

論文 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

河野 進^{*1}・長尾 奈宜^{*2}・田中 仁史^{*3}

要旨: 接合筋を介して接続されたコンクリート接合面が、繰り返して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、部材モデル実験から評価した。コンクリートの摩擦作用とダウエル作用を分離する試験方法を用い、コンクリート圧縮強度と接合面粗さがせん断伝達性能に与える影響を調べた。接合面粗さは滑りと伴に変化する開きに影響し、伝達されるせん断力は開きと滑りの関数となること、コンクリート強度の影響はダウエル作用に関しては認められないがコンクリートのかみ合いで伝達されるせん断力に認められることが実験から明らかになった。

キーワード: 高強度材料, 接合面, せん断力, ダウエル作用, 摩擦作用, 表面荒さ

1. はじめに

打設時期が異なるが接合筋を介して接続されたコンクリート間、例えばプレキャスト部材と場所打ちコンクリートの間等、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、せん断耐力式が提案されている^{1)~5)}。しかし、コンクリートと接合筋が高強度である場合に滑りに伴ってせん断伝達力がどのように変化するかに関しては研究が少ない。大淵等⁶⁾は、コッターを有する接合面におけるせん断力-滑り関係の履歴モデルを提案したが、他の仕上げ状態を持つ接合面に適用できるモデルは知られていない。

本研究では、高強度材料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て荷重のもとで行い、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。さらに、こうした履歴を予想する既往の提案モデルの適用性を確かめる。

2. 実験概要

試験体は17体あり、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3に示す。複合試験体は、図-1に示すように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。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、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・接合筋歪ゲージの有無の3種類である。

複合試験体接合面の仕上げには、表-1に示すように平滑・洗出し・波型・矩形コッターの4通りがある。波型及び矩形コッターの形状はそれぞれ、図-2(a)(b)に示す通りである。打設に当っては、試験体を90度回転させた状態で、図-1(a)の矢印方向から行った。複合試験体では下側のブロック打設後、3日で上側のブロックを打設した。

図-3は試験体両側に設置された変位計を示す。パンタグラフは図中I, II, IVの3点で固定されており、変位計Aで相対水平変位(以後、滑り)、変位計Bで相対鉛直変位(以後、開き)、変位計Cで回転を測定する。荷重装置を図-4に示す。水平力作用線は接合面と高さが一致し、接合面にモーメントが働かず、せん断力のみが作用するようにしている。また、アクチュエータB及びCは、接合面をはさむ上下の

