

高強度スタッドジベルの耐荷力向上に及ぼす 縁端距離の影響とスパイラル鉄筋の効果

Effects of Edge Distance and Confined Spiral Reinforcement for Shear Strength of High Strength Headed Stud

澤 大 輔 ピーシー橋梁株式会社本社技術部 主任研究員
中 村 定 明 ピーシー橋梁株式会社本社技術部 主任研究員 技術士（建設部門）

本研究では、ずれ止めに高強度スタッドを用いた場合、スタッドからの縁端距離がせん断耐荷力に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、高強度スタッドの静的な押抜き試験を実施した。さらに、縁端距離が小さい場合の補強方法としてスパイラル筋を配置することを提案し、その有効性を実験的に検討した。その結果、縁端距離が 70 mm までの範囲では、縁端距離に伴い最大せん断耐荷力が増加した。また、縁端距離が同じ場合、スパイラル筋有りの最大せん断耐荷力は、スパイラル筋無しに対して 15% 程度増強できる結果となった。

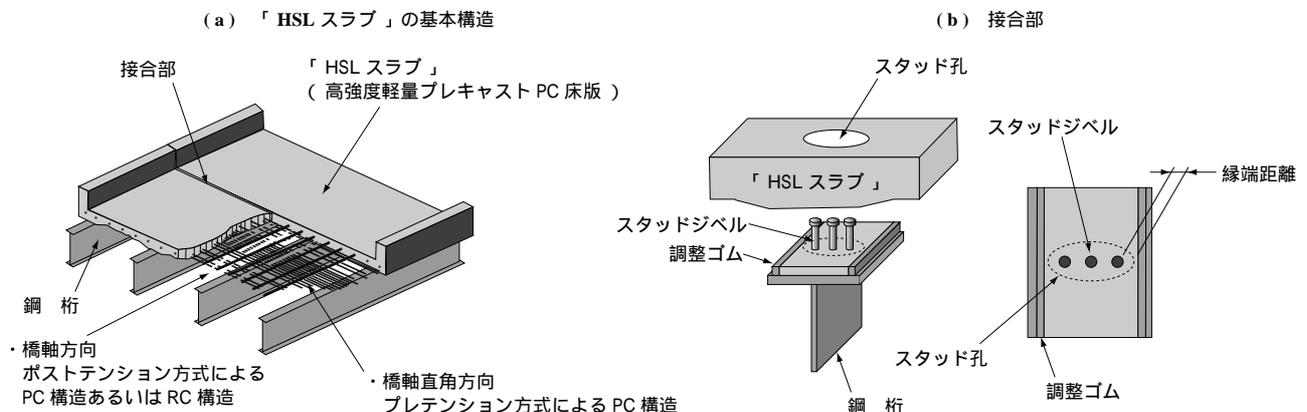
In this study, push-out tests were conducted to reveal the effect of edge distance to influence the shear strength of high strength stud dowels. Moreover, a reinforcing method is proposed using spiral bars, and the effects of the reinforcement verified. The maximum shear strength without spiral reinforcement increased in proportion to the edge distance. The maximum shear strength with spiral reinforcement was 1.15 times without spiral reinforcement.

1. 結 言

近年、鋼合成桁橋において、鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）の損傷によって、補修・補強が必要となった事例が多数報告されている⁽¹⁾。ピーシー橋梁株式会社では、石川島建材工業株式会社と共同で道路橋床版の取換補修をターゲットにした高強度軽量プレキャストプレストレストコンクリート床版（以下、「HSL スラブ」）を開発してきた（第 1 図）⁽²⁾。「HSL スラブ」は、従来のプレキャストプレストレストコンクリート床版（以下、プレキャスト PC 床版）に比べ重量を約 20% 減少できる。また、各

種性能試験から曲げモーメントおよび押抜きせん断力に対する耐荷力や疲労耐久性に優れていることが確認されており⁽²⁾、今後、取換補修用床版として主力製品となることが期待される。

しかし、「HSL スラブ」を含むプレキャスト PC 床版を鋼合成桁に適用する場合、端支点および中間支点上にはずれ止めとして多数のスタッドが配置されるため、横締め PC 鋼材とスタッド孔とが干渉する。そのため、これまでは場所打ち RC 床版や合成床版で対応することが多く、プレキャスト PC 床版の高品質、高耐久性および工期短縮といった特長を十分活かしているとはいえない。この対策として、



第 1 図 「HSL スラブ」
Fig. 1 HSL Slab (High Strength Lightweight precast prestressed concrete Slab)

