

論文 高強度材料を用いた接合面におけるせん断力伝達性能の評価

河野 進^{*1}・柳田 豊彦^{*2}・田中 仁史^{*3}

要旨:プレキャスト部材と場所打ちコンクリートを、接合筋を介して接続した接合面におけるせん断力伝達性能を、部材モデルを用いた直接せん断実験により評価した。用いた材料はコンクリート圧縮強度が30MPaから100MPa、鉄筋降伏強度が350MPaから1000MPaの範囲であり、特に高強度材料がせん断力伝達性能に与える影響を調べることを目的とした。実験結果から、せん断耐力に占めるダウエル作用の割合と最大せん断耐力発揮時の滑り量を定量化した。また、せん断接合面が平滑であれば、最大せん断耐力は接合筋の鉄筋比と降伏強度の積に対して線形的に変化し、コンクリート強度には無関係であることを確かめた。

キーワード:プレキャストコンクリート、場所打ち、せん断、ダウエル作用、摩擦作用、接合面

1. はじめに

プレキャストコンクリート部材と場所打ちコンクリート部材間のせん断接合に関しては、従来接合面での摩擦作用および接合筋のダウエル作用を仮定したせん断設計が行われてきた。しかし、既往の研究では接合部がせん断耐力を発揮するときの滑り量が明確にされておらず、摩擦作用とダウエル作用を明確に分離して扱った例が少ない。さらに、鉄筋コンクリート構造物の高層化に伴い高強度化している材料を用いた場合のせん断伝達性能は、普通強度の材料を用いた場合と違うことが指摘されているものの、これを定量的に扱った研究は極めて少ない。

そこで、本研究では高強度コンクリートおよび高強度接合筋を用いた場合に、(1)普通強度材料用の設計式が最大耐力の予想に適用可能か検証すること、(2)せん断接合面における滑りと伝達せん断力の関係を明らかにすること、(3)せん断耐力に占めるダウエル作用の寄与分を明らかにすることの三つの目的で実験を行った。実験では、15体の直方体試験体に直接せん断力を作用させ、これらの問題点の解明を試みた。

2. 実験概要

2.1 試験体の種類

表-1に示すのは、CタイプとDタイプの2種類の試験体を1セットとして6セット・計12体と、さらにCタイプのみの3体、合計15体の試験体名と実験変数である。Cタイプの試験体は、実際のせん断接合部を模擬するもので、摩擦作用とダウエル作用が同時に作用する。Dタイプの試験体は、ダウエル作用を独立して評価しようとするもので、せん断接合面に摩擦を取り除くための鉄板プレートを挿入した。Cタイプの実験で得られた接合面における相対変位をDタイプの載荷時に与え、Cタイプの試験時におけるダウエル作用の寄与分を間接的に求めることにした。表-1に示す通り、実験変数は接合筋の種類と呼び径、及びコンクリートの公称圧縮強度の2種類である。

2.2 試験体の寸法

試験体の寸法、および接合筋以外の配筋は全ての試験体で共通であり、これを図-1に示す。試験体は幅200mm、長さ400mm、高さ320mmの直方体であり、断面中央のせん断接合面は四周に切り欠きを設けた為、幅160mm、長さ360mmと小さくなっている。Dタイプ試験体では、接合筋を含めた配筋が対

*1 豊橋技術科学大学助手 建設工学系 Ph. D. (正会員)

*2 豊橋技術科学大学大学院 建設工学系

*3 豊橋技術科学大学助教授 建設工学系 Ph. D. (正会員)

応するCタイプの試験体と同一であるが、違いはせん断接合面位置に厚さ1.5mmの鉄板を2枚挿入し、摩擦作用を排除した事である。上下ブロックに4個ずつ埋め込んだ六角長ナットは、試験体を载荷フレームに固定するためのものである。せん断面を横切る接合筋は図中に影をつけて示してある。D10を用いた接合筋は、閉鎖型四角形に加工し、これを2セット配置した。D16を用いた接合筋は図-1(C)のように上下にアンカープレートを溶接し、これを4本配置した。表-2に使用した鉄筋の力学的性質を示す。

2.3 試験体の打設

Cタイプの試験体は、せん断面を挟む上下のブロックのコンクリートを2回に分けて打設した。まず、下側のブロックを接合筋を埋め込んだ状態で図-1(a)のA方向から打設し、翌日にワイヤーブラ

