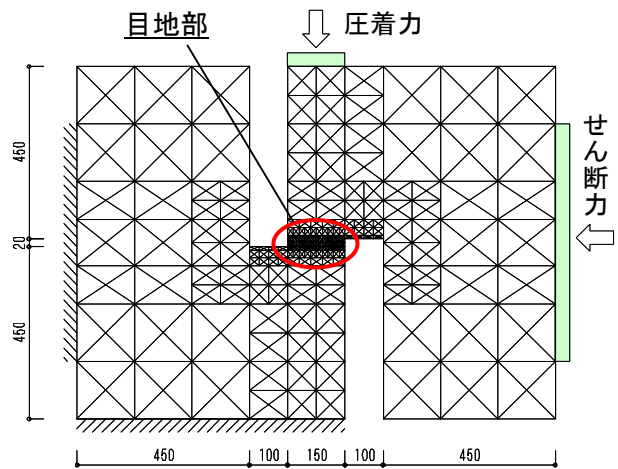


図-8 要素分割図

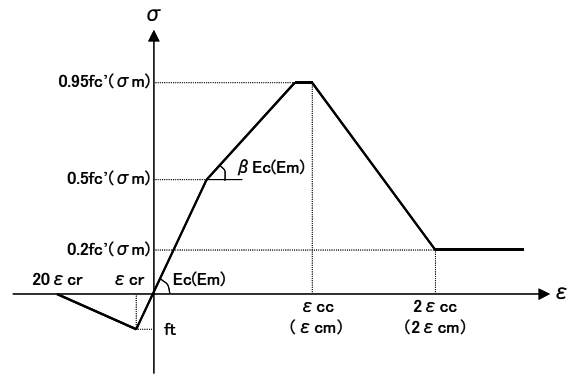


図-9 応力-ひずみ関係

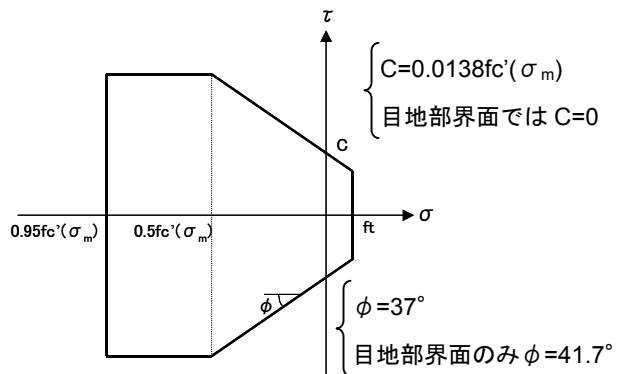


図-10 材料の降伏破壊曲面(Mohr-Coulomb)

表-4 解析に用いた値

試験体名	コンクリート		モルタル	
	剛性低下率 $\beta$	終局ひずみ $\epsilon_{cc} [\mu]$	剛性低下率 $\beta$	終局ひずみ $\epsilon_{cm} [\mu]$
Fc100-2,5,7	0.75	4000	0.60	5000
Fc200-2,5,7	0.85	4500	0.90	3500

曲面を図-10に示す。せん断すべりに対してMohr-Coulombの条件を用い、降伏後は塑性流れ則に従い破壊面上を移動するものとし、せん断すべりが生じた後にせん断ひずみが0.004に達した時、せん断破壊するものと定義した。コンクリート及びモルタルの内部摩擦角 $\phi=37^\circ$ 、粘着力 $C=0.0138fc'$  ( $\sigma_m$ )とし<sup>9)</sup>、目地部界面では文献2)に倣い $ft=0$ 、 $\phi=41.7^\circ$ 、 $C=0$ とした。

#### 4.2 解析結果

図-11にFc100-2,5,7の解析結果を示す。また、実験値と解析値の比較を図-12に示す。圧着応力が $0.2\sigma_m$ 、 $0.5\sigma_m$ のものに対しては、せん断伝達耐力の実験値と解析値の誤差は $\pm 25\%$ となり、実験結果をある程度追跡できたと言えるが、圧着応力が $0.5\sigma_m$ を超えると、解析値と実験値の差が非常に大きくなった。これは、Fc200-2,5,7でも同様の傾向を示した。

