

北陸地方における床版劣化の実態調査と高耐久プレキャスト床版の研究開発

(株)国土開発センター

金沢大学大学院

金沢大学

金沢大学 正会員

○浦 修造

菊地 弘紀

博(工) 深田 幸史

工博 鳥居 和之

Abstract : In the Hokuriku region, the countermeasures for deteriorated RC slab in road bridges due to both ASR and chloride attack by deicing salts have become an important issue. On the other hand, when the flyash (FA) produced at coal-burning power plant was incorporated in concrete mixtures, it will be expected to effectively improve the durability of concrete against both ASR and chloride attack. Currently, in the Hokuriku region, deteriorated RC slabs in NEXCO highways or regional roads are planned to newly replace by a highly durable Precast PC slab (PCa・PC) in their renovation works. In this study, the complex deterioration mechanisms of RC slab due to both ASR and chloride attack were investigated based on the inspection of deteriorated road bridges. Furthermore, the structural properties of highly durable PCa・PC slabs using FA concrete developed were confirmed by flexural and shear load capacity tests.

Key words : Deterioration mechanism, ASR, Chloride attack, Road slab, FA concrete

1. はじめに

昨年、NEXCOで大規模更新・修繕事業¹⁾が認可され、事業費の大きな割合を占めている道路橋RC床版や桁の取替えおよび補修・補強の検討が進められている。都市部の高速道路では、RC床版の主要な劣化原因として疲労が挙げられるが、地方部の道路橋では大型車の交通量が少なく、疲労が劣化原因になることはほとんどない。その一方で、北陸地方などの積雪寒冷地では、凍結防止剤 (NaCl) が多量に散布されるため、アルカリシリカ反応 (ASR) と塩害による鋼材腐食、さらに山間部では凍害が関与した複合的な劣化現象が発生²⁾しており、これらの劣化・抑制対策が求められている。しかし、劣化が顕著な山間部の橋梁で対策を実施する場合、RC床版が合成桁として設計されており、RC床版の撤去時には主桁や橋脚・橋台の補強が必要になる。さらに、急峻な山間部では迂回路の建設ができないために、供用または短期間の通行止めを前提にした、急速施工の開発が必要とされている。この状況下で、ASR、塩害および凍害などの複合的な早期劣化に対するフライアッシュ (FA) コンクリートの抑制メカニズムが明らかにされ³⁾、PC桁への適用として実桁の曲げ破壊試験による耐荷力性能の確認と実橋への実用化がされている⁴⁾。とくに、北陸地方では、高品質な分級FAの安定供給が可能になり⁵⁾、FAコンクリートを用いた構造物の耐久性向上、環境負荷低減、地域産業の活性化および地産地消の利点を生かす必要がある。そこで、本研究では、工期を短縮しコストを削減するため、工場製作で品質管理された高強度FAコンクリートを使用した高耐久プレキャスト(PCa)・PC床版に着目した。しかし、これまでASR、塩害および凍害に対する抑制対策として、FAコンクリートを用いたPCa・PC床版に対する材料特性や曲げ破壊および押抜きせん断破壊時の挙動特性を確認した事例はない⁶⁾⁻⁹⁾。そこで本研究では、高耐久FAコンクリートを用いたPCa・PC床版を開発するために、FA混入有無の実物大PCa・PC床版を作製し、その材料特性や曲げとせん断耐力を明らかにした。さらに、従来の早強ポルトランドセメントを用いたPCa・PC床版と比較することにより、新たな高強度FAコンクリートPCa・PC床版の有効性を検証した。

2. 北陸地方(石川県, 富山県, 福井県)でのRC床版劣化の実態調査

北陸地方は、河川の上流部に白山や立山などの火山があり、河川に流入する火山系岩石(安山岩や流紋岩質凝灰岩など)により、ほぼ全域でASRが発生している。とくに、石川県金沢市から福井県大野市を經由して岐阜県岐阜市に至る国道157号、福井県福井市から岐阜県高山市を經由して長野県松本市に至る国道158号、岐阜県岐阜市から富山県高岡市へ至る国道156号などでは、昭和31年または昭和39年の道路橋示方書にもとづく、RC床版を有する鋼道路橋が建設されている。これらの路線は、手取川ダム(国道157号)、九頭竜川ダム(国道158号)の取り付け道路として建設しており、その後、道路の管理が石川県および福井県に移管されている。また、庄川、手取川、九頭竜川から採取された反応性骨材が使用されていたため、**写真-1**に示すASRによる遊離石灰をともなった亀甲状のひび割れが床版下面に発生している。一方、白山や立山山麓に位置する路線では、標高が800mを超えるあたりから凍害の影響が顕著に現れている。これらのASRが生じた床版での圧縮強度ならびに静弾性係数を測定した結果を**図-1**に示す。ASRが発生すると、コンクリートの内部組織の弛緩やASRゲルの弾性的な性質により圧縮強度に対して静弾性係数が大きく低下し、いずれも静弾性係数の低下傾向が明確に認められた。



