

(10) プレキャスト床版を有する弾性合成桁の ずれ止め性能に関する実験研究

大垣 賀津雄¹・PHAM NGOC VINH²・渡邊 翔一郎³・石田 学⁴
赤江 信哉⁵・今川 雄亮⁶・石川 敏之⁷・大久保 宣人⁸

¹正会員 ものづくり大学教授 技能工芸学部建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333番地)
E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

²正会員 ものづくり大学特任講師 技能工芸学部建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333番地)
E-mail: pnvinh@iot.ac.jp

³学生会員 ものづくり大学 技能工芸学部建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333番地)
E-mail: b01812181@iot.ac.jp

⁴正会員 太平洋マテリアル株式会社 (〒114-0014 東京都北区田端6-1-1)
E-mail: manabu-ishida@taiheiyo-m.co.jp

⁵正会員 太平洋マテリアル株式会社 (〒285-0802 千葉県佐倉市大作2-4-2)
E-mail: shinya-akae@taiheiyo-m.co.jp

⁶正会員 大阪工業大学講師 工学部都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)
E-mail: yusuke.imagawa@oit.ac.jp

⁷正会員 関西大学准教授 環境都市工学部都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)
E-mail: t-ishi@kansai-u.ac.jp

⁸正会員 高田機工株式会社 技術本部 (〒556-0011 大阪市浪速区難波中 2-10-70)
E-mail: n_ookubo@takadakiko.co.jp

近年、橋梁の高齢化が進み大規模修繕や更新が始まっており、最近では施工性および耐久性の観点から、プレキャストPC床版への取替え工事が行われている。合成桁にプレキャストPC床版を使用する場合、水平せん断力が大きい桁端部付近のずれ止めの配置が難しくなり、合成桁として必要な頭付きスタッドを配置が困難なケースがほとんどである。そこで、本研究では、合成桁の床版にプレキャストPC床版を使用することを前提に、頭付きスタッド周辺の箱抜き部や版下部に弾性係数の低いモルタルを充填した供試体の静的押抜き載荷試験を行い、弾性合成桁設計の可能性について検討することとした。

Key Words : *shear connectors, precast slabs, continuous composite girder, rubber latex, lightweight resin mortar*

1. はじめに

鋼桁のRC床版をプレキャストPC床版（以下、PCa床版と記す）に取り換える場合の課題の一つに、鋼桁と床版の結合構造がある。高度経済成長時代に施工されたRC床版を有する鋼橋は活荷重がTL-20荷重で設計されており、このような床版取り換えに際してB活荷重に対応できるようにする場合が多い。ここで取り換えたPCa床版を主桁の一部として合成桁設計できれば、その補強量を低減できる。頭付きスタッドをずれ止めとして、完成後に合成桁として設計する場合、道路橋示方書¹⁾

規定である完全合成を満足させるためには、PCa床版の箱抜き部に十分なスタッドを設置する必要があるが、箱抜き部の大きさや橋軸方向間隔が限られるため、その配置が困難となる。箱抜き部でグループスタッドを合理的に配置すれば、鋼桁とPCa床版の合成度が確保できることが実験で検討されている²⁾ものの、橋軸方向間隔なども含めて支間長が長い場合の桁端部では合成桁としてのずれ止め規定を満足できないケースが多い。

一方で、非合成桁設計を行っても、PCa床版の場合にはスラブアンカーの適用も困難であり、頭付きスタッドを用いるケースがほとんどである。そこで、PCa床版と

鋼桁のずれ止めによる合成度合いを適切に評価して床版、鋼桁、およびずれ止めを実挙動に即して合理的に設計することが最もよいと考えられる。このような考え方は、古くから不完全合成桁設計法として、各種研究が行われている³⁹⁾。不完全合成桁という言葉から受けるイメージがよくないので、今後できる限り、弾性合成桁と呼ぶこととしたい⁹⁾¹²⁾。

