

# 論文 PC 圧着工法のための支圧強度と一面せん断強度に関する基礎研究

森田 真由美\*1・中塚 信\*2・坂田 博史\*3

要旨：PC 圧着工法は、プレストレストコンクリート(PC)，とくにプレキャスト PC 構造には不可欠な基本技術の一つである。しかし、近年の低強度コンクリート構造に対する耐震補強や高強度コンクリートが用いられる高層プレキャスト PC 構造などに同工法が多用されるが、コンクリート強度に対するその適用性は十分に明らかではない。本研究では、低強度から高強度コンクリートに PC 圧着工法を適用する際のキーポイントとなる支圧強度およびせん断強度を調べ、低強度から高強度コンクリートにまで適用できる新しい支圧強度推定式を導いた。また、各種コンクリートで構成される圧着接合面の一面せん断耐力および破壊モードに関する新しい知見を得た。

キーワード：プレストレストコンクリート，圧着工法，支圧強度，せん断耐力，摩擦係数

## 1. はじめに

PC 圧着工法は、プレストレストコンクリート(以下 PC と略記する)，とくにプレキャスト PC 構造には不可欠な基本技術の一つである。従って日本建築学会の PC 設計・施工規準においても、適用できるコンクリートの強度範囲を 30N/mm<sup>2</sup> 以上として規定されている。しかし近年、低強度コンクリートに対する耐震補強工法の一つとしての PC 圧着工法に対する需要が高まる一方、高強度コンクリートが用いられる高層の PCaPC 構造も多数建設されるようになってきたにも関わらず、コンクリート強度に対する PC 圧着工法の適用性はこれまで十分に明らかにされてこなかった。

本研究は、低強度から高強度コンクリートに PC 圧着工法を適用する際のキーポイントとなる支圧強度およびせん断強度を調べる基礎研究で、低強度から高強度コンクリートにまで適用できる新しい支圧強度推定式を導いた。また、コンクリート強度、圧着用鋼材のグラウトなどが影響する、各種コンクリートで構成される圧着接合面の一面せん断耐力および破壊モードに関する基礎知見を検討した。

## 2. 支圧試験

### 2.1 実験概要

#### (1) 目的

支圧強度に及ぼすコンクリート強度の影響およびシース穴の影響を明らかにするため、表 - 1 に示すような 3 シリーズの実験を行った。実験 - 1 は低強度コンクリートの、実験 - 2 は中・高強度コンクリートの支圧強度を調べるためのもので、コンクリート強度および支圧面積比(ここでは便宜上  $\sqrt{Ac/AI}$  をいう;  $Ac$  はコンクリート上面の面積、 $AI$  は支圧板の面積)を実験変数とした。実験は、シース穴径およびコンクリート強度を実験変数として、シース穴が支圧強度におよぼす影響を調べるものである。

#### (2) 試験体

いずれの実験シリーズでも、試験体は 250 × 250 × 500mm の無筋コンクリートブロックであり、打設方向は試験体材軸に対し、横打ちである。また、シース管は試験体断面中央に配置した。各種の要因を組み合わせた各試験体種に対し、試験体数は原則として 3 体とした。なお、実験 - 1 は、2007 年度の実験体<sup>2)</sup>を再録したものである。使用材料の力学的試験結果を表 - 2 に、コンクリートの調合表を表 - 3 に示す。

表 - 1 試験体要因

実験No.	要因	水準
- 1	支圧面積比 $\sqrt{Ac/AI}$	1.5, 2.0, 3.0, 4.0
	コンクリート計画圧縮強度 $F_{ce}$	9.0, 13.5, 18.0
- 2	支圧面積比 $\sqrt{Ac/AI}$	1.5, 2.0, 3.0
	コンクリート計画圧縮強度 $F_{ce}$	30, 50, 80
	シース管 内径 $\phi$ (mm)	28, 40, 70, 100
	シース穴比 $\phi/d$	0.224, 0.32, 0.56, 0.8
	コンクリート計画圧縮強度 $F_{ce}$	30, 50

( $F_{ce}$  : 単位 N/mm<sup>2</sup>)

