

論文 コンクリート打継ぎ面に直交する鉄筋の挙動と打継ぎ面粗さの関係に関する研究

香取慶一*¹・林 静雄*²・乗物丈巳*³・羽田和幸*⁴

要旨：コンクリート打継ぎ面に直交する鉄筋と打継ぎ面の粗さがせん断力伝達に及ぼす影響に関して、昨年に引き続き研究を行った。本報では、溝切り鉄筋を直交鉄筋に採用して貼付した歪みゲージの影響を排除し、またコンクリートを逆打ちすることで打継ぎ面に不純物が生成しない様にした。この結果、最大耐力と打継ぎ面の表面粗さとの相関は弱い、滑り変位を限定した場合はその耐力と打継ぎ面粗さに強い相関があること、せん断摩擦で負担されるせん断力が、打継ぎ面粗さで評価可能であることを示した。

キーワード：プレキャスト、摩擦効果、打継ぎ面、表面粗さ、溝切り鉄筋、接合筋

1. はじめに

コンクリート打継ぎ面の滑り変位、目開き変位により生じる「せん断摩擦」([1]では「パッシブ摩擦」)は、Mattockらによれば一定の条件下では打継ぎ面に直交する鉄筋(以下「接合筋」と呼ぶ)の降伏強度と鉄筋比、および打継ぎ面の摩擦係数などで求められるとされている[2]。

著者らは、このせん断摩擦(パッシブ摩擦)には打継ぎ面の表面粗さが大きく関与すると考え、昨年の大会で研究結果を報告した[1](以下「既報」と記す)。その際、せん断摩擦の指標となる「軸方向拘束力」(接合筋に貼付した歪みゲージにより測定された歪み度に表2のヤング率 E_s を乗じた値を全ての歪みゲージについて求めたものの総和)と打継ぎ面粗さとの間には相関は弱いとの結論を得た。しかし、行った実験では以下の事項が問題となった。

- (1)接合筋に貼付した歪みゲージ養生テープにより、接合筋とコンクリートの付着がなくなり、また接合筋にダボ作用が生じなかった。
- (2)先打ち部分のコンクリート打設面が打継ぎ面となったため、打継ぎ面にレイトランスなどの不純物が生成した恐れがあった。

本報は、これらの問題点を改善して可能な限り厳密な状況を試験体で再現した上で、再度同様の研究を行い、その結果を報告するものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状、配筋、パラメータ、使用コンクリートの調合は、基本的に既報と同じである。コンクリート強度のばらつきを考慮し、同一パラメータの試験体を3個製作し、合計12体の実験を行った。試験体一覧を表1に、試験体形状・配筋図を図1に、使用材料物性を表2～4に示す。

接合筋にはD13、SD295相当の鉄筋のリブ部に軸方向の溝切りを施した鉄筋を用いた。歪みゲ-

*1 東京工業大学助手 建築物理研究センター、工修(正会員)

*2 東京工業大学教授 建築物理研究センター、工博(正会員)

*3 (株)竹中工務店、工修(正会員)

*4 東京工業大学大学院 総合理工学研究科環境物理工学専攻

ジはこの溝内に貼付し、ゲージ養生を溝深さ範囲内で行うことで、1章(1)の問題点の改善を図った。接合筋両端部は、定着の完璧を期すため、厚さ6mmの鋼板に溶接した。接合筋からダボ作用を排除し、純引張力だけが作用する様にするために施す緩衝材については、取り扱いが容易でかつ軟度のある工作用油粘土を用いた。

1章(2)の様な問題点を解消するため、本報では先打ち部分、後打ち部分共にスタブ側からコンクリートを打設し、粗さを施す打継ぎ面が型枠面となる様にし、打継ぎ面上には不純物が生成しない様に配慮した(以下「逆打ち」と記す。図1参照)。

