ポリブタジエンフォームによる桁遊間止水材の開発と評価†

玉川 博士* 森 房 春 海** 松 田 哲 夫***
栗 原 慎 介**** 小 川 篤 生***** 樺 山 好 幸*****

Development and Evaluation of Filling Material for Expansion Gap Used Polybutadiene Foam

by

Hiroshi TAMAGAWA*, Harumi MORIFUSA**, Tetsuo MATSUDA***,
Shinsuke KURIHARA****, Atsuo OGAWA***** and Yoshiyuki MOMIYAMA*****

This paper presents development and the result of evaluation of filling material used polybutadiene foam in a waterproof structure at girder end.

The polybutadiene foam used for the waterproof structure is excellent in water resisting property, flexibility, concrete adhesion, weatherability, and durability. Moreover, it was confirmed that the forming object has a difference in water resisting property in the up-and-down portion of the object. Therefore, when the number of lamination of the foaming object was increased, it proved that water resisting property improves.

By installing the waterproof structure of having such characteristic features in the expansion gap of the road bridge, it becomes possible to attain reduction of traffic restriction, and reduction of maintenance expense.

Key words: Expansion gap, Waterproof structure, Polybutadiene, Polybutadiene foam, Filling material

1 緒 言

道路橋の桁遊間部に設ける伸縮装置は、本来の伸縮機能に加えて、路面に設置しているため通行する車両の輪荷重の繰り返しを直接受けることと、道路排水を止水することが基本性能として要求される。橋梁の部材の中では特に損傷しやすい部分であり、近年の車両大型化に加え、違法な過積載車両の増加といった現象に伴って、その補修頻度も増加の一途を辿っている。伸縮装置の破損は、乗り心地の悪化、高速走行の安全性の低下、あるいは騒音・振動等の環境問題の発生および漏水によるコンクリート桁端部・パラペットの変状、支承への影響など迅速な道路保全上の対応を必要とするのと同時に、補修時の交通規制による渋滞の発生は、社会的な時間および経済損失を生じるなど高速道路管理上の大きな問題の一つである。

伸縮装置部の止水構造の損傷メカニズムとしては、通行車両の衝撃力等により本体および周辺コンクリート等が損傷するとともに、橋面の水や泥等が交通車両により止水部に圧入され、損傷し止水機能が損なわれることで漏水を生じる。

この漏水には、凍結防止剤（主に NaCl）が混在することもあり、塩分を混在する水分が桁端やパラペット、

Fig. 1 Feature of concrete deterioration at expansion gap.

査座を濡らし橋台前面や橋梁側面にも漏水するとともに、桁端や張り出し部等を伝わりコンクリート部材に塩害やアルカリ骨材反応を生じる可能性が高い。さらに、これに経時変化による中性化が加わるとコンクリートの劣化メカニズムは、より複雑になる。ちなみに北陸自動車道における橋梁桁端部での損傷は、損傷全体の 70% にも及んでいる。¹⁾

2 止水材の要求性能

筆者らは桁遊間部の止水対策として発泡性柔軟充填材を用いた Fig. 2 に示す構造を考えた。橋梁伸縮装置部の桁遊間を弾力性の大きい発泡性柔軟充填材を用い埋設防水する方法は、桁端防水と橋桁遊間の止水を同時に行う

† 原稿受理 平成 18 年 11 月 14 日 Received Nov. 14, 2006 ©2007 The Society of Materials Science, Japan
* 西日本高速道路エンジニアリング関西(株) 道路技術部 〒532-0003 大阪市淀川区宮原, Odex Co., Ltd., Yodogawa-ku, Osaka, 532-0003
** 中国塗料(株)工業用塗料技術センター 〒520-2323 野洲市三上, Chugoku Marine Paint Ltd., Mikami, Yasu, 520-2323
*** 西日本高速道路(株)関西支社 〒530-0003 大阪市北区堂島, West Nippon Expressway Co., Ltd., Kita-ku, Osaka, 530-0003
**** 正 会 員 中国塗料(株)工業用塗料技術センター 〒520-2323 野洲市三上, Chugoku Marine Paint Ltd., Mikami, Yasu, 520-2323
***** 西日本高速道路(株) 〒530-0003 大阪市北区堂島, West Nippon Expressway Co., Ltd., Kita-ku, Osaka, 530-0003
***** 正 会 員 西日本高速道路エンジニアリング関西(株)道路技術部 〒532-0003 大阪市淀川区宮原, Odex Co., Ltd., Yodogawa-ku, Osaka, 532-0003

Fig. 2 Waterproof structure.

