

FRPを用いた橋梁用伸縮装置の開発

Development of the bridge expansion joint using FRP



久保 圭吾^{*1}
Keigo Kubo

福永 靖雄^{*4}
Yasuo FUKUNAGA



山口 浩平^{*2}
Kohei YAMAGUCHI

今村 壮宏^{*5}
Takahiro IMAMURA



日野 伸一^{*3}
Shinichi HINO

芦塚 憲一郎^{*6}
Kenichiro ASHIZUKA

要 旨

橋梁の伸縮装置は、路面の滞水や融雪材などにより、鋼材やゴムが腐食劣化し、伸縮装置の損傷はもとより、漏水などによる橋桁端部の損傷を誘発することから、短期間で補修や取替えを余儀なくされている。このため、これらの要望に対応できる伸縮装置として、軽量で耐食性に優れ、様々な形状に成形できるという特徴を持つFRP材を用いた伸縮装置を開発した。本研究では、FRP伸縮装置の基礎的な耐荷力を確認するため、静的載荷試験を実施した。また、GFRP材は鋼材と比べ柔らかく、走行車両のタイヤによる摩耗などの損傷が懸念されることから、回転式舗装試験機を用いた耐摩耗性試験も実施した。これらの結果、実用上十分な耐荷性能を有していることが確認された。

キーワード：FRP、伸縮装置、静的耐荷力、摩耗試験

1. はじめに

橋梁の伸縮装置は、気温の変化による橋梁の伸縮などの変形を吸収し、自動車や人が支障なく通行できるためのものである。しかしながら、路面の滞水や融雪材などにより、構成材料である鋼材やゴムが腐食劣化（図-1参照）し、伸縮装置の損傷はもとより、漏水などによる



図-1 伸縮装置の損傷事例¹⁾



図-2 桁端の損傷事例¹⁾

橋桁端部の損傷（図-2参照）を誘発することから、短期間で補修や取替えを余儀なくされている。また、伸縮装置の補修や取替えは、路面からの作業であり、交通規制をとまなうことから、補修や取替えの施工期間短縮および長寿命化による交通規制の低減が求められている。このため、これらの要望に対応できる伸縮装置として、軽量で耐食性に優れ、様々な形状に成形できるという特徴を持つFRP材を用いた伸縮装置を開発した²⁾。

本研究では、FRP伸縮装置の基礎的な耐荷力を確認するため、静的載荷試験を実施した³⁾。また、GFRP材は鋼材と比べ柔らかく、走行車両のタイヤによる摩耗などの損傷が懸念されることから、回転式舗装試験機を用いた耐摩耗性試験も実施した⁴⁾。ここでは、これらの試験結果について報告する。

2. 構造概要

FRP伸縮装置は、図-3に示すように、床版端部の型枠を兼用する歯形部と、コンクリートとの定着を図るた

^{*1} 橋梁事業本部 技術本部技術部技術グループ 担当リーダー

^{*2} 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門 助教

^{*3} 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門 教授

^{*4} 西日本高速道路 本社 技術部

^{*5} 西日本高速道路 九州支社 北九州高速道路事務所

^{*6} 西日本高速道路 九州支社 建設事業部

めの孔を設けたリブからなっており、ガラス繊維を強化繊維としてハンドレイアップ成形法により一体成形した構造である。また、FRPとコンクリートは、孔あきジベルにより一体化するが、付着を確保することで耐久性の向上が図られる⁵⁾と考えられることから砂を接着剤で付けることとした。

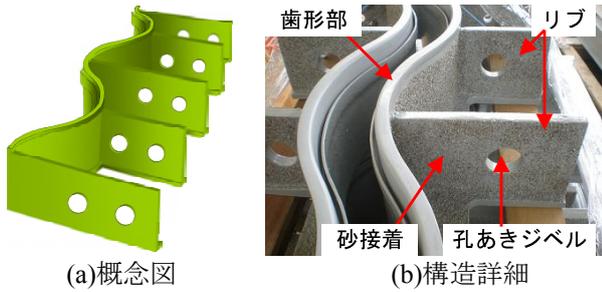


図-3 FRP伸縮装置の構造概要

FRP伸縮装置は、構造上、大伸縮には対応できないため想定する伸縮量を50mm~100mmとし、図-4に示す3種類を設定している。このときの歯形部の突出長は最小遊間量を20mmとし、設計伸縮量に余裕量10mmを見込んで設定した。本伸縮装置の幅員方向の標準長さは、製作性および施工性を考慮して1mとしており、幅員方向の接続は、端部のFRPリブ同士をステンレスボルトで連結する構造としている。なお、FRP材は、ハンドレイアップ成形法による等方性材料とした。