表 - 2 使用材料の力学的試験結果

実験No.	試験体名	計画強度	実験結果(N/mm <sup>2</sup> )		
		$F_{ce}$ (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度	引張強度	弾性係数 ( $\times 10^4$ )
- 1	Fce=9.0-A,B	9	8.0	0.98	1.35
	Fce=13.5-A,B	13.5	11.3	1.36	1.62
	Fce=18.0	18	17.6	1.78	2.13
- 2	Fce=30	30	29.3	2.61	1.69
	Fce=50	50	51.6	3.16	3.39
	Fce=80	80	73.0	4.32	4.50
	sh30N	30	39.2	2.86	3.08
	sh50N	50	48.6	3.23	3.41

表 - 3 コンクリートの調合表

計画強度	水セメント比	単位量				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
$F_{ce}$	W/C	W	C	S	G	減水剤
N/mm <sup>2</sup>	%	kg	kg	kg	kg	kg
30	47	156	332	797	1099	1.49
50	36	158	439	721	1078	1.976
80	23	165	717	608	940	10.8

\*1 大阪工業大学大学院 工学研究科 建築学専攻 (正会員)

\*2 大阪工業大学 工学部 教授 工博 (正会員)

\*3 (株) 建研 大阪支店 第一設計部 (正会員)

### (3) 載荷および測定方法

載荷および測定方法を図-1に示す。載荷は、ブロックの載荷面を厚さ20mmの支圧板によって、鋼製型枠面である載荷面を局部載荷するもので、低・中強度コンクリート試験体では2000kN万能試験機を、高強度コンクリート試験体では5000kNジャッキを用いた。測定は、支圧板に治具を介して取り付けられた変位計によって、コンクリート上面と支圧板との相対変位を測定した。

## 2.2 実験結果および考察

### (1) 現行支圧強度式の適用性

図-2は、横軸に支圧面積比の平方根をとって、各種強度を有する試験体の支圧強度( $\sigma_{Br}$ )をコンクリートの圧縮強度( $\sigma_{cb}$ )で除した支圧強度比( $\sigma_{Br}/\sigma_{cb}$ )の結果を示したものである。同図によれば、建築学会の現行支圧強度式、 $\sigma_{Br}/\sigma_{cb} = \sqrt{Ac/A1}$ は、 $\sigma_{cb}=30\text{N/mm}^2$ 程度のコンクリ

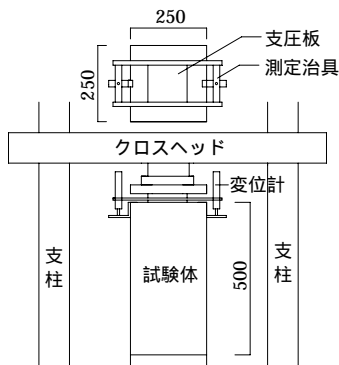


図-1 載荷・測定方法

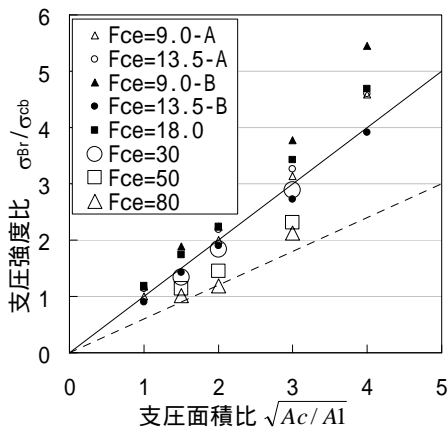


図-2 支圧強度比に及ぼす支圧面積比の影響

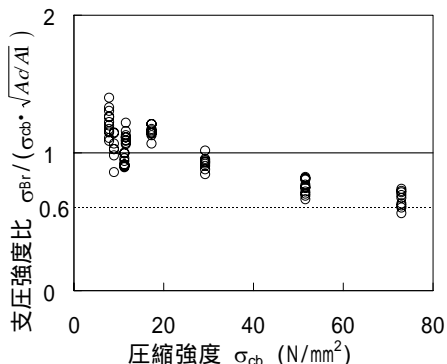


図-3 支圧強度に及ぼすコンクリート強度の影響

トに対してはほぼ適用できるが、それ以上の強度を有するコンクリートに対しては危険側の評価を与える。また図-3は、支圧強度実験値を現行支圧強度式で除した値を縦軸に、横軸に $\sigma_{cb}$ をとって、コンクリート強度の影響を調べたものである。同図によれば、実験値/推定値は、コンクリート強度が大きくなるに従って小さくなる傾向が見られ、 $50\text{N/mm}^2$ 以上では許容応力度に対応する0.6以下になると予測されるため、高強度コンクリートに現行支圧強度式は適用できないと考えられる。

