

論文

グループ配置した高強度太径スタッドの せん断耐荷特性に関する実験的研究

林大輔*, 滝本和志**, 小林顕***, 伊佐政晃****, 岡本信也*****

*工修, 清水建設株式会社, 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

** 工博, 清水建設株式会社, 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

*** 工修, 清水建設株式会社, 名古屋支店土木技術部 (〒460-8580 愛知県名古屋市中区錦 1-3-7)

**** 工修, 阪神高速道路株式会社, 管理本部大阪保全部 (〒552-0023 大阪府大阪市港区晴 2-11-12)

***** 工修, 阪神高速道路株式会社, 管理本部神戸管理・保全部 (〒650-0041 兵庫県神戸市中央区新港町 16-1)

プレキャスト PC 床版と鋼桁との接合には一般的に頭付スタッドが用いられるが, 必要とするスタッド本数が多い場合は設計基準に準拠すると, 多数のスタッド孔を設けることから床版の製作が困難となる. 本研究は, プレキャスト床版に対する合理的なスタッド配置を検討することを目的に, 1本あたりのせん断抵抗性に優れた高強度・太径スタッドをグループ配置したずれ止め構造の押抜き試験を行い, せん断耐荷特性を評価した. 実験より, スタッド間隔が狭くなるにつれて 1本あたりのせん断耐荷性能が低下することを確認し, その低下度合いについて整理をおこなった. また, せん断抵抗性の向上を目的にスパイラル筋による補強を検討した結果, グループ配置により低下したせん断耐荷力を改善することを確認した.

キーワード: 頭付きスタッド, グループ配置, 高強度太径, 押抜き試験

1 はじめに

大規模更新事業により, 経年劣化や損傷した RC 床版の取換え工事が実施されている. 床版取換えにおいては, 交通規制期間を極力短縮することが求められるため, 予め工場で作成したプレキャスト PC 床版で取り換えることが一般的に多い. 従来は, 床版と鋼桁間の作用せん断力が大きくなる鋼連続合成桁の桁端部や中間支点付近では, 現場打ち施工とすることが多いが, さらなる急速施工をめざし, これらの箇所に対してもプレキャスト床版による施工が期待される. しかしながら, 大きなせん断力が作用する構造に対し, 道路橋示方書¹⁾に準拠した通常の設計を適用した場合, 必要とするスタッド本数を配置するためのスタッド孔が多くなり, スタッド孔と PC 鋼材が干渉することから, プレキャスト PC 床版を製作することが困難である.

この問題に対して設計上取りうる手段としては, 以下の2つの方法が挙げられる. 1) スタッド径, 強度が大きなものを採用することで1本あたりのせん断耐荷性能を向上させ, 必要とするスタッド本数を低減させる. 2) 複数本のスタッドを比較的狭い間隔で配置することで, 限

られたスペースに多くのスタッドを配置する. 前者に対する既往の研究は, 小野辺ら²⁾によって合成少数主桁橋への適用を目的に, スタッド直径 25mm かつ材質が SM570 相当の高強度スタッドのせん断耐荷性能の検討がなされており, 実際の実務で使用されている. 後者については, スタッドを所定の間隔よりも狭めた場合 (以下, グループ配置と呼ぶ) に標準な配列の場合と比べて耐荷力が低下することから, 例えば岡田ら³⁾は, グループ配置したスタッドのせん断耐荷力について実験と FEM 解析を行い, せん断耐力の算定を試みている.