高強度スタッドを採用することによってスタッド本数を減少させることが考えられる⁽³⁾。

高強度スタッドの性能を發揮させるためには、高強度スタッドの降伏よりも先にコンクリートの支圧破壊が生じないようにする必要がある。しかしながら、取換補修の場合には、縁端距離を十分確保できない場合もあり、最大せん断耐力に達するまでにスタッド側面のコンクリート（モルタル）が欠け落ち、せん断耐荷力が低下することが考えられる⁽⁴⁾。

そこで本研究では、高強度スタッドのせん断耐荷性能が發揮できる合理的な設計を行うために、縁端距離がせん断耐荷力に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、高強度スタッドの押抜き試験を実施した。さらに、縁端距離が小さい場合の補強方法としてスパイラル筋を配置することを提案し、その有効性を実験的に検討した。

2. スタッドの押抜き試験

2.1 供試体

供試体一覧を第1表に示す。実験パラメータは表中に示す四つ（荷重方法：単調・漸増，縁端距離 e : 30・50・70 mm，スパイラル筋：無し・粗・密，コンクリート種別：普

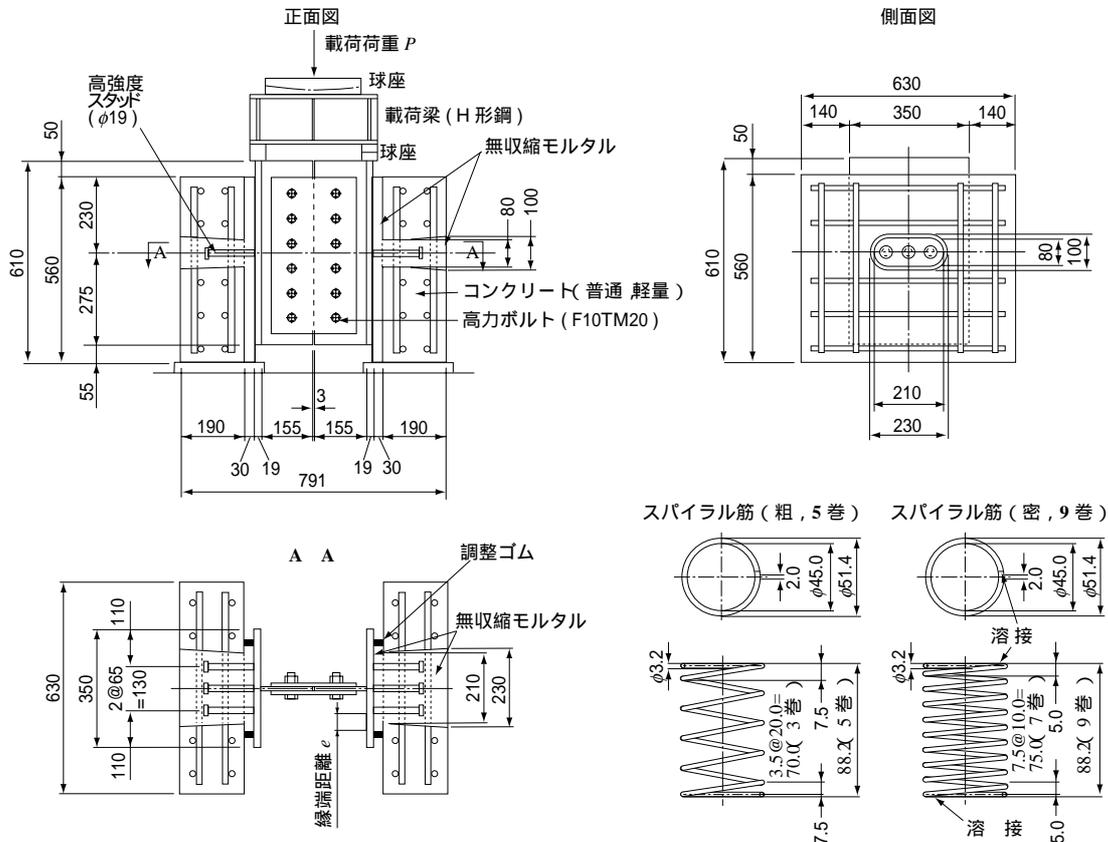
第1表 供試体一覧
Table 1 Specimens

シリーズ	供試体名*1	荷重方法	コンクリート種別	縁端距離 e (mm)	スパイラル筋
シリーズ1	N-30-n-M1	単調	普通	30	無し
	N-30-n-M2				
	N-30-n-C	漸増			
シリーズ2	L-30-n-M	単調	軽量	30	無し
	L-30-n-C	漸増			
シリーズ3	N-30-s'-M1	単調	普通	30	粗*2
	N-30-s-M2				密*2
	N-30-s-C	漸増			密
シリーズ4	N-50-n-M	単調	普通	50	無し
	N-50-n-C	漸増			密
シリーズ5	N-50-s-M	単調	普通	50	無し
	N-50-s-C	漸増			密
シリーズ6	N-70-n-M	単調	普通	70	無し
	N-70-n-C	漸増			密
シリーズ7	N-70-s-M	単調	普通	70	無し
	N-70-s-C	漸増			密

