

UFCおよびCFを用いた公共構造物の部材の安全性と再生化技術に関する研究

CFRP支持埋設型伸縮装置の疲労耐久性に関する研究

阿部 忠・木田哲量・澤野利章（日大生産工・教授），
斉藤 誠（日鉄コンポジット(株)・技術部・技術部長）

1. はじめに

道路橋伸縮装置は、通過する車両や利用者が快適な走行性を確保するとともに近隣住民への環境対策も配慮しなければならない。従来の伸縮装置では、段差を通過する際に発生する音圧レベルは 100db にも達し、近隣住民に不快感を与えている。また、伸縮装置の段差によって発生する大型車両の荷重変動により周辺床版には大きな荷重が作用し、RC 床版のひび割れ損傷の原因ともなっている。これらの問題解決の対策の 1 つに、炭素繊維シート材で輪荷重を支持する埋設型の伸縮装置が考案され、一部の道路では施工されている。従来、同様の構造で提案された埋設型伸縮装置¹⁾は、遊間部に剛性の高いポリパラフェニレンベンゾビスオキサゾール (PBO) 繊維シートにメタクリル酸樹脂 (MMA) 樹脂を含浸させて荷重支持部に使用しており、表層は通常のアスファルト舗装で施工されていた。今回は、荷重支持部である遊間部にさらに高強度な材料である高強度炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を採用した埋設型伸縮装置を開発した。しかし、埋設伸縮装置は大型車両の過酷な輪荷重と衝撃を受けることから疲労耐久性の確保・確認試験が重要となる。

そこで本研究は、道路橋床版に設置する CFRP 埋設型伸縮装置を通常期、冬期、夏期の伸縮量を想定した 3 タイプの供試体を用いて、疲労実験を行い、たわみの関係から疲労耐久性を評価し、また疲労実験後の静荷重実験における最大耐荷力および終局時の破壊状況から実用性を評価する。

2. 埋設型伸縮装置の概要、基本構造および試験体寸法

2.1 伸縮装置の概要

道路橋には、上部工の熱膨張等を吸収するために橋梁連結装置、すなわち伸縮装置が設けられている。従来の露出型伸縮装置は、取り付けボルトのゆるみ、ゴム部の劣化、固定用コンクリートとアスファルト舗装の流動ずれ等によって段差が生じ、車両通行時に大きな振動と騒音が発生し、床版や近隣住民に対する低周波音を含む騒音が問題となっている。そこで、舗装部分のみを連続化したノージョイント化や埋設ジョイント化が進められている。伸縮装置のノージョイント化工法は、騒音・振動の発生源を無くす

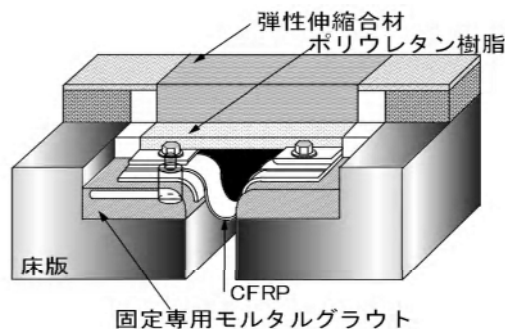


図 - 1 CFRP埋設型伸縮装置の基本構造

沿道環境の改善効果が期待されることから、導入には疲労耐久性の確認が重要である。ノージョイント工法には、主げた連結工法、横げた連結工法、床版連結工法などがある。主げた連結工法、横げた連結工法、床版連結工法は、既設の床版および脊座コンクリートのはつり、支承の交換、鋼げたの削孔、連結、補強などの大掛かりな作業が必要である。これに対して埋設型伸縮装置は、伸縮装置の取り付け範囲の舗装と床版コンクリートをはつり、伸縮性能を持った舗装構造を持つ伸縮装置を設置し、その後、段差なく設置されることから、施工性に優れている構造である。いずれにおいても、伸縮装置は、車両走行時に発生する伸縮部の衝撃・振動により床版および伸縮装置の寿命低下が著しいことから延命化対策が重要である。

