

論文 高強度コンクリート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}・川西 泰一郎^{*2}・田中 仁史^{*3}・渡辺 史夫^{*4}

要旨:普通強度の接合筋を介して接続された高強度コンクリート打継ぎ面が、直接せん断力を受ける場合のせん断力と滑りの履歴特性を、13体のモデル試験体を用いた実験及び3次元有限要素法を用いた数値解析から評価した。実験では、コンクリート強度が与える影響はコンクリートの摩擦作用に顕著に現れることを確認し、以前の実験では小さいと考えられたダウエル作用にもある程度影響することをつきとめた。数値解析では、接合筋の歪分布等をある程度予想できたが、せん断応力-滑り関係の予想は十分とはい難くコンクリート及び鉄筋の付着のモデル化に改良の余地があることが明らかになった。

キーワード:高強度コンクリート、打継ぎ面、接合筋、せん断力、ダウエル作用、摩擦作用

1. はじめに

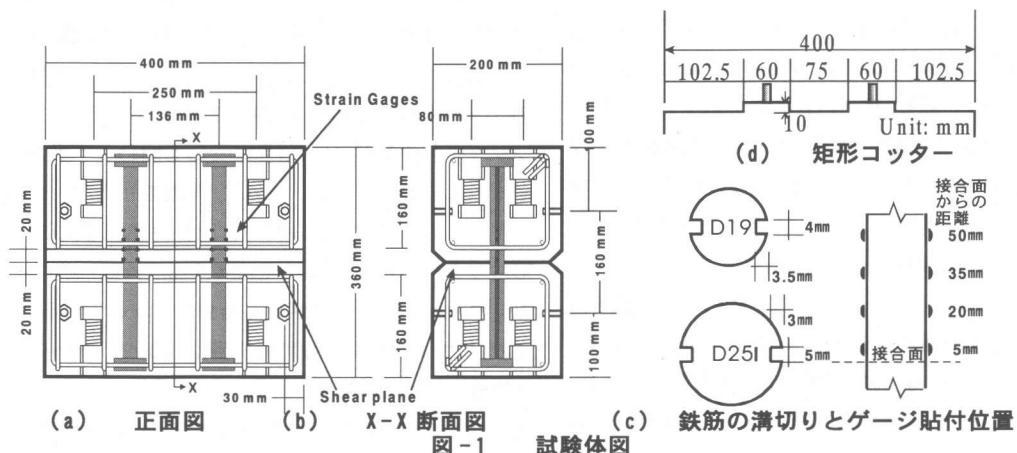
プレキャスト構造においては、打設時期が異なるコンクリートがせん断力伝達のため接合筋を介して接続される場合がある。こうしてできる界面におけるせん断力伝達機構に関しては、現在までに多くの研究がなされ様々なせん断耐力式が提案されている^{1)~5)}。しかし、コンクリートや接合筋が高強度である場合の研究はまだ少なく、滑りに伴ってせん断伝達機構がどのように変化するか未だ明らかでない。

これから需要が高まる高強度材料を用いたプレキャスト構造では、せん断伝達機構の解明は重要な課題の一つであると考えられる。そこで本研究では、(1)

高強度コンクリートと普通強度鉄筋を用いたせん断接合面における直接せん断試験を正負交番繰り返し載荷のもとで行い、接合面の粗さとコンクリート強度がせん断力-滑りの履歴特性にどのように影響するかを実験的に確認すること、さらに(2)有限要素法を用いた数値モデルでダウエル作用の抵抗機構を明らかにすることの2つを目的として研究を行った。

2. 実験概要

実験で用いた試験体は13体ある。これらの名称と実験変数を表-1に、材料の力学的特性を表-2及び表-3に示す。試験体寸法と配筋詳細は、図-1に



*1 京都大学工学研究科助手
 *2 都市基盤整備公団
 *3 京都大学工学防災研究所教授
 *4 京都大学工学研究科教授

建築学専攻 Ph. D. (正会員)
 工修
 Ph. D. (正会員)
 建築学専攻 博士(正会員)