設計荷重は、道路橋示方書の輪荷重(輪荷重面積200mm×500mm、100kN)とし、この荷重が遊間部を除く歯形部に等分に作用するものとした。FRPのリブ高、リブ厚は、図-5に示すように、歯形部基部に作用する曲げモーメントに対し抵抗できるものとして設計し、このときの抵抗断面は引張側コンクリートの剛性を無視し

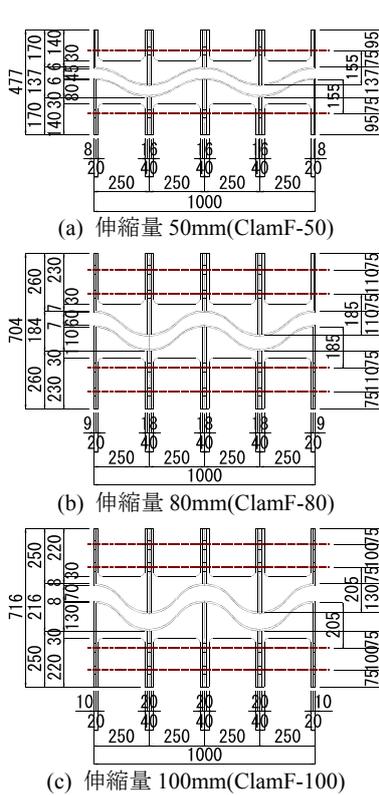


図-4 FRP伸縮装置の種類 単位 (mm)

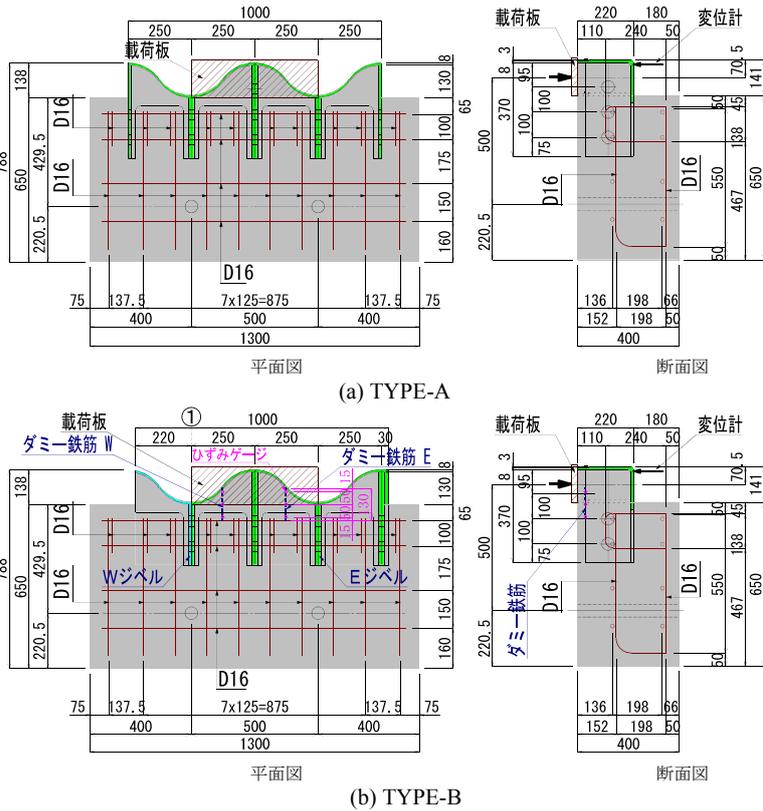


図-5 設計方法の概念図 (伸縮量100mm) 単位 (mm)

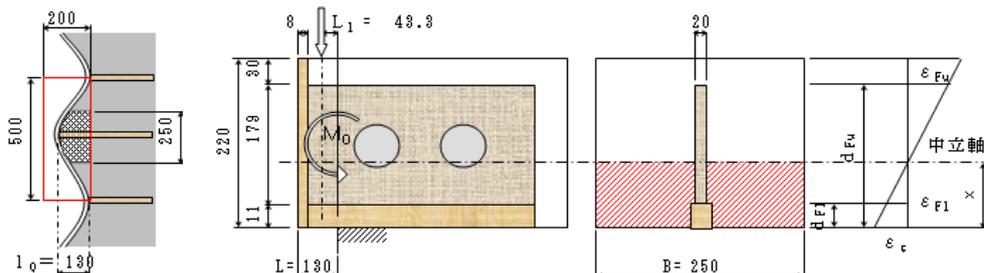


図-6 供試体図 単位 (mm)

d_{Fu} : 下線-FRPリブ上線の距離
 d_{F1} : 下線-FRPリブ下線の距離
 x : 下線-中立軸の距離
 ϵ_{Fu} : FRPリブ上線のひずみ
 ϵ_{F1} : FRPリブ下線のひずみ
 ϵ_c : コンクリート下線のひずみ

