

2. プレストレスジョイントの特徴

今回、技術開発を進めている PSJ を用いた PCa 床版は、床版同士の接合面に PSJ を埋込み、床版を押し込むことで一体化を図ることにより、主に以下の特徴を有する。

- 1) PCa 床版の薄厚化による軽量化が可能となる。
- 2) 間詰め部のコンクリート打設などの現場作業の省略により、急速施工が可能となり、安全性が向上する。
- 3) 接合部にプレストレスを導入することにより継手部の耐久性が向上する。
- 4) オスボルトに PE シース内に納め、プレグラウト樹脂を注入しておくことで施工誤差を吸収できる可動域を設けるとともにグラウト作業が不要となる。

3. ワンタッチ接続およびプレグラウト機構

3.1 ワンタッチ接続

PSJ は、シールドセグメントのリング間継手（長手方向継手）として使用されているピン挿入型継手の技術を PCa 床版用に適用させたものである。その構成部品を図 - 2 に、ワンタッチ接続の仕組みを図 - 3 に示す。PSJ はオスボルトをメスボルトに設置されたコマに押し込むことでボルトを一体化させるとともに、皿ばねがコマを押し付けることにより引抜き力に抵抗する機構を有する機械式継手である。

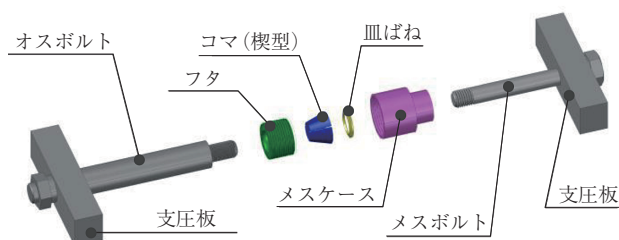
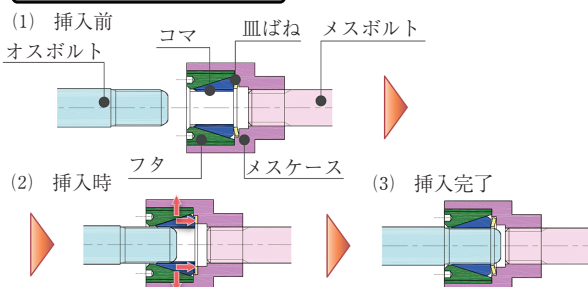


図 - 2 PSJ の構成部品図

◇ワンタッチ接続の仕組み



ピン挿入に伴い、コマが拡がりながら挿入方向に下がる

◇引抜き力の伝達



図 - 3 PSJ の接合構造

3.2 プレグラウト機構

プレグラウト技術とは、あらかじめ工場で PC 鋼材に後硬化型の樹脂を塗布し、PE 被覆を施すことにより、施工現場でのグラウト作業を不要とする PC 鋼材であり、グラウト作業の省略による工期短縮および工場製作による信頼性向上を目的とした技術である。プレグラウト PC 鋼材は、「エポキシ樹脂を用いた高機能 PC 鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針（案）⁵⁾」（以下、土木学会指針）に標準化されている。

PSJ のオスボルトにプレグラウト加工を施すことで、PSJ を接合したあと、プレストレスの導入を可能とする構造とした。併せて、床版の接合を適切に実現させるために、架設時の PCa 床版相互の施工誤差・位置決め誤差を吸収できる誤差吸収機構を開発し、付与した。この際、誤差吸収の可動域としては PCa 床版の製作誤差、クリープ、および収縮量の違いによる相対変形量および架設時の施工誤差を考慮して 5 mm とした。

プレグラウト機構の概要を図 - 4 に示す。ナット側の端部はねじ嵌合である PE リングと熱収縮チューブ、接合面の端部は緩衝材と熱収縮チューブによる端部処理を施し、PE シース内でのオスボルトの可動性を確保するとともに、プレグラウト樹脂の漏れを生じない構造とした。