一般に、PCa 床版と鋼桁接合部の頭付きスタッドを減らして橋軸方向間隔を広げても、その軸径を 13φ や 16φ 程度に小さくしても、どちらかという合成桁に近い挙動をすることが知られている¹²⁾。また、弾性係数の低い樹脂モルタルなどが近年開発されており、箱抜き部の頭付きスタッド周りや版下部に適用すれば、ずれ止めのバネ定数が小さくなり合成度の制御方法が可能になることが考えられる。鋼桁とコンクリート床版の合成度合いを実挙動に近い弾性合成桁としての評価法を検討し、以下の設計上の想定を証明する等、課題を検討する必要がある。

- (1) 弾性合成桁設計を行っても、正曲げモーメント領域における鋼桁は、はほとんど合成桁設計と同様の照査断面になる。〔計算法の提案〕
- (2) 負曲げモーメント領域はプレストレスしない連続合成桁挙動に近く、鋼桁＋鉄筋断面で断面力算出と応力照査を行ってよい。〔計算法の提案〕
- (3) 非合成桁設計においても、スラブアンカー等により結合されており、弾性合成挙動すると考えられる。〔挙動の明確化〕
- (4) 完全合成桁設計においても、ずれ止め用水平せん断力算出においては弾性合成の考え方を適用している。〔現示方書の矛盾点〕
- (5) PCa 床版を用いた場合、桁端部付近に配置できるスタッドに対して弾性合成桁としての照査を行うこととする。〔現場施工の課題〕
- (6) 近年、FEM 解析技術も発展しており、直接的に弾性合成桁挙動を評価できる。〔計算方法の確立〕
- (7) 弾性合成桁設計の計算システム化は比較的容易に構築できる¹²⁾。〔計算方法の確立〕
- (8) ずれ止めの押抜きせん断試験データを整理して¹³⁾²⁰⁾、設計最大荷重荷状態等ある程度変形した時のずれ止めのバネ定数を与えることができれば、弾性合成桁を適切に評価できるものと考えられる。〔ずれ止めの現状把握〕

今後、上記想定や課題に対して、順次検討を実施していく予定である。本文は上記(8)に関する研究であり、PCa 床版の箱抜き部のスタッド周りに充填するモルタルや鋼桁と PCa 床版の間の調整モルタルについて、種々の弾性係数を有するものをパラメータにした試験体の押

抜きせん断試験を行い、ずれ止めのバネ定数の差異を明確にし、合成度合いを計算できるフレキシビリティ定数 s を推定するものである。

2. 試験概要

(1) 試験供試体

試験に用いる供試体を図-1 に示す。本試験では、450×450×210mm の PCa 床版を想定したコンクリートブロックを製作し、200×450×16mm の鋼桁を想定した部材を各種モルタルを用いて一体化させる。材料の詳細は表-1 に示す通りである。また、押抜きせん断試験供試体の種類を表-2 に示す。ここで、コンクリートブロックと鋼桁との間を版下モルタル、スタッド用の箱抜き部分を充填モルタルと定義する。

PCa 床版は呼び強度 40N/mm² の早強コンクリート（粗骨材の最大寸法 20mm）を用いた。試験パラメータは、版下モルタル、充填モルタルの種類、鋼材と版下モルタルの付着の有無、150mm の頭付きスタッドの軸径 13φ もしくは 19φ とした。

CASE-A1～A4 は頭付きスタッドを 19φ で、版下モルタルに無収縮モルタルを施工して、充填モルタルの種類をパラメータとしている。充填モルタルには低弾性なゴムラテックスモルタルや軽量樹脂モルタル等を用いてお