本研究は, 限られたスペースに対して高いせん断耐荷性能を発揮する合理的なスタッド配置を検討すること目的として, 前述の 1)と 2)を組み合わせて, 高強度・太径のスタッドをグループ配置した際のせん断耐荷力を実験的に検証する. 具体的には, スタッド間隔をパラメータとしたスタッドの押抜き試験を実施し, スタッド間隔が変化した場合のせん断耐荷性能の低下度合いを明らかにする. 既往のグループ配置に関する研究では, スタッド径が 22mm 以下を対象としているため, 本研究では直径が 25mm のスタッドを対象とした. ただし, グループ配置により, スタッド1本あたりのせん断耐荷性能は低下

表-2 コンクリート強度試験結果

材料	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
コンクリート	39	90.4	2.88
モルタル	29	86.1	2.71

表-3 コンクリート強度試験結果

材料	降伏強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	伸び (%)
スタッド (HT570)	544	614	25.0
鋼板 (SS400)	245	423	34.0
鉄筋 (SD345)	363	508	19.0

このときフランジ面上のモルタル層の厚さは30mmとしている。この部材2体を鋼板ウェブ部で添接板により一体化させることで1組の試験体とした。なお、鋼板とモルタルの付着の影響を除去するため、鋼板フランジ面にグリースを塗布した。G75Sのスパイラル筋で補強したケースは、澤らの既往の研究⁴⁾を参考に、 $\phi 4.0\text{mm}$ 、高さ88.2mm(9巻き)の鋼材を配置した。

2.3 材料特性

使用したコンクリート、モルタルおよび鋼材の材料特性を表-2、表-3に示す。コンクリート強度は設計強度70N/mm²、無収縮モルタルは、高強度タイプのプレミックスマルタルを使用した。使用したコンクリートの設計強度が高い理由は、床版継手部にプレストレスを導入する継手工法⁵⁾との併用を想定したためである。鉄筋はSD345で呼び径D13のものを使用した。H形鋼材(H250

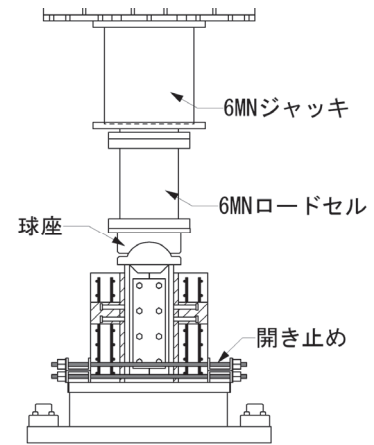


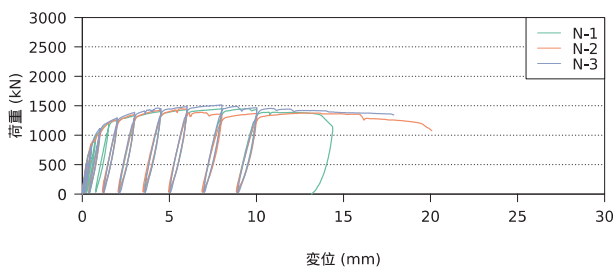
図-2 荷重装置

$\times t_f 30 \times t_w 18$)は、試験荷重に対して降伏しないように、SS400の鋼材をビルドアップして製作した。

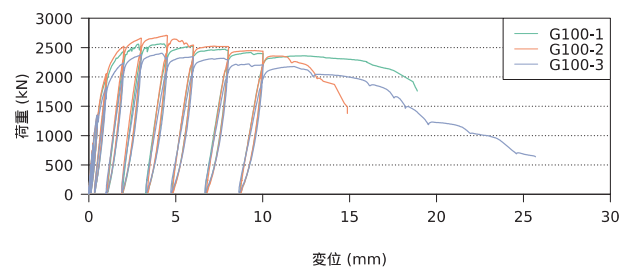
2.4 荷重装置

荷重装置を図-2に示す。試験体は、均一に荷重がかかるように石膏を敷いた上に設置し、油圧ジャッキに球座を取り付けた加力装置にてH形鋼上部を加力した。また、スタッドに適切にせん断力を作用させるため、試験体下部に開き止めを設置し試験体を拘束した。