(注) *1: N: 普通コンクリート, L: 軽量コンクリート
n: スパイラル筋無し, s: スパイラル筋(密)
s': スパイラル筋(粗), M: 単調荷重, C: 漸増荷重
*2: スパイラル筋溶接無し

通・軽量)とする。

供試体形状を第2図に示す。供試体のコンクリート床版は、あらかじめプレキャスト部材(以下、PCa版)として



第2図 供試体およびスパイラル筋の形状 (単位: mm)
Fig. 2 Form of specimens and spiral reinforcement (unit: mm)

製作し、鋼主桁の両側に配置後、スタッド孔に無収縮モルタルを後打ちして鋼部材と一体化させた。スタッドは、すべて軸径 $d = 19 \text{ mm}$ 、スタッド高 $H = 150 \text{ mm}$ 、材質 HT570 の高強度鋼材を 65 mm ピッチで 3 本配置した。なお本研究では、高強度鋼材の頭部に六角ナットを二つ取り付けたものを頭付き高強度スタッドとして用いた。スパイラル筋は、第 2 図に示す 2 種類のものを使用し、両側のスタッド 2 本のみに配置した（第 3 図）。また、スパイラル筋には、両方の素線端部と 1 周後の素線とを溶接し、拘束効果の向上を図った。

第 2 表に今回使用した各種材料の強度および材料特性を示す。スタッドと H 形鋼の溶接については供試体製作前に溶接性能確認試験を行い、高強度スタッドと H 形鋼との間に変状が無いことを確認した。

2.2 載荷方法

各シリーズに対して単調載荷と漸増載荷で試験を行った（第 4 図）。単調載荷試験では、荷重制御で 10 kN ごとに計



第 3 図 スパイラル筋の配置（9巻）
Fig. 3 Arrangements of spiral reinforcement

第 2 表 材料特性
Table 2 Material properties

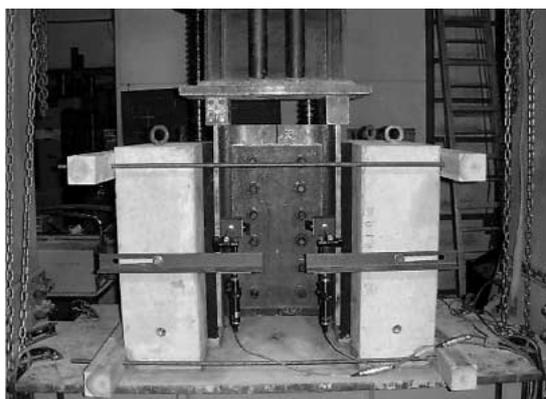
(a) コンクリートおよびモルタル

	σ_c (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)
普通コンクリート	52.4	3.2	31.9×10^3
軽量コンクリート	54.4	2.2	23.2×10^3
無収縮モルタル	71.3	-	26.6×10^3

(b) 鋼材

	材 質	σ_y^* (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	Δl (%)	E_s (N/mm ²)
スタッド	HT570	486	600	24	200×10^3
H形鋼	SS400	289	456	31	200×10^3
スパイラル筋	SS400	585	629	18	200×10^3

(注) * : 降伏点は 0.2 % 耐力とする



第 4 図 載荷試験状況
Fig. 4 Set up of specimen

測を行い、変位 2 mm 程度に達したのち、変位制御に切り替えて 0.2 mm ピッチで計測を行った。漸増載荷試験では、荷重制御で 20 kN 増分ごとに載荷・除荷を繰り返し、変位が 2 mm 程度に達した以降は変位制御に切り替え、0.5 mm ピッチで計測を行った。なお、載荷中に H 形鋼と PCa 版が開き、スタッド基部に二次的なモーメントが生じないようにするため、供試体の上下にボルトとひのき材の開き止めを設置した。

3. 押抜き試験結果および考察

第 3 表に試験結果一覧を、第 5 図にせん断力 - 変位関係（以下、 $Q - \delta$ 曲線）を示す。同図の左側にはスパイラル筋の無い一般的なシリーズ 1, 4, 6 を、右側にはスパイラル筋を有するシリーズ 3, 5, 7 の結果を示している。