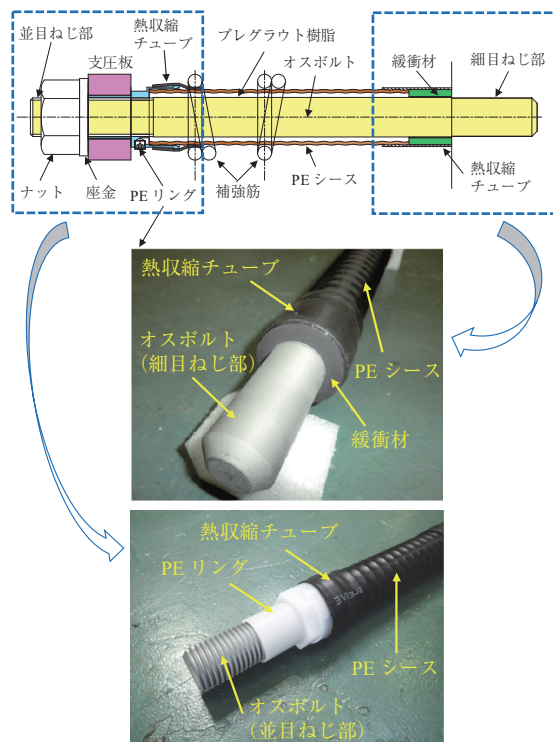
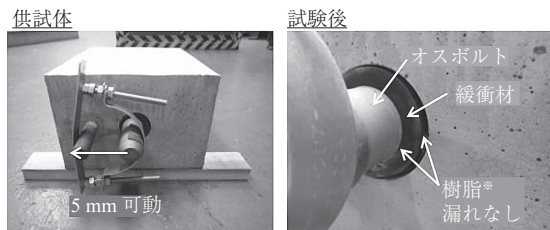


図 - 4 プレグラウト機構の概要

本構造による誤差吸収機構を有することおよびプレグラウト樹脂が漏れないことを実験的に検証するため、写真 - 1 に示すようなオスボルトを 5 mm 可動させた状態のコンクリート供試体を作製し、樹脂漏れ確認試験を実施した。その試験期間として、床版の製造および架設までの期間と温度を考慮し、最初に恒温槽を用いて 70℃ 環境下で 1 ヶ月、その後恒温槽から取り出し、常温の環境下で 6 ヶ月経過す

るまで観察した。試験結果は、写真 - 1 に示すように計 7 ヶ月後においても樹脂漏れは認められず良好であった。



※湿気硬化型樹脂（有効付着強度の発現期間が 2～4 年程度）を供試

写真 - 1 樹脂漏れ確認試験

4. プレストレスジョイントの性能確認試験

PSJ の性能確認として、ワンタッチ接続の接合性能（押込み試験、引抜き試験）、機械的性能（耐疲労性試験、リラクセーション試験）、耐食性（塩水噴霧試験、耐遅れ破壊抵抗性試験、耐アルカリ性試験）およびそのほかの性能確認試験を実施した。

4.1 押込み試験および引抜き試験

PSJ のオスボルトおよびメスボルトの材料諸元を表 - 1 に示す。PCa 床版同士の一体化に用いる PSJ のオスボルトとメスボルトの嵌合に必要な押込み力を確認することおよび嵌合された PSJ が設計引張力に対して十分な強度を有することを確認するため、押込みおよび引抜き試験を実施した。

押込み試験は写真 - 2 に示すように、アムスラー試験機を用いて、オスボルトをメスボルト（ケース付き）の設定位置まで押込み荷重を行い、押込み荷重と鉛直変位を測定した。押込み試験結果を表 - 2 に、押込み荷重と変位の関係を図 - 5 に示す。押込み力の最大値は 17～33 kN 程度とばらつきがあるが、おおむね押込み力 20～30 kN の範囲で押込みが可能な結果であった。図 - 5 に示すように、押込み力は連続的に上昇と下降を繰り返し、そのピークはオスボルトの細目ねじ加工間隔ごとに発生し、押込み開始直後から押込み変位が増加するにしたがい押込み力もゆるやかに増加した。