シで骨材が見えるまでモルタルを除去した。これは表面洗い出しの処理であるが、打ち継ぎ面の凹凸は最大でも2mm程度であり、4章でも検証される通り表面状態は平滑として取り扱うことが妥当と考えられる。上側のブロックは下側のコンクリート打設から1週間後、試験体を立て、B方向に打設を行った。Dタイプの試験体は、せん断接合面に鉄板を2枚挿入した状態で試験体を立て、B方向から上下のブロックのコンクリートを同時に打設した。

脱型後は、CタイプとDタイプの両方で载荷直前まで湿布養生した。試験時のコンクリートの力学的性質は、表-3に示す通りであった。なお、全ての試験体で最大粗骨材粒径は20mmであった。

表-1 試験体名と実験変数

試験体		接合筋の呼び強度と呼び径	コンクリートの公称圧縮強度 (MPa)
C type	D type		
L10-30-30C	L10-30-30D	SD295A	30
L10-50-50C	L10-50-50D	D10	50
L10-80-80C	L10-80-80D	(L10 series)	80
H10-30-30C	H10-30-30D	KSS785 [*]	30
H10-50-50C	H10-50-50D	D10	50
H10-80-80C	H10-80-80D	(H10 series)	80
H16-30-30C	-	KSS785 [*]	30
H16-50-50C	-	D16	50
H16-80-80C	-	(H16 series)	80

*1: 神戸製鋼所社製高強度せん断補強筋

表-2 鉄筋の力学的性質

種類	呼び強度 呼び径	降伏 強度 (MPa)	引張 強度 (MPa)	弾性 係数 (GPa)
接合筋	SD295A D10	354	481	182
	KSS785 [*] D10	999	1034	184
	KSS785 [*] D16	867	1085	187
組み立て筋	SR295 φ6	351	447	206
	SD295A D10	354	481	182

*1: 神戸製鋼所社製高強度せん断補強筋

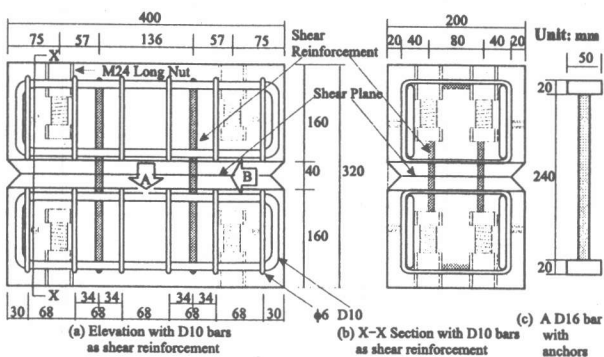


図-1 試験体図

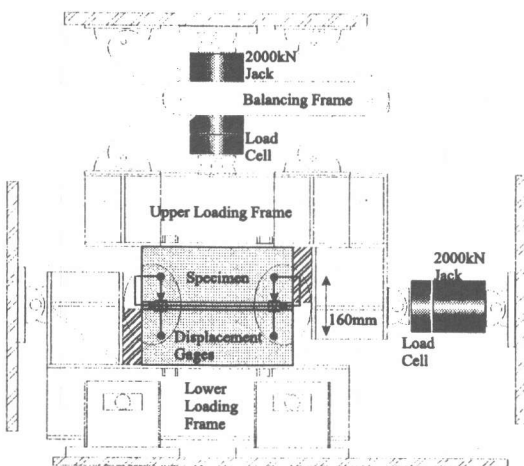


図-2 载荷装置と計測器の配置

表-3 コンクリートの力学的性質

公称圧縮強度 (MPa)	コンクリートの位置	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
30	Cの先打部	30.0	3.16	25.4
	Cの後打部とD試験体	31.8	3.52	24.4
50	Cの先打部	54.6	4.41	33.7
	Cの後打部とD試験体	45.4	4.44	29.2
80	Cの先打部	79.2	3.31	35.6
	Cの後打部とD試験体	102.6	3.52	35.0

2.4 載荷と計測

載荷装置と計測器の配置を図-2に示す。まず、水平力を加力する2000kNジャッキと下側フレームの水平方向反力点は試験体せん断接合面と同じ高さに設置し、せん断面に高さ方向の偏心によるモーメントが作用しないようにした。試験体は上下とも載荷用のフレームにそれぞれ4本のM24ボルトで緊結されている。上部フレームはパンタグラフ、下部フレームはローラー支持により水平方向に自由に動くため、フレームの上下位置から水平力は作用しない。