施す粗さについては、既報のうち粗面処理としての「鉄板粗し(凹凸型枠)」および平滑面処理としての「鉄の型枠(磨き鋼板)」の2種類を採用した。

2.2 打継ぎ面粗さ測定と粗さ評価方法

既報と同様にレーザー式粗さ測定器で打継ぎ面の粗さを測定した。測定は、面全体の測定が困難なため、既報と同様に図2に示す打継ぎ面上の2ラインを0.1mmごとに合計5600点で行った。粗さの評価は、既報と同様に「十点平均粗さ(Rz)」、「自乗平均粗さ(Hrms)」、「負荷値(Rk)」を各ラインごとに求め、2ラインの値を平均することで行った。なお、既報でHrmsと「中心線平均粗さ(Have)」に極めて強い相関があるとの結果を得たので、この両者は同じ評価方法と判断し、本報ではHaveによる評価は行わない。

2.3 打継ぎ部分載荷実験

粗さ測定後、後打ち部分に配筋、コンクリート打設し、硬化後に載荷実験を行った。打継ぎ面

表1 試験体一覧

試験体名	打継ぎ面粗さ処理方法	接合筋	緩衝材
No.1、2、3	鉄板粗し(凹凸型枠)	2-D13 溝切り加工	なし
No.4、5、6	鉄の型枠(磨き鋼板)		なし
No.7、8、9	鉄板粗し(凹凸型枠)		あり
No.10、11、12	鉄の型枠(磨き鋼板)		(油粘土)

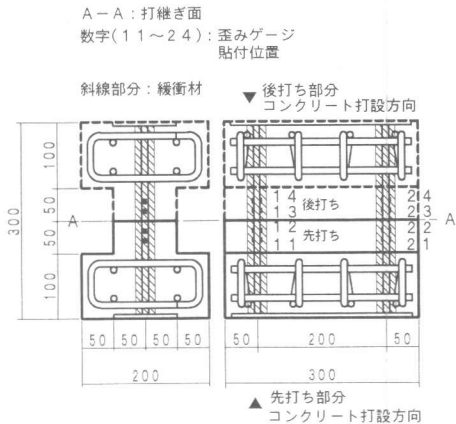


図1 試験体形状・配筋図

表2 使用鉄筋の力学的性質(引張試験)

断面積 A _s (cm ²)	降伏強度 σ _y (MPa)	引張強度 σ _{st} (MPa)	ヤング率 E _s (MPa)
1.02	353.8	498.0	1.78×10 ⁵

表3 使用鉄筋の力学的性質(曲げ試験)

曲率 φ(μ/mm)	モーメント M(N・cm)
0	0
この間	M=8.779φ
754	6619.5
この間	M=0.967φ+5890
4050	9806.7
これ以降	M=9806.7

※曲げ試験は単純梁形式で行った。

表4 使用コンクリートの力学的性質

用途	圧縮強度 σ _B (MPa)	ヤング率 E _B (MPa)	割裂強度 σ _{RI} (MPa)
No.1~6 先打ち部分	25.8	2.18×10 ⁴	2.12
No.1~6 後打ち部分	22.9	2.11×10 ⁴	2.16
No.7~12 先打ち部分	23.1	2.18×10 ⁴	2.18
No.7~12 後打ち部分	22.7	2.20×10 ⁴	2.16

へのせん断力荷は、既報と同じく万能試験機を用いて逆対称一方単調荷（S型荷）とした。試験体を加力フレーム内に納めた上で、加力フレームの表裏両側に平行クランクを装着することで、先打ち部分と後打ち部分が常に平行状態である様にした。打継ぎ面滑り変位（S）の測定は、 $S < 6\text{mm}$ では試験体に貼付した2軸型変位計で、 $S > 6\text{mm}$ では加力フレーム外側に設けた変位計で行った。



図2 打継ぎ面粗さ測定ライン位置図

3. 実験結果および考察

3. 1 打継ぎ面粗さ測定結果、粗さ評価

打継ぎ面粗さの測定結果の例を図3に、また各評価方法による粗さ評価値を表5に示す。

3. 2 荷による破壊状況・変形状

荷による破壊はすべて打継ぎ面の滑り破壊であった。荷によるせん断力（Q）と打継ぎ面滑り変位（S）の関係図を、4体分を代表として図4に、最大耐力を表5に示す。

Q-S関係の形状は、詳しく見ると以下の3種のパターンに分類される。

- (1) 荷と共に打継ぎ面滑り変位が生じるパターン（試験体No.5、7、8）。
- (2) 荷開始後しばらくは滑りは生じないが、最大耐力以前のある時点以降から滑り変位が生じ始めるパターン。そのある時点以前では目開き変位、接合筋歪みはほぼ零であった（試験体No.1～4、6、12）。
- (3) 荷開始後最大耐力までは全く滑り変位が生じず、ある時点で急激な滑り変位発生、耐力低下が生じ、それ以降に再度の耐力上昇を生じ、そのある時点より大きな耐力で最大耐力となったパターン。そのある時点以前では目開き変位、接合筋歪みはほぼ零であった（試験体No.9～11）。