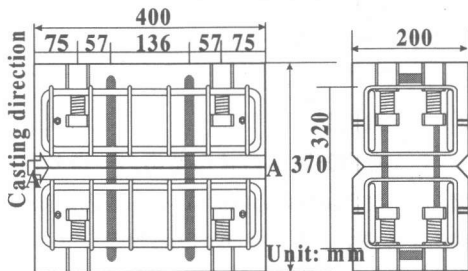


図-1 試験体図

*1 京都大学工学研究科助手
*2 竹中工務店
*3 豊橋技術科学大学助教授

建築学専攻 Ph. D. (正会員)
建設工学系 Ph. D. (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			試験方法
		コンクリート設計強度 (MPa)	接合面の仕上げ	接合筋歪ゲージの有無	
C050TG	複合	50(A)	平滑	有	コンクリート強度と仕上げ状態の影響を観察
D050TG	ダウエル	50(A)	鉄板挿入	有	C050TGの開きと滑りの経路を追従
D050TN	ダウエル	50(B)	鉄板挿入	無	接合筋にゲージが無いが、他はD050TGに同じ
D050TS	ダウエル	50(B)	鉄板挿入	無	D050TNと同じ
C050RG	複合	50(A)	洗出し	有	コンクリート強度と仕上げ状態の影響を観察
D050RG	ダウエル	50(A)	鉄板挿入	有	C050RGの開きと滑りの経路を追従
D050RN	ダウエル	50(B)	鉄板挿入	無	接合筋にゲージが無いが、他はD050RGに同じ
C100TG	複合	100	平滑	有	コンクリート強度と仕上げ状態の影響を観察
D100TG	ダウエル	100	鉄板挿入	有	C100TGの開きと滑りの経路を追従
C100RG	複合	100	洗出し	有	コンクリート強度と仕上げ状態の影響を観察
D100RG	ダウエル	100	鉄板挿入	有	C100RGの開きと滑りの経路を追従
D051RG	ダウエル	50(A)	鉄板挿入	有	f'c=50MPaである以外はD100RGに同じ
C100BG	複合	100	波型	有	コンクリート強度と仕上げ状態の影響を観察
D100BG	ダウエル	100	鉄板挿入	有	C100BGの開きと滑りの経路を追従
D051BG	ダウエル	50(A)	鉄板挿入	有	f'c=50MPaである以外はD100BGに同じ
C100CG	複合	100	矩形コッター	有	コンクリート強度と仕上げ状態の影響を観察
D100CG	ダウエル	100	鉄板挿入	有	C100CGの開きと滑りの経路を追従

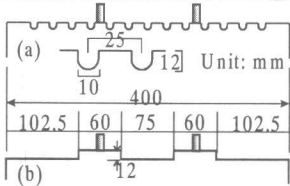


図-2 試験体接合面の仕上げ状態

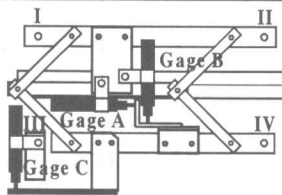
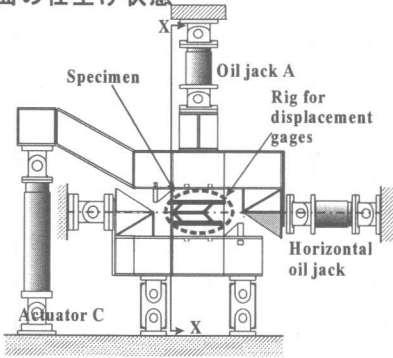
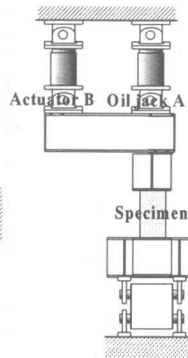


図-3 変位計の配置



(a) 正面図



(b) X-X断面図

図-4 荷重装置

ブロックが平行を保つ為の補助的な荷重装置である。アクチュエータBは、変位計Bが示す開きが試験体両側で等しくなるように、アクチュエータCは、変位計Cの平均値が0となるよう制御された。実験中、試験体の傾きはどちらの方向でも最大5/10000程度であり、上下のブロックはほぼ平行を保って相対的に変位したと考えられる。尚、本論文では、水平力は押す方向を正としこれに伴う滑りを正、鉛直力は開きが正となる加力方向を正として考察を行う。

複合試験体の荷重は、鉛直方向の合力が零となるようにジャッキAを調節しながら水平力を加えた。図-5に示す通り、基本的には滑りが2mm, 4mm, 8

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)
50(A)	1st	55.9	9.85	31.8
	2nd	55.7	12.8	31.5
50(B)	1st	55.7	12.7	31.3
	2nd	54.4	13.5	31.3
100	1st	106.3	22.5	39.4
	2nd	94.6	20.1	39.4

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)
KSS785	980	1063	200

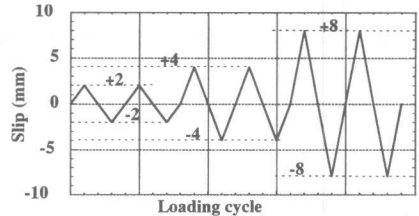


図-5 滑りの荷重履歴

mmにおいて2回づつ正負交番繰り返し荷重を行った。ダウエル試験体については、対応する複合試験体の第2サイクルまでの滑りと開きの履歴を追従するように変位制御で荷重を行った。

