

# 論文 PCa 鉄筋コンクリート構造接合面の正負繰返し載荷におけるせん断伝達性能

上西 彰<sup>1</sup> ・ 伴 幸雄<sup>2</sup> ・ 加藤 三晴<sup>3</sup> ・ 田才 晃<sup>4</sup>

要旨：プレキャスト鉄筋コンクリート構造壁柱に幅 20mm 程度の鉛直接合部を設け、各種接合要素をモルタル充填により一体化した場合の、繰返し載荷時のせん断耐力を検討した。ダウエル筋の応力状態を、ダウエル筋の応力歪関係をモデル化して把握した。その結果せん断変位 6mm 範囲内のモーメントは、軸力のない場合の全塑性モーメントを下回った。ダウエル筋のだぼ抵抗を杭の弾塑性設計式を用いて仮定してコンクリート支圧強度を検討し、また破断面の摩擦係数を検討した結果、既往の設計式のこれらの値の妥当性を示した。

キーワード：プレキャストコンクリート、接合部、せん断伝達、ダウエル作用

## 1. はじめに

プレキャスト鉄筋コンクリート構造(以下 PCa 構造)接合部のせん断耐力については、多くの実験研究がなされている[1]。これらの研究は、最大せん断耐力の評価[2]から、せん断耐力とせん断変位の関係[3]へと移行しており、これらの背景として、接合部の復元力特性の把握が要求されていることがあげられる。そこで、ダウエル筋・コッター・目荒しを設けた場合の、繰返し載荷時のせん断耐力について、ダウエル筋のだぼ抵抗とコンクリート破断面の摩擦抵抗をせん断変位に関連させ、既往の設計式と比較、検討を行った。

## 2. 実験方法

実験主変数を表 1 に材料試験結果を表 2 に示す。だぼ効果については高強度鋼の D13 と SD295 の D13,16,19,25 をダウエル筋に用いた 5 体、摩擦効果については目荒し深さ 0, 16mm とコッター有りに関して、接合面直応力が一定と変動させた場合の 6 体、総合効果と一体打ちの 4 体の計 15 体を作成した。試験体の形状及び配筋を図 1 に示す。試験体の接合部断面寸法は  $B \times L=200 \times 625\text{mm}$ (面積:  $1250\text{cm}^2$ )で、接合部厚は実施工と同様の 20mm である。ダウエル筋を有

表 1 実験変数

	試験体	目荒らし	コッター	ダウエル筋	鉛直荷重
だぼ効果	NO 1			2-D13 高強度	無
	NO 2			2-D13 SD295	無
	NO 3			2-D16 SD295	無
	NO 4			2-D19 SD295	無
	NO 5			2-D25 SD295	無
摩擦効果	NO 6	0mm			サイクル毎上昇
	NO 7	0mm			4.4t
	NO 8	16mm			サイクル毎上昇
	NO 9	16mm			4.4t
	NO 10		有		サイクル毎上昇
	NO 11		有		4.4t
総合効果	NO 12	16mm		2-D13 SD295	サイクル毎上昇
	NO 13	16mm	有	2-D13 SD295	無
一体打ち	NO 14				サイクル毎上昇
	NO 15				サイクル毎上昇

\*1 大阪工業大学大学院、工修 (正会員)

\*2 矢作建設工業(株)建築技術部技術開発室、主任 (正会員)

\*3 矢作建設工業(株)建築技術部技術開発室、次長 (正会員)

\*4 大阪工業大学工学部建築学科、助教授 博 (工) (正会員)

する NO1 ～ 5 の試験体は、ダウエル筋周りにシース管(冷延帯鋼製、φ 23~38mm)及びスパイラル筋(10 番線、φ 32mm)を配し、グラウト充填により一体とした。なお、接合部境界面にテフロンシートを設けた。コッターを有する NO10,11,13 の試験体は、実施工と同様の面積比(コッター投影面積/接合部面積=40%)となるようコッター寸法を B × L=200 × 125mm とし、250mm 間隔に 2 箇所配置し、グラウト充填により形成した。目荒らし深さ 16mm を有する NO8,9,12,13 の試験体は、接合部境界面に発砲スチロールの化粧型枠を用いて作成した。

