

論文 コンポジット舗装におけるアスファルト中間層適用に関する研究

竹津 ひとみ^{*1}・風戸 崇之^{*2}・西澤 辰男^{*3}・麓 隆行^{*4}

要旨：本研究では、セメント安定処理路盤とセメント安定処理路盤の上部 4cm をアスファルト中間層に置き換えた連続鉄筋コンクリート版の挙動の違いを把握するため、舗装構造の一部を想定した模擬供試体を作製し、10 か月間にわたり温度、ひずみおよび傾斜角を測定した。その結果、アスファルト中間層がある方が供試体端部の拘束ひずみが小さくなること、また傾斜角が大きくなることを確認した。また、供試体端部から採取したコアから、アスファルト中間層の有無でコンクリート版との境界面に入るひび割れの性状が異なることを確認した。

キーワード：連続鉄筋コンクリート舗装版、アスファルト中間層、拘束ひずみ、傾斜角

1. はじめに

コンポジット舗装は、コンクリート舗装版の上にアスファルト表・基層を設ける構造であり、コンクリート舗装の耐久性と、アスファルト舗装の走行快適性および維持修繕の容易性を兼ね備えた舗装である。高速道路等の重交通路線では、連続鉄筋コンクリート（以下、CRC）舗装版を用いたコンポジット舗装を採用する例¹⁾がある。CRC 版は、走行方向に配置した鉄筋の拘束力によってひび割れを分散させ、目地を不要とすることができるため、アスファルト表・基層へのリフレクティブクラックの発生を抑制することができるものである。

それとは別に、重交通路線等ではセメント安定処理路盤の上部にアスファルト中間層（以下、As 中間層）を設置することがある²⁾。これは、コンクリート版の下に雨水等が浸入することによるセメント安定処理路盤の耐久性低下を防止しようとするものと考えられる。

表・基層や中間層に用いられるアスファルト混合物は、温度および载荷速度依存性が高い粘弾性体であり、走行荷重のような瞬間的な载荷には大きな支持力（高い弾性係数）を発揮する材料である。コンクリート版上下面により生じる温度応力は、昼夜間の温度変化によるものであるため、その周期は 24 時間といえる。このようなゆっくりとした動きには、As 中間層の拘束は小さくなることが考えられる。しかし、そのような効果を検討した研究はなく、現行の設計でもその効果は考慮されていない^{3),4)}。

そこで、本研究ではコンポジット舗装の CRC 版下にセメント安定処理路盤とセメント安定処理路盤の上部 4cm を As 中間層に置き換えた場合の CRC 版の挙動の違いを把握するために、模擬供試体で 10 か月間の計測を行い、As 中間層の有用性や寿命予測に及ぼす影響について検証した。

2. 試験方法

2.1 模擬供試体作製

実物大の CRC 版は、延長方向に数百 m 以上と長い区間を必要とするため、限られた敷地内では実験が困難であった。そこで、本実験では幅員 4250mm の CRC 版に幅員方向のひび割れが 60cm 間隔に発生したと仮定し、その部分を切り出した形の模擬供試体を作製することとした。作製した模擬供試体の状況を写真-1 に示す。また、平面図を図-1 および断面図を図-2 に示す。まず、模擬供試体は原地盤を掘削し、真砂土を締固めて厚さ 700mm の構築路床を設け、その上に各工区を施工した。As 中間層を設けた工区（以下、ASI 工区）は、コンクリート版の下に路盤として As 中間層 40mm およびセメント安定処理路盤 160mm 設け、比較工区（以下、CTB 工区）は、セメント安定処理路盤 200mm のみの路盤とした。コンクリート版の寸法は、幅 4250mm×長さ 600mm×厚さ 250mm で、鉄筋を配せず、基本的に路盤からの拘束が主となるような状況とした。また、日射等の影響を受けやすくするため、アスファルト表・基層を設けない構造とした。なお、コンクリート版の側面は、厚さ 100mm の発泡樹脂断熱材で断熱処理し、コンクリート版や路盤との隙間はシーリング材で防水処理をした。