3. 実験結果

3.1 複合試験体のせん断応力-滑り関係

図-6に、複合試験体の内4体のせん断応力-滑り関係を実線で示す。せん断応力度はコッターのものも含めて、水平ジャッキの荷重をせん断接合面積640cm²で割った値である。本研究で取り扱うような接合面は、滑りが2mm以内ならば一体打ち接合面と

同等の力学的挙動をすることが報告されているので、表-4には滑りが2mmまでの範囲における正負両方向の最大値とその時の滑りを示す。尚、表中のDRについてはダウエル作用の寄与分であり3.3節で説明する。

仕上げ面が平滑なC050TG及びC100TGは、滑りが2mmを越えるところから応力の増加がほぼ見られない。これは、せん断力を伝達している接合筋が曲げ降伏していることが原因であると考えられる。また、引き側の載荷履歴は押し側とほぼ同様である。

その他の仕上げ面を持つ複合試験体では、押し側の2mmまでに最大せん断耐力に達し、これ以後大きな

滑りをともなって耐力が減少する傾向がある。これらの試験体は平滑仕上げの場合と違い、引き側のせん断力は、押し側に比べて大きく低下している。

表-4に示す、C050RGとC100RGの+2mm第1サイクルの最大せん断耐力を比較すると、コンクリート強度の大きなC100RGの最大せん断耐力がC050RGよりも大きい。そこで今回のように洗出しが完全な状態では、コンクリートがかみ合うことにより伝達されるせん断力は、コンクリート強度の影響を受けると考えられる。

3.2 複合試験体の開き-滑り関係

図-7に示すのは、図-6に示した複合試験体の開

表-4 実験結果

試験体名	複合試験体における滑り2mmまでのせん断力最大値*1											粗さ指標値*3			
	第1サイクル						第2サイクル					Have (mm)	Hrms (mm)	Rk (mm)	
	押し (MPa)	滑り (mm)	DR*2 (%)	引き (MPa)	滑り (mm)	DR*2 (%)	押し (MPa)	滑り (mm)	DR*2 (%)	引き (MPa)	滑り (mm)				
C050TG	1.63	2.00	81	-1.61	-2.00	103	1.24	1.98	82	-1.37	-1.96	101	0.4(0)	0.2(0)	0.3(0)
C050RG	5.30	0.84	18	-2.20	-1.47	29	3.06	1.95	29	-1.97	-1.99	18	1.9	1.5	2.9
C100TG	2.21	2.01	108	-1.85	-1.81	129	1.55	2.01	137	-1.54	-1.85	161	0.0(0)	0.0(0)	0.1(0)
C100RG	7.32	1.63	3	-3.55	-1.83	21	5.09	1.99	9	-3.47	-2.00	16	2.8	2.5	5.6
C100BG	5.68	1.05	17	-2.82	-1.65	47	2.97	1.98	38	-2.35	1.98	52	4.9(5.2)	5.2(5.4)	0.7(0)
C100CG*1	6.05	1.08	15	-3.29*	-3.52*	17*	1.62*	5.96*	93*	-1.88*	-5.99*	37*	4.8(5.1)	5.2(5.5)	0.6(0)

*1: C100CGは、6mmで繰り返し載荷をしたので、±6mmの範囲における最大値を掲載。*2: DRはダウエル作用寄与分。*3: 目粗し以外に示された括弧内の数字は、理論値。

