

論文 コンクリートおよび鋼材と充填材の押抜きせん断挙動に及ぼすずれ止めの影響

松家 武樹^{*1}・辻井 修^{*2}・白山 智^{*3}・大柳 英之^{*3}

要旨：本研究は、径の大きな鋼管内に径の小さい鋼材およびコンクリートを差し込み、その間隙を3種類の無収縮グラウト材で充填させた場合の押抜きせん断試験を行い、その挙動に及ぼす充填材の種類の影響について検討した。さらに、本研究では鋼材およびコンクリートにずれ止めを設け、押抜きせん断挙動に及ぼすずれ止めの影響についても検討した。その結果、無収縮グラウト材の種類により押抜きせん断挙動は異なることや、鋼材およびコンクリートに設けたずれ止めの種類やその間隔は押抜きせん断挙動に影響を及ぼすことを明らかにした。

キーワード：押抜きせん断耐力、ずれ止め、充填材、変位、ひび割れ

1. はじめに

近年、構造物の設計および施工の合理化が求められ、材料の高度化、設計の多様化、施工性の向上・工期短縮などが図られている。特に、コンクリート構造物では、工期短縮や施工性能の向上のため、コンクリート構造と鋼構造の合成構造が増大している。例えば、図-1に示すような都市交差点の立体交差高架橋における下部構造と上部工桁の接合構造などがある。本接合構造は、下部橋脚に鋼製キャップを取り付けた鋼床版箱桁を差し込み、40mm程度の環状の間隙に無収縮グラウト材（以下、充填材と略記）を充填し、一体化させるものである。本構造の接合部の耐力を算出する上で、充填材と鋼材、および充填材とコンクリート間の耐力を明らかにする必要がある。なお、鋼材やコンクリートにずれ止めを設けることで、充填材との付着耐力が増加し、結果的にせん断耐力は増加することが報告¹⁾されている。

そこで、本研究では、鋼材およびコンクリートとの押抜きせん断試験によって充填材の選定を行うとともに、その充填材を用いてずれ止めを設けた鋼材およびコンクリ

ートに押抜きせん断試験を行い、ずれ止めの影響についても検討した。

2. 実験概要

本研究における実験は、2つのシリーズに区分した。Series Iは、押抜きせん断挙動に及ぼす充填材の種類の影響について検討したものである。Series IIでは、Series Iで選定した充填材と、ずれ止めを設けた鋼材およびコンクリートが押抜きせん断挙動に及ぼす影響について検討したものである。

2.1 使用材料

表-1に、本研究で使用したコンクリートの材料の種類および品質を示す。

充填材は、非金属骨材系無収縮グラウト材（以下、充填材Aと略記）、金属骨材系無収縮グラウト材（以下、充填材Bと略記）、および特殊セメント系無収縮注入材（以下、充填材Cと略記）の3種類である。

2.2 製造および配合

コンクリートおよび充填材の製造は、温度20℃、相対湿度60%の試験室で行った。コンクリートは、容量55リットルのパン型ミキサを用いて、45リットルで製造した。表-2に、コンクリートの配合を示す。充填材は、ハンドミキサを用いて製造した。充填材A、BおよびCの水量は、それぞれ4.5、4.2、4.5/袋であり、単位充填材量は、それぞれ2250、1875、1650 kg/m³である。

2.3 供試体

(1) 製作方法

コンクリートの締め固めは全て内部振動機で行った。なお、充填材打ち込み後の締め固めは、特に行っていない。

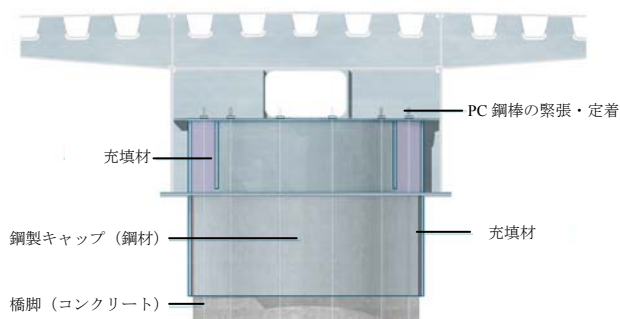


図-1 接合構造の概念図

*1 (株)間組 技術・環境本部技術研究所 博士(工学) (正会員)