合理的な防水工法である。止水材として要求される性能を下記に示す。また、桁のための遊間充填材の要求性能を Table 1 に示す。

- (1) 性能：伸縮性、コンクリートとの接着性、止水性と耐圧性、適正なバネ定数、接着力の耐久性を有すること
- (2) 施工性：特殊な設備を必要としない、低温環境でも工事可能、品質の安定性を有すること
- (3) コスト：現行の桁端防水工法の費用と同程度もしくはそれ以下であること

提案する止水構造を適用する橋梁は、比較的伸縮量が少なく間隔の狭い遊間 (30 ~ 80mm) を対象とし、橋梁の基本伸縮量から止水材に求められる伸縮性 (伸び率) は 40% 以上とした。従って、接着性に関しても伸び率 40% 以上で剥離しないこととした。また、橋桁の温度変化に伴う伸縮に対する反力の影響が無視できないため、止水材に 40% の圧縮変位が生じた時の荷重が橋桁自重の 1/5 ~ 1/10 と設定した。

車両が伸縮装置を通過する際に発生する衝撃荷重は止水材の剥離・損傷等の大きな原因となることから耐圧性に関しては、車両の接地圧力に衝撃係数と安全率を考慮して設定した。また、施工性に関しては、施工時の気温の影響を受けにくいものとするとともに、特殊な設備や大きな設備の必要がないこととした。

材料の選定にあたり、弾性および柔軟性を有する充填材として一般的に使用されている材料として下記に示すものがあげられる。

Table 1 Fundamental property for foam Filling material.

Items	Specified requirement	Remarks
Property		
Flexibility (Elongation)	>80%	Safety elongation is 80%(Theoretical elongation;40%). Specification date → Clearance of decks ; 30mm, Max expansion value ; ±12mm
Concrete adhesion (Elongation)	>80%	No damage at 80% elongation(Tensile test of concrete to concrete)
Still water Strength	>1.47MPa	Hydraulic pressure resistance of laminated layer (Non foam;75mm, foam;800mm)
Spring constant	<0.15kN/mm	Safety hardness at max expansion value
Fatigue durability of concrete adhesion	>10000cs	No damage after 10000cs and over fatigue test(Cycle tensile test of concrete to concrete, Elongation;40%)
Application		
Workability	>5℃	Stability of curing reaction and foaming ratio at low temperature
Facility		Simple tool can be used likes electric handmixer

- (1) ウレタンエラストマー
- (2) シリコン系シーリング材
- (3) 弾性エポキシ樹脂
- (4) ポリサルファイド (チオコール) 系液状ゴム

この内のウレタンエラストマーであるウレタン硬化ポリブタジエンフォームは、優れた止水性、伸縮性、コンクリート接着力、耐疲労強度を示すとともに、嫌水性が高く防食注入材として使用してきた材料である。また、低温環境でも発泡剤や反応触媒により目的の倍率に発泡させることができる等の特徴を持っている。

ポリブタジエンフォームは一級水酸基を付加した液状ポリブタジエンとジイソシアネートによるもので、基本的には通常のウレタンフォームと同じ製法により得られる。ウレタンフォームと異なる特徴はエチレン ($\text{CH}_2 = \text{CH}_2 : \text{C}_2$) やプロピレン ($\text{CH}_3\text{CH}_2 = \text{CH}_2 : \text{C}_3$) をベースにしたエーテルポリオールとジイソシアネートによる通常のウレタンフォームに比べ、ブタジエン ($\text{CH}_3\text{CH} = \text{C} = \text{CH}_2$ または $\text{CH}_2 = \text{CHCH} = \text{CH}_2 : \text{C}_4$) とジイソシアネートの組み合わせは、化学構造的に親水性が無く、優れた絶縁性と疎水性を示す発泡体が得られることにあり、目的とした桁遊間止水材は、桁遊間全体に充填発泡させ、完全な止水構造を形成させることにあり、ポリブタジエンフォームのような柔軟性、疎水性に富む材料が適切であると判断した。²⁾Table 2 に発泡させる前のポリブタジエンの一般性状を示す。桁遊間止水材に求められる性能は、Table 1 に示すように、伸縮性、コンクリート接着性、止水性等である。高密度軟質ポリブタジエンフォームの桁遊間止水材としての適性を評価試験により検証した。

3 評価試験

試験に供した高密度軟質フォーム用ポリブタジエン (設計発泡倍率約 2.3 (Case 1) および 3 倍 (Case 2)/密度換算による理論値) および無発泡ポリブタジエン (Case 3) の材料組成を Table 3 に示す。

なお、発泡程度の表現として、発泡倍率は近似組成の無発泡物と発泡物の密度比から換算した推測値に過ぎず、おおよその値であり精度に欠けるため、以降密度で表す。

Table 2 Property of polybutadiene in general (before foaming).