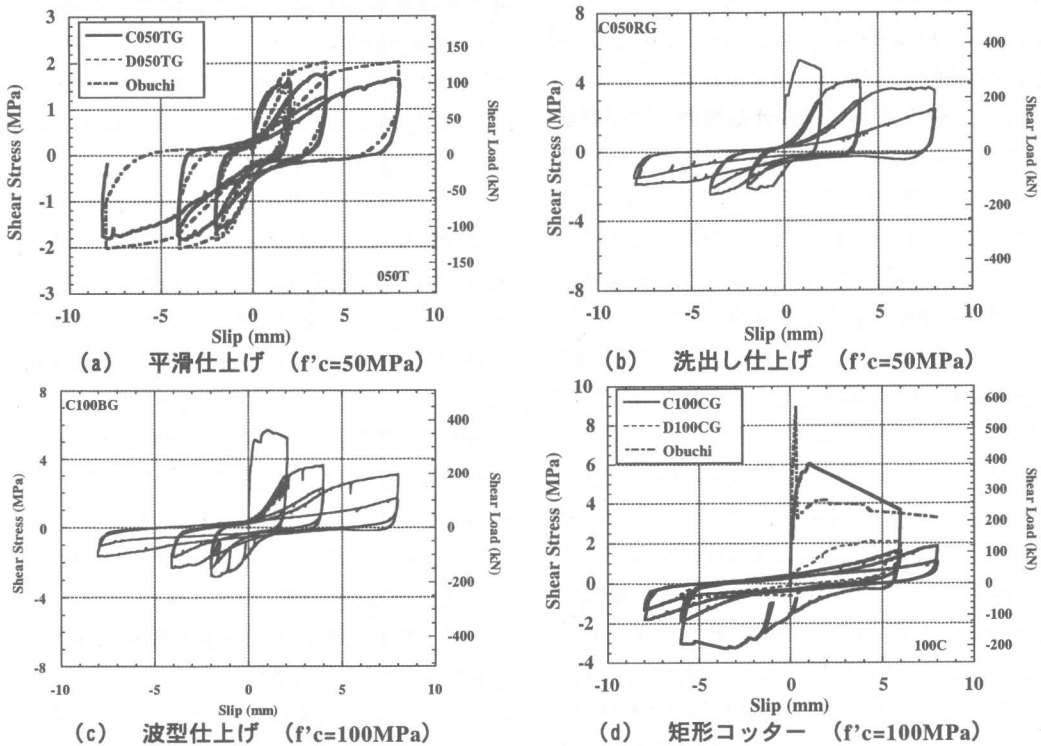
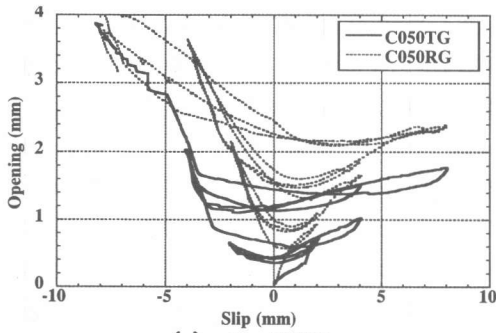
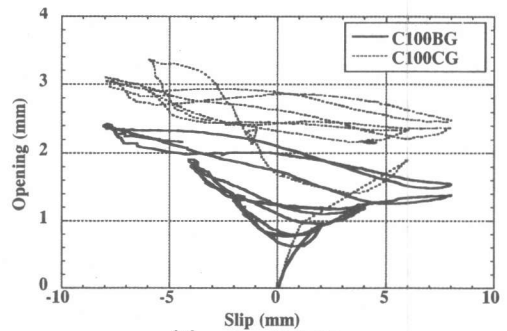


図-6 せん断応力度と滑りの関係



(a) $f'c=50\text{MPa}$



(b) $f'c=100\text{MPa}$

図-7 開き—滑り関係

きと滑りの関係である。平滑や波型仕上げの試験体では、試験終了まで開きが2mm程度に納まっているのに対して、他の試験体では滑りの増大に伴って開きが3mmから4mm近くになることが分かる。また、開きの変化は、滑りが零付近で一旦大きく落ち込むような履歴を見せる洗出し仕上げでは、滑りとともに局部的な凸面が相互に乗り上げたことを示しており、このため滑りに伴うせん断力の増加が平滑仕上げのものに比べて大きくなったと考えられる。これに対し、一旦大きな滑りを示した後はせん断耐力の増加が見られなかったコッターのC100CGでは、6mmの2回目以降開きは3mm程度のままあまり変化しない。以上から、せん断力の伝達には滑りだけでなく、開きが大きく影響していると考えられる。