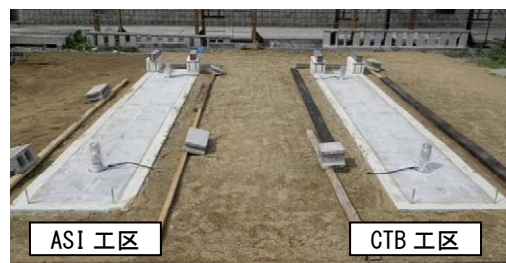


写真-1 模擬供試体作製状況

*1 住友大阪セメント（株）セメント・コンクリート研究所（正会員）

*2 西日本高速道路（株）技術本部 技術部

*3 石川工業高等専門学校 環境都市工学科 教授 工博

*4 近畿大学 理工学部社会環境工学科 講師 博（工）（正会員）

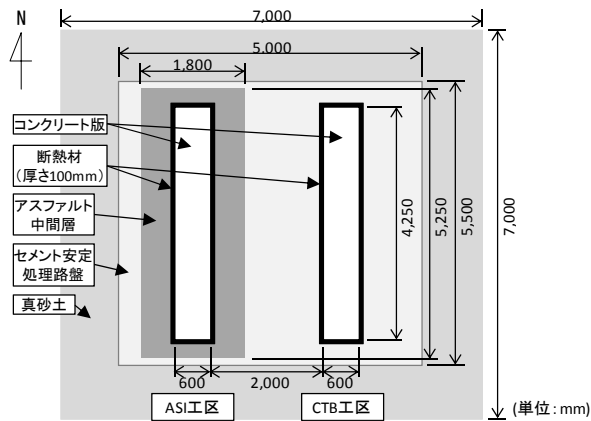


図-1 平面図

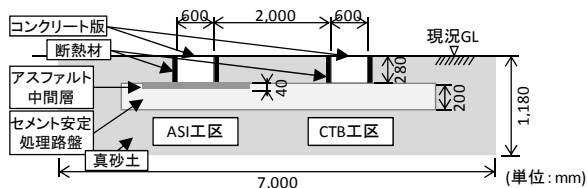


図-2 断面図

2.2 使用材料および配合

各層の使用材料を表-1に示す。路床は真砂土を使用し、セメント安定処理路盤は含水比7.3%のM-30硬質砂岩に高炉セメントB種をバックホウにて攪拌し転圧した。As中間層は、表-2に示す骨材配合率の密粒度アスファルト混合物を使用した。コンクリートの使用材料を表-3に、示方配合を表-4に示す。計測機器類を設置するため、粗骨材最大寸法20mm、スランプ6.5cmの配合とした。なお、打設時のコンクリートはスランプ7.5cm、空気量5.8%、温度18.5℃であった。

表-1 模擬供試体に使用した材料

種類	使用材料	備考
路床	真砂土	淡路島産
セメント	高炉セメントB種	---
安定処理路盤	M-30硬質砂岩	茨木市産
As中間層	密粒度アスファルト混合物	ストアス60/80
コンクリート	※表3参照	
断熱材	発泡ポリスチレン樹脂	---

表-2 密粒度アスファルト混合物の骨材配合率

設計アスファルト量 [%]	骨材配合率 [%]				
	6号砕石	7号砕石	スクリーニングス	細目砂	石粉
5.6	35	22	19	19	5

表-3 コンクリート使用材料

種類	略記	仕様	備考
水	W	水道水	---
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.15 [g/cm ³]	---
細骨材	S	海砂, 表乾密度2.58 [g/cm ³]	白島沖西島産
粗骨材	G	砕石2005, 表乾密度2.62 [g/cm ³]	西島産
混和剤	Ad	AE減水剤	

表-4 示方配合

粗骨材最大寸法 [mm]	スランプ [cm]	W/C [%]	s/a [%]	空気量 [%]	単位量 [kg/m ³]				Ad [C × %]
					W	C	S	G	
20	6.5	47.9	39	4.5	154	322	704	1116	0.75

