

コンクリート水平打継ぎ面におけるせん断伝達 (その2)

——結合鉄筋のだぼ作用に関する一考察——

古屋 則之 安楽 秀嶽
竹本 靖

Shear Transfer along Horizontal Joint Surface in Composite Concrete Member (Part 2)

——A Discussion on Dowel Action of Tie Reinforcement——

Noriyuki Furuya Hidetake Anraku
Yasushi Takemoto

Abstract

The object of this study is to investigate the dowel mechanism of reinforcing bars extending through horizontal joint surfaces in composite concrete members. Both experimental and analytical studies are made. The method of analysis is based on the balance of bending of steel and bearing of concrete. The dowel forces of this analysis have good coincidence with experimental results. In addition, data not completely satisfying the shear friction hypothesis are reported.

概 要

この研究の目的は、コンクリート合成ばりのような合成部材の、水平打継ぎ面におけるせん断伝達要素の一つとして知られている打継ぎ面を貫通する結合鉄筋の、せん断抵抗のメカニズムについて明らかにすることである。

ここでは、結合鉄筋がだぼ作用によって負担するせん断力の大きさを、実験と解析によって求め、結合鉄筋の働きについて考察している。解析方法は、鉄筋自身の曲げとコンクリートの支圧の、両者の変形および力の釣合いを Mindlin の第2解を利用して求める、というものである。

さらに、打継ぎ面のすべり発生メカニズムを説明するものとして知られている Shear Friction 仮説を必ずしも完全には満足しないデータが得られたので報告する。

1. 序

コンクリート合成ばりのような合成部材の水平打継ぎ面におけるせん断伝達に関しては、その伝達メカニズムに不明な点が多い。ここでは、伝達要素の一つと考えられている結合鉄筋のせん断伝達力がどの程度のものであるかを知るために、結合鉄筋がだぼ作用によって負担するせん断力を求めることを実験で試みるとともに、コンクリート中に埋め込まれた鉄筋の横せん断抵抗力を理論的にも求め、両者を比較検討しながら結合鉄筋の働きについて考察を行なった。

2. 実験の概要

実験の方法、供試体の形状等は、同題(その1)¹⁾と同

様である。

2.1. 供試体

供試体は、図-1に示す形状をした先打ち部分と後打ち部分からなる打継ぎ面モデルである。打継ぎ面の仕上げを左官バケによるハケ仕上げ(同題(その1)、および写真-1参照)とし、打継ぎ面の大きさを幅20cm、長さ50.8cmとした。

供試体は2種類あり、結合鉄筋のだぼ作用を除いたものとそうでないものとである。両者とも配筋はまったく同じであり、それぞれコンクリート強度を変えて2体ずつ製作した。表-1参照。コンクリートは、先打ち、後打ち部分とも同じ調合のものを用いた。

結合鉄筋のだぼ作用を除くためには、結合鉄筋の打継ぎ面近傍だけを鉄筋の外径より8.5mm大きい内径のゴ

ムホース (肉厚 3.5 mm, 長さ 80 mm) の中に通すことにした。写真-1 参照。

供試体名称は, ハケ仕上げ (Brushing) を表わす「B」と結合鉄筋比 (単位: %) を表わす「0.5」に続けて, 実験時のコンクリート強度 (単位: kg/cm²) を表わす数値を付け, さらに, 結合鉄筋のだぼ作用を除く場合には最後に「H」を付けて表わした。

2.2. 使用材料

使用したコンクリートは普通ポルトランドセメントを使用したレディミクストコンクリートであり, 設計強度を 180 kg/cm² と 225 kg/cm² にした。調合を表-2 に示し, コンクリートテストピース (150φ×300) による実験時の圧縮試験結果を表-1 に記す。

