

高たわみ性 SMA を用いた改良型埋設ジョイントの開発

阪神高速道路(株)大阪管理局保全部保全設計課 石井 亜也加
 阪神高速道路(株)大阪管理局保全部保全設計課 尾 幡 佳 徳
 阪神高速道路(株)技術部国際室 岡 本 信 也
 阪神高速道路(株)大阪管理局保全部保全設計課 小 林 寛

要 旨

阪神高速道路では、伸縮継手の騒音・振動の低減や走行性の改善、利用者のサービス向上を目的に、伸縮量の比較的小さい橋梁支間 25m、伸縮量 25mm 以下の PC 桁において埋設ジョイント工法を研究、実用化してきている。これまでの検討結果より、基層部のグースアスファルト混合物（以下、グース As）にエキスパンドメタルを挿入し、基層と PC 桁上面の間にせん断変形層を設ける工法が標準化され現在に至っている。しかし、施工後数年で遊間直上付近の舗装面に横断方向の線上ひび割れが生じ、その損傷が進行して舗装補修が必要になる等、耐久性に課題を有していた。

従来の工法で使用されているグース As は、高温時は柔らかいが低温時は硬質化し、損傷が発生すると推定された。そのため、グース As に替わる新材料として、特殊改質アスファルトを用いた高たわみ性 SMA に着目し、耐久性に優れた改良型埋設ジョイントの開発を行った。開発にあたっては、室内実験による耐久性比較、現地での試験施工により路面性状やひずみ計測による追跡調査を実施した。さらに、従来構造と新構造の埋設ジョイントの実構造物を模擬した輪荷重走行試験を実施し、破壊形態の確認を行った。これらの結果より、高たわみ性 SMA を用いた改良型埋設ジョイントは従来構造のグース As を用いた埋設ジョイントと比較して高い疲労耐久性を確認した。

キーワード:埋設ジョイント、高たわみ性 SMA、輪荷重走行試験、疲労耐久性

はじめに

伸縮装置は、温度変化や走行車両などによって上部構造に生じる変位を吸収することにより、路面の平坦性や連続性を保ち、車両の安全な走行を確保するために重要な役割を果たしている。しかし、伸縮装置は車両の輪荷重を直接繰り返し受けるため損傷が生じやすく、周囲への騒音・振動の発生源になっている。さらに伸縮装置からの漏水による桁端部損傷や伸縮装置の補修工事は維持管

理上の問題点である。そこで、伸縮装置から生じる騒音、振動及び漏水による桁端部損傷を防ぐため、エキスパンドメタルを用いた PC 桁のノージョイント工法が開発された(図-1)。この工法は舗装の基層部にグース As とエキスパンドメタルを

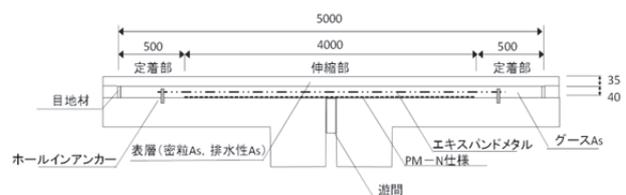


図-1 埋設ジョイント構造図

用いて変形性能を高めるとともに、基層部にせん断変形層を設けて応力をスムーズに伝達させ、伸縮継手部の変形が局部的に集中しないように工夫したものである¹⁾。

しかし、この工法は施工後比較的早期に不具合が見られ、調査の結果、平均3.3年で軽微なひび割れが遊間直上付近に発生し始め、平均4.6年で横断方向にまで進行する。阪神高速道路では、通行止めによる舗装補修工事を路線毎に概ね8年に1回の周期で行い、維持管理に努めているが、現在の構造では、望ましい補修周期の約1/2であった。そのため、埋設ジョイントの耐久性向上は、維持管理上の大きな課題であった。

1. 損傷原因の推定

耐久性向上のため、損傷原因を推定し、改良方針を決定した。損傷原因を以下に示す。

1-1 損傷状況による改良

現状で生じている損傷状況は、**写真-1**に示すように、桁と桁の遊間部の直上で、表層に車両進行直角方向に生じるひび割れである。ひび割れが遊間部直上に生じていることから、輪荷重の繰り返し荷重により、基層部から生じたリフレクションクラックが進行したものであると考えられる。