Items	Value	Remarks
Specific gravity (Mixture)	0.99	Specific gravity cup
Viscosity (Pa. s, Mixture, 25℃)	1.4 ~ 2.4	Viscosity meter type B
Pot life (min, 25℃)	5 ~ 6	
Foaming gel time (min, 25℃)	20	
Hardness (25℃)	1 ~ 15	Hardness tester type C (SRIS-C)

Table 3 Component of polybutadiene foam.

	Case1	Case2	Case3
(wt%)			
Polybutadiene/plasticizer mixture	65	65	70
water	0.2	0.4	--
Others	9.8	9.6	10
Diisocyanate	25	25	20
Foam density (g/cm ³)	0.43 ± 0.05	0.32 ± 0.05	0.97

3・1 伸縮性

3・1・1 試験体の形状と試験法 Table 3 の Case1, Case 2 および (発泡体密度約 0.37g/cm^3 , 約 2.6 倍発泡) と (発泡体密度約 0.49g/cm^3 , 約 2 倍発泡) による 4 種類の発泡倍率の異なるフォーム用ポリブタジエンを $100 \times 150 \times 25\text{mm}$ の大きさに発泡成型した後, 23°C の環境下で 14 日間養生し 5mm 厚に裁断した, これを Fig. 3 に示すダンベル形状に打ち抜いて試験体とした. 各検体数は 3 個である (以下「 $n=3$ 」と記す.). 試験法は JIS-K-6400 「軟質ウレタンフォームの試験方法」の 10. 引張強さおよび伸びに準じ, エレクトロメカニカルタイプの静的圧縮引張り材料試験機 (1kN) を用いて, 室温にて 500mm/min の引張り速さで破断伸びおよび破断強さを測定した.

3・1・2 伸びおよび引張り強さ 得られた発泡体密度 (発泡倍率) に対する伸びと引張り強さの関係を Fig. 4 に示す. 通常, 発泡体の引張り強さは発泡体密度の低下に比例して低下する. 伸びは脆くなり低下することが想定されたが, きれずに発泡体密度に比例し大きくなった.

試験結果から, 発泡体は桁端間部止水材として必要な伸び性能を示すことがわかった.

試験に供したポリブタジエンフォームは, 発泡体密度が 0.49g/cm^3 (約 2 倍発泡) で 350%, 0.33g/cm^3 (約 3 倍発泡) では 400% 以上の伸び性を示した.

3・2 コンクリート接着性

3・2・1 試験体の形状と試験法 JIS-A-6024 「建築補修用注入エポキシ樹脂」の 4.8 接着強さに示される形状のモルタルブロックを用い, 接着性向上のためのプライマーを塗布し, モルタルの表面含水率が 3 ~ 4% になる

Fig. 3 Feature of specimen for tensile test.

Fig. 4 Relationship between foam density, elongation and tensile strength.

Fig. 5 Adhesion test specimen.

Table 4 Matrix of test specimen condition.

(n=2)		
Polybutadiene form	Foam density	Primer treatment
Case 3	0.97g/cm^3	Non
Case 1	0.43g/cm^3	Non
		Epoxy(2 component)
		Polyurethane(Moisture cure)
		Water bone epoxy(2 component)
Case 2	0.33g/cm^3	Water bone polyurethane(2 component)
		Water bone epoxy(2 component)

ように乾燥状態を調節した. Fig. 5 に示すように, 接着層の厚さ 30mm になるように間隔を設け, Table 4 に示す Case 1 から Case 3 までの発泡体密度のフォーム用ポリブタジエンを充填硬化させ, 23°C の環境下で 14 日間養生した.

試験法はエレクトロメカニカルタイプの静的圧縮引張り材料試験機 (1kN) を用いて, 室温にて 10mm/min の引張速さで伸びと破断強さを測定した.

3・2・2 コンクリート接着性 試験結果を Table 5 に示す.

桁端止水材に求められる接着性は, 橋桁が伸縮を繰り返しても桁端面に強固に接着し剥離しないことであり, 接着力と伸縮性 (伸び率) が加味された接着性が求められる. 試験結果から, プライマーを使用しない場合はほぼ目標値に近い接着性を示すものの, コンクリートとの界面で剥離した. 一方, プライマーの種類にもよるが, プライマーを使用することにより発泡体自身が破断するまで十分な接着性は保持されており, 接着性が大幅に改善されることがわかった.

3・3 止水性

発泡体の止水性は発泡セルが独立セルであるか否かによって大きく左右され, さらに発泡体中の連通セルの割合が大きくなれば止水性は指数的に低下する. 例えば,

Table 5 Result of adhesion test.

