

# 合成梁における頭付きスタッドのずれ剛性に関する文献研究

## A comprehensive Review of Literature on the Slip Rigidity Obtained Through Push-Out Tests of Headed Studs

住居学科 安藤 万里子 石川 孝重  
Dept. of Housing and Architecture Mariko Ando Takashige Ishikawa

**抄 録** 鋼とコンクリートの合成梁では頭付きスタッドを用いるのが一般的である。その力学的性状を検証するために押抜き試験が行われるが、その場合特定の条件下での実験となることが多く、結果は試験条件に影響を受ける。力学的性状のうち、せん断耐力に関する研究は数多く行われているが、ずれ剛性に関しては全体を通して研究が少ない。そこで、本論文では押抜き試験の 53 文献からずれ剛性のデータを抽出し、ずれ剛性に影響を与える試験体条件を包括的に俯瞰し、その傾向を分析することにより、押抜き試験においてずれ剛性に影響を与える要因とその影響の一端を明らかにした。

**キーワード**：押抜き試験、頭付きスタッド、ずれ剛性、せん断力-相対ずれ変位関係、スタッド径

**Abstract** Headed studs are generally used in composite beams. Mechanical characteristics of headed studs are investigated by push-out tests. However, these tests are carried out under specific conditions and their results are greatly affected by test conditions. The number of studies of slip rigidity are fewer than those of shear strength. This study attempts to discuss the slip rigidity tenderly of headed studs comprehensively by analyzing experimental data obtained through push-out test results form 53 studies. This paper also elucidates the factors and influences which affect slip rigidity in push-out tests.

**Keywords:** Push-out test, Headed stud, Slip rigidity, Shear force-slip relationship, Stud diameter

### 1. はじめに

鋼とコンクリートの合成梁は、鉄骨梁とコンクリートスラブを緊結することにより、鋼材とコンクリートの間で力が伝達され、耐力・剛性が増すことから広く利用されている。鋼とコンクリートの結合に、施工性・経済性の面から優れている頭付きスタッド(以下スタッドと称する)が多く用いられている。

複合構造物の設計においては、一般的にずれが生じないことを前提に構造計算がなされている。しかし、実際には鋼とコンクリート間には相対ずれが生じ、スタッドはせん断力により変形する。このせん断滑りを許容する設計を行えば、スタッドの使用量を減らし、より合理的でコストを削減した設計ができると考えられる。

そこで本研究では、既往の押抜き試験に関する文

献を調査し、論文の結果と記述から全体の傾向を俯瞰してとらえ分析することで、押抜き試験を行う上で、ずれ剛性に特に大きく影響を与える試験体条件を明らかにすることが目的である。

### 2. 既往研究におけるずれ剛性の試験結果の整理

スタッドを用いた押抜き試験を行い、結果としてずれ剛性やせん断力-相対ずれ関係が読み取れる文献を収集した。その結果、53編の文献<sup>4)~56)</sup>から525体の試験結果を分析対象とした。

文献中から実験方法や実験条件について調査し、ずれ剛性に影響を与えると指摘されているパラメータを抽出した。それらの条件に対して文献内でどのように考えられているか抜き出し、同条件ごとに文献の記述を比較し俯瞰して考察することとした。

ずれ剛性としては、「最大せん断力の 1/3 荷重点

の割線勾配」を初期剛性とし、文献中に数値が記載されているもののみを抽出した。せん断力-相対ずれ曲線においては押抜き試験全体のずれ量の変化や靱性など、グラフをもとに挙動をとらえた(図1)。

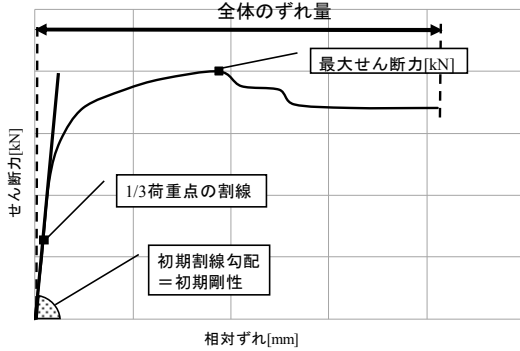


図1 初期剛性とずれ関係

文献上で挙げられたパラメータとその記述のある文献数、試験体数を表1に示す。試験体数に関しては、初期剛性の記載のあるもの、せん断力-相対ずれ曲線(グラフ)のあるものに分けて示した。

表1 対象文献から読み取れる実験条件(件)

パラメータ	文献数	試験体数		パラメータ	文献数	試験体数	
		初期剛性	グラフ			初期剛性	グラフ
付着	13	153	66	コンクリート強度	2	69	19
コンクリート打ち込み方向	8	54	37	閉止め、バンド	2	20	6
スタッド配置	4	24	31	縁端距離	2	12	23
コンクリートに圧縮載荷	4	20	43	加熱状況	2	24	15
突出長さ	4	0	22	スラブ幅	2	69	10
スタッド配置(即上)	4	0	22	スタッド配置(水平方向)	2	20	9
載荷方法	3	12	47	スタッド変断面	2	13	8
スラブ形状	3	12	65	スタッド軸径	2	69	2
コンクリート種別	3	21	31	傾斜スタッド	1	1	9
スタッド引張強度	3	77	23	スタッド高さ/軸径	1	0	3
配筋	3	0	21	摩擦拘束	1	0	3

### 3. スタッド軸部まわりのずれ剛性への影響

#### 3.1 スタッド軸径

スタッド軸径はずれ性状に最も影響を与えるパラメータと考えられる。初期剛性の値をとると、太径スタッドの方が初期剛性が大きくなるのがわかる(図2)。

さらに押抜き試験の結果、ずれ量はスタッド軸径が太い方が大きくなる。これは、「スタッドの寸法が大きくなると、応力やひずみの分布形が同じ時に、スタッドの変形が寸法比だけ大きくなると考えられる」<sup>4)</sup> ことと一致する(図3)。