表-1 試験体名と実験変数

試験体名	試験体の種類	実験変数			実験結果					
		f'c (MPa)	接合面の仕上げ	鉄筋の種類	押し側(正側)			引き側(負側)		
					耐力 (MPa)	滑り (mm)	開き (mm)	耐力 (MPa)	滑り (mm)	開き (mm)
L19-045PC	複合	45	箒目	D19	3.99	0.46	0.36	-3.23	-0.57	0.54
L19-045PD	ダウエル		鉄板挿入		-	-	-	-	-	-
L25-045RC	複合		洗出し		4.27	0.91	0.39	-3.17	-0.53	0.35
L25-045RD	ダウエル		鉄板挿入		-	-	-	-	-	-
L25-045KC	複合		矩形コッター	D25	5.37	1.83	1.38	-3.31	-0.78	0.69
L25-045KD	ダウエル		鉄板挿入		-	-	-	-	-	-
L25-045K2	ダウエル		鉄板挿入		-	-	-	-	-	-
L19-110PC	複合	110	箒目	D19	4.14	0.44	0.19	-3.15	-0.54	0.47
L19-110PD	ダウエル		鉄板挿入		-	-	-	-	-	-
L25-110PC	複合		箒目		6.24	0.95	0.77	-3.89	-3.87	3.24
L25-110PD	ダウエル		鉄板挿入		-	-	-	-	-	-
L25-110RC	複合		洗出し		6.18	0.48	0.20	-3.83	-0.31	0.21
L25-110RD	ダウエル		鉄板挿入	D25	-	-	-	-	-	-
L25-110KC	複合		矩形コッター		6.67	0.89	1.02	-3.43	-1.06	1.02
L25-110KD	ダウエル		鉄板挿入		-	-	-	-	-	-

注: 表中 f'c は、コンクリート設計強度を示す。

表-2 コンクリートの力学的性質

コンクリート設計強度(MPa)	打設順序	圧縮強度(MPa)	割裂強度(MPa)	弾性係数(GPa)
45	1st	44.1	3.49	30.8
	2nd	47.5	3.51	30.9
110	1st	112	5.67	43.4
	2nd	112	5.58	43.2

表-3 接合筋の力学的性質

接合筋の種類	降伏強度(MPa)	引張強度(MPa)	弾性係数(GPa)
D19	432	642	164
D25	386	588	184

示す通りである。表中、複合試験体は実際のせん断接合部を模擬し、摩擦作用とダウエル作用が同時に作用する。接合面の仕上げは、箒目・洗出し・矩形コッター（図-1(d)参照）の3通りである。ダウエル試験体は、ダウエル作用を独立して評価しようとするもので、試験体形状は図-1で示すものと同じだが、せん断接合面に摩擦を取り除くための鉄板プレートが挿入されている。実験変数は、複合かダウエルかの別を除くと、コンクリート圧縮強度・接合面仕上げ・接合筋の直径の3種類である。