(n=2)					
Form density	Primer treatment	Adhesive strength(MPa)	Elongation (%)	Flaking surface	
Case 3	0.97g/cm^3 Non	0.33	87	Concrete	
	Non	0.09	70	Concrete	
Case 1	0.43g/cm^3 Epoxy(2 component)	0.19	160	Inner form	
	Polyurethane(Moisture cure)	0.19	160	Inner form	
	Water bone epoxy(2 component)	0.13	120	Inner form	
	Water bone polyurethane(2 component)	0.09	82	Concrete	
Case 2	0.33g/cm^3 Water bone epoxy(2 component)	0.09	130	Inner form	

発泡ポリエチレンや硬質ウレタンフォームは独立気泡率が100%近いためほとんど吸水しないが、軟質ウレタンフォームは自重の何倍もの吸水性を示す。ここでは発泡体の不連通セルの割合、すなわち独立気泡率の測定と通気性の測定および耐水圧試験を行った。

3・3・1 独立気泡率の測定³⁾

(1) 試験体の準備 Case 1 および Case 2 のフォーム用ポリブタジエン、別途用意した硬質フォーム用ウレタンをφ50mm (t=2mm)、長さ300mmの透明アクリルパイプに発泡成形した後、23℃の環境下で14日間養生した。Fig. 6に示す形状に上部と下部から裁断して試験体とした (n=3)。独立気泡率の測定は、減圧法により発泡体中の連通セルの体積を測定することにより行っている。しかし、軟質発泡体の場合は、発泡体を試験装置に装着し減圧した時に不連通セル内の空気も減圧により膨張し、膨張した量が連通セルの体積に加算されて測定されるため独立気泡率の測定はできない。従って、実際の試験にあたっては発泡体中の不連通セル内の空気が減圧により膨張しないように、透明アクリルパイプ内に発泡成形しアクリルパイプで拘束され減圧時に体積変化が生じないように改良した試験体を用いた。

(2) 試験法 試験法はISO DIS 4590 Rigid cellular plastics-Determination of the volume percentage of open cell and closed cellのPyknometerによる方法とした。最近、ASTM D2856による乾式自動密度計が開発され簡単に独立気泡率を測定することが可能となった。しかし、硬質ウレタンフォームのように圧力変化による体積変化が無視できる場合は精度よく測定できるが、軟質フォームのように大きな影響を受ける場合は適切に測定できないため、古典的なこの方法によった。Fig. 7に試験装置図を示す。

ISO DIS 4590の独立気泡率を測定する基本原理は、ボイルの法則の“PV=一定”の原理を応用したもので、密閉した容器内に置いた試験体の連通セル中の空気は加圧減圧された時周囲の空気と同じ挙動する。しかし、不連通セル内の空気は加圧減圧の影響を受けないので、発泡体の無発泡部分と不連通セルの部分はボイルの法則によらない固体と見なされる。従って、この方法により周囲の空気と同じ挙動する試験体内の連通セル中の空気の体積を計測し、試験体の体積から除せば不連通セル（独立気泡のみの）を含む個体部分の体積が求められる。

Fig. 6 Test specimen for measurement of closed cell content.

A:Test chamber H:Test specimen
B:Reduced-pressure chamber I:Indicator
Ca, Cb:Cranks J:Scale D:Measurement chamber
M1, M2:Differential manometers
Ea, Eb: End points for displacement of pistons
Pa, Pb:Pistons F:Filter T1toT5:Valves
G:Airtight joint

Fig. 7 Test apparatus for measurement of closed cell content in ISO DIS 4590.

ISO DIS 4590のPyknometer法（負圧法）による不連通体積 V_i は次式で与えられる。

$$V_i = ((\delta VA_1 - \delta VA_2) / (-P_e)) \cdot P_B$$

ここで、 $P_B = P_{amb} + P_e$

δVA_1 ; 試験片がないときの試験チャンバーの体積変化

δVA_2 ; 試験片があるときの試験チャンバーの体積変化

P_e ; 試験チャンバーの低下圧（大気圧との差圧）

P_{amb} ; 大気圧

(3) 独立気泡率の測定結果 Table 6に独立気泡率の結果を示す。

軟質の高密度ポリブタジエンフォームには、下部に位置する試験体は独立気泡率が低く、上部に位置する試験体は独立気泡率が高い傾向がある。試験体全体の平均独立気泡率は発泡体密度（発泡倍率）に比例するようではあるが、Case 2による発泡体の上部はCase 1の発泡体の下部より不連通性が高く、必ずしも発泡体密度に関連するとはいえない。発泡体生成の段階で上部は発生ガスを受け止めながら膨張し、発泡が終了するまで下部は上

Table 6 Test result of closed cell content.