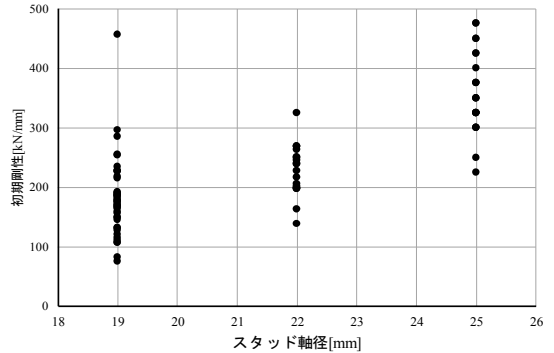


図2 スタッド軸径と初期剛性(文献5,6)による)

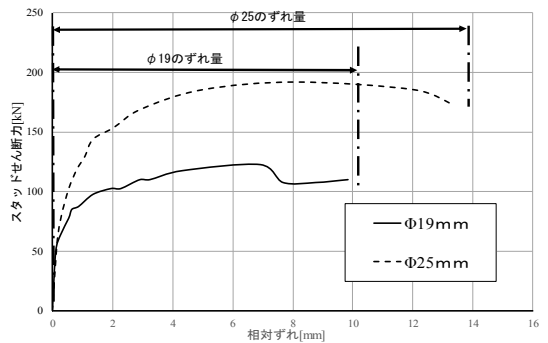


図3 軸径によるずれ量の比較(文献4)による)

せん断力-相対ずれ曲線のスタッド軸径による影響を軽減するための要因を考察した。結果、軸径の違いによる影響を無次元化するために、せん断力をスタッド軸部断面積で除した(図4)。以降、せん断力-相対ずれ曲線の比較にこれを用いる。

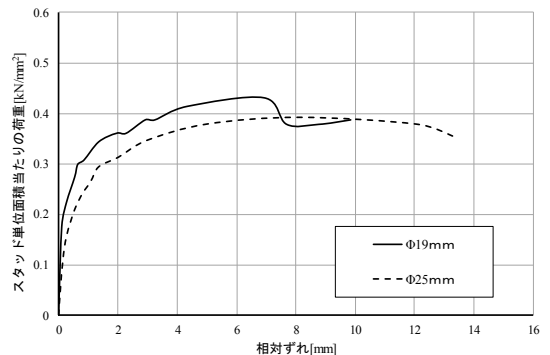


図4 スタッド単位断面積あたりの荷重-相対ずれ曲線(文献4)による)

### 3.2 変断面スタッド

ずれ剛性に対するスタッド軸径の影響が大きいことを考慮し、変断面による押抜き試験を行った文献がある。押抜き試験時の荷重はスタッド根元に加力が集中するという知見から、スタッド根元のみを約2倍太くする実験が行われ、剛性はほとんどのスタッドより若干高い結果を得た(表2)。

表2 高剛性スタッドの初期剛性 (文献7)による

試験体名	軸径 [mm]	初期剛性 [kN/mm]	変形のないスタッドとの比率	試験体名	軸径 [mm]	初期剛性 [kN/mm]	変形のないスタッドとの比率
PA	16	252.1	1	PB	13	195.6	1
PC	25+16	266.7	1.06	PE	22+13	213.5	1.09

これに対して、土木などの場面で高剛性のスタッドを用いた際にスタッドに荷重が集中し、疲労破壊を起こしやすくなるという懸念から、根元にウレタンのような柔らかい材を巻き、非合成化を目指した実験が行われ、剛性は低くなるという結果が得られた(表3)。

表3 ウレタンを使用したスタッドの初期剛性 (文献8)による

試験体名	軸径 [mm]	ウレタン (高さ)	初期剛性 [kN/mm]	平均 [kN/mm]	ウレタンのないスタッドとの比率
A-1	19	なし	226.7	236.1	1
A-2	19		247.2		
A-3	19		234.5		
B-1	19	あり (2 cm)	136	131.1	0.56
B-2	19		121.4		
B-3	19		126		
C-1	19	あり (3 cm)	113.3	113.3	0.48
C-2	19		90.7		
C-3	19		136		
D-1	19	あり (4 cm)	56.7	72.4	0.31
D-2	19		75.6		
D-3	19		85		

### 3.3 傾斜スタッド

スタッドに傾斜をつけた状態で取り付けた押抜き試験がある。<sup>9)</sup> 傾斜をつけることにより、スタッド断面積は傾斜のない試験体よりも見かけの断面積が大きくなる。この断面積の変化のため、必然的にせん断力は増すことになる。しかし、スタッド単位断面積あたりの荷重-相対ずれ曲線を見ると(図5)、上方に傾斜した場合は傾斜のない状態に比べて若干剛性の上昇がみられる程度だった。逆に下方に傾斜した試験体は剛性の低下が顕著にみられた。

文献<sup>17)</sup>においては「傾斜角が0°、30°、45°ではスタッドには引張力が生じ」<sup>9)</sup>たことや「 $\theta$ が-30°、

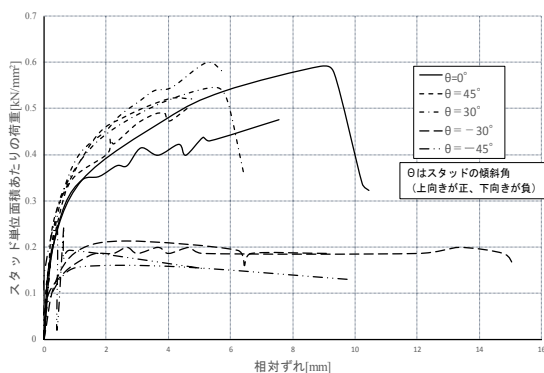


図5 傾斜スタッドのスタッド単位断面積あたりの荷重-相対ずれ曲線 (文献9)による

-45° の場合には、スタッドに圧縮力が作用し、そのためにコンクリートと鉄骨との界面にすき間が生じた」との記述があり、傾斜させる向きによってスタッドに作用する力の方向が剛性の変化につながったと考えられる。