3.1 載荷方法による影響

第 3 表から、各シリーズにおける降伏せん断耐力および最大せん断耐力は漸増載荷供試体の方が単調載荷のものよりも低くなる傾向がみられる。最大せん断耐力に着目すると単調荷重に対する漸増荷重の比率は、スパイラル筋無し（シリーズ 1, 4, 6）で 0.77 ~ 0.89（平均 0.81）、スパイラル筋有り（シリーズ 3, 5, 7）で 0.82 ~ 0.98（平均 0.93）であった。実験中には、せん断力が 80 ~ 100 kN/本に達したときに小さな音が確認され、第 5 図に示すとおり、スパイラル筋無しの場合、漸増載荷のせん断力は約 80 kN/本を超えたあたりから単調載荷に比べてずれ剛性が低下した。

これらの要因として、漸増載荷の場合、荷重の繰返しによる H 形鋼とコンクリートのすべりおよびスタッド周辺のモルタルの局部ひび割れに対し、スパイラル筋有りの場合には、スパイラル筋の拘束効果によってモルタル部のずれおよび局部ひび割れの進展が抑制されたと考えられる。一方、スパイラル筋無しの場合には、その効果が無いためス

第3表 押抜き試験結果
Table 3 Test results

シリーズ	供試体	Q_y (kN/本)	δ_y (mm)	Q_{max} (kN/本)	δ_{max} (mm)	K_{st}^0 (kN/mm)
シリーズ1	N-30-n-M1	100.7	0.64	165.8	6.08	231.5
	N-30-n-M2	93.3	0.59	136.2	7.12	237.8
	N-30-n-C	90.2	0.65	134.2	2.64	199.2
	漸増/単調	0.93	1.06	0.89	-	0.85
シリーズ2	L-30-n-M	99.1	0.70	154.3	6.48	200.2
	N-30-n-C	95.0	0.65	135.5	2.13	211.7
シリーズ3	漸増/単調	0.96	0.92	0.88	-	1.06
	N-30-s'-M1	118.4	0.87	151.2	5.77	176.5
	N-30-s-M2	104.3	0.80	166.7	5.80	172.7
	N-30-s-C	96.6	0.61	155.5	5.38	233.4
シリーズ4	漸増/単調	0.87	0.73	0.98	0.93	1.34
	N-50-n-M	99.1	0.70	154.3	6.48	200.2
	N-50-n-C	73.2	0.54	118.3	7.46	217.1
	漸増/単調	0.74	0.77	0.77	1.15	1.08
シリーズ5	N-50-s-M	102.1	0.70	183.8	6.23	204.5
	N-50-s-C	92.1	0.59	150.8	7.37	235.9
	漸増/単調	0.90	0.84	0.82	1.18	1.15
シリーズ6	N-70-n-M	105.1	0.68	176.0	6.10	217.7
	N-70-n-C	90.8	0.60	134.7	5.07	227.6
	漸増/単調	0.86	0.88	0.77	0.83	1.05
シリーズ7	N-70-s-M	109.2	0.69	169.3	6.50	224.1
	N-70-s-C	100.0	0.66	164.7	4.00	215.8
	漸増/単調	0.92	0.96	0.98	0.62	0.96

(注) Q_y : 降伏せん断耐力, δ_y : 降伏時のずれ量
 Q_{max} : 最大せん断耐力, δ_{max} : 最大ずれ量, K_{st}^0 : ずれ定数
 なお, 記号の定義は JSSC の押抜き試験方法(案)に基づいている。
 また, 漸増/単調の計算は, 2 体以上の場合は平均値を示す。

スタッドの変形によってモルタル部分が押され, モルタル部分と PCa 版とのずれ(付着切れ)が生じたと考えられる。

3.2 スパイラル筋による補強効果と縁端距離の影響

スパイラル筋が粗なもの(5巻)と密なもの(9巻)の $Q-\delta$ 曲線を第5図-(b)に示す。スパイラル筋が粗な N-30-s'-M1 は, せん断力が 125 kN/本を超えたあたりからスパイラル筋が密な N-30-s-M2 よりもずれが大きくなった。両者の最大せん断耐力を比較すると, N-30-s-M2 は N-30-s'-M1 の約 1.1 倍となり, スパイラル筋が密な方が高くなった。また, 第6図にスパイラル筋の変形を示す。この図からスパイラル筋が粗なものは, 密なものに比べ大きく分かれていることが分かる。

以上のことから, スパイラル筋を密にすることによって, 特にスタッド周辺部における基部の拘束効果が高められ最大せん断耐力が高くなったと考えられる。

(1) 降伏せん断耐力 (Q_y)