この原因の一つとして、目地部モルタルが薄板であることによる圧縮強度・せん断強度の上昇が考えられる。目地部のモルタルは高さ/幅 $=0.2$ と非常に小さく、目地モルタルの上下端面は、試験体コンクリートによる変形拘束を受け、その圧縮強度は高さ/径 $=2.0$ の円柱供試体で得られる圧縮強度よりも大きい強度となる。そこで、目地モルタルの圧縮強度を、高強度コンクリートに対して野口<sup>10)</sup>により提案された式(1)により $n$ 倍して、つまり、図-9と図-10中の $\sigma_m$ を $n\sigma_m$ に置き換えて圧縮強度と降伏曲面を大きくして、再解析を実行した。表-5に各試験体での $n$ の値を示す。(ここでは、 $H=2.0$ 、 $D=10.0$ )

$$n = k \cdot \{\ln(2D/H)\}^2 + 1 \quad (1)$$

$$k = 4.84/Fc + 0.165$$

$n$  : Fc に対する圧縮強度の比率

H : 高さ[cm], D : 直径[cm]

Fc :  $H/D=2$  の供試体の圧縮強度[N/mm<sup>2</sup>]

Fc100-2,5,7の再解析結果を図-13に、実験値と解析値の比較を図-14に示す。圧着応力の大きさに関わらず、実験値と解析値の誤差は $\pm 25\%$ の範囲内となり、実験で得られたせん断伝達耐力を、解析により概ね追跡できたと言える。ま

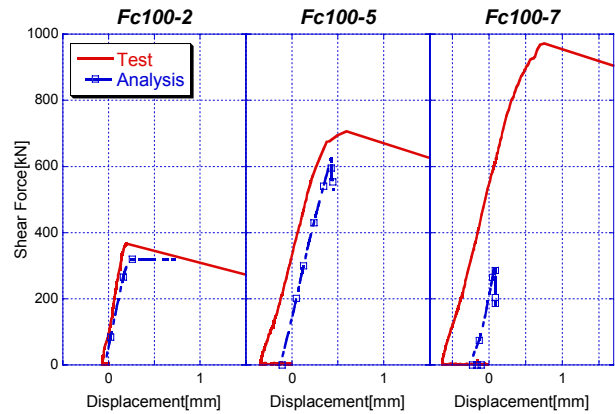


図-11 解析結果 (Fc100-2,5,7)

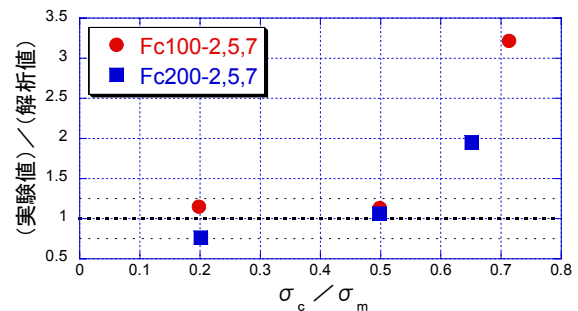


図-12 実験値と解析結果の比較

表-5 nの値

	n
Fc100-2,5,7	2.09
Fc200-2,5,7	2.02

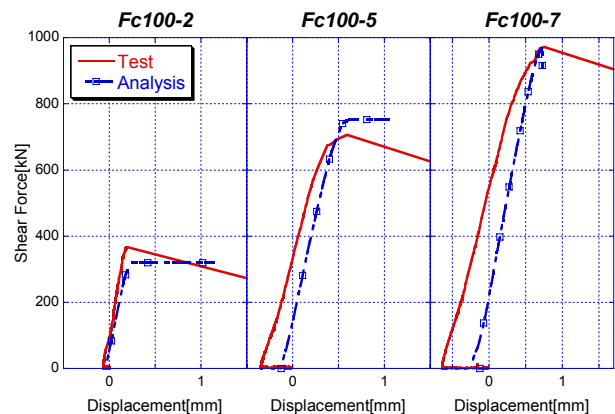


図-13 再解析結果 (Fc100-2,5,7)