Cタイプ試験体における加力は水平方向のみとし、鉛直方向の加力は行わなかった。加力は、水平方向の2000kNジャッキにより試験体上部ブロックを押しながら、滑り量が既定値(約10mm)に達するまで静的単調載荷を行った。

Dタイプ試験体では対応するCタイプ試験体で得られた滑りと開きの関係を保持するように水平方向及び鉛直方向の2本のジャッキを操作した。図-3に示すのは、全試験体の滑りと開きの関係である。L10-30-30C及びH10-30-30Cの試験体は、測定装置の不都合等から載荷をそれぞれ滑り量5mmと2mmで止めた。図中、細線で示すDタイプ試験体の滑りと開きの関係は、対応するCタイプ試験体のそれを良く追従できたと考えられる。

2本のジャッキの荷重は、先端に取り付けたロードセルによって測定した。せん断接合面を挟む上下ブロックの滑りと開きは、試験体の4隅に設置した検長5mmの変位計によって測定した。せん断接合面を横切る接合筋の歪は、せん断接合面から25mmの位置に2枚づつ貼付した検長3mmの歪ゲージを用いた。

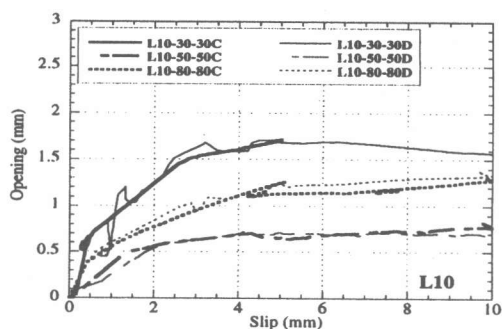
3. 実験結果

3.1 破壊性状

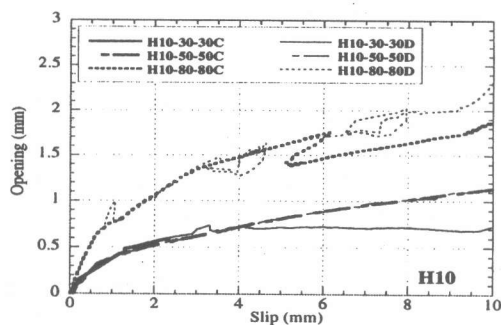
全試験体において、せん断接合面にそって滑りと開きが生じた。他にも、軽微なひび割れが観察されたが、せん断接合面に沿ったひび割れに比べると試験結果への影響は無視できると考えられる。

3.2 せん断応力-滑り関係

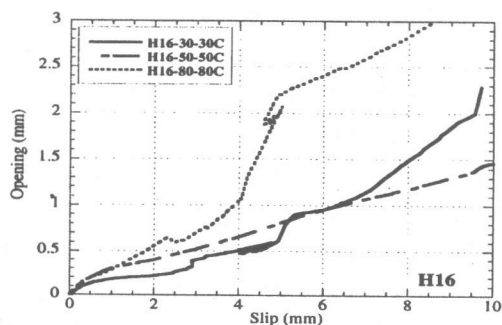
全試験体のせん断応力と滑りの関係を図-4に示す。CおよびDタイプの対応する試験体は同じグラフ内に示してある。せん断応力は、水平力をせん断接合面積576cm²で除した値であり、滑りは4本の変位計の平均である。前述したように、L10-30-30C及びH10-30-30Cの試験体は、載荷をそれぞれ5mmと2mmで止めた。また、載荷途中、載荷治具の都合で意図的に除荷を行ったものが数体ある。なお、図中(g)(h)(i)は縦軸のスケールが他のものと異なる。