表 2 材料試験結果

コンクリート・グラウト			
	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	割裂強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )
コンクリート	300	21	2.8 × 10 <sup>7</sup>
グラウト	350	28	
鉄筋 (*: 0.2%オフセット)			
	降伏強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (× 10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
D13	3500	1.87	5100
D16	3600	1.87	5600
D19	3400	1.84	5400
D25	3400	1.80	5300
高強度	7500 *	0.66	13400

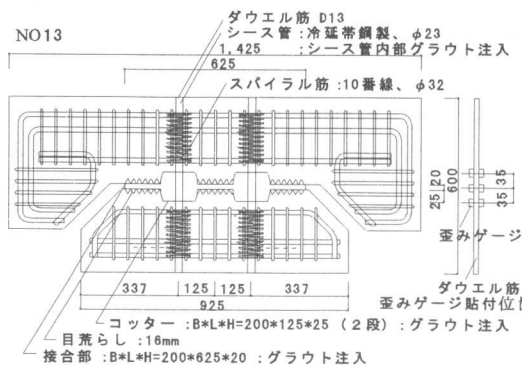


図 1 試験体の形状・配筋

加力は、図 2 に示すような加力フレームを用い、直接せん断試験による正負交番繰返し载荷を行った。図 3 に加力サイクルを示す。接合部分の変形は上下 P<sub>Ca</sub> 部分のすべり量(せん断変位)と目開き量(ひび割れ幅)を測定した。ダウエル筋には、接合部中心と中心から ± 35mm の位置に歪ゲージを貼付した。ダウエル筋のだば抵抗を確認するため、歪ゲージの保護にはクッション材を用いないこととした。

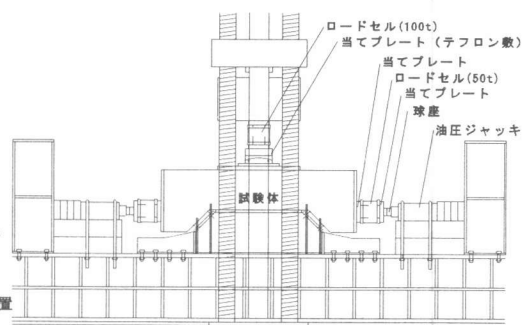


図 2 加力装置

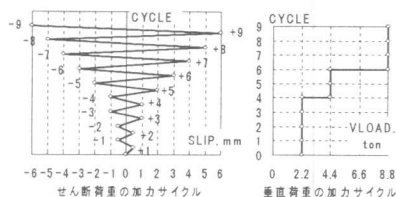


図 3 加力サイクル

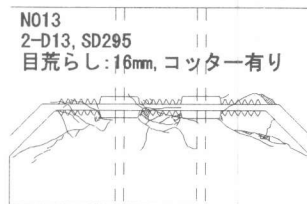


図 4 最終破壊状況

### 3. 実験結果

#### 3. 1 破壊状況

総合効果の試験体 NO13 の、最大すべり量 6mm 終了時のひび割れ状況図を図 4 に示す。コッターを有する試験体については、接合部界面とコッター隅角部からのひび割れが発生した後、コッターのせん断破壊と共に急激な耐力低下を示した。新しいせん断変位に進行する場合は、破断面のかみ合いによる斜めひび割れが見られた。実験後に摩擦効果の試験体の破断面を観察したところ、目荒らし深さ 16mm の試験体でも破断面の凹凸はかなり削られていた。コッターを有する試験体についても同様であった。

#### 3. 2 せん断荷重-せん断変位関係

代表的な実験主変数のせん断荷重-せん断変位関係を図 5 に、包絡線を図 6 に示す。だば効果

の試験体 NO2 ではすべり量 2mm 以降の耐力上昇は少なかった。包絡線では鉄筋径に比例して耐力は上昇した。高強度鉄筋の耐力は上昇傾向にあった。目荒しを有する試験体 NO7 は 1 サイクル時の最大耐力後、急激な耐力低下と共にせん断変位が図 3 の加力計画を越えて進行した。以後の加力を加力計画に基づいて行った結果、すべり量 2mm 以降の繰返し载荷では、ほぼ一定の耐力となった。コッターを有する試験体 NO11 は 1 サイクル時の最大耐力後、破断面のかみ合いにより耐力は変動した。すべり量 ± 4mm 以降の繰返し载荷では、ほぼゆるやかな耐力低下となった。総合効果の試験体 NO13 は最大耐力後はゆるやかな耐力低下を示した。

