

論文 ASR が発生したプレキャスト PC 床版の膨張挙動とひび割れ性状に関する研究

畑野 翔哉*¹・浦 修造*²・深田 宰史*³・鳥居 和之*⁴

要旨：近年、高速道路会社にて大規模な補修や更新事業が進められており、その中には RC 床版をプレキャスト PC 床版に更新している事例がある。これまで組成ペシマムの影響を受けてアルカリシリカ反応 (ASR) が発生した事例もあることからプレキャスト PC 床版に ASR が発生した場合の劣化性状について予め把握する必要がある。そこで本研究では、ASR が発生した実物大のプレキャスト PC 床版の劣化性状を調べるために、反応性骨材を使用したプレキャスト PC 床版を実環境下にて屋外暴露し、ASR によるひび割れの特徴と PC 床版および採取したコアに対して非破壊検査手法を用い、劣化性状について実験的に明らかにした。

キーワード：ASR、プレキャスト PC 床版、膨張挙動、ひび割れ挙動、有効プレストレス量

1. はじめに

現在、高速道路会社において道路橋の大規模な補修や更新が進められている。この更新事業の中で最も多いものは、交通輸荷重が直接に作用する RC 床版であり、凍結防止剤が散布される中日本高速道路株式会社の北陸自動車道の RC 床版の更新事業では、施工工期の短縮やコンクリートの高耐久化を目的として、プレキャスト PC 床版¹⁾が採用されている。とくに、積雪寒冷地である北陸地方では、凍結防止剤の散布量が年々増えているとともに、ASR 抑制対策 (昭和 61 年) 以後においても ASR が実際に発生している現状がある。この際に、北陸地方での ASR 事例の最近の調査によると、組成ペシマムの影響を強く受ける、一部の細骨材 (川砂や陸砂) では、アルカリ総量が 2 kg/m^3 程度でも ASR が実際に発生していることに注視する必要がある。このため、同地方では、ASR 抑制対策としてのプレレストレストコンクリートやプレキャスト部材へのフライアッシュコンクリートの利活用が積極的に検討されてきた^{2),3)}。一方、ASR が発生した RC 床版の劣化性状とその評価に関しては、杉江⁴⁾、前島⁵⁾、内藤⁶⁾、石川⁷⁾らにより精力的に研究されている。しかし、PC 床版における ASR 劣化に関しては、わずかに 2, 3 の事例報告^{8),9)}があるのみである。著者の 1 人が実調査に携わった、港湾舗装で ASR による劣化が生じたプレキャスト PC 床版は、一夏目に PC 鋼材に沿った表面のひび割れが発生した後に、二夏目には舗装が完全に破壊されたことを経験している¹⁰⁾。このように、プレキャスト PC 床版における ASR によるひび割れとそれに伴う劣化機構については、部材破壊をもたらす深刻なものになるが、これまで詳細に検討されていないのが実状

である。

そこで本研究では、最初に ASR が発生した PC 床版の損傷事例について紹介するとともに、プレキャスト PC 床版に発生した ASR によるひび割れと劣化メカニズムを調べるために、常願寺川産の川砂と川砂利を使用した、実物大のプレキャスト PC 床版を製作し、実環境下 (金沢大学構内) にて長期間屋外暴露することにより、プレキャスト PC 床版に発生した ASR によるひび割れの特徴と PC 床版および採取したコアに対して非破壊検査手法を用い、劣化性状について実験的に明らかにした。

2. 道路橋 PC 床版に発生した ASR 劣化の特徴

ASR が発生した PC 床版 (下面張出し部) を写真-1 に示す。外観における ASR による劣化状況は、RC 床版よりも PC 床版でより顕著であり、プレストレスが導入されている橋軸方向の下面に顕著なひび割れが発生していた。このため、橋梁路面にはポットホールが発生していると同時に、床版上面にはコンクリートの土砂化が生



写真-1 PC 床版(下面張出し部)の劣化状況

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科 環境デザイン学専攻 (学生会員)

*2 (株) 国土開発センター (正会員)

*3 金沢大学 理工研究域地球社会基盤学系 教授 博士(工学) (正会員)

*4 金沢大学 理工研究域地球社会基盤学系 特任教授 工博 (フェロー会員)

