

論文 フライアッシュコンクリートを用いた実物大プレキャスト PC 床版の曲げおよび押抜きせん断耐力に関する研究

深田 幸史*1・浦 修造*2・小林 和弘*3・犬島 秀治*4

要旨: 北陸地方の道路橋床版においては、ASR、塩害および凍害などの早期劣化の問題を抱えており、これらの合理的な抑制対策としてフライアッシュコンクリートを用いることが標準化されつつある。このような背景のもと、高速道路における大規模更新、修繕事業が始まり、工期短縮、コスト縮減のために、本研究では、高耐久性プレキャスト PC 床版に着目した。プレキャスト PC 床版の高耐久化を実現させ、塩害や ASR などの早期劣化を生じさせないようにするため、本研究ではフライアッシュコンクリートを用いたプレキャスト PC 床版を開発した。さらに、曲げ載荷および押抜きせん断載荷試験を行い、フライアッシュ混入の有無による曲げおよび押抜きせん断耐力の違いを調べた。

キーワード: プレキャスト PC 床版, フライアッシュコンクリート, 曲げ載荷試験, 押抜きせん断載荷試験

1. はじめに

北陸地方の道路橋床版は、ASR、塩害および凍害などの早期劣化の問題¹⁾を抱えており、これらに対する合理的な抑制対策が求められている。このような状況下において、ASR²⁾、塩害³⁾などの早期劣化に対するフライアッシュコンクリートの抑制メカニズムが明らかにされ、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³⁾がされている。特に、北陸地方においては、高品質な分級フライアッシュの安定供給が可能になったことから⁴⁾、フライアッシュ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していく必要がある。

上記の背景のもと、高速道路における大規模更新、修繕事業が始まり、事業費の大きな割合を占めている道路橋床版の取替え、補修方法について検討が進められているなかで、本研究では、工期を短縮してコストを縮減するために、工場製作により品質管理された高耐久性のプレキャスト PC 床版に着目することにした。また、プレキャスト PC 床版の高耐久化を実現させ、塩害や ASR などの早期劣化を生じさせないために、フライアッシュコンクリートを使用したプレキャスト PC 床版を開発する必要があると考えた。しかし、これまで ASR、塩害および凍害などの早期劣化に対する抑制対策として、フライアッシュコンクリートを用いたプレキャスト PC 床版に対する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。

そこで本研究では、高強度のフライアッシュコンクリートを用いたプレキャスト PC 床版を開発するために、フライアッシュ混入の有無の実物大プレキャスト PC 床版を作製し、曲げ載荷試験および押抜きせん断試験を行うことで、フライアッシュ混入の有無による曲げおよび押抜きせん断耐力の違いを調べることにした。

2. 床版試験体の概要

2.1 コンクリート

(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 μ 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砕石を使用した。

表-1 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	C	早強ポルトランドセメント 密度:3.14g/cm ³
混和材	FA	分級フライアッシュ(七尾大田火力 発電所産) 密度:2.43 g/cm ³ , プレーン 比表面積:4620cm ² /g
細骨材	S	川砂(庄川産) 表乾密度:2.57 g/cm ³
粗骨材	G	砕石(庄川産) 表乾密度:2.61g/cm ³
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系
AE 剤	AE	アニオン系界面活性剤

*1 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 (株) 国土開発センター (学生会員)

*3 (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会 北陸支部 (正会員)

*4 (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会 北陸支部

表-2 配合

種別	組骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水結合材比 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	結合材 B		細骨材 S	粗骨材 G
						セメント C	フライアッシュ FA		
H	20	12.0	38.7	4.5	150	388	—	816	950
H+FA	20	18.0	34.8	4.5	150	366	65	758	957

(2) 配合

床版試験体は、設計基準強度を 50N/mm² 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る。また、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⁵⁾、分級灰の高品質化および施工性を考慮して、結合材に対するフライアッシュの置換率を 15% と設定した。また、プレストレス導入時(14h)の強度確保のために、H+FA の水結合材比は H 単味よりも 4% 小さくした。

(3) コンクリートの材料特性

本床版試験体に用いたコンクリートの材料特性として、早強ポルトランドセメント単味 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 H+FA における材齢 7 日と実験時の材齢 158 日での圧縮強度と材齢 158 日での引張強度と静弾性係数を表-3 にまとめた。圧縮強度は、材齢 7 日で H の方が H+FA よりも 2% 程度高いが、材齢 158 日では H+FA の方が 6% 程度高い結果になった。なお、材料試験を行ったテストピースは、床版試験体と養生条件を同一にして、打設後、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。