以上よりスタッドの軸径及び軸部まわりの状況によりずれ剛性は大きな影響を受けることがわかる。

## 4. スタッド周辺のスラブ状況のずれ剛性への影響

押抜き試験時においてずれ剛性への影響を与える要因として、スタッド周辺のスラブ状況の影響が挙げられる。

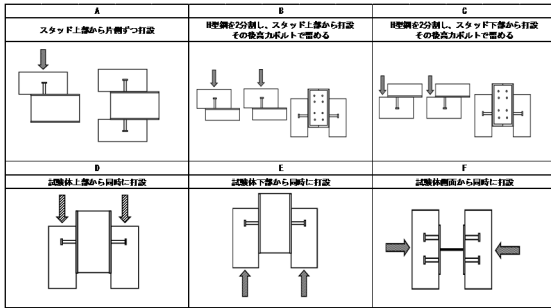
### 4.1 コンクリートの打ち込み方向

初期剛性は押抜き試験体のわずかな非対称性によっても、結果が左右される。そのため、押抜き試験体には高い精度が求められる。特にコンクリートの打ち込み方向によっては、スタッド周辺のコンクリートの充填状態が悪く、ずれ性状の悪化につながりかねない<sup>10)</sup>。また、試験体の両側にコンクリートの打設を行う際、片面ごとに別々に打設した場合、押抜き試験時に均一のコンクリート品質が期待できないため、好ましくない。

押抜き試験におけるコンクリートの打ち込み方向は実構造物の状況に合わせる事が原則であり、文献からは主に表4のような試験体作成法が収集できた。(B, CはH型鋼を予め2分解し、同時にコンクリートを打設した後、高力ボルトなどでH型鋼をつなげた試験体である。)

文献の中ではBの方法での試験体作成が最も多い。スタッド根元への十分なコンクリートの充填やコン

表4 コンクリートの打ち込み方向



クリートの均一な品質保持において、Bの方法が有効であると考えられる。

4.2 スラブ形状

押抜き試験の中には、コンクリート部分が等厚スラブとデッキプレート付きスラブがあり、後者は横断型と切断型の2種類がある。スラブ形状によるスタッド根元のコンクリート充填状態を表5に示す。

これによると、スラブ形状ごとにスタッド周辺のコンクリート量が大きく違うことがわかる。

表5 スラブ形状によるスタッド根元のコンクリート充填状態

	スラブ形状 <sup>1)</sup>	コンクリート充填状態	
等厚スラブ			
横断型デッキプレート付きスラブ			
切断型デッキプレート付きスラブ		スタッドとDPの山の位置が一致	スタッドとDPの溝の位置が一致

平野らの文献<sup>11)</sup>において、「相対ずれが0.1mmに対する割線勾配で示した」初期剛性の値を表6に示す。初期剛性の値は横断型が特に小さく、次に切断型が小さい。これはスタッド周辺のコンクリート量の大小が起因していると考えられる。他の文献に「最大せん断力の1/3荷重点の割線勾配」の初期剛性が示されているものはみられなかったが、同様の条件下で押抜き試験を行っている文献<sup>12)</sup>のスタッド単位断面面積あたりの荷重-相対ずれ曲線の挙動(図

表6 スラブ形状ごとの初期剛性値 (文献11)による)

試験体名	スラブ形状	初期剛性 [kN/mm]	試験体名	スラブ形状	初期剛性 [kN/mm]	試験体名	スラブ形状	初期剛性 [kN/mm]
P-N	等厚	2192.26	T-N	等厚	1734.60	PT-N	等厚	1756.16
P-DA	横断型	823.20	T-DA	横断型	973.14	PT-DA	横断型	1002.54
P-DIC	切断型	1350.44	T-DIC	切断型	1507.24	PT-DIC	切断型	1592.50
P-DJS	切断型	1367.10	T-DJS	切断型	1624.84	PT-DJS	切断型	1488.62

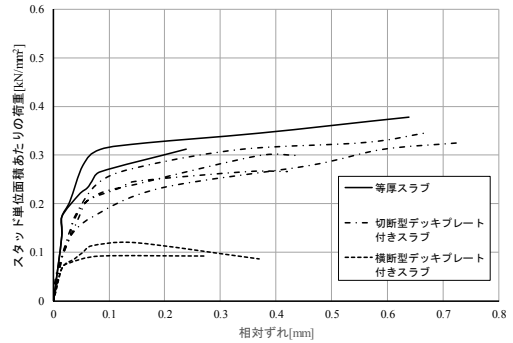


図6 スラブ形状ごとのスタッド単位断面面積あたりの荷重-相対ずれ曲線 (文献12)による)

6)をみると、横断型は顕著に強度・剛性が低下している。これらの結果を含めると、スラブ形状によってずれ剛性が受ける影響が大きいことが認められる。

4.3 縁端距離

押抜き試験時に荷重を受けると、スタッド下部のコンクリートはスタッドにより支圧を受ける。この時、スタッドとスラブ下部の縁端距離

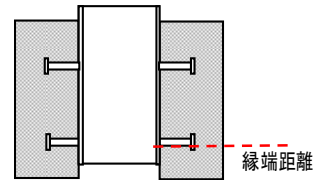


図7 縁端距離

(図7)が短いと、支圧を受けるコンクリートが減り、剛性の低下が早い段階で起き、全体のずれ量も大きくなる(図8)。

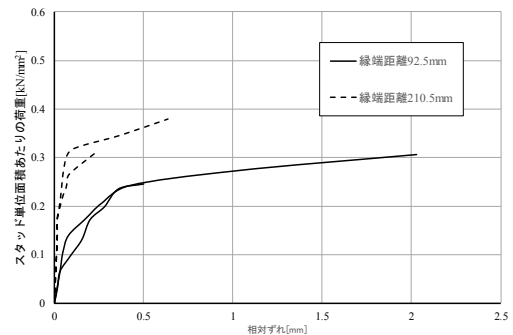


図8 縁端距離によるスタッド単位断面面積あたりの荷重-相対ずれ曲線 (文献11, 12)による)

つまり、スタッド下部には十分なコンクリート量が必要となり、その指標として縁端距離の確保が求められることがわかる。

#### 4.4 スタッド高さ

スタッドによって鋼とコンクリートを緊結させるとき、スタッドには頭がついていることでコンクリートを引き寄せ拘束し、その結合を強めている。つまり、このコンクリートによるスタッド頭部の拘束の効果が十分発揮されない場合は、剛性が低下する可能性が考えられる。

ここで、スタッドの高さがスラブ厚の中立軸よりも低い場合、せん断力-相対ずれ曲線の初期勾配は顕著に小さくなっている。図9はスラブ厚 180mm に対して、スタッド高さが 80, 120, 150mm の試験体の比較<sup>4)</sup>であり、スラブ厚の半分よりも短いスタッド高さ 80mm の初期の勾配が明らかに低いことがわかる。