じており、上面鉄筋が腐食していた。また採取したコアは折損していたことから PC 鋼材とコンクリートとの付着力が大きく低下しているのが予想できた。

3. プレキャスト PC 床版試験体の概要

3.1 コンクリートの配合と養生条件

プレキャスト PC 床版のコンクリートの配合を表-1 に示す。セメントには、早強ポルトランドセメント（密度：3.14 g/cm³）を使用し、反応性骨材には、富山県常願寺川産の川砂（密度：2.62 g/cm³，吸水率：1.85%）および川砂利（密度：2.60 g/cm³，吸水率：1.45%，Gmax：20 mm）を使用した。なお、常願寺川産骨材は、安山岩が約 30%（ペシマム混合率）含まれており、主要な反応性鉱物はオパールとクリストバライトである。さらに、常願寺川産の川砂および川砂利の岩石構成率（安山岩）は、ほぼ同じであり、いずれも高いアルカリシリカ反応性を示す。常願寺川産川砂および川砂利は、化学法（JIS A 1145）では「無害でない」、モルタルバー法（JIS A 1146）および促進モルタルバー法（ASTM C 1260）では「無害でない」および「有害」とそれぞれ判定された¹¹⁾。なお、コンクリートの ASR 膨張を促進する目的で、添加アルカリ量（等価 Na₂O）が 10 kg/m³ となるように NaCl をコンクリートに 18.87 kg/m³ 添加した。また、試験体は、コンクリートを打設後に 15 °C/h で昇温、最高温度 50 °C を 4h 保持、その後は、自然降下にて養生を行い、2015 年 7 月より金沢大学自然科学研究科内にて屋外暴露（写真-2 参照）を開始した。なお、金沢の気象条件は、夏季は降雨量が多く、かつ 30 °C を超える高温多湿な気象である。

3.2 鋼材と試験体の形状

本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、PC 鋼材は、主鉄筋方向に高強度 PC 鋼より線 SWPR7BL（1S15.2）を上下に 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 189.8 kN のプレストレスを導入した。本試験体の形状寸法を図-1 に示す。試験体は、既設鋼橋の桁間隔 3.0m を想定し、主筋方向が 3500 mm、配力筋方向が 1750 mm、厚さが 240 mm とした。

3.3 屋外暴露試験の測定項目

暴露試験体の工学的性質の測定項目とその測定箇所を図-2 に示す。プレキャスト PC 床版の各箇所でのコンクリートの膨張率をコンタクトゲージ法（基長：100 mm）により 1 ヶ月間隔で測定するとともに、部材中央

のそり量を計測した。ASR によるひび割れが春から夏にかけて大きく進展することを考慮して、2016 年 10 月（暴露期間 1 年半）と 2017 年 10 月（暴露期間 2 年半）の時点でひび割れ展開図を作成した。また、ASR によるコンクリート内部の劣化状況と強度低下との関係を把握するために、2017 年 10 月（三夏経過）の時点で鉛直方向から直径 55 mm のコアを 6 本採取した。コアの測定項目は、圧縮強度、静弾性係数および超音波パルス伝播速度である。さらに、コア切込み法¹²⁾で有効プレストレス量の推定を行った。

4. プレキャスト PC 床版の暴露試験結果と考察

4.1 プレキャスト PC 床版のひび割れ状況

プレキャスト PC 床版（暴露期間 2 年半）でのひび割れの展開図を図-3 に、ひび割れ発生状況の外観を写真-3 にそれぞれ示す。写真-3 (a) に示すとおり、暴露期間 3 ヶ月（一夏経過）の頃から、床版上面の外縁部に PC 鋼線に沿ったひび割れがまず発生し、その後、二夏、三夏と経過するとともに、ひび割れの本数およびその幅が急速に増大した。これは、プレストレスによる拘束が中央部よりも小さいことに加え、床版外縁部や端部が日射や降雨の影響を受けているためと考えられる。同時に試験体の側面部や端部には、水平方向のひび割れが発生し、とくに両端部の上筋および下筋の水平方向のひび割れ幅は 1 mm を超えるものがあり、写真-3 (b) に示すとおり、暴露期間の経過とともに、ひび割れが連続し、かつ大きく開いてきた。一方、下面には上面と同じ位置にひび割れ