たコンクリートとFRPの合成断面とした。なお、このときのFRP材の安全率は、FRP合成床版の事例⁶⁾を参考に3を考慮しており、せん断力に対しては、コンクリートの剛性が大きく寄与することから発生応力は小さく、断面決定に影響しなかった。

3. 耐荷力特性

(1) 試験の概要

本伸縮装置の静的耐荷力、破壊メカニズムなどを確認するため、実物大供試体による荷重試験を実施した。

供試体は、歯形突出量の最も大きい伸縮量100mm(±50mm)のものを用い、実際の伸縮装置の片側を模擬したものとした。伸縮装置と床版とは、床版箱抜き部の界面での破壊を避け、歯形部に着目した試験とするために伸縮装置部と床版部のコンクリートを一体で製作した。

図-6に供試体図を示す。供試体はTYPE-AとTYPE-Bの2種類とし、TYPE-Aの試験で中央のFRPリブの先端の孔を起点としてFRPリブが破断する破壊形態となったことから、TYPE-Bではこの孔を省略した。また、図-7に示すように、TYPE-Aで歯形基部のガラス繊維が連続していないことから、破壊時にこの部分でずれが生じたため、TYPE-Bではガラス繊維を追加積層することで補強した。なお、伸縮装置の橋軸直角方向の接続部の耐荷性状を確認するため、TYPE-Bでは図中①部のWジベル側に、写真-1に構造を示す継手を設けた。供試体の材料特性値を表-1に示す。

荷重は、鋼製フレームに設置した油圧ジャッキにより行い、歯形部に片持ち状態で荷重することによる供試体の浮き上がりを防止するため、床版部をPC鋼棒により

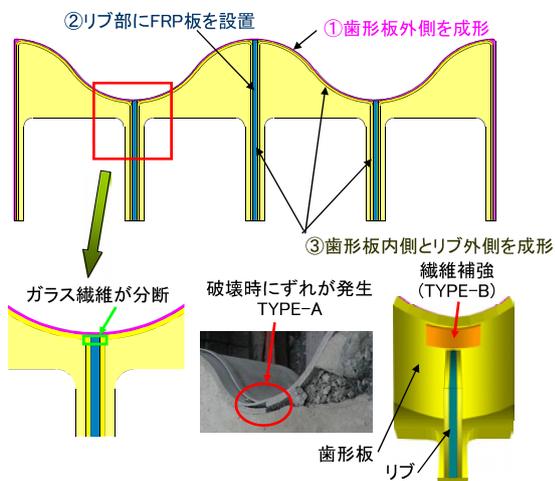


図-7 FRP成形の概要

I桁と固定した。このときの試験概要を図-8に、試験状況を写真-2に示す。

荷重は、輪荷重の接地面積200mm×500mmが歯形突出部に等分布で作用するものとした荷重を設計荷重(92.9kN)とし、単調増加で荷重した。

計測項目は、歯形部先端のたわみ、FRPリブのひずみとし、TYPE-Bには、コンクリートのひび割れ発生荷重を推察するため、リブ天端付近に設置したダミー鉄筋のひずみも計測した。



写真-1 FRP伸縮の継手構造

表-1 材料特性

		圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
TYPE-A	GFRP	—	106	10.0
	コンクリート	40.9	3.12	28.6
TYPE-B	GFRP	—	106	10.0
	コンクリート	47.5	3.63	34.2