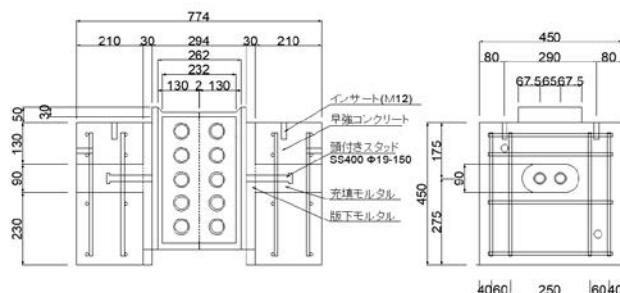


図-1 押抜きせん断試験供試体

表-1 使用材料

材料名称		圧縮強度 N/mm ²	弾性係数 N/mm ²
早強コンクリート		45.3	2.8×10 ⁴
無収縮モルタル		70.9	2.8×10 ⁴
低弾性ゴムラテックスモルタル		39.1	1.8×10 ⁴
超低弾性ゴムラテックスモルタル		32.7	1.0×10 ⁴
軽量樹脂モルタル	CASE-A	13.8	1.3×10 ³
	CASE-B	17.0	1.6×10 ³
	CASE-C	41.4	3.2×10 ³

材料名称	種類	降伏点 N/mm ²	引張強度 N/mm ²
頭付きスタッド	φ19×150	371	449
	φ13×150	400	460

注) 表中の値は各供試体の材料平均値である。

り、ずれ変形が生じやすいように配慮した。また、版下モルタルと鋼材の付着を無くすために剥離剤を噴霧している。版下モルタル施工時にスタッドの軸溶植部分に10mmのウレタンを巻いておき、充填モルタル施工時にはウレタンを取り除いて、スタッドの付け根部分も充填モルタルを施工した。

CASE-B1～B6は頭付きスタッドを13φと19φの2種類とし、充填モルタルに無収縮モルタルを施工して、版下モルタルの種類をパラメータとしている。本試験体では鋼材の表面は無機ジンクリッチプライマーのままとし、版下モルタルと鋼材間の付着がある状態としている。

一方、CASE-C1, C2は頭付きスタッド径を19φとし、充填モルタルに無収縮モルタルを施工して、版下モルタルに軽量樹脂モルタルを適用しており、鋼材面にグリースを塗布して、版下モルタルと鋼材の付着が無い状態で実験を実施している。

表-2 押抜きせん断試験供試体の種類

種類	版下モルタル	充填モルタル	鋼桁上面	頭付きスタッド
CASE-A1	無収縮モルタル	無収縮モルタル	付着無し	φ19×150
CASE-A2		低弾性 ゴムテックスモルタル		
CASE-A3		超低弾性 ゴムテックスモルタル		
CASE-A4		軽量樹脂モルタルA		
CASE-B1	無収縮モルタル	無収縮モルタル	付着有り	φ13×150
CASE-B2	低弾性 ゴムテックスモルタル			
CASE-B3	軽量樹脂モルタルB			
CASE-B4	無収縮モルタル			φ19×150
CASE-B5	低弾性 ゴムテックスモルタル			
CASE-B6	軽量樹脂モルタルB			
CASE-C1	軽量樹脂モルタルC	無収縮モルタル	付着無し	φ13×150
CASE-C2				φ19×150

(2) 試験要領

図-2に示す載荷実験状況の通り、H形鋼とコンクリートブロックとの相対ずれ4点を計測しながら載荷除荷を繰り返した。そして、4点平均の相対ずれが4mmとなるまで、20kNずつの増分載荷と除荷の繰り返しを行った。相対ずれが4mmを超えてからは、破壊するまで単調載荷とした¹³⁾。

また、PCa床版と載荷定盤との隙間や不陸を無くすため、設置時に超速硬無収縮モルタルで設置調整を行った。同図に示す通り、試験体の下部に単管パイプで開き止めの措置を講じている。

3. 試験結果

(1) 試験結果

試験結果一覧を表-3に示す。同表には、各試験供試体の最大荷重、最大せん断耐力 $Q_{\max}$ 、最大ずれ量 $\delta_{\max}$ 、降伏せん断耐力 Q_y 、限界せん断耐力 Q_c 、せん断耐荷力計算値 Q_{cal} 、破壊モードを示した。