結合鉄筋には市販の SR24 の 9φ の丸鋼を用いた。引張試験結果を表-1 に記す。

2.3. 供試体の製作

コンクリートの打込みは, 図-1 に示す断面とは上下を逆にした状態で行なった。後打ち部分の打込みは先打ち部分の打込みから 2 週間後である。

2.4. 載荷方法

打継ぎ面にせん断力を与えるために, 後打ち部分を固定し, 先打ち部分に載荷した。載荷は 1 方向の単調載荷であり, 荷重芯を打継ぎ線上に一致させた。

2.5. 変位およびひずみの測定

打継ぎ面のすべりとはだわかれを両側面 6 ケ所に取り付けた 1/1000 mm 目盛のダイヤルゲージで測定した。

ひずみとしては, 打継ぎ面レベルにおいて結合鉄筋の軸方向に検長 3 mm の箔ひずみゲージを貼り付けて測定した。

3. 実験結果とその検討

3.1. 実験結果の概要

実験経過について, 図-2 の荷重-ずれの曲線を用いて説明する。

OA 間では荷重とずれの関係がほぼ直線状であり, その後, 打継ぎ面のずれが大きくなり始め, B 点に達すると急激なすべりが発生し, 荷重が低下する。C 点でいったん除荷し, それまでのずれ測定用に使用していた 1/1000 mm 目盛のダイヤルゲージを 1/100 mm 目盛のものに替えた。

その後, 荷重は, CD 間ではほとんど上昇しないか, やや減少の傾向にあり, ずれが 4~5 mm に達した後再び上昇し始める。

E 点は, コンクリート側面に大きなひびわれが発生し

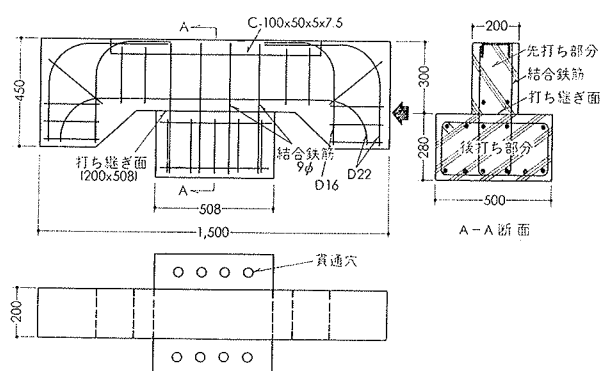


図-1 供試体の形状, 寸法

供試体	打継ぎ面	結合鉄筋	結合鉄筋比	コンクリート				特記事項	
				先打ち部分		後打ち部分			
				圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ kg/cm ²)	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ kg/cm ²)		
B0.5-130H	ハケ仕上げ	8-9φ (A _s =4.72cm ²) { σ _y =3430kg/cm ² σ _{max} =4980kg/cm ²	0.47%	138	1.38	119	1.59	結合鉄筋のだぼ作用を除去	
B0.5-130				186	1.67	205	1.80	結合鉄筋のだぼ作用を除去	
B0.5-200H									
B0.5-200									

表-1 供試体の種類と使用材料の物理定数

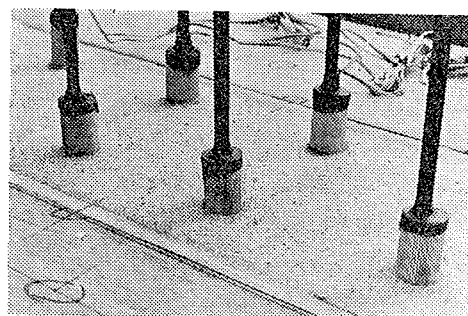


写真-1 打継ぎ面と結合鉄筋 (ゴムホース付き)

供試体	打込み部分	スランプ実測値 (cm)	水セメント比 (%)	水 (kg/m ³)	普通ポルトランドセメント (kg/m ³)	砂 (kg/m ³)	砂利 (kg/m ³)	混和剤 (kg/m ³)
B0.5-130H	先打ち部分	20.8	69.8	180	258	867 (兼用・免)	955 (兼用・免)	1032 (AE減水剤)
	後打ち部分	20.4						
B0.5-200H	先打ち部分	18.6	62.9	180	286 (同上)	849 (同上)	965 (同上)	1114 (同上)
	後打ち部分	21.4						