2.2 CFRP埋設型伸縮装置の基本構造

連続繊維シート支持埋設型伸縮装置の基本構造を図-1に示す。埋設型伸縮装置の遊間部の材料には、CFRPを採用し、CFRP 上面に充填される 2 種類のポリウレタン樹脂と一体化されることにより輪荷重を支持する構造である。伸縮装置本体となる前記伸縮部分を鋼材及びアンカーで橋梁構造物に設置し、さらに、超速硬無収縮モルタル材又は超速硬コンクリートで設置される構造である。伸縮装置表面は、硬質ゴム粒子をポリウレタン樹脂で固めた専用弾性伸縮舗装合材で舗装され、必要な伸縮性能を有し、伸縮装置本体を埋設化している。CFRP に用いる連続繊維シートの性能は引張強度 3400N/mm^2 以上、引張弾性率 $2.45 \times 10^6\text{N/mm}^2$ である。伸縮装置充填樹脂であるポリウレタン樹脂は伸び 300 %以上の硬質ウレタンゴムと伸び 700 %以上

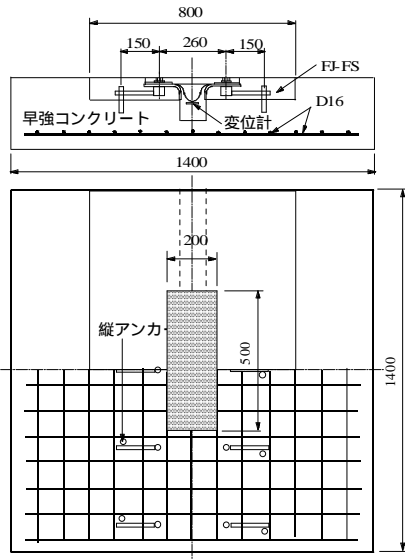
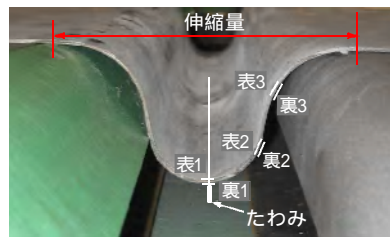
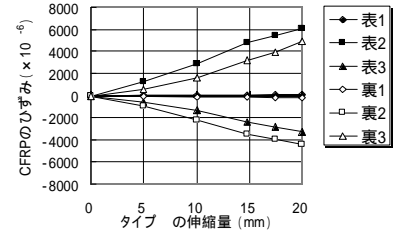


図 - 2 供試体寸法



(2)タイプ

図 - 3 ひずみ・たわみ計測位置



(1)タイプ

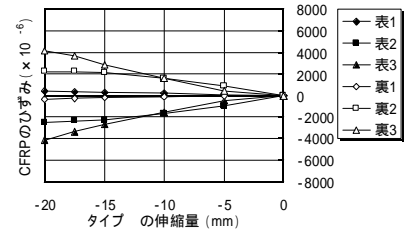


図 - 4 伸縮量とひずみの関係

の軟質ウレタンゴムで構成され、CFRP から弾性伸縮舗装材まで強固に化学的に接着されている。

2.3 実験供試体の寸法および伸縮量

本実験に用いる CFRP 埋設型伸縮装置の寸法を図 - 2 に示す。なお、この装置における幅方向の寸法は実寸であり、長さ方向は輪荷重の設置面から 45 度の荷重分布を考慮して 140cm とした。

伸縮装置の伸縮量は、橋げたの温度変化、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮、活荷重によって生じるけたの回転等による橋梁の移動量に施工誤差による余裕量を考慮する必要がある。そこで本供試体は、伸縮桁長さ 50m 程度の橋梁を想定し、伸縮装置自体の伸縮性能限界に安全率を考慮し 40mm とした。また、一体型伸縮装置とすることにより、桁端部への塩化物イオンを含む水の浸入防止に有効である。よって、本供試体は、冬期を想定して、伸縮装置の伸縮量を +20mm とし、夏期を想定した場合の伸縮量を -20mm とする。したがって、この試験体は合計 40mm の伸縮量を考慮したものである。冬期を想定した試験体は標準タイプを基準に強制的に 20mm 牽引してコンクリートを打設した。また、夏期を想定して標準タイプを基準に 20mm 圧縮してコンクリートを打設し、一体構造として製作した。供試体の名称は標準タイプをタイプとし、冬期を想定した供試体をタイプ、夏期を想定した供試体をタイプとする。