2.3 計測位置

各工区には、FEM解析の着目点に測温機能内蔵型ひずみ計および傾斜計を設置した。設置位置を図-3, 4に示す。また、設置状況を写真-2, 3に示す。傾斜計は、コンクリート版内に温度差が生じたときに傾斜が大きくなる位置を予めFEM解析で検証し、端部から525mmの位置とした。なお、ひずみは1供試体あたり25箇所測定したが、本論文では中央部および端部から525mmの位置の測定結果について述べる。

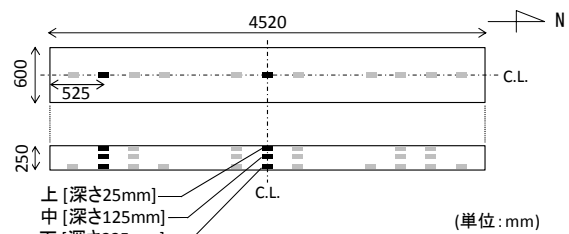


図-3 ひずみ計設置位置

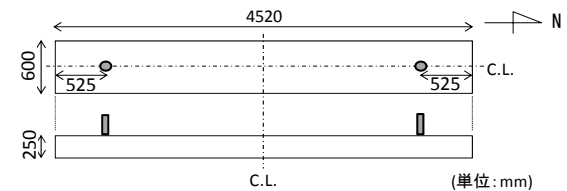


図-4 傾斜計設置位置



写真-2 ひずみ計

写真-3 傾斜計

2.4 計測期間

コンクリートは2011年4月8日に打設し、直後からひずみの測定を開始した。傾斜計は、材齢3週で設置し、測定を開始した。測定間隔は、コンクリート打設直後から24時間は5分間隔、2~8日目までは30分間隔、その後は1時間間隔で記録し、2012年3月1日に測定を終了した。

3. 結果

3.1 硬化コンクリート

コンクリートの曲げ強度は、材齢7日で5.38N/mm²、材齢28日で6.09N/mm²となり、設計基準曲げ強度

4.5N/mm²を満足した。また、圧縮強度は、材齢7日で35.4N/mm²、28日で46.2N/mm²となり、静弾性係数はそれぞれ31.9kN/mm²、36.0kN/mm²であった。

3.2 コンクリート温度測定結果

コンクリート打設直後から測定されたコンクリートの温度は、ASI工区、CTB工区ともに同様の挙動を示した。例としてASI工区での温度測定結果を図-5に示す。

測定初期は、硬化時の水和熱による温度挙動があり、養生を終了した4月24日からは、外気温や日射等の影響を受け温度挙動が大きくなった。また、5月下旬から6月中旬にかけては、梅雨時期で曇りの日が多かったため、温度挙動が小さくなった。春から夏にかけては、表面から25mmの位置では1日に15℃以上温度が変動することがあるが、秋以降は10℃程度と変化が小さくなった。

全体的に表面から25mmの位置は、外気温や日射等の影響を受けやすいため温度変化が大きくなり、表面から離れるにつれて温度変化は小さくなる。特に、春から夏にかけては、表面から25mmの位置と底面から25mmの位置の測定値で12℃の温度差が生じる日もあった。春から夏にかけては、気温が高くなるだけでなく日射量も多いことが影響していると考えられる。

3.3 ひずみ測定結果

本研究では、コンクリート版表面と底面の温度差により変形し、それを拘束することにより発生する拘束ひずみを捉えることを目的としている。そのため、打設後1か月以上経過し、さらに24時間毎にひずみをリセットし、そこからのひずみと温度の変化量について検討することで水和熱および乾燥収縮等の影響を無視することとした。そして、測定された全ひずみから、コンクリートの線膨張係数を $1.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として式(1)を用いて温度ひずみを差し引き、拘束ひずみを求めた。

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_2 - \gamma \times \Delta_t \quad (1)$$

ε_3 : 拘束ひずみ [$\times 10^{-6}$]

ε_2 : 全ひずみ [$\times 10^{-6}$]

γ : 測定対象物の線膨張係数 [$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]

Δ_t : 温度増分 [$^{\circ}\text{C}$]