引抜き試験は、押込み試験終了後の締結された PSJ の試験体を用いて写真 - 2 に示すようにメスボルトとオスボルトの軸方向に引抜き力を与え、そのときの引抜き力および鉛直変位を計測した。引抜き試験の荷重方法としては、残留変形や嵌合部の拔出し量を確認するため、設計許容荷重 (P_{Sa})、プレストressing 中の上限荷重である設計導入荷重 (P_{Bo})、オスボルトとメスボルトの設計引張荷重 (P_t) で除荷を行う繰返し荷重方式を採用した。引抜き荷重と変位の関係を図 - 6 に、引抜き試験結果を表 - 3 に示す。試験結果より、設計許容荷重 $P_{Sa}=433$ kN が作用する時点の嵌合部の変位は 0.20～0.43 mm、また設計導入荷重 P_{Bo} での嵌合部の変位は 0.27～0.54 mm 程度であった。この結果から床版同士の接合面の目開きへの影響が少ないことが確認された。さらに、設計許容荷重 P_{Sa} および設計導入荷重 P_{Bo} に対して十分な剛性を有することが同時に確認された。

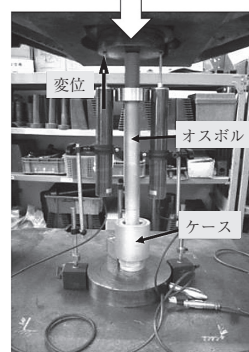
また、各試験体とも設計降伏荷重 $P_y=736$ kN までは荷重 - 変位関係は直線関係となり、実降伏荷重は、設計降伏

荷重 P_y （公称値）を上回ると判断される。さらに、試験体 No.1 を設計引張荷重 $P_t=817$ kN まで荷重したのちに嵌合部を分解し観察した結果、とくに異常は認められなかった。試験体 No.2 および No.3 の最終破壊荷重は、設計引張荷重 $P_t=817$ kN を上回る 912～914 kN であった。その際の PSJ ボルトの破断位置は、断面積がもっとも小さいオスボルトの M36 並目ねじ部であった。以上より、PSJ 嵌合部は十分な耐力を有することが確認された。

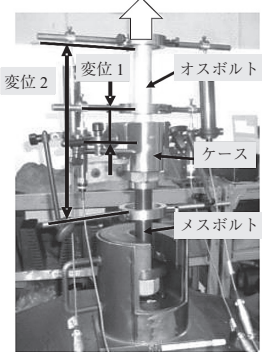
表 - 1 オスボルトおよびメスボルトの材料諸元

形状			機械的性質			
ボルト径 (mm)	並目ねじ部	ねじ有効断面積 (N/mm ²)	引張強度 P_t		耐力 P_y	
			(N/mm ²)	(kN)	(N/mm ²)	(kN)
37	M36 × P4.0	817	1 000	817	900	736

押込み試験



引抜き試験



変位 1：オスボルト + ケース + メスボルトの変位を計測
変位 2：オスボルト + ケースの変位を計測

写真 - 2 押込み試験および引抜き試験状況

表 - 2 押込み試験結果の一覧

	押込み荷重 (kN)			
	No.1	No.2	No.3	平均値
最大荷重	32.64	20.61	17.18	23.48
最小荷重	6.87	5.15	5.15	5.72

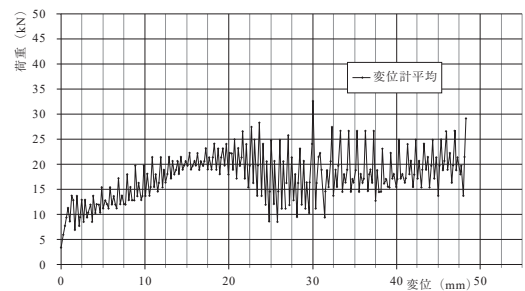


図 - 5 押込み試験結果 荷重 - 変位図 (No.1)