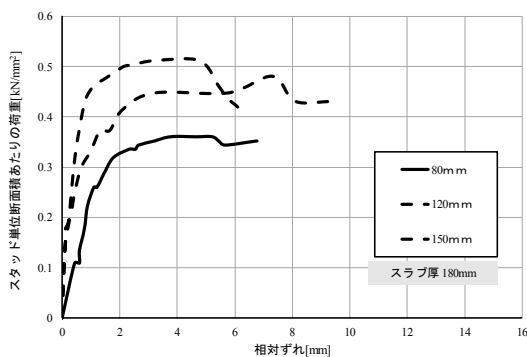


図9 スタッド高さによるスタッド単位断面積あたりの荷重-相対ずれ曲線 (文献4)による)

これにより、スタッドがコンクリートを拘束するためには少なくともスラブ幅の半分以上のスタッド高さが必要であると考えられる。押抜き試験においてスラブの中立軸よりも長いスタッド高さを確保することにより、より正確なスタッドのずれ性状を知ることができると考えられる。

### 4.5 スタッド配置

#### 4.5.1 等厚スラブ上のスタッド配置

等厚スラブ上のスタッドの H 型鋼上の配置によって、スタッド周辺のコンクリート状況は変化する (図 10)。

配置ごとの初期剛性の値を表7に示す。これを比

較すると、縦方向にスタッドが配置されている方の初期剛性が若干高い。これはスタッドによってコンクリートが固定される形になることで拘束力が増し剛性が増したものと考えられる。

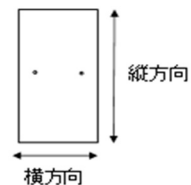


図 10 スタッド配置

表7 スタッド配置と初期剛性 (文献5)による)

試験体名	スタッド配置		スタッド軸径 [mm]	スタッド初期剛性 [kN/mm]	同一配置ごとの平均の初期剛性 [kN/mm]	試験体名	スタッド配置		スタッド軸径 [mm]	スタッド初期剛性 [kN/mm]	同一配置ごとの平均の初期剛性 [kN/mm]
	縦 [本]	横 [本]					縦 [本]	横 [本]			
A-19-40-600-1	1	2	19	82.91	137.36	C-19-40-600-1	1	2	19	120.83	154.42
A-19-40-600-2	1	2	19	75.26		C-19-40-600-2	1	2	19	177.67	
A-19-40-600-3	1	2	19	253.92		C-19-40-600-3	1	2	19	164.74	
A-19-40-600-1 (2段配置)	2	2	19	166.70	143.34	C-19-40-600-1 (2段配置)	2	2	19	182.77	176.43
A-19-40-600-2 (2段配置)	2	2	19	131.81		C-19-40-600-2 (2段配置)	2	2	19	171.50	
A-19-40-600-3 (2段配置)	2	2	19	131.52		C-19-40-600-3 (2段配置)	2	2	19	175.05	

また、上下に配したスタッド間での荷重分担が均等であるとはいえ、さらにスタッド周辺のコンクリート量も変化する。よって、スタッドの純粋な力学性状をみるための押抜き試験としては縦方向のスタッド配置は 1 列にするのが望ましい。しかしながら、実構造物においては 2 列配置とせざるを得ない場合もあるため、2 列配置での力学性状を調査するための押抜き試験の実施を行う必要性を否定するものではない。また、スタッドの配置間隔が小さすぎると群効果により強度低下が懸念される<sup>13)</sup>。また、剛性への影響は限定的と考えられるが、定かではない。

#### 4.5.2 デッキプレート上のスタッド配置

デッキプレート付きスラブにおいて、デッキプレート上のスタッド配置に注目する。デッキプレート上のスタッド配置を表8に示す。

表8 デッキプレート上のスタッド配置 (文献14~17)による)

配置名	溝下部配置	溝上部配置	千鳥配置
試験体断面図			
横方向からみた試験体			

スタッド単位断面積あたりの荷重-相対ずれ曲線 (図 11) を比較すると、配置ごとの特徴的な傾向は認められない。支圧面のコンクリート量が変化する

るため、強度への影響は見られるが、ずれ剛性に関しては影響が小さく、少なくとも他の試験体パラメータの影響に埋没する程度であると考えられる。

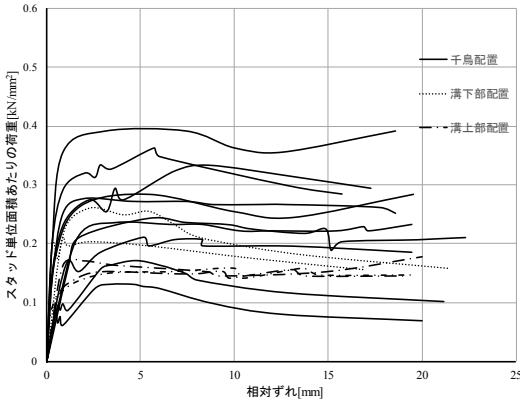


図 11 DP 上のスタッド配置によるスタッド単位断面積当たりの荷重-相対ずれ曲線 (文献 14~17)による)

4.6 鋼コンクリート間の付着性状

鋼とコンクリートの間には一般的に付着が生じる。建物の構造上では付着が初期剛性には有効であるが、スタッド本来の初期剛性を知る上では適さない。そこで H 型鋼にグリースを塗布するなど、付着による影響を軽減させる試みをした試験が多くある。付着の有無による初期剛性の値を表 9 に示す。

表 9 付着の有無と初期剛性 (文献 5, 18)による)

試験体名	付着	初期剛性 [kN/mm]	試験体名	付着	初期剛性 [kN/mm]
PT4S	A (なし)	226.9	B-19-40-300 (開止め)	1 あり	104.2
	B (なし)	473.6		2 あり	77.3
	C (なし)	364.9		3 あり	73.7
PT4U	A (なし)	355.6	B-19-40-400 (開止め)	1 あり	113.2
	B (なし)	507.1		2 あり	274.4
	C (なし)	216.3		3 あり	382.9
	D (なし)	214.7	B-19-40-400	1 あり	212.4
PT6U	A (なし)	788.2	B-19-40-600 (開止め)	1 あり	125.0
	B (なし)	243.9		2 あり	161.3
	C (なし)	561.1		3 あり	115.6