*2 (株)間組 土木事業本部技術部

*3 (株)サクラダ 設計部

表-1 使用材料および品質

材料	種類	品質
セメント	普通 ポルトランドセメント	密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3290cm ² /g
細骨材	川砂	表乾密度：2.62g/cm ³ ，吸水率：1.17%， 粗粒率：2.91，微粒分量：1.45%， 実積率：69.4%
粗骨材	碎石	最大寸法：20mm，表乾密度：2.73g/cm ³ ， 吸水率：1.03%，粗粒率：6.62， 実積率：60.3%
混和剤	AE減水剤	変性リグニンスルホン酸化合物

養生は、試験体表面にポリ塩化ビニリデン製ラップを覆い、材齢 28 日まで封かん養生を行った。

(2) 形状寸法および諸元

図-2 および図-3 に、供試体の形状寸法を示す。充填材と、図-2 に示す充填材内側の鋼材（以下、内鋼管と略記）およびコンクリート、ならびに図-3 に示す充填材内側のコンクリートには、12mm の段差を設けている。なお、鋼材は厚さ 16mm とし、SS400 の鋼種を使用した。

Series II では、図-2 に示す内鋼管表面、および図-3 に示すコンクリート表面にずれ止めを設けている。図-4 および図-5 に、内鋼管およびコンクリートに設けたずれ止めの配置位置を示す。内鋼管に配したずれ止めには、SS400 のφ6 とφ9 の2種類の鉄筋を使用した。これ以降、ずれ止めにφ6 を用い、図-4 の左図、中図および右図のようにずれ止めを設けた場合には、それぞれφ6@200、φ6@100、およびφ6@75 と表記する。

コンクリートに設けたずれ止めの種類は大きく分けて3通りあり、第一に、コンクリートを打設する型枠表面に

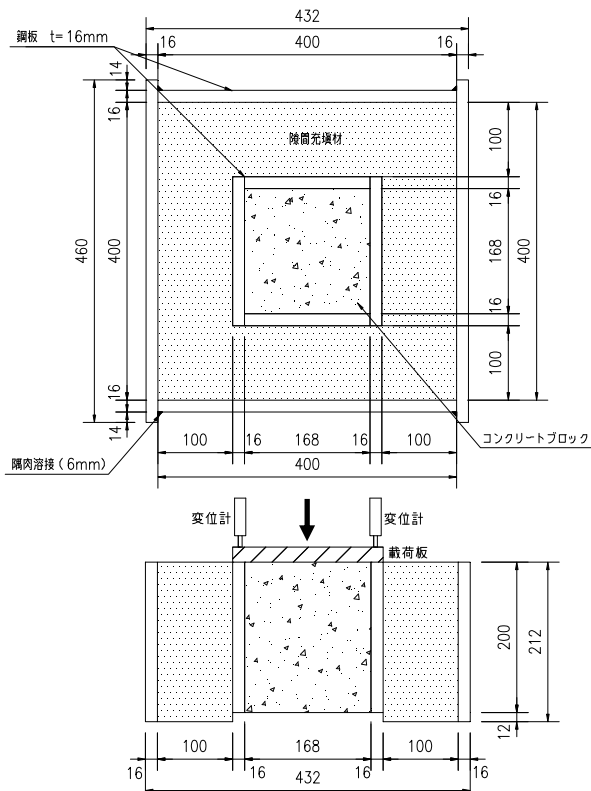


図-2 供試体の平面図および断面図

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		水 W	セメント C	細骨材 砕砂	粗骨材 砕石	AE減水剤 C×% (kg/m ³)	
41.5	43.0	166	400	741	1023	0.60	2.40

凝結遅延剤を塗布し、コンクリート表面に強制的に凸凹を形成させる場合である。つまりコンクリート表面だけが硬化していない状態で型枠を脱型し、その際にコンクリート表面の一部が型枠に付着するため、コンクリート表面に凸凹が形成されるものである。なお、凝結遅延剤の主成分は、オキシカルボン酸塩である。第二に、コンクリート表面をワイヤーブラシでチッピング処理した場合である。第三は、底辺 20mm、高さ 10mm の直角二等辺三角形の切り欠きを設けた場合である。なお、切り欠きの間隔は図-5 に示す通りであり、これ以降、図-5 の左図、中図および右図のようにずれ止めを設ける場合には、それぞれ面木 4、面木 7、および面木 10 と表記する。