最大耐力の大きさ（ $Q_{\max}$ ）と粗さ評価値との関係については、例として相関の最も良いRzによる評価を図5に示す。緩衝材の有無により分類を行っても、最大耐力の大きさと粗さ評価値との間の相関は弱い。試験体ごとに最大耐力時点での滑り変位が異なるため、粗さ評価値による一義的な最大耐力評価は困難と判断される。

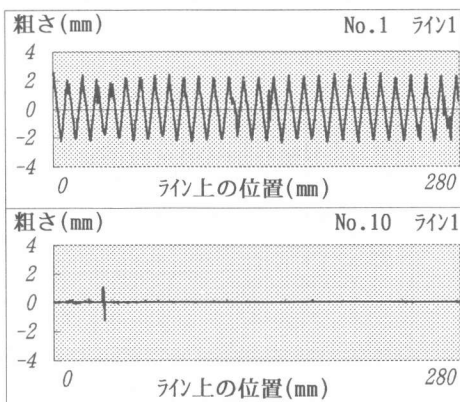


図3 表面粗さ測定結果

3. 3 接合筋の軸方向拘束力

最大耐力時の軸方向拘束力と粗さ評価値

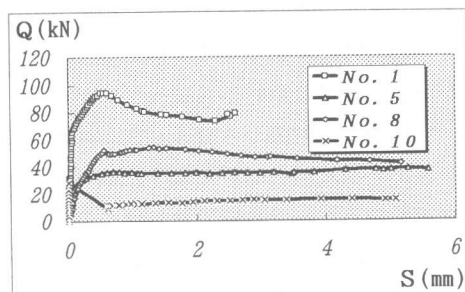


図4 荷せん断力（Q）－打継ぎ面滑り変位（S）関係図

表5 打継ぎ面粗さ評価値および载荷実験結果

試験体名	粗さ評価値	最大耐力 $Q_{\max}(\text{kN})$ ()内: $\tau_{\max}(\text{MPa})$	特定滑り変位時 耐力 $Q_*(\text{kN})$ - 平均軸方向拘束力 $N_*(\text{N})$	
	評価方法: ライン1 - ライン2 - 平均		S = 0.5mm時 $Q_{0.5} - N_{0.5}$	S = 1mm時 $Q_1 - N_1$
No.1	Rz(mm): 4.765-4.769-4.767 Hrms(mm): 1.260-1.286-1.273 Rk: 4.236-4.359-4.298	94.37 (3.13)	94.07 - 12012	82.80 - 15080
No.2	Rz(mm): 4.978-5.121-5.050 Hrms(mm): 1.288-1.296-1.292 Rk: 4.231-4.302-4.267	105.07 (3.50)	103.89 - 12600	87.61 - 15054
No.3	Rz(mm): 5.923-6.648-6.286 Hrms(mm): 1.374-1.460-1.417 Rk: 4.477-4.285-4.381	117.69 (3.92)	105.07 - 13400	97.57 - 11556
No.4	Rz(mm): 2.484-0.875-1.680 Hrms(mm): 0.544-0.161-0.353 Rk: 0.095-0.071-0.083	79.86* (2.66)	33.71 - 3828	36.35 - 4762
No.5	Rz(mm): 2.432-3.694-3.063 Hrms(mm): 0.486-0.405-0.445 Rk: 0.559-0.102-0.330	90.68* (3.02)	35.17 - 4593	35.20 - 8132
No.6	Rz(mm): 0.998-1.405-1.201 Hrms(mm): 0.241-0.098-0.170 Rk: 0.160-0.139-0.150	99.33* (3.31)	26.93 - 345	29.61 - 576
No.7	Rz(mm): 4.985-7.129-6.057 Hrms(mm): 1.297-2.099-1.698 Rk: 4.198-3.293-3.745	53.89 (1.80)	48.29 - 4476	50.20 - 7464
No.8	Rz(mm): 5.639-5.635-5.637 Hrms(mm): 1.320-1.342-1.331 Rk: 4.250-4.380-4.315	54.31 (1.81)	50.46 - 4040	52.43 - 6290
No.9	Rz(mm): 5.898-5.460-5.679 Hrms(mm): 1.378-1.310-1.344 Rk: 4.471-4.168-4.319	53.55* (1.79)	23.34-(算出不能)	33.06-(算出不能)
No.10	Rz(mm): 0.693-0.899-0.796 Hrms(mm): 0.065-0.043-0.054 Rk: 0.049-0.050-0.049	45.83* (1.53)	8.99 - 2388	12.38 - 2903
No.11	Rz(mm): 0.106-0.244-0.175 Hrms(mm): 0.050-0.052-0.051 Rk: 0.110-0.117-0.114	51.90* (1.73)	11.24-(算出不能)	15.68-(算出不能)
No.12	Rz(mm): 0.354-0.191-0.272 Hrms(mm): 0.033-0.016-0.025 Rk: 0.057-0.041-0.049	59.09* (1.97)	14.13 - 1140	16.16 - 1891