表-2 コンクリートの調合

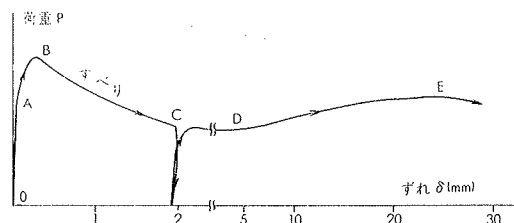


図-2 荷重-ずれ曲線

て荷重が維持されなくなったか, あるいは, ずれが 30 mm 以上に達してその後の荷重上昇がなくなったために実験を終了した点である。

A~E 点の荷重を表-3 に記す。

3.2. 打継ぎ面におけるコンクリート間の付着

同題(その1)では、すべり発生前に打継ぎ面の平均せん断応力がある一定値に達すると、結合鉄筋量や打継ぎ面の仕上げ状態に関わらず打継ぎ面のコンクリート間の付着が切れ始め、コンクリート圧縮強度が 320 kg/cm² の場合には、その時の平均せん断応力 (τ_{bond}) は 25 kg/cm² 前後であること、また、その時の現象としては、結合鉄筋の打継ぎ面レベルの軸方向ひずみが急増することが挙げられる、等を述べた。

図-3 と 4 は、今回実験したコンクリート圧縮強度が約 200 kg/cm² の場合の2種類の供試体それぞれの、荷重-結合鉄筋の軸ひずみ曲線と、荷重-打継ぎ面の相対ずれ曲線を併せて示したものである。また、結合鉄筋のばね作用を取り除くことを目的とした供試体については、さらに荷重-結合鉄筋の全負担せん断力曲線も併せて示した。結合鉄筋の負担せん断力の計算方法はこの項の末尾に記す。

結合鉄筋の軸ひずみ曲線の屈折点(図中⊕印)が、上に述べた付着の切れ始めを表わす時であるが、その時には、図のように打継ぎ面のずれ曲線や結合鉄筋の負担せん断力曲線も屈折し始め、結合鉄筋の軸ひずみ曲線以外にも同様の現象があらわれていることがわかる。ただし、同題(その1)では両方向の繰り返し載荷を行なったためか、ずれ曲線からは明瞭な屈折点を見出し得なかった。

図-5 は、同題(その1)の中から打継ぎ面が今回と同じハケ仕上げの供試体を選び、今回の供試体も含めて、それらの τ_{bond} とコンクリート圧縮強度 (F_c) との関係を示したものである。 F_c が大きくなると τ_{bond} も増加する傾向がみられる。

〔付: 打継ぎ面付近でコンクリートとの接触を断った結合鉄筋自身の負担せん断力計算法〕

結合鉄筋とゴムホースとは図-6のような配置関係にあり、結合鉄筋の軸方向の表面ひずみが距離 l だけ離れた A, B 点の両面にて測定されている。

鉄筋の直径を d 、弾性係数を E 、断面2次モーメントを I とし、A1, A2, B1, B2 のひずみを ϵ_{A1} , ϵ_{A2} , ϵ_{B1} , ϵ_{B2} とする。

A 点の曲げモーメントを M_A 、曲率を θ_A とすると、

$$\theta_A = M_A / EI = (\epsilon_{A1} - \epsilon_{A2}) / d$$

$$\therefore M_A = (\epsilon_{A1} - \epsilon_{A2}) EI / d$$

鉄筋に働くせん断力を Q_s とすると

$$Q_s = (M_A - M_B) / l = \{(\epsilon_{A1} - \epsilon_{A2}) - (\epsilon_{B1} - \epsilon_{B2})\} EI / dl$$

