

軽量コンクリート2種を使用した床版に用いる頭付きスタッドのせん断耐力

(株) IHI インフラ建設	正会員	○小林 崇
(株) IHI インフラ建設	正会員 博(工)	中村 定明
日本スタッドウェルディング(株)		馬場 敏
大阪工業大学	正会員 博(工)	大山 理

Abstract : In Japan, the number of existing highway bridges working over fifty years is increasing and retrofitting of the deteriorated slabs on those bridges is required to extend the bridge lives another fifty years. For the retrofitting those slabs, precast pre-stressed concrete slabs using lightweight concrete of class-2 have been developed. Generally, studs are used to connect slabs and steel girders and the static push-out test was carried out to confirm shear strength of the stud on specimens using different concretes. As the result, the type of concrete used for the slab does not affect the shear strength of the studs, and the use of high-strength studs can also reduce the number of studs on precast pre-stressed concrete slabs using lightweight concrete of class-2.

Key words : Lightweight concrete of class-2, Precast PC slab, Headed stud, Shear strength

1. はじめに

わが国では橋梁のストック数が膨大になり、供用期間が50年に達する橋梁数も増加している。これらの橋梁では老朽化が進んでおり、各道路管理機関ではRC床版の劣化に対して床版取替など大規模更新・修繕が計画されている。床版取替では、工事期間の短縮などからプレキャスト床版が多く用いられるが、現行の活荷重への対応や幅員拡幅などの機能向上により増加する死荷重の増加、これによる既設の鋼主桁や下部工の負担応力の増加を抑制するため、新たに架設される床版には軽量化が求められる。これに対して筆者らは、粗骨材および細骨材に軽量骨材を使用する軽量コンクリート2種（以下、軽量2種）を用いたプレキャストPC床版（以下、軽量2種床版）を開発し¹⁾、床版自重の軽減を図っている。

プレキャストPC床版を用いた床版取替では、床版と鋼桁の接合には頭付きスタッド（以下、スタッド）が多く用いられているが、工場製作時に橋軸直角方向プレストレスの導入に用いるプレテンションPC鋼材とスタッド用孔の干渉が問題となる場合がある。特に、合成桁ではスタッドの配置本数が多いため、道路橋示方書²⁾で標準とされるJIS B1198に規定されるスタッド（以下、標準スタッド）に対して高強度のスタッド（以下、高強度スタッド）の使用により、その本数を削減する場合がある。一方、軽量2種は、同等の圧縮強度を有する普通コンクリート（以下、普通コン）に比べて静弾性係数や引張強度、せん断強度が小さいため、プレキャスト床版への適用にあたって床版と鋼桁の接合に用いるスタッドの耐荷性能を確認する必要がある。

本稿は、軽量2種床版と鋼桁の接合に用いるスタッドの耐荷性能の確認を目的として行った静的押抜き試験について報告するものであり、プレキャスト床版に用いるコンクリートの種類がスタッドのせん断耐力に与える影響を検証したものである。

2. 試験の種類と試験体の概要

プレキャストPC床版への適用にあたり軽量2種に求めた性能目標は、設計基準強度 $50\text{N}/\text{mm}^2$ （普通コンを用いた一般的なプレキャストPC床版と同等）、単位重量 $16.5\text{kN}/\text{m}^3$ 以下（普通コン $23.0\text{kN}/\text{m}^3$ を30%程度軽減）であり、このときの静弾性係数が、同等の圧縮強度を有する普通コンの60%程度、引張強度が65%程度、せん断強度が85%程度となることを確認している³⁾。

表-1 試験体種類

床版種類	コンクリート種類	モルタル厚	スタッド種類	記号	試験体形状
場所打ち床版	普通コン	—	標準	SN	①
	軽量1種	—	標準	SL1	
	軽量2種	—	標準	SL2	
プレキャスト床版	普通コン	0	標準	PN-0	②
			高強度	PN-0H	
	30	標準	PN-30	③	
		高強度	PN-30H		
	軽量1種	30	高強度	PL1-30H*	
	軽量2種	30	標準	PL2-30	
高強度			PL2-30H		

