

頭付きスタッドのせん断耐荷力に及ぼす縁端距離の影響とスパイラル筋の補強効果

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

中村 定明* 澤 大輔* 池尾 良一** 平城 弘一***

Sada-aki NAKAMURA, Daisuke SAWA, Ryoichi IKEO, Hirokazu HIRAGI

* 工修 ピーシー橋梁(株) 本社技術部 (〒105-0004 東京都港区新橋 6-17-19)

** 日本スタッドウェルディング(株) 滋賀事業所 第2技術グループ (〒529-1422 滋賀県神崎郡五個荘町小幡 474)

*** 工博 摂南大学助教授 工学部都市環境システム工学科 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8)

In this study, push-out tests were conducted to reveal the effect of edge distance to influence shear strength of the high strength stud dowels. Moreover, authors proposed the reinforcing method using spiral bar, and the effects of the reinforcement were verified.

From the results, it was cleared that maximum shear strength without spiral reinforcement increases in proportion to the edge distance. The maximum shear strength with spiral reinforcement was 1.15 times without spiral reinforcement. In addition, if the minimum edge distance is more than 50mm, the maximum shear strength was decided by the tensile strength of the stud dowels.

KeyWords: push-out test, high strength stud, edge distance, spiral reinforcement

1. はじめに

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）の損傷により、補修・補強の必要となった事例が多数報告されている。損傷が激しい場合には、床版の取り換えが必要となる。RC床版に取り換える場合、現行の道路橋示方書（以下、道示）による活荷重に対応するため既設床版よりも床版厚を増やす必要があり、死荷重が増加することになる。これに対して、プレストレストコンクリート床版（以下、PC床版）は、RC床版に比べて床版厚を小さくでき、死荷重を軽減することが可能である。死荷重をさらに軽減させたい場合は、高強度軽量コンクリートを使用したPC床版の採用が有効である。また、通過交通に対する交通規制と迂回路確保の観点から、現場作業の省力化が図れるプレキャストPC床版は大いに期待できる。

しかし、鋼合成桁の床版としてプレキャストPC床版を適用する場合、端支点および中間支点付近ではスタッド孔と横締めPC鋼材との取り合いが問題となる。必要PC鋼材間隔を確保するためには、一般的にスタッド間隔は250mm以上必要となる。しかし、現行の道示に示されているスタッド（JIS B 1198）を使用した場合、支点上付近の通常スタッドの必要間隔は125mm程度となり、スタッド孔と横締めPC鋼材とが干渉するためプレキャストPC床版を適用することが困難となる。また、

既設桁の上フランジ幅に所定のスタッド本数を配置しなければならず、スタッドに十分な縁端距離が確保できない場合が生じる。これらの対策として、ずれ止めに高強度スタッド^{1),2)}を採用することによりスタッド本数を減少させる方法が考えられる。

高強度スタッドの性能を発揮させるためには、発生する支圧力に対してコンクリート側が十分に抵抗できることが前提となる。既往の研究では、最も一般的な二面せん断試験（押抜き試験）の場合、スタッドのせん断力をスタッド根元部のコンクリートブロック下面の支圧抵抗で受け持つことから、縁端距離の影響は少ないとされている³⁾。しかし、これは文献⁴⁾に示されているようなH形鋼のフランジ面に直接コンクリート床版が打設され、せん断耐荷挙動に影響しない部分までコンクリートがある標準的な供試体を用いた試験結果を対象にしている。それに対して、プレキャスト床版のように縁端距離が十分確保できない場合には、最大せん断耐荷力に達するまでにスタッド側面のコンクリートが欠け落ち、せん断耐荷力に影響を及ぼすことが考えられる⁵⁾。

そこで本研究では、床版の取り替えにプレキャスト床版を適用することを想定し、縁端距離がせん断耐荷挙動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タッド軸部周辺にスパイ