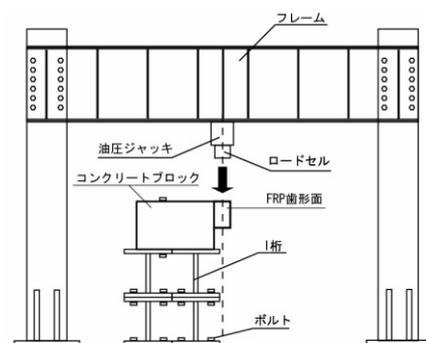


図-8 試験の概要



写真-2 試験状況

(2) 試験結果

図-9に荷重と歯形部先端の荷重-変位の関係を、突出部のコンクリートの有効幅を250mmとした場合の計算値とともに示す。これより、TYPE-Aの140kN付近で、一時的に荷重の減少が見られ、TYPE-Bにおいても150kN付近で変曲点が見られる。これは、コンクリート上面に曲げひび割れが生じた影響であり、概ね計算値と一致している。また、いずれの供試体も、コンクリートにひび割れが生じた後も荷重とたわみの関係は線形的に増加しており、TYPE-AでFRP破断の設計値と同程度の665kNで破壊に至った。このときの破壊形態は、写真-3に示すように、FRP中央リブ上部の破断であり、計算上の仮定と一致している。

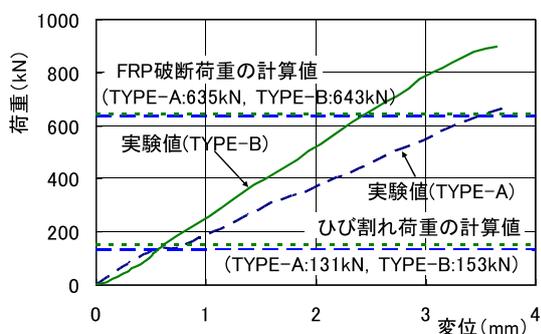


図-9 荷重-変位関係

一方、TYPE-Bでは、ひび割れ発生後も剛性の低下は少なく、破壊荷重も898kNと計算値より大きくなった。これは、歯形基部の補強によりFRP歯形板が荷重を負担していることによるものであり、FRP伸縮装置の設計は、曲げモーメントにより設計することで安全側に評価できると考えられる。なお、TYPE-Bでは、コンクリートひびわれ時の変位の変化がほとんどないことから、輪荷重に対して十分な耐荷力を有しているものと推察できる。

試験終了後のTYPE-Bの供試体上面のひび割れ状況、および中央ジベル、Wジベルの破壊状況を写真-4、ダミー鉄筋の荷重-ひずみ関係を図-10に示す。供試体

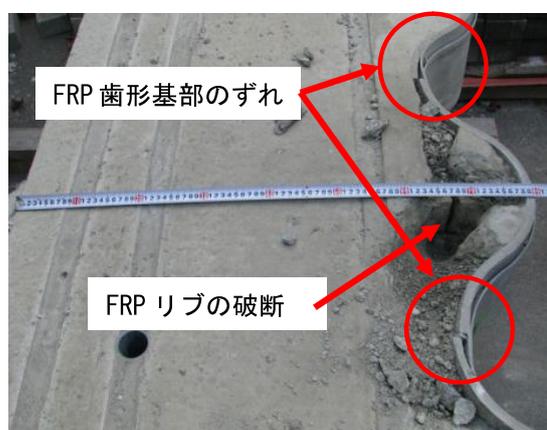


写真-3 FRP破断状況 (TYPE-A)

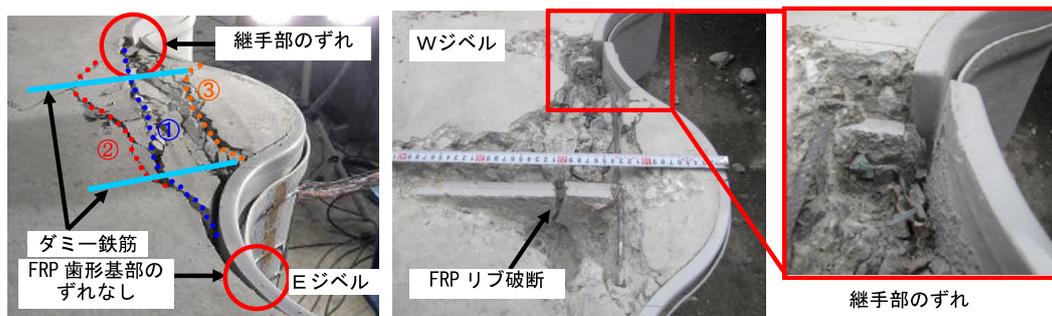
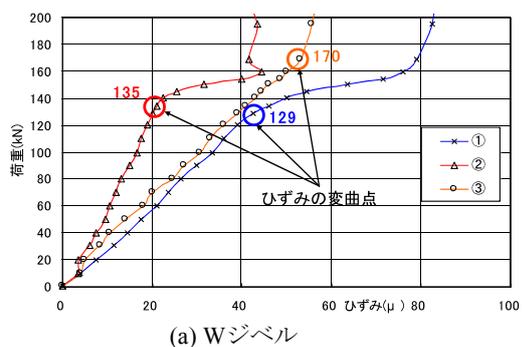
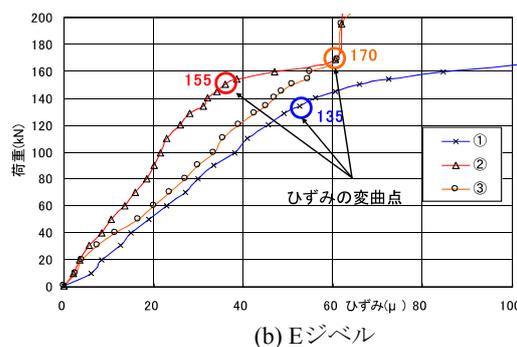