また、基層部のグース As は低温時に固くなる性質がある。橋面の温度は-5℃～50℃まで変化するため、低温時に伸縮部へ大きな温度伸縮が作用し、ひび割れが発生すると考えられる。

そのため、基層材料は繰り返し载荷に対する疲労抵抗性の改善と低温時のひび割れ抵抗性の改善が必要である。

1-2 施工状況による改良

材料がグース As で1箇所あたりの施工規模が小さいため、人力施工にならざるを得ない。そのため、仕上がりが不均質となる場合がある。

また、エキスパンドメタルもグース As 層の間に設置することとなっているが、施工手順から



写真-1 損傷状況



写真-2 床版面不陸

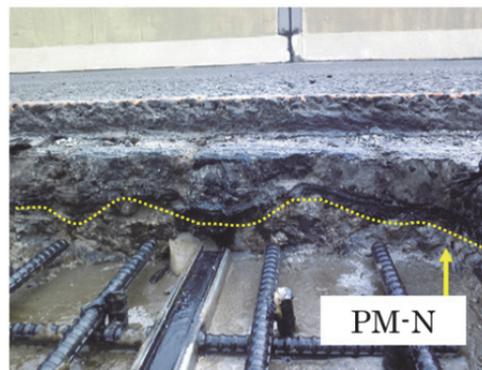


写真-3 PM-Nの凹凸

は、エキスパンドメタル設置後、グース As を流し込むため、エキスパンドメタルが正規の高さに設置されていない場合がある。そのため、施工による均質な品質の確保が必要である。

1-3 施工基面の不具合からの改良

埋設ジョイント補修時には、既設ジョイントを撤去し新設することとなるが、撤去した状況を確認すると、床版面に**写真-2**のような凹凸（不陸）が生じている場合がある。不陸があると**写真-3**のように、温度伸縮を吸収するためのせん断層（PM-N）に不規則な凹凸が生じ、期待するひずみ緩和の機能が発生せず、ジョイント部に想定していない応力が発生する。

表-1 特殊改質バイнда性状

項目	特殊改質 アスファルト	改質Ⅱ型
針入度(25℃)	1/100cm	173
軟化点	℃	79
伸度(15℃)	cm	100+
伸度(4℃)	cm	90
フラース脆化点	℃	-23
針入度指数		8.56
60℃粘度	Pa·a	8.896
		1.475