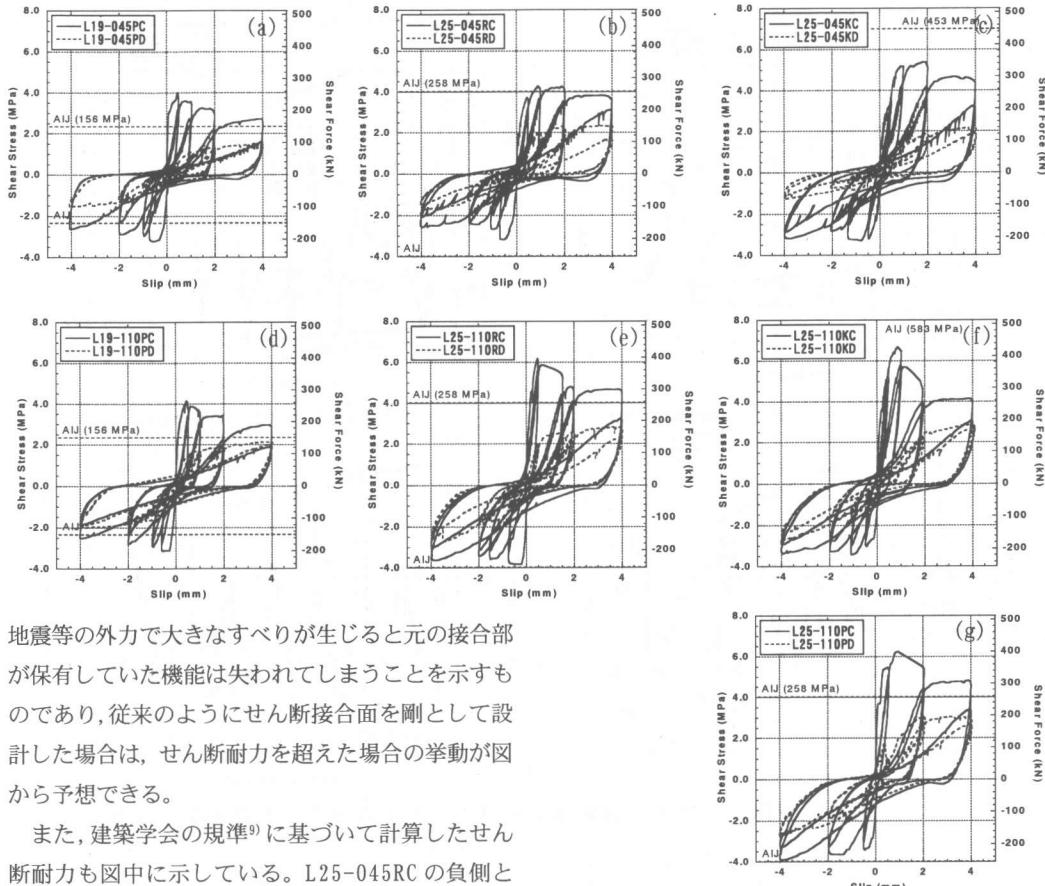
なお、コンクリートの打設は下側のブロックを打設し必要な表面処理を行い、3日後に上側のブロックを打設した。載荷装置は文献8に示す方法と同様に、接合面にモーメントが働くせん断力のみが作用するようにした。測定装置に関しても文献8に示すのと同様の方法で、せん断面に作用するせん断力と鉛直力、せん断面における相対開きと相対すべりを測

定した。詳細は、紙面の関係で割愛する。載荷は図-2から分かる通り、滑りが0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mmにおいて2回づつ正負交番繰り返しを行った。ダウエル試験体については、対応する複合試験体の滑りと開きの履歴を追従するように変位制御で載荷を行い、対応する複合試験体におけるダウエル作用の寄与分が解析できるようになっている。

3. 実験結果

3.1 複合試験体のせん断応力一滑り関係

図-2に示すのは、14体の複合試験体とダウエル試験体のせん断応力と滑りの履歴曲線である。複合試験体の正側（押し）または負側（引き）における最大せん断力とそのときの滑り及び開きは、表-1にまとめて示してある。図から分かるように、箒目の仕上げを行ったL19-045PCとL19-110PCでは、コンクリート強度がほぼ2倍異なるにも関わらず耐力がほとんど変わらない。しかし、界面の凹凸が大きな洗出しの試験体（L25-045RC, L25-110RC）及び矩形コッターの試験体（L25-045KC, L25-110KC）では、コンクリート強度の差がせん断耐力に現れている。これは、コンクリート強度の影響はコンクリートの摩擦機構による寄与分に対して顕著に現れるとした文献6における結論を裏付けるものである。さらに、図-2に示す全ての試験体で顕著なスリップ型の履歴を示し、一旦すべりが生じるとこれより小さなすべりでは、剛性や耐力が極端に小さくなっている。



地震等の外力で大きなすべりが生じると元の接合部が保有していた機能は失われてしまうことを示すものであり、従来のようにせん断接合面を剛として設計した場合は、せん断耐力を超えた場合の挙動が図から予想できる。