### (2) 提案支圧強度式の誘導

前項によれば支圧強度は、高強度になるほど、現行の支圧強度式より小さくなる傾向が示された。Williamsはその原因として、割裂引張強度が支圧強度に影響を及ぼすことを予測<sup>3)</sup>している。それ故、コンクリートの引張強度に基礎を置く支圧強度推定式を以下のように求める。

#### a) コンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係

図-4(a)は圧縮強度と割裂引張強度の関係を、広い $\sigma_{cb}$ の範囲で示したものである。同図によれば野口式<sup>4)</sup>が良好に実験値を推定しているが、拡大した同図(b)から低強度部分の適合性は悪いことがわかる。したがって、本研究では高強度域で極値をとるものの、低強度コンクリートから $100\text{N/mm}^2$ 程度の高強度コンクリートの範囲における適合性が良好な式(1)でコンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係を推定することとした。なお、同式による推定値に対する実験値の比の平均値は1.00で、標準偏差は0.09であった。

$$f_t = 0.18 \cdot \sigma_{cb}^{(0.8 - \sigma_{cb}/2000)} \quad (1)$$

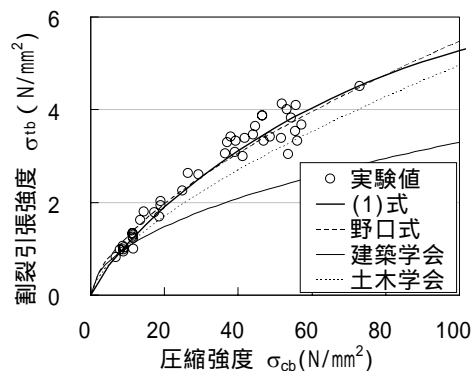


図-4(a) 圧縮強度と割裂引張強度との関係

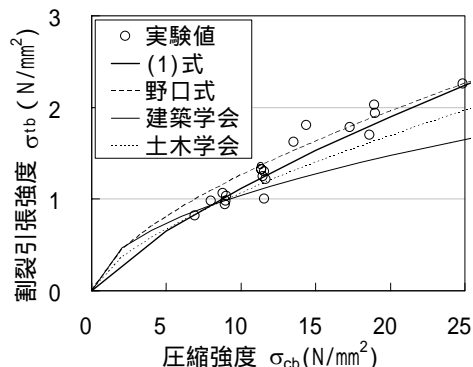


図-4(b) 圧縮強度と割裂引張強度との関係

b) 提案支圧強度推定式

図 - 5 に式(1)より算出した割裂引張強度による支圧強度比( $\sigma_{Br}/\sigma_{tb\text{ cal}}$ )と支圧面積比の関係を示す。圧縮強度を用いた図 - 2の結果と異なり、コンクリート強度にかかわらず支圧強度比は支圧面積比と良好な線形性を示した。

したがって、図 - 5 において直線勾配の平均値を求めると、数値 10 が得られたので、割裂引張強度より算出する支圧強度推定式を式(2)とした。図 - 6 は式(2)による計算値で実験値 $\sigma_{Br}$ を除いた値におよぼす $\sigma_{cb}$ の影響を調べた図であるが、図 - 3 の結果と異なりコンクリート強度の影響は見られない。

$$\sigma_{Br} = 10 \cdot f_t \cdot \sqrt{Ac/AI} \quad (2)$$

また前述の式(1)を用いると、圧縮強度から支圧強度を推定する式(3)が得られる。

$$\sigma_{Br} = 1.8 \cdot \sigma_{cb}^{(0.8 - \sigma_{cb}/2000)} \cdot \sqrt{Ac/AI} \quad (3)$$

図 - 7 は、式(3)より算出した推定値と実験値を比較したものであるが、当然のことながら推定値は実験値を良好に推定している。

(3) シース穴を有する場合の支圧強度

PC 定着部ではプレストレス力の導入後にグラウトが施工されるため、建築学会の現行の設計規準では、支圧強度におよぼすシース穴の影響は明確に記述されてい

ない。しかし、コンクリート便覧<sup>5)</sup>にも示されている通り、シース穴が支圧強度におよぼす影響は大きく、設計において何らかの考慮が必要であると考えられる。