ラル筋を配置することを提案し、その補強効果についても検証した。

2. スタッドの押抜き試験

2.1 供試体

供試体一覧を表-1に示す。実験パラメータは表中に示す4つ（コンクリート種別：普通・軽量、縁端距離 e ：30mm・50mm・70mm、スパイラル筋：なし・粗・密、载荷方法：単調・漸増）とする。

供試体形状を図-1に示す。供試体は、H形鋼の両側にコンクリートブロックを配置したものである。

コンクリートブロック（以下、PCa版）は、あらかじめプレキャスト部材として製作し、スタッド孔から無収縮モルタルを後打ちして鋼部材と一体化させた。

一方、スタッドは全て軸径 $d=19\text{mm}$ 、スタッド高 $H=150\text{mm}$ 、材質 HT570 の高強度鋼材を1列に3本配置した。また、スパイラル筋は、図-1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（写真-1）。シリーズ5,7に使用するスパイラル筋の選定にあたっては、先行して N-30-s'-M1 と N-30-s-M2 の押抜き試験を行い、せん断耐力に対して補強効果が大きかった N-30-s-M2 のスパイラル筋（密）を用いることとした。また、スパイラル筋には、スパイラル筋の両端の1周目を溶接し、端部の拘束効果を高めた。

表-1 供試体一覧

シリーズ	供試体名※1	载荷方法	コンクリート種別	縁端距離 $e(\text{mm})$	スパイラル筋
シリーズ 1	N-30-n-M1	単調	普通	30	なし
	N-30-n-M2				
	N-30-n-C	漸増			
シリーズ 2	L-30-n-M	単調	軽量	30	なし
	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		50	なし
	N-50-n-C	漸増			
シリーズ 5	N-50-s-M	単調		50	密
	N-50-s-C	漸増			
シリーズ 6	N-70-n-M	単調		70	なし
	N-70-n-C	漸増			
シリーズ 7	N-70-s-M	単調		70	密
	N-70-s-C	漸増			