写真-4 破壊状況 (TYPE-B)



(a) Wジベル



(b) Eジベル

図-10 ダミー鉄筋のひずみ

上面には3か所の大きなひび割れが確認でき、ダミー鉄筋のひずみの変曲点の荷重からひび割れ発生の順番を推察すると、①載荷板の端、②FRPリブの先端の孔が位置するコンクリートの上面、③歯形部の重心の順であることがわかった。なお、Wジベル側の方がEジベル側よりも荷重が若干小さいのは、Wジベル側に設けた継手部の影響と考えられる。コンクリート撤去後のFRPの損傷状況では、FRPリブ先端の孔上部からジベルの孔に至る破断が確認できた。また、Wジベルに設けた突き合わせ部における破断も確認できた。これは、Eジベル側がFRP歯形板の基部を補強しているのに対し、継手部では、FRP歯形板が連続していないためと考えられる。

図-11に600kN載荷時の主ひずみの値および方向を示す。いずれも供試体前方に向かう引張作用であり、ジベル上部の値が下部に比べ大きいことから、FRPリブには曲げが生じていることが確認できる。また、主ひずみの方向はTYPE-AとTYPE-Bで大きな差は見られないものの、TYPE-Aに比べTYPE-Bのひずみが小さくなっている。これは、FRPリブ先端の孔の省略による応力集中の緩和、およびFRP歯形板による荷重の負担によるものと考えられる。

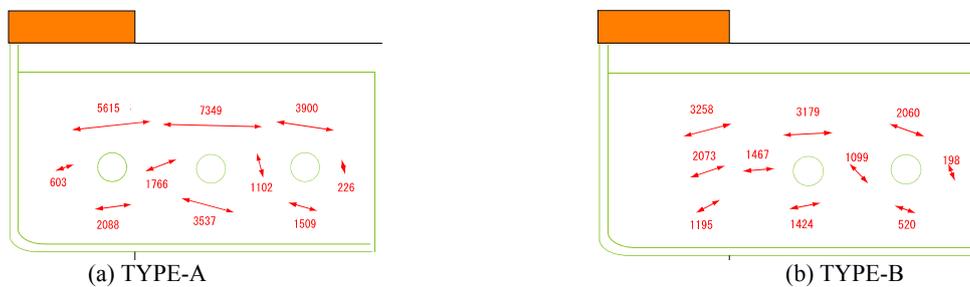


図-11 FRPリブの主ひずみ分布

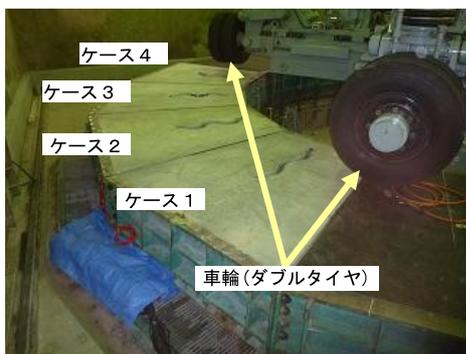


写真-6 試験機と供試体設置状況

4. 摩耗特性

(1) 試験の概要

本試験に用いる回転式舗装試験機は、実際の車輪が舗装上を走行して交通状況を再現するものである。ここでは、本試験機を用いて、FRP伸縮装置の車輪走行による耐摩耗性の確認を行った。試験機と供試体の設置状況を写真-6に示す。