3. 伸縮量に関する実験結果

3.1 強制伸縮量作用時の CFRP のひずみ

強制伸縮量を与えた場合の CFRP に貼り付けたひずみゲージ位置およびたわみ計測位置を図 - 3 に示

す。なお、ひずみゲージは CFRP 上面に充填したポリウレタン樹脂の表面、裏面に 3 箇所 6 点を貼りつけた。冬期、夏期を想定した伸縮量と CFRP ひずみの関係についてタイプ の場合を図 - 4(1)、タイプ の場合を図 - 4(2)に示す。

冬期を想定したタイプ における CFRP の伸縮量とひずみの関係は図 - 4(1)より、計測点表 1、裏 1 のひずみは伸縮量 20mm で、それぞれ 100×10^6 、 -400×10^6 であり底面にはほとんどひずみは生じていない。計測点 2 のひずみは表 2 が引張ひずみ、裏 2 は圧縮ひずみとなり、ともに伸縮量 20mm 付近まで線形的に増加し表 2、裏 2 で、それぞれ 6012×10^6 、 -4370×10^6 である。また、計測点 3 も表 3 は圧縮ひずみ、裏 3 は引張ひずみとなり、最大ひずみは、それぞれ -3000×10^6 、 4920×10^6 である。タイプ の供試体は計測点 3 に比して計測点 2 のひずみが上回っている。

夏期を想定したタイプ の場合は図 - 4(2)より、伸縮量が大きくなるに従って、計測点表 1 のひずみは引張となり、伸縮量が -20mm の場合のひずみが 452×10^6 である。これに対して裏 1 は圧縮され伸縮量 -20mm のひずみが -342×10^6 である。計測点表 2、裏 2 はともに伸縮量 -17.5mm 付近まで線形的に増加し、その後、伸縮量 -20mm までひずみは緩やかに増加している。また、伸縮量 -20mm のひずみは表 2、裏 2 で、それぞれ 2540×10^6 、 2240×10^6 である。次に、計測点表 3、裏 3 は伸縮量の増加に比例してひずみは線形的に増加し、伸縮量 -20mm のひずみは表 3、裏 3 で、それぞれ 4130×10^6 、 4150×10^6 である。

3.2 伸縮量とたわみの関係

伸縮量とたわみの関係は図 - 5に示す。タイプ は伸縮量に比例してたわみが線形的に増加し、伸縮

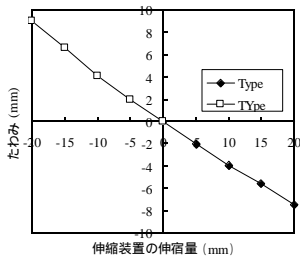


図 - 5 伸縮量とたわみの関係

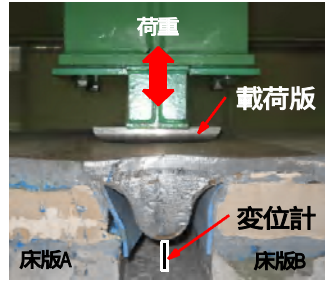
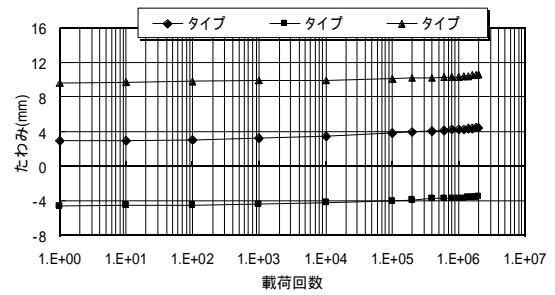
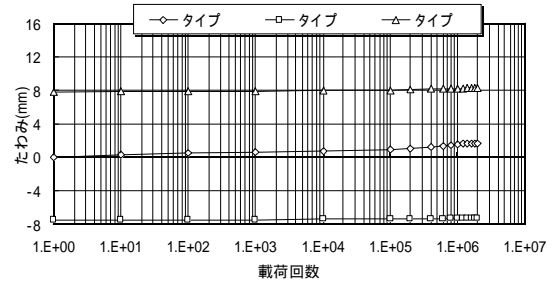