(3) 荷重方法および測定項目

荷重は単調荷重で行い、最大荷重 2000kN および 5000kN の荷重装置を用い、それぞれ変位制御で行った。なお、本実験ではコンクリートの抜け出し変位（以下、変位と略記）が 8mm 程度まで荷重を行った。コンクリートおよび充填材の変位は、ダイヤルゲージ型変位計で測定した。図-2 および図-3 の下段には荷重位置および変位計位置を示す。

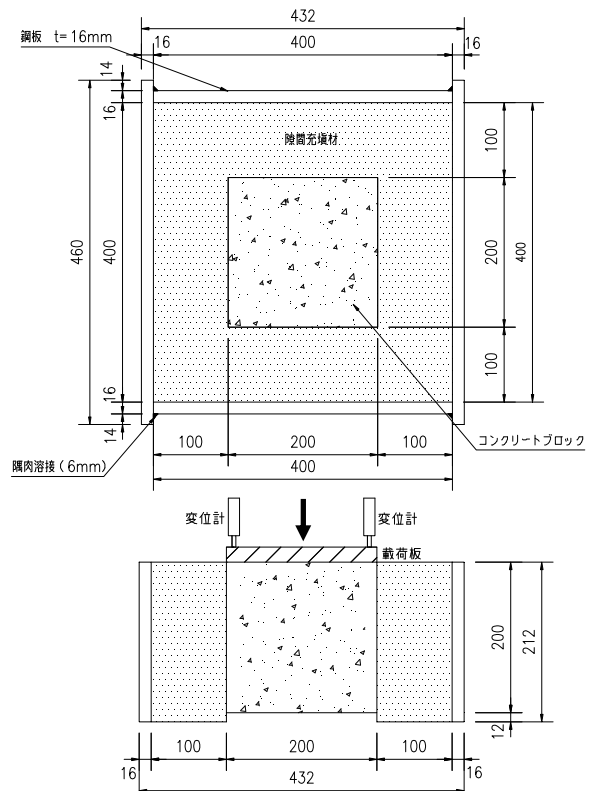


図-3 供試体の平面図および断面図

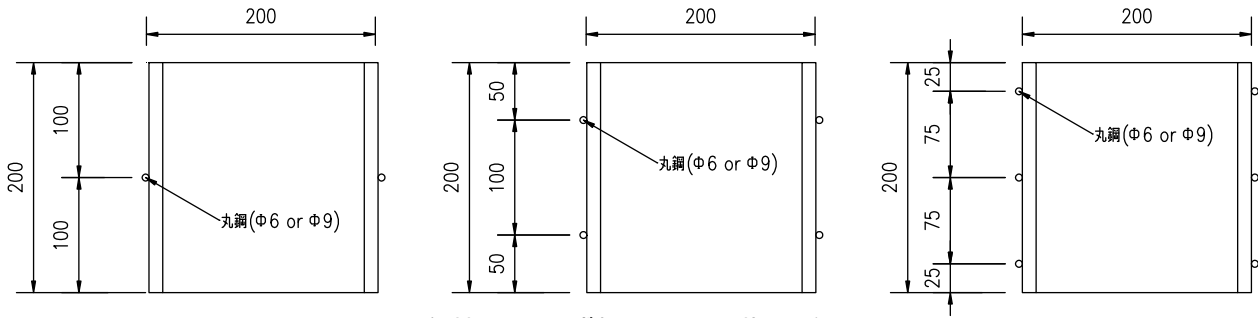


図-4 鋼材に設けたずれ止めの配置状況（側面図）

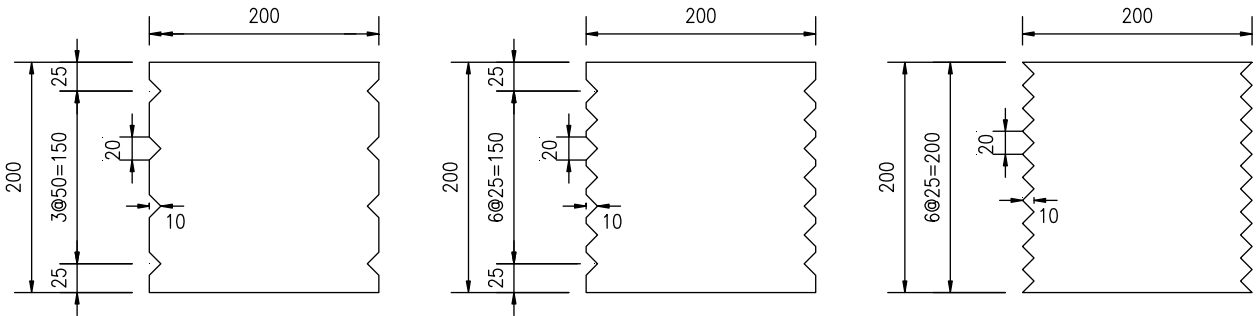


図-5 コンクリートに設けたずれ止めの配置状況（側面図）

表-3 材料特性 (Series I)

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	単位容積重量 (kg/m ³)
コンクリート	69.3	4.81	37.0	2400
充填材A	56.8	3.72	24.2	2185
充填材B	67.0	4.24	24.6	2498
充填材C	62.9	4.35	20.5	2053

3. 実験結果および考察

3.1 Series I