以下での「ひずみ」は式(1)によって計算した拘束ひずみである。昼間は、コンクリート表面の方が温度は高くなるため、供試体は全体的に凸の形状に変形しようとし、それを自重や路盤が拘束するため、上面に圧縮ひずみ、下面に引張ひずみが発生する。逆に夜間は、コンクリート表面の方が温度は低くなるため凹の形状に変化しようとし、上面に引張ひずみ、下面に圧縮ひずみが発生する。その大きさは、路盤からの拘束が大きいほどひずみは大きく測定されると予想される。

(1) 各季節の抽出期間

測定期間が長いと温度変化に起因するひずみのほかに、乾燥収縮、クリープ等の影響が入る。そのため、ここでは10日間の変化を検証することとした。まず、晴天が続き温度変化が判断しやすい10日間を選定した。次に、供試体内部の温度勾配が最も小さくなる時間を毎朝選定し、それをイニシャル時刻と設定した。それぞれのイニシャル時刻から次のイニシャル時刻までの温度増分を計算し、つなぎ合わせて240時間分のデータとした。

例として、春の結果を図-6に、温度増分を図-7に示す。同様に選定した各季節の結果を表-5に示す。な

表-5 各季節の抽出期間

季節	抽出期間
春	2011年5月12日7時13分～5月22日6時13分
夏	2011年8月8日7時13分～8月19日6時13分
秋	2011年11月6日8時10分～11月17日7時10分
冬	2012年1月21日9時10分～2月1日8時10分

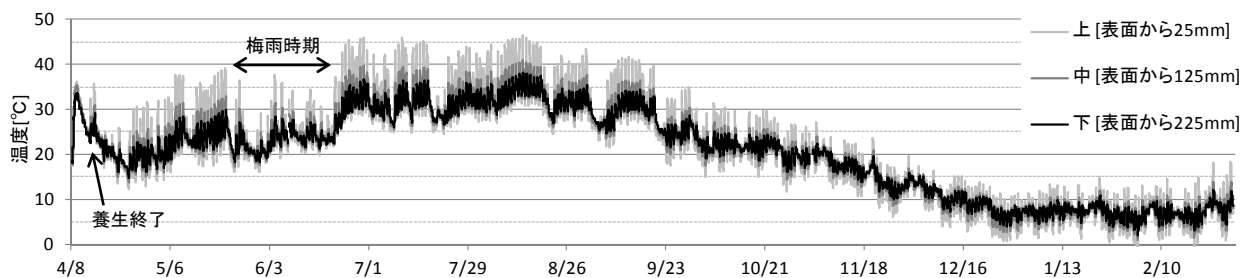


図-5 コンクリート温度測定結果 (2011/4/8[打設]~2012/3/1)

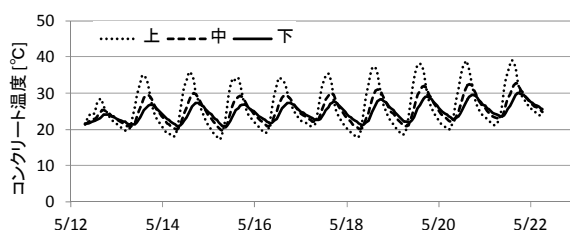


図-6 抽出期間 (5/12~5/22)

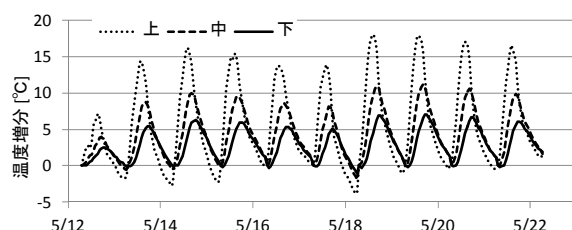


図-7 温度増分 (イニシャル時刻 5/12 7:13)