また、建築学会の規準⁹⁾に基づいて計算したせん断耐力も図中に示している。L25-045RC の負側と L25-045KC 及び L25-110KC の正負側では AIJ の予想式よりも実験で得られた耐力はかなり低めに出ていている。目粗しをした仕上げ面に正負繰り返し荷重が作用する場合の負側ではせん断耐力が正側よりかなり低くなること、また本実験のようにコンクリート強度が高い場合にはせん断耐力が予想より低くなるので注意を要する。

3.2 せん断力に占めるダウエル作用寄与分の変化

図-3に、コンクリート強度が110MPaの試験体について対応する複合試験体とダウエル試験体のせん断応力の変化を示した。反転を行った変位における第1回目の最大耐力点同士を太い実線又は点線で結んである。こうした実線と点線は、正側でも負側でもサイクル数が増えるごとに相互に接近することから、全せん断応力に占めるダウエル作用の寄与分が増加して、コンクリートの摩擦作用が小さくなることが分かる。また、図-3(b), (c), (d)の点線同士を

図-2 せん断応力-すべり関係

比較すると、仕上げ状態が異なればコンクリート強度と鉄筋の種類が同じでもダウエル作用の寄与分が異なる。これは、同じすべりに対応する開きが仕上げ状態により異なるためであり、他の研究¹⁰⁾でも明らかとなったように開きとすべりの2つがダウエル作用に大きく影響することが再確認された。

3.3 鉄筋の歪分布

図-1(c)に示すように貼付した歪ゲージで、鉄筋の歪分布を測定した。その代表例として、L25-110PCにおける滑り土0.5mm時の歪分布を図-4に示す。凡例の右左は一本の鉄筋における位置を示す。押し(実線)の場合はせん断面から上下に25mm程度の所で歪分布が最大となる。引き(点線)の場合には実線をX軸に関して対称移動したように見えるが、歪分布の最大点はあまり明らかではない。