表-3に、コンクリートおよび各充填材の材料特性を示す。本実験では、土木学会規準 JSCE-F541-2007²⁾に準じて、充てんモルタルの流動性試験を行っている。充填材 A, B, および C の流下時間は、それぞれ 9.3, 7.3, および 11.0 秒であった。

(1) ひび割れ状況

基本的にひび割れは、内鋼管およびコンクリートの隅角部に発生し、そこから斜め 45° に進展している。なお、

鋼材とコンクリートの違いや充填材の種類によるひび割れの外観上の挙動に有意な差異は見られないものとなった。ひび割れ状況の写真は、後述する series II で一例を示すこととする。

(2) 荷重-変位曲線

図-6に、荷重-変位曲線（以下、P-δ曲線と略記）を示す。充填材Cを用いた場合の最大荷重は、他のものに比べて極めて小さい。充填材Cでは、適切な養生を行ったが、乾燥収縮によるひび割れが発生した。これは、他の充填材よりも乾燥収縮の量が大きかったことを示唆するものである。乾燥収縮量の増大は充填材と鋼材およびコンクリートの付着を著しく減少させ、結果的に、そのことが最大荷重を小さい値にさせたものと類推される。

Series I における各充填材の材料特性、ひび割れ状況およびP-δ曲線の結果を踏まえ、Series II では、3種類の充填材の中で最も性能が良いと考えられる充填材Bを用い

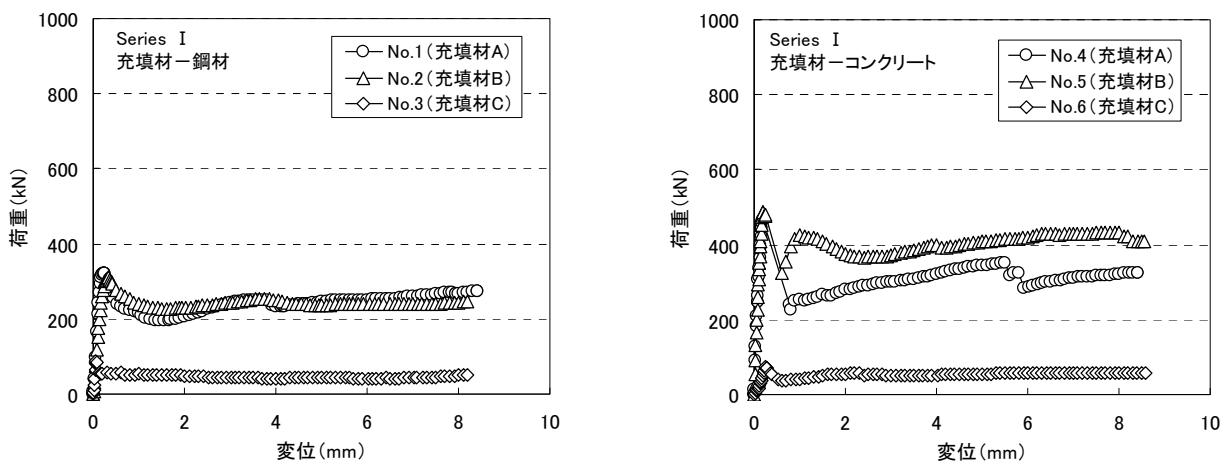


図-6 荷重-変位曲線 (Series I)