写真-2 プレキャスト PC 床版試験体の暴露状況

表-1 プレキャスト PC 床版に使用した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 (%)	単用量(kg/m ³)				高性能減水材 SP (C×%)	AE剤 (C×%)
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
H-暴露	20	12±2.5	38.7	4.5±1.5	150	388	816	950	0.65	0.003

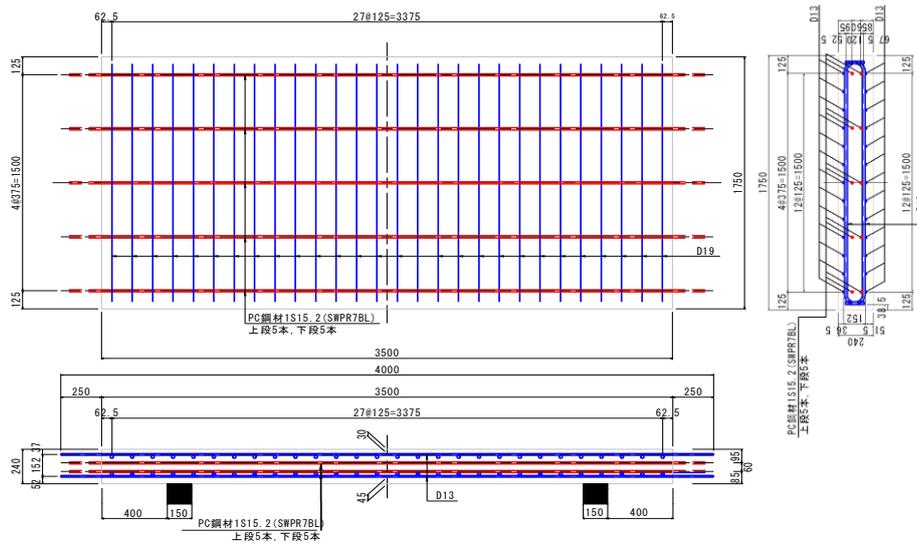


図-1 プレキャスト PC 床版の配筋図

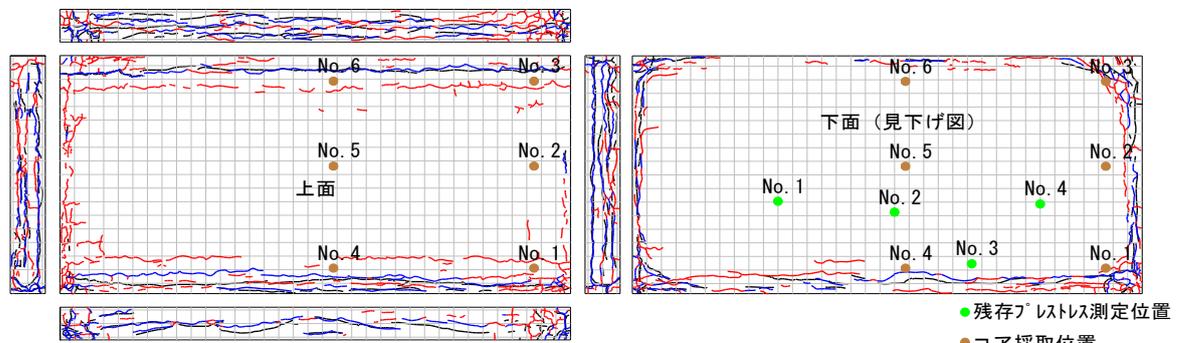


図-3 プレキャスト PC 床版のひび割れ展開図 (赤線：暴露1年半，青線：暴露2年半)

れが発生したが、ひび割れは全体的に軽微であった。このように、床版構造は厚さ方向の膨張を拘束する鋼材がないので、ASRが発生すると水平方向（側面部や端部）に層状となる、特徴的なひび割れが卓越することが確認された。