図 - 6 荷重載荷状況



(1) たわみ上限



(2) 残留たわみ

図 - 7 載荷回数とたわみの関係

量が 20mm で-7.49mm である。また、タイプ は伸縮量が-20mm でたわみは 9.02mm である。冬期と夏期でのたわみは伸縮量 ± 20 mm で-7.49mm から 9.02mm まで変形している。

4. CFRP埋設型伸縮装置の疲労実験および静荷重実験

4.1 疲労実験

伸縮装置は、衝撃を伴う輪荷重を直接支持することから十分な耐久性の確保が重要である。伸縮装置に作用する荷重は道示 に規定する T 荷重 100kN (1N/mm^2) を考慮する。また、埋設型の伸縮装置は大きな衝撃を受けることはない構造であるが、ゴム材、鋼材からなる伸縮装置は衝撃による応力を活荷重応力の 40 % が考慮されている。そこで本実験では輪荷重 100kN と衝撃による荷重 50 % 考慮した 150kN を最大荷重として載荷する。載荷板の接地面積は、大型自動車の輪荷重を想定した場合、道路橋示方書・同解説 (以下、道示 値とする)²⁾では $50\text{cm} \times 20\text{cm}$ (接地面積 1000cm^2) としているが²⁾、本実験では取り付けアンカーボルト内に荷重が作用するように $50\text{cm} \times 17\text{cm}$ (接地面積 850cm^2) の鋼板を用い、床版遊間の直上に載荷する。載荷状態を図 - 6 に示す。荷重は、最大荷重 150kN、最小荷重 20kN を 5Hz の正弦波形として載荷する。計測は凸部分下のたわみを $1, 10, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5$ とし、 10^5 以降は 100000 毎に測定し 2×10^6 回までとする。

4.2 疲労実験後の静荷重実験

疲労実験後にタイプ の試験体を用いて、静荷重実験を行った。荷重は 10kN ずつ供試体が破壊するまで載荷した。

5. 結果および考察

5.1 伸縮時および疲労・静荷重におけるたわみ

伸縮時の伸縮量とたわみの関係を図 - 7(1)、残留たわみを図 - 7(2)に示す。

(1) 定点疲労実験

疲労実験における 200 万回での載荷回数とたわみの関係は、タイプ、タイプ、ともに載荷回数 200 万回までは疲労実験 1 回からタイプ は 1.56mm、タイプ、

がそれぞれ 1.1mm、1.0mm と急激な増加が見られなく、緩やかに増加している。また、載荷回数ごとの残留たわみにおいても同様な増加傾向を示している。

載荷回数 200 万回における最大たわみおよび残留たわみはタイプ が 4.49mm、荷重除荷時の残留たわみは 1.02mm である。タイプ は伸縮時のたわみ-7.49mm を初期値とすると疲労実験 200 万回ではたわみは -3.54mm となり、残留たわみは-7.23mm である。また、タイプ の初期たわみは 9.02mm であり、疲労実験 200 万回では 11.86mm に達し、残留たわみは 9.56mm である。なお、疲労実験に用いた上限荷重は、道示 に規定する 100kN に衝撃計数 0.50 を割増した荷重 150kN に載荷板の応力比 0.85 を考慮すると実質荷重は 172.5kN に相当する。本実験の範囲内では、載荷回数 200 万回の疲労実験ではほとんどたわみによる変形量はみられない。

(2) 疲労実験後の静荷重実験

タイプ における疲労実験後の静荷重による荷重とたわみの関係を図 - 8に示す。図 - 8より、タイプ の疲労実験後の静荷重実験における荷重とたわみの関係は、荷重 50kN 付近までたわみの増加が大きく、その後の荷重増加ではややたわみは増加するが、荷重 150kN から 860kN までは線形的に増加し、その時点でのたわみは 6.5mm である。その後の荷重増加ではたわみは急激に増加するとともに、CFRP を保護しているガラス繊維のはく離音が生じる。最大荷重は 910kN でたわみが 11.4mm ある。タイプ の載荷回数 200 万回の疲労実験における残存耐荷力も通常の床版の

