

論文 鉄筋を配したコンクリート打継ぎ部のせん断挙動に関する研究

石原誠一郎^{*1}・三橋博三^{*2}・立松和彦^{*1}・山崎順二^{*1}

要旨: 打継ぎ面の表面粗さを変え、接合筋を直交して配した打継ぎ部のせん断伝達挙動を S 形試験により調べた。その試験結果を筆者らが以前行ったダウエル作用を除いたコンクリートのせん断試験結果と比較する事で、接合筋の存在がコンクリートのせん断伝達挙動に与える影響について検討した。実験結果から、接合筋の存在がコンクリートのせん断ひび割れ強度の低下を引き起こすこと。さらに、せん断ひび割れ後、滑り現象の終了までにおいて、打継ぎ面でのひび割れ界面の接合筋近傍に、圧縮ストラットが形成され、せん断にともなうひび割れ開口が、かみ合い機構とは異なるメカニズムに支配されることが明らかになった。

キーワード: せん断, 打継ぎ, コンクリート, 鉄筋, ひび割れ, 表面粗さ

1. はじめに

鉄筋コンクリートの接合面および鉄筋コンクリートのひび割れ面における接合筋の効果に関する研究は、Mattock¹⁾などの多くの研究者によって行われてきた。既往の研究では、接合筋の効果のうちダウエル作用については、過大なせん断変形がひび割れに加わった場合に、鉄筋の曲げ、せん断変形によって起こり、鉄筋径、コンクリートの剛性、強度、ひび割れ面の鉄筋周辺コンクリートの破壊程度などが、その作用に影響を与えると考えられている。さらに、最近では、三島²⁾らによって、接合筋のダウエル変形と軸変形の連成作用が鉄筋軸剛性を低下させることが明らかにされている。以上のように、既往の研究では接合筋の挙動を中心に検討されてきたため、接合筋の存在がコンクリートのせん断伝達挙動にいかなる影響を与えるかについては、十分解明されているとは言い難い。

そこで、本研究では、筆者らが拙論³⁾⁴⁾において報告したダウエル作用などの、接合筋による不必要なせん断抵抗を除いたコンクリート打継ぎ部のせん断伝達挙動と、今回新たに試験を行った接合筋を直交に配した打継ぎ部のせん断伝達挙動とを比較することで、接合筋の存在が

コンクリートのせん断伝達挙動に与える影響についての解明を試みた。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は表-1 に示すように A,B の 2 シリーズとした。A シリーズは、打継ぎ面に直交鉄筋を配した S 形試験体である。B シリーズは既報³⁾⁴⁾において報告した拘束用鋼棒を打継ぎ面に直交に配した S 形試験体である。試験体形状の詳細を図-1 に示す。

A シリーズ試験体の打継ぎ面は 10.8 cm×8.8 cm である。打継ぎ面で確実にせん断破壊を起こすよう、打継ぎ面の上下左右に溝を切った。性能比較のために作製した一体打ちの試験体にも同じ位置で溝を切り、せん断面が打継ぎ面積と同じになるようにした。各試験体には、D6 の接合筋を 4 本または 2 本、打継ぎ面に直交するように配した。接合筋比はそれぞれ 1.34% と 0.67% である。

B シリーズの試験体の打継ぎ面は 8.8 cm×8.9 cm である。A シリーズと同様に打継ぎ面の上下左右に溝を切った。さらに一体打ちの試験体にも同じ位置で溝を切った。各試験体には、4

*1 (株)浅沼組 技術研究所

(正会員)

*2 東北大学大学院工学研究科教授 工博 (正会員)

本の拘束用鋼棒をシースに通し打継ぎ面に直交するように配置した。シースの直径は鋼棒直径よりも 5mm 大きくし、鋼棒によるダウエル作用と不必要なせん断抵抗を排除してある。拘束用鋼棒はΦ8mm を使用したが、両端にナット用のねじを切り、さらに鋼棒にかかる拘束力を計測するためのゲージを貼る部分を削っている。打継ぎ面に対する拘束鋼棒の鋼材比は 2.39 % である。載荷前の鋼棒の拘束は、鋼棒を所定位置に配するためナットを軽く手締めする程度にして、ほとんど拘束力をかけていない。