※過去の実験⁵⁾より引用

表-2 スタッドの種類と力学特性

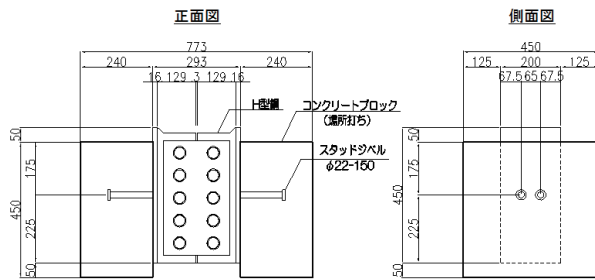
種別	材質	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
標準スタッド	SS400	358	461	28
高強度スタッド	SM570相当	563	636	19

表-3 コンクリートの使用材料と物性値の例

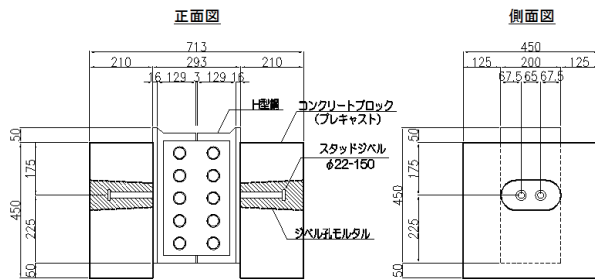
種別	記号	種類	物性値等
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm ³
細骨材	S	石灰砕砂	表乾密度 2.67g/cm ³ 滋賀県犬上郡産
	SL	人工軽量骨材 (低含水品)	絶乾密度 1.67g/cm ³ 含水率 0.3%
粗骨材	G	石灰砕石	表乾密度 2.69 g/cm ³ 滋賀県犬上郡産
	GL	人工軽量骨材 (低含水品)	絶乾密度 1.25g/cm ³ 含水率 0.2%
水	W	水道水	

表-4 コンクリートの配合例

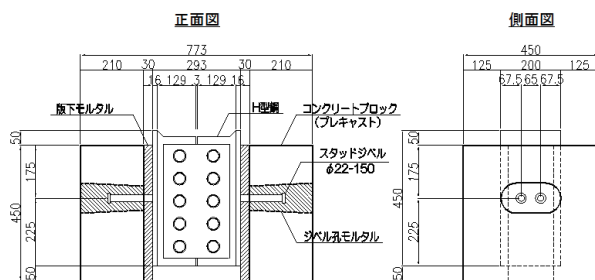
コンクリート種類	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	S	SL	G	GL
普通コン	44.0	4.5	44.0	145	363	816	—	1046	—
軽量1種	35.0	5.0	42.7	150	429	756	—	—	476
軽量2種	32.0	5.0	41.0	150	469	71	402	—	481



①場所打ち床版タイプ



②プレキャスト床版タイプ
(版下モルタル厚 0mm)



③プレキャスト床版タイプ
(版下モルタル厚 30mm)

図-1 試験体概要

本研究では、軽量2種床版のスタッドによる鋼桁との耐荷性能に対して、①場所打ち床版における床版コンクリートの種類、②プレキャスト床版下に敷設するモルタルならびに③プレキャスト床版における床版コンクリートの種類が与える影響を静的押抜き試験により確認する。試験方法および試験体の形状は「頭付スタッドの押抜き試験方法 (案)」(日本鋼構造協会⁴⁾に準拠し、H形鋼の両側にコンクリート床版を模したコンクリートブロックを配置、H形鋼とコンクリートブロックを片側に2本配置した軸径22mm、高さ150mmのスタッドで接合した試験体とした。各影響の確認における試験体の種類と概要を表-1および図-1に、使用したスタッドの種類と力学特性を表-2に、コンクリートの使用材料を表-3に、コンクリートの種類とその配合を表-4にそれぞれ示す。なお、プレキャストPC床版の架設に際してスタッド用孔には、一般的に膨張コンクリートまたは無収縮モルタルが充填される。本研究では日々取替えなどの急速施工を想定し、版下、スタッド用孔とも充填材として超速硬型の無収縮モルタル

を使用, 実施工と同様となるよう切断したH型鋼上にコンクリートブロックを配置し, 一括で流し込んだ。

試験は, H形鋼に载荷することにより行い, H形鋼とコンクリートブロックの相対ずれが4mmとなるまで想定される最大荷重の1/20程度である40kNごとの载荷と除荷を载荷速度2~4kN/秒で繰り返し, 相対ずれが4mmを超えて以降は単調载荷として破壊まで载荷を行った。