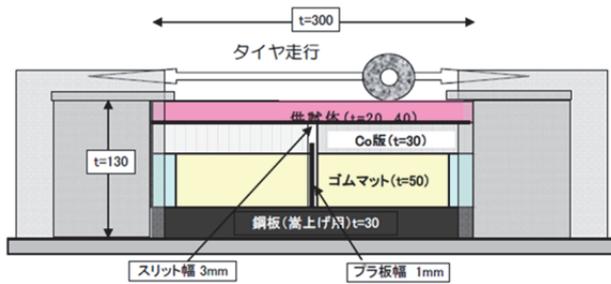


図-2 ひび割れ貫通試験装置



写真-4 ひび割れ貫通試験状況

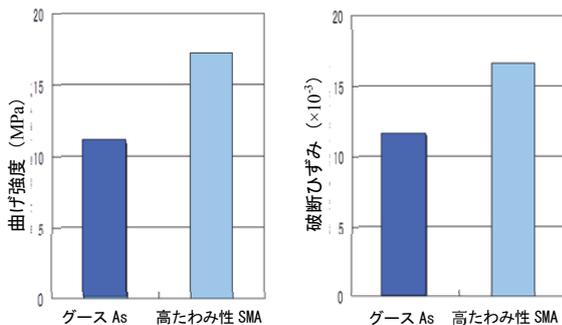


図-3 曲げ試験結果

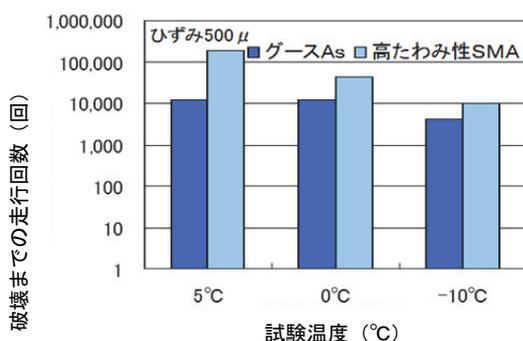


図-4 曲げ疲労試験結果

そのため、不陸のない平坦な施工基面の確保が必要である。

2. 基層代替舗装材の選定

グース As の代替舗装材を求めて、近年のアスファルト舗装技術を調査した結果、高たわみ性碎石マスチック混合物（以下、高たわみ性 SMA）に着目した。

2-1 代替材料の評価方法

高たわみ性 SMA とは、特殊改質バイнда²⁾を用いたアスファルト混合物であり、フラース脆化点が低く針入度が高い特徴を有しているため、低温時の変形追従性とひび割れ抵抗性が期待できる。特殊改質バイндаの性状を表-1 に示す。この混合物の埋設ジョイントへの適用性を評価するため、曲げ試験、曲げ疲労試験、ひび割れ貫通試験を実施した。曲げ試験では、アスファルト混合物の曲げ強度、破断時のひずみ(-10℃)を計測し、低温時のたわみ性を評価した。曲げ疲労試験では、繰り返し荷重を受けた場合の疲労抵抗性を評価した。ひび割れ貫通試験は、ホイールトラッキング試験を応用した試験法を参考に、図-2、写真-4のように、スリットを設けたコンクリート版上に供試体を設置し、輪荷重の走行荷重によりスリット上に発生したひび割れが供試体表面まで貫通する走行回数を測定し、繰り返し荷重によるひび割れ抵抗性を評価した³⁾。

2-2 評価試験結果

曲げ試験の結果、曲げ強度、破断ひずみともグース As に比べて高たわみ性 SMA の方が大きな値を示した(図-3)。曲げ疲労試験では試験温度3条件(5℃, 0℃, -10℃)にて試験を実施した結果、高たわみ性 SMA の方がグース As よりも優れた曲げ疲労抵抗性を示した(図-4)。ひび割れ貫通試験では、グース As に比べて高たわみ性 SMA の方がひび割れ貫通までに時間を要した(図-5)。したがって、高たわみ性 SMA はグースアスファルトに比

べ、低温時のたわみ性、曲げ疲労抵抗性、ひび割れ抵抗性に優れていることが確認できた⁴⁾。

3. 輪荷重走行試験

グース As を用いた従来型埋設ジョイントと高たわみ性 SMA を用いた改良型埋設ジョイントの耐久性を比較するため、実構造物を模擬した供試体による輪荷重走行試験を実施した。

3-1 試験概要

(1) 試験体概要

輪荷重試験に用いた 3 種類の供試体を図-6 に示す。タイプ A はグース As+エキスパンドメタルの従来型、タイプ B、タイプ C が高たわみ性 SMA の改良型である。このうち、タイプ B は埋設ジョイント前後の基層も高たわみ性 SMA を適用するため基層面の不陸が生じず、施工範囲が広いいため機械施工が可能である。タイプ A 及びタイプ C は人力施工を実施するタイプで規制範囲の小さく、部分補修タイプである。改良型には、遊間部のせん断に対する抵抗性を向上させるため、エキスパンドメタルの代わりにガラス繊維シートによる補強層を設置した。ひび割れ貫通試験より、補強材ありの方が補強材なしよりもひび割れ抵抗性に優れ、特に低温時に効果があることが確認されている(図-7)。試験床版の長さは 1980mm、支間長は 1800mm とした。各供試体の中央部には 40mm の遊間を設け、3 種類の供試体を構築した。