として求めることができる。

供試体	A 点			B 点			C 点			D 点			E 点	
	P_A (ton)	P_B (ton)	P_C (ton)	P_D (ton)	結合鉄筋の軸ひずみ ϵ_s	みかけの摩擦係数 $\mu (=P_D/A_s \cdot \epsilon_s)$	P_E (ton)	結合鉄筋の負担せん断力 $Q_s (=P_E/A_s)$	結合鉄筋の負担せん断力 $Q_s (=P_E/A_s)$	τ_{bond} (kg/cm ²)	結合鉄筋の負担せん断力 $Q_s (=P_E/A_s)$	τ_{bond} (kg/cm ²)	結合鉄筋の負担せん断力 $Q_s (=P_E/A_s)$	
B0.5-130H	16.5	19.0	11.5	13.3	0.81 ϵ_y	1.01	22.4	0.93 σ_{max}						
B0.5-130	16.0	26.2	17.2	16.5	1.0 ϵ_y	1.02	23.4	0.98 σ_{max}						
B0.5-200H	21.5	23.0	17.1	15.1	0.92 ϵ_y	1.01	23.9	1.00 σ_{max}						
B0.5-200	25.5	31.0	16.9	16.5	1.0 ϵ_y	1.02	23.2	0.97 σ_{max}						