降伏せん断耐力は, JSSC の頭付きスタッドの押

抜き試験方法(案)⁽⁵⁾に準じ $Q-\delta$ 曲線から 0.2 mm オフセット法を用いて算出した。第7図に普通コンクリート PCa 版におけるせん断耐力と縁端距離との関係を示す。図中の \bullet はスパイラル筋無しを, \circ はスパイラル筋有りを示す。同図から確認できるとおり, 降伏せん断耐力は約 100 kN/本でほぼ一定になっており, 縁端距離およびスパイラル筋の有無による影響はみられなかった。また, この結果は, いずれも第二名神高速道路「員弁川橋」の実験式⁽⁶⁾の値とほぼ同等の結果となった。これは, 降伏せん断耐力レベルでは顕著なひび割れが生じておらず, コンクリートだけで抵抗しているため, スパイラル筋の拘束効果の影響が低いものと考えられる。

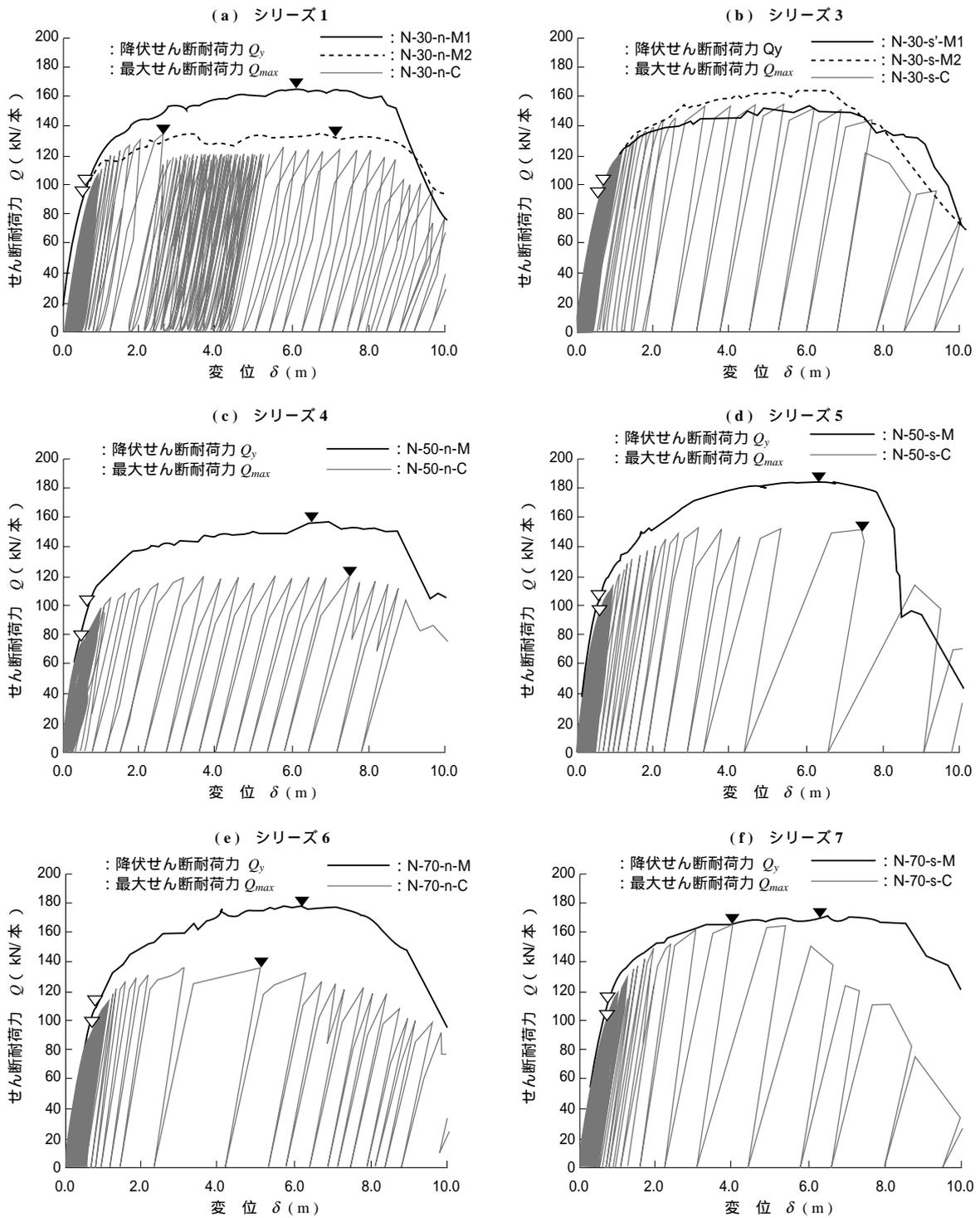
(2) 最大せん断耐力 (Q_{max})