試験体に使用したコンクリートの調合を表-2 に示す。粗骨材には最大骨材寸法 15mm の碎石を使用した。使用したコンクリートの材料試験結果を表-3 に示す。接合筋と拘束鋼棒の力学的性質を表-4 に示す。拘束鋼棒には、ネジ切りの機械加工を施すため S45C を使用したが、ヤング係数は接合筋とほぼ同じである。

試験体の製作は以下のように行った。打継ぎのある試験体は、まず、先打ち部にコンクリートを打設した。平滑面タイプは打継ぎコンクリート面を塗装合板による仕上げとし、目荒しタイプは打継ぎ面の型枠に凝結遅延シートを貼付け、材齢 7 日に目荒しを行った。材齢 14 日に打継ぎのある試験体の後打ち部と一体打ち試験体のコンクリートを同時に打設した。

表-1 試験体一覧

[A シリーズ]

試験体記号	打継ぎ面の処理法	接合筋比 (%)	接合筋の本数 (本)
SR-AA1	一体打ち	1.34	4
SR-AB1	一体打ち	0.67	2
SR-AB2	一体打ち	0.67	2
SR-BPA1	平滑面	1.34	4
SR-BPA2	平滑面	1.34	4
SR-BPB1	平滑面	0.67	2
SR-BPB2	平滑面	0.67	2
SR-BMA1	目荒し	1.34	4
SR-BMA2	目荒し	1.34	4
SR-BMB1	目荒し	0.67	2
SR-BMB2	目荒し	0.67	2

[B シリーズ]

試験体記号	打継ぎ面の処理法	拘束鋼棒本数 (本)
SA1	一体打ち	4
SA2	一体打ち	4
SA3	一体打ち	4
SBP1	平滑面	4
SBP2	平滑面	4
SBP3	平滑面	4
SBM1	目荒し	4
SBM2	目荒し	4

表-2 コンクリートの調合

コンクリートの種類	骨材最大寸法 (mm)	W/C (%)	単位重量 (kg/m ³)				混和剤 l / m ³
			W	C	S	G	
普通	15	60.0	189	315	867	888	0.788

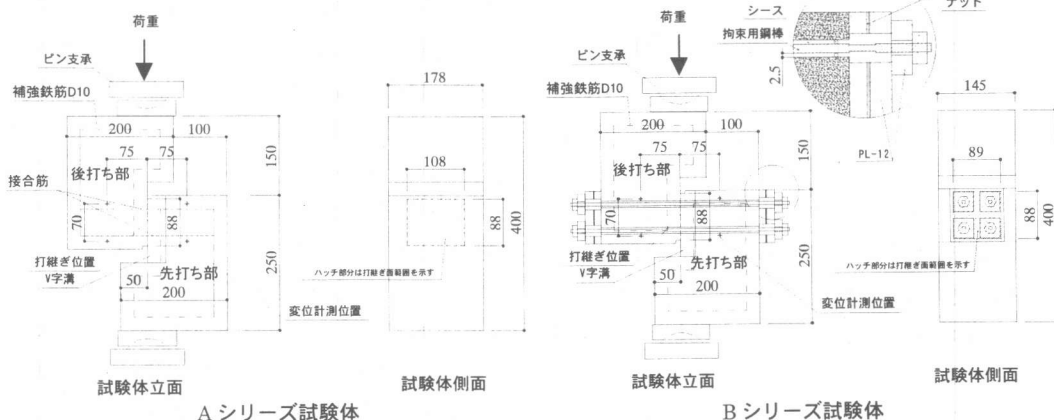


図-1 試験体寸法・載荷方法および測定位置

2.2 コンクリート表面粗さの測定方法

打継ぎ部の目荒し程度を数値化する目的で、打継ぎ面のコンクリート表面粗さをレーザー変位計を用いて 0.1mm 間隔で計測した。コンクリート表面粗さを定量的に示す粗さの定義は、JIS B 0601 の中心線平均粗さ R_a によった。

2.3 試験方法

試験は容量 100kN のコンピュータ計測制御式精密万能試験機を用い、せん断ひび割れを起こすまで 0.005mm/min、ひび割れが発生し滑り現象を起こした後は、徐々に載荷速度を 0.06mm/min まで上昇させた。各試験体についてせん断応力、せん断変位、ひび割れ幅の変化を測定した。