表-5 実験結果の一覧 (Series II)

試験体 No.	差し込みブロック	ずれ止めの仕様	実験値		最大荷重時の変位 (mm) δ	計算値		実験値/計算値
			最大荷重 (kN)	せん断耐力 (N/mm ²)		最大荷重 (kN)	せん断耐力 (N/mm ²)	
No.1	鋼材	平滑	199.5	1.25	0.311	184.0	1.15	1.08
No.2		$\phi 6@200$	918.1	5.74	1.201	737.5	4.61	1.24
No.3		$\phi 6@100$	1500.1	9.38	1.219	1291.0	8.07	1.16
No.4		$\phi 6@75$	1863.7	11.65	2.008	1660.0	10.37	1.12
No.5		$\phi 9@200$	1465.6	9.16	1.042	1014.2	6.34	1.45
No.6		$\phi 9@100$	2165.4	13.53	3.358	1844.4	11.53	1.17
No.7		$\phi 9@75$	2764.7	17.28	1.782	2397.9	14.99	1.15
No.8	コンクリート	平滑	343.3	2.15	0.217	—	—	—
No.9		粗面(チップング) ↓ 凝結遅延剤使用	1374.2	8.59	0.700	772.3	4.83	1.78
No.10		粗面(チップング) ↓ ワイヤーブラシ	1728.9	10.81	1.209	772.3	4.83	2.24
No.11		面木4	1127.1	7.04	0.287	686.5	4.29	1.64
No.12		面木7	2267.8	14.17	1.186	1201.4	7.51	1.89
No.13		面木10	2359.7	14.75	1.350	1716.2	10.73	1.37

ることとした。Series II では、その充填材とコンクリートおよび鋼材との押抜きせん断挙動に及ぼすずれ止めの影響について検討した。

3.2 Series II

表-5 に、各実験結果の一覧を示す。本シリーズで使用したコンクリートおよび充填材 B (以下、充填材と略記) の圧縮強度は、それぞれ 69.3 および 67.0 N/mm² である。同表に示す計算値は、後述する式(1)および式(3)を用いて算出した値である。

(1) ひび割れ状況

写真-1 に、鋼材と充填材 B の押抜きせん断試験後における試験体 No.7 のひび割れ状況の一例を示す。ずれ止めの有無に関係なく、いずれの場合においても、前述した通り、ひび割れは内鋼管およびコンクリートの隅角部から発生し、その部分から斜め 45° 進展している。なお、内鋼管にずれ止めを設けた場合については、上記のひび割れに加え、外枠の辺を構成する 2 点から放射線状のひび割れも発生している。



写真-1 ひび割れ状況 (Series II)

(2) 荷重-変位曲線

図-7 に、充填材 B と鋼材およびコンクリートの P- δ 曲線を示す。全体として、ずれ止めの種類は P- δ 曲線に影響を及ぼす結果となっているが、最大荷重に到達するまでの P- δ 曲線の差異は小さく、たわみに及ぼすずれ止めの種類の影響は明確ではない。なお、試験体 No.6 の