プレキャスト PC 床版のそり量は、両端部に水系を張り、支間中央部における上側方向への変化量を計測した。暴露期間 3 カ月（一夏経過）後に 4.3mm 程度のそりが発生したが、暴露期間にともなうそり量の増加はほとんど認められなかった。床版両端部の上面に凸型のそり変形が生じる原因は、主に水分供給、日射などにより、ASR による膨張量が上・下面で異なることによるものである。さらに、プレキャスト PC 床版では、床版隅角部にひび割れが発生し、二夏、三夏(暴露期間 15 カ月, 28 カ月)と経過するとともに年輪状のひび割れ (D クラック, 写真-3 (a)) が内部へと進展した。D クラックは、ASR や凍害による劣化と交通輪荷重による複合的な劣化形態で、端部からひび割れが進展することにより局所的な破壊を誘発するので、十分な注意が必要である。欧米諸国では、コンクリート舗装版の破壊要因の一つとして、D クラックの発生に伴う角欠けにより、土砂細流分が吸い上げられ、

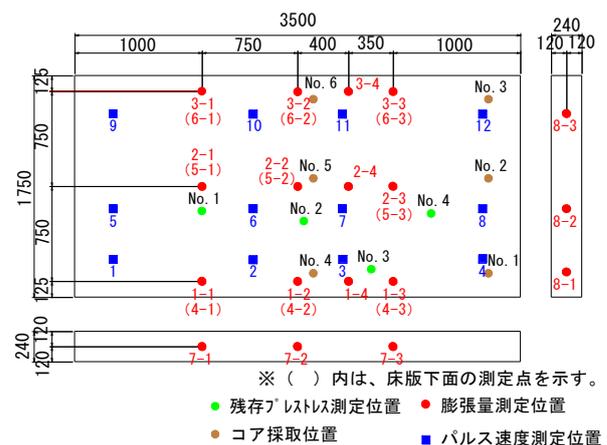


図-2 測定位置図

その直下の路盤が空洞化する現象が知られている¹³⁾。

4.2 プレキャスト PC 床版の膨張率

プレキャスト PC 床版の配力鉄筋方向 (PC 鋼材直交方向) における上面・下面の膨張率を図-4 に、側面・端面における厚さ方向の膨張率を図-5 に、プレストレス方向 (PC 鋼材方向) の膨張率を図-6 にそれぞれ示す。プレキャスト PC 床版の ASR による膨張挙動には、雨がか



(a) PC 鋼材に沿ったひび割れ



(b) 端面の水平ひび割れ

写真-3 プレキャスト PC 床版のひび割れ状況

りや日射などの試験体周囲の使用・環境条件と PC 鋼材による拘束状態の相違が明確に反映されていた。すなわち、床版上面においてひび割れが目視できた一夏目後(暴露期間 3 カ月経過後)では、ひび割れから水分が試験体内部に供給されるので、ASR による膨張が急速に増大する傾向が認められた。また、側面と端部ではほぼ同時期に膨張が発生した。プレキャスト PC 床版における ASR による膨張挙動は、気温が高く、日射が多い“夏季に進行する”傾向で、気温が低く、日射も少ない“冬季に停滞する”という階段状の膨張挙動となっていた。とくに、PC 鋼材が剥き出しになっている端面では PC 鋼材方向に作用するプレストレス力が中央よりも小さく、厚さ方向に拘束する鉄筋が無いため、写真-3 (b) に示すように、端面の厚さ方向に大きな膨張力が発生し、その影響で PC 鋼材の上・下部に層状の水平ひび割れが連続的に発達しているのが特徴的であった。一方、プレストレス方向の ASR 膨張はほとんど発生しておらず、すべての箇所において PC 鋼材により ASR 膨張が効果的に拘束されていた。

4.3 コアの圧縮強度、静弾性係数および超音波パルス伝播速度

厚さ方向に採取した貫通コアの劣化状況を写真-4 に示す(写真中のコア番号は図-2、図-3 を参照)。貫通コアは上下の PC 鋼材の位置で多くが折損(断裂)していた。とくに、上面部では採取位置(端部および中央部)に係らず、すべてのコアが破損しており、上面部の PC 鋼材