3. 実験結果および考察

すべての試験体が打継ぎ面でせん断ひび割れを発生させて、せん断破壊した。

(1) せん断応力とせん断変位の関係

打継ぎ面が平滑なタイプ、目荒しタイプおよび一体打ちタイプの代表的試験体のせん断応力とせん断変位の関係を図-2 に示す。既報³⁾⁴⁾において、コンクリート打継ぎ部のせん断伝達のメカニズムはせん断ひび割れ発生までの弾性挙動段階、ひび割れ伝播段階、滑り現象を起こし、急激にせん断応力を低下させる遷移段階および安定した骨材のかみ合いの4段階からなることを報告した。青柳・山田⁵⁾⁶⁾によれば、ひび割れ発生後、ひび割れ伝播段階ではひび割れが大きく開口しないため(ひび割れ幅 $W < 0.1\text{mm}$ 程度)、ひび割れ縁での微細な凹凸(local roughness)がせん断ずれに有効に働き、大きなせん断耐力が発揮される。これに対し、荷重の増加に伴い、ひび割れ幅が拡大し、微細な凹凸が破壊したりすると、粗骨材などのオーダーのレベルの凹凸(general roughness)が接触するまでに若干の自由すべりを起こす。

平滑タイプのうち、B シリーズのダウエル作用を除いた試験体(SBP2)は、ひび割れ伝播段階が短く、急激に滑り現象を起こし、general

表-3 コンクリートの力学的性質

使用材料種類	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張 強度 (N/mm ²)	静弾性 係数 (N/mm ²)
先打ち部普通 CON	30.1	2.4	2.4
後打ち部普通 CON	26.5	2.2	2.3

表-4 使用鋼材の力学的性質

種類	規格・ 呼び径	降伏 強度 (N/mm ²)	引張 強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ×10 ³ (N/mm ²)
接合筋	SD295A D6	415	527	1.96
拘束 鋼棒	S45C Φ8	439	963	1.97

roughness による骨材かみ合い段階に達した。急激な滑り現象の原因は local roughness が小さいためと考えられる。接合筋を配した試験体(SRBPA2)は、ひび割れ発生後、ダウエル作用によりせん断応力が上昇し、最大応力に達した後、滑り現象を起こした。その後 general roughness の骨材かみ合いと、鉄筋のダウエル作用による安定したせん断伝達挙動を示した。しかし、接合筋の鉄筋比の小さい試験体(SRBPB1)ではひび割れ発生後、ひび割れ時のせん断応力を維持し、せん断応力の上昇はみられなかった。そしてそのまま変形が増大し、滑り現象を起こした。

目荒しタイプのうち、ダウエル作用を除いた試験体(SBM2)はひび割れ伝播段階を経た後、滑り現象を起こし、general roughness による骨材かみ合い段階に達した。接合筋を配した試験体(SRBMA1)は、ひび割れ発生後、せん断応力の上昇がみられたが、接合筋の鉄筋比の小さい試験体(SRBMB1)ではひび割れ発生後のせん断応力の大きな上昇はみられなかった。

一体打ちのタイプでは、ダウエル作用を除いた試験体(SA2)は滑り現象によるせん断応力の低下が小さかった。これは、general roughness の粗さが大きいいため、骨材のかみ合いが、滑り後すぐに形成されるためと考えられる。接合筋を配した試験体(SRAA1)ではひび割れ発生後、せん断応力の大幅な上昇がみられ、最大応力に

到達後も、計測の範囲では明確な滑り現象は見られなかった。接合筋比の小さい試験体 (SRAB2) も同様な挙動を示した。

(2) ひび割れ幅とせん断変位との関係

打継ぎ面が平滑タイプ、目荒しタイプの各試験体のひび割れ幅とせん断変位の関係を図-3 に示す。

Walraven と Reinhardt⁷⁾ は、プッシュオフ形式のせん断実験結果から接合筋に異形鉄筋を用いた場合、ひび割れを貫通する異形鉄筋の高い付着抵抗が鉄筋近傍のひび割れ幅を狭くし、その狭い領域に高い応力が発生し、鉄筋まわりに二次的なひび割れを発生させ、図-4 に示すような、斜めの圧縮ストラットが形成され、純粋にかみ合い機構にもとづくひび割れ開口とは異なる挙動を引起す可能性を指摘している。本実験の B シリーズの試験体は、シースによって鋼棒まわりの圧縮ストラットの形成を完全に排除している試験体といえる。