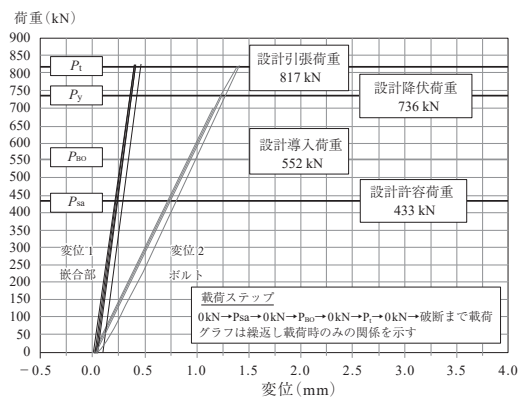


図 - 6 引抜き試験結果 荷重 - 変位図 (No.2)

表 - 3 引抜き試験結果の一覧

荷重 kN	鉛直変位 (mm) 変位計 2 (変位計 1)		
	No.1	No.2	No.3
0	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
100	0.23 (0.07)	0.17 (0.06)	0.29 (0.15)
200	0.39 (0.11)	0.34 (0.11)	0.51 (0.25)
300	0.56 (0.16)	0.50 (0.15)	0.72 (0.33)
400	0.73 (0.13)	0.66 (0.19)	0.90 (0.40)
$P_{Sa}=433$	0.79 (0.14)	0.73 (0.20)	0.97 (0.43)
500	0.91 (0.15)	0.83 (0.24)	1.12 (0.51)
$P_{Bo}=552$	0.99 (0.16)	0.92 (0.27)	1.22 (0.54)
600	1.07 (0.17)	1.00 (0.30)	1.32 (0.60)
700	1.24 (0.18)	1.18 (0.34)	1.50 (0.65)
$P_y=736$	1.31 (0.19)	1.23 (0.36)	1.58 (0.68)
$P_t=817$	1.47 (0.20)	1.40 (0.40)	1.75 (0.73)
0	0.07 (0.21)	0.05 (0.09)	0.39 (0.38)
破断荷重 kN (N/mm ²)	—	914 (1 119)	912 (1 116)
破断位置	—	オスボルト M36 並目ねじ部	オスボルト M36 並目ねじ部

4.2 耐疲労性試験

耐疲労性試験は、PSJ のオスボルトとメスボルトを嵌合した状態で油圧サーボ式疲労試験機を用い、軸引張疲労荷重を与える方法により試験を行った。供試体は予備試験の小径サイズの M30 および本試験の実大サイズの M36 とし、疲労試験条件として「Recommendations for the acceptance of post-tensioning systems⁶⁾」(FIP 規格)に示される条件に加え、応力範囲をより高くした安全側の条件についても実施した。

試験結果を表 - 4 に試験状況を写真 - 3 に示す。いずれのねじにおいても FIP 規格の条件 (供試体 No.1 および No.3) に対して 200 万回繰返し後も破断せず、十分な耐疲労性を有することが示された。

表 - 4 耐疲労試験結果の一覧

供試体		疲労試験条件		試験結果
No.	ねじの呼び	上限荷重	応力範囲 (N/mm ²)	
No.1	M36	0.65 P_t	80 (FIP 規格の条件)	200 万回 未破断
No.2	M36	0.65 P_t	100 (FIP 規格の条件 $\times 1.25$)	200 万回 未破断
No.3 (予備試験)	M30	0.65 P_t	80 (FIP 規格の条件)	200 万回 未破断
No.4 (予備試験)	M30	0.65 P_t	120 (FIP 規格の条件 $\times 1.5$)	43 万回 破断