図-2 載荷実験状況

表-3 試験結果一覧

試験体	最大荷重 (kN)	最大せん断耐力 $Q_{\max}$ (kN/本)	最大ずれ量 $\delta_{\max}$ (mm)	降伏せん断耐力 Q_y (kN/本)	限界せん断耐力 Q_c (kN/本)	せん断耐荷力 計算値 Q_{cal} (kN/本)	破壊 モード	バネ定数k (kN/mm/本)		フレキシビリティ 定数S	
								M1	M2	M1	M2
CASE-A1	565	141	20.97	88	58	97	スタッド破断	518.2	518.4	0.92	0.92
CASE-A2	592	148	13.98	70	68	97	スタッド破断	613.9	260.9	0.85	1.30
CASE-A3	498	125	7.96	60	55	97	モルタルの破壊	414.5	232.7	1.03	1.38
CASE-A4	360	90	11.60	35	35	78	モルタルの破壊	373.0	103.9	1.09	2.06
CASE-B1	427	107	3.60	55	47	47	スタッド破断	303.0	—	1.21	—
CASE-B2	322	81	12.1	75	75	47	スタッド破断	4876.0	—	0.30	—
CASE-B3	418	105	26.9	80	79	47	モルタルの破壊	2048.0	—	0.46	—
CASE-B4	674	168	6.9	90	75	99	スタッド破断	377.0	—	1.08	—
CASE-B5	403	101	12.7	100	100	99	スタッド破断	4803.0	—	0.30	—
CASE-B6	410	103	19	95	95	86	モルタルの破壊	1103.0	—	0.63	—
CASE-C1	213	53	11.4	26	18	47	モルタルの破壊	42.0	—	3.24	—
CASE-C2	388	97	20	52	35	86	モルタルの破壊	69.0	—	2.53	—

注) 表中、せん断耐荷力計算値は文献 21)による値である。

(2) 低弾性モルタルを充填部に入れた場合のずれ性能

低弾性モルタル等の材料を充填部に入れて供試体を製作した CASE-A シリーズについて、相対ずれ δ の履歴曲線のピークの包絡線を図-3 に示す。また、CASE-A シリーズのバネ定数 k と作用せん断力 Q_s の関係を図-4 に示す。

表-3 において、フレキシビリティ定数 s とバネ定数 k の M1 とは、図-3 の曲線の最大作用荷重の 1/3 と原点を結ぶ割線剛性値である。また、M2 とは図-4 のせん断力比 (Q_s/Q_{sc}) が 1.0 の時の数値である。ここで、限界せん断力 Q_{sc} は、荷重-ずれ曲線の載荷・除荷の 1 サイクルが、 $\delta=0.08\text{mm}$ に達するときのオフセット値に相当する荷重であると定義した。また、フレキシビリティ定数 s は下式(1)で与えられる。

$$s = \sqrt{(k_0 \times L_d) / (k \times m)} \quad (1)$$

ここに、 k_0 ：基準バネ定数 1.96(kN/mm/mm)、 k ：スタッド 1 本当たりのバネ定数(kN/mm/本)、 m ：1 列当たりのスタッドの本数、 L_d ：ずれ止め間隔(mm)である。

表-3に示す通り、CASE-A1がCASE-A2,A3,A4よりもフ

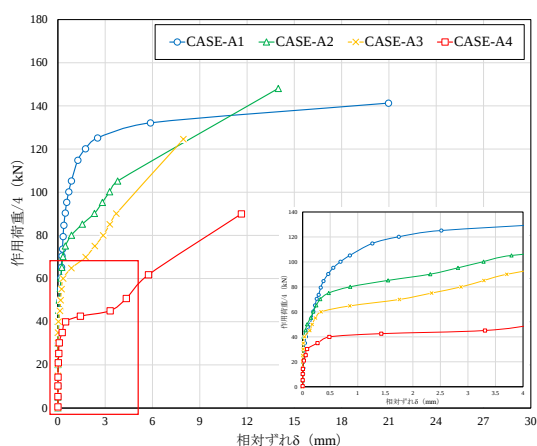


図-3 相対ずれ δ の履歴曲線のピーク包絡線(CASE-A)