表-3 コンクリートの材料特性

種別	圧縮強度 (N/mm ²)		引張 強度 (N/mm ²)	静弾性 係数 (N/mm ²)
	σ ₇	σ ₁₅₈		
H	56.2	65.2	3.91	35.9
H+FA	54.9	68.8	3.16	35.0

2.2 鋼材

本床版試験体に使用した鋼材の材料特性を表-4 に示す。鉄筋は、SD345 の D13 (主鉄筋方向)、D19 (配力鉄筋方向) を用いた。

表-4 鋼材の材料特性

種別	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D13	405	569
D19	403	564
SWPR7BL 1S15.2	1710	1938

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。

2.3 床版試験体

本床版試験体は実物大のプレキャスト PC 床版を想定しており、主鉄筋方向 4000mm、配力鉄筋方向 1750mm (プレキャスト PC 床版部材の一般的な幅 2000mm よりループ継手部を控除した長さ)、厚さ 240mm の寸法とした。H および H+FA とともに試験体サイズは同じである。試験体の配筋図を図-1 に示す。なお、曲げ載荷試験と押抜きせん断試験に用いた試験体は、基本的な断面構成は、同じとした。

3. 載荷試験の概要

3.1 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験は、図-2 (a) に示すように支間長 3000mm、載荷点間隔 1000mm とした 2 点で荷重を載荷する 4 点曲げ載荷で荷重制御により試験を行った。支点は、丸鋼棒を用いて単純支持とした。計測項目は、荷重、床版の鉛直変位、支点部の変位および鉄筋ひずみとした。測点の配置を同図に付記した。

3.2 押抜きせん断載荷試験

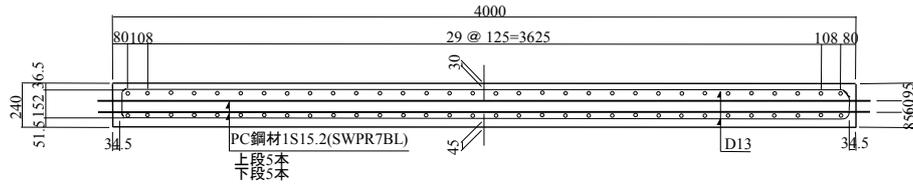
押抜きせん断載荷試験では、試験時に曲げ破壊に至らず、版としての押し抜きせん断挙動を確認できるように、図-2 (b) に示すようにせん断支間と床版幅が 1 対 1 (1750mm) となるように 2 辺支持とした。支持方法は、PC 鋼棒を片側 6 本ずつ試験体に貫通させ、ジャッキを用いて緊張力を与えることで固定支持した (図-3 参照)。荷重載荷点は、200×500 の載荷板を用いて荷重を載荷した。計測項目は、荷重、床版の鉛直変位、支点部の変位および鉄筋ひずみとした。測点の配置を同図に付記した。

4. 試験結果

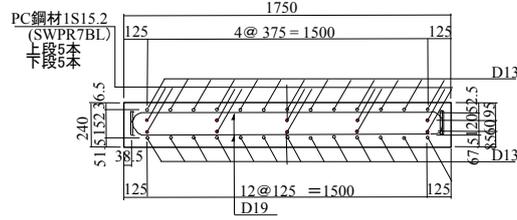
4.1 曲げ載荷試験

(1) 荷重-変位関係

H 試験体および H+FA 試験体における載荷荷重と支間中央 (載荷点) の鉛直変位の関係を図-4 に示す。また、載荷試験実施時の実強度 65N/mm² を用いて、道路橋示方書 (Ⅲ) による終局荷重を算出し、同図に付記した。