図 - 8 は、縦軸に、支圧板の直下で荷重を直接受けるコンクリート部分の面積で試験体破壊荷重を除いた応力( $\sigma_{Br}$ )を $\sigma_{cb}$ によって無次元化した値を、横軸にシース穴径比( $\phi/d$ ;  $\phi$ はシース穴径,  $d$ は支圧板の一辺長さ)をとって示したものである。同図によれば( $\phi/d$ )が0.6以下では強度比はほぼ一定値となる特徴が見られる。それ故、シース穴がある場合の支圧強度式を以下のように求めることとした。すなわち、シース穴の有無にかかわらず、支圧板直下で支圧応力を受けるコンクリート部分の強度は一定値と仮定すると、同じ支圧板でシース穴がある場合の破壊荷重( $P_u$ )と穴がない場合の破壊荷重( $P_{0u}$ )の比は式(4)で与えられる。したがって、シース穴を有する試験体の  $P_u$  は式(4)に式(3)による  $P_{0u}$  を代入することによって得られる。

$$\frac{P_u}{P_{0u}} = 1 - \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{\phi}{d}\right)^2 \quad (4)$$

図 - 9 は、縦軸に、実験における各試験体の( $P_u/P_{0u}$ )を、横軸にシース穴径比をとって示したものである。同図中には、式(4)による推定曲線を示しているが、実用的

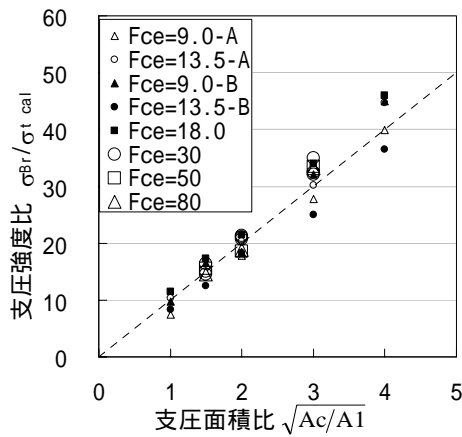


図 - 5 支圧強度に及ぼす割裂引張強度の影響(1)

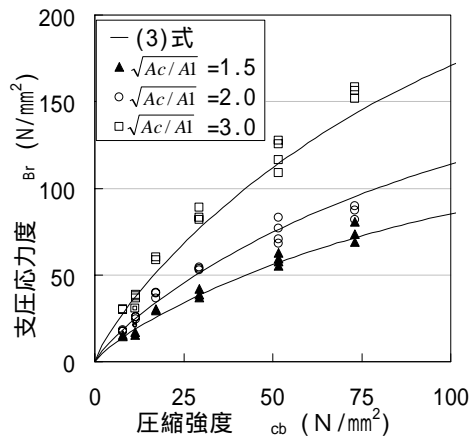


図 - 7 支圧応力の実験値を計算値の比較

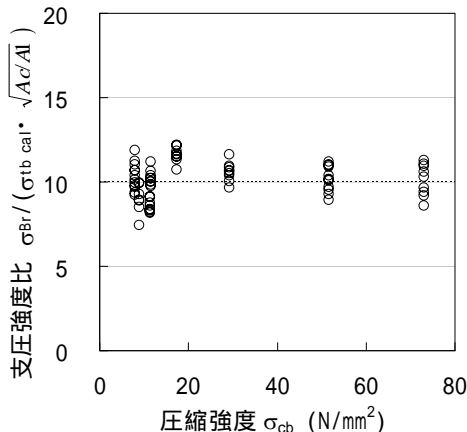


図 - 6 支圧強度に及ぼす割裂引張強度の影響(2)

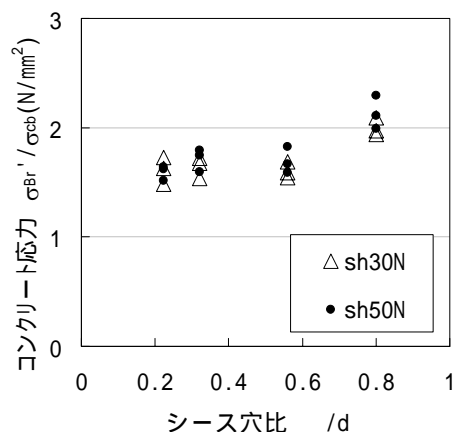


図 - 8 コンクリート応力とシース穴比の関係

な範囲と考えられる( $\phi/d < 0.6$ )で実験値を良好に推定している。また図中には、理論的な根拠は明確ではないが式(5)のような、シース穴がある場合の破壊荷重推定式<sup>5)</sup>も併記しているが、同式は( $\phi/d$ )が0.8の場合も含む実験結果を比較的良好に推定できている。

$$\left(\frac{P_u}{P_{0u}}\right)^2 + \left(\frac{\phi}{d}\right)^2 = 1 \quad (5)$$