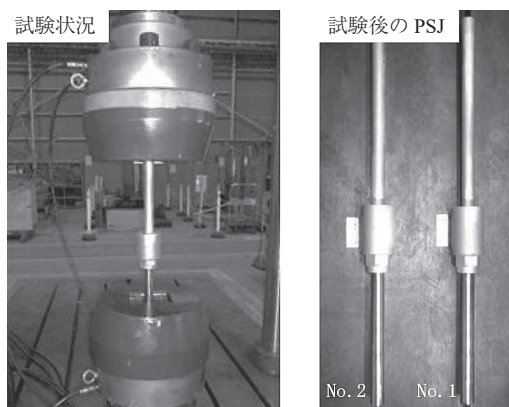


写真 - 3 耐疲労性試験状況

4.3 リラクゼーション試験

リラクゼーション試験は、「PC 鋼棒」(JIS G3109) に則って行い、0.7 P_t の初期試験力にて伸びを一定にした状態で 1 000 時間後の荷重低下率を測定した。試験状況を写真 - 4 に、試験結果を図 - 7 に示す。オスボルトとメスボルトの嵌合品で 2.41 %、オスボルト単体で 0.53 % の結果であった。この値は、JIS 規格に規定される 4 % 以下を満足していることから、PSJ は PC 鋼棒に準拠した設計が可能と考えられる。

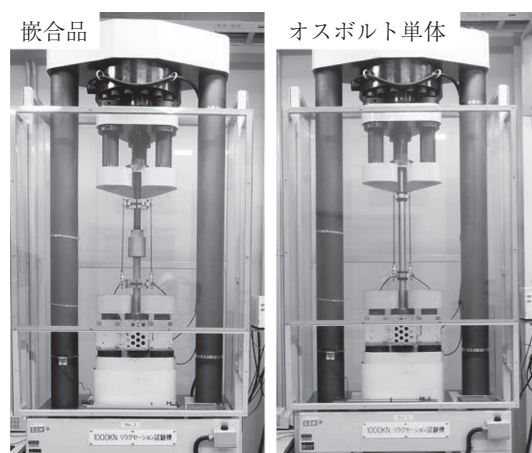


写真 - 4 リラクゼーション試験状況

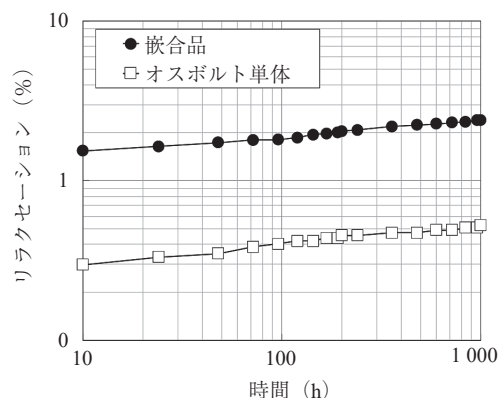


図 - 7 リラクゼーション試験結果

4.4 塩水噴霧試験

耐食性の評価として、プレグラウト PC 鋼材の土木学会指針に準拠し、「塩水噴霧試験方法」(JIS Z2371) にのっとって 1 000 時間塩水噴霧試験を行った。試験状況を写真 - 5 に示す。試験体の種類としては、ボルト表面にダクロダイズド処理+プレグラウト加工、ダクロダイズド処理のみ、比較として電気亜鉛めっき処理の3とおりとした。試験結果の一覧 (図 - 8) より、プレグラウト加工したオスボルトの表面に変状は認められず、プレグラウト加工の優れた耐食効果が確認された。また、ダクロダイズド処理したオスボルトおよびメスボルトの部品に白色亜鉛酸化物が認められたが赤錆は発錆しておらず、電気亜鉛めっき処理と比較し耐食性に優れていることが確認された。

塩水噴霧
試験機試験体
配置状況

写真 - 5 塩水噴霧試験状況

	表面処理および加工	試験前	試験後 (1 000 時間後)	結果	評価
オスボルト	ダクロダイズド処理 + プレグラウト加工			変状および腐食なし	土木学会指針 を満足
	ダクロダイズド処理			赤錆なし 白色亜鉛酸化物あり	良好
	電気亜鉛めっき (参考比較)			赤錆あり	不合格
メスボルト 部品の一例 (コマ)	ダクロダイズド処理			赤錆なし 白色亜鉛酸化物あり	良好
	電気亜鉛めっき (参考比較)			赤錆あり	不合格