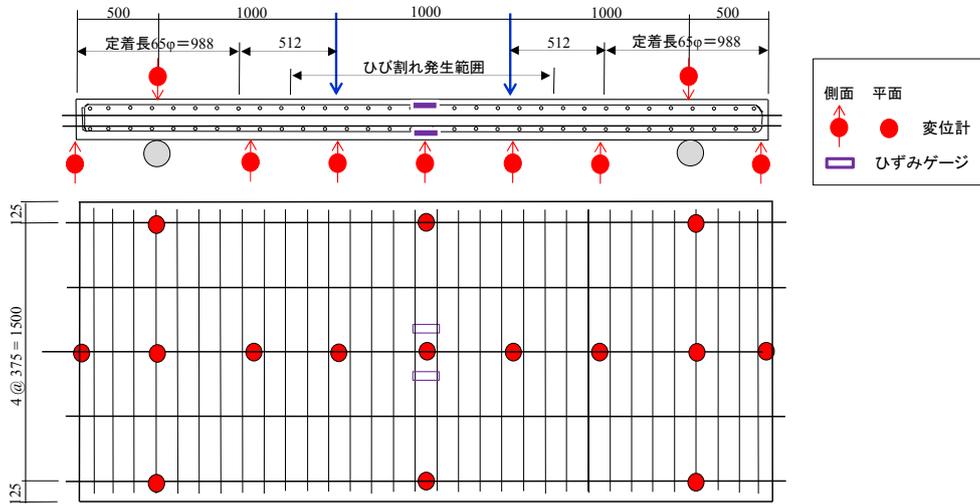


(a) 配力鉄筋方向に直交する断面

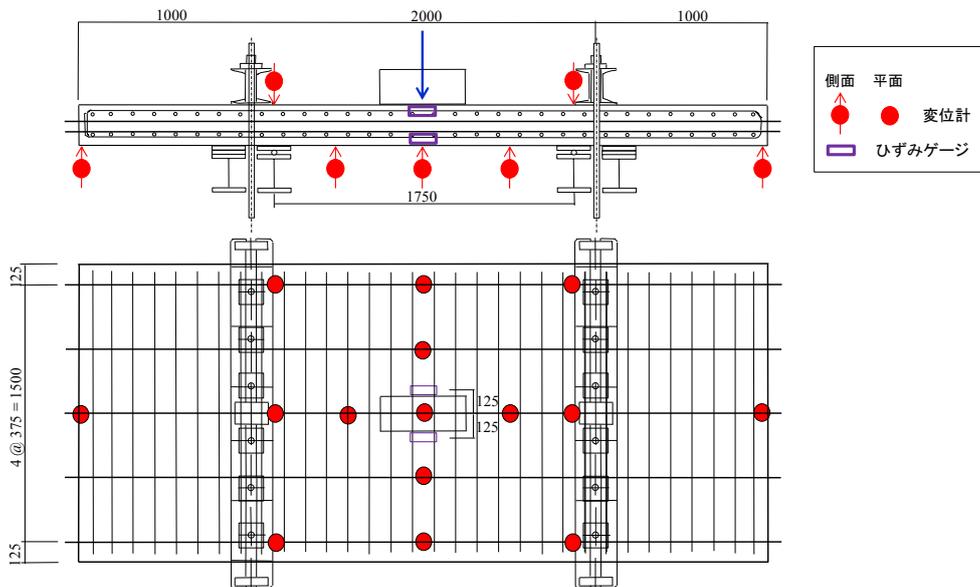


(b) 主鉄筋方向に直交する断面

図-1 床版試験体の配筋図



(a) 曲げ載荷試験



(b) 押抜きせん断載荷試験

図-2 各載荷試験における概要図と測点配置図

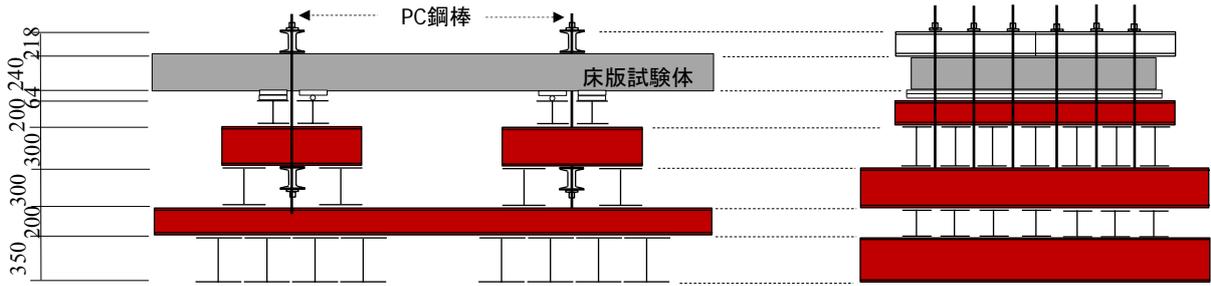


図-3 押抜きせん断載荷試験の概要図（左：側面図，右：断面図）

さらに、載荷荷重と支間中央の上下鉄筋ひずみ（主鉄筋方向）の関係を図-5 に示す。これより、下縁側鉄筋が降伏する 400kN までは両者の差はほとんど見られないが、それ以降、H+FA 試験体の鉄筋ひずみが大きくなり、徐々に荷重変位関係も H+FA 試験体の荷重値が大きくなっている。さらに、650kN 以降においては、同じ変位で比較すると、H+FA 試験体の方が H 試験体より荷重がやや大きくなっている。最終的な曲げ耐力は、H 試験体 808kN、H+FA 試験体 852kN となった。以上の結果をみると、H+FA 試験体は H 試験体に比べ、同等またはそれ以上の曲げ耐力があることがわかった。また、両試験体はともに計算上の終局荷重以上の性能を有していることも明らかになった。