レキシビリティ定数 s が低いことがわかる。フレキシビリティ定数 s が低いほど合成効果が高くなるということであり、高強度な無収縮モルタル材で充填した場合は、完全合成桁挙動に近くなるなることがわかる。また、CASE-A4は他の材料に比べフレキシビリティ定数 s が高く、ずれ変形しやすい傾向にあり、弾性合成桁に近い挙動を示すといえる。図-4に示す通り、せん断力比が0.6～0.8を超えてからすべての材料のバネ定数 k が低下しており、特にCASE-A4はバネ定数 k が最も低い値であることがわかる。

各CASE-Aシリーズの充填モルタルの弾性係数とフレキシビリティ定数 s について、M1, M2の関係を図-5に示す。同図から、充填モルタルの弾性係数が小さくなるとフレキシビリティ定数 s が大きくなり、弾性合成桁の挙動に近づくことが伺える。

(3) 低弾性モルタルを版下部に入れた場合のずれ性能

低弾性モルタル等の材料を版下部に入れて供試体を製作した CASE-B,C シリーズについて、相対ずれ δ の履歴曲線のピークの包絡線を図-6 に示す。

同図と表-3 から、CASE-B シリーズは版下モルタルに

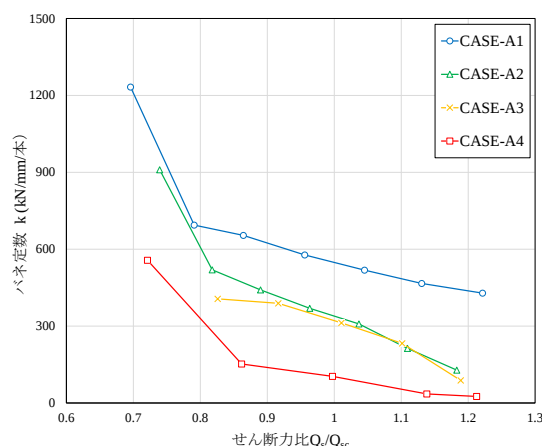


図-4 バネ定数と作用せん断力比の関係

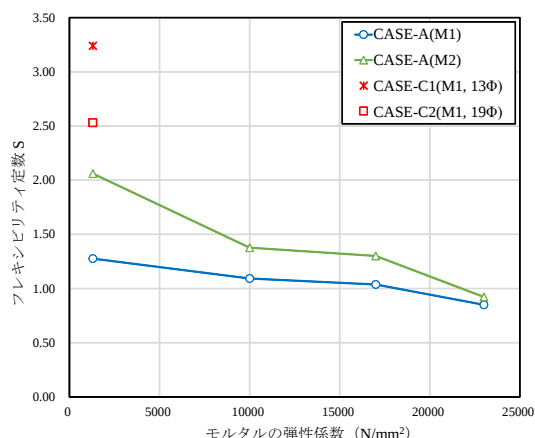


図-5 充填材の弾性係数とフレキシビリティ定数の関係

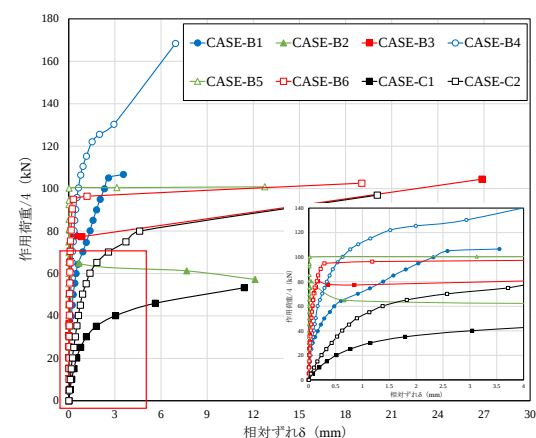


図-6 相対ずれ δ の履歴曲線のピーク包絡線(CASE-B,C)