(2) 調査・計測内容

輪荷重走行試験では、わだち掘れ量計測、舗装部損傷確認、発生ひずみ計測を実施した。輪荷重走行試験は、設計荷重 98kN の 1 輪荷重分 49kN に衝撃影響 40%を加算した荷重として 69kN を想定した。14 万回終了時に損傷は確認されなかったため、16 万回までは荷重を 83kN に、16 万回以降は 98kN に荷重をあげ、20 万回まで走行試験を実施した。

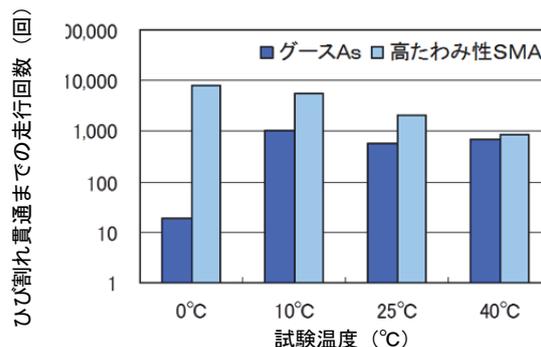


図-5 ひび割れ貫通試験結果

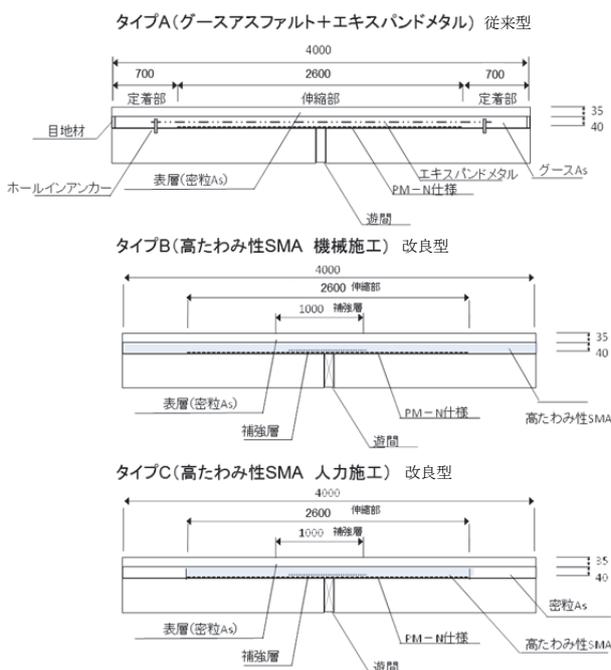


図-6 輪荷重試験供試体

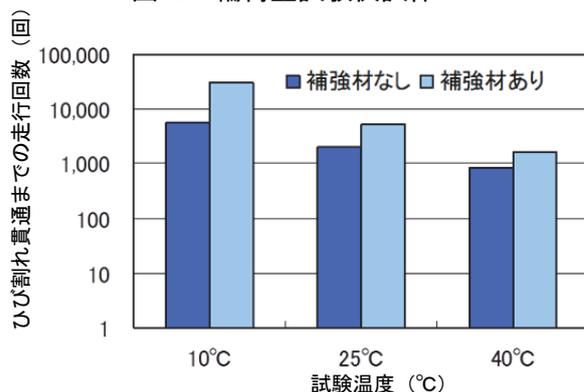


図-7 補強材によるひび割れ貫通試験比較

3-2 調査結果

(1) わだち掘れ計測結果

輪荷重走行試験による舗装損傷を確認するため、わだち掘れ量を計測した。各タイプの計測結果を表-2 に示す。各わだち掘れ量は小さく、阪神高

速の点検判定ではOK ランク相当(3mm 以下)であった。比較するとタイプA よりもタイプB, タイプC が大きい傾向にあった。

表-2 わだち掘れ計測結果

	左タイヤ	右タイヤ
タイプA	1.3mm	1.8mm
タイプB	1.5mm	1.8mm
タイプC	1.6mm	2.1mm

(2) 舗装部損傷確認結果

埋設ジョイント中心部の路面の損傷状況を確認するため、路面観察を実施した。結果を図-8 に示す。タイプA には、骨材飛散による穴の発生、ひび割れが散見されたが、タイプB, タイプC の損傷は軽微であった。また、輪荷重走行試験終了後、供試体を切断し、内部損傷状況を確認した。タイプB, タイプC では明らかな損傷は確認できなかったが、タイプA 供試体の床版から上面に向かって軽微なひび割れが確認された(写真-5)。