(1) 富山県内

(2) 石川県内

(3) 福井県内

写真-1 RC床版下面の劣化状況

橋梁部位ごとの塩分浸透状況を**図-2**に示す。冬期に散布される多量の凍結防止剤(NaCl)による塩分浸透が明確に確認され、塩害(外来塩分)が顕在化している。とくに、凍結防止剤による塩分浸透は、橋梁の縦断や横断勾配により、路面排水が集まるジョイントや地覆付近に影響が大きい。北陸地方でのRC床版劣化の特徴としては、3本主桁の鋼鉄構造でRC床版厚が18cmと薄く、建設時から乾燥収縮によるひび割れが発生していた。また、建設当時は床版防水層も設置されておらず、舗装内に浸透した凍結防止剤を含む路面排水と輪荷重による力学作用の複合的な要因で、ポットホール、ひび割れが比較的初期に発生し、約20年経過した段階で土砂化や床版上面鉄筋の腐食が生じている(**写真-2**)。さらに、反応性骨材を有する床版コンクリートには、凍結防止剤からのアルカリ供給により、ASR劣化が促進される。床版のような薄い部材で、ASR膨張が生じた場合、拘束力の小さい版厚方向への膨張を生じやすく、**写真-3**に示す床版中心部付近に水平方向のひび割れが生じる。このようなASR劣化が生じているRC床版でコア採取を行った場合、コアには水平方向ひび割れが確認できる。**写真-4**に示す骨材そのものにもひび割れが発生し、その周辺は濡れて