Item	Case - 1			Case - 2			Rigid polyurethan cellular
	Upper	Under	Av.	Upper	Under	Av.	
Closed cell content(%)	97.1	76.7	86.9	79.0	54.8	66.9	99.8
Foam density(g/cm ³)	0.39	0.40	0.40	0.33	0.31	0.32	0.28

部を膨張させるためのガスを供給し続けることから、下部に位置する部分はある程度連通している必要があり独立気泡率が低くなる傾向がある。

参考までに、Case 1 は実測した発泡体密度を発泡倍率に換算すると約 2.4, Case 2 は約 3.1 となる。

3・3・2 通気性 発泡体の注入高さと通気性の関係の評価するために、独立気泡率の測定に用いた試験体 (L=85mm) および 25mm, 50mm, 100mm, 150mm の追加試験体を用いて通気性試験を実施した。

また、独立気泡率の測定に用いた 4 種類の試験体 (L=85mm) はその独立気泡率が既知であり通気性試験結果から独立気泡率との関係を求めた。

(1) **試験体の準備** 独立気泡率の測定に用いた試験体および下記に示す試験体を用いた。

Case 1 および Case 2 のフォーム用ポリブタジエンを $\phi 50\text{mm}$ ($t=2\text{mm}$)、長さ 300mm の透明アクリルパイプに発泡成型したものを各 3 本用意し、 23°C の環境下で 14 日間養生する。25mm, 50mm, 100mm, 150mm の高さに各 2 個裁断して追加試験体とした。また、密度 $0.017\text{g}/\text{cm}^3$ (発泡倍率約 60) の市販のウレタンフォームを $\phi 50\text{mm}$ の円柱状に切出し、 $\phi 50\text{mm}$, L=85mm の透明アクリルパイプにつめ込み独立気泡率がほぼゼロとなる試験体とした。

(2) **試験法** 軟質フォームの通気性試験は、一般に JIS-K-6400 「軟質ウレタンフォームの試験方法」の通気性 B 法により測定されるが、この試験装置はウレタンフォームのような大きな通気性を示す材料には適するものの、通気性の低い高密度発泡体を試験する場合は試験体をセットするフレームの機密性が小さいため、試験体とフレームの隙間から漏れ出す空気が大きな誤差となって正確なデータが得られない欠点があった。この問題を解決するために Fig. 8 に示すようにアクリルパイプに充填硬化させた試料をバキュームチャンバーに直結して測定した。

バキュームチャンバーに該当する同径の空のパイプ (L=200mm) に試験体を接続し、大気との圧力差を 300Pa, 500Pa の負圧 (減圧) による試験体 (L=25mm~150mm) の通気量を測定した。

(3) **通気性の試験結果** 注入高さと通気性の関係 (300Pa) を Fig. 9 に示す。充填深さが発泡体密度 $0.40\text{g}/\text{cm}^3$ (約 2.4 倍発泡) の場合は 50mm 位から、発泡体密度 $0.32\text{g}/\text{cm}^3$ (約 3.1 倍発泡) は 75mm 位からほとんど通気性はなくなり、100mm 以上になればどちらも空気は

Fig. 9 Relationship between length and air flow.

透過しない結果となった。しかし、Case 2 の 25mm と 50mm の場合、独立気泡率の影響によるデータのばらつきが見られたため、試験 n 数を 5 に増やして最大と最小値を除く平均値を結果として採用した。

独立気泡率の測定に用いた 4 種類の試験体 (L=85mm の Case1, 2) の通気性試験結果から独立気泡率と通気性の関係を Fig. 10 に示す。また、独立気泡率の測定に用いた試験体のみでは独立気泡率の低い領域での通気性との関係が分からないため、独立気泡率は限りなくゼロに近い市販ウレタンフォームの通気性を測定してデータとして追加した。

発泡体の通気性は、独立気泡率に指数的に比例することが Fig. 10 から明らかとなった。また、市販のウレタンフォームの独立気泡率は、ほぼ 100% 連通しているためゼロに近いが、ISO DIS 4590 の計算理論はセルの殻の体積は不連通部分とみなすため、発泡体中のセルの殻の体積比の百分率をウレタンフォームの独立気泡率とし、1.7% とした。

3・3・3 耐水圧試験 高密度発泡体の場合、独立気泡率の測定や通気性試験により止水性が期待できることは確認した。しかし、止水性能の定量判断基準としては不十分で、車両が伸縮装置を通過する時に衝撃が発生することも考慮し、耐水圧試験を行うこととした。

Fig. 10 Relationship between closed cell content and air flow.