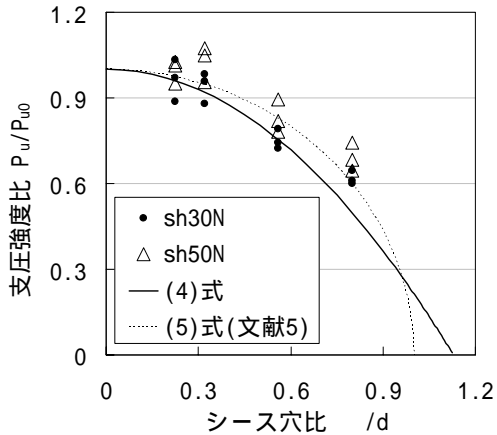


図 - 9 実験値と計算値の比較

### 3. 一面せん断試験

#### 3.1 実験概要

##### (1) 目的

圧着接合部の一面せん断性能に及ぼすコンクリート強度、圧着力の大きさおよび圧着力を与える PC 鋼材へのグラウトの有無の影響を明らかにし、圧着接合設計のための基礎データを得ることである。

表 - 4 試験体一覧

コンクリート 計画圧縮強度 Fce(N/mm <sup>2</sup> )	試験体名	圧着応力比 $\sigma_0/Fce$	グラウト 有無
13.5	13.5N	0.1, 0.2	無
	13.5N-G		有
30	30N	0.1, 0.2	無
	30N-G		有
50	50N	0.05, 0.1, 0.13	無
	50N-G		有

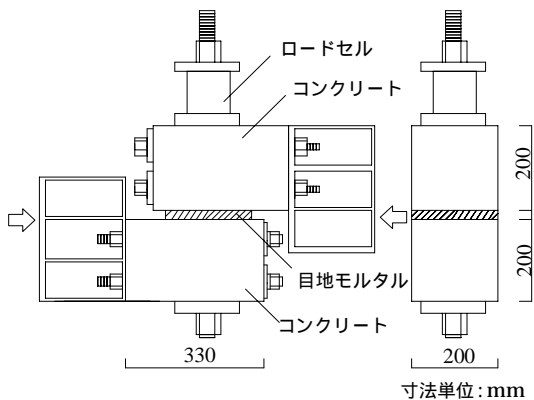


図 - 10 試験体および荷重方法

#### (2) 試験体

試験体一覧を表 - 4 に示す。試験体は図 - 10 に示すように、圧縮強度が 50N/mm<sup>2</sup> のコンクリートブロック(コンクリート)に、表 - 4 の強度(Fce)を持つもう一方のコンクリートブロック(コンクリート)を、目地を介して圧着したものである。圧着力( $P_0$ )は、コンクリートの実強度 $\sigma_{cb}$ に基づき計画した。ここで、 $\sigma_0$  は、 $P_0$  を接合面( $A=200 \times 200$ mm)で除したものである。試験体数は、原則として3体行なった。また、試験体の接合面は、型枠の JAS 合板面である。使用材料の力学的試験結果を表 - 5 に、コンクリートの調合表を表 - 6 に示す。

#### (3) 荷重・測定方法

荷重は、図 - 10 に書き込んだ左矢印位置で反力を取り、右矢印位置にセットしたピンを介して、500kN ジャッキによる単調荷重を行った。接合面に作用する圧着力は接合面の図心を通る PC 鋼棒によって荷重し、実験中における圧着力の変化はロードセルによってモニターした。コンクリートと目地間およびコンクリートとコンクリート間のずれ変形、ならびにコンクリートと目地間それぞれの目開き変形を測定した。

#### 3.2 実験結果および考察

##### (1) 圧着接合面の導入圧着力とせん断耐力の関係

###### a) グラウトがない場合

図 - 11 は、各コンクリート強度の試験体において、最大せん断荷重(以下、せん断耐力  $Q_u$  と記す)におよぼす導入圧着力( $P_0$ )の影響を調べたものである。同図中の中塗り記号は同一種試験体の平均値を示す。同図によれば、ばらつきは大きいものの、いずれのコンクリート強度の場合でも  $Q_u$  と  $P_0$  の間には、縦軸に若干の固着強度をもつほぼ線形関係が認められる。従って本研究では、圧着接合部の一面せん断耐力はクーロンの摩擦理論<sup>6)</sup>によっ