お、測定期間全体を調査し抽出した夏のデータは、測定期間内で最も温度が高く、冬は最も温度が低い時期であったことを確認している。

(2) 拘束ひずみ

春の拘束ひずみの計算結果を図-8~11に示す。両工区ともに、拘束ひずみの変化は、中央部は大きく、端部から525mmは小さくなった。また、ASI工区とCTB工区を比較すると、下面のひずみはASI工区の方が 40×10^{-6} 程度と引張ひずみは大きくなったが、ひずみの振れ幅は同程度となった。CTB工区の下面は、昼は引張ひずみ、夜は圧縮ひずみをほぼ対称な形で挙動しているが、ASI工区の方は全体的にプラス側（引張側）で挙動している。図-9および図-11に示すように、端部から525mmの位置における拘束ひずみを比較すると、表面から25mm（上）と底面から25mm（下）の拘束ひずみは、

ASI工区の方がひずみは小さくなった。コンクリート版端部においては、As中間層の方がコンクリート版端部における拘束を小さくしていると考えられる。

3.4 傾斜測定結果

模擬供試体では、図-4に示したとおり供試体の南側と北側の端部から525mmの位置で傾斜角を測定した。昼間は供試体全体が凸の形に変形しようとするため、図-12のようなイメージで変形する。そのとき、傾斜計はそれぞれ別の方向に傾くが、傾斜計の正負は同一方向で



図-12 傾斜角測定イメージ

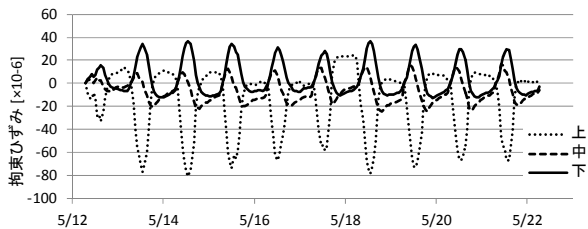


図-8 拘束ひずみ (ASI工区, 中央部)

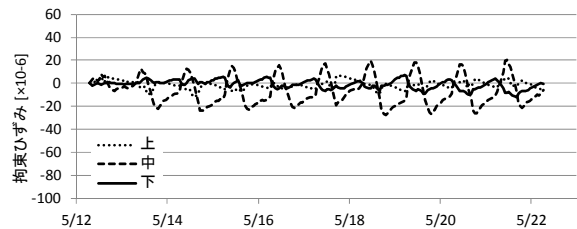


図-9 拘束ひずみ (ASI工区, 端部から525mm)

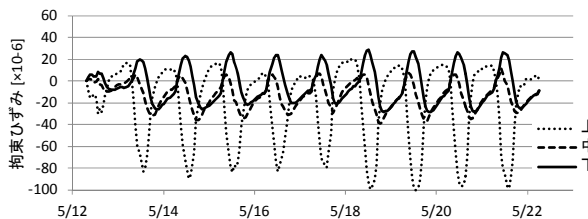


図-10 拘束ひずみ (CTB工区, 中央部)

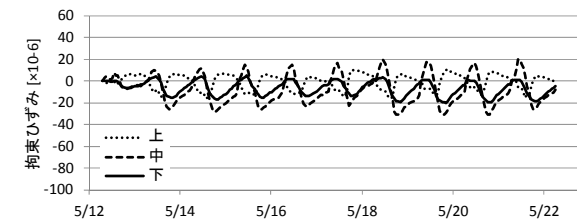


図-11 拘束ひずみ (CTB工区, 端部から525mm)

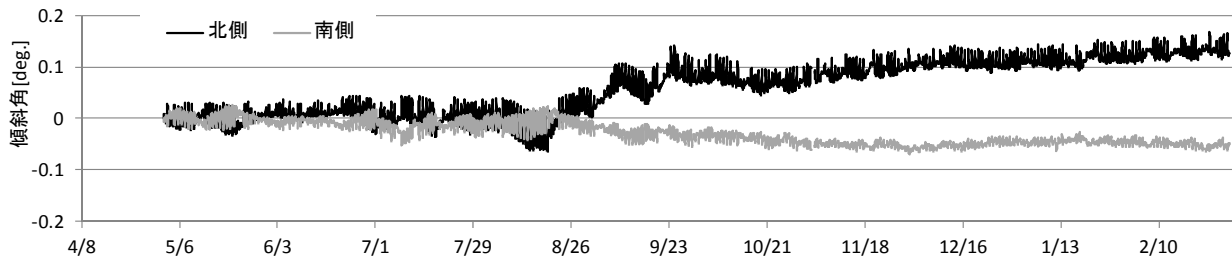


図-13 傾斜角の推移 (ASI工区)