平滑タイプでは、滑り現象の終了時すなわち general roughness の骨材かみ合い開始時のせん断変位が、どの試験体も 0.3~0.5mm 程度であった。せん断変位が 0.4mm 程度までのひび割れ幅とせん断変位の関係をみると、各試験体ともほぼ同じであった。目荒しタイプでは、平滑タイプと同様に滑り現象が終了する時点でのせん断変位は、どの試験体も 0.4mm 程度であった。

せん断変位が 0.4mm 程度までの、ダウエル作用を除いた試験体のひび割れ幅とせん断変位の関係は、平滑タイプ (SBP1,2,3) に比べ、目荒しタイプ (SBM1,2) は、せん断変位の増加に伴ってひび割れ幅が大きくなっている。この現象は、ダウエル作用を除いた試験体のひび割れ開口が純粋に local roughness の凹凸のかみあい機構にもとづき、local roughness の凹凸が平滑タイプに比べ大きいために引き起こされると考えられる。

それに対し、接合筋比 1.34% の試験体のせん断変位 0.4mm 程度までのひび割れ幅とせん断

変位の関係をみると、平滑タイプ (SRBPA1,2) ではダウエル作用を除いた試験体 (SBP1,2,3) とほぼ同じであるが、目荒しタイプ (SRBMA1,2) ではダウエル作用を除いた試験体 (SBM1,2) に比べひび割れの開口がかなり小さくなっている。

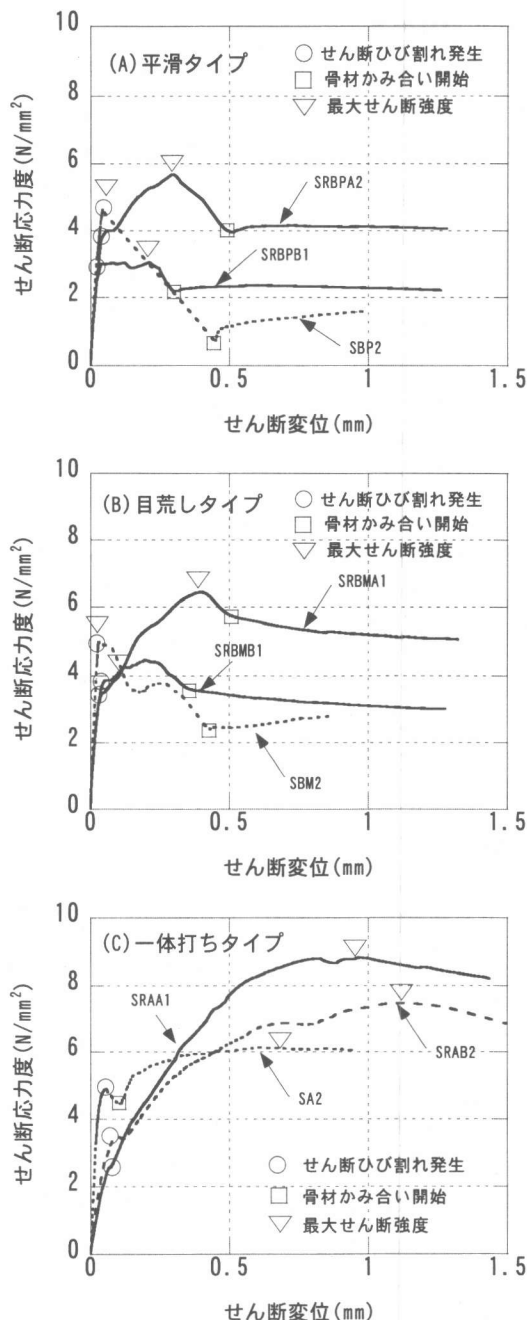


図-2 せん断応力とせん断変位の関係

この事は、接合筋のある打継ぎ試験体のせん断にともなうひび割れ開口が local roughness の凹凸かみ合い機構とは異なるメカニズムに支配されていることを示している。