表 - 5 使用材料の力学的試験結果

試験体名	コンクリート		コンクリート		目地モルタル		グラウト	
	$\sigma_{cb}$	Ec	$\sigma_{cb}$	Ec	$\sigma_b$	Ec	$\sigma_b$	Ec
13.5N	13.5	1.4	55.7	3.3	69.3	-	-	-
13.5N-G	14.4	1.9	53.2	3.4	68.3	4.6	26.1	2.2
30N	39.3	3.0	55.5	3.4	68.3	4.6	-	-
30N-G	36.4	3.1	56.1	3.5	69.7	5.6	27.7	2.0
50N	54.4	3.4	-	-	70.9	5.6	-	-
50N-G	56.1	3.5	-	-	69.7	5.6	27.7	2.0

(単位  $\sigma_{cb}$ : N/mm<sup>2</sup>,  $Ec \times 10^4$ : N/mm<sup>2</sup>)

表 - 6 コンクリート調合表

計画 強度	水セメ ント比	単体量						
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材	混和剤	
Fce	W/C	W	C	S	G	石灰石	減水剤	AE剤
N/mm <sup>2</sup>	%	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
13.5	97	159	164	938	975	85	0.52	0.03
30	47	156	332	797	1099	-	1.49	-
50	36	158	439	721	1078	-	1.976	-

て推定できると仮定し、実験結果を直線近似することによって求めた摩擦係数とコンクリート強度の関係を図 - 12 に示す。実験結果にはばらつきが大きいものの、概ね、コンクリート強度の増加に伴い、摩擦係数が増加する傾向が見られた。なお、図 - 11 および 12 の図中の  $9\text{N}/\text{mm}^2$  および  $18\text{N}/\text{mm}^2$  の結果は、前報<sup>2)</sup>の低強度コンクリートの結果である。

b) グラウトがある場合

図 - 13 は、低強度および高強度コンクリートそれぞれについて、グラウト有りの場合のせん断耐力 - 導入圧着力関係の結果を、グラウト無しの場合のそれと比較して示したものである。同図によれば低強度コンクリートの

場合、圧着力が小さい範囲では、グラウト有りの  $Q_u$  は無しの場合のそれに比べ大きい、圧着力の増加に対してその増分が減少する、言い換えれば見かけ上の摩擦係数が減少する傾向が見られた。高強度コンクリートの場合、試験体種類が少ないので明確ではないが、 $P_0$  が大きい場合の  $Q_u$  は無しの場合と同程度かそれ以下となる傾向が見られる。

(2) せん断力 - ずれ変形関係

前項(1)における各試験体の  $P_0 - Q_u$  の特徴を考察するため図 - 14 に、せん断力( $Q$ ) - コンクリート - 間のずれ変形( $\delta H$ )関係の代表例を示す。なお、図中の挿絵は、横軸を最大耐力後の  $2\text{mm}$  まで示したものである。同図(a)に示すグラウト無しの試験体では、低強度および高強度コンクリートのいずれの場合でも、ずれ変形( $\delta H$ )のない固着領域を経て徐々に変形を起こしてせん断最大耐力を迎えるが、その時の  $\delta H$  は極めて小さく、また、最大耐力以降で、 $\delta H$  が  $1\text{mm}$  程度まで耐力下降勾配の急変は見られない。これに対し同図(b)に示すグラウトありタイプの場合、低強度コンクリート試験体では、 $Q - \delta H$  関係における固着領域での  $Q$  および小変形領域での勾配がグラウト無しのときに比べ増大し、その後ずれ変形の増加とともに  $Q$  は徐々に増大し最大耐力を迎えている。これらのことは、接合面でコンクリートに対しダボとしてコッ