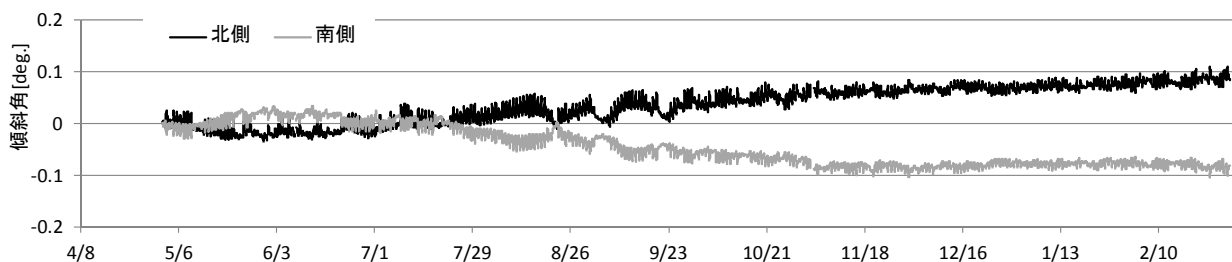


図-14 傾斜角の推移 (CTB工区)

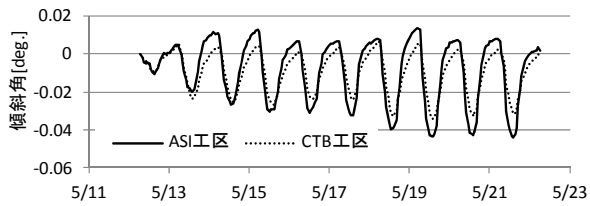


図-15 傾斜角測定結果（春）

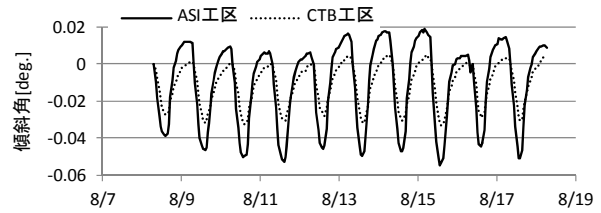


図-16 傾斜角測定結果（夏）

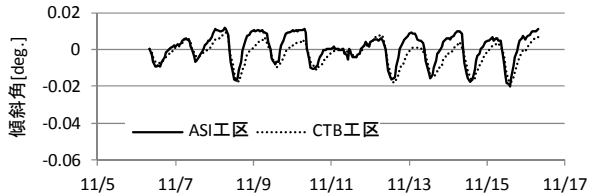


図-17 傾斜角測定結果（秋）

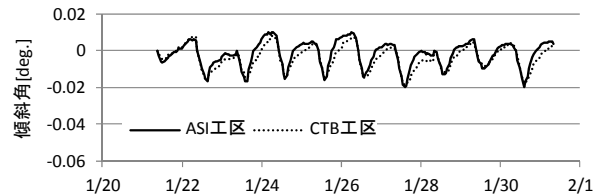


図-18 傾斜角測定結果（冬）

あるため、グラフ上では供試体南側と北側で正負が逆となって出てくる。

模擬供試体の端部から 525mm の位置において、4 月 28 日から 3 月 1 日まで測定された結果を図-13, 14 に示す。全体的に、夏から冬に向かって傾斜が大きくなっていく傾向となった。また、ASI 工区は南側に比べて北側の方が 2 倍程度大きく傾いたが、CTB 工区はほぼ対称な形で傾斜角が大きくなった。

次に、各季節での ASI 工区と CTB 工区の傾斜の比較をするため、北の傾斜角の符号を南に合わせ平均化した。結果を図-15~18 に示す。全体的に ASI 工区の方が傾斜の変動は大きくなり、特に夏においてその傾向は顕著となった。また、朝方もしくは夕方に傾斜角が大きく変動するとき、ASI 工区の変動の早さに比べて、CTB 工区の方が数時間遅れて変動している結果となった。