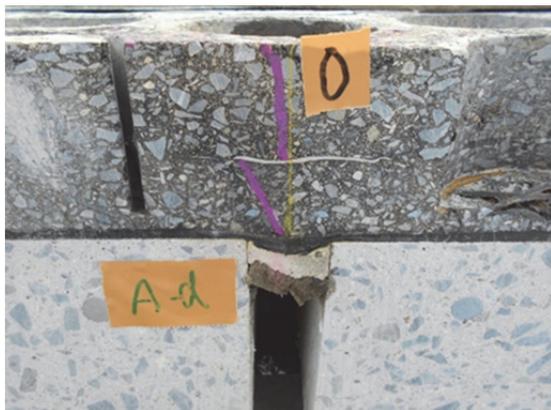


写真-5 タイプA ジョイント部ひび割れ

(3) ひずみ計測結果

疲労損傷による発生ひずみの経時変化を追跡する目的で、ひずみ計測を実施した。ひずみゲージは表層、基層上面、基層下面に設置した。遊間直上部のひずみ分布の経時変化を図-9~図 11 に示す。タイプA では、基層上面のひずみが載荷履歴の増加により引張から圧縮に変化しており、基

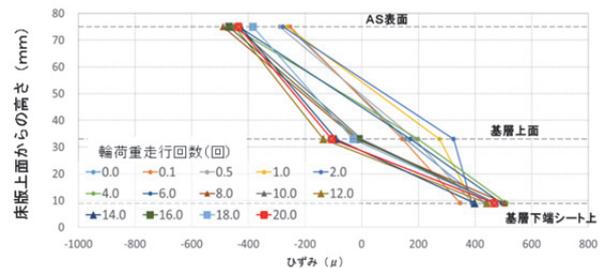


図-9 タイプA ひずみ分布

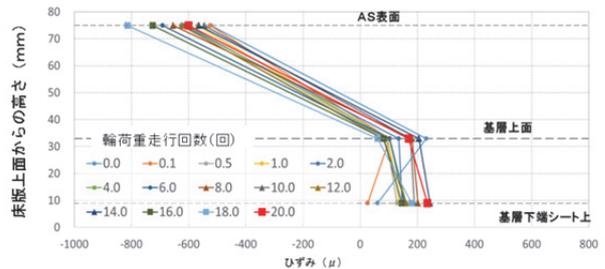


図-10 タイプB ひずみ分布

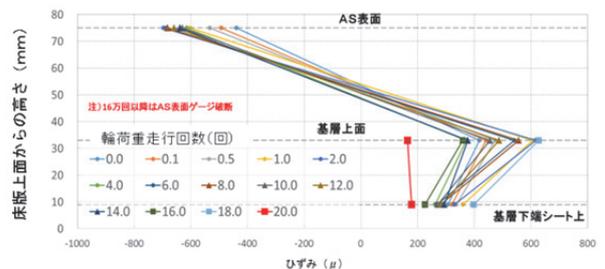


図-11 タイプC ひずみ分布

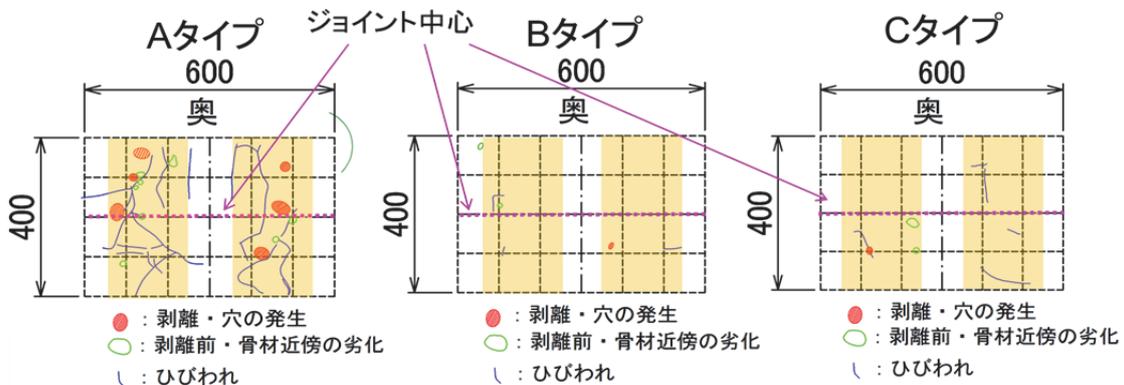


図-8 舗装表面損傷状況

層・表層間でずれが発生していると考えられる。タイプBは、明確な経時変化が見られず最も安定している。タイプCは、計測初期はタイプB同様安定している。16万回以降は、わだち掘れによる表面ゲージ破断のため、表面ひずみは不明であるが、18万回から20万回でタイプA同様の変化が確認され、供試体に何らかの損傷が発生していたものと推察された。また、改良型埋設ジョイントの締固め度は、人力施工タイプが95.9%、機械施工タイプは98.3%であり、人力施工タイプの方が低い結果となった。

3. 試験施工