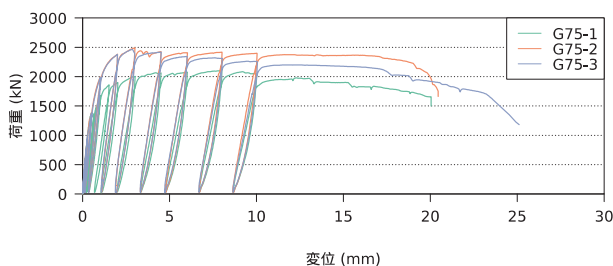
荷重は、漸増繰り返し荷重で行った。荷重が100kN、250kN、500kN、750kN、せん断ずれが0.25mm、0.50mm、1.00mm、2.00mm、3.00mm、4.50mm、6.00mm、8.00mm、10.0mmの時点で除荷を行い、荷重が0kNまで低下した段階で再荷重した。繰り返し荷重の途中で、荷重がピーク荷重の80%程度まで低下した時点で破壊とみなし、試験を終了した。ただし、各ケースとも1体はスタッドが破断するまで荷重を実施した。



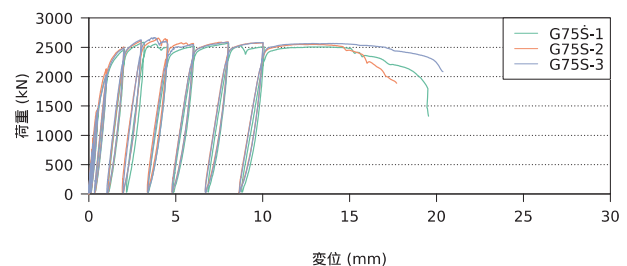
(a) ケースN



(b) ケースG100



(c) ケースG75



(d) ケースG75S

図-3 荷重-変位関係

表-4 最大荷重およびせん断耐荷力

ケース名	番号	最大荷重 (kN)	最大せん断耐荷力 (kN)		最大ずれ (mm)	降伏せん断耐荷力(kN)		破壊形態
				平均値 (変動係数)			平均値 (変動係数)	
N	1	1453	242	245 (0.020)	9.46	139	147 (0.037)	変位 14mm で載荷終了
	2	1451	242		5.69	148		スタッド破断
	3	1515	253		7.98	153		変位 18mm で載荷終了
G100	1	2566	214	213 (0.049)	4.14	143	134 (0.096)	変位 20mm で載荷終了
	2	2712	226		4.44	143		変位 20mm で載荷終了
	3	2404	200		4.19	116		スタッド破断
G75	1	2107	176	196 (0.075)	8.01	114	125 (0.063)	変位 20mm で載荷終了
	2	2491	208		3.00	133		変位 18mm で載荷終了
	3	2466	205		2.86	126		スタッド破断
G75S	1	2585	215	220 (0.014)	3.15	141	140 (0.001)	変位 19mm で載荷終了
	2	2657	221		3.99	140		変位 15mm で載荷終了
	3	2665	222		3.74	141		スタッド破断



(a) G75-No.2



(b) G75-No.3 [左:コンクリート側, 右:鋼板側]

図-4 スタッドの変形・破断状況

計測は、鋼材とコンクリートの相対ずれをスタッド位置（高さ）で計測した。グループ配置のケースでは、スタッドが複数列に配置されるが、それぞれのスタッド位置で相対ずれの計測を行い、その平均によって評価を行った。

3 試験結果

3.1 荷重 - 変位

実験で得られた荷重 - 変位関係を図-3 に、各ケースの最大荷重を表-4 に示す。ここで示す変位は、スタッド位置で計測したコンクリートと鋼材間のせん断力作用方向の相対変位である。