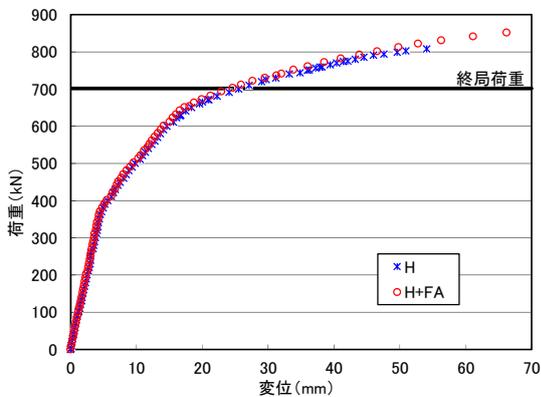


図-4 載荷荷重と鉛直変位（支間中央）の関係

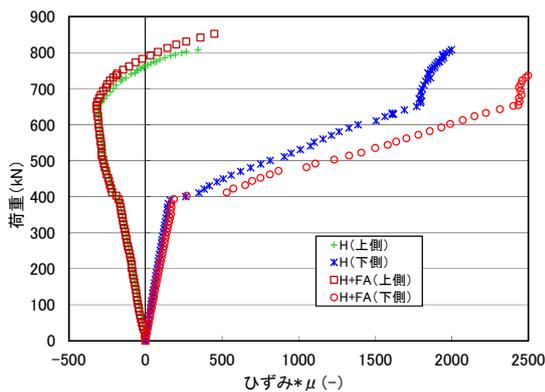
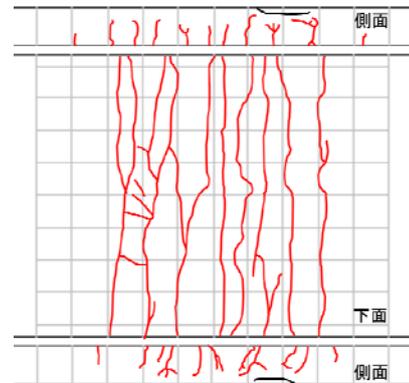


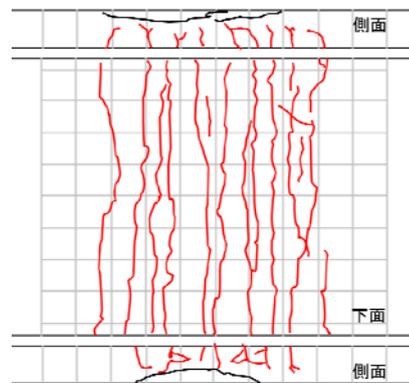
図-5 載荷荷重と上下鉄筋ひずみの関係

(2) ひび割れ性状

H 試験体および H+FA 試験体における曲げ載荷試験後のひび割れ性状を図-6 に示す。格子状の 1 辺は 20cm、剥離部分を黒線で示した。400kN 付近から支間中央の配力鉄筋方向にひび割れが発生し、徐々に支点方向にひび割れが広がっていった。最終的な破壊形態は、両者ともに上縁で圧壊を生じた圧縮破壊となった。このひび割れ性状を比較しても曲げ載荷に関しては、どちらも同じような性状となっていた。なお、プレストレスの分布が一定となっていない区間（定着長、図-2 (a) 参照) においては、ひび割れが発生しておらず、定着長とひび割れ発生範囲が十分離れていることを確認した。