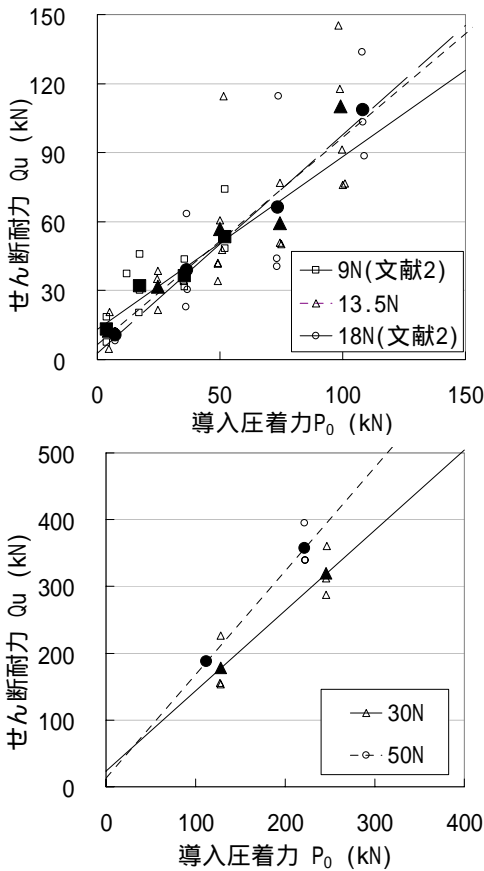


図 - 11 せん断耐力 - 導入圧着力関係

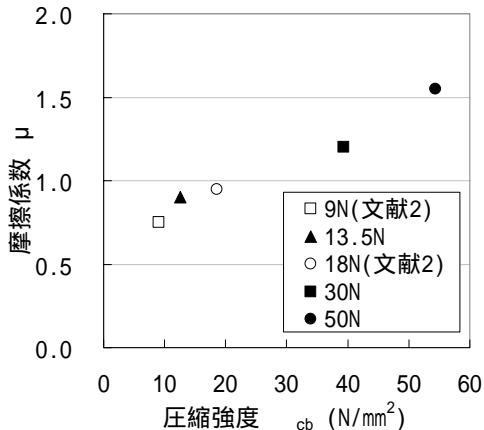


図 - 12 摩擦係数とコンクリート強度の関係

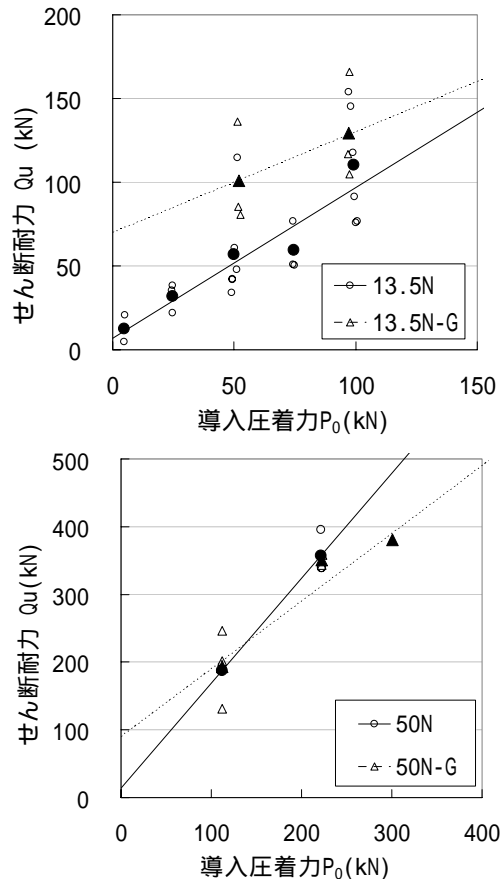


図 - 13 グラウト有無の影響

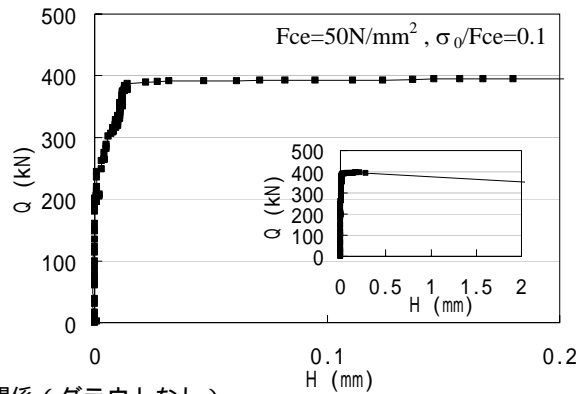
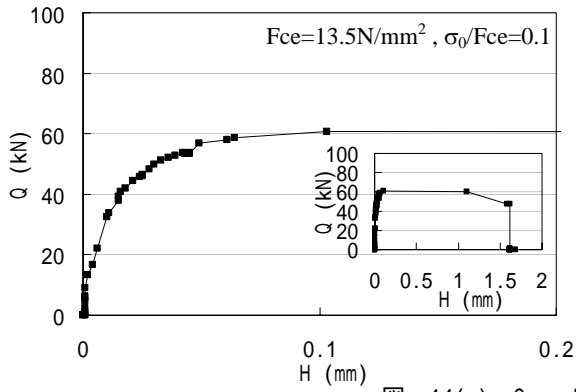