3.3 ダウエル試験体せん断力—滑り関係

ダウエル試験体のせん断応力度—滑り関係を対応する複合試験体の2mmまでの履歴ループと重ねて描いたものの内4つを図-8に示す。2章で説明したように、ダウエル試験体の開きと滑りの関係は、対応する複合試験体のものと基本的には同一である。図-8(a)に示されるように、平滑仕上げでは、複合試験体とダウエル試験体のせん断応力度—滑り関係がほぼ一致している。そこで、平滑仕上げにおけるせん断力の伝達は、ダウエル筋のみによると考えられる。これに対して、他の仕上げでは、ダウエル筋により伝達されるせん断力は複合試験体が示す値に比べ小さかった。こうした傾向を明らかにするため、複合試験体の滑り2mmまでの最大せん断力と、その時と同じ滑りに対応するダウエル試験体のせん断力の割合、DR、を求め、複合試験体におけるダウエル作用の寄与分として表-4に示した。平滑では、ダウ

エル作用の寄与分はほぼ100%であるが、他の仕上げでは0%から50%程度である。文献3)では、不完全な洗出しの接合面においてダウエル作用の寄与率が60%程度であったことと符合する。

また、図-7からわかる通り、表面が粗いものは大きな開きを伴って滑りが変化するように制御された。この開きを考慮に入れて図-8におけるダウエル試験体のせん断力を比較すると、開きが大きな試験体では、ダウエル作用により伝達されるせん断力が低くなるのが特に引き側の履歴から明らかである。

3.4 ダウエル作用におけるコンクリート強度及び接合筋に貼付した歪ゲージの影響

ダウエル試験体において、コンクリートの圧縮強度が伝達せん断力にどのような影響を及ぼすかを確認した。試験体には、コンクリート圧縮強度のみが異なる以外は同一な試験体を2セット用意した。D051RGはD100RGの、D051BGはD100BGの開き—滑りの履歴を追従させた。対応する試験体のせん断応力度—滑り関係を図-9に示す。図-9(a)の押し方向で、コンクリート強度が低いD051RGのせん断応力度が多少高めである以外、有為な差は認められない。

また、接合筋に貼付した歪ゲージの影響をみる為、歪無しの試験体を3体用意した。図-10から分かるように、第1サイクルでゲージ無しのせん断力が大きくなる傾向はある。しかし、全体的には、歪ゲージの有無による有為な差は認められなかった。

3.5 既往のせん断力—滑り履歴の予想式

図-6(a)(c)には、大淵等¹⁾によって提案されたせん断力—滑り関係式の予想結果を点線で示す。予想式は接合筋を有するコッターにおけるせん断力—

滑り関係を予想する目的で作られており、本実験における平滑と矩形コッターの仕上げを有する試験体に適用できる。予想式は、接合筋及びコッターにおけるせん断力を累加する形で表される。接合筋による応力伝達は、図-6(a)における平滑仕上げの試験体でみることができる。履歴の概形が大変うまく表されており、大淵等が予想した鉄筋の塑性モデルが実際の挙動に近いことを示すものであろう。しかし、予想式ではダウエル作用は、開きやコンクリート表面の粗さの関数とはなっていない。このため、3.3節で説明したように、接合面の粗さにより開きが異なる場合、同じ滑りでもダウエル作用のせん断力が、接合面の仕上げ状態により異なるという3.3節の結果を説明できない。つまり、大淵式ではダウエル作用による伝達せん断力が平滑仕上げより小さかった洗出しや波型のものに対しても平滑のものと同じ高いせん断伝達力を予想してしまう。図-6(d)には、コッター試験体C100CGのせん断力-滑り関係を大淵式で予想した結果を示す。本実験では、コッター部がせん断破壊したため、こうした破壊モードに対するコンクリートのせん断力を予想式から算出した。