※1 記号：N：普通コンクリート、L：軽量コンクリート、
n：スパイラル筋なし、s：スパイラル筋（密）
s'：スパイラル筋（粗）、M：単調载荷、C：漸増载荷

※2 スパイラル筋溶接なし

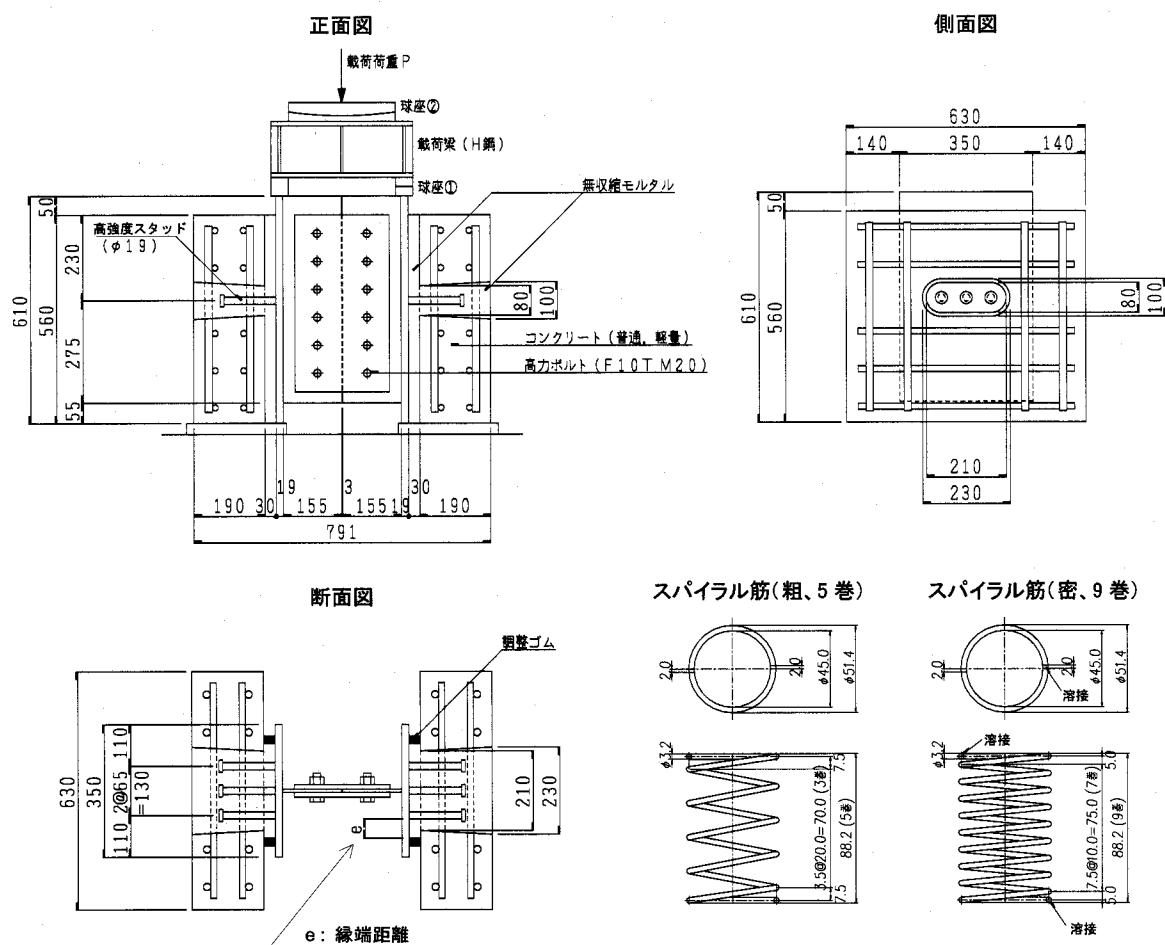


図-1 供試体およびスパイラル筋の形状

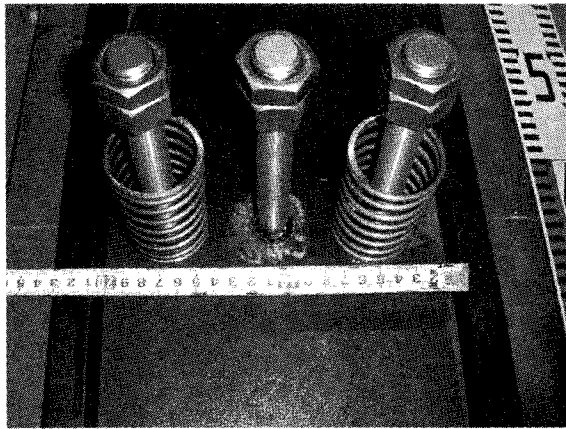


写真-1 スパイラル筋の配置 (9巻)

表-2 材料特性

(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

記号 σ_c :圧縮強度、 σ_t :割裂引張強度、 E_c :コンクリートのヤング係数

(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

記号 σ_y :降伏点(0.2%耐力)、 σ_u :引張強度、 Δl :伸び、 E_s :鋼材のヤング係数

表-2 に今回使用した各種材料の強度および変形特性を示す。なお、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