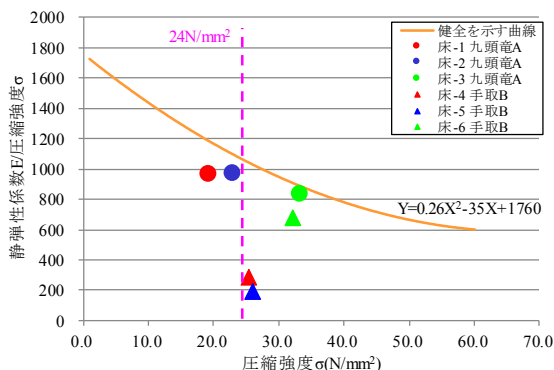


図-1 RC床版の圧縮強度と静弾性係数

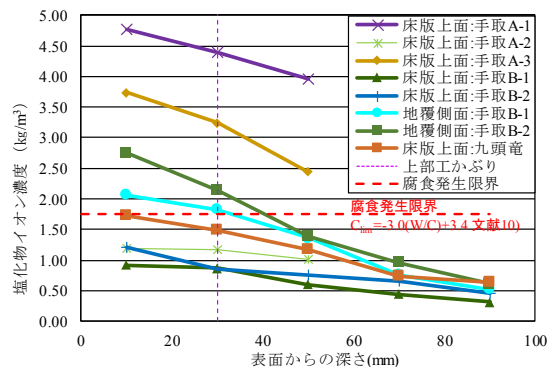


図-2 RC床版の塩化物イオン含有量状況

いる。これは、ASRひび割れに浸透した水が滞水したもので、標高の高い地区で凍害を誘発している。



写真-2 床版上面の劣化状況



写真-3 床版および採取コアに生じた水平方向ひび割れ



写真-4 骨材に生じたひび割れと濡れ

3. 高耐久FAコンクリートPCa・PC床版の研究開発

3. 1 試験概要

(1) 使用材料

本床版試験体は、早強ポルトランドセメントのみを使用した試験体（以下、H）と早強ポルトランドセメントにフライアッシュを混入した試験体（以下、H+FA）の2種類を作製した。使用材料を表-1に示す。フライアッシュは北陸電力七尾大田火力発電所産の分級フライアッシュ（平均粒径： $7\mu\text{m}$ ）を使用した。細骨材および粗骨材は庄川産の川砂および碎石を使用した。床版試験体は、設計基準強度を $50\text{N}/\text{mm}^2$ とし、表-2に示す配合とした。H試験体は、早強ポルトランドセメント単味の配合であり、H+FA試験体については、ASRに対する有効性を確認した既往の研究結果³⁾から、水結合材比をHの配合より3%程度小さくし、プレストレス導入時(16h)の強度を得ることや練り混ぜ直後のスランプロスを考慮して練り混ぜ直後のスランブを18cmとするとともに、結合材に対するフライアッシュの置換率を15%とした。本床版試験体で使用した鋼材は、D13(主鉄筋方向)、D19(配力鉄筋方向)である。PC鋼材は、主鉄筋方向に高強度PC鋼より線SWPR7BL(1S15.2)を上下それぞれ5本ずつ(合計10本)断面内に配置し、プレテンション方式で1本あたり189.8kNの緊張力でプレストレスを導入した。

(2) PCa・PC床版試験体の詳細

本床版試験体は実物大のPCa・PC床版を想定しており、主鉄筋方向4000mm、配力鉄筋方向1750mm、厚さ240mmの寸法とした。HおよびH+FAともに試験体サイズは同じである。試験体の配筋図を図-3に示す。

表-1 コンクリートの使用材料

使用材料	種類	性質	記号
セメント	早強ポルトランドセメント	密度： $3.14\text{g}/\text{cm}^3$	H
混和材	分級フライアッシュ (七尾大田火力発電所産)	密度： $2.43\text{g}/\text{cm}^3$ 、平均粒径： $7\mu\text{m}$ ブレーション比表面積： $4620\text{cm}^2/\text{g}$	FA
細骨材	川砂 (庄川産)	表乾密度： $2.57\text{g}/\text{cm}^3$	S
粗骨材	川砂利 (庄川産)	表乾密度： $2.61\text{g}/\text{cm}^3$ $G_{\text{max}20\text{mm}}$	G
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP
	AE剤	アニオン系界面活性剤	AE

表-2 コンクリートの配合

種別	粗骨材の最大寸法 (cm)	スランブ (cm)	水結合材比 (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m^3)				
					水 W	結合材		細骨材 S	粗骨材 G
						セメント C	混和材 FA		
H	20	12±2.5	38.7	4.5±1.5	150	388	—	816	950
H+FA	20	18±2.5	34.8	4.5±1.5	150	366	65	758	957