改良型埋設ジョイントタイプBについて、試験施工を実施し、改良型の施工性を確認した。また、従来型と改良型の耐久性を比較する目的で追跡調査を実施した⁵⁾。

3-1 試験施工概要

(1) 施工箇所

試験施工を実施した従来型埋設ジョイント構造

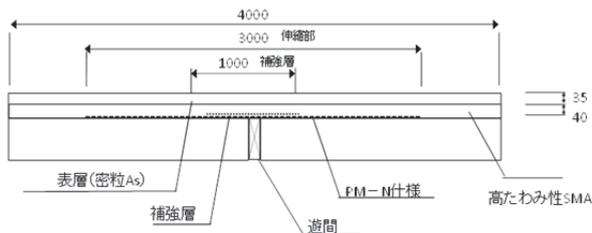
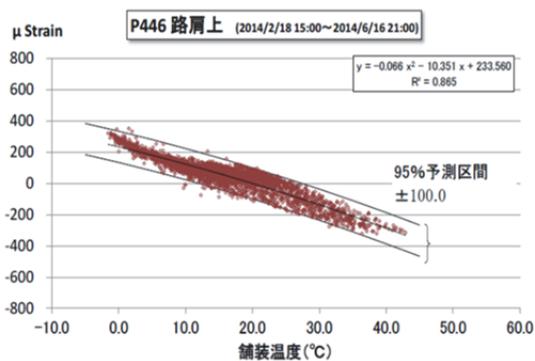


図-12 試験施工改良型埋設ジョイント



a) 改良型(高たわみ性SMA)

を図-11に、改良型埋設ジョイント構造を図-12に示す。試験施工は池田線上路走行車線で行われ、高たわみ性SMA(空上P446走行)と従来のグースAs(空上P450走行)の2形式のジョイントを比較した。

(2) 施工方法

施工は以下の手順で実施した。

- ①既設アスファルト層切削
- ②既設コンクリート床版不陸調整
- ③せん断層(PM-N)敷設・補強層敷設
- ④締固め

締固めに使用したローラは、初期転圧として25t級タイヤローラ7回、二次転圧として10t級マカダムローラ5回、仕上転圧として4t級タンDEMローラ5回を使用した。

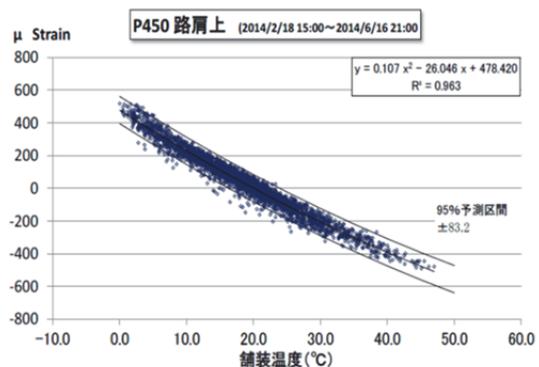
転圧時の温度管理は敷均し温度155℃以上(目標165℃)、初期転圧温度145℃以上(目標155℃)、二次転圧温度105℃(目標115℃)、仕上転圧温度95℃(目標105℃)とし、締固め度確保に努めた。現場での転圧管理、温度管理の結果、締固め度は98%以上が得られ、緻密な高たわみ性SMA層を得ることができた。