載荷試験状況を写真-2に示す。各シリーズに対して単調載荷と漸増載荷で試験を行う。

単調載荷試験では、荷重制御で10kNごとに計測を行い、変位が2mm程度に達したのち、変位制御に切り替えて0.2mmピッチで計測を行うこととした。

漸増載荷試験では、荷重制御で20kN増分ごとに載荷・除荷を繰り返して、変位2mm程度に達したのち変位制御に切り替え、原則0.5mmピッチで計測を行った。

なお、荷重載荷中においてH形鋼とPCa版とが開くことを防ぐため、供試体の上下にボルトとヒノキ材の開き止めを設置した。

3. 押抜き試験結果および考察

表-3に試験結果一覧を、図-2にせん断耐力-変位の関係(以下、Q- δ 曲線)を示す。

3.1 載荷荷重方法による影響

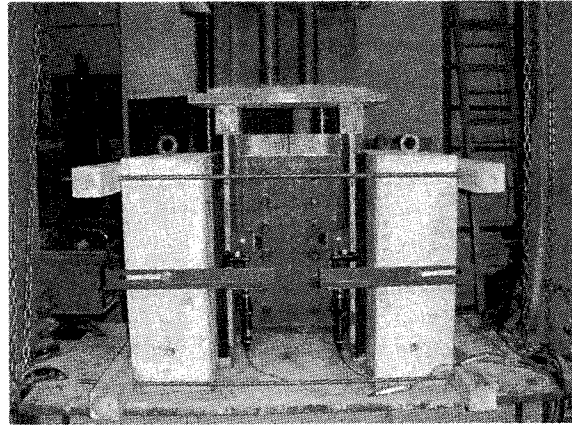


写真-2 載荷試験状況

表-3 押抜き試験結果

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
シリーズ 2	L-30-n-M	99.1	0.70	154.3	6.48	200.2
	L-30-n-C	95.0	0.65	135.5	2.13	211.7
シリーズ 3	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	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
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
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
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

記号 Q_y :降伏せん断耐力、 δ_y :降伏時ずれ量

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。

図-2の左側にはスパイラル筋のな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の結果を示す。

図-2より、スパイラル筋のない供試体の漸増載荷試験は、せん断力が約80kN/本を越えるあたりから単調載荷試験に比べられ剛性が全て低下していることが分かる。最大せん断耐力も、漸増載荷の結果は単調載荷の結果と比較して低い値となった。これらは、作用せん断力が80~100kN/本に達したときに、小さな音が確認されており、スタッド支圧側のPCa版と無収縮モルタルとの付着切れが生じたものと考えられる。

一方、スパイラル筋を有する供試体のQ- δ 曲線は、シリーズ5を除いて、載荷方法の違いによる影響はあまり見られなかった。これは、スパイラル筋によるコンファインド効果によってがPCa版とモルタルとの付着性能が増したためと考えられる。

3.2 スパラル筋によるスタッド周辺部への補強効果と縁端距離の影響

シリーズ3では、スパイラル筋の形状（巻数）がせん断耐荷挙動に及ぼす影響を検討するため、図-1に示す2種類のスパイラル筋を用いて実験を行った。

図-2(b)に両者の $Q-\delta$ 曲線の比較を示す。スパイラル筋が粗な N-30-s-M1 は、せん断力が 125kN/本を越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荷力を比較すると、N-30-s-M2 は N-30-s-M1 の 1.08 倍となり、スパイラル筋が密な方の最大せん断耐荷力が高くなっている。また、破壊面は、スパイラル筋が密な方がスパイラル筋内側モルタルの損傷度が軽微であった。スパイラル筋のコンフ

ァインド効果が高くスタッド周辺部が補強されることで、最大せん断耐荷力が高くなったと考えられる。

次に、普通コンクリート PCa 版においてスパイラル筋の有無と縁端距離がせん断耐荷挙動に及ぼす影響を図-3に示す。図中の○・△はスパイラル筋なしを、●・▲はスパイラル筋ありを示す。

(1) 降伏せん断耐荷力 (Q_y)