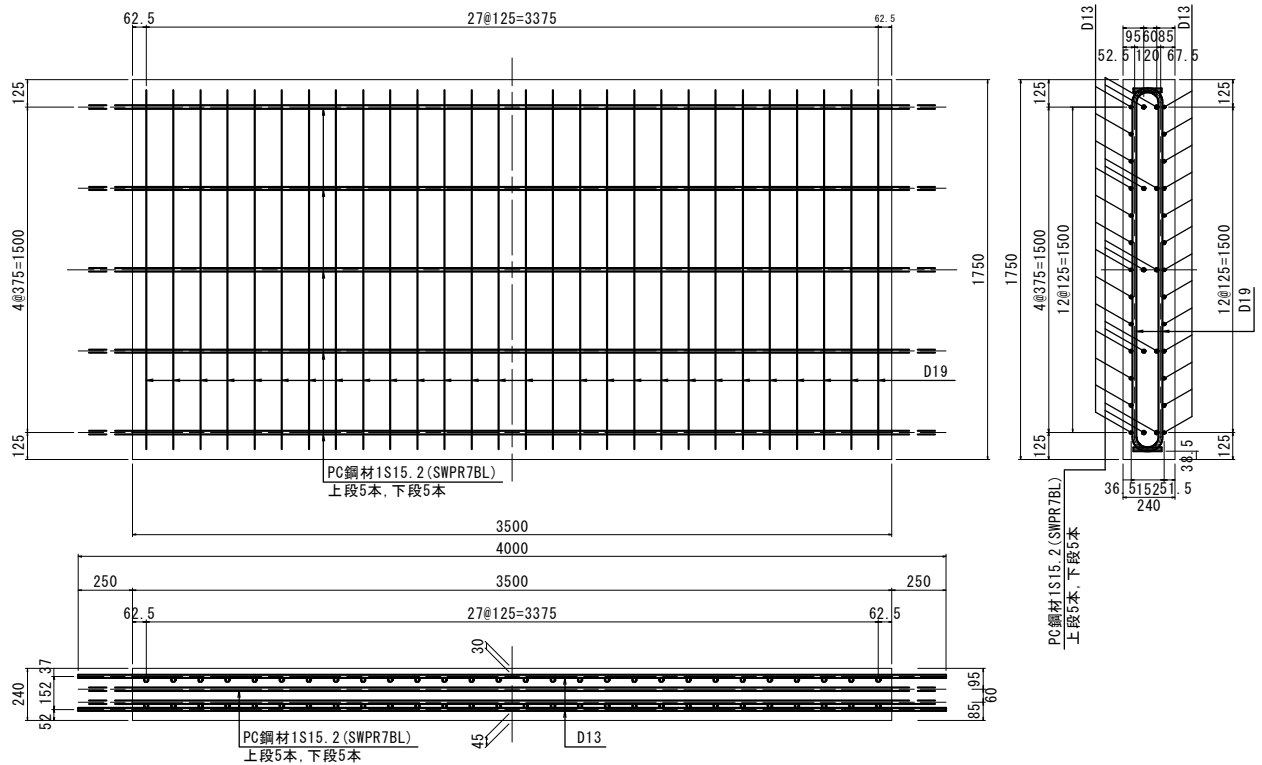


図-3 PCa-PC 床版 試験体の配筋図

3. 2 FAコンクリートの強度発現性

本床版試験体に用いたコンクリートの材料特性を示す。材料試験を行ったテストピースは、床版試験体と同じ養生条件にして、蒸気養生(15°C/hで温度上昇)を50°Cで5時間行い、その後、気中養生させた。図-4は、HとH+FAにおける材齢1日～実験時の材齢158日までの圧縮強度と材齢の関係を示す。いずれの場合も、設計基準強度の50N/mm²以上の強度を発現できている。また、材齢初期段階では、単味Hのほうが1.0～2.3%程

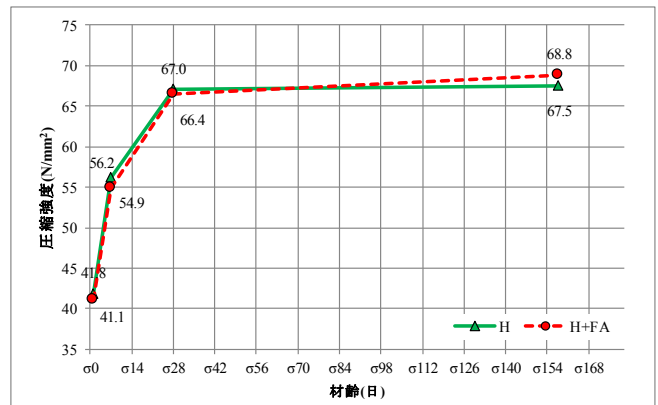


図-4 圧縮強度と材令の関係 高い強度発

現を示すが、材齢158日のときには、H+FAのほうが1.9%程度高くなっており、長期強度が増進していることがわかる。図-5には、材齢158日での圧縮強度と引張強度ならびに弾性係数の関係を示す。弾性係数は、ほぼ同程度の平均値を示し