3. 試験結果

3. 1 場所打ち床版における床版コンクリートの種類の影響

プレキャスト床版では, 床版と鋼桁の接合はスタッドとスタッド用孔に充填される膨張コンクリートや無収縮モルタルを介して行われる。このため, 床版に用いるコンクリートの種類は, スタッドの耐荷性能に影響しないことも予想される。ここでは, プレキャスト床版に用いるコンクリートの種類がスタッドの耐荷性能に与える影響を評価するにあたり, 床版とスタッドの接合に膨張コンクリートや無収縮モルタルを介さない場所打ち床版タイプにより床版コンクリートの種類がスタッドの耐荷性能に与える影響を確認する。ここで, 床版コンクリートの種類は, 普通コン, 粗骨材に軽量骨材を使用した軽量コンクリート1種 (以下, 軽量1種) および軽量2種とし, 標準スタッドによりH形鋼と接合している。表-5に床版コンクリートの材料試験結果を示す。

表-5 材料試験結果

コンクリート種類	単位重量 (g/cm ³)	強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)
		圧縮	引張	
普通コン	2.43	59.5	2.99	39.7
軽量1種	1.82	53.9	2.15	22.9
軽量2種	1.62	58.9	2.23	21.0

载荷試験の結果を表-6に, 各試験体の作用せん断力と相対ずれの関係を図-2に示す。ここで, 全ての試験体はスタッドの破断により試験を終了している。軽量1種を使用したSL1の降伏せん断耐力は121.2kN/本, 最大せん断耐力は184.1kN/本であり, 普通コンを使用したSNの132.4kN/本, 197.4kN/本に対して若干小さい結果となった。

表-6 試験結果 (3体の平均値)

試験体種類	コンクリート種類	最大荷重 (kN)	最大せん断耐力 (kN/本)	最大ずれ量 (mm)	ずれ定数 (kN/mm)	降伏せん断耐力 (kN/本)
SN	普通コン	789.5	197.4	5.5	374.0	132.4
SL1	軽量1種	736.4	184.1	6.5	386.2	121.2
SL2	軽量2種	834.9	208.7	8.9	345.6	128.2

干小さい結果となった。一方で, 軽量2種を使用したSL2は128.2kN/本, 208.7kN/本であり, SNに対して大きい結果となった。破壊後の試験体よりはつり出した破断スタッドの変形状況を図-3に示す。SNに対してSL1およびSL2は, スタッド根元部の変形が大きくなっている。高強度の軽量コンクリートは普通コンに

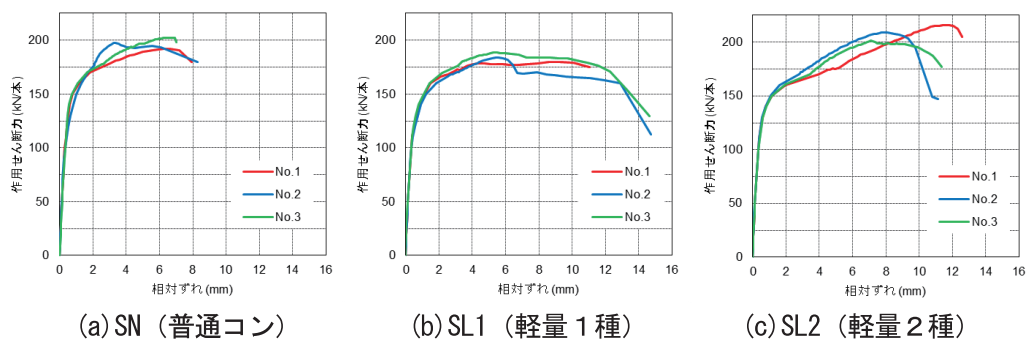


図-2 作用せん断力と相対ずれの関係



(a) SN (普通コン) (b) SL1 (軽量1種) (c) SL2 (軽量2種)

図-3 破断スタッドの変形状況

対して支圧強度が低いとされており⁶⁾、SL1およびSL2はSNに対して破壊範囲が広く、スタッド根元付近に曲げが作用したものと推察される。しかし、その影響は小さく、スタッドのせん断耐力に影響しない程度であった。また、SL2では相対ずれ3mm以降の挙動がSN、SL1と異なり、6mm以降も作用せん断力の増加が見られた。繰り返し载荷から単調载荷に切り替える相対ずれ4mmにおける荷重が、SNが180.5kNであったのに対してSL2は170.4kNであり、スタッド根元部の支圧破壊により相対ずれが大きくなり、単調载荷に切り替える荷重が小さく、挙動が異なった可能性がある。ただし、本要因はSL1についても同様であり、今後の検討課題である。