すべてのケースで、ずれ変位が 1.0~2.0mm の段階で荷重 - 変位関係の勾配が緩やかになっている。標準配置(N)と集中配置(G)を比較すると、標準配置のケースでは、荷重 - 変位関係の勾配が小さくなった後も緩やかに荷重が増加し、ずれ変位が 5.5~9.0mm の段階でピークに達しているのに対し、グループ配置のケースでは変位 3.0~4.5mm 程度と変形量が比較的小さい段階で荷重がピークに達した。この違いは、モルタル、コンクリートの負担力がグループ配置のケースの方が大きいこと、既往の研究³⁾で指摘されたように、スタッド間隔が狭くなったことで、クラックがスタッド間をまたぐように進展するよ

うになったことが要因だと考えられる。

3.2 破壊形態

各ケースとも、スタッドの破断で急激な荷重低下が生じ終局に至った。試験終了後、スタッドをはつり出し観察した様子を図-4 に示す。スタッドは、根本付近が曲がるように変形が生じていた。最終的に、溶接面のやや上方の断面でスタッドが破断していた。

3.3 スタッド1本あたりのせん断耐荷力

図-3 の荷重 - 変位関係から各ケースにおけるスタッド最大せん断耐荷力および降伏せん断耐荷力を評価する。ここでは、JSSC 試験方法(案)⁹⁾に従い、最大せん断耐荷力、降伏せん断耐荷力を算出した。最大せん断耐荷力は、スタッドの本数で最大荷重を除いた1本あたりのせん断抵抗力である。降伏せん断耐荷力は、最大せん断耐荷力の 1/3 の大きさの荷重点と原点を結んだ初期割線を 0.2mm シフトした直線と、荷重 - 変位関係の交点から求めた。

表-4 に示す結果から、次のような傾向が読み取れる。最大せん断耐荷力、降伏せん断耐荷力ともグループ配置した G75 のケースが最も低い値を示し、G100 と比べても、スタッド間隔がより狭いことで、せん断耐荷力が低下していることが確認できる。

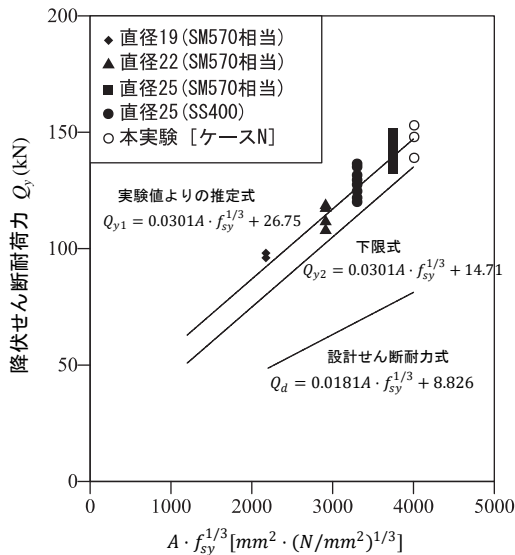


図-5 標準配置のせん断耐力

4 グループ配置したスタッドのせん断耐荷性能

4.1 コンクリート強度の影響

本試験で使用したコンクリート強度は、従来の実績と比べて高いものであった。したがって、実験結果に高強度コンクリートを使用している影響が考えられるため、標準配置の実験結果と既往の実験結果の比較を行うことで、整合性を確認することとした。小野辺ら²⁾により、コンクリート強度 50N/mm²を対象に高強度スタッドの押抜き試験が体系的に実施されており、実験結果から、高強度スタッドの断面積・強度と降伏せん断強度の関係が明らかにされている。

図-5に、小野辺らの実験結果に本実験の標準ケースの結果を追記して示す(文献²⁾p.190中の第18図に追記)。実験より得られた推定式 Q_{y1} に対して、本実験のケースNが良好に一致していることがわかる。どちらのケースもスタッドの破断によりせん断破壊となるため、コンクリート強度が高くなる場合については、強度が降伏せん断耐力へ及ぼす影響はほぼないものと判断できる。