(a) H 試験体



(b) H+FA 試験体

図-6 各試験体のひびわれ性状

4.2 押抜きせん断載荷試験

(1) 荷重—変位関係

押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。また、支間中央における上下鉄筋ひずみを用いて、断面のひずみ分布を求め、そのひずみ分布から上縁からの中立軸位置を算出し、載荷荷重との関係をまとめたものを図-8 に示す。

図-8 から、道路橋示方書 (I) の T 荷重 (片輪分) の倍にあたる 200kN 付近で中立軸位置が急変しており、下縁側の鉄筋が降伏したことがわかる。また、図-7 の 200kN 以降、同じ変位で比べると、H+FA 試験体の方が H 試験体より荷重が上回り、最終的なせん断耐力は、H+FA 試験体 1467kN、H 試験体 1381kN となった。これより、本試験結果から、H+FA 試験体のせん断耐力は、コンクリート強度の差を考慮すると H 試験体と同等程度で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⁶⁾⁷⁾から、今回の試験結果と比較した。載荷試験実施時の実強度 65N/mm^2 を用いて計算した結果、文献 6)および文献 7) から算出したせん断耐力はそれぞれ 1463kN および 1696kN となり、文献 6)による結果が試験結果に近いことがわかった。

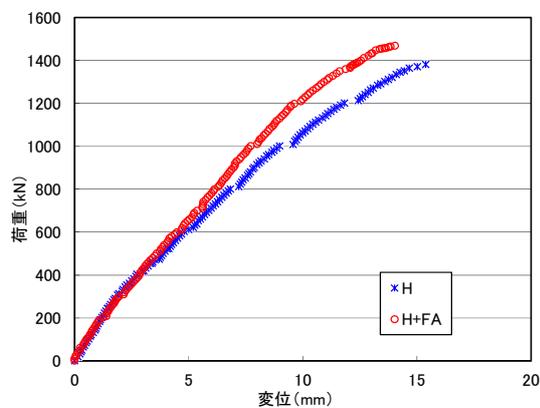


図-7 載荷荷重と鉛直変位の関係

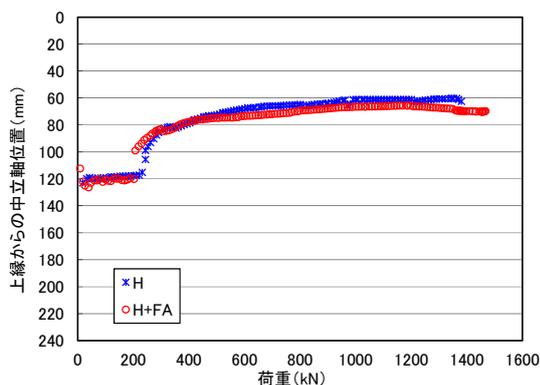
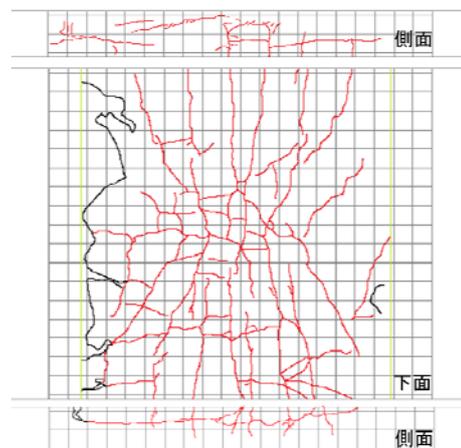


図-8 載荷荷重と中立軸位置との関係

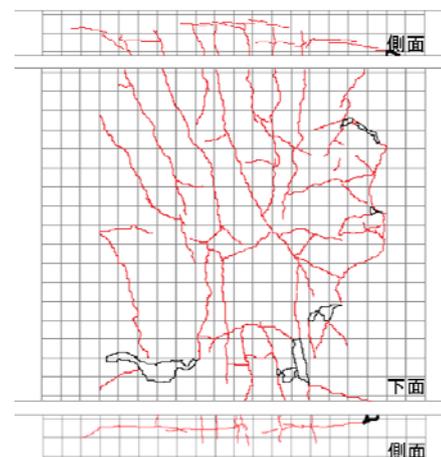
(2) ひび割れ性状

H 試験体および H+FA 試験体における押抜きせん断載荷試験後のひび割れ性状を図-9 に示す。なお、格子状の 1 辺は 10cm、剥離部分を黒線で示した。初期ひびわれは、どちらの試験体ともに約 200kN から配力鉄筋方向に出現した後、載荷点下面付近において主鉄筋方向にひび割れが拡大し、前出のひび割れと結合して格子状のひび割れとなった。載荷後のひび割れ図を見る限り、H+FA 試験体の方が H 試験体比べてひび割れ密度が小さい。