次に、接合筋比 0.67% の試験体のせん断変位 0.4mm 程度までのひび割れ幅とせん断変位の関係を見ると、平滑タイプ(SRBPB1,2)は他の試験体とあまり差がないが、目荒しタイプ(SRBMB1,2)のせん断に伴うひび割れ開口は、ダウエル作用を除いた試験体(SBM1,2)と接合筋比 1.34% の試験体(SRBMA1,2)とのほぼ中間的な挙動を示した。この原因としては、接合筋の本数が半分になったことで、Walraven らのいう圧縮ストラットの数が半分になり、local roughness の凹凸のかみ合い機構による影響をより大きく受けたためと思われる。

さらに、平滑タイプにおいて各試験体のひび割れ開口挙動にあまり差がないのは、local roughness の凹凸の粗さが小さいため、明確な圧縮ストラットが形成されにくいためと考えられる。

(3) せん断強度と表面粗さ(R_a)との関係

各試験体のせん断ひび割れ強度 τ_{ci} と表面粗さ R_a との関係既報の τ_{ci} と R_a の関係にプロットしたものを図-5 に示す。

これまでの研究でコンクリートのせん断ひび割れ強度は打継ぎ面の表面粗さの影響をほとんど受けずほぼ一定で、一体打ちと同等であることを確認している。

図から明らかなように、接合筋を配した試験体のせん断ひび割れ強度は、打継ぎ面の表面粗さに関わらず、ダウエル作用を除いた試験体にくらべ 20~30% 程度小さくなっている。これは、せん断面のうちの接合筋の近傍に局所的な応力集中がおり、ひび割れが発生しやすくなるためと考えられる。

図-6 に general roughness の骨材かみ合い開始時のせん断強度 τ_{si} と表面粗さ R_a の関係を示す。接合筋を配した試験体の滑り現象によるせん断抵抗の低下は、接合面の表面粗さが粗く