表-3 実験結果

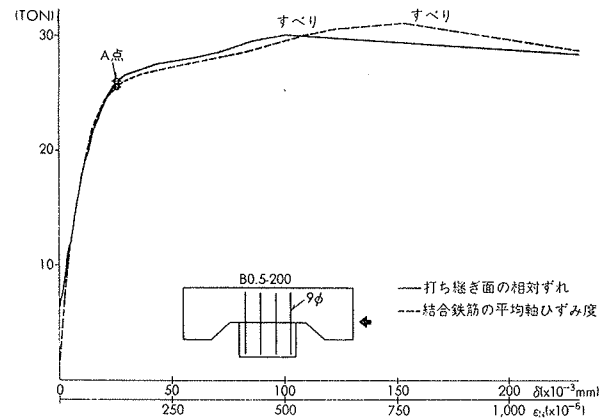


図-3 B0.5-200 供試体の実験結果

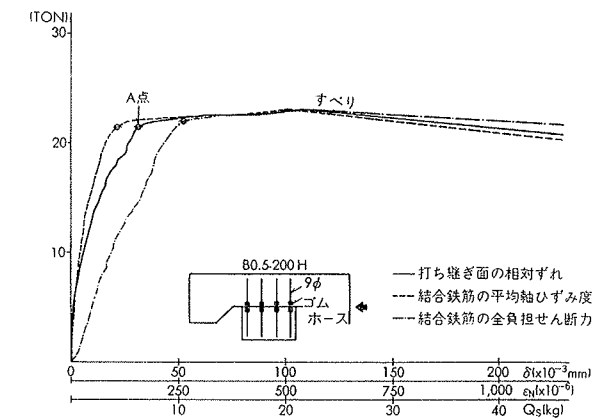


図-4 B0.5-200H 供試体の実験結果

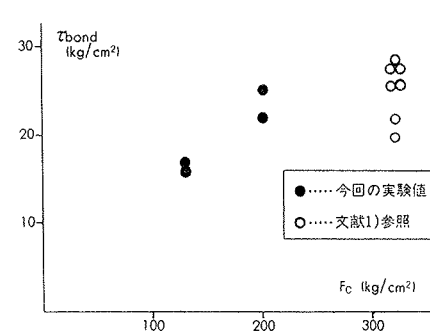


図-5 τ_{bond} - F_c 関係

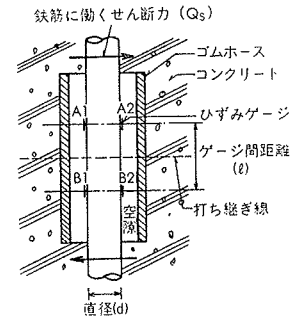


図-6 結合鉄筋の負担せん断力の求め方

3.3. 結合鉄筋自身が負担するせん断力

結合鉄筋自身が負担するせん断力を実験から求め、理論解析値と比較、検討する。

3.3.1. 結合鉄筋の負担せん断力実験値 ゴムホースを付けたことによって、本来結合鉄筋が直接負担すべきせん断力の大部分が取り除かれたと考えられる。それは

ゴムホースを付けた結合鉄筋の全負担せん断力を前述の方法で求めると、打継ぎ面がすべる時においてさえ20~30 kg 程度 (図-4 参照) にしかならず、その時の荷重の0.1% 程度であること、また、すべった時の荷重は、結合鉄筋にゴムホースを付けなかった供試体に比べて7 ton 以上下回っている (表-3 参照) こと、さらに、写真-2 が示すように結合鉄筋が主としてせん断に抵抗していたと考えられるのは変形状態からみて打継ぎ面近傍であり、その範囲がゴムホースを付けた区間と一致すること、等の理由による。したがって、ゴムホースの有無による供試体の荷重の差が、結合鉄筋のだけ作用によって負担されたせん断力とみなすことができよう。せん断力の負担率を打継ぎ面がすべった時点で求めると30%前後になる。

3.3.2. だぼ作用の解析 今回の実験結果と対比させるために、安楽らによって開発された「スタッドジベルの弾塑性解析」²⁾ プログラムを用いて、コンクリート中に埋込まれた鉄筋の横せん断抵抗の解析を行なう。このプログラムは、鉄骨製のはりとコンクリートスラブとのシアコネクターとして一般に用いられているスタッドジベルの働きを理論的に裏付けたものである。

解析の考え方は、鉄筋の横せん断抵抗は鉄筋自身の曲げせん断抵抗と、鉄筋に接するコンクリートの支圧抵抗とのバランスによって成り立つ、とするものである。

計算手順の概略は、①打継ぎ面上で鉄筋に作用するせん断力と、鉄筋の軸に沿って分布する力と変形の間係を導き、②鉄筋の変形に応じて生じるコンクリートの力と変形の間係を Mindlin の第2 解に基づいて求め、③鉄筋とコンクリートの変形を適合させながら、鉄筋のモーメント分布、コンクリートの反力分布を求める、というものである。

結合鉄筋のモデル化に際しては、結合鉄筋の反曲点が打継ぎ面上であることや、反曲点は打継ぎ面上を移動すること等を考慮して図-7 のように行なった。コンクリートの材料定数には先打ち部分の値を採用する。

3.3.3. 実験結果と解析結果 結合鉄筋が負担するせん断力とずれの関係を図-8 に示す。このせん断力-ずれ曲線の実験値は、ゴムホースの付かない供試体と、付いた供試体との荷重-ずれ曲線の包絡線から、同一変形(ずれ) 時の荷重の差をとり、その荷重差が結合鉄筋のだけ作用によるものであるとして描いたものである。図は F_c が約 200 kg/cm² の場合についてのものであるが、 F_c が約 130 kg/cm² の場合についても実験結果と解析結果の関係は図と同様である。

解析によって求められた結合鉄筋のモーメント分布、変形状態、コンクリートの支圧分布を図-9 に示す。

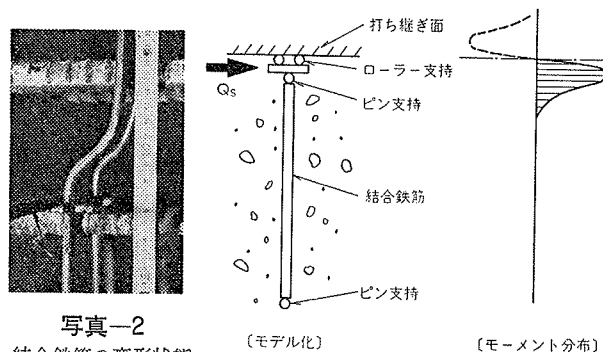


写真-2
結合鉄筋の変形状態
(B0.5-200 供試体)