供試体は、伸縮量50mm(±25mm)と100mm(±50mm)の場合のものを適用し、図-12に示すようにコンクリート板の走行位置に伸縮装置を埋め込んだ。なお、伸縮量100mmタイプには設置時の施工誤差を考慮して、段差が2mmのものと、FRPがコンクリートから2mm突出した供試体も準備した。さらに、舗装との相対比較を行うため、2種類のアスファルト舗装供試体も追加した。供試体の種類を表-3に、FRP伸縮部の形状を図-13に示す。

荷重は、時速80km、荷重70kN(試験機の最大荷重)で試験を開始したが、タイヤ温度の上昇により試験の継続が不可能となったことから、1.5万回以降は時速80km、荷重50kNにて試験を実施し、試験機使用期間内に荷重可能であった168万回まで継続した。

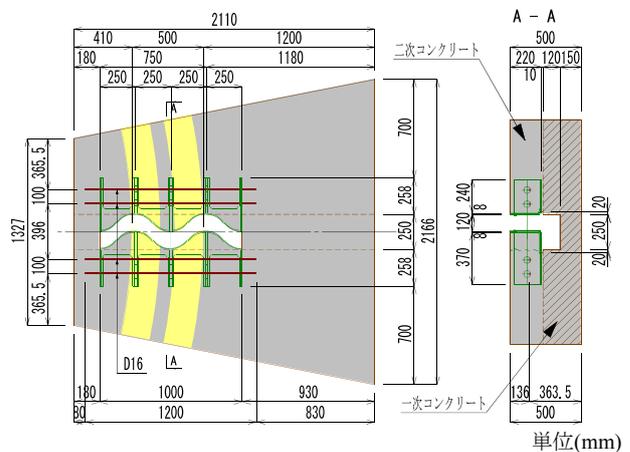


図-12 供試体の形状(ケース4)

試験中は、一定走行回数毎に外観目視と、FRPとコンクリートの摩耗量を計測した。

(2) 試験結果

FRPの変状は、ケース1では、138万回でタイヤ熱あるいは舗装の剥離した骨材によりFRP表面樹脂が若干凹んだ箇所が見られたものの大きな変状はなかった。

一方、ケース2~4の供試体では、いずれの供試体も載荷回数の早い段階で、写真-7に示すようなFRP表面樹脂の剥離が見られた。この原因としては、走行回数の増加による剥離範囲の増大はほとんど見られていないこと、および損傷を受けた空隙の内部のガラス繊維が切断されたような形跡がなく、ガラス繊維が樹脂で被覆されたままであることから判断して、成形時の空隙が車輪走行により表面の樹脂が剥離することで顕在化したものと

表-3 荷重-変位関係

試験ケース	パラメータ	
	板厚t	段差、突出
ケース1	6mm (ClamF-50)	なし
ケース2	8mm (ClamF-100)	なし
ケース3	8mm (ClamF-100)	段差あり(2mm)
ケース4	8mm (ClamF-100)	突出あり(2mm)
ケース0	高機能I型混合物舗装	
ケース0'	密粒度混合物舗装(表層タイプA)	

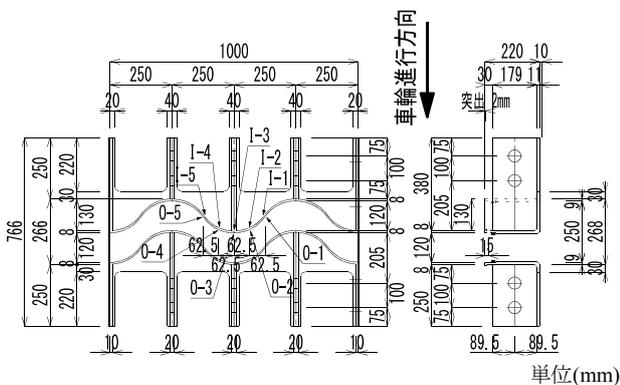


図-13 FRP伸縮の形状(ケース4)



写真-7 FRPの変状(ケース3)

推察できる。

なお、FRP伸縮装置では、耐光性、耐水性の観点からFRP上端にFRP断面が露出しないように、図-14に示す上端のガラス繊維を巻き込む形状としており、平面形状がClamF-50タイプと比べ歯形の曲率が小さいClamF-100タイプで、ハンドレイアップ成形時のガラス繊維が成形型の曲率に沿わず、空隙が顕著となったと考えられる。したがって、このような損傷をなくすためには、FRP上端の曲率を現状の2mmから10mm程度に大きくするなど、成形時に空隙が残らないような対策が必要である。