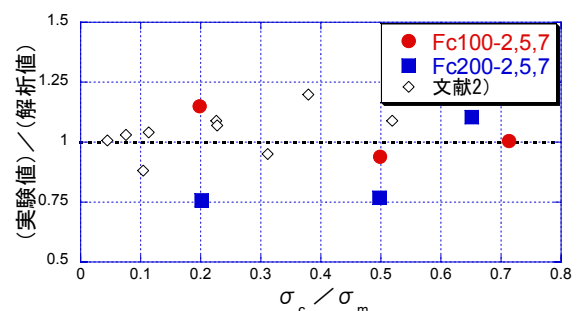


図-14 実験値と再解析結果の比較

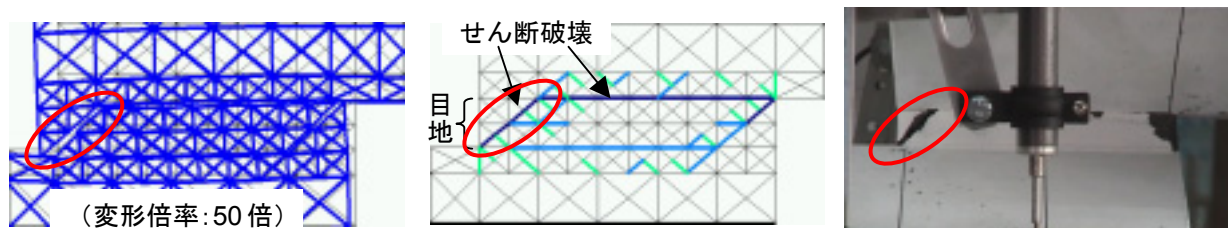


図-15 せん断伝達耐力時変形図・破壊状況図・せん断伝達耐力時写真 (Fc100-5)

た、田中らの実験<sup>2)</sup>についても同様の手法で予測可能であることが確認された。

図-15 に解析で得られた Fc100-5 の破壊状況図・破壊時変形図と、実際の破壊状況の比較を示す。実験と同じ位置に目地部を横断するせん断破壊が生じ、上部コンクリートと目地モルタルの間に滑りが生じてせん断伝達耐力に至っている状況が良く再現できている。その他全ての試験体でも、破壊状況の対応は良好であった。

## 5. まとめ

Fc100 を超える超高強度コンクリートを用いて、圧着応力をパラメータとし、PCaPC 圧着接合部を模擬した 1 面せん断実験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 目地に無収縮モルタルを介在させ、平滑なコンクリート面同士を結合させた圧着接合部のせん断伝達耐力  $Q_y$  は、モルタル強度や圧着力の大きさに関わらず、建築学会の PC 規準に規定されている摩擦係数  $\mu = 0.5$  を用いて、 $Q_y = \mu P_c$  ( $P_c$ : 圧着力) により安全側の評価をすることが可能であると考えられる。ただし、圧着応力  $0.3 \sigma_m$  以上では破壊モードは目地界面の滑り破壊ではなく、目地部のせん断破壊へと移行していくので、せん断摩擦を想定した PC 規準の耐力算定式による設計については注意が必要である。
- (2) RBSM を用いた離散化極限解析では、目地モルタルの高さ／幅が非常に小さい事による、見かけの圧縮強度の増大を式 (1) で考慮することにより、PCaPC 圧着接合部のせん断伝達耐力や破壊過程を比較的精度良く予測することが可能である。

## 参考文献

- 1) プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 日本建築学会, 1998
- 2) 田中秀人ほか: 高強度コンクリート使用による高応力圧着接合部のせん断伝達耐力 (その 1, その 2), 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp.1009-1012, 2002.8
- 3) 川井忠彦: コンピュータによる極限解析法シリーズ 1・離散化極限解析法概論, 培風館, 1991
- 4) 岡本晴彦ほか: プレキャストコンクリート柱・梁接合部の圧着接合に関する研究—接合面のせん断伝達に関する実験結果, 日本建築学会学術講演梗概集, C, pp.1063-1064, 1993.9
- 5) 小山内裕ほか: 付帯柱と絶縁したプレキャスト壁の耐震性に関する実験的研究 その 6 柱梁接合部のせん断実験の結果, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp.905-906, 1996.9
- 6) 黒田洋子ほか: すべり発生前後におけるプレキャスト部材圧着接合面の摩擦に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, 1998.7
- 7) 鬼頭宏明ほか: RBSM による鉄筋コンクリートディープビームの破壊解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, 1993
- 8) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 -, 日本建築学会, 1999
- 9) 上田眞稔: 鉄筋コンクリート部材の離散化極限解析法に関する研究, 東京大学学位論文, 1996
- 10) 野口貴文: 高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する研究, 東京大学学位論文, 1995