第7図から, 縁端距離が小さい(30~50 mm)場合, 最大せん断耐力と縁端距離の間には線形関係がみられ, 縁端距離を確保することに伴い最大せん断耐力が増大していることが確認できる。縁端距離が 50~70 mm では, スパイラル筋無しの場合, 縁端距離 70 mm でスタッドの引張強度レベルに達した。一方, スパイラル筋有りの場合には, 縁端距離 50 mm でスタッドの引張強度レベルになり, 縁端距離をそれ以上確保しても最大せん断耐力はスタッドの引張強度レベルを大きく上回ることはなかった。換言すると, スパイラル筋無しの場合には縁端距離を 70 mm 以上, スパイラル筋有りの場合には縁端距離を 50 mm 以上確保すれば, 最大せん断耐力は縁端距離の影響は小さく, スタッド自身の強度特性までせん断耐力性能を発揮できると考えられる。また, スパイラル筋の有無に着目すると, スパイラル筋有りのせん断耐力は, スパイラル筋無しに対して約 15%大きくなった。

3.3 コンクリート種別の影響

PCa 版に普通コンクリート(シリーズ1)と軽量コンクリート(シリーズ2)を用いた場合の比較を第4表に示す。なお, 漸増載荷試験における PCa 版とモルタル間との接合面の付着切れによる影響を無視するため, 表中の値は単調載荷試験結果のみを用いている。

この表から明らかなように, 普通コンクリートに対する軽量コンクリートの比率は, 降伏せん断耐力および最大せん断耐力の両方において 102%となり, PCa 版のコンクリート種別がせん断耐力に及ぼす影響は少なかった。一方, ずれ定数は, PCa 版に軽量コンクリートを用いた場



第 5 図 $Q - \delta$ 曲線
Fig. 5 Shear force vs. slip curves

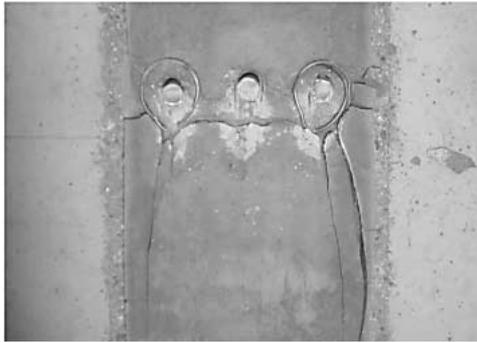
合、普通コンクリートを用いたものに対して 85%と小さくなった。これは、PCa 版に用いた軽量コンクリートのヤング係数が普通コンクリートのヤング係数よりも小さいことに起因していると考えられる。

つまり、せん断耐力はスタッドから支圧を受けるモルタルの圧縮強度によって決まり、変形に対してはモルタルと PCa 版に起因した全体的な挙動になっていると考えられる。

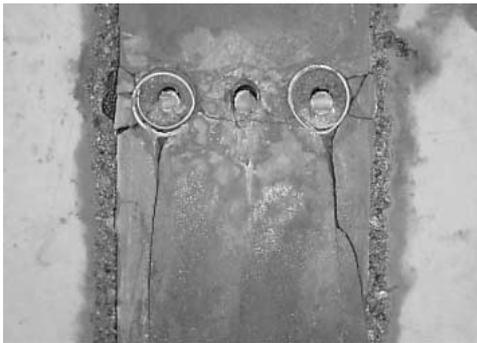
3.4 考 察

以上の実験結果から、高強度スタッドとスパイラル筋を組合せた接合構造とすることによって、スタッド周辺のモルタルが補強され、最大せん断耐力の向上を図れることが明らかとなった。ここでは、実験結果ならびにモルタル部の破壊面の状況から、PCa 版を用いた場合の接合部の耐力挙動とスパイラル筋による最大せん断耐力の増大につ

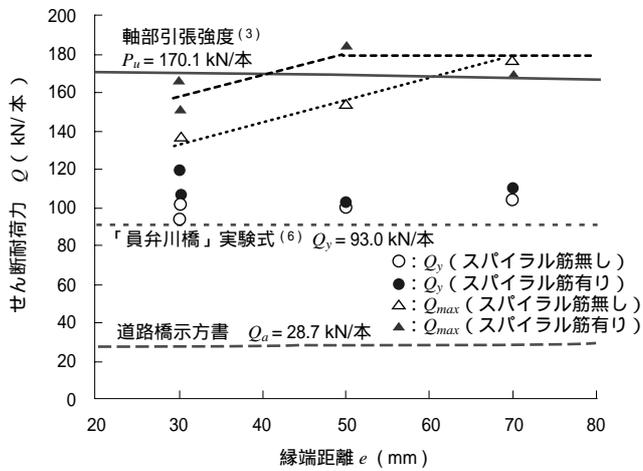
(a) スパイラル筋(粗): N30-s¹-M1



(b) スパイラル筋(密): N30-s²-M2



第6図 スパイラル筋の損傷状況
Fig. 6 Failure condition of spiral reinforcement



第7図 スパイラル筋および縁端距離がせん断耐力に及ぼす影響
Fig. 7 Effects of spiral reinforcement and edge distance for shear strength of high strength studs