図-7 結合鉄筋のモデル化

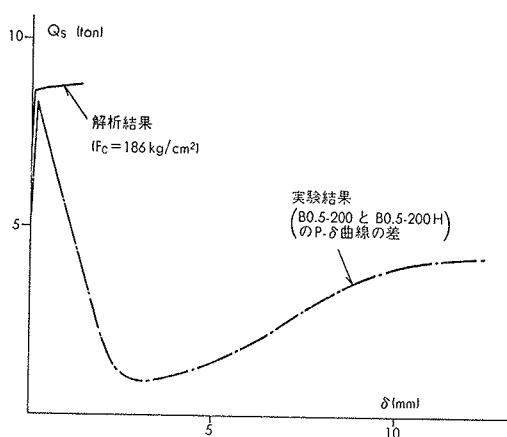


図-8 結合鉄筋の負担せん断力-ずれ曲線

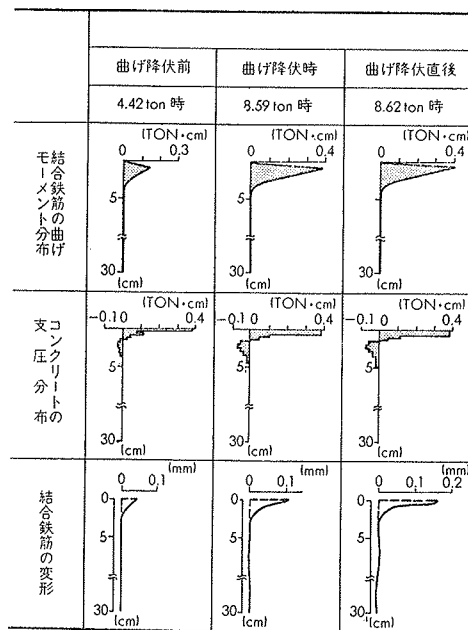


図-9 解析結果

解析によれば、図-8 のずれ曲線が折れるまではコンクリートの支圧破壊が深さ方向に徐々に進展し、ずれ曲線が折れ曲がる点では結合鉄筋が曲げ降伏し、その後はコンクリートの支圧破壊はほとんど進まない、というも

のである。ただし、ここでは、コンクリートは支圧破壊しても破壊時の耐力を維持する、という仮定を設けているために、鉄筋の曲げ降伏の進行に伴なって負担せん断力は微増し続ける。

表-4 に結合鉄筋の負担せん断力の実験値と解析値を記す。実験値としては、すべった時の荷重の差（ずれ量は両者で多少異なる）と、図-8の最大値（すべった頃にはほぼ一致する）の二つの値で示し、解析値としては鉄筋の曲げ降伏時（図-8の屈折点）の値で示した。解析値は、実験値とよく一致しており、それまでのずれ曲線もよく対応したものとなっている。これらのことから、結合鉄筋が負担するせん断力の大きさは、鉄筋自身の曲げ降伏で決まるが、その時の鉄筋のシアスパン長さはコンクリートの支圧破壊深さに左右される、ということが推察される。ただし、これだと鉄筋の曲げ降伏位置が狭い範囲に限られ、今回のひずみ測定からは曲げ降伏したかどうかの確認はできなかった。また、実験では打継ぎ面がすべった後の、また解析では曲げ降伏後の、それぞれの負担せん断力の大きさに違いがあるが、これは、上に記したコンクリートの支圧破壊後の解析仮定によって生じたものと考えられる。