実験で得られた履歴曲線のおおよその形を表しているが、最大耐力の算定に問題が残っている。現時点ではコッターを含めた表面形状の影響を考慮したコンクリートのせん断力を予想することが極めて困難であることを示すものである。

3.6 粗さ指標について

表-4に、文献2)が示す3つの粗さ指標を理論値とともに示した。今回の表面粗さは、みかけ上異なるものの、その粗さ指標値が近いものを選んでいる。しかし、文献4)と今回の実験から分かるように、こうした3つの粗さ指標と、表-4が示す耐力値や図-6が示す履歴の間に相関は無いと結論付けて良いと思われる。少なくとも、洗出しのように後打ちのコンクリートが既存のコンクリートと一体化するような場合と、コッターのように表面はあくまでも平滑だが全体としては凹凸がある場合とでは、同じ指標を用いることができない。特に、コンクリートのかみ合いを説明する時に用いることができる粗さ指標の必要性を感じる。

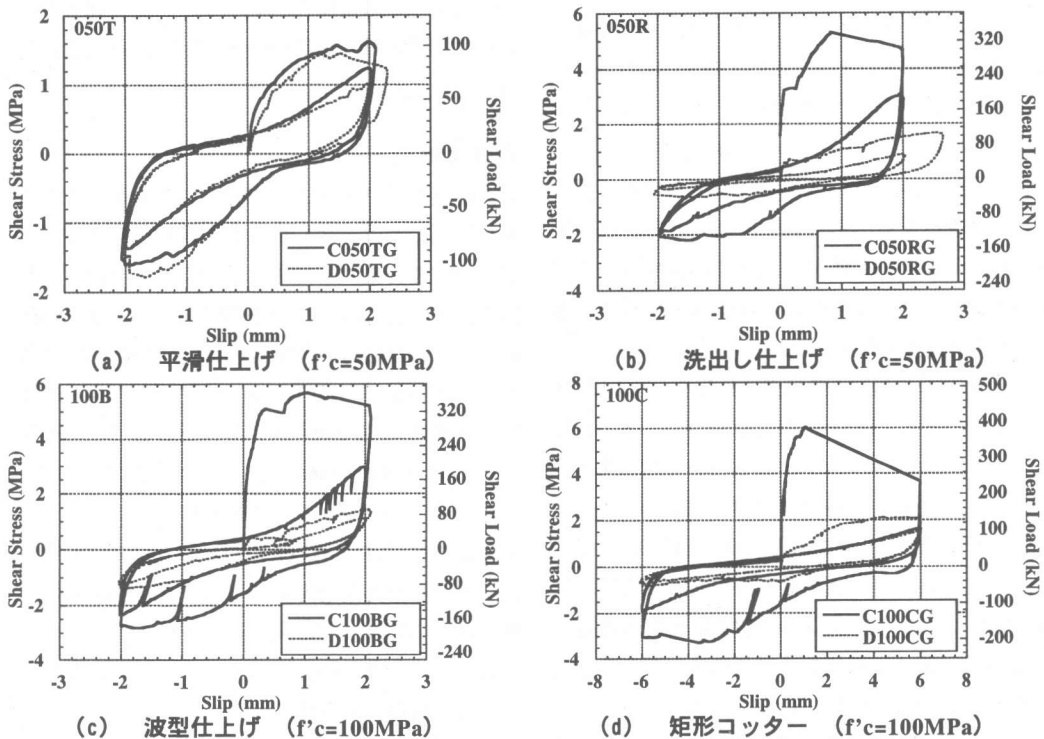
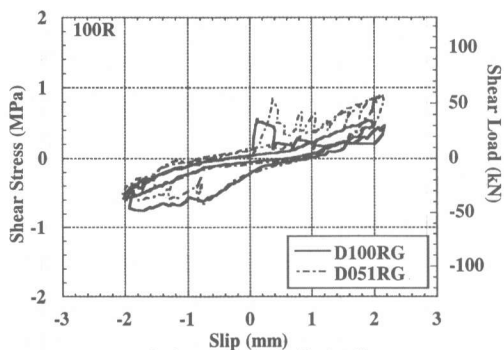
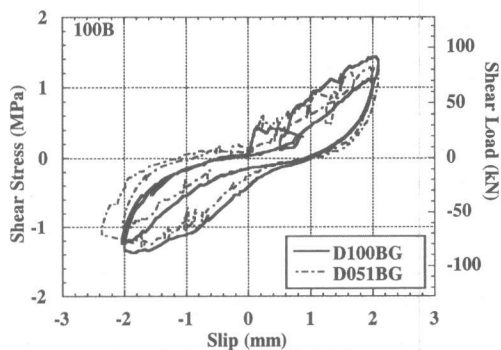