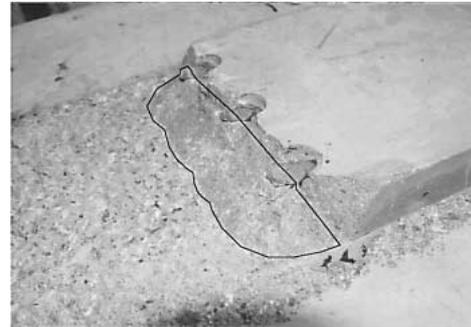
第4表 コンクリート種別による比較
Table 4 Comparison of concrete type

シリーズ	供試体	Q_y (kN/本)	δ_y (mm)	Q_{max} (kN/本)	δ_{max} (mm)	K_{st}^0 (kN/mm)
シリーズ1	N-30-n-M1	100.7	0.64	165.8	6.08	231.5
	N-30-n-M2	93.3	0.59	136.2	7.12	237.8
	平均	97.0	0.62	151.0	6.60	234.7
シリーズ2	L-30-n-M	99.1	0.70	154.3	6.48	200.2
比(シリーズ2/シリーズ1)		1.02	1.13	1.02	0.98	0.85

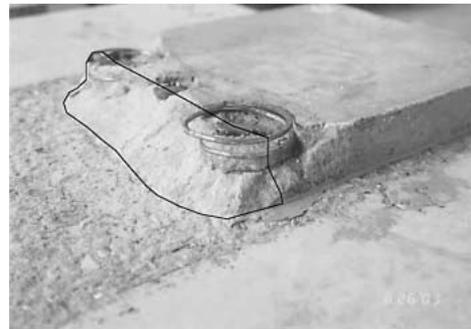
いて考察を試みる。

第8図に破壊状況を示す。本実験のようにPCa版形式の供試体の破壊面には、従来の場所打ちコンクリートを想定した供試体とは異なり、モルタル部にコーン状の破壊面が形成されている。このコーンは、第9図に示す概念図のとおりモルタル部分の支圧力に起因したPCa版とモルタル

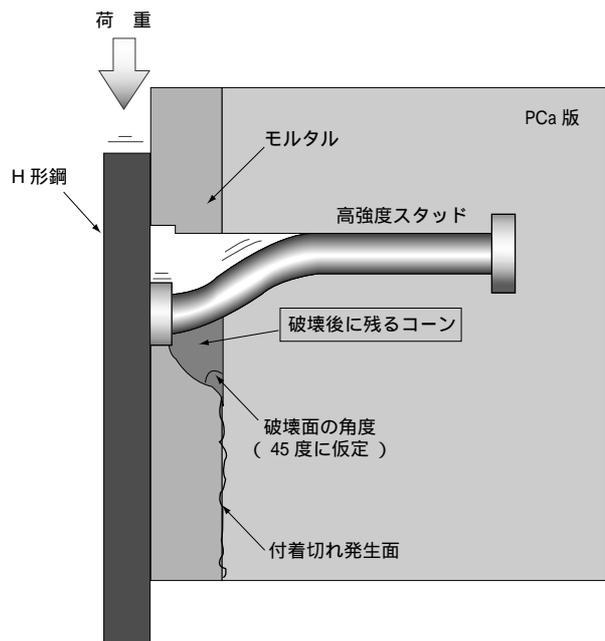
(a) スパイラル筋無し(例: N-50-n-M)



(b) スパイラル筋有り(例: N-50-s-M)