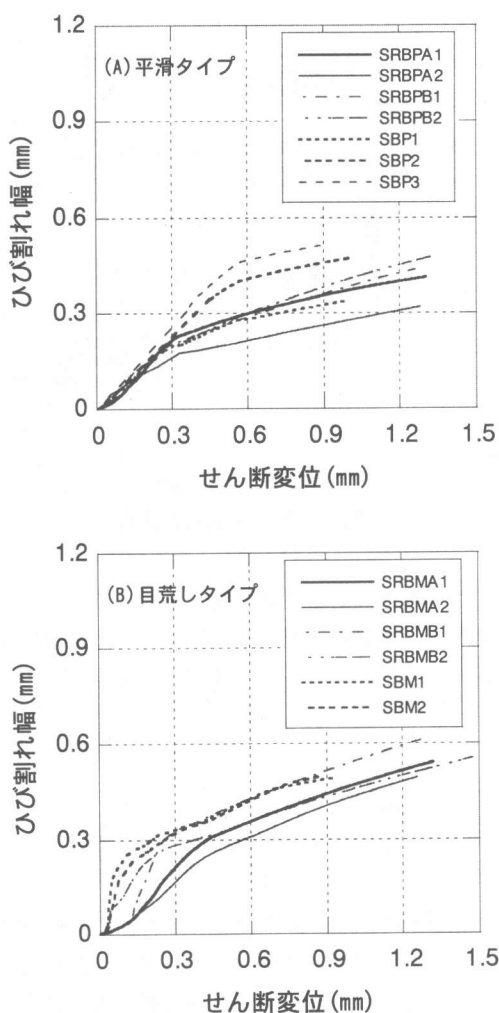


図-3 ひび割れ幅とせん断変位の関係

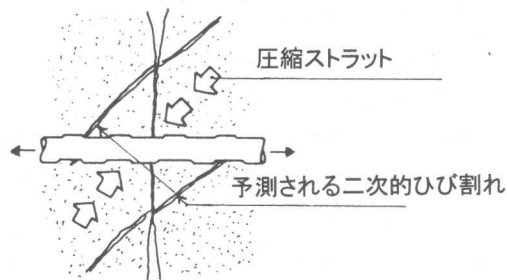


図-4 ひび割れ界面の接合筋近傍の圧縮ストラット

なると、小さくなった。ただ、打継ぎ面の平滑なコンクリートであっても、接合筋を鉄筋比

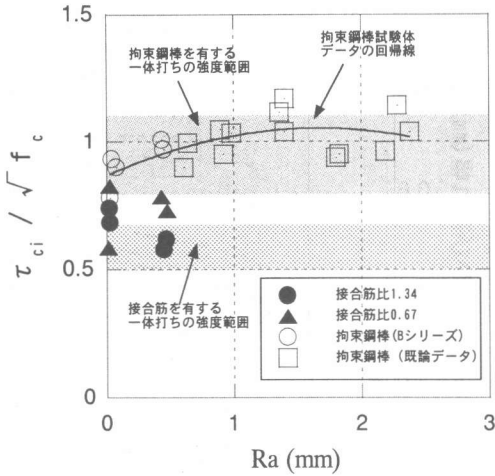


図-5 τ_{ci} とRaの関係

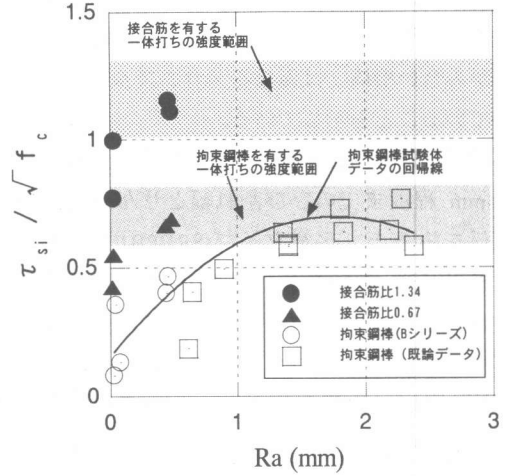


図-6 τ_{si} とRaの関係

で1.34%程度打継ぎ面に配することで、滑りによるせん断抵抗の低下を、接合筋を配しない一体打ちコンクリートと同等以上に押さえることができることが判った。

4. まとめ

本研究から得られた結果の要約を以下に述べる。

- (1) 打継ぎ面に接合筋を配することで打継ぎ面の表面粗さに関わらずコンクリートのせん断ひび割れ強度が約20~30%程度低下する。

[参考文献]

- 1) Hofbeck, J.A., Ibrahim, I.O. and Mattock, A.H.: Shear Transfer in Reinforced Concrete, ACI Journal, Proceedings, Vol.66, No.2, pp.119-128, February, 1969.
- 2) 三島徹也、鈴木顕彰、篠田佳男、前川宏一；鉄ひび割れ面で軸変形とズレ変形を同時に受ける軸方向筋の非線形挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.191-196, 1992
- 3) Ishihara, S., Mihashi, H. and Rokugo, K., "Experimental Study on The Mechanical Behavior of Construction Joints in Concrete Structures," Fracture Mechanics of Concrete Structures, pp.783-792, Aedificatio Publishers, 1998.
- 4) Ishihara, S. and Mihashi, H., "Experimental Study on Strain Softening Behavior of Shear Fracture in Concrete

- (2) せん断ひび割れ後、滑り現象の終了までにおいて、打継ぎ面でのひび割れ界面の接合筋近傍に圧縮ストラットが形成され、せん断にともなうひび割れ開口が、local roughnessの凹凸のかみ合い機構とは異なるメカニズムに支配される。
- (3) せん断ひび割れ後、滑り現象の終了までの打継ぎコンクリートのせん断挙動には、接合筋の鉄筋比と打継ぎ面の粗さが強い影響を与える。

- Structures," Transactions of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, SMiRT-15, Vol.VI, pp.149-160, 1999
- 5) 青柳 征夫：せん断伝達機構とその設計上の取扱い、コンクリート工学, Vol.20, No.12, pp.4-10, 1982
- 6) 山田 一字、青柳 征夫：ひび割れ面におけるせん断伝達、第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, 1983.10.
- 7) Walraven, J.C. and Reinhardt, H.W.: Theory and Experiments on the Mechanical Behaviour of Cracks in Plain and Reinforced Concrete Subjected to Shear Loading, HERON, Vol.26, No.1A, 1981