降伏せん断耐荷力は、JSSC の押抜き試験方法(案)³⁾ に定められている 0.2mm オフセット法により算出した。

表-3に示す通り、縁端距離およびスパイラル筋の有無に関わらず、100kN/本程度でほぼ一定になっている。こ

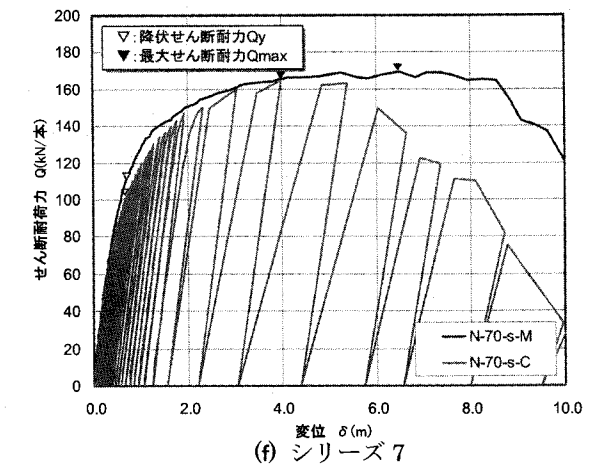
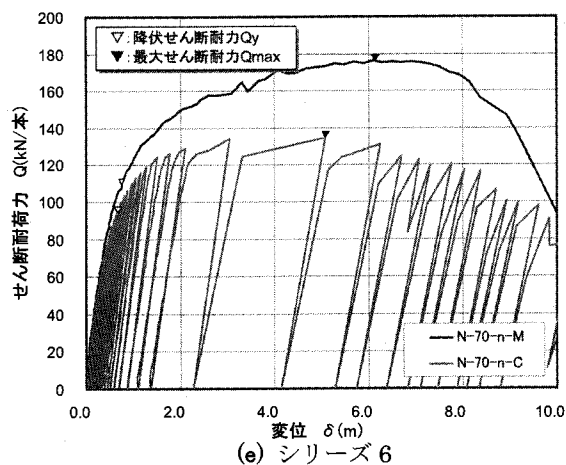
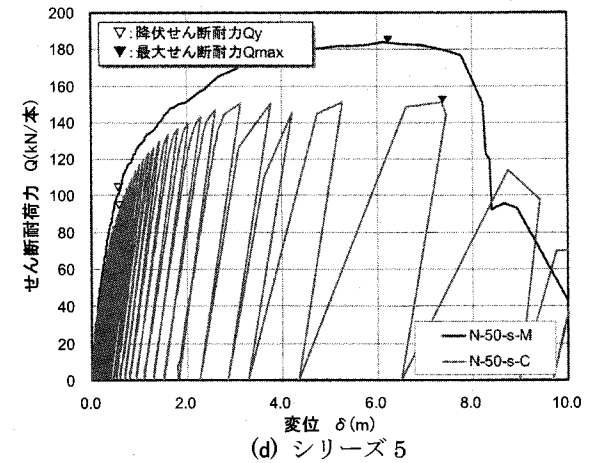
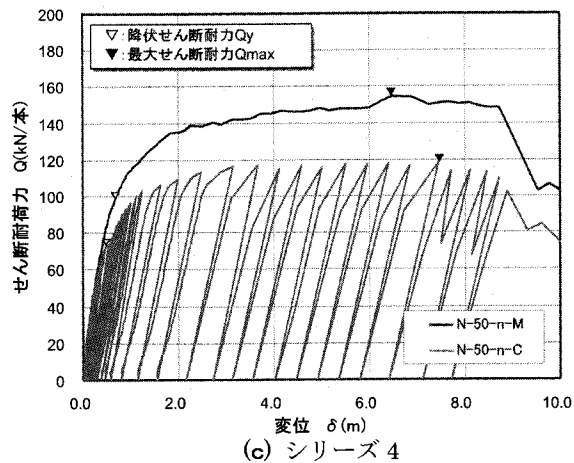
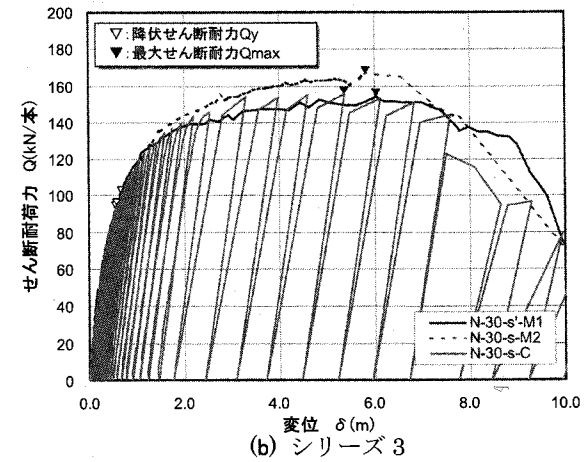
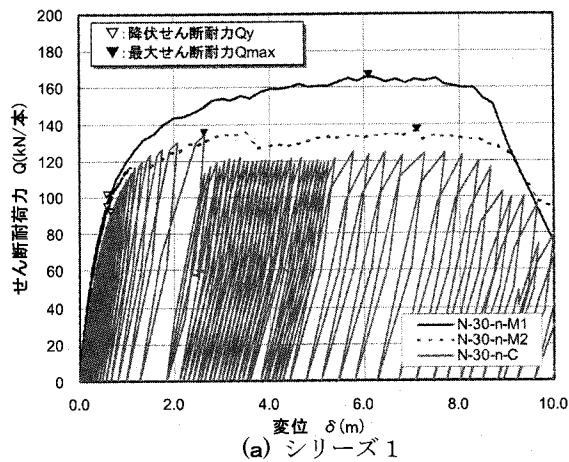