Fig. 8 Test apparatus for measurement of air flow value.

Fig. 11 Test method and specimen.

Table 7 Matrix of water compression test specimen.

No	Polybutadiene foam	Primer treatment	Rsisting pressure layer
A		-	-
B		Water bone epoxy (2 component)	-
C	Case 1	Water bone epoxy (2 component)	50mm
D		Water bone epoxy (2 component)	75mm
E		Water bone epoxy (2 component)	100mm

(1) 試験体の準備 試験体はφ150のB形コンクリートヒューム管、長さ1mを用いFig. 11およびTable 7に示す形状、組合せとした。止水材のフォーム用ポリブタジエンはCase 1（設計発泡倍率約2.3）とし2度に分けて注入発泡させた。耐圧層はCase 3を50～100mmの範囲で用い、養生は室温14日とした。

(2) 試験法 室温にて最大1.96MPaの水圧を加え、水の透過による圧力低下および漏水を調査した。

(3) 試験結果 試験結果をTable 8に示す。

コンクリート面にプライマーを使用した場合、0.49MPaの水圧に耐えたが、プライマーを用いない場合は、低圧下でも水は発泡体とコンクリート面との隙間を剥離させながら貫通した。

無発泡の止水層（Case 3）を用いると止水性は飛躍的に向上し、50mmで約1MPaの耐圧性を示し、75mmにすると要求性能1.47MPaを満足した。

無発泡の止水層（Case 3）の厚みと耐圧強さの関係をFig. 12に示す。

3・4 バネ定数⁴⁾

桁遊間全体を止水材で充填した場合、橋桁の温度変化に伴う伸縮により発生する充填材の反力は無視できなくなり、可能な限り反力の小さい材料とする必要がある。反力は充填材の硬さ（バネ定数）により決まり、その目安を幅10m、長さ40m、高さ1m、桁自重9.8MN程度の橋桁遊間全体に充填し、40%の圧縮変位が生じた時の荷重（反力）が橋桁自重の1/5以下とした。この条件を

Table 8 Result of water compression test.

No	Water pressure (Mpa)								Remarks
	0.15	0.49	0.59	0.98	1.08	1.47	1.72	1.96	
A	Flow	--	--	--	--	--	--	--	
B	Yes	Yes	Flow	--	--	--	--	--	
C	Yes	Yes	Yes	Yes	Flow	--	--	--	Break of resisting pressure layer
D	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	--	Cracking of resisting pressure layer
E	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

Fig. 12 Compression strength of resisting pressure layer (Case 3).

幅30mmの遊間を対象にバネ定数に置き換えると変位は12mmとなり適正なバネ定数は164KN/mm以下となる。更に実験室レベルの大きさとして100mm×100mmの面積に置き換えると、バネ定数は164N/mm以下が適当となる。

ポリブタジエンフォームのような発泡体の適用は反力を小さくできる有効な方法であり、発泡倍率と厚みの違いによるバネ定数の関係を調査した。

(1) 試験体の準備 Case 1およびCase 2の発泡倍率の異なるフォーム用ポリブタジエンを100×100×25(t)mm、100×100×50(t)mm、100×100×75(t)mmの大きさに各3個発泡成型した後、23℃の環境下で14日間養生した。

(2) 試験法 バネ定数の測定はJIS-K-6385に準拠し、試験機はエレクトロメカニカルタイプの静的圧縮引張り材料試験機(50KN)を用い、試験荷重は橋桁の最大伸縮量の12mmに対応させるために、試験体毎に8～16mmとなる荷重に設定した。圧縮速度は10mm/minとし、Fig. 13に示すように2回の予備圧縮を含む3回の圧縮試験を繰り返し3回目の圧縮曲線からバネ定数を求めた。バネ定数は次式により与えられる。

$$\text{バネ定数 } K = (F1 - F2) / (t1 - t2) \text{ N/mm}$$

(3) バネ定数の試験結果 試験結果をFig. 14に示す。

Case 1の約2倍発泡の場合、厚みが50mm以下になるとバネ定数が大きくなる傾向はあるものの、30mmの橋桁遊間にバネ定数164N/mm以下の充填層を十分形成できることが分かる。また、Case 2のように発泡倍率が3以上となると、

バネ定数はほとんど厚みの影響を受けなくなることが分かる。

Fig. 13 Test Method of spring constant.

Fig. 14 Relationship between spring constant and thickness.