第8図 破壊状況
Fig. 8 Failure condition



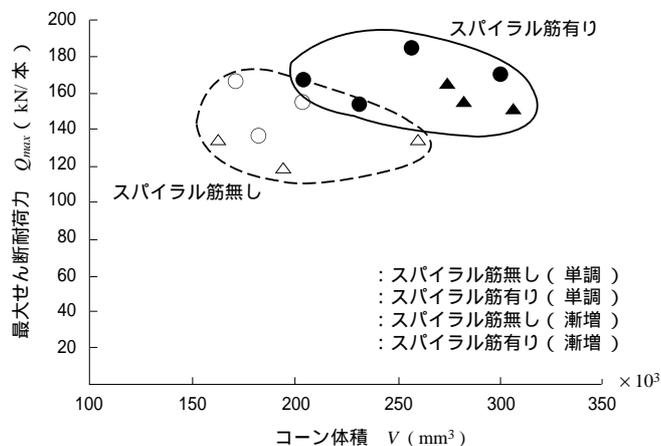
第9図 破壊時の概念図
Fig. 9 Failure image

ル間のせん断力によって付着切れが生じたため、PCa 版にまで達することなく、モルタル部分に形成されたものと考えられる。また、スパイラル筋の有無によるコーン形状を比較すると、スパイラル筋無しの場合には、コーン上側の半径（PCa 版側の半径）がほぼスタッド半径となっているのに対し、スパイラル筋有りの場合には、スパイラル筋付近まで広がっている。これは、スパイラル筋の拘束効果によってスタッド周辺におけるモルタル部分の局部的なひび割れの進展を抑制し、破壊に至るまでスパイラル筋内のモルタルが一体とならずれ止め寄与したためと考えられる。

ここで、コーン体積に着目し、最大せん断耐荷力とコーン体積との関係を第 10 図に示す。コーン体積は、スタッド中心からの各投影半径と破壊面角度を 45 度と仮定して得られる高さから算出した。この図から、スパイラル筋を有する場合には破壊面のコーン体積が大きくなっていることが確認できる。データ数が少ないため、定量的な結果を導くには至っていないが、この体積を大きくすることが最大せん断耐荷力の増加につながっていると考えられる。このせん断耐荷メカニズムについては、今後検討を加えていく予定である。

4. 結 言

本研究では、縁端距離がせん断耐荷力に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、高強度スタッドの押抜き試験を実施した。さらに、縁端距離が小さい場合の補強方法としてスパイラル筋を配置することを提案し、その有効性を実験的に検討した。以下に、本研究で得られた知見を示す。



第 10 図 最大せん断耐荷力とコーン体積の関係

Fig. 10 Relationship between maximum shear strength and cone volume

- (1) 縁端距離を 30 mm 以上確保すれば、降伏時のせん断耐荷力は、縁端距離およびスパイラル筋の有無による影響を受けなかった。
- (2) スパイラル筋無しの最大せん断耐荷力は、縁端距離に比例して増大し、縁端距離を 70 mm 以上確保すれば、せん断耐荷力をスタッドの引張強度レベルまで発揮できた。
- (3) スパイラル筋で補強すると、縁端距離が 30 ~ 50 mm のせん断耐荷力は、縁端距離に比例して増大し、スパイラル筋無しに対して最大せん断耐荷力を 15%程度高めることができた。さらに、縁端距離を 50 mm 以上確保すれば、せん断耐荷力をスタッドの引張強度レベルまで発揮できた。
- (4) PCa 版に軽量コンクリートを用いても、降伏および最大せん断耐荷力は、普通コンクリートを用いた場合と有意な差はみられなかった。一方、ずれ定数は、軽量コンクリートの方が普通コンクリートの 85%と低い値になった。
- (5) スパイラル筋を有する場合、破壊面に形成されるコーン体積は大きくなり、最大せん断耐荷力とコーン体積に相関性がみられた。

謝 辞

本研究は、ピーシー橋梁株式会社、日本スタッドウェルディング株式会社、摂南大学（平城弘一助教授）の共同研究をまとめたものである。本研究を行うに当たりピーシー橋梁株式会社試験センター小林氏はじめ関係各位にはご尽力いただいた。また実験を行うに当たり、摂南大学 4 年生の尾形君、古主君には多大なるご協力をいただいた。関係各位に対し、ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 建設省土木研究所：土木研究所資料 橋梁損傷事例写真集 土木研究所資料第 2652 号 1988 年 pp.70 - 80
- (2) 財団法人土木研究センター：技術審査証明報告書（建技審証第 0313 号）道路橋 RC 床版取換用高強度軽量プレキャスト PC 床版「HSL スラブ」 2003 年 11 月
- (3) 井上一朗，尾形素臣，松井繁之：高強度頭付きスタッドの開発の一例 JSSC テクニカルレポート No.35 1996 年 11 月 pp.95 - 98

- (4) Taylor, R. et al. : Investigation on the use of deep hunches in composite construction Proceedings, The Institution of Civil Engineers Vol.47 (1970.9)
- (5) 社団法人日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法（案）とスタッドに関する研究の現状 JSSC テクニカルレポート No.35 1996 年 11 月

pp.16 - 17

- (6) 水口和之,小松秀樹,松野 進,小野辺良一,倉田幸宏：プレキャスト PC 床版用のスタッドの強度特性に関する解析的検討 員弁川橋 土木学会第 54 回年次学術講演会概要集 1A 1999 年 9 月 pp.310 - 311