3.4. Shear Friction 仮説との対応

Shear Friction 仮説³⁾によれば、すべりは結合鉄筋が引張降伏した時に生じると仮定し、その時のせん断力の大きさは鉄筋の引張降伏耐力と摩擦係数との積で表すことができるというものであるが、同題（その1）にも述べたように、すべり発生時には結合鉄筋が引張降伏以前であることが多く、今回の実験でも同様の結果を得た。図-10参照。

ただし、この摩擦の考え方は、打継ぎ面がすべって結合鉄筋が引張状態になった場合には適用できそうである。

打継ぎ面がすべった後の最大荷重時（図-2のD点）の結合鉄筋の軸引張力（ $A_s \cdot \sigma_D$ ）とその時の荷重（ P_D ）からみかけの摩擦係数（ $\mu = P_D / A_s \cdot \sigma_D$ ）を求めると、表-3に記すようにいずれの供試体の場合も $\mu = 1.01 \sim 1.02$ の平均した値が得られ、摩擦の概念の妥当性を示唆しているものと考えられる。

その後の最大荷重時（図-2のE点）においては、鉄筋のひずみが測定されていないために、鉄筋の引張力が不明であるが、摩擦係数がD点の時と変わらないとして、上記の考え方から、逆に鉄筋のみかけの引張応力を求めると、 $0.93 \sim 1.00 \sigma_{max}$ というほぼ一定値が得られ（表-3参照）、これからも摩擦概念の妥当性が裏付けられるものと考えられよう。

4. 結 び

結合鉄筋の負担せん断力 コンクリート強度	実 験 値				解析値 (ton)
	すべった時の荷重差 (ton)	実/解	P- δ 曲線の荷重差 (ton)	実/解	
F _c =138kg/cm ² の場合	7.2	0.90	9.0	1.12	8.03
F _c =186kg/cm ² の場合	8.0	0.93	8.3	0.97	8.59

表-4 結合鉄筋の負担せん断力

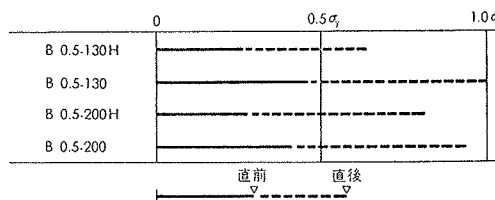


図-10 すべり発生当時の結合鉄筋の軸引張応力

今回行った実験は、供試体の数が少なく、供試体の品質のバラつきを考慮することができなかったが、実験の範囲内では次のことが明らかとなった。

(1) 結合鉄筋の打継ぎ面近傍をコンクリートと縁を切ることによって、鉄筋の負担するせん断力を非常に小さく抑えることができ、鉄筋のだぼ作用を調べるには有効な方法であることがわかった。

(2) Mindlin の第2解を利用した鉄筋の横せん断抵抗の解析結果は、結合鉄筋のだぼ作用のメカニズムを理解するうえで示唆に富んだものであるが、この確認のためには今回よりさらに詳細な実験を行なう必要がある。

(3) 打継ぎ面のすべりと結合鉄筋の引張降伏とは必ずしも関連したものではないが、すべり発生後のせん断伝達メカニズムを理解するうえで Shear Friction は有効な考え方であろう。

謝 辞

この研究にあたっては、日本大学卒論学生の新井利兼氏の尽力に負うところが非常に多く、ここに深謝の意を表わします。

参考文献

- 1) 古屋, 竹本: コンクリート水平打継ぎ面におけるせん断伝達 (その1), 大林組技術研究所報, No. 15, (1977), pp. 30~36
- 2) 安楽, 武田, 竹本: スタッロジナルの弾塑性解析, 大林組技術研究所報, No. 10, (1975), pp. 23~29
- 3) Birkeland, P. W. and Birkeland, H. W.: Connections in Precast Concrete Construction, Journal of the ACI, Vol. 63, No. 3, (Mar. 1966), pp. 345~368