以上のことより、ASI 工区では模擬供試体端部の変形は大きくなっていることから、As 中間層は柔軟性があり、端部での応力緩和等がより大きいと考えられる。

4. コアによる付着状況の確認

測定終了後、コンクリート版の周囲の土砂を除去し、供試体と路盤の界面の付着状況等について調査した。

4.1 コア採取位置

コア採取位置を図-19 に示す。各工区で 4 本ずつ採取した。

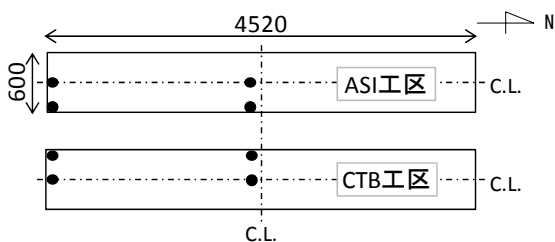
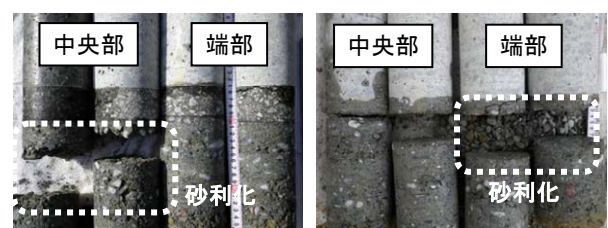


図-19 コア採取位置

4.2 付着状況

採取されたコアの状況を写真-4 に、端部からの採取コアを拡大したものを写真-5 に示す。ASI 工区では、中央部および端部ともに、コンクリートと As 中間層界面の付着を確認したが、端部のコアは採取後、時間経過とともにコンクリートと As 中間層の界面ではがれが進行し、最終的には 2 層に分かれた。また、中央部から採取したコアにおいて、セメント安定処理路盤の上面から 2~5cm の位置で砂利化していた。

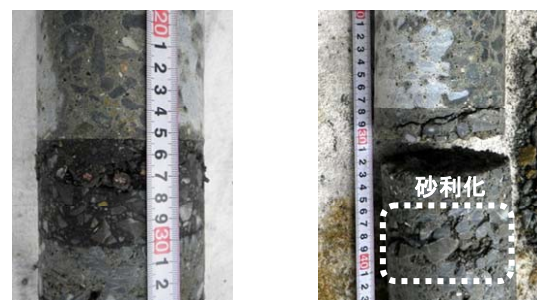
CTB 工区では、中央部のコアはコンクリートとセメント安定処理路盤の界面は付着していたが、端部のコアは端部側から亀裂が入っていた。また、その下 2~5cm の位置で砂利化し、一部は路盤材が粉砕されているのも確認された。



(a) ASI 工区

(b) CTB 工区

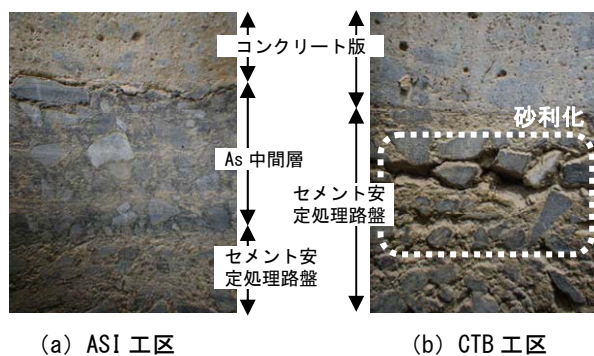
写真-4 採取コア



(a) ASI 工区

(b) CTB 工区

写真-5 端部コア拡大状況



(a) ASI 工区 (b) CTB 工区

写真-6 端部コア孔内界面状況

さらに、界面の状況を確認するため、端部でのコア採取後にコア孔内の状況を撮影したものを写真-6 に示す。ASI 工区において、コンクリートと As 中間層の界面にひび割れが確認できた。また、CTB 工区端部で砂利化が確認された位置では、細粒分が抜け出し、亀裂のように見える。これらの損傷は、端部側から入っていることから、コンクリート版の挙動がコンクリート版と路盤の界面または界面から 2~5cm で深に影響を及ぼすことを示していると考えられる。