4.2 グループ配置の影響

グループ配置の影響に対する各せん断性能の低下割合を整理して図-6に示す。横軸は、スタッド間隔をスタッド直径で正規化した値、縦軸を実験で得られた降伏せん断耐力(Q_y)、最大せん断耐力(Q_u)としてプロットした。ここでは、道示においてスタッド間隔の最小値として5d (d:スタッド直径)と定められていることから、標準配置のケースNを、スタッド間隔/スタッド直径 (s/ϕ) = 5として整理した。

ケース内ではばらつきは認められるものの、 s/ϕ が小さくなるに従い、降伏せん断耐力、最大せん断耐力がほぼ線形に低下していることが読み取れる。また、スタ

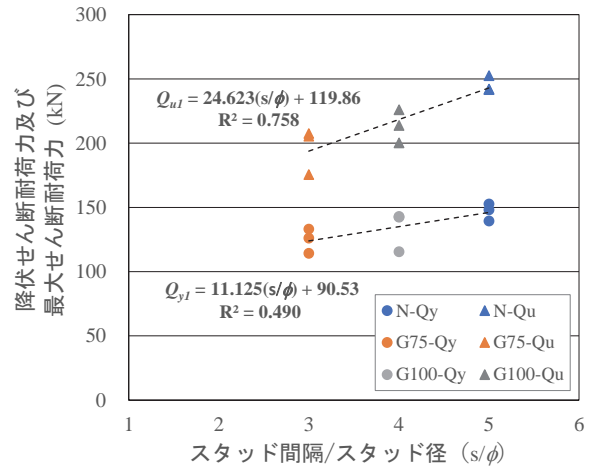


図-6 スタッド間隔とせん断耐力の関係

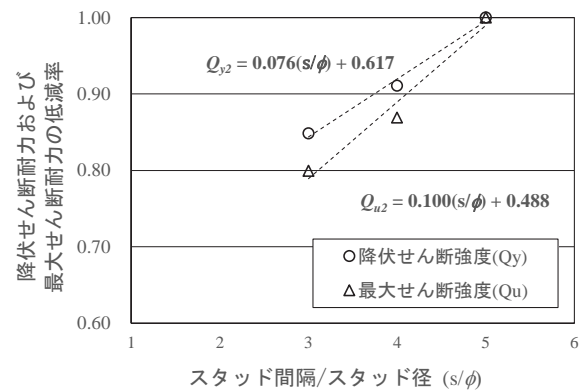


図-7 スタッド間隔とせん断耐力の低減率

ッド間隔に対するせん断耐荷性能の低下の割合は、降伏せん断耐力に比べて、最大せん断耐力の方が大きく減少している。これはグループ配置した場合は、ずれ変位が比較的小さい段階でピーク荷重を迎えたことに関係していると考えられる。

図-7に、各ケース3体の結果の平均値に対して、標準配置のケースのせん断耐力で正規化した結果を示す。 s/ϕ の値が3のとき、標準配置に対して降伏せん断耐力は0.85、最大せん断耐力は0.80まで低下している。既往の研究結果^{3) 7)}では、グループ配置による耐荷力の影響は無視できる程度に小さいと報告されているが、これらの結果は道路橋示方書を逸脱しない $s/\phi=5$ までの結果であり、それよりもスタッド間隔が狭い本ケースでは、1本あたりのせん断耐力の低下が顕著に生じたと考えられる。

本結果より、高強度・太径スタッドをグループ配置するずれ止め構造は、スタッド間隔が狭いことにより1本あたりのせん断耐力は15%程度低下するものの、複数本のスタッドを配置することによりせん断耐荷性能の向上を期待できるため、限られたスタッド孔の空間で高いせん断耐荷性能を発揮できることが確認できた。また、図-5より、標準配置のせん断耐力は既往の耐力式から