表 9 より、グリースを塗布した試験体の方が結果のばらつきが大きいことがわかる。これは付着がある状態においてはある一定の付着強度が生じており、それにより初期剛性の変化が抑えられることに起因していると考えられる。付着により初期剛性はある段階まで一定の値を示す

傾向にあるが、合成梁上においては荷重が付着強度に達した段階で一気にずれが生じ、剛性の低下がおきるなどの懸念がある。合成梁上での付着とそれに対応するスタッドの挙動に関してはさらなる説明が必要である。

4.7 開止め

載荷時にコンクリートブロックと H 型鋼の間に開きが生じることがある。開きによってスタッド周辺のコンクリートとの状況が変化することが懸念される。そこで、この開きを防止するために開止めを使用した文献<sup>5)</sup>がある。等厚スラブにおける開止めの有無による初期剛性の値を表 10 に示す。これらと比較すると、等厚スラブの場合、開止めによる影響は小さい。

表 10 開止めの有無による初期剛性 (文献 5)による)

試験体名	開止め	スラブ形状	初期剛性 [kN/mm]	平均の初期剛性 [kN/mm]	試験体名	開止め	スラブ形状	初期剛性 [kN/mm]	平均の初期剛性 [kN/mm]
A-19-40-400-1	なし	等厚	108	180	C-19-40-400-1	なし	等厚	191	170
A-19-40-400-2			255		C-19-40-400-2			169	
A-19-40-400-3			177		C-19-40-400-3			150	
A-19-40-400-1 (開止め)	あり	等厚	186	210	C-19-40-400-1 (開止め)	あり	等厚	156	171
A-19-40-400-2 (開止め)			235		C-19-40-400-2 (開止め)			186	
B-19-40-400-1	なし	DP	212	161	C-22-40-400-1	なし	等厚	325	221
B-19-40-400-2 (開止め)			110		C-22-40-400-2			139	
B-19-40-400-1 (開止め)			113		C-22-40-400-3			199	
B-19-40-400-2 (開止め)	あり	DP	274	257	C-22-40-400-1 (開止め)	あり	等厚	206	211
B-19-40-400-3 (開止め)			383		C-22-40-400-2 (開止め)			216	

デッキプレート付きスラブの押抜き試験において、デッキプレートの溝部分が転ぶような回転挙動 (図 12) がおきることがあり<sup>19)</sup>、回転挙動がおきると剛性が低下する要因になる。デッキプレート付きスラブを用いた

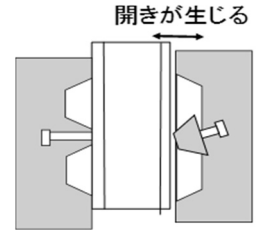


図 12 デッキプレートの溝による回転挙動  
押抜き試験において開止めはこの回転挙動を防止するために有効であると考えられる。

4.8 載荷方法

押抜き試験の載荷方法として、単調圧縮載荷 (P 載荷)、引張圧縮繰返し載荷 (PT 載荷)、引張載荷 (T 載荷) が挙げられた。

スラブ形状ごとの初期剛性の値を表 11 に示す。この初期剛性の値は「相対ずれが 0.1mm に対する割線勾配」と定義されたものである。

表 11 荷重方法ごとの初期剛性 (文献 12)による

試験体名	荷重方法	初期剛性 [N/mm]	試験体名	荷重方法	初期剛性 [N/mm]
等厚スラブ			切断型デッキプレート付きスラブ		
P-N	圧縮	2192.26	P-DJC	圧縮	1350.44
T-N	引張	-1734.6	P-DJS		1367.1
PT-N	圧引繰返し	-1756.16	T-DJC	引張	-1507.24
横断型デッキプレート付きスラブ			T-DJS		-1624.84
P-DA	圧縮	823.2	PT-DJC	圧引繰返し	-1592.5
T-DA	引張	973.14	PT-DJS		-1488.62
PT-DA	圧引繰返し	-1002.54			

これによると、等厚スラブにおいてはP荷重の初期剛性が高く、デッキプレート付きスラブにおいてはT・PT荷重の初期剛性が高くなっている。この文献中においては試験体形状の相違によるものと述べられており、スラブ形状と荷重方法の組合せ次第で剛性が変化する可能性があることがわかる。

本章では、押抜き試験時のスタッド周辺のスラブ状況に関するパラメータについて考察を行った。これらの考察により、スタッド周辺のコンクリート量を変化させる要因となるコンクリート打ち込み方向・スラブ形状・縁端距離・スタッド高さがずれ剛性に与える影響が特に大きいことがわかる。

## 5. 鋼・コンクリートの力学特性によるずれ剛性への影響

前章より、スタッド周辺のコンクリート状態がずれ剛性に与える影響が大きいことがわかった。本章では、スタッドやコンクリート自身の強度や種別などがずれ剛性に与える影響について検証する。

### 5.1 コンクリート種別

使用されるコンクリートの種別によるずれ剛性への影響を比較する。図 13 に等厚スラブの試験体のコンクリート種別ごとの初期剛性とコンクリートのヤング係数を示す。

これらの値を比較すると、普通コンクリートと高強度コンクリートはほぼ同様の結果が得られた。ヤング係数に注目すると、普通コンクリートと高強度コンクリートに関しては近い値を示している。初期剛性はコンクリート破壊がおこる前の性状であるため、コンクリート種別による初期剛性への影響は比較的小さいと考えられる。

普通コンクリート、軽量コンクリート、超軽量

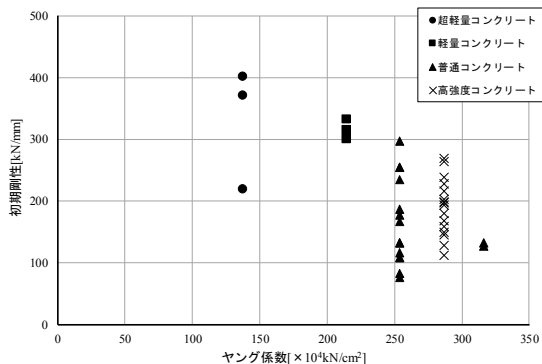


図 13 ヤング係数と初期剛性 (文献 5, 21)による

コンクリートに関して、ヤング係数に違いはあるものの初期剛性には大差はない。左藤らの文献<sup>21)</sup>においては各コンクリートの水セメント比が異なること、さらにスタッド支圧面にブリージングが発生したことにより普通コンクリートの初期剛性が低下したという指摘がなされている。