図 - 14(a) Q - H関係 (グラウトなし)

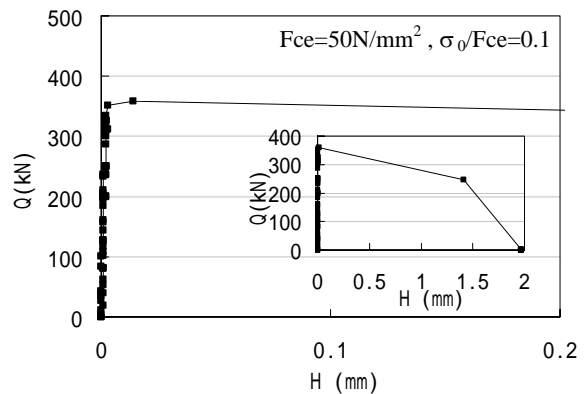
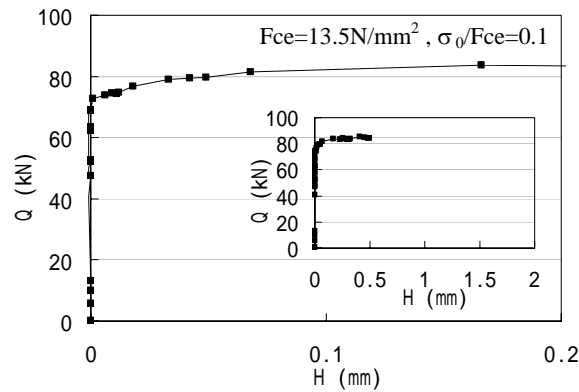


図 - 14(b) Q - H関係 (グラウトあり)

ター作用を發揮すると予想されるグラウト部が相対的に高強度でヤング係数も大きいので、グラウト部のコンクリート部への側方めり込み変形を主因とするずれ変形のために、グラウト部の破壊が生じず、摩擦によるせん断抵抗が主となって機能したことを示唆すると推測される。これに対し、高強度コンクリートでは、コンクリート部の強度およびヤング係数がグラウト部に対して相対的に大きいので、グラウト部のコンクリート部へのめり込み変形があまり生じず、ごく小さなずれ変形時でグラウト部が破壊して最大耐力を迎え、続いて荷重が急減したと推測される。

#### 4. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 建築学会 PC 規準における現行支圧強度推定式は高強度コンクリートに対し危険側の評価を与える。
- (2) コンクリートの引張強度に基づく、低強度から高強度コンクリートにまで適用できる支圧強度推定式を導いた。
- (3) 圧着接合面のせん断耐力はクーロンの摩擦理論で仮定できること、ならびに摩擦係数のコンクリート強度依存性を示した。
- (4) PC 鋼材用のグラウトとコンクリート強度の相対関係で、圧着接合面のせん断耐力、破壊モードが変化する。

#### 謝辞

本研究は、国土交通省「住宅等の耐震性の向上に資する技術開発」プログラムによるもので、ミラクルコーポレーション(株)から多大な研究協力を得た。また、平成20年度科学研究費補助金(課題番号:19560585,代表者;中塚信)を受けた。さらに、実験に際しては、高周波熱錬(株)から資材提供を得た。また、当時大阪工業大学大学院生、吉田由美子氏、建築学科卒論生、若井麻佑子氏、森本圭祐氏および中村哲徳氏から助力を得た。記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 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・同解説 pp.88～89
- 2) 森田，中塚，吉田，坂田：低強度鉄筋コンクリート建物に対する圧着型外側耐震補強に関する基礎研究：コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.3 pp.1249～1254, 2008.7
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料，pp.90～97
- 4) 野口，友澤：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集 第472号，1995.6
- 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧 第二版，p.233, 1996
- 6) 曾田範宗：摩擦の話 p.61, 1971