なお、路盤材料の強度については、供試体作製時に一軸圧縮試験および平板載荷試験を実施し、所要の強度を満足していることを確認済みである。また、供試体周囲に防水処理を施していたことから、本実験では雨水等の浸入の可能性は低いと考えられる。

5. 考察

模擬供試体から得られた、拘束ひずみと傾斜角から、両工区とも端部では供試体底面付近の拘束ひずみが小さくなり、表面で測定された傾斜角が大きくなることを確認した。しかし、中央部ではあまり違いが見られなかった。傾斜計のデータから、端部においては温度勾配による端部のそり拘束が ASI 工区では小さいことがいえるが、中央部では自重により拘束されているため、拘束の度合いが CTB 工区と変わらないと考えられる。

また、コンクリート版端部からコアを採取したところ、CTB 工区では端部側からひび割れが入っており、ASI 工区では時間経過とともにコンクリート界面からはがれが進行した。少なくとも、工区に限らず端部でコンクリート版が動いていたと推察される。特に、ASI 工区の傾斜角は CTB 工区より大きく変動していたにも関わらず、コア採取直後は付着していた。コンクリート版と As 中間層界面にひび割れは入っていたが、追従することで路盤内への雨水等の浸入、セメント安定処理路盤の耐久性低下を遅らせる可能性がある。

現場での損傷形態として CRC 版下面の空洞への雨水の浸透やエロージョンの発生があることから、界面が付

着していた As 中間層の方が耐久性付与のためには良いと考えられる。これを維持するためにも、実施工においては、端部継目への止水処理も必要と考えられる。

6. まとめ

本研究では、As 中間層が CRC 版の挙動に及ぼす影響について検証するため、CRC 版の一部を想定した模擬供試体を作製し、長期間にわたり温度、ひずみおよび傾斜角を測定した。その結果をまとめると以下ようになる。

- (1) コンクリート版中央部における底面付近の拘束ひずみは、CTB 工区の場合、昼に引張りひずみ、夜に圧縮ひずみとほぼ対象な形で挙動したが、ASI 工区の場合、昼夜に拘わらずほぼ引張りひずみ側で挙動した。
- (2) 端部付近の拘束ひずみは、ASI 工区の方が CTB 工区に比べ拘束ひずみは小さくなったことから、As 中間層の拘束ひずみ低減効果が考えられる。
- (3) 全体的に ASI 工区の方が傾斜の変動は大きくなり、特に夏においてその傾向は顕著となった。CTB 工区の方が緩やかに、As 中間層はフレキシブルに挙動していることから、コンクリート版の拘束はセメント安定処理路盤の方が大きいといえる。
- (4) 中央部では、両工区ともコンクリート版と路盤は付着していることが確認されたが、端部では CTB 工区は端部側からひび割れが入り、ASI 工区は時間経過とともにコンクリート版界面からはがれが進行した。As 中間層が追従し、CRC 底面におけるひび割れの進行を抑制している可能性がある。

以上より、コンクリート版端部において路盤の種類による挙動の違いが判明した。しかし、模擬供試体と実物大の CRC 版は、規模も拘束の大きさも異なるため、拘束ひずみや傾斜角だけでなく、硬化初期のひび割れ発生への影響も不明確である。そのため、今後、実物大で検証し、多角的な点から評価を行う予定である。

参考文献

- 1) 東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株): 設計要領 第1集 舗装編, (株)高速道路総合技術研究所, 2012
- 2) (社)日本道路協会: 舗装設計便覧 (平成十八年版), 2006.2
- 3) 西澤辰男, 七五三野茂, 小松原昭則, 小梁川雅: 連続鉄筋コンクリート舗装の温度応力に関する研究, 土木学会論文集, No.578/V-37, pp.123-132, 1997.11
- 4) 尾関孝人: 空港コンクリート舗装版の温度応力に着目した疲労度設計手法の合理化に関する研究, 京都大学学位論文, 2011.9