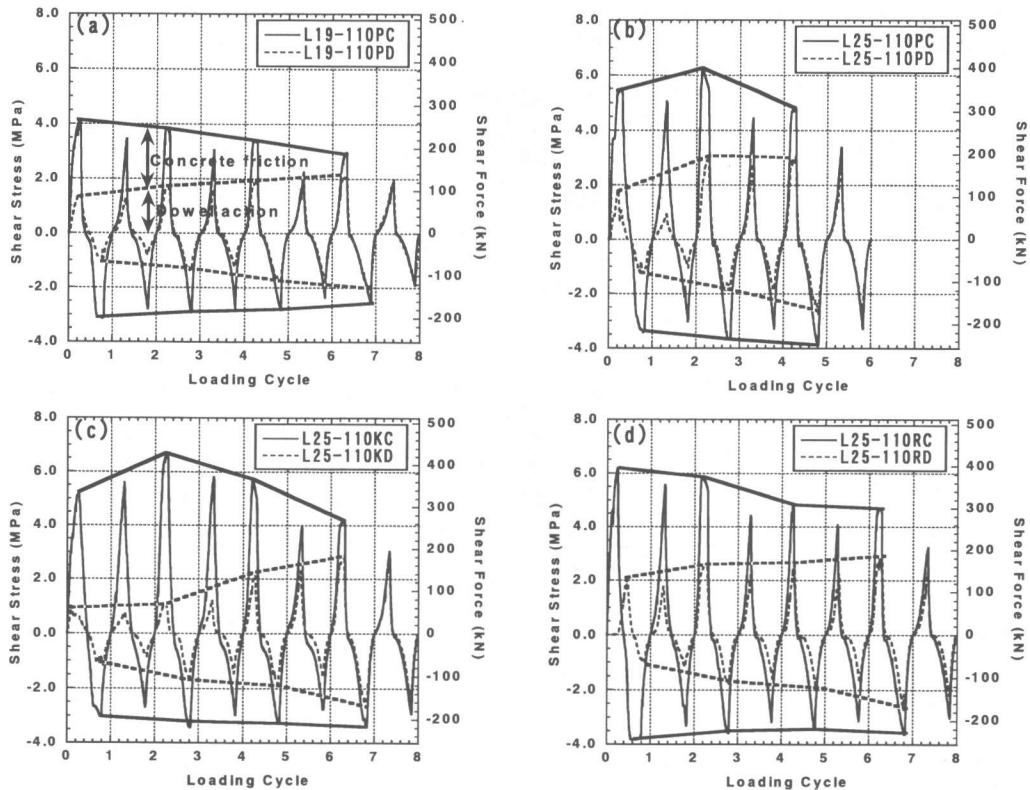


図-3 複合試験体とダウエル試験体におけるサイクル毎のせん断応力の変化

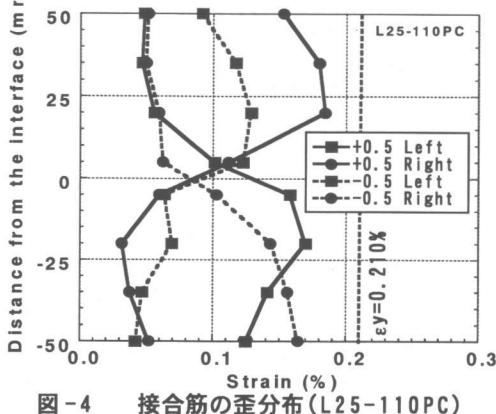


図-4 接合筋の歪分布 (L25-110PC)

4. ダウエル作用の有限要素解析

4.1 解析モデル

ダウエル作用によるせん断伝達機構を明らかにする為、汎用有限要素法解析パッケージABAQUSを用いた数値解析を行った¹¹⁾。但し、界面でのコンクリート同土の摩擦作用によるせん断力の伝達は、今回の解析対象としていない。解析では対称条件を考慮して上部ブロックの1/4のみをモデル化した。簡

単化のため、鉄筋断面は実験で用いた接合筋と同じ断面積を持つ正方形を考え、これを半分にしたもの完全付着を仮定して図-5に示すモデルに埋め込んだ。コンクリートの要素自体がひび割れることで鉄筋とコンクリートの界面の肌離れを模擬できると考えたので有る。

コンクリート部分は、ABAQUSにあるコンクリート構成則を用いた。破壊曲面は、図-6(a)に示す通り主応力空間の子午平面(図中pは静水圧応力、qは偏差応力を示す)において2つの曲線で示すことができる。一つはひび割れを規定するRankineの最大引張応力基準であり、他の一つは圧縮における塑性化を規定するMisesの降伏条件である。圧縮域における一軸挙動は図-6(b)に示す通りである。引張域の一軸挙動は、引張強度 f'_t までは弾性、ひび割れ後は図-6(c)に示す応力-開き関係で表されたとした。図中の引張強度は圧縮強度の0.076倍(45MPa)と0.050倍(110MPa)、応力が0となる開き U_0 は

コンクリート強度に関わらず0.05mmとした。鉄筋は完全弾塑性を仮定した。

解析では、鉄筋の基部をピン支持としてモデルの左側基部に右向きの水平変位を徐々に加え、解が収束しなくなるまで計算を行った。解析に用いたモデルは、表-4に示す3パターンである。

4.2 解析結果

解析から得られたせん断応力-滑り関係を解析モデルABA25-045と実験L25-045Dと比較したのが図-7である。実験における履歴曲線の包絡線を考えると、解析モデルの剛性と耐力の予想はかなり大きめである。ピークを超えたあたりの解析結果は、鉄筋と接して大きな力を受ける接合面近くのコンクリート要素が、圧縮破壊でなく引張り破壊によってせん断耐力が落ちていくことが認められた。