Rz: 十点平均粗さ、Hrms: 自乗平均粗さ、Rk: 負荷値

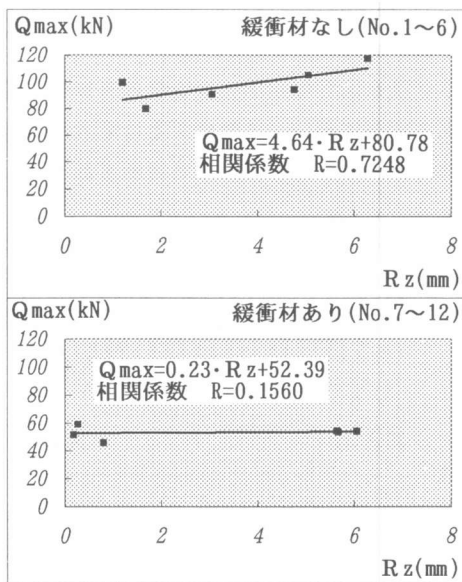
 $\tau_{\max} = Q_{\max} / 300\text{cm}^2$ (打継ぎ面面積)

Qmax欄の*印は、QmaxがS > 6mmで生じた試験体であることを示す。

については、歪みゲージの破断などで軸方向拘束力が算出できず、相関の強弱は判定できなかった。

次に、ある特定の滑り変位時 (S = 0.5mm、1mm の2時点) における軸方向拘束力について検討する。なお、緩衝材を施した試験体では、接合筋の歪みの挙動から判断して、接合筋はほぼ純引張状態であった。各滑り変位時における軸方向拘束力を表5に、また粗さ評価値と軸方向拘束力の関係をS = 1mm時のRzによる評価を例として図6に示す。なお、ここでは断線した歪みゲージの多いNo.9、11試験体は対象から除外した。また、測定可能歪みゲージ枚数の差を考慮し、軸方向拘束力を測定可能歪みゲージ枚数で除した平均値を、便宜的に「平均軸方向拘束力」と定め、S = 1mm時の平均軸方向拘束力を N_1 とした。

これによると、いずれの滑り変位時でも平均軸

図5 最大耐力 ($Q_{\max}$) - 十点平均粗さ (R_z) 関係図

方向拘束力と粗さ評価値との間には強い相関が認められた。緩衝材の有無により場合分けすると相関はより強くなり、緩衝材を施した試験体においては特に強い相関が見られた。また、図7に各滑り変位時における耐力と平均軸方向拘束力との関係を、 $S=1\text{mm}$ 時を例にして示す。耐力と平均軸方向拘束力との間には強い相関が認められた。これは $S=0.5\text{mm}$ 時でも同様であった。