図-2 $Q-\delta$ 曲線

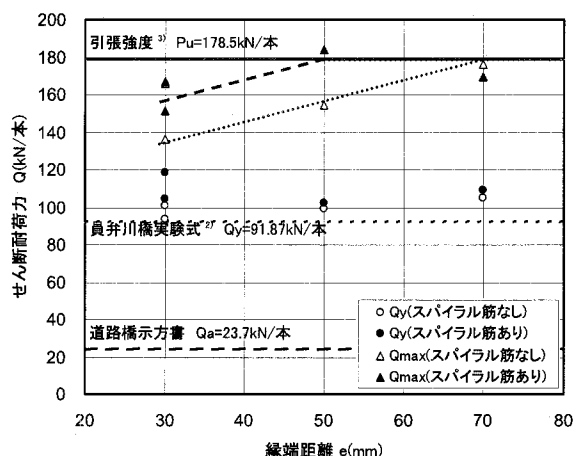


図-3 スパイラル筋の有無および縁端距離がせん断耐力に及ぼす影響

れらから降伏荷重レベルにおいては、縁端距離の大小とスパイラル筋の有無による影響はないと判断できる。

(2) 最大せん断耐力 (Q_{max})

図-3 に示す通り、スパイラル筋なしの場合、せん断耐力は縁端距離に比例して増加し、縁端距離 70mm を確保すると最大せん断耐力はスタッドの引張強度 ($P_u = \sigma_u \cdot A_s$) に達した。一方、スパイラル筋を有する場合、せん断耐力はスパイラル筋なしの値に対して約 15% 増の結果となった。また、縁端距離を 50mm 確保し、スパイラル筋で補強すると、最大せん断耐力はスタッドの引張強度と合致し、縁端距離をそれ以上確保しても最大せん断耐力が大きくなることはなかった。

以上のことから、スパイラル筋なしの場合は縁端距離を 70mm 以上、スパイラル筋ありの場合は縁端距離を 50mm 以上確保することで高強度スタッドの性能を十分発揮できると言える。

(3) ずれ定数

ずれ定数⁴⁾と縁端距離の変化を図-4 に示す。

スパイラル筋によりスタッド周辺のモルタルが補強された場合、ずれ定数は縁端距離に比例して増加する結果となった。スパイラル筋を有する場合の縁端距離とずれ定数の回帰式を求めると図中の式のようになる。

一方、スパイラル筋なしは、縁端距離 30mm の結果を除いて、縁端距離が 50mm 以上になるとスパイラルありとほぼ同等のずれ定数となった。

3.3 コンクリート種別の影響

コンクリート種別によるせん断耐力挙動比較を表-4 に示す。ここで、表中の値は漸増載荷試験での PCa 版とモルタル間の接合面の付着切れによる影響を無視するため、評価には単調載荷試験結果のみを用いている。