### 3. 3 目開き—せん断変位関係

目開き—せん断変位関係を図 7 に示す。だぼ効果の試験体 NO2 の目開きは増加しており、ダウエル筋の残留歪が影響していると思われる。総合効果の試験体 NO13 の場合も目開きは増加しており、破断面の乗り上げによって目開き量は大きかった。目荒しを有する試験体 NO7 は破断面の乗り上げによって多少の目開きの増加が見られるが、ほぼ一定の傾きをもって目開きが進行した。コッターを有する試験体 NO11 は最大耐力時に目開きが進行した後、すべり量 ± 4mm 以降の繰返し载荷では、ほぼ一定の傾きをもって目開きが進行した。

### 4. ダウエル筋の応力状態

ダウエル筋に貼付した歪ゲージより得られた曲率と平均歪の値から、軸力・モーメントの変換を以下の応力—歪関係のモデル化により行った。ダウエル筋の応力歪関係は歪硬化と Bauschinger 効果を考慮し、塑性域での履歴曲線の形状は Ramberg-Osgood 関数を用いて次式でモデル化した。

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_B}{k_0 \varepsilon_y} = \frac{\sigma - \sigma_B}{k_0 \sigma_y} \left( 1 + \left| \frac{\sigma - \sigma_B}{k_0 \sigma_y} \right|^{\alpha - 1} \right) \quad (1)$$

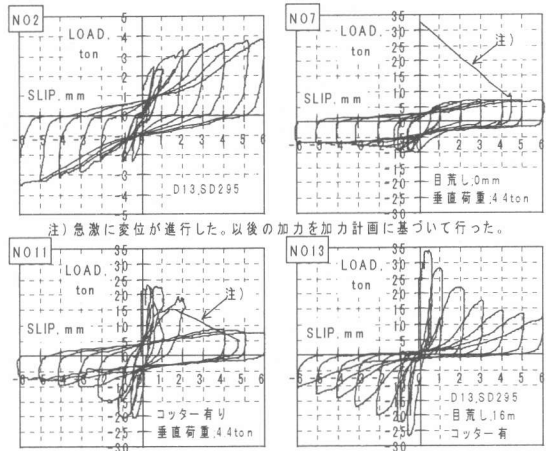


図 5 せん断荷重—せん断変位関係

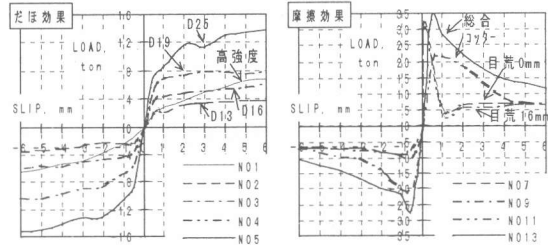


図 6 せん断荷重—せん断変位包絡線

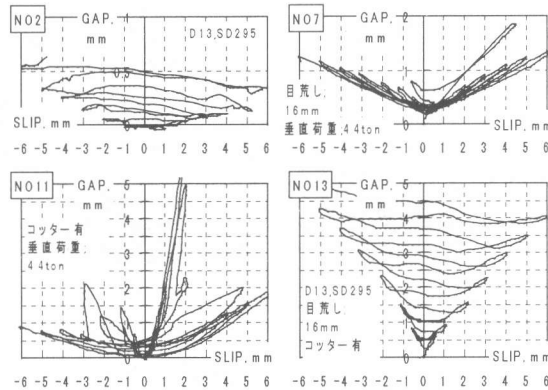


図 7 目開き—せん断変位関係

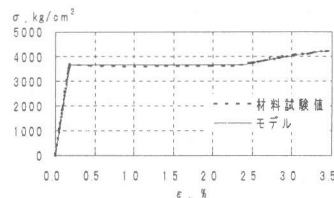


図 8 鉄筋材料特性のモデル化

履歴曲線の形状と位置を決定する変数  $\epsilon_B$ 、 $k_0$  及び  $\alpha$  の値は、材料試験により得られた歪硬化開始点と曲線上の任意の 2 点の  $\epsilon$  と  $\sigma$  の値を上式に代入し、連立させて解くことにより求まる。決定したモデルと材料試験結果を図 8 に示す。歪の計測値から決定した応力-歪関係のモデルを用いて、軸力とモーメントへの変換を、図 9 に示すような鉄筋断面に分割し、平面保持を仮定した Fiber モデルによって行った。