(a) 低強度鉄筋 (L10) の場合



(b) 高強度鉄筋 (H10) の場合



(c) 高強度鉄筋 (H16) の場合

図-3 開きと滑り関係

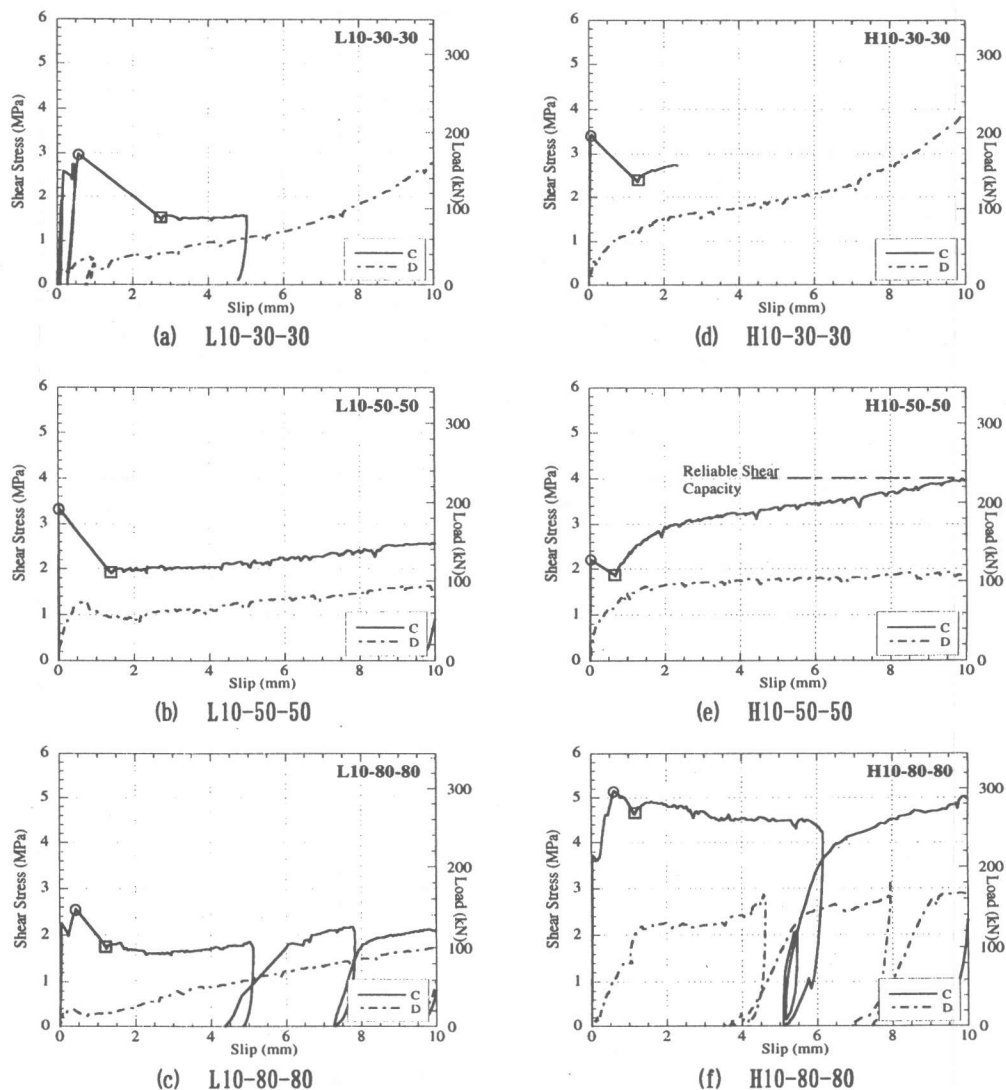
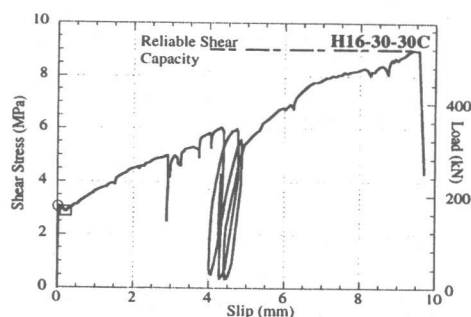


図-4 せん断応力と滑り関係 (次頁へ続く)

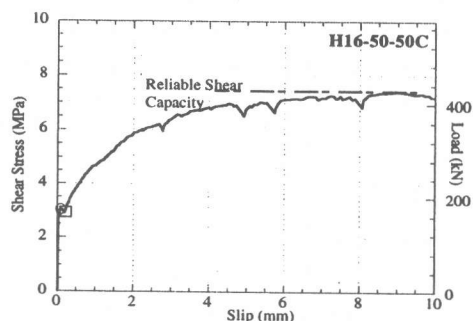
(1) Cタイプのせん断応力-滑り関係

せん断応力と滑りの関係をCタイプの9体について論ずる。L10シリーズの3体とH10-30-30C, H10-80-80Cの2体は滑りが2mmまでに図中に丸印で示した初期耐力最大値(実測曲線の初期に現われる最大値)に到達する。この後、滑りとともに耐力は大きく低下し図中の四角で示す点に到る。この点を過ぎた後は、耐力の大きな変化は認められず、耐力は初期耐力最大値を超えずに滑りのみが進行する。これらを、初期耐力型の試験体と呼ぶ。初期耐力型では、初期耐力最大値が最大耐力に等しい。次に、H16