3-2 追跡調査

追跡調査は、路面観察、ひずみ計測を行った。

(1) 路面観察結果

従来型及び改良型によるジョイント補修箇所、舗装のみの補修を行ったジョイント未補修箇所について路面観察を実施した。ジョイント未補修のうち、表基層のみ補修部については、施工後3か



b) 従来型(グースAs+エキスパンD)

図-13 静的ひずみ計測結果

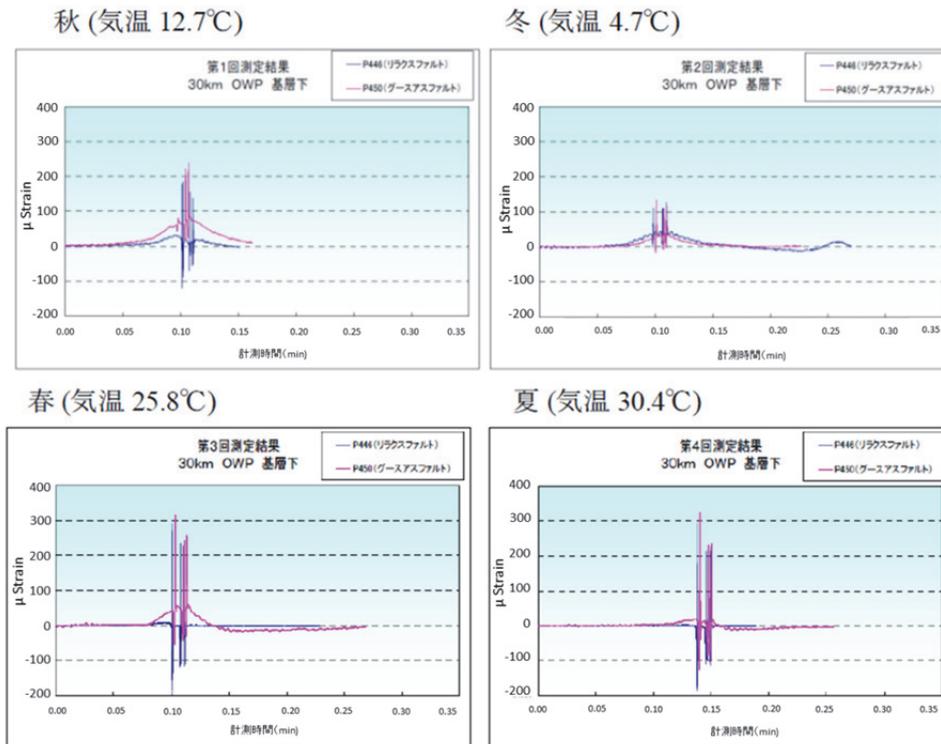


図-14 動的ひずみ計測結果

月にひび割れが発生し、7 か月後には、未補修部すべてにひび割れが確認された。従来型及び改良型によるジョイント補修部は、10 か月後でもひび割れは確認されなかった。

(2) ひずみ計測結果

試験施工時に基層上面、基層下面にひずみセンサーを設置し、供用後に静的ひずみと動的ひずみを測定した。

a) 静的ひずみの測定結果

静的ひずみとして、桁伸縮に伴う発生ひずみを計測した(図-13)。計測結果から得られたひずみ量の幅が、高たわみ性 SMA は、 $\pm 400 \mu m$ であるのに対し、従来型では $\pm 600 \mu m$ であった。そのため、高たわみ性 SMA の方が、応力緩和機能が発揮されていると考えられる。

b) 動的ひずみの測定結果

総重量 196kN の荷重車を 30 km/h で走行させた場合の動的ひずみ計測結果を図-14 に示す。気温による影響を把握するため、季節ごとに計測を実施した。各季節の従来型と改良型の最大ひずみを比較すると、いずれも同程度であった。冬のひずみは、他と比べて小さく、低温時においてアス