低弾性材料を使用した、鋼桁上面の付着を切らずに施工しており、接着性の高いゴムラテモルタルや軽量樹脂モルタルを用いた場合のバネ定数 k は大きくなっていることがわかる。

特に、版下部に無収縮モルタルを使用したCASE-B1やCASE-B4よりも、ゴムラテモルタルを施工したCASE-B2,B5や軽量樹脂モルタルを施工したCASE-B3,B6の方が初期のずれが生じていないことがわかる。このように、鋼桁上面の付着力の影響が大きく、版下モルタルに低弾性な材料を施工してもそのバネ定数 k 等の値をコントロールすることは難しいといえる。

一方、CASE-Cシリーズは版下モルタルに軽量樹脂モルタルを使用した、鋼桁上面にグリスを塗って付着を無くすように施工しており、この場合のバネ定数 k は小さい値となっている。CASE-C1とCASE-C2のバネ定数 k は42.0, 69.0であり、フレキシビリティ定数 s がそれぞれ3.24, 2.53という大きな値となり、弾性合成桁の挙動になることが伺える。CASE-Cシリーズの版下に施工した軽量樹脂モルタルの弾性係数とフレキシビリティ定数 s について、M1の値を図-5にプロットしている。同図から、版下モルタルの弾性係数も小さくなるとフレキシビリティ定数 s が大きくなることがわかる。

4. まとめ

合成桁の床版にPCa床版を使用することを前提に、頭付きスタッド周辺の箱抜き部や版下部に弾性係数の低いモルタルを施工した供試体の静的押抜き载荷試験を行った。本研究の結果から、以下のことがわかった。

- (1) CASE-A シリーズの充填モルタルの弾性係数とフレキシビリティ定数 s について、充填モルタルの弾性係数が小さくなるとフレキシビリティ定数 s が大きくなり、弾性合成桁の挙動に近づくことが伺える。
- (2) CASE-B シリーズの版下モルタルで鋼桁上面の付着がある場合は、低弾性なモルタルを施工しても、相対ずれが生じにくくバネ定数が大きくなることがわかった。
- (3) CASE-C シリーズの版下モルタルで鋼桁上面の付着を無くした場合は、軽量樹脂モルタルを用いた供試体の相対ずれが大きくフレキシビリティ定数 s が大きくなり、弾性合成桁の挙動になる可能性があることがわかった。

以上のとおり、冒頭に述べた弾性合成桁の設計上の想定や課題を検討する事項のうち、頭付きスタッドを用いた場合のスタッド周辺箱抜き部の充填モルタルや、鋼桁とPCa床版の間に施工する版下モルタルの種類をパラメータとした押抜きせん断試験を行い、この部分に低弾性な材料を適用することで弾性合成桁としてのずれ変形領

域になることが確認できた。

しかしながら、弾性係数の低いこの種の充填材料を実施施工で適用することには、床版本体との強度差などの観点から抵抗感がある。また、PCa床版を用いず、場所打ちや合成床版の場合には適用困難となる。このような観点から、従来から検討されている頭付きスタッドを検討の対象にしぼり、スタッド径が小さいものを適用したり、スタッドの橋軸方向間隔を広げることにより、弾性合成桁としてのずれ定数は確保することができるかどうか、試算や実験的検討を行うことを検討中である。そのうえで、ずれ止めのフレキシビリティ定数 s の考え方を整理して、弾性合成桁設計法を確立することを今後の課題とする。