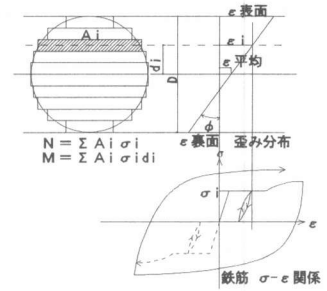


図 9 鉄筋断面の分割

だば効果の試験体 NO2 と総合効果の試験体 NO13 について、破断面から上方 35mm の位置のダウエル筋の応力状態を図 10 に示す。ここで試験体 NO2 の履歴が途切れているのは、歪ゲージの値が計測不能となったためである。(c)図の鉄筋軸力は、試験体 NO2 の加力サイクルピーク時において、正加力時は約 1ton(引張り)であった。試験体 NO13 では正加力時は約 3ton、負加力時は約 2ton であった。両試験体共に、降伏軸力以下の値でせん断変位が進行していた。(d)図の鉄筋モーメントは、試験体 NO2 では正加力時は最大+470kg・cm となり、履歴に棚がみられた。負加力時は最大-1100kg・cm であった。試験体 NO13 では正加力時は最大+590kg・cm、負加力時は最大-670kg・cm であり、履歴に棚がみられ、加力サイクルピーク付近でモーメントの低下がみられた。両試験体共にダウエル筋には軸力とモーメントが同時に作用しており、ダウエル筋のモーメントは、軸力のない場合の全塑性モーメントを下回っていた。

ダウエル筋 SD295, 1-D13	
降伏歪	$\epsilon_y = 0.2\%$
降伏軸力	$\sigma_y \cdot a_t = 4400 \text{ kg}$
軸力のない場合の全塑性モーメント	
$0.17 \cdot D^3 \cdot \sigma_y = 1300 \text{ kg} \cdot \text{cm}$	

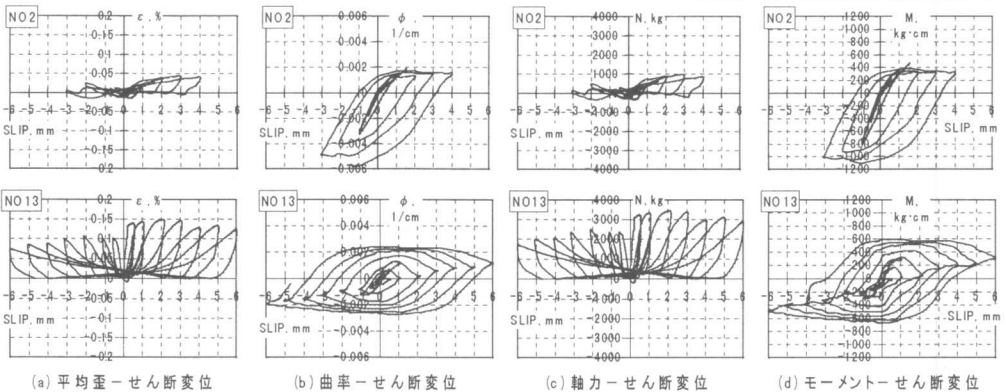


図 10 試験体 NO2 と NO13 のダウエル筋応力状態

図 11 にだば効果の試験体 NO2 とコッターを有する試験体 NO11 のせん断耐力を足し合わせたものと、それら総合効果の試験体 NO13 の包絡線を示す。最大耐力以降の包絡線は、せん断抵抗要素の累加で表される。図 12 はせん断変位 0.5mm の位置でのせん断荷重と加力サイクル数を示したものである。試験体 NO13 は、初期段階において破断面コンクリートの支圧作用によりせん断耐力は減少し、5 サイクル

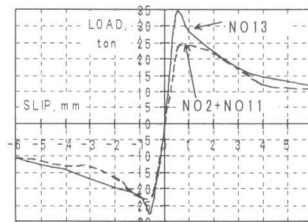


図 11 包絡線

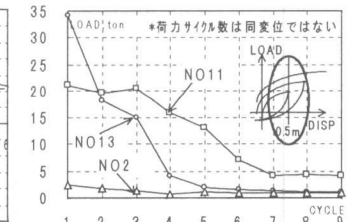


図 12 せん断変位 0.5mm 時耐力

時以降ではコッターを有する試験体 NO11 を下回り、ダウエル効果の試験体 NO2 とほぼ同じ耐力となった。これらから図 13 のような破断面を仮定すると、せん断耐力は破断面コンクリートのかみ合いがある場合はせん断抵抗要素の累加で表され、かみ合いがない場合はダウエル筋のだぼ抵抗によって表される。