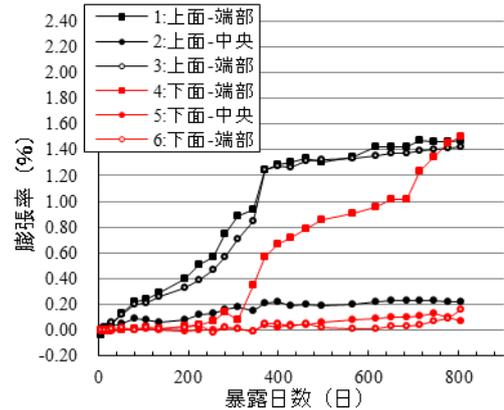


図-4 配力鉄筋方向の膨張率(上面および下面)

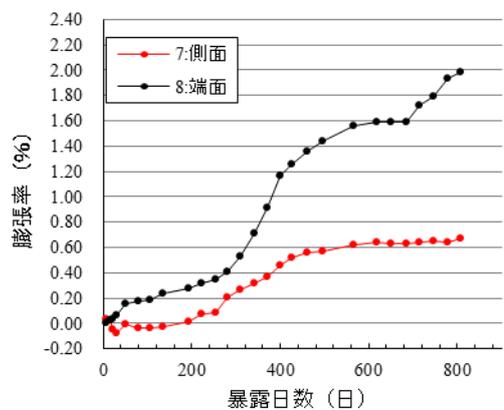


図-5 厚さ方向の膨張率(側面および端面)

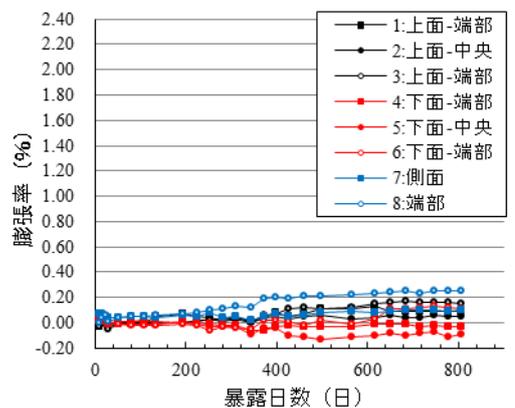


図-6 PC 鋼材の長さ方向の膨張率(上面、下面、端面、側面)

付近で連続的な水平ひび割れ(縁切れ)が発生していた。それに対して、下面部は上面部よりも ASR が進行していないので、プレストレスによる拘束の小さい端部のみでコアの折損が発生していた。これらの測定結果は図-3 に示すひび割れの発生状況とも一致していた。また、コアの採取時において、コアビット先端の回転によりセメントペーストの破壊と泥濁が生じており、いわゆるコン



写真-4 採取したコアの折損状況

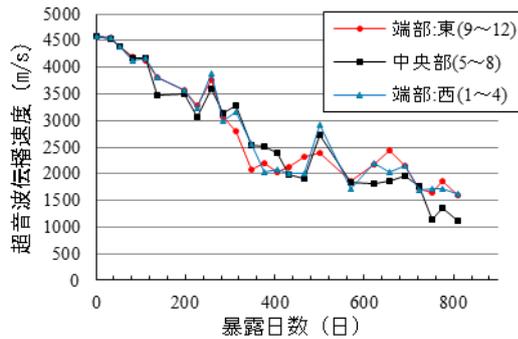


図-7 試験体の超音波伝播速度の経時変化（鉛直方向）

表-2 コアの圧縮強度、静弾性係数および超音波伝播速度の測定値

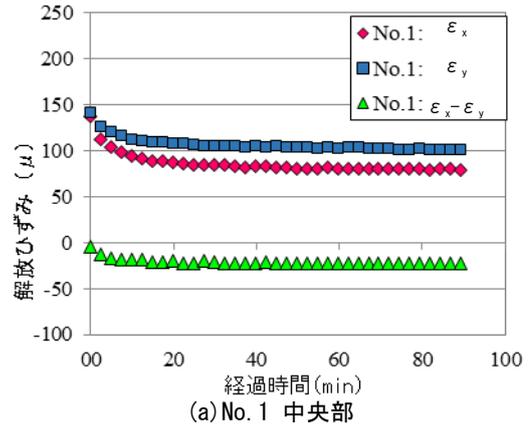
部位	箇所 No	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	コアの超音波パルス伝播速度*1 (m/sec)	試験体の超音波パルス伝播速度*2 (m/sec)	断裂本数 (本)
端部	No.1	34.6	12.9	3,900	1,110	5
	No.2	38.0	9.80	3,590	640	5
	No.3	35.5	9.21	3,640	1,820	4
	平均	36.0	10.6	3,710	1,190	4~5
中央部	No.4	36.8	10.5	3,710	2,030	3
	No.5	45.6	12.9	3,380	1,200	3
	No.6	49.0	12.1	3,480	1,570	2
	平均	43.8	11.8	3,520	1,600	2~3