表-7 材料試験結果

種別	単位重量 (g/cm ³)	強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)
		圧縮	引張	
普通コン	2.38	61.0	3.14	40.3
モルタル	2.17	64.1	—	26.5

3.2 プレキャスト床版下に敷設するモルタルの影響

プレキャスト床版と鋼桁の接合に用いるスタッドのせん断耐力は場所打ち床版に用いた場合に比べて小さい。これは、プレキャスト床版と版下モルタル、鋼桁それぞれの界面で生じるせん断力によりスタッド根元部に曲げが生じ、これにより生じる引抜き力の影響によるものと推察される。

ここでは、版下モルタルの厚さを実施工で標準的であり、同様の試験での実績の多い30mmと、プレキャスト床版を鋼桁に直接設置してスタッド用孔のみモルタルを充填した0mmとした試験体により版下モルタルがスタッドの耐荷性能に与える影響を確認する。ここで、床版コンクリートは普通コンを、スタッドは標準スタッドおよび高強度スタッドを使用した。表-7に床版コンクリートの材料試験結果を示す。

载荷試験の結果を表-8に、各試験体のせん断耐力の比較を図-4に、標準スタッドの変形状況を図-5に示す。版下モルタルの厚さ30mmで標準スタッドを使用したPN-30の降伏せん断耐力は、同0mmとしたPN-0の24%程度、最大せん断耐力は28%程度低下した。また、版下モルタルの厚さ30mmで高強度スタッドを使用したPN-30Hは、同0mmとしたPN-0Hに対してそれぞれ14%程度、12%程度低下した。ここで、PN-0Hの最大荷重はPN-0を下回る結果となっている。また、PN-0Hの最大ずれ量はPN-30Hと同等、ずれ定数は小さくなっており、これの原因については今後の検討課題である。

スタッドの変形について、PN-0では根元で局部的に生じているのに対してPN-30では広い範囲で生じている。また、破断したPN-30のスタッドの長さはPN-0に比べて長く、スタッドの根元部では曲げにより引抜き力が作用し、伸びを生じて断面積が減少することによりせん断耐力が低下したものと推察された。

表-8 試験結果 (3体の平均値)

試験体種類	版下モルタル厚 (mm)	スタッド種類	最大荷重 (kN)	最大せん断耐力 (kN/本)	最大ずれ量 (mm)	ずれ定数 (kN/mm)	降伏せん断耐力 (kN/本)
PN-0	0	標準	886.5	221.6	9.7	336.9	127.3
PN-0H		高強度	859.7	214.9	7.1	282.0	132.6
PN-30	30	標準	638.2	159.5	13.2	286.4	97.0
PN-30H		高強度	759.0	189.8	7.0	321.6	113.9

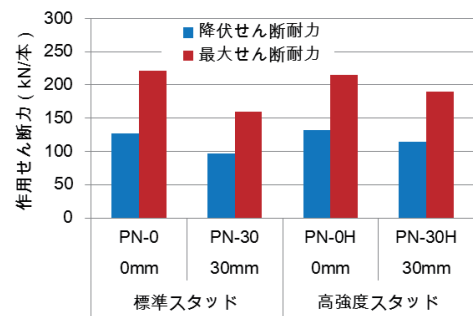
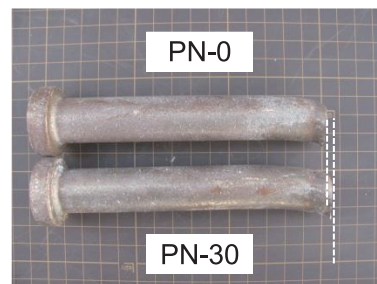


図-4 せん断耐力の比較



(a) PN-0 (未破断) (b) PN-30 (未破断)



(c) 破断スタッド

図-5 標準スタッド変形状況

表一 9 材料試験結果

試験体種類	単位重量 (g/cm ³)	強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)	
		圧縮	引張		
PN-30 PN-30H	普通コン	2.38	61.0	3.14	40.3
	モルタル	2.17	64.1	5.90	26.5
PL1-30H ⁵⁾	軽量1種	—	69.6	—	25.5
	モルタル	—	65.2	—	—
PL2-30 PL2-30H	軽量2種	1.62	62.1	2.28	20.4
	モルタル	2.15	67.8	5.37	25.3