図-8 対応する複合及びダウエル試験体のせん断応力度-滑り関係



(a) 洗出し仕上げ



(b) 波型仕上げ

図-9 コンクリート圧縮強度がダウエル作用によるせん断力に与える影響

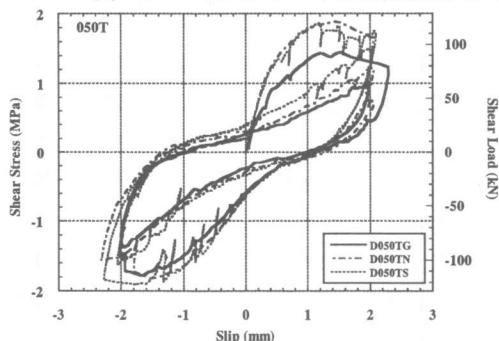


図-10 歪ゲージの有無がせん断力-滑り関係に与える影響

4. 結論

高強度材料を用いたコンクリート接合面が、繰り返して直接せん断力を受ける場合のせん断力-滑り関係の履歴特性を、ダウエル作用とコンクリートのかみ合い作用に分けて実験から求めた。

(1) 接合面の粗さは、滑りに伴って変化する開き量に影響を与える。開きは滑りと伴に、伝達されるせん断力に大きく影響する。これは、ダウエル作用及びコンクリートのかみ合い作用により伝達されるせん断力の両方に共通する。

(2) ダウエル作用により伝達されるせん断力は、コンクリート強度に影響を受けなかった。しかし、コンクリートのかみ合いにより伝達されるせん断力の大きさはコンクリート強度の影響を受ける。

(3) 平滑仕上げのように大きな開きを伴わない場合には、ダウエル作用によるせん断力を大測式でかなり精度良く予想できる。この予想式に開きの効果を含め、開きの増大と伴に伝達されるせん断力を低減させるとより汎用性が出ると思われる。

(4) 本研究で検証した3つの粗さ指標は、開きやせ

ん断力との相関が認められなかった。特に、コンクリートに依存して伝達されるせん断力は不確定な要素が大きく、実験を行っても大きなばらつきがでる。今後は、表面の粗さを表す指標と合わせて、コンクリートのかみ合いによる伝達せん断力をモデル化する必要がある。

謝辞

本研究は、文部省科学研究費補助金奨励研究(A)から援助の一部を受けた。また、実験では、神戸製鋼株式会社には鉄筋を、エフ・ピー・ケー株式会社には凝結遅延紙を提供頂いた。ここに、謝意を表する。

参考文献

- 1) 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
- 2) 香取慶一他: コンクリート接合面の粗さを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
- 3) 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
- 4) 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, pp. 871-876, 1999
- 5) 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