### 5.2 スタッド引張強度

まず初めにスタッドの引張強度がずれ剛性に与える影響を考察する。スタッドの引張強度と初期剛性の関係を図 14 にまとめた。両者とも顕著な相関があるとは認められない。

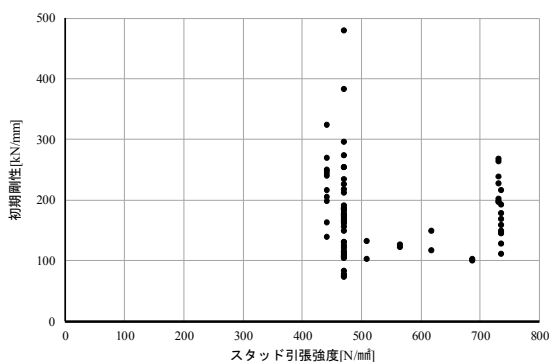


図 14 スタッド引張強度と初期剛性 (文献 5, 20)による

### 5.3 コンクリート強度

コンクリート強度とずれ剛性の関係について述べる。コンクリート強度に着目した文献<sup>4), 5), 22)</sup>の記述全体を通して、コンクリート強度がずれ剛性に与える影響は小さいことがわかる。初期剛性とコンクリート強度の関係を図 15 に示す。これによると両者に顕著な関係性はみられない。

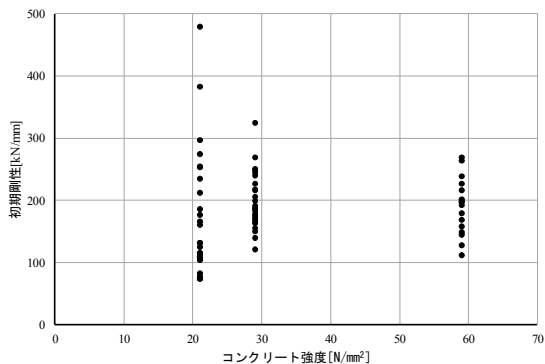


図 15 コンクリート強度と初期剛性 (文献 5)による

### 5.4 加熱による力学特性の変化

鋼・コンクリートは熱を加えることでその力学特性が変化する。その場合の押抜き試験結果への影響を探るために、押抜き試験載荷時に加熱を行うものと加熱を行った後、押抜き試験を行ったものがある。この二つの試験の初期剛性の値を表 12 に示す。

表 12 加熱状況ごとの初期剛性 (文献 23)による

試験体名	加熱温度 [°C]	初期剛性値 [kN/mm]	平均初期剛性値 [kN/mm]	加熱なしを基準とした初期剛性の比率	試験体名	加熱温度 [°C]	初期剛性値 [kN/mm]	平均初期剛性値 [kN/mm]	加熱なしを基準とした初期剛性の比率
押抜き試験載荷時に加熱					加熱冷却後に押抜き試験				
S-000d1	なし	227.8	209.87	1	S-000a1	なし	409.3	386.43	1
S-000d2		161.7			S-000a2		320.5		
S-000d3		240.1			S-000a3		429.5		
S-300d1	300	183.1	248.77	1.19	S-300a1	300	388.7	410.87	1.06
S-300d2		273.5			S-300a2		414.6		
S-300d3		289.7			S-300a3		429.3		
S-500d1	500	212.5	212.87	1.01	S-500a1	500	199.5	201.23	0.52
S-500d2		227.9			S-500a2		215.2		
S-500d3		198.2			S-500a3		189		
S-700d1	700	155.7	211.03	1.01	S-700a1	700	111	110.57	0.29
S-700d2		258.2			S-700a2		106.4		
S-700d3		219.2			S-700a3		114.3		

載荷時に加熱を行う場合、初期剛性に大きな変化はみられない。しかし、加熱冷却後の押抜き試験においては、500°Cを超えると急激な初期剛性の低下が起きている。これは加熱冷却した際に鋼材は強度の回復が見込めるのに対し、コンクリートはそれが見込めず、むしろさらに低下するという材料特性の違いによるものと考えられる。

本章の各考察より、スタッドやコンクリート自身の強度や種別がずれ剛性に与える影響は大きくないが、特定条件下における材料特性の変化には留意すべき点があることがわかった。

## 6. おわりに

頭付きスタッドの押抜き試験におけるずれ剛性に影響を及ぼす要因に注目し、収集した 53 文献より、525 体の試験体の結果を整理した。

押抜き試験においてずれ剛性に影響を与える要因としてスタッド軸径、変断面スタッドなどのスタッド軸部の状況とコンクリート打ち込み方向、縁端距離、スタッド高さ、スラブ形状などのスタッド周辺のスラブ状況があることを明らかにした。しかしながら、付着性状や載荷方法に関してはばらつきがありさらなる研究が求められる。

本研究を通して、せん断耐力と比べてずれ剛性に関する研究を行っている研究が少なく、初期剛性に言及している文献も多くないことがわかった。そのため、初期剛性における傾向を一義的に明示するには至らなかった。今後の展望として、ずれ剛性に着目した押抜き試験の実施や、標準試験体の確立とその推進の必要性を実感した。

## 参考文献

- 1) スタッド協会:合成梁の設計と施工, 森北出版, 第 1 版, 1989 年 3 月 14 日.
- 2) 一般社団法人スタッド協会:技術資料, <http://asw-net.jp/siryoku.html>, 2018 年 1 月 18 日.
- 3) スタッド協会:溶接技術者のためのスタッド溶接施工の手引き, 鋼構造出版, 第 5 版, 2012 年 10 月 3 日.
- 4) 島弘, 渡部誠二:頭付きスタッドのせん断力-ずれ関係の定式化, 土木学会論文集 A VOL.64NO.4, 936-947, 2008 年 11 月.
- 5) 田川泰久, 平城弘一, 尾形素臣, 井上一朗, 松井繁之:頭付きスタッドの押抜き試験法の標準化に関する検討, 鋼構造論文集第 2 巻第 8 号, 47-60, 1995 年 12 月.
- 6) 栄真堂, 大谷恭弘:太径Φ25 頭付きスタッドのせん断ずれ剛性評価について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 573-574, 2016 年 8 月.
- 7) 前田泰秀, 石崎茂, 平城弘一, 池尾良一:高剛性を目指したスタッドの開発, コンクリート工学年次論文報告集, VOL.21, NO.3, 1087-1092, 1999 年.
- 8) 松井繁之, 平城弘一, 石崎茂:スタッドの非合成桁橋への適用に関する研究, コンクリー