表一 10 試験結果 (3体の平均値)

試験体種類	スタッド種類	最大荷重 (kN)	最大せん断耐力 (kN/本)	最大ずれ量 (mm)	ずれ定数 (kN/mm)	降伏せん断耐力 (kN/本)
PN-30	標準	638.2	159.5	13.2	286.4	97.0
PN-30H	高強度	759.0	189.8	7.0	321.6	113.9
PN-30H ⁵⁾	高強度	693.0	173.2	6.7	329.4	104.8
PL1-30H ⁵⁾	高強度	672.2	168.0	3.5	277.0	114.6
PL2-30	標準	634.3	158.6	4.4	304.2	100.1
PL2-30H	高強度	726.8	181.7	4.7	374.7	108.4
PL2-30H ⁷⁾	高強度	715.2	178.8	4.4	295.9	112.2

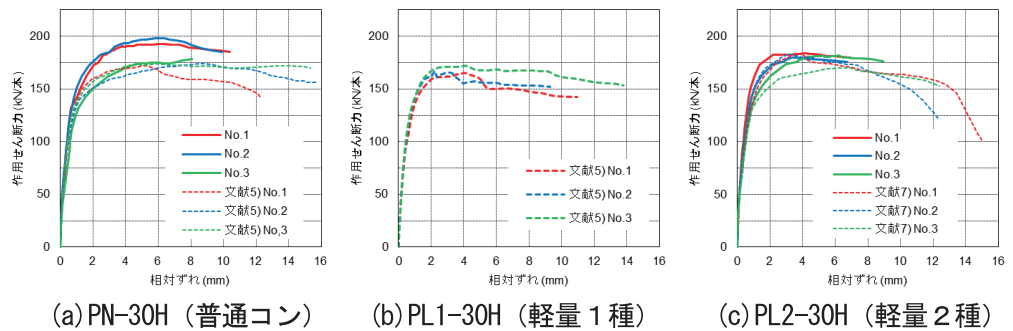
3. 3 プレキャスト床版における床版コンクリートの種類の影響

場所打ち床版タイプにより床版コンクリートの種類の影響を、普通コンを用いたプレキャスト床版により版下モルタルの影響を確認した。ここでは、プレキャスト床版タイプによ

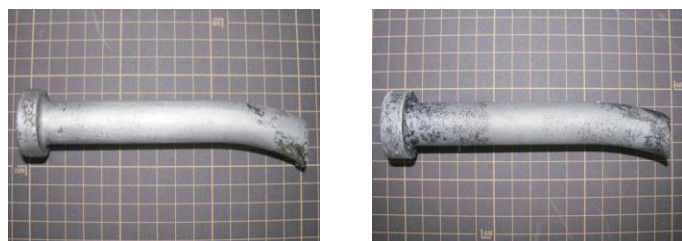
り床版コンクリートの種類の影響を確認する。ここで、床版コンクリートの種類は普通コン、軽量2種とし、軽量1種については同様の試験条件で行われた過去の実験⁵⁾を引用する。表一 9に床版コンクリートの材料試験結果を示す。

載荷試験の結果を表一 10に、高強度スタッドを用いた試験体の作用せん断力と相対ずれの関係を図一 6に示す。ここでは同条件で行わ

れた既往の研究^{5),7)}における結果も参考として示している。標準スタッドを使用したPN-30とPL2-30は降伏および最大せん断耐力は同等、高強度スタッドを使用したPL2-30Hは、PN-30Hに対して若干小さい値となったが、過去の実験でPN-30Hに相当する試験結果と同等である。これより、床版と鋼桁の接合にモルタルを介するプレキャスト床版では、床版コンクリートの種類のスタッドのせん断耐力への影響はないものと推察される。図一 7にPL2-30およびPL2-30Hより採取したスタッドの変形状況を示す。標準スタッドに対して高強度スタッドの変形は小さく、高強度スタッドは根元部に生じる曲げや引抜き力に対して抵抗性が高く、特にプレキャスト床版においてスタッド本数の削減に有効であることが確認された。



図一 6 作用せん断力と相対ずれの関係 (高強度スタッド)