この表から明かなように、降伏および最大せん断耐力は、PCa 版のコンクリート種別の影響を受けず、ほぼ同等の性能を有している。これは、せん断耐力挙動が局所的なものであり、せん断耐力がスタッドから支圧を受けるモルタルの強度によって定まってくるためと考

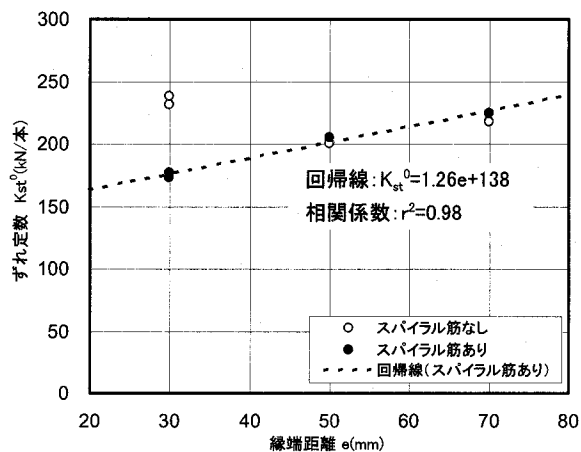


図-4 ずれ定数と縁端距離の関係

表-4 コンクリート種別による比較

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

えられる。

一方、ずれ定数に着目すると、PCa 版に軽量コンクリートを用いた供試体は、普通コンクリートを用いたものの 85% となった。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ためと考えられる。

3.4 考察

以上の実験結果から、スパイラル筋を配置したスタッドは、スパイラル筋によってスタッド周辺のモルタルが補強され、ずれ剛性とせん断耐力の向上を図れることが確認できた。ここでは、モルタルの破壊面の状況から、スパイラル筋によって最大せん断耐力が向上するメカニズムについて以下に考察する。

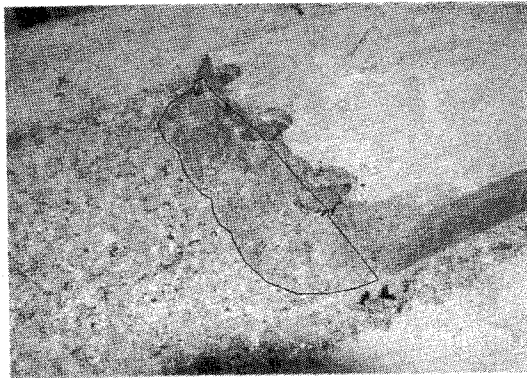
破壊後の状況と破壊面の概念図を写真-3 および図-5 に示す。スタッド周辺のコンクリートとモルタル部にはスタッドから支圧応力が伝達され、モルタル部にはコーン状の破壊面が形成される。最大せん断耐力とコーンの体積の関係を図-6 に示す。このコーン体積は、スタッド中心からの各投影半径と破壊面角度を 45 度と仮定して得られる高さから算出した。

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の体積が大きくなり、この体積を大きくすることが最大せん断耐力の増加につながっていると言える。

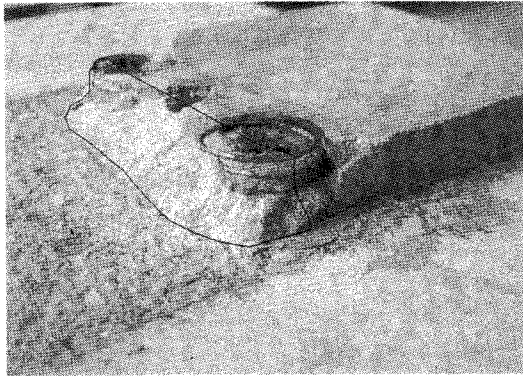
4. 結論

以下に、本研究で得られた結果の要約を示す。

1) 縁端距離を 30mm 以上確保すれば、降伏せん断耐力



(a)スパイラル筋なし (例: N50-n-M)