- ト工学年次論文報告集, VOL19, NO.2, 1413-1418, 1997年.
- 9) 三好栄二, 塚田昇平, 打越瑞昌, 藤木清弘, 南宏一: 傾斜スタッドの開発, 鋼構造論文集 第1巻3号, 139-146, 1994年9月.
  - 10) 赤尾親助, 栗田章光, 平城弘一: 頭付きスタッドの押抜き挙動に及ぼすコンクリートの打込み方向の影響, 土木学会論文集, 第380号 I-7, PP.311-320, 1987年4月.
  - 11) 平野道勝, 穂積秀雄, 吉川精夫: 引張力をうけるスラブに埋込まれたスタッドコネクタの押抜き試験(2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 947-948, 1976年10月.
  - 12) 平野道勝, 穂積秀雄: 引張力をうけるスラブに埋込まれたスタッドコネクタの押抜き試験(1) 構造, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1517-1518, 1975年10月.
  - 13) 山田稔, 福田晴男: スタッドジベルの力学性状に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演会, 479-480, 1971年11月.
  - 14) 田川泰久, 駿河良司, 竹下和彦: デッキプレート付スラブに埋込まれた頭付スタッドの押抜き試験 その1. 鉄骨梁にスタッドを直に溶接した場合, 日本建築学会学術講演梗概集 構造Ⅲ, 521-522, 1996年9月.
  - 15) 駿河良司, 田川泰久, 竹下和彦: デッキプレート付スラブに埋込まれた頭付スタッドの押抜き試験 その2. スタッド1本をデッキ溝に貫通溶接した場合, 日本建築学会学術講演梗概集 構造Ⅲ, 523-524, 1996年9月.
  - 16) 田川泰久, 堀田洋志, 中楚洋介, 浅田勇人: デッキプレートを用いた合成梁における頭付きスタッドの押抜き試験 太径スタッドの配置と突出長さの力学性状への影響 その1, 日本建築学会学術講演梗概集 構造Ⅲ, 855-856, 2012年9月.
  - 17) 堀田洋志, 田川泰久, 中楚洋介, 浅田勇人: デッキプレートを用いた合成梁における頭付きスタッドの押抜き試験 太径スタッドの配置と突出長さの力学性状への影響 その2, 日本建築学会学術講演梗概集 構造Ⅲ, 857-858, 2012年9月.
  - 18) 竹下和彦, 駿河良司, 田川泰久: デッキプレート付スラブに埋込まれた頭付スタッドの押抜き試験 その3. 貫通溶接で高強度コンクリートの場合, 日本建築学会学術講演梗概集 構造Ⅲ, 525-526, 1996年9月.
  - 19) 駿河良司, 尾形素臣, 井上一朗, 田川泰久: 頭付きスタッド押抜き試験の標準化に関する実験 デッキ貫通溶接の場合, 日本建築学会学術講演梗概集 構造Ⅲ, 855-856, 1995年8月.
  - 20) 巖詰煥, 井上一朗, 辻岡静雄, 新居努: 高強度スタッドの力学的諸特性について, 建築学会大会学術講演梗概集 構造系, 1377-1378, 1989年10月.
  - 21) 左藤有二, 日野伸一, 太田俊昭, 田村一美: 超軽量コンクリートを用いた鋼・コンクリート合成部材の力学特性, コンクリート工学年次論文報告集 VOL21, NO.3, 2000年.
  - 22) 渡部誠二, 島弘: 頭付きスタッドのせん断力-ずれ変位関係に関する実験的研究 コンクリート工学年次論文集, VOL30, NO.3, 1333-1338, 2008年.
  - 23) 今川雄亮, 大山理, 栗田章光: 火災時および火災後におけるスタッドの力学特性, 土木学会論文集 A VOL66NO.2, 384-394, 2009年5月.
  - 24) 平野道勝, 友永久雄: 合成梁に関する実験的研究 その1 押し抜き試験, 日本建築学会学術講演梗概集, 1507-1508, 1972年10月.
  - 25) 友永久雄, 平野道勝: 合成梁に関する実験的研究(その3・押し抜き試験'72), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1551-1552, 1973年10月.
  - 26) 平野道勝, 穂積秀雄: 合成梁に関する実験的研究 その4 押し抜き試験'73, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1085-1086, 1974年10月.
  - 27) 平野道勝, 穂積秀雄, 吉川精夫: PC スラブを鋼梁に接合するスタッド・コネクタの押抜き試験, 日本建築学会学術講演梗概集 構造 52, 1293-1294, 1977年10月.
  - 28) 平野道勝, 石川孝重: スタッドコネクタの押し抜き実験 STUD 9Φを用いた場合, 日本建築学会研究報告集, 59, 233-236, 1981年.
  - 29) 佐藤和広, 井上一朗, 尾形素臣: 太径・高強度スタッドシアコネクタの押抜き試験(1), 日本建築学会学術講演梗概集 構造Ⅱ, 1677-1678, 1991年9月.
  - 30) 村上聖, 江良弘樹, 坂井廣道, 中村守康: 炭