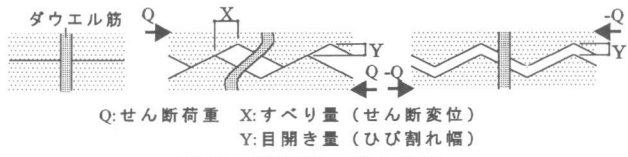


図 13 破断面の応力状態

5. せん断抵抗要素

総合効果の試験体は、コッター及び接合部コンクリートの破壊時に最大耐力に達し、その時点でダウエル筋には塑性ヒンジが発生していると思われる。その後の破断面のせん断抵抗要素は、ダウエル筋のだぼ抵抗、コンクリートの摩擦抵抗に分けられるとする。以下に、これらせん断抵抗要素について考察する。

ダウエル筋のだぼ抵抗は、Broms による杭の弾塑性設計式[4][5]を用い、図 14 に示すダウエル筋の応力状態を仮定する。ここで、ダウエル筋を杭に置き換え、杭頭にせん断力  $Q_u$  が作用し、破断面から  $h_2$  の位置のダウエル筋には塑性ヒンジが発生し、全塑性モーメントに達しているものとする。ここで、全塑性モーメントの値は軸力のない場合を用いるが、4. で示したように、ダウエル筋には軸力とモーメントが作用しており、この時の全塑性モーメントは、軸力のない場合の全塑性モーメントを下回るとと思われる。せん断力  $Q_u$  の反力は、コンクリート支圧強度を便宜上  $\beta \cdot f_c$  で表し、これが  $h_2$  間に等分布に作用し、それらの合力  $Q_{cu}$  が破断面から  $h_2/2$  の位置に作用する。これらを用いて、塑性ヒンジ発生位置での力の釣り合いを考えると、(2)式と(3)式が得られる。

$$\sum Q=0 \quad Q_u - \beta \cdot f_c \cdot D \cdot h_2 = 0 \tag{2}$$

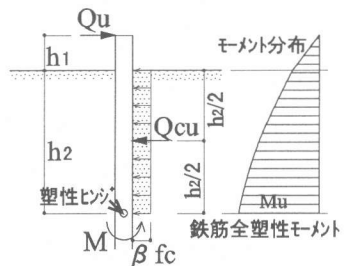
$$\sum M=0 \quad Q_u(h_1+h_2) - \frac{\beta \cdot f_c \cdot D \cdot h_2^2}{2} - 0.17 \cdot D^3 \cdot \sigma_y = 0 \tag{3}$$

$h_1=0$  とし、(2)式と(3)式を連立させて  $Q_u$  について解くと(4)式となり、(4)式を  $\beta$  について書き直すと(5)式となる。

$$Q_u = 0.58 \cdot D^2 \sqrt{\beta \cdot f_c \cdot \sigma_y} \tag{4}$$

$$\beta = \frac{Q_u^2}{0.34 \cdot D^4 \cdot f_c \cdot \sigma_y} \tag{5}$$

だぼ効果試験体の実験結果  $Q_u$  を用いて、(5)式により  $\beta$  を求めた結果を図 15 に示す。既往の設計式の  $\beta$  の値は、ある程度のすべりを生じる場合は  $\beta=5$  とし、過大なすべりを生じない場合は低減して対処している[6]。図 15 はダウエル筋 SD295 の正加力時の  $\beta$  を示しており、せん断変位+6mm 時まではほぼ  $\beta=4.0$  以下であった。