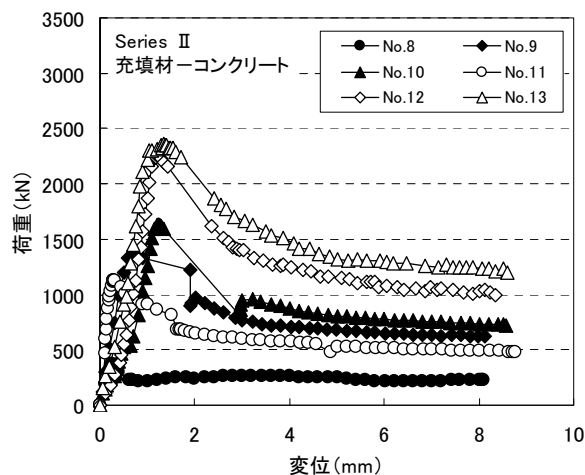
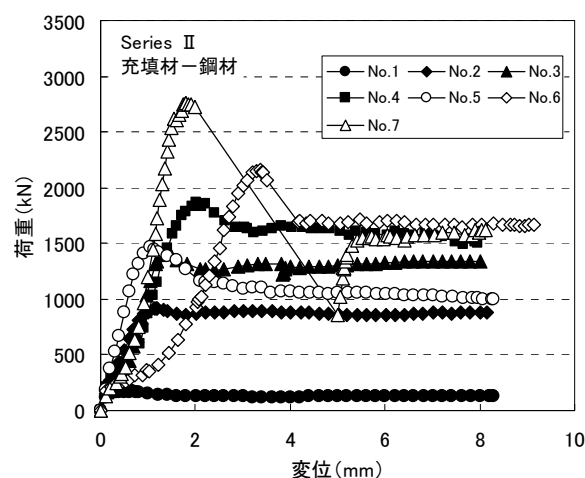


図-7 荷重-変位曲線 (Series II)

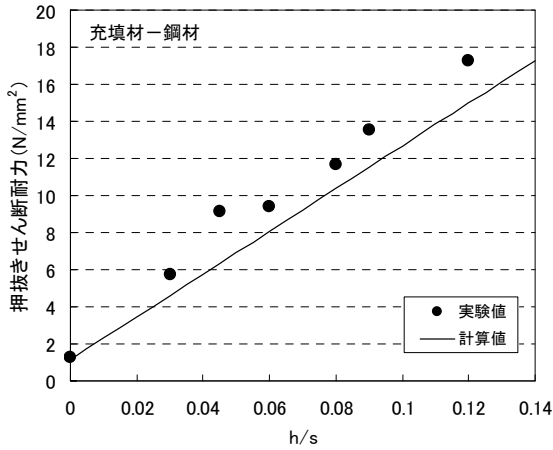


図-8 押抜きせん断耐力と h/s の関係

最大荷重時における変位は、他のものに比して大きくなっている。この原因に関しては判然としないが、載荷板と試験体の間に設置した石膏の潰れの影響に起因しているものと考えられる。しかしながら、寄与の程度については明確ではない。

一方、ずれ止めの種類に関係なく、内鋼管にずれ止めを用いない場合に対する用いた場合の最大荷重の比は4.60～13.86となっている。充填材とコンクリートの場合も同様に、ずれ止めを設けることで最大荷重は大きくなっている。ずれ止めを設けていない場合に対するずれ止めを設けた場合の比は、3.28～6.87である。

(3) 鋼材と充填材との押抜きせん断耐力

ずれ止めを設けた鋼材と充填材との押抜きせん断耐力は、「鉄道構造物等設計標準・同解説」³⁾に記載されているAPI基準⁴⁾に則した式(1)より算定した。

$$\tau_{\max} = 1.15 + 1.72 f_g \cdot h/s \quad (1)$$

ここに、 τ_{\max} ：押抜きせん断耐力 (N/mm²)、 f_g ：充填材の圧縮強度 (N/mm²)、 h ：ずれ止めの高さ (mm)、 s ：ずれ止めの間隔 (mm) である。