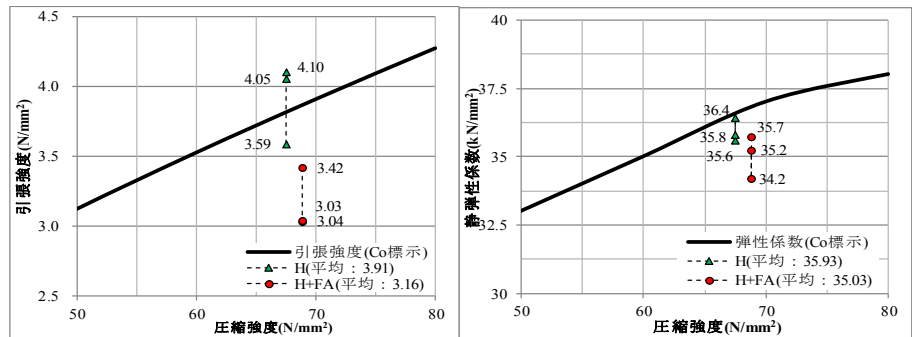


図-5 弾性係数および引張強度と圧縮強度の関係

ている。引張強度は、H+FAに比べて、Hのほうが平均値で23.7%高い傾向を示す。しかし、既往の実験¹¹⁾では、フライアッシュなどの混和材有無で圧縮強度と引張強度の性状が相違しないことが示されており、本研究でもH+FAにおける引張強度の平均値(3.16N/mm²)が、設計基準強度50N/mm²相当の引張強度(3.12N/mm²)以上を示していることから、FAコンクリートの材料性能は問題ないとする。

3. 3 FAコンクリートPCa・PC床版の耐荷試験

(1) 曲げ載荷試験

写真-5に曲げ載荷試験状況を示す。載荷試験は、支間長3m、載荷点間隔1mとした2点で荷重載荷する4点曲げ載荷で荷重制御により行った。H試験体およびH+FA試験体の載荷荷重と支間中央の鉛直変位（たわみ）の関係を図-6に示す。また、同図に載荷試験時試験体の実圧縮強度相当の70N/mm²として算出したひび割れ荷重、降伏荷重および終局荷重を付記した。H試験体ならびにH+FA試験体ともに、ほぼ同様の荷重曲線を示し、ひび割れ荷重291kN(理論値)に対して351kN(実験値)、降伏荷重586kN(理論値)に対して651kN(実験値)で、それぞれ勾配変化しており、計算値以上の性状を示している。また最終的な曲げ耐力は、H試験体で808kN、H+FA試験体で852kNとなり、H+FA試験体のほうが5.4%高くなった。これは、前述の材齢158日のH単味とH+FAでの圧縮強度の違い（H単味よりH+FAが1.9%程度高い）によるものである。これらの結果から、長期強度の増進による差が耐力に現れており、H試験体に比べてH+FA試験体は、同等もしくは、それ以上の耐力を有することがわかった。また、両試験体ともに計算上の終局荷重以上の性能を有していた。



写真-5 曲げ載荷試験状況

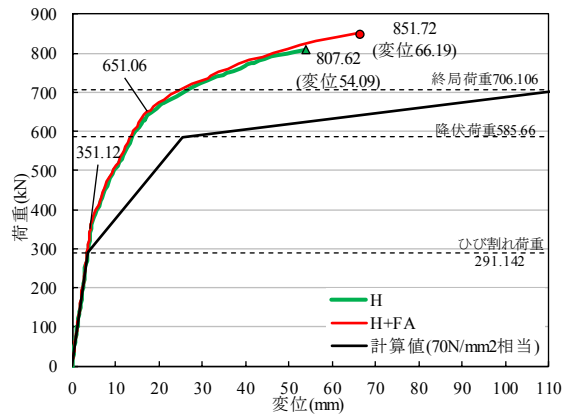


図-6 載荷荷重と鉛直変位(支間中央)の関係

(2) 押し抜きせん断載荷試験

写真-6に押し抜き載荷試験の状況を示す。押し抜きせん断載荷試験は、等方性版となるようにせん断支間と床版幅が1対1（1750mm）の2辺支持とした。支持方法は、曲げ成分が作用しないように破壊荷重相当となる力をPC鋼棒を片側5本ずつ試験体に貫通させて緊張力を与え支持した。なお、荷重載荷点は200×500の載荷板を用いて荷重を載荷した。押し抜きせん断載荷におけるH試験体およびH+FA試験体の載荷荷重と載荷点下面での鉛直変位の関係を図-7に示す。最終的なせん断耐力は、H+FA試験体1467kN、H試験体1381kNとなり、H+FA試験体のほうが6.2%高くなった。これは、前述の材齢158日のH単味とH+FAでの圧縮強度の違い（H単味よりH+FAが1.9%程度高い）が影響している。これらの結果から、長期強度増進による差が耐力に現れているが、H試験体に比べてH+FA試験体は同等または、それ以上のせん断耐力があることがわかった。これまでPC床版のせん断耐力を評価した研究^{8)・9)}から、今回の試験結果と比較した。載荷試験時の各試験体の実圧縮強度67.5 N/mm²、68.8N/mm²で計算した結果、文献9)から算出したせん断耐力は、それぞれ1328kN(H)と1343kN(H+FA)となり、