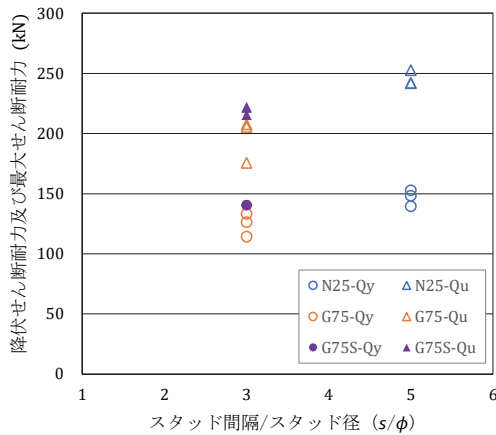


図-8 スパイラル筋補強の効果

推定可能なことから、グループ配置によるせん断耐力の低減率をスタッド間隔の関数として設定することで、グループ配置された高強度スタッドのせん断耐力を評価できると考えられる。そのためには、コンクリート強度やスタッド径など、その他のパラメータにおける実験結果が期待される。

4.3 スパイラル筋補強の効果

グループ配置の影響を緩和させるため、スパイラル筋による補強を検討した。スパイラル筋で補強した G75S と無補強の G75 の結果を表-4、図-8 より比較すると、降伏せん断耐力、最大せん断耐力ともに G75S の方が 15%程度高くなっていることがわかる。さらに各耐力の変動係数に着目すると、G75 が 0.075(0.063)に対し G75S は 0.014(0.001)と小さな値であり、スタッドを補強したことで、同一ケース内のばらつきが小さくなっていることが読み取れる。これは、スパイラル筋によってスタッド周辺のモルタルが拘束されたこと、スタッド間をまたぐように発生するひび割れに補強筋が抵抗することにより、ひび割れの進展挙動が抑制されたためと推察される。以上より、マクロ的な視点からはスパイラル筋によりスタッドの補強したことで、せん断耐力が向上したと評価できる。今後、数値解析により詳細なメカニズムの検討を実施する予定である。

5 結論

グループ配置した高強度・太径スタッドのせん断耐力性能を明らかにすることを目的に実施した本研究より得られた結論を以下にまとめる。

- 設計強度 70MPa の高強度コンクリートを使用した
が、標準配置のスタッドのせん断耐力性能は既往

の設計式で評価できる結果であった。

- 本実験の範囲 ($3 \leq s/\phi \leq 5$) において、グループ配置によりスタッド 1 本あたりのせん断耐力性能はスタッド間隔が狭くなるほど減少した。スタッド間隔/スタッド直径の比が 3 のとき、標準配置に比べて、降伏せん断耐力で 0.85、最大せん断耐力で 0.80 の大きさであった。
- グループ配置により 1 本あたりのせん断耐力性能は減少するものの、複数本スタッドを配置する効果の方が大きいため、本実験で検討したスタッド配置に限られたスペースにおいて高いせん断耐力を発揮できることを確認した。
- 本研究で検討した範囲においては、スパイラル筋によるスタッドの補強によって、降伏せん断耐力、最大せん断耐力が向上した。これは、スタッド周辺のモルタルが拘束されることで、ひび割れの進展が抑制された効果だと推察される。

謝辞

実験の実施と結果の考察にあたり大久保宣人博士（日本ファブテック株式会社）より貴重なアドバイスをいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編，2017.11.
- 2) 小野辺良一，倉田幸宏，松野憲司：「町屋川橋」のプレキャスト床版用スタッドの強度特性に関する解析・実験的検討，石川島播磨技報，pp.184-190，2001.
- 3) 岡田淳，依田照彦，Jean-Paul LEBET：グループ配列したスタッドのせん断耐力性能に関する検討，土木学会論文集，No.766/I-68，pp.81-95，2004.7.
- 4) 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力，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1441-1446，2004.
- 5) 小林颯，新名勉，興石正己：プレストレスジョイントを用いた PCa 床版の設計，コンクリート工学年次論文集，pp.499-504，2018.7
- 6) (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 35，1996.11.
- 7) 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，2001.10.

(2020 年 7 月 17 日受付)