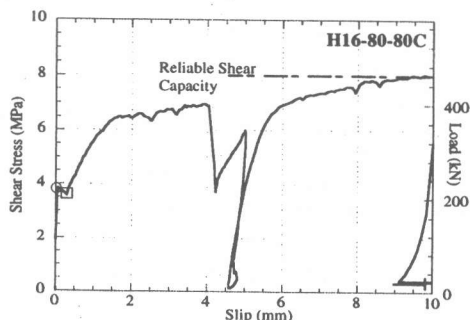
シリーズの3体とH10-50-50Cは耐力が四角で示す値まで低下した後、耐力が再び増加し、やがて初期耐力を上回る。これらを、耐力漸増型の試験体と呼ぶ。耐力漸増型では、H16-50-50Cを除き、実験で与えた滑り量10mmの範囲では、最大耐力に達したと考えられない。しかし、この4体では本実験中に得られた最大値は少なくとも保証できると考え、保証耐力(Reliable Shear Capacity)として図中に示した。本論文では、この保証耐力を耐力漸増型の最大耐力として取り扱う。



(g) H16-30-30C



(h) H16-50-50C



(i) H16-80-80C

図-4 せん断応力と滑り関係 (続き)

(2) Dタイプのせん断応力-滑り関係

Dタイプ試験体のせん断応力-滑り関係は、図-4中に一点鎖線で示されているが、滑りの増加に伴い耐力がほぼ単調増加したとみなせる。

3.3 ダウエル作用の寄与分

図-5は、ダウエル作用が全せん断力に占める割合の推移を示す。これは、対応するCタイプとDタイプの試験体の、同一滑りに対応するせん断応力の比を計算することで求めたものであり、縦軸の τ_c と τ_d はそれぞれCタイプとDタイプのせん断応力を示す。滑りが4mm程度になるまで、初期にはほぼ

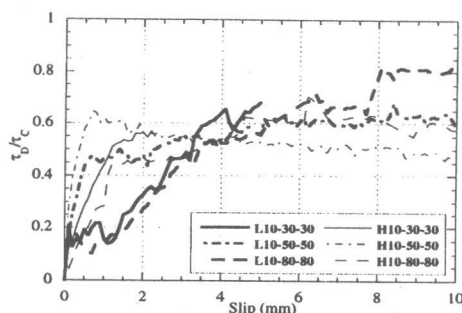


図-5 ダウエル作用が全せん断力に占める割合

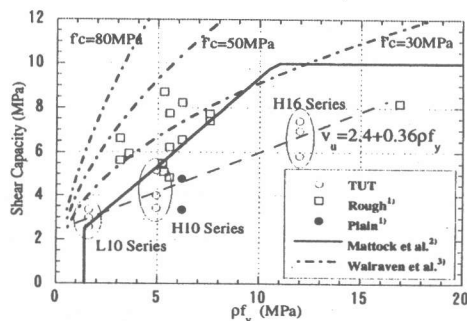


図-6 最大せん断耐力と $p_s f_y$ の関係

0であったダウエル作用の寄与分は、全体の60%程度まで増加する。この後、ダウエル作用の寄与分は滑りが10mmまでに増減し、最終的に50%から80%の間の値となる。細線で示す高強度接合筋を用いたH10シリーズは、太線で示す普通強度接合筋を用いたL10シリーズに比べ、2mm以下の小さい滑りでは、ダウエル作用の寄与分が大きい傾向がある。

3.4 コンクリート強度の影響

本実験では、図-4・図-5から分かるように、せん断応力と滑りの関係やダウエル作用の寄与分にコンクリート強度の明確な影響は、認められなかった。

4. 考察

3.2.1項で説明した本実験Cタイプ試験体9体の最大耐力を、他の実験結果及び耐方式と比較したのが図-6である。横軸の p と f_y は、それぞれ接合筋の鉄筋比(接合筋断面積総和/コンクリート接合断面面積)及び降伏強度である。図中RoughとPlainで示されるのは、岡本等¹⁾によるS字型試験体を用いた実験結果で、表面仕上げがそれぞれ洗い出しと