ファルトが硬化した性状が示された。ひずみを時間で積分したエネルギー量で考えると、改良型埋設ジョイントの方が、受けるエネルギーが小さく、動的挙動に関しても応力緩和機能が発揮されていることを確認した。

5. まとめ

高たわみ性 SMA を用いた改良型埋設ジョイント工法について検討を実施した。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) 材料試験の結果、高たわみ性 SMA は低温時のひび割れ抵抗性、疲労耐久性が優れ、グース As の代替材料として、耐久性向上が期待できた。
- 2) 輪荷重走行試験の結果、高たわみ性 SMA を用いた改良型埋設ジョイントは従来型埋設ジョイントよりも舗装表面の損傷が軽微であり、供試体内部にも損傷は確認できなかった。
- 3) 従来型埋設ジョイントの発生ひずみによる

ひずみ分布は、荷重回数の増加に伴い表層境界部周辺に異常が生じており、基層・表層間でずれが生じていると考えられる。また、人力施工の改良型埋設ジョイントについても同様の傾向が確認された。

- 4) 輪荷重走行試験より、高たわみ性 SMA を機械施工すると均質な施工および品質が得られることが分かった。
- 5) 試験施工箇所のひずみ計測結果より、改良型は従来型に比べて活荷重、温度荷重に対する応力緩和機能が発揮されていることが示された。

これらの結果から、ジョイント前後に基層にも高たわみ性 SMA を用いた改良型埋設ジョイントは、耐久性に優れる工法であることが確認できた。今後は、2 年経過時点では健全である試験施工箇所の追跡調査を継続し、実橋梁における耐久年数

を確認していく予定である。

謝辞：代替材料検討には大成ロテック(株)の方々、輪荷重走行試験には大阪工業大学井上教授をはじめ、多数の関係者にご協力をいただきました。改めて皆さまに謝意を表します。

参考文献

- 1) PC 桁埋設ジョイント設計施工要領(案)：阪神高速道路公団，平成 6 年 7 月。
- 2) N.Oguri et al.: SMA with Special Modified Asphalt Aimed to Extend Pavement Lifespan, ISAP2010.
- 3) 池田拓哉：室内試験によるひび割れ防止材への評価方法,道路建設, pp.61-67, 昭和 63 年 8 月。
- 4) 井口祐樹ら：高たわみ性砕石マスタック混合物を用いた埋設ジョイントの改良, 第 69 回年次学術講演会, 平成 26 年 9 月。
- 5) 岡本信也ら：高たわみ性 SMA を用いた改良型埋設ジョイントの試験施工と追跡調査, 平成 27 年阪神高速道路第 47 回技術研究発表会論文集。

DEVELOPMENT OF NEW EMBEDDED EXPANSION JOINT USING HIGH FLEXIBILITY STONE MASTIC ASPHALT

Ayaka ISHI, Yoshinori OBATA, Nobuya OKAMOTO and Hiroshi KOBAYASHI

Embedded expansion joints are often used in prestressed concrete bridges in urban areas in Japan for noise reduction and driving comfort. Gussasphalt has been conventionally used for their base course but is known to be damaged at low temperatures. In order to improve durability of the base course, Hanshin Expressway has developed a new embedded expansion joint using high flexibility stone mastic asphalt. In this study wheel load running tests simulating a real viaduct were conducted to compare the fatigue resistance of three types of embedded expansion joints using gussasphalt, fully or partially high flexibility stone mastic asphalt. The results demonstrated an improved fatigue resistance of the new embedded expansion joints.

石井 亜也加



阪神高速道路株式会社
大阪管理局
保全部保全設計課
Ayaka Ishii

尾幡 佳徳



阪神高速道路株式会社
大阪管理局
保全部保全設計課
Yoshinori Obata

岡本 信也



阪神高速道路株式会社
技術部 国際室
Nobuya Okamoto

小林 寛



阪神高速道路株式会社
大阪管理局
保全部保全設計課
Hiroshi Kobayashi