よって、既報での結論とは異なり、軸方向拘束力は粗さ評価値により評価可能であり、結果としてせん断摩擦（パッシブ摩擦）は打継ぎ面の粗さに影響される可能性があることが分かった。

さらに各試験体ごとの平均軸方向拘束力と接合筋の降伏荷重（ N_1 が1本当たりの平均値になっているので、ここでは比較のため $2 \cdot A_s \cdot \sigma_y$ ではなく $A_s \cdot \sigma_y$ ）との関係を $S=1\text{mm}$ 時を例として図8に示す。 $A_s \cdot \sigma_y$ は計算上の最大の平均軸方向拘束力であるが、実際の平均軸方向拘束力とは大きな差が生じた。これは $S=0.5\text{mm}$ 時でも同様であった。

よって、接合筋が引張降伏する前提で軸方向拘束力を求めることは困難と判断される。

$S=0.5\text{mm}$ 、 1mm 時ではすでに先打ち、後打ち両コンクリート間の付着力は消失しており、また外部からの圧縮力は作用していないので、せん断伝達機構としては接合筋のダボせん断力とせん断摩擦のみが作用しているはずである。そこで、No.7～12試験体では $S=0.5\text{mm}$ 時で接合筋が純引張状態であったことからダボせん断力はなくせん断摩擦力だけで耐力を発揮していると仮定し、摩擦係数 μ' を下式