写真-6 押し抜きせん断載荷試験状況

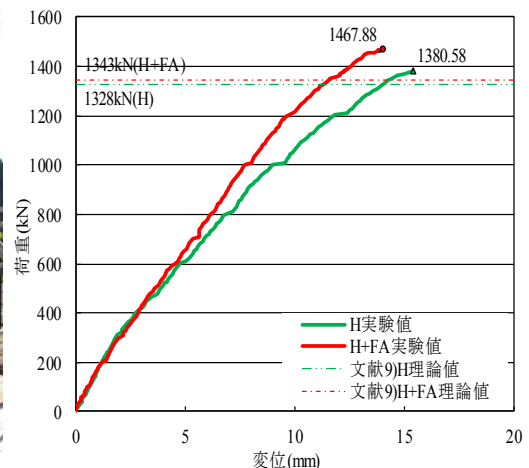


図-7 載荷荷重と鉛直変位の関係

4.0%~9.3%の変動が見られたが、理論値と同等以上のせん断耐力有していることがわかった。

4. まとめ

本研究では、北陸地方におけるRC床版劣化の実態調査をまとめ、劣化対策としてFAコンクリートを用いた高耐久PCa・PC床版の研究開発を行い、材料特性の確認ならびに曲げ・押し抜きせん断性能の有効性を確認した。本研究で明らかとなった事項は以下のとおりである。

- 1) 北陸地方は、手取川、九頭竜川、庄川産の反応性骨材（火山系岩石）が使用されており、全域でASRが発生していた。とくに、山間部の路線では、ASRと塩害、凍害が複合的に発生していた。
- 2) FAを混入したPCa・PC床版の強度発現では、初期強度は早強ポルトランドセメントに比べて1.0~2.3%劣るものの、長期強度では1.9%高くなった。また、弾性係数は、両者がほぼ同一であった。
- 3) 曲げ耐力は、H試験体で808kN、H+FA試験体で852kNとなり、H+FA試験体のほうが5.4%高くなった。これは、H単味とH+FAでの圧縮強度の違い（H単味よりH+FAが1.9%程度高い）によるもので、H試験体に比べてH+FA試験体は、同等もしくは、それ以上の耐力を有していた。
- 4) せん断耐力は、H+FA試験体1467kN、H試験体1381kNとなり、曲げ耐力と同様に、強度差による耐力の違いがあるが、H試験体に比べてH+FA試験体は同等または、それ以上のせん断耐力があった。

5. 謝辞

本研究は、独立行政法人 科学技術振興機構 SIPプログラム「コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基づくトータルマネジメントシステムの開発」により進められたものである。また、本研究で行った載荷試験では、(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 北陸支部の皆様のご協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) NEXCO東日本ホームページ：更新計画情報，<http://www.e-nexco.co.jp/koushin/pdfs/150116.pdf>
- 2) 石川裕一，足立嘉文，青山實伸，長井正嗣：疲労と凍結防止剤による塩害を受けた鋼橋RC床版の特徴と健全度評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1263-1272，2011.
- 3) 北陸電力株式会社：北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会 報告書（富山・石川・福井），2013.6
- 4) 山村智，椎野碧，桜田道博，中井聖棋：結合材15%を分級フライアッシュで置換したコンクリートの基礎物性および構造特性の検討，株式会社ピーエス三菱技報，第13号，2015.
- 5) 橋本徹，久保哲司，参納千夏男：産官学連携による北陸地方におけるコンクリートのフライアッシュ有効利用促進に向けた取組み，電力土木，No.361，pp.56-60，2012.
- 6) 石橋忠良，佐藤春雄，大庭光商：PCスラブの押し抜きせん断耐力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集10(3)，pp.109-114，1988.
- 7) 末弘保，石橋忠良，佐藤春雄，大庭光商：PCスラブの押し抜きせん断耐力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集11(2)，pp.149-152，1989.
- 8) 東山浩士，太田博士，朴滄珍，松井繁之：PC床版の押し抜きせん断耐荷力について，プレストレストコンクリート技術協会 第7回シンポジウム論文集，pp.13-16，1997.10.
- 9) 奥村征史，浜田純夫，松尾栄治，野村貞広：PC床版の押し抜きせん断耐力評価式に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.559-564，1999.
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編 2013年制定
- 11) 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源開発センター：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(II)，第472号，2016.1.