図 - 8 塩水噴霧試験の結果

4.5 遅れ破壊抵抗性試験

遅れ破壊抵抗性試験は、「20% チオシアン酸アンモニウム溶液中でのPC鋼材の水素脆化試験方法⁷⁾」(JSCE S1201)に準拠して試験を行い、50℃のチオシアン酸アンモニウム水溶液中で、PSJ用ボルトの実引張強さの80%に相当する荷重を載荷し、破断までの時間を計測した(写真-6)。試験の結果(表-5)、「Technical report tendons⁸⁾」(FIP)のプレストレストコンクリートに用いられるφ25mm以上の鋼棒に対する規格の累積破断確率50%における破断時間400時間以上の値を満足することを確認した。

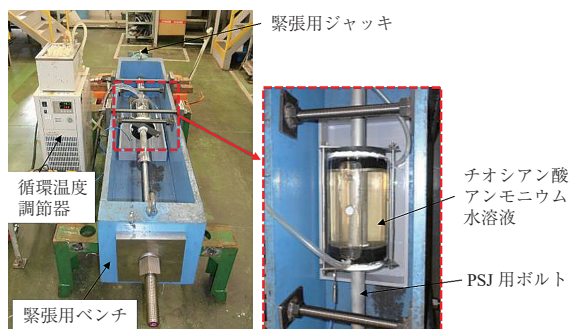


写真 - 6 遅れ破壊抵抗性試験の試験装置

表 - 5 遅れ破壊抵抗性試験の結果

評価基準	・最小破断時間 100 時間以上 ・累積破断確率 50 % で 400 時間以上		
	No.1	No.2	No.3
試験結果	435 時間 未破断試験停止	480 時間 未破断試験停止	528 時間 未破断試験停止

4.6 耐アルカリ性試験

プレグラウト加工を施すオスボルトについて、土木学会指針に規定される耐アルカリ性試験(JSCE-E 145)を行った(写真-7, 8)。1 000 時間浸漬後において、PE シースおよびオスボルトの浸漬部と未浸漬部に差異は認められず、十分な耐アルカリ性を有することを確認した。



写真 - 7 耐アルカリ性試験状況

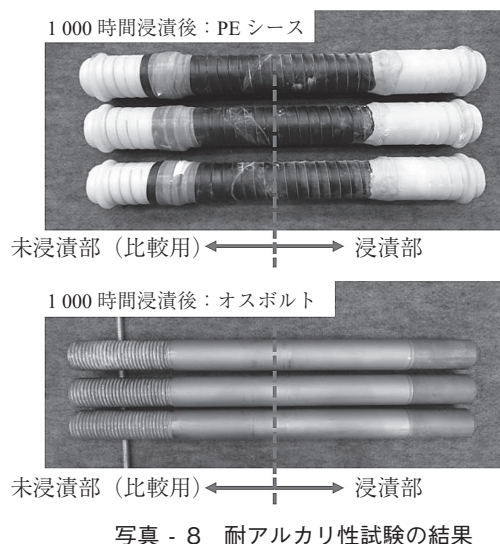


写真 - 8 耐アルカリ性試験の結果

4.7 付着特性試験

付着特性の性能確認として、土木学会指針に規定されるプレグラウト PC 鋼材の付着特性試験（JSCE-E 145）に準拠して試験を行った。試験状況を図 - 9 に、試験結果を表 - 6 に示す。試験の結果、プレグラウト未加工のオスボルトと同等以上の付着応力度を示した。また、この値は、道路橋示方書・同解説（平成 8 年 12 月）に記載されるコンクリート設計基準強度 60 N/mm^2 の時の丸鋼の許容付着応力度 10 kg/cm^2 （ $\approx 1.0 \text{ N/mm}^2$ ）に比べても十分な結果であった。