図-8に、押抜きせん断耐力と h/s の関係を示す。ここ

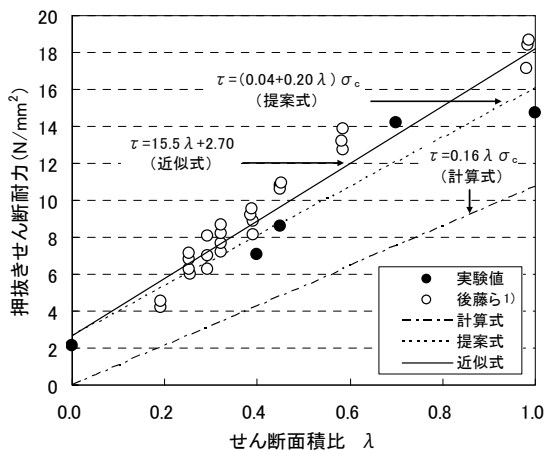


図-10 押抜きせん断耐力とせん断面積比の関係

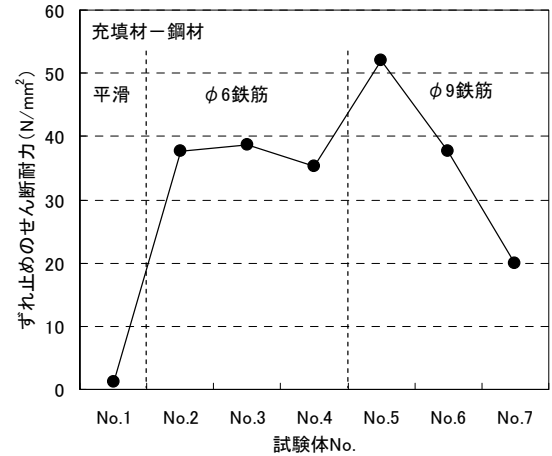


図-9 ずれ止めのせん断耐力

に示す実験値は、押抜きせん断荷重の最大値をコンクリートと接する鋼材の表面積で除して算出した値である。計算値は、式(1)より算出した押抜きせん断耐力であり、計算の際の充填材の圧縮強度には実験値を用いた。本実験結果は、式(1)で算出した計算値とほぼ符合する結果となった。計算値に対する本実験結果の比は、1.08～1.45の範囲にある。また、鉄筋間隔が同一の時のφ6とφ9の押抜きせん断耐力を比較すると、φ9の場合のせん断耐力が1.44～1.60倍ほど大きくなっている。

本実験では、押抜きせん断試験後に試験体を解体し、ずれ止めに拘束されている充填材の表面積を算出し、ずれ止めが負担するせん断荷重をその値で除すことで、ずれ止めのせん断耐力を算出した。図-9には、ずれ止めのせん断耐力を示す。ずれ止めのせん断耐力は、式(2)より算出した。なお、平滑面のせん断耐力は、試験体No.1の実験値を用いた。

$$\tau_2 = \frac{P - \tau_1 \cdot A_1}{A_2 \cdot m} \quad (2)$$

ここに、 P ：押抜きせん断荷重 (N)、 τ_1 ：平滑面のせん断耐力 (N/mm²)、 A_1 ：平滑面の表面積 (mm²)、 τ_2 ：

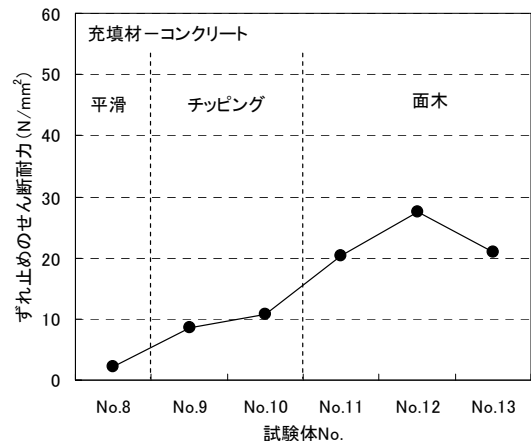


図-11 ずれ止めのせん断耐力

ずれ止めのせん断耐力 (N/mm^2), A_2 : ずれ止めに拘束されている充填材の表面積 (mm^2), m : ずれ止めの段数である。

$\phi 6$ の鉄筋をずれ止めとして用いた場合, ずれ止めのせん断耐力に及ぼすその間隔の影響はほとんどない。一方, $\phi 9$ の鉄筋をずれ止めとして用いた場合におけるずれ止めのせん断耐力は, $\phi 6$ の場合に比べ, その違いはより顕著に現れている。この結果は, ずれ止めの間隔が効率的にせん断力を受け持つ範囲が存在することを意味しており, 鉄筋径が大きいほど, その影響は大きい。

(4) 充填材とコンクリートとの押抜きせん断耐力

アンダー・ピニング設計・施工の手引⁵⁾によると, 表面処理を施した場合のせん断耐力は, 式(3)で表されている。

$$S_{us} = 0.16\lambda \cdot \sigma_c + \{1.12\lambda + (1-\lambda) \cdot \mu\} \cdot \sigma_M \quad (3)$$