図-15に、任意の走行回数毎の摩耗量を計測した結果の一例を示す。これより、FRP伸縮装置では、路面がコンクリートとなっていることから車輪走行による変化はほとんどないが、アスファルト舗装供試体では、わだち掘れが生じていることが確認できる。(写真-8)

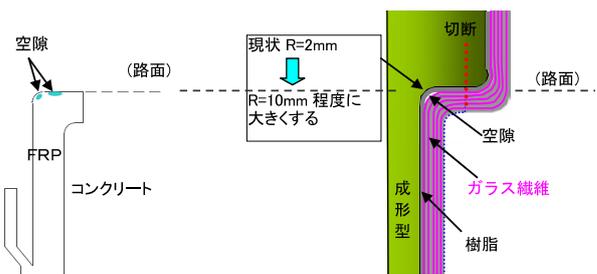
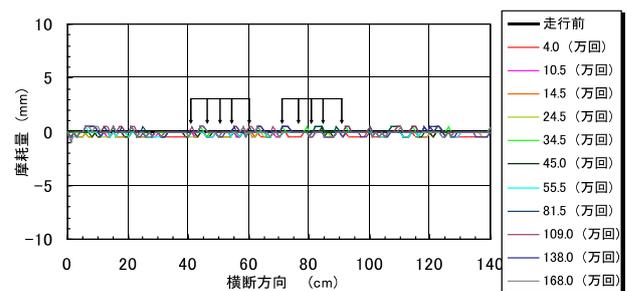
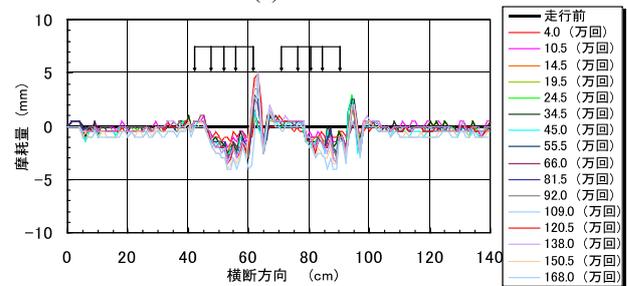


図-14 FRPの変状位置と成形方法

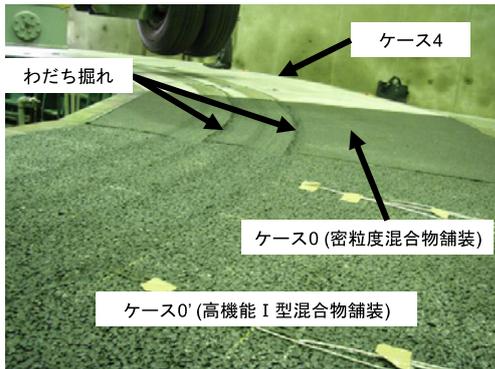


(a) ケース4

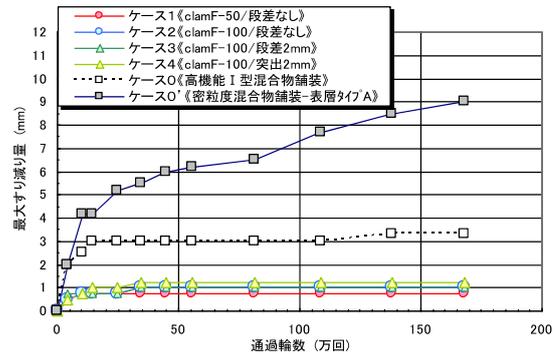


(b) ケース0'

図-15 背面コンクリートの摩耗量



写真一8 走行輪数と摩耗量の関係



図一16 走行輪数と摩耗量の関係

表一4 FRPの摩耗量

供試体の種類			位置	0回	1.5万回	4.0万回	14.5万回	34.5万回	55.5万回	81.5万回	109万回	138万回	168万回
ケース1	clamF-50	段差なし	前	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			後	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ケース2	clamF-100	段差なし	前	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
			後	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2
ケース3	clamF-100	段差2mm	前	0.0	0.4	0.6	0.6	0.4	0.8	0.6	0.6	0.8	0.6
			後	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
ケース4	clamF-100	突出2mm	前	0.0	0.2	0.6	0.8	1.0	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0
			後	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

図一16に走行輪数と摩耗量との関係を示す。これより、FRP伸縮装置では、コンクリート表面の摩耗により載荷10万回程度までで若干摩耗量が増加するものの、その後はほとんど増加せず、いずれの供試体も1mm適度で定常化している。また、ケース0（高機能舗装）では、15万回までで摩耗量が急増し、その後3mm程度で定常化する傾向が見られるが、ケース0'（密粒度混合物舗装）では、増加傾向は小さくなるものの15万回以降も定常化しておらず、168万回走行後で約10mmのわだち掘れが生じている。