3・5 湿潤コンクリート面下の止水性

高密度ポリブタジエンフォームは全天候型の材料ではなく、接着面に水分が介在すれば著しく接着性は低下し目的とする性能は得られない。水中硬化型の塗料を湿潤コンクリート面用プライマーとして用いることがこの問題を解決できる糸口と考え実験を行った。

3・5・1 試験体の準備 塗装時の条件やプライマーの種類を変えて塗装したプライマー塗布モルタル板と十分乾燥させ湿気硬化型のウレタンプライマーを塗布した同じ大きさの2枚のモルタル板を用いて Fig. 15 の試験体を製作し、23℃の環境下で7日間養生し試験体とした。ポリブタジエンフォームのモルタル面との接着性は接着面の乾燥状態に大きく左右されるため、フォーム用ポリブタジエンの注入発泡はプライマー塗布後12時間以上2日以内にプライマー表面が乾燥していることを確認して実施した。また、プライマー塗布モルタル板の塗装時の条件やプライマーの種類は Table 9 の組合せとした。

ポリブタジエンフォームに水を誘導する水みちは、あらかじめモルタル板に傷をつけプライマー塗布、乾燥後に2分割し、それを組合せてできるクラック(0.2mm程度)とし、フォーム用ポリブタジエンを注入発泡させた後、水を誘導する側のモルタルは表面から水が蒸発しないように全面エポキシ塗料によりシールした。

3・5・2 試験法 試験はプラスチックロートおよびパイプに水を充填させ、水の減量をパイプに付けた目盛りにより読み取る方法とした。また、ポリブタジエンフォームのない試験体を同じ条件で作製し、クラック部からの漏水量を測定してブランク値とした。

3・5・3 漏水量の測定結果 Fig. 16 に示すようにモルタル板のクラックは10L/月程度の水を排出可能であるが、各試験体の漏水量は2ヶ月間で6～7ccと極めて

Fig. 16 Time rate of leaking water.

微々たるものであった。また、試験体のポリブタジエンフォームやそのモルタル接着面にはまったく湿潤は見られず、測定値はパイプの上端やシール塗料を介して蒸発した水と考えられた。従って、フォーム用ポリブタジエンを注入発泡させる段階でコンクリート面が乾燥していればプライマー塗布時の含水率は止水性には大きく影響しないものと判断された。

3・6 接着力の耐久性

3・6・1 試験体の準備 Case1 のフォーム用ポリブタジエンを用いて、コンクリート接着性試験に用いた試験体と同じものを、Table 10 の組合せにより製作し、23℃の環境下で14日間養生し試験体とした。

3・6・2 試験法 室温で油圧型の動的圧縮引張り試験機(100KN)を用い、Fig. 17 の1Hzで振幅 7 ± 5 mmの正弦波変位を試験体を与え、1万回の繰返しを行い外観(剥離、亀裂等)の調査を行った。その後、コンクリート接着性試験と同じように、エレクトロメカニカルタイプ

Table 10 Matrix of test specimen for adhesive durability.

No	Polybutadiene form	Primer treatment
A	Case 1	--
B		Epoxy (2 component)
C		Polyurethan (Moisture cure)
D		Water bone epoxy (2 component)

Fig. 15 Test specimen for water leaking.

Table 9 Matrix of Primer treatment for concrete mortar.

No	Moisture content (%)	Primer treatment	Polybutadiene form
A	4-5	Underwater curable epoxy (2 component)	Case 1
B	4-5	Water bone epoxy (2 component)	
C	Saturate	Underwater curable epoxy (2 component)	
D	Saturate	Water bone epoxy (2 component)

Fig. 17 Fatigue pattern of hydraulic test machine.

Table 11 Result of adhesive durability.

No	Fatigue cycle				Adhesive strength (MPa)	Elongation (%)
	400	6000	8000	10000		
A	Yes	Yes	Yes	Yes	0.08	70
B	Yes	Yes	Yes	Yes	0.19	160
C	Yes	Yes	Yes	Yes	0.18	150
D	Yes	Yes	Yes	Yes	0.13	110

の静的圧縮引張り材料試験機 (1kN) を用いて、室温にて 10mm/min の引張速さで伸びと破断強さを測定した。

3・6・3 接着力耐久性の試験結果 試験結果を Table 11 に示す。

昼夜の温度差による橋桁の伸縮は 1 年に 365 サイクル繰り返され、試験の 1 万回は約 30 年分に相当する。試験に供したポリブタジエンフォームは外観的な異常はなく、わずかな伸び性の低下が観られただけで、優れた耐接着疲労性を示した。