- 素繊維補強コンクリートと H 型鋼の合成パネルの曲げ載荷試験(その 3)(構造), 日本建築学会九州支部研究報告第 33 号, 381-384, 1992 年 3 月.
- 31) 松久勝也, 井上一朗, 尾形素臣: 高強度スタッドの開発研究, 建築学会大会学術講演梗概集構造系, 1785-1786, 1992 年 8 月.
  - 32) 保坂鐵矢, 中村俊一, 西海健二: 鋼管桁の曲げ耐力および RC 床版とのずれ止めに関する実験的研究, 土木学会 構造工学論文集 VOL.43A, 1301-1312, 1997 年 3 月.
  - 33) 小林潔, 平城弘一, 祝賢治, 笠間慈弘: 拘束を受けるコンクリート内に埋め込まれたスタッドの静的強度に関する実験的研究, 鋼構造論文集第 7 巻第 27 号, 59-70, 2000 年 9 月.
  - 34) 大久保宣人, 小松恵一, 石原靖弘, 栗田章光, 中島星佳: グループ配置したスタッドの押抜き試験, 土木学会第 56 回年次学術講演会, 100-101, 2001 年.
  - 35) 笠井裕次, 河村哲男, 大下英吉: スタッド付き鋼・コンクリート界面の付着性状に及ぼす側圧効果の影響に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 13 巻第 2 号, 1-13, 2002 年 5 月.
  - 36) 吉武謙二, 前孝一, 小川晃, 大崎雄作, 磯田和彦: 土留め壁の H 形鋼芯材を本体利用した合成壁のシアコネクタに関する押抜き試験, 清水建設研究報告, 第 82 号, 32-41, 2002 年 10 月.
  - 37) 中島章典, 木下幸治, 斉木功, ミヤーMD コシユール, 大江浩一, 酒井吉永: 両振り載荷によるスタッドの静的および疲労強度, 鋼構造論文集第 10 巻第 37 号, 31-41, 2003 年 3 月.
  - 38) 澤大輔, 中村定明, 池尾良一, 平城弘一: スパイラル筋によって補強された高強度スタッドジベル接合部のせん断耐荷力, コンクリート工学年次論文集, VOL26, NO.2, 1441-1446, 2004 年.
  - 39) 安田聡, 道越真太郎, 小林裕, 成原弘之: 高温における頭付きスタッドのせん断耐力に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演論文集 73, 第 630 号, 1417-1423, 2008 年 8 月.
  - 40) 山本真気, 木部謙吾, 大山理, 大久保宣人, 栗田章光: 二重合成 2 主 I 桁橋の下コンクリート床版におけるスタッドの設計法, 土木学会 構造工学論文集 VOL55A, 1102-1113, 2009 年 3 月.
  - 41) 大島義信, 小木崇広, 杉浦邦征, 服部篤史, 河野広隆, 利根川太郎: ずれ止め構造の拘束効果に関する基礎的研究, 土木学会 構造工学論文集 VOL.55A, 1122-1129, 2009 年 3 月.
  - 42) 島弘: 頭付きスタッドのせん断力とずれ変位およびスタッド軸方向挙動との関係に及ぼす試験方法の影響, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), VOL.67, NO.2, 307-319, 2011 年.
  - 43) 大山理, 栗田章光: 二重合成 2 主 I 桁橋の下コンクリート床版に配置された鉛直および水平スタッドの静的および疲労挙動に関する研究, 土木学会 構造工学論文集 VOL57A, 978-986, 2011 年 3 月.
  - 44) 大城壮司, 上條崇, 奥井義昭, 長井正嗣: プレキャスト床版連続合成桁のずれ止めに関する実験および解析, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), VOL68, NO.2, 331-346, 2012 年.
  - 45) 渡邊裕人, 中島章典, 橋本昌利: 頭付きスタッドの新しい押抜き試験方法の検証実験, 第 39 回土木学会関東支部技術研究発表会, I-47, 2012 年.
  - 46) 永尾和夫, 中島章典, 渡瀬博, 原健悟: コンクリート床版箱抜き部とモルタル層を用いた頭付きスタッド押抜き試験体の押抜き性状, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 27-28, 2013 年.
  - 47) 渡辺遼, 牧剛史: 持続的荷重を受けるスタッド接合部の力学特性に関する研究, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 25-26, 2013 年.
  - 48) 堀田洋志, 田川泰久, 加納和麻: デッキプレートを用いた合成梁における頭付きスタッドの押抜き試験 - 太径スタッドの突出長さによる変形状態への影響その 1, 日本建築学会学術講演梗概集, 1181-1182, 2013 年 8 月.
  - 49) 堀田洋志, 田川泰久, 加納和麻: デッキプレートを用いた合成梁における頭付きスタッドの押抜き試験 - 太径スタッドの突出長さによる変形状態への影響その 2, 日本建築学会学術講演梗概集, 1183-1184, 2013 年 8 月.
  - 50) 田川泰久, 加納和麻, 山口千尋, 今村しおり: デッキプレートを用いた合成梁における

- 頭付きスタッドの押抜き試験 太径スタッドのせん断耐力評価に関する一提案 その 1, 日本建築学会学術講演梗概集 構造Ⅲ, 899-900, 2014年9月.
- 51) 加納和麻, 田川泰久, 山口千尋, 今村しおり: デッキプレートを用いた合成梁における頭付きスタッドの押抜き試験 太径スタッドのせん断耐力評価に関する一提案 その 2, 日本建築学会学術講演梗概集 構造Ⅲ, 901-902, 2014年9月.
- 52) 平陽兵, 渡辺忠朋, 齊藤成彦, 溝江慶久, 島弘, 中島章典: 制御されたせん断力と軸方向圧縮力を受ける頭付きスタッドのせん断耐力とせん断力 - ずれ変位関係土木学会論文集 A1(構造・地震工学), VOL.71, NO.5, II 69-II 80, 2014年.
- 53) 大谷恭弘, 石川孝重, 渡部健太, 佐々木一明, 稲本晃士, 内海祥人: 太径 $\Phi 25$  頭付きスタッドの押抜きせん断実験と強度評価, 日本建築学会学術講演梗概集, 1375-1376, 2014年9月.
- 54) 大谷恭弘, 中島章典, 渡部健太, 佐々木一明, 稲本晃士, 内海祥人: 軸径 25MM頭付きスタッドの押抜きせん断強度性状土木学会第 69 回年次学術講演会, 13-14, 2014年9月.
- 55) 栄真堂, 大谷恭弘, 仲地健二郎, 佐々木一明, 尾籠秀樹, 内海祥人: 太径 $\Phi 25$  頭付きスタッドの押抜きせん断実験と強度評価(その 2) - 埋め込み長さの影響, 日本建築学会学術講演梗概集, 1369-1370, 2015年9月.
- 56) 高橋良輔, 齊藤成彦, 中島章典, 島弘: 単純支持と開き止めを併用した押抜き試験における頭付きスタッドの耐荷挙動, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), VOL.71, NO.1, 113-127, 2015年.