*1 コア（試験体中央部、長さ：110mm）の測定値

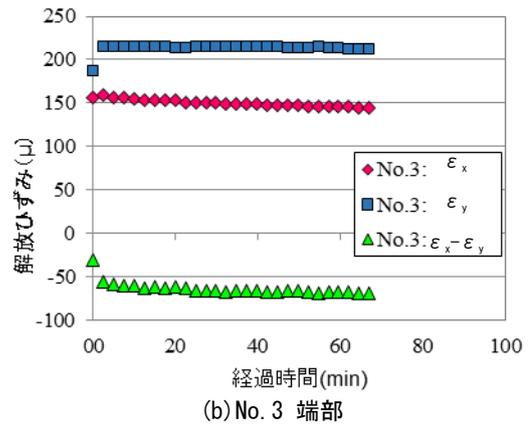
*2 コア採取位置での試験体（厚さ：240mm）の測定値

クリートの砂利化現象が再現されていた。

プレキャスト PC 床版の厚さ方向の超音波パルス伝播速度(端部東、中央、端部西それぞれの4箇所の平均)の変化を図-7に示す。超音波パルス伝播速度に関しては、暴露開始時に4600 m/sec(健全)のものが、200日経過後に約3000 m/sec(やや良)に、さらに400日経過後に2000 m/sec(不良)にまで大きく低下し、400日経過した時点で、プレキャスト PC 床版の上面で連続的なひび割れ(縁切れ)が発生したものと考えられた。さらに、ASRによる水平ひび割れ(縁切り)の発生は、採取コアの縁切れしていない部分から成形したコア試験体の超音波パルス伝播速度が3500~3700 m/secに対して、床版全厚の値が1200~1600 m/secと、1/2以下になることから推定が可能であった。コア(中央部からの切り出し試験体)の圧縮強度、静弾性係数および超音波パルス伝播速度の結果を表-2に示す。ASRが発生したコンクリートではコン



(a) No.1 中央部



(b) No.3 端部

図-8 円形コア法によるひずみ計測の結果

クリートの弾性係数が圧縮強度よりも大きく低下することが知られている¹⁴⁾。このため、コアの圧縮強度と静弾性係数の関係に関して、圧縮強度の低下に比べて静弾性係数の低下がより大きくなり、圧縮強度で設計基準強度の50 N/mm²に対して35 N/mm²と30%低下、静弾性係数の33k N/mm²に対して10 kN/mm²と70%大きく低下した。このように、ASRが発生したプレキャスト PC 床版は側面部や端部に水平ひび割れが多数発生しており、この水平ひび割れが部材の耐力や使用性の急激な低下をもたらす原因になると推測された。

4.4 有効プレストレス量の推定

コア切込み法¹¹⁾により有効プレストレス量を推定することにした。コンクリート表面にひずみゲージを貼り、コアカッターにより切込みを入れ、応力解放後のひずみ計測結果を図-8に示す。 ϵ_x は主筋方向のひずみ、 ϵ_y は配力筋方向のひずみを示し、圧縮ひずみを負とした。床版の中央ならびに端部いずれの箇所でもひずみ($\epsilon = \epsilon_x - \epsilon_y$)の測定値が負の値となっている。これは、有効プレストレスが完全に消失していることを示しており、ASRでひび割れが発生した際の静弾性係数の著しい低下や、かぶり付近の連続的な水平ひび割れが原因と考えられる。したがって、ASRにより劣化したプレキャスト PC 床版の有効プレストレス量を本測定法により正確に推定でき