ここに, S_{us} : 打継面のせん断耐力 (N/mm^2), σ_c : 柱コンクリート及び膨張モルタルの圧縮強度のうち小さい方の値 (N/mm^2), σ_M : 膨張圧 (N/mm^2), μ : 打継面の摩擦係数, λ : 打継面の形状・寸法による実験定数である。なお, 打継面全面に深さ 5mm 程度の目荒しを施工した場合 λ は 0.45 と設定されており, チッピング処理などを施した試験体 No.9 および 10 の λ は 0.45 とした。打継面に規則的なデフォーメーションを施工した場合のせん断面積比 λ は, 下式で算出される。

$$\lambda = \frac{n \cdot d}{L} \quad (4)$$

ここに, n : デフォーメーションの個数, d : デフォーメーションの幅, L : 打継面の長さである。

図-10 に, 押抜きせん断耐力とせん断面積比の関係を示す。同図には, 後藤ら¹⁾のデータも併せてプロットしている。ここに示す計算式とは前記式(3)で算出した値であるが, 充填材の膨張圧は $0N/mm^2$ としている。充填材の膨張圧を測定することは容易ではなく, また実際の現場で膨張圧の測定をすることは現実的に困難であることから, 本論文では膨張圧を測定しなくても押抜きせん断耐力を推定できる算出式を提案することとした。

本実験と後藤らが行った実験は必ずしも同じ方法ではないが, 何れの結果も概ね一致している。一方, 本実験結果と計算式は大きな差異が生じている。これは, 充填材の膨張圧を考慮していないためである。同図には, 本実験結果から導出した提案式と, 本実験結果および後藤らの結果を近似した式 (以下, 近似式と略記) も示している。本提案式は, 近似式と類似している。

本論文では, 前記式(2)を用いてずれ止めのせん断耐力を算出した。なお, 平滑面のせん断耐力は, 試験体 No.8 の実験値を用いた。図-11 に, ずれ止めのせん断耐力を

示す。ここに示すずれ止めのせん断耐力は, 充填材を拘束する切り欠き部分のコンクリートの表面積を算出し, ずれ止めが負担するせん断荷重をその値で除すことで, ずれ止めのせん断耐力を算出した。試験体 No.9 および No.10 のチッピング処理の違いによるせん断耐力の違いはほとんど見られないものとなった。なお, 試験体 No.12 である面木 7 の場合にせん断耐力は最も大きな値となっている。つまり, これはずれ止めが効果的にせん断力を負担するためのずれ止めの間隔が存在することを意味するものである。

3. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 充填材の種類によるひび割れの発生状況に差異はない。
- (2) 充填材に乾燥収縮によるひび割れが発生した場合の最大せん断荷重は, 極めて小さい。なお, 充填材の種類は荷重-たわみ曲線に影響を及ぼす。
- (3) ずれ止めの種類によるひび割れの発生状況に顕著な差異はない。
- (4) ずれ止めの種類は荷重-たわみ曲線に影響を及ぼす。
- (5) 鋼材にずれ止めを用いない場合に対する用いた場合の最大荷重の比は 4.60~13.86 である。コンクリートにずれ止めを用いない場合に対する用いた場合の最大荷重の比は 3.28~6.87 である。
- (6) 鋼材およびコンクリートに設けたずれ止めの種類やその間隔は押抜きせん断耐力に影響を及ぼす。
- (7) 充填材とコンクリートの押抜きせん断耐力を推定する式を提案した。

謝辞

本研究を実施するにあたり, 埼玉大学の睦好宏史教授のご指導を賜った。ここに深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 後藤祐司, 長滝重義: コンクリート接合部のせん断耐力に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 254 号, 1976.10
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書「規準編」, pp.217, 2007
- 3) 財団法人鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説-鋼とコンクリートの複合構造物, 1998
- 4) American Petroleum Institute: Recommended Practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms, API RP2A, 19th Edition, 1991
- 5) 財団法人鉄道総合技術研究所: アンダー・ピニング設計・施工の手引き, 1987