図-7における解析精度があまりよくないので、

今回の解析結果はコンクリート強度や鉄筋径の影響を定性的に調べるために用いることとする。図-8では、3つのモデルの解析結果を比較している。コンクリート強度や鉄筋径が変化したことにより発揮されるせん断耐力や剛性の違いをある程度示していると考えられる。しかし、ABA25-045とABA25-110を比較すると、コンクリート強度の影響が余りにも大きいようである。実験では、コンクリート強度の差はこれほど顕著でなかったことを考慮すると、用いたコンクリートの材料特性が実際よりも剛性や耐力の点で大きすぎたと思われる。

さらに、ABA25-045における鉄筋の軸方向の歪分布をすべりが0.05mmと0.1mmの場合に示したのが図-9である。歪分布の最大値が界面からおよそ25mm程度の所で現れており、これに関しては図-4に示されるような実験結果をうまく表すことが出来たと考えられる。

以上解析では、コンクリートの引張り破壊が接合筋の変形に大きく寄与し、接合筋が引張りと曲げを受けることでダウエル作用の応力伝達が行われることが定性的に分かった。

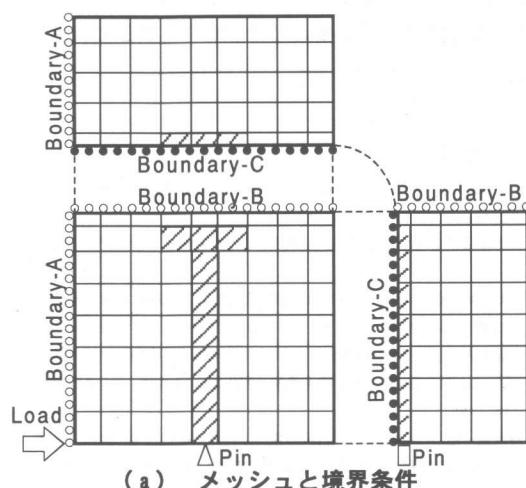


図-5 上部ブロックの1/4 モデル
(a) メッシュと境界条件

表-4 数値解析におけるモデルの種類

モデル名	模擬した 鉄筋種類	$f'c$
		MPa
ABA25-045	D25	45
ABA25-110	D25	110
ABA19-045	D19	45

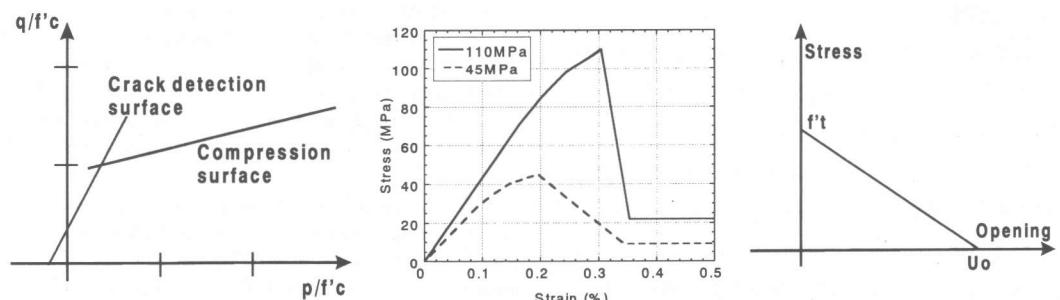


図-6 有限要素解析で用いたコンクリートの力学モデル
(a) コンクリートの破壊曲面 (b) 圧縮側の挙動 (c) 引張側の挙動

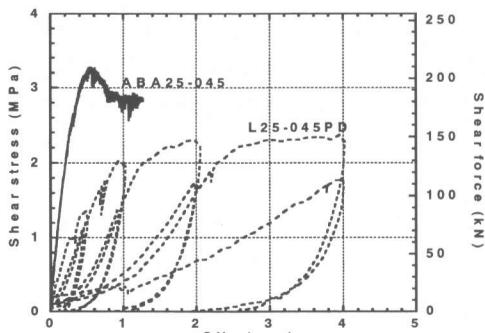


図-7 解析結果とモデルの比較

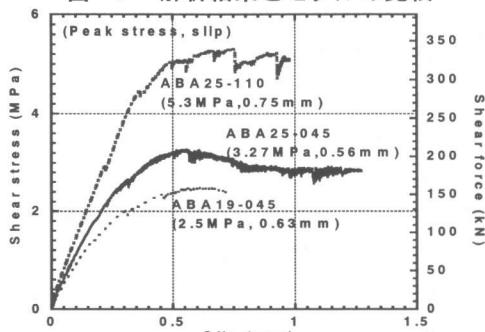


図-8 解析によるせん断力-滑り関係

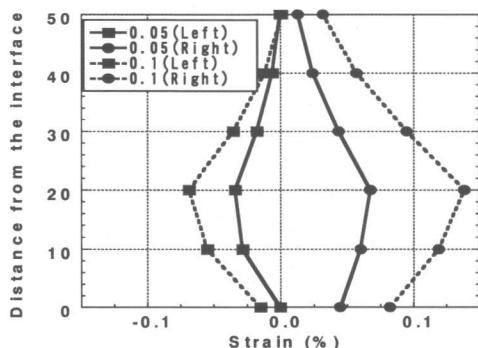


図-9 解析における歪分布(ABA25-045)

5. 結論

普通鉄筋と高強度コンクリートを用いたコンクリート打ち継ぎ面を仮定したモデル試験体を用いた実験及び数値解析を行い以下の結論を得た。

(1) 目粗しをした仕上げ面に正負繰り返し荷重が作用する場合の負側ではせん断耐力が正側よりかなり低くなること、また本実験のようにコンクリート強度が高い場合にはせん断耐力が予想より低くなるので注意を要する。

(2) コンクリート強度の影響はコンクリートの摩擦作用寄与分に顕著に現れることが再度確認された。また、以前の研究ではコンクリート強度はダウエル作用には影響しないとの結論を得たが、今回の実験及び解析で摩擦作用ほど顕著ではないもののコンクリート強度の影響はダウエル作用のせん断耐力寄与分にも影響を与えることを確かめた。

(3) 接合筋の軸方向歪の分布は、せん断面からほぼ直径に等しい距離を軸方向に離れた付近で最大となることが実験から確認できた。この結果は、有限要素解析からも予想できた。