なかった。

5. まとめ

ASR 膨張が発生した実物大のプレキャスト PC 床版の暴露試験の結果をまとめると、以下に示すことが検証できた。

- (1) プレキャスト PC 床版では、厚さ方向の膨張を拘束する鋼材がないために、ASR が発生すると水平方向に層状となる、特徴的なひび割れが卓越した。
- (2) プレキャスト PC 床版では、一夏経過後に 4 mm 程度のそりが発生したが、その後は、暴露期間にともなうそり量の増加がほとんど認められなかった。
- (3) プレキャスト PC 床版の ASR による膨張挙動は、雨がかりや日射などの試験体周囲の使用・環境条件と PC 鋼材による拘束状態が反映されていた。
- (4) プレキャスト PC 床版から採取した貫通コアは水平ひび割れの影響により PC 鋼材の上下の位置で多くが折損（断裂）していた。
- (5) ASR により劣化したプレキャスト PC 床版では有効プレストレス量をコア切込み法により正確に推定できなかった。

本研究の測定結果より、プレキャスト PC 床版にて ASR が一旦発生すると、PC 鋼材に沿った“大きなひび割れ”や床版上部での“連続的な水平方向の剥離”が生じるために、その後、急速かつ甚大な早期劣化の進行が懸念された。通常、適切な床版厚さを有するプレキャスト PC 床版では、交通荷重による疲労の問題は発生しないとされている。しかし、ASR や鋼材腐食による材料劣化がプレキャスト PC 床版に発生すると床版としての耐荷性や使用性が失われ、さらにそれらを外観目視により正確に評価・判定することが難しいことが明らかとなった。

謝 辞

本研究は、内閣府・JST による SIP「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の一環として実施したものである。また、本研究を実施するにあたり、(株)ピーエス三菱より試験体の作製と計測に当たり、ご協力とご支援をいただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会：更新用プレキャスト PC 床版技術指針，2017。
- 2) 鳥居和之，深田宰史，浦修造：フライアッシュコンクリートを使用した高耐久プレキャスト PC 床版の開発と社会実装，プレストレストコンクリート，Vol.59, No.2, pp.96-103, 2017。

- 3) 鳥居和之，深田宰史，Ha Minh Tuan，小林和弘：北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの標準化と PC 橋梁への適用，プレストレストコンクリート，Vol.59, No.6, pp.22-27, 2017。
- 4) 杉江功，児島孝之，杉山功，村山康雄：アルカリ骨材反応による RC 床版の損傷，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.1, pp.1111-1116, 1994。
- 5) 前島拓，子田康弘，岩城一郎，内藤英樹，岸良竜，鈴木康範，大田孝二，鈴木基行：アルカリシリカ反応が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.72, No.2, pp.126-145, 2016。
- 6) 内藤英樹，小林珠祐，土屋祐貴，杉山涼亮，山口恭平，早坂洋平，安川義行，鈴木基行：局所振動試験に基づく道路橋 RC 床版の内部損傷評価，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol.73, No.2, pp.133-149, 2017。
- 7) 石川裕夏，久保善司，横山広，出口一也：凍結防止剤がコンクリート構造物に及ぼす影響に関する実態調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.766-771, 2012。
- 8) 河村直哉，川端雄一郎，片山哲哉：岩石学的評価に基づいた空港コンクリート舗装の ASR 劣化事例解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.13, No.2, pp.1015-1020, 1991。
- 9) 児島孝之，水越睦視，長岡誠一，中上明久：PC 床版における PC 版と RC 部との材令差が疲労性状に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.243-248, 2012。
- 10) 菊地弘紀，山戸博晃，広野真一，鳥居和之：細・粗骨材の組み合わせの組成ベシマム現象による ASR 劣化事例の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.1041-1046, 2016。
- 11) 菊地弘紀，久保哲司，鈴木雅博，鳥居和之：収縮補償コンクリートのアルカリシリカ反応とフライアッシュによる抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.39, No.1, pp.865-870, 2017。
- 12) 二井谷教治，渡瀬博，肥田研一：残存プレストレスの調査手法，コンクリート工学，Vol.53, No.8, pp.690-697, 2015。
- 13) Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B. and Panarese, W. C. : Design and Control of Concrete Mixtures, 14th ed., PCA, 2002。
- 14) 久保善司，上田隆雄，黒田保，野村倫一：アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1, pp.1961-1966, 2006。