(b)スパイラル筋あり (例: N50-s-M)

写真-3 破壊面の状況

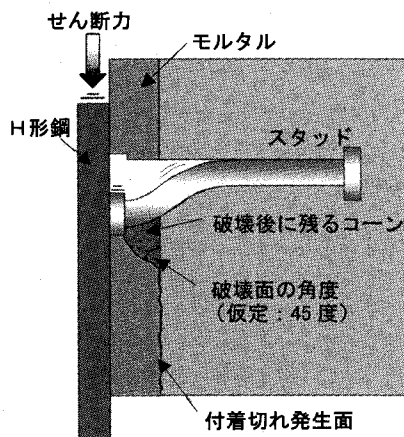


図-5 破壊面概念図

カレベルにおいて、縁端距離の影響およびスパイラル筋の有無による影響は見られなかった。

- 2) 最大せん断耐力は、縁端距離に比例して増加し、スパイラル筋で補強することにより、補強しないものに対して約 15% 大きくなる。
- 3) 高強度スタッドは、スパイラル筋なしの場合は縁端距離を 70mm 以上、スパイラル筋ありの場合は縁端距離を 50mm 以上確保することにより、その性能を引張強度まで発揮できることが明らかとなった。
- 4) 降伏および最大せん断耐力に対して、PCa 版のコンクリート種別による影響は見られなかった。一方、ずれ定数は、PCa に軽量コンクリートを用いた場合、普通コンクリートのものよりも低くなった。

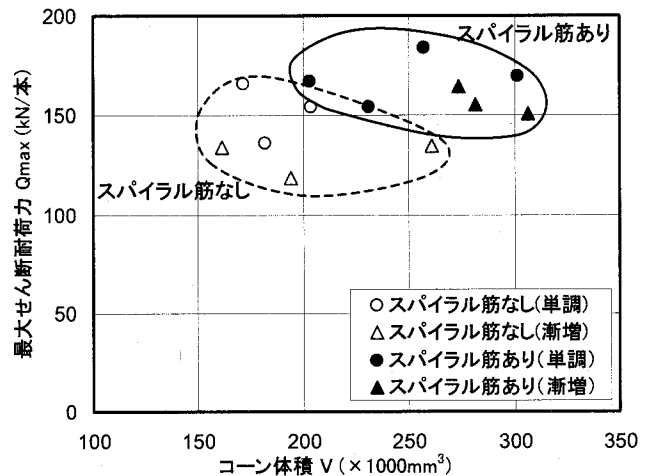


図-6 最大せん断耐力とコーン体積の関係

- 5) 最大せん断耐力と破壊面に残るコーン体積との間には相関性が見られた。

本研究は、スパイラル筋で補強された高強度スタッドの基礎的研究として行った。今後、実験を重ねることにより、定量的な評価を行う必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり供試体製作ではピーシー橋梁(株)試験センター小林氏をはじめ関係者各位にはご尽力頂いた。また実験を行うにあたっては、摂南大学の4年生の尾形君、古主君には多大なるご協力を頂いた。関係者各位に対し、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 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, pp.95-98, 1996.11
- 2) 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一員弁川橋一、土木学会第 54 回年次学術講演会概要集、1999.9
- 3) 平城弘一・松井繁之・佐藤 崇・Abubaker AL-SAKKAF・石崎 茂・石原靖弘: 縁端距離を考慮した頭付きスタッドの引抜きおよびせん断強度評価式、土木学会論文集 No.703/I-59, pp.279-291, 2002.4
- 4) (社)日本鋼構造協会: 頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)および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, 1996.11
- 5) R.Taylor et al.: Investigation on the use of deep hunches in composite construction, Proceedings, The Institution of Civil Engineers, Vol.47, pp.47-54, Sep., 1970

(2003 年 9 月 12 日 受付)