謝辞：本研究を遂行するに際して、(株)ADEKA殿より樹脂モルタルの鋼製材料の提供を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書（Ⅱ 鋼橋・鋼部材編）・同解説、丸善出版、2017.11
- 2) 大久保宣人、栗田章光、小松恵一、石原靖弘：グループスタッドの静的および疲労特性に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.48A, pp.1291-1398, 2002.3
- 3) 山本稔：不完全合成桁の曲げ理論、土木学会論文集、No.67, pp.1~10, 1960.3
- 4) 橋善雄、安達義雄：不完全合成桁について、土木学会論文集、No.112, pp.11~19, 1964.12
- 5) 小松定夫、佐々木孝：不完全合成格子桁橋の理論と近似計算法について、土木学会論文報告集、第 329 号, pp.27-37, 1983.1
- 6) 佐々木孝、小松定夫：不完全合成桁橋の合理的設計、橋梁と基礎、Vol.24, No.5, pp.23~28, 1986.5
- 7) 中島章典、溝江慶久：不完全合成桁の不完全度の簡易推定法、土木学会論文集、No.537/I-35, pp.89~96, 1996.4
- 8) 中島章典、池川真也、山田俊行、阿部英彦：ずれ止めの非線形挙動を考慮した不完全合成桁の弾塑性解析、土木学会論文集、No.537/I-35, pp.89-96, 1996.3
- 9) 中井博、山内幸裕、袴田文雄、酒造敏廣、山本竜太郎：プレキャスト床版を用いた負の曲げモーメントを受ける弾性合計桁の実験研究、土木学会構造工学論文集、Vol.34A, 1988.
- 10) 橋善雄：連続合成桁橋、理工図書、1966 年
- 11) 大垣賀津雄：既設合成桁の床版取替えにおける設計・施工上の課題について、土木学会、第 10 回道路橋床版シンポジウム論文報告集、pp.291-300, 2018.11.
- 12) 土木学会：連続合成桁における床版取替技術の現状と展開、複合構造レポート 17, 2021.9
- 13) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜きせん断試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状、1996.8

- 14) 桑原進太郎, 中島章典, Nguyen Minh Hai, 藤倉修一: 活荷重による非合成桁ずれ止めのせん断応答と疲労強度の比較検討, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.899-909, 2017.3
- 15) 田川泰久, 平城功一, 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, pp47-60, 1995.12
- 16) 小林崇, 中村定明, 馬場敏, 大山理: 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, プレストレストコンクリート工学会 第27回シンポジウム論文集, pp.395-400, 2018.
- 17) 松本崇志, 浅野文佳, 小林駿祐, 光川直宏, 山口隆司: モルタル薄層を有する頭付きスタッドで結合されたプレキャスト床版の押抜き試験, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.914-927, 2020.3
- 18) 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, Vol.68, No.2, pp331-346, 2012.6
- 19) 石川敏之, 寺田典生, 福永靖雄, 中村和己, 田中一: カップラージョイントスタッドのせん断耐力および疲労強度特性, 構造工学論文集, Vol.47A, pp1355-1362, 2001.3
- 20) 大垣賀津雄, PHAM NGOC VINH, 石田学, 赤江信哉, 今川雄亮: プレキャスト床版を有する弾性合成桁のずれ止め性能に関する基礎実験研究, 土木学会第76回年次学術講演会概要集第1部, 第76巻, 2021.9
- 21) 土木学会: 複合構造標準示方書 [2014年制定] 設計編, 2015.5

(Received September 10, 2021)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE DISPLACEMENT PERFORMANCE OF ELASTIC COMPOSITE GIRDERS WITH PRECAST PC SLABS

Kazuo OHGAKI, Ngoc Vinh PHAM, Syoichiro WATANABE, Manabu ISHIDA, Shinya AKAE, Yusuke IMAGAWA, Toshiyuki ISHIKAWA and Nobuhito OKUBO

In recent years, large-scale repairs and renewal works of bridge have been carried out. From the viewpoint of workability and durability, replacement work is being carried out from RC slabs to precast PC slabs. When a precast PC slab is used for the composite girder, it becomes difficult to place shear connectors near the end of the girder, which has a large horizontal shear force.

Therefore, in most cases, the headed studs required for composite girders cannot be placed. Therefore, in this study, on the premise that a precast PC slabs is used for the composite girder, the push-out test of shear connector specimen filled with a low elastic mortar in the boxed part around the headed stud and the under of slabs.