また、RC 床版のせん断耐力を評価するための破壊モデル⁸⁾では、せん断破壊面が 45 度となっているが、本試験体のように PC 床版の場合は、RC 床版とは違い、せん断破壊面が 45 度より小さくなることが知られている⁷⁾。H 試験体を例にして見ると、端面からの限定的な判断であるが、写真-1 に示すように、概ね 11~28 度のせん断破壊面となっており、45 度よりも小さいことを確認した。また、同写真の丸で囲った部分のように、ダウエル効果により PC 鋼材に沿ったコンクリートの剥離破壊が生じていた。これらのひび割れ性状は H+FA 試験体においても同様であった。



(a) H 試験体



(b) H+FA 試験体

図-9 ひび割れ性状

(3) 中立軸

PC 床版に対する押抜きせん断載荷試験を実施した事例が少ないことから、せん断耐力算定式に用いるパラメータに不明な点がある。その一つに中立軸の評価がある。

そこで、押抜きせん断載荷試験での H および H+FA 試験体における PC 床版の中立軸位置を算出したものが図-8 である。初期ひび割れが発生した 200kN 付近までは、通常の弾性挙動が確認され、最終耐力に達するまでに上縁から概ね 60-70mm に収束していることがわかり、H+FA 試験体の方が上縁から若干下側に位置していた。



写真-1 せん断破壊面の角度

5. まとめ

本研究では、プレキャスト PC 床版の高耐久化を実現させ、塩害や ASR などの早期劣化を生じさせないようにするため、フライアッシュコンクリートを用いたプレキャスト PC 床版を研究開発し、曲げ載荷および押抜きせん断載荷試験を実施した。

本研究で明らかになった事項は以下の通りである。

- (1) 早強ポルトランドセメント単味 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 H+FA における実験時の材齢 158 日での圧縮強度を比較した結果、材齢 158 日では H+FA の方が 6% 程度高い結果になっていた。
- (2) 曲げ載荷試験を実施したところ、両者の曲げ耐力は H 試験体 808kN、H+FA 試験体 852kN となった。両者ともに設計上の終局耐力以上の曲げ耐力を有していることが明らかになった。さらに、H+FA 試験体については、H 試験体と比較して、同等程度の曲げ耐力を有していることがわかった。
- (3) 押抜きせん断載荷試験から、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 試験体は、H 試験体と同等程度のせん断耐力を有していることがわかった。また、既往の文献から、せん断耐力を評価した結果、文献 6) による結果が試験結果に近いことがわかった。
- (4) PC 床版の場合は、RC 床版とは違い、せん断破壊面が 45 度より小さくなることが知られているが、本試験体の結果からも、概ね 11~28 度のせん断破壊面となっており、45 度よりも小さいことを確認した。また、ダウエル効果により PC 鋼材に沿ったコンクリートの剥離破壊が生じていた。

- (5) 押抜きせん断載荷試験での H および H+FA 試験体における PC 床版の中立軸位置を算出した結果、初期ひび割れが発生した 200kN 付近までは、通常の弾性挙動が確認され、最終耐力に達するまでに上縁から概ね 60-70mm に収束していることがわかり、H+FA 試験体の方が上縁から若干下側に位置していた。

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においては、一般社団法人 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) 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。
- 2) 広野真一，鳥居和之：北陸地方を代表する安山岩系骨材のアルカリシリカ反応性とフライアッシュによる抑制機構，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，pp.499-506，2012。
- 3) 山村智，桜田道博，小林和弘，鳥居和之：フライアッシュコンクリートの PC 橋梁への適用に関する実用化研究，プレストレストコンクリート，Vol.57，No.5，pp.46-53，2015。
- 4) 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。
- 5) 山村智，桜田道博，小林和弘，鳥居和之：フライアッシュを用いたコンクリートの PC 桁橋への適用，セメント・コンクリート，No.828，pp.22-27，2016。
- 6) 東山浩士，太田博士，朴淳珍，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。
- 7) 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。
- 8) 前田幸雄，松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐荷力の評価式，土木学会論文集，第 348 号/V-1，pp.133-141，1984.8。