(4) 有限要素法を用いたモデル化は、コンクリートの材料則や鉄筋の付着問題等解決すべき問題が多く、これからも課題といえる。

謝辞

本研究は、平田定男研究奨学基金から援助の一部を受けました。また、京都大学4回生の堀切健太郎君には実験において多大なる援助を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- Mattock, A.H. et al.: Shear Transfer in Reinforced Concrete Recent Research, PCI Journal, pp. 55-75, March-April, 1972
- 日本建築学会:壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造設計規準・同解説, 1989
- 望月重他:壁式プレキャスト構造鉄直接合部のせん断耐力, AIJ構造系論文報告集, No. 424, pp. 11-22, June, 1998
- 大淵英夫他: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, AIJ構造系論文報告集, No. 491, pp. 97-104, Jan., 1997
- 香取慶一他:コンクリート接合面の粗さを用いた接合面せん断耐力の推定と滑り変位挙動, AIJ構造系論文報告集, No. 507, pp. 107-116, May, 1998
- 河野進他: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, JCI 年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp. 631-636, 1998
- 河野進他:高強度材料を用いたコンクリート接合面におけるせん断耐力評価, JCI 工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 871-876, 1999
- 河野進他:高強度材料が接合面におけるせん断力伝達性能に与える影響の評価, JCI 工学年次論文報告集, Vol. 22, No. 3, pp. 901-906, 2000
- 日本建築学会:壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造設計規準・同解説, 1989
- 例え Maekawa, K. and Qureshi, J.: Embedded bar behavior in concrete under combined axial pullout and transverse displacement," J. Materials, Conc. Struct., Pavements, No. 532, Vol. 30, pp 183-195, Feb., 1996.
- Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.: ABAQUS User's Manual, Ver. 5.7, 1997.