(a) PL2-30 (標準スタッド) (b) PL2-30H (高強度スタッド)

図一 7 スタッド変形状況の比較

4. 既往の研究との比較

小野辺らは、PC床版と少数主桁を組合せた合理化橋梁の建設に際して高強度スタッドを提案、押抜き試験や解析により静的強度特性を検証し、高強度スタッドの設計せん断耐力式を提案している⁸⁾。ここで、小野辺らの研究で得られた実験値よりの推定式と今回の実験値との比較を図一 8に示す。

実験値は、床版コンクリートの種類に依らず実験値よりの推定式に対して若干小さい。これは、小野辺らの実験ではスタッド用孔には膨張コンクリートが充填されているのに対して、今回の実験では、無収縮モルタルを充填しているためと推察される。一方で、実験結果はいずれも下限式を上回っており、実験結果は概ね同等の結果であり、小野辺らの提案式の適用が可能であることが確認された。

5. まとめ

プレキャストPC床版と鋼桁の接合に用いるスタッドの耐荷性能に床版コンクリートの種類が与える影響および高強度スタッドの適用性の確認を目的として行った押抜き試験により得られた知見を以下に示す。

- ・普通コン、軽量1種および軽量2種を使用した場所打ち床版、またはプレキャスト床版は、それぞれの床版タイプでスタッドの降伏および最大せん断耐力は同等である。
- ・床版コンクリートの種類は床版と鋼桁の接合に用いるスタッドの耐荷性能に影響しない。
- ・プレキャストPC床版に用いるスタッドは、版下モルタル部での変形により根元部に生じる引抜き力が増加、これによりせん断耐力が低下するが、高強度スタッドの低下の割合は標準スタッドに対して小さい。
- ・プレキャスト床版において高強度スタッドの使用は、スタッド本数の削減に有効であり、軽量2種床版を合成桁に適用する場合に、標準的に高強度スタッドを用いることが可能である。

今後、本実験結果に基づき、構造物の要求性能に関する照査するにあたり、安全性および疲労耐久性の観点から、高強度スタッドの設計せん断耐力算定式の提案を行う予定である。

謝辞

本研究では、試験の実施にあたり大阪工業大学特任講師の今川雄亮様、木下貴史様（現 中央復建コンサルタンツ（株））、大阪工業大学大学院の石原涼澄様にご協力頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 小林崇・中村定明・郷保英之・松井繁之：軽量コンクリート2種を用いたプレキャストPC床版の疲労耐久性，プレストレストコンクリート工学会，第26回シンポジウム論文集，pp. 563-568，2017. 10.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編，2017. 11.
- 3) 小林崇・中村定明・石川寛範：低含水状態の軽量骨材を使用したコンクリートの材料特性，土木学会第72回年次学術講演会，V-617，pp. 1233-1234，2017. 9.
- 4) 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. 11.
- 5) 木村俊紀・岸田政彦・齊藤史朗・橘肇：プレキャストPC床版の接合に用いる高強度スタッドの押抜き試験，プレストレストコンクリート工学会，第25回シンポジウム論文集，pp. 337-340，2016. 10.
- 6) 土木学会：人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル，コンクリートライブラリー第56号，pp. 63-64，1985. 6.
- 7) 木下貴史・小林崇・大山理：高強度軽量コンクリートを用いた合成桁におけるスタッドのせん断耐力算定式の提案，土木学会第72回年次学術講演会，CS5-033，pp. 65-66，2017. 9.
- 8) 小野辺良一・倉田幸宏・松野進：「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.

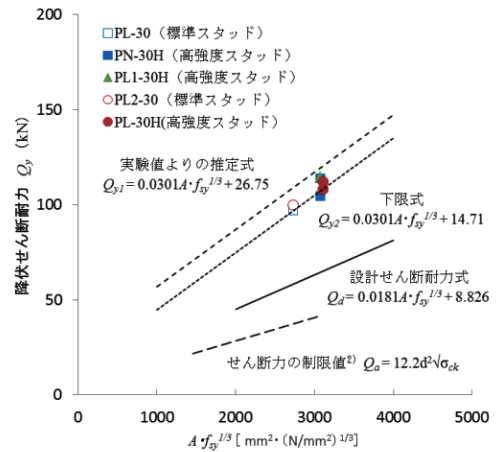


図-8 既往の研究⁸⁾との比較