$$Q_{0.5} = 2 \cdot N_{0.5} \times \mu' \quad \dots (1)$$

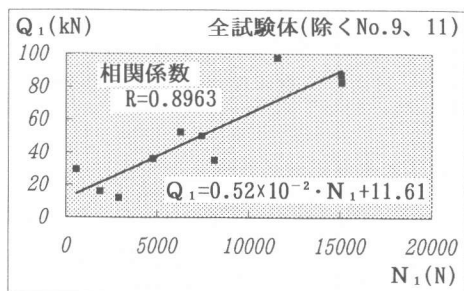


図7 $S=1\text{mm}$ 時の耐力（ Q_1 ）—平均軸方向拘束力（ N_1 ）関係図

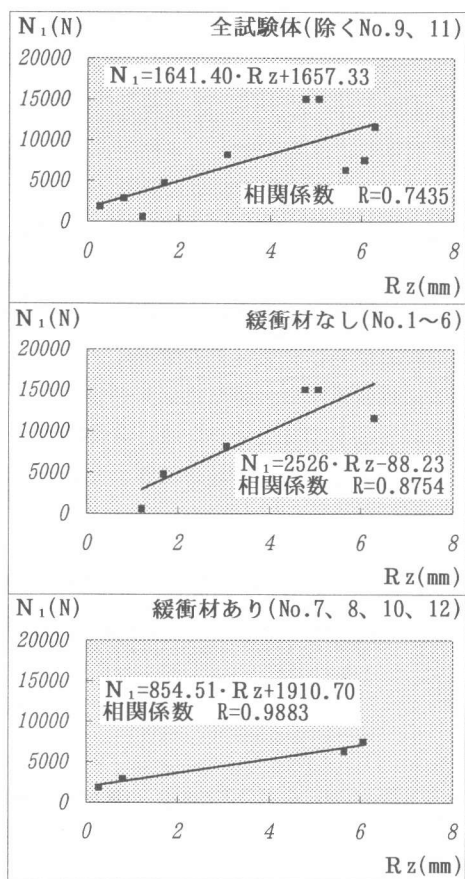


図6 $S=1\text{mm}$ 時の平均軸方向拘束力（ N_1 ）—十点平均粗さ（ Rz ）関係図

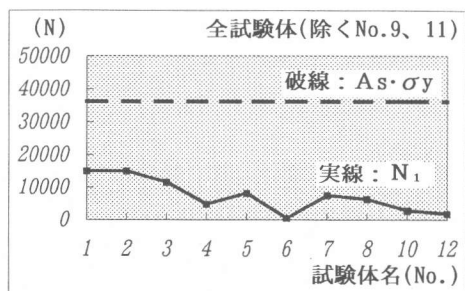


図8 $S=1\text{mm}$ 時の平均軸方向拘束力（ N_1 ）—計算値関係図

ここで、 $Q_{0.5} : S = 0.5\text{mm}$ 時の耐力

$2 \cdot N_{0.5} : 0.5\text{mm}$ 時の平均軸方向拘束力 $N_{0.5}$ の本数倍

から逆算し、表6に示す。文献

[2]、[3]に示す「鉄板粗し」処理

で1.2相当、「鉄の型枠」処理で

0.6相当とは大幅に異なっている。

この値の相違は、試験体の初期状態

の相違や平行クランクの使用に

よる試験体の拘束の強化によるものと考えられる。

次いで、ダボせん断力とせん断摩擦力の累加と実際の耐力との比較を、 $S = 0.5\text{mm}$ を例に表7に示す。各せん断伝達機構の負担せん断力の単純累加では、実際の耐力は評価できないと思われる。

表7 $S = 0.5\text{mm}$ 時のダボせん断力、せん断摩擦力と実際の耐力の比較

試験体名	接合筋に作用するダボせん断力 $Q_{sd0.5}(\text{kN})$	平均軸方向拘束力の本数倍 $2 \cdot N_{0.5}(\text{kN})$	摩擦係数 μ'	$S = 0.5\text{mm}$ 時		実際の耐力 $Q_{0.5}(\text{kN})$	$\frac{Q_{0.5}}{Q_{sd0.5} + Q_{sf0.5}}$
				左の2欄からのせん断摩擦力 $Q_{sf0.5}(\text{kN})$	$Q_{sd0.5} + Q_{sf0.5}(\text{kN})$		
No.1	2.38	24.02	5.82	139.80	142.18	94.07	0.66
No.2	2.82	25.20		146.66	149.48	103.89	0.70
No.3	1.69	26.80		155.98	157.67	105.07	0.67
No.4	4.05	7.66	1.88※	14.40	18.45	33.71	1.83
No.5	4.73	9.19		17.28	22.01	35.17	1.60
No.6	2.33	0.69		1.30	3.63	26.93	7.41

※表6の μ' 中、No.12による値は、打継ぎ面粗さ処理方法およびNo.7、8との比較から明らかに異常と判断し、No.10による値を用いた。

4. 結論

本報で以下の知見を得た。なお、(1)、(3)は既報とは異なる知見となった。

(1) 載荷実験の最大耐力は打継ぎ面粗さ評価値では評価困難である。

(2) 滑り変位0.5mm、1mm時の耐力、軸方向拘束力と粗さ評価値との間には強い相関が見られた。

(3) せん断摩擦（パッシブ摩擦）は打継ぎ面粗さにより影響される可能性がある。

(4) 接合筋の引張降伏を前提にせん断摩擦力を評価すると、摩擦力を過大評価する恐れがある。

(5) 各せん断伝達機構ごとの負担耐力の単純な累加では、実際の耐力は評価できない。

なお、(3)～(5)に関してはさらに詳細な検討を行い、後日いずれかの機会に発表したい。

【謝辞】東工大 塚田忠夫、和田 章、田中享二、篠原保二各先生からご教示戴きました。東健二、岸田慎司、山本直孝各氏、郭 濟蒼嬢ら東工大林研究室各位から種々ご協力賜りました。また本研究は、文部省科学研究費補助金（奨励研究(A)）および東京工業大学建築物理研究センター全国共同研究（一般共同研究）から援助を戴きました。記してお礼申し上げます。

<参考文献>

- [1] 牛垣和正、香取慶一、林 静雄：コンクリート打継ぎ面における表面粗さの評価とせん断伝達に関する実験研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.2、pp.1205-1210、1996.6
- [2] Mattock, A. H. : Cyclic Shear Transfer and Type of Interface, ASCE Strucral Division, Vol.107, No.ST10, pp.1945-1965, 1981.11
- [3] PCI Committee on Connection Details, "DESIGN AND TYPICAL DETAILS OF CONNECTIONS FOR PRECAST AND PRESTRESSED CONCRETE", Prestressed Concrete Institute, 1988
- [4] 武井一夫：コンクリート打継ぎ面の界面粗さの評価方法、日本建築学会構造系論文集、No.455、pp.7-16、1994.1