D : 鉄筋径  
 $\sigma_y$  : 鉄筋降伏強度  
 $f_c$  : コンクリート圧縮強度

図 14 ダウエル筋応力状態モデル

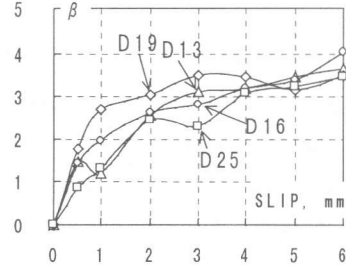


図 15  $\beta$  - せん断変位包絡線

コンクリート破断面の摩擦抵抗を、摩擦係数  $\mu = Q / N$  によって評価する。ここで、 $Q$  はせん

断荷重、N は垂直荷重である。垂直荷重が 4.4ton に一定の場合について、実験結果から求めた摩擦係数  $\mu$  の包絡線を図 16 に示す。コッターを有する試験体は、せん断変位が初期の段階では破断面のかみ合いによって大きい値を示しているが、せん断変位  $\pm 6\text{mm}$  では目荒しを有する試験体とほぼ同じ値となった。目荒しを有する試験体は、最大耐力後の急激なせん断変位の進行により破断面が削られ、これにより、正加力時の摩擦係数は負加力時よりも低い値を示したと思われる。目荒し量 0、16mm の差異は見られず、単調載荷試験[7]での目荒しの効果は見られなかった。これは、繰返し載荷の影響により破断面の凹凸が削られたためと思われる。PCI のマニュアル[8]を用いた摩擦係数  $\mu$  の値は、目荒し 0mm は  $\mu=0.6$ 、目荒し 16mm は  $\mu=1.2$ 、一体打ちは  $\mu=1.4$  である。このことから、目荒しを有する試験体のせん断変位の初期段階を除いた摩擦係数は約  $\mu=1.5$  にあり、ほぼ一体打ちと同程度にあった。

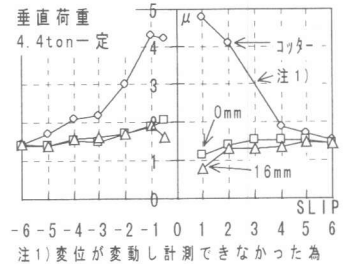


図 16  $\mu$  -せん断変位包絡線

## 6. まとめ

PCa 構造接合部の各種接合要素のせん断耐力について検討を行った。ダウエル筋の応力-歪関係モデルをモデル化し、繰返し載荷時の破断面ダウエル筋の応力状態を考察した。その結果、せん断変位  $\pm 6\text{mm}$  範囲内の破断面から 35mm の位置では、ダウエル筋には軸力とモーメントが同時に作用しており、軸力は降伏軸力に達しておらず、モーメントは軸力のない場合の全塑性モーメントを下回っていた。接合要素のせん断耐力について、ダウエル筋の応力状態を杭の弾塑性設計式を用いて仮定してコンクリート支圧強度を考察した結果、ダウエル筋 SD295 の場合はせん断変位  $\pm 6\text{mm}$  の範囲ではほぼ  $4.0 \cdot f_c$  以下であった。垂直荷重が 4.4ton に一定の場合の破断面の摩擦係数は、せん断変位  $\pm 6\text{mm}$  では目荒し、コッターの有無にかかわらず約  $\mu=1.5$  であった。

謝辞：本研究を行うにあたり、大阪工業大学卒業生の高木耕二（現前田建設工業㈱）、宮岡ちさと（現大阪工業大学大学院）両君の協力に、ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- [1]プレキャスト鉄筋コンクリート構造の設計と施工、日本建築学会、1986
- [2]望月重、横谷栄次、永坂具也：壁式プレキャスト構造鉛直接合部のせん断耐力-ダウエル効果および圧縮拘束力を考慮した場合-、日本建築学会構造系論文集、No.424,pp11-22,1991.6
- [3]大淵英夫、鈴木基晴、南尚吾、中野克彦、松崎育弘：ずれ変形を考慮したプレキャスト部材接合面におけるせん断伝達に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.491,pp97-104,1997.1
- [4]壁式プレキャスト構造の鉛直接合部の挙動と設計法、日本建築学会、1989
- [5]Vintzeleou,E.N.,and Tassios,T.P. : Mathematical Models for Dowel Action under Monotonic and Cyclic Conditions、Magazine of Concrete Research (London)、V.38,No.134,pp13-22,1986.3
- [6]塩原等：コンクリートとコンクリートの接合、コンクリート工学、Vol,34、No.6,pp14-24、1996.6
- [7]伴幸雄、古田智基、田才晃：二分割されたプレキャスト壁柱の鉛直接合部のせん断伝達性能、コンクリート工学論文報告集、Vol,18、No.2,pp1187-1192、1996.6
- [8]PCI Committee on Connection Details,"DESIGN AND TYPICAL DETAILS OF CONNECTIONS FOR PRECAST AND PRESTRESSED CONCRETE",Prestressed Concrete Institute,1986