3・7 耐候性

3・7・1 止水材の耐候性 ポリブタジエンは分子内に不飽和二重結合をもつ化学構造的をしているため、紫外線吸収剤や光安定剤で劣化防止措置を行っているものの、大気中で紫外線を受けると不飽和二重結合部分が酸化重合し表層に亀裂等の不具合を発生する。

紫外線は透過性の弱い電磁波であるため内部まで劣化することはないが、桁遊間は季節変動するため、発泡体が大きな引張、圧縮応力を受けている場合、表層の小さな亀裂が起点になって更に大きな亀裂に変化する可能性は見逃せない。

ポリブタジエンの紫外線劣化を防止するためには紫外線または酸素との照射、接触を阻止すれば良く、柔軟性が大きく、ウレタン変性アクリル樹脂と無黄イソシアネートによる特殊アクリルウレタン系の耐候性のある塗料を 30 ~ 50 μ 塗布することが最も簡単で効果のある方法である。屋外暴露 1 年半の結果ではまったく異常は認められなかった。

4 結果と考察

供試体の高密度ポリブタジエンフォームは大きな水圧で加圧されれば水は気泡を貫通させ透過するが、独立気泡率が高いため 0.5MPa 程度の圧力には耐える良好な止水性を示した。発泡体の止水性能だけが評価されるのであれば、高い独立気泡率が得られる硬質フォームが圧倒的に有利であるが、桁遊間部の止水材として用いる場合、伸縮性や低いバネ特性は必須条件であり、さらに止水性能が付加されればより発泡倍率の低く密度の高い軟質フォームを選択することとなり、伸縮性や低いバネ特性に関しては相反する要因となる。しかし、独立気泡率の測定結果からみて、軟質フォームの止水性を左右する独立気泡率は必ずしもフォームの密度に依存するのではなく、フォーム密度が低い（発泡倍率が大きい）成型物であっても中央から上端に位置するフォームの独立気泡率は大きく高い止水性能を示す。つまり軟質フォームの独立気泡率は成型時の位置への依存性があるために、比較的低密度の軟質フォームを用いても優れた止水性能が得られること、独立気泡率は止水性に指数的に影響することも良好な止水性が得られた理由と考えられる。

コンクリート接着性について、接着強さや伸びについ

ては Table 5 に示すように定量的な評価ができた。しかし、耐久性については試験終了時に接着力や伸び率を定量的評価したものの、その経時変化については定性的な評価にとどまっている。今後、より適切に耐用年数、劣化速度等について評価予測できる試験法、解析法の検討を進める予定である。

5 結 言

本研究に着手した目的は冒頭でも触れたように、凍結防止剤散布による橋桁端部と橋桁を支えているパラベット部や橋脚の沓座周りの損傷劣化に対する耐久性の向上である。

橋桁間に設置された伸縮装置は通常止水構造に設計されているものの、止水シール材の機能が低下すると雨水は橋桁遊間を伝わって桁裏にまわり、溶け込んだ塩分により塩害等が発生したケースがある。

ポリブタジエンフォームによる桁遊間止水材の開発は、このような背景からスタートしたものである。今回の試験結果から得られた結論を下記に示す。

(1) 発泡体の密度が 0.49g/cm³（発泡倍率としては約 2 倍）以上になるとバネ定数の増大傾向が著しく、発泡体の密度が 0.3g/cm³（発泡倍率としては約 3 倍）以下になると独立気泡率の低下による止水性の低下が著しいため、桁遊間止水材としての発泡体の適正な密度は約 0.49g/cm³ から 0.3g/cm³ の範囲にあることが望ましいと判断された。

(2) 独立気泡率の試験から成型物の上下部分には明らかに止水性の差があることが分かり、充填回数（積層数）を多くすればより止水性は向上する。

(3) 耐圧性が必要な場合は適切な厚みの無発泡層を設定することにより対応できる。

本検討で開発した止水材を用いての試験施工から 1 年半経過した現在も追跡調査を実施中であるが、特に変状は見られていない。今後も追跡調査を実施するとともに、新材料の開発につとめていきたい。

参 考 文 献

- 1) K. Kumagai, H. Takahashi and M. Aoyama, "The damage characteristic and degradation process of the concrete components of the bridge beam end in Hokuriku area", Journal of Construction Management and Engineering, JSCE, No.798, VI-68, pp.31-39 (2005).
- 2) S. Nishizaki, "Kogyo Zairyo", Vol.23, No.11, pp.42-45 (1975) THE NIKKAN KOGYO SHIMBUN, LTD.
- 3) G. Woods, "The ICI Polyurethane Book", p.169, p.264 (1987) J. Wiley & Sons.
- 4) H. Tohara, "Boshin Gom", pp.52-60 (1975) Japan Association of Rolling Stock Industries.