平滑の場合である。実線は、Mattock等²⁾による提案式であり、最大せん断耐力、 v_u 、が式(1)で表される。

$$v_u = 1.4 + 0.8 (\rho f_y + \sigma_n) \quad (\text{MPa})$$

ただし、 $v_u < 0.3 f'_c$ (1)

ここで、 ρ は接合筋比、 f_y は接合筋の引張り降伏強度、 σ_n は接合面に垂直な応力の大きさ(圧縮が正、本実験では $\sigma_n = 0$)である。一点鎖線はコンクリート強度を最大せん断力の算定に含めたWalraven³⁾等による提案式であり、式(2)で与えられる。

$$v_u = C_1 (\rho f_y)^{C_2}, \quad C_1 = 0.822 f'_{cc}{}^{0.406}$$

$$C_2 = 0.159 f'_{cc}{}^{0.303} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

ここで、 f'_{cc} はコンクリート立方試験体圧縮強度である。図-6におけるWalravenの曲線は、 f'_{cc} の値を本実験で得られたシリンダー圧縮強度の1.15倍と仮定し、式(2)を用いて求めたものである。式(1)と式(2)は、ともに本実験の結果を上回った耐力を予想したことが図-6からわかる。これは、MattockやWalravenの提案式が、接合面の状態が本実験より凹凸の大きいものを対象としているためであると考えられる。凹凸が大きくなるに従い、コンクリート強度の影響が、最大せん断耐力に現れてくるのではないかと予想される。

2.3節で説明した通り、本試験体のせん断接合面の状態は平滑として考えられ、岡本等による2体の平滑面の試験体と合わせると、せん断耐力が ρf_y とほぼ線形関係にあることが分かる。この線形関係を本研究の9体に関して最小自乗法を用いて求めると、式(3)が得られる。

$$v_u = 2.4 + 0.36 \rho f_y \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

なお、相関係数は、0.94であった。図-6の破線は、式(3)を示す。ただし、2.3節でも説明した通り、 ρf_y が大きい場合のせん断耐力は、大きな滑りを生じてはじめて到達できるものであり、実際の部材接合部の設計では注意を要する。

5. 結論

せん断接合面が平滑なコンクリート打設面におけるせん断伝達性能に関して次の結論を得た。

- (1) 最大せん断耐力は ρf_y の増加に対しては線形的に増加し、この関係はMattock等による提案式と同様の一次式を用いて表わすことができる。
- (2) 最大せん断耐力を発揮するときの滑り量は、 ρf_y の増加に伴い大きくなる傾向がある。
- (3) 滑りが4mm程度まではせん断耐力に占めるダウエル作用の寄与分は滑りとともに増加するが、滑りが4mmを超えるあたりから寄与分の増加率は小さくなり、載荷終了時には全体の50%から80%となった。また、高強度の接合筋を用いた試験体は、滑りの小さいときからダウエル作用の寄与分が大きい傾向がある。
- (4) 今回の実験では、コンクリート圧縮強度は、最大せん断耐力とその時の滑り量、またダウエル作用の寄与分に影響を与えなかった。しかし、接合面の凹凸が大きくなることで、コンクリート強度の影響が現われる可能性が有る。

【謝辞】

本研究は、(社)建築研究振興協会に設けられた共同研究「PC構造設計・施工指針の作成」の研究調整委員会・構造性能評価WG(委員長：岡本伸、主査：渡辺史夫)で行われたものである。本研究の遂行にあたり、神戸製鋼株式会社には鉄筋を提供して頂き、竹本油脂株式会社にはコンクリートの養生に協力して頂いた。ここに、謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 岡本晴彦他：プレキャスト部材と現場打ちコンクリートとの接合面のせん断耐力に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 539-540, 1990, pp. 679-680, 1991, pp. 773-774, 1992.
- 2) Mattock, A.H. and Hawkins, N.M.: Shear Transfer in Reinforced Concrete Recent Research, PCI Journal, pp. 55-75, March-April 1972.
- 3) Walraven, J., Frenay, J., and Puijssers, A.: Influence of Concrete Strength and Load History on the Shear Friction Capacity of Concrete Members, PCI Journal, pp. 66-84, Jan.-Feb., 1987.
- 4) Dulacska, H., "Dowel Action of Reinforcement Crossing Cracks in Concrete," ACI Journal, pp. 754-757, Dec. 1972.