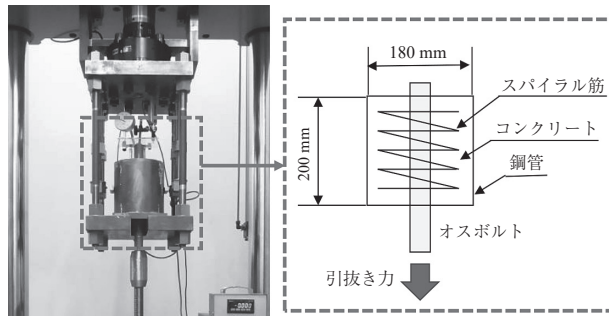


図 - 9 付着特性試験状況

表 - 6 付着特性試験の結果

	最大応力度 (N/mm^2)					
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	平均※
プレグラウト加工を施したオスボルト	41.44	4.00	4.28	5.21	2.60	4.50
プレグラウト未加工のオスボルト	2.14	2.05	2.05	2.23	2.23	2.14

※平均値は最小値と最大値を除外して計算

5. おわりに

本稿では、PCa 床版に適用する PSJ として、新たな継手構造のシステム（ワンタッチ接続およびプレグラウト機構）の開発および PSJ 本体の性能照査として種々の性能確認試験を行った。性能確認試験の結果をまとめると以下のとおりである。

- ・ 押込み試験の結果、押込み力の最大値は $17 \sim 33 \text{ kN}$ 程度であった。引抜き試験により、嵌合部の引張性能はボルトの設計引張荷重 P_t (817 kN) 以上であった。
- ・ 耐疲労性試験はねじの呼び M36 および M30 に対して試験を行い、FIP に規定される上限荷重 $0.65 P_t$ 、応力範囲 80 N/mm^2 以上、繰返し回数 200 万回の耐疲労性を有することを確認した。
- ・ リラクセーション特性は PC 鋼棒の規格である 4.0% 以下を満足した。
- ・ 耐食性に対して、オスボルトはダクロダイズド処理＋プレグラウト加工しており、メスボルトおよびその部品はダクロダイズド処理を施している。1 000 時間塩水噴霧試験、遅れ破壊抵抗性試験および耐アルカリ性試験を実施し、良好な結果が得られた。
- ・ 付着特性試験の結果、プレグラウト未加工のオスボルトと同等以上の付着応力度を示し、土木学会指針の規定を満たすことを確認した。

本稿は、阪神高速道路 (株)、清水建設 (株)、昭和コンクリート工業 (株)、ユニタイト (株)、住友電気工業 (株) による共同研究成果の一部に関する報告である。本共同研究の遂行に対し、ご指導頂いた関係各位に深く謝意を示します。

参考文献

- 1) Koshiishi, 他 5 名：Development of a Novel Prestressed Joint System for Precast Slab, *fib Congress*, 2018.10
- 2) 小林 顕, 新名 勉, 奥石正己：プレストレスジョイントを用いた PCa 床版の設計, *コンクリート工学会年次論文集*, 2018.7
- 3) 小林 顕, 奥石正己, 新名 勉, 宮田勝治：プレストレスジョイントの性能確認試験, *土木学会第 73 回年次学術講演会公演概要集*, 2018.8
- 4) 新名 勉, 小林 顕, 奥石正己：プレストレスジョイントを用いたプレキャスト PC 床版の床版取替への適用検討, *土木学会第 73 回年次学術講演会公演概要集*, 2018.8
- 5) 土木学会：エポキシ樹脂を用いた高機能 PC 鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針（案）, 2010.
- 6) FIP, Recommendations for the acceptance of posttensioning systems, 1993
- 7) 腐食防食協会：20 % チオシアン酸アンモニウム水溶液中での PC 鋼材の水素脆化試験方法 JSCE S 1201, 2012
- 8) FIP, Technical report tendons, 1995

【2019 年 1 月 25 日受付】