アスファルト舗装では、舗装の温度がわだち掘れに与える影響が大きく、今回の常温（室温15℃）で168万回走行の試験結果が、実橋で何年に相当するのかの判断は困難である。しかしながら、法定の輪荷重（50kN）相当の荷重で168万回走行の結果、摩耗量は1mm程度であり増加傾向も見られないことから、実用上問題ないと思われる。

表一4に、FRP摩耗量の計測結果を示す。これより、FRPの摩耗が最も大きいと考えられる2mm突出している場合（ケース4）においても、168万回走行後の摩耗量は1mm以下であり、その他の供試体の摩耗量はさらに小さいことから、コンクリートと同様にFRPの車輪走行による摩耗はほとんどないことがわかった。

5. まとめ

FRP伸縮装置の静的載荷試験および摩耗試験により、以下に示す事項が明らかとなった。

- FRP伸縮装置は、設計荷重に対してTYPE-Aで約7倍、TYPE-Bで9倍以上の破壊荷重であり、輪荷重に対して十分な耐荷力を有している。
- 本伸縮装置の破壊形態は、FRP中央リブ上部の破断であり、FRPリブの断面は曲げモーメントにより安全側の設計ができる。
- 伸縮量100mmのタイプでは、成形時に空隙が生じる恐れがあることから、上端の曲率を大きくするなどの改善が必要である。
- FRPおよび背面コンクリートの摩耗は、50kNで168万回の走行においても1mm以下であり、実用上問題ないと思われる。

謝辞

回転式舗装試験機による耐摩耗性試験を行うにあたりご指導を賜りました、高速道路総合技術研究所の関係各位に深謝いたします。

<参考文献>

- 1) 道路橋の定期点検に関する参考資料（2013年版），国土技術政策総合研究所資料，第748号，pp.479-549，2013.
- 2) 久保圭吾，今村壮宏，芦塚憲一郎，福永靖雄，山口浩平，日野伸一：FRPを用いた橋梁用伸縮装置の耐荷力と摩耗に関する実験的研究，土木学会構造工学論文集，Vol.59A，pp.928-935，2013.
- 3) 久保圭吾，福永靖雄，山口浩平，日野伸一，今村壮宏，桑山豊六：FRPを用いた橋梁用伸縮装置の静的耐荷性能，土木学会第66回年次学術講演会，CS2-029，2011.
- 4) 久保圭吾，今村壮宏，芦塚憲一郎，福永靖雄，日野伸一，若林大：FRPを用いた橋梁用伸縮装置の耐摩耗性能，土木学会第67回年次学術講演会，CS2-038，2012.
- 5) 久保圭吾，長尾千瑛，石崎茂，松井繁之：鋼・FRP複合永久型枠を用いた合成床版の耐荷力と耐久性に関する実験的研究，土木学会論文集A Vol65 No4，pp.932-948，2009.
- 6) FRP橋梁－技術とその展望－ 構造工学シリーズ14，（社）土木学会，pp.83-90，2004.

2014.1.27 受付.

グラビア写真説明

鷗橋

本橋は、東京都発注工事（環状第3号枝線1号）で汐見運河に架かる単純鋼床版箱桁橋です。

架設工法は、運河内にベント杭を施工して両岸からクローラークレーンで施工し、運河上であるため、航路高さを確保するのを留意しながら、ジャッキダウンして据え付けました。

工事評定も高く、第5建設事務所長表彰を受賞しました。（伊藤 浩之）

豊洲橋

江東区豊洲と越中島を結ぶ豊洲運河上に架かる3径間鋼床版箱桁橋と隣接する同形式の1期線の内ブラケット部材の製作・架設・橋面工一式の工事でした。

航路となっている運河のため、船舶を一時通行止めにして、ベント併用のフローティングクレーン架設を行いました。（伊藤 浩之）

中部横断矢沢川橋

中部横断自動車道は新東名自動車道の新清水JCTを起点に、山梨県甲斐市を經由して長野県小諸市に至る高速自動車国道です。このうち山梨県区間（富沢IC～六郷IC）が国土交通省の事業として進められています。

本橋梁は山梨県南巨摩郡南部町本郷地区に位置しており4車線で整備される区間となっています。上下線分離の橋梁で、隣接橋梁は東綱橋梁株式会社が施工しました。（熱海 晋）