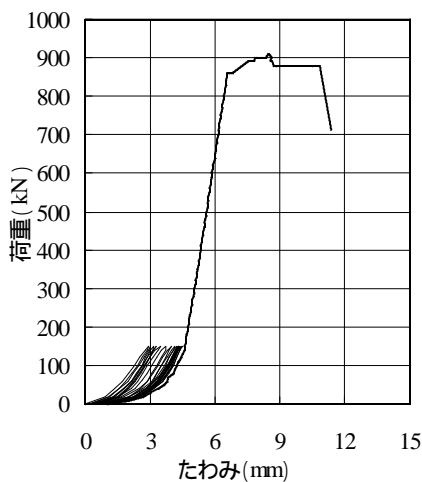
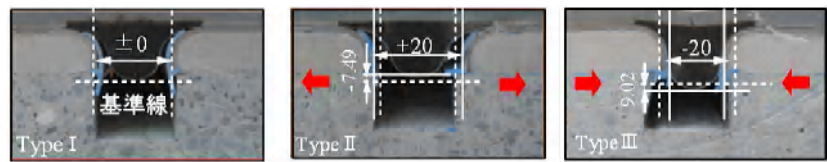


図 - 8 荷重とたわみの関係



(1)タイプ (2)タイプ (3)タイプ

図 - 9 破壊状況(切断面)

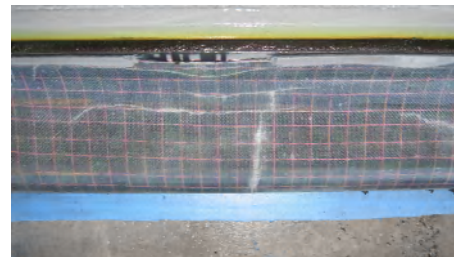


図 - 10 静荷重実験におけるCFRPのはく離状況

押抜きせん断耐荷力を上回っている。

5.2 破壊状況

荷重回数 200 万回の疲労実験における各供試体の切断断面を図 - 9 に示す。また、タイプ I における荷重回数 200 万回の疲労実験後の静荷重実験における CFRP 材の破壊状況を図 - 10 に示す。

図 - 9 より荷重回数 200 万回の疲労実験後の軸方向の切断面では RC 床版との取り付け部の早強コンクリート部にはひび割れがみられない。また、特殊伸縮性樹脂と CFRP とのはく離も見られない。したがって、CFRP 埋設型伸縮装置を装着し、200 万回の疲労実験では装着部の早強コンクリート部および床版コンクリートには目視によるひび割れは確認されない。

次に、タイプ II の疲労実験後の静荷重実験における切断面の損傷状況は図 - 10 より、最大荷重 910kN 載荷後の損傷状況は CFRP 材を保護しているガラス繊維材にひび割れが発生し、また一部のガラス繊維材にはく離がみられるものの破壊に起因するような破断・切断状況は主荷重支持材の CFRP にはく離はみられない。

6. まとめ

埋設型伸縮装置は、通常のアスファルト材では伸縮に追従しにくく、また軟質合材では特に夏季に重車両交通による流動化により、初期平滑であった表面の、窪み段差による騒音の再発生する。さらに 2 輪車走行等の路面安全性を含めた耐久性が課題となる。そこで大型車両の活荷重を想定した衝撃を含む荷重による疲労実験および残存耐荷力を評価した。さらに大型車両が伸縮装置を通過する際に発生する音圧レベルを測定した結果、以下のことが判明した。

(1)本供試体における標準温度 15 の伸縮量 0.0mm を基準に夏期を想定した場合の伸縮量 $\pm 20\text{mm}$ を作用させたガラス繊維系材料で表面保護した CFRP のひずみは、伸縮量に比例して、表と裏で交番応力が発生している。しかし、本設計活荷重（衝撃を含む）が作用した場合においてはほとんど影響を受けない。

(2)本供試体における標準温度 15 の伸縮量 0.0mm を基準に夏期を想定した場合の伸縮量 -20mm のたわみは 9.02mm となり、冬期を想定した場合の伸縮量 20.0mm のたわみは -7.49mm となった。

(3)200 万回の疲労実験におけるたわみは、道示に規定する T 荷重に衝撃係数を割り増した荷重(150kN-20kN)で、200 万回の疲労実験を行ったが、荷重支持材である炭素繊維は高強度であり CFRP 化されていることによりたわみの増加は 1.5mm 程度と少ない。また、200 万回の疲労実験後の静荷重実験における最大荷重は 910kN でたわみが 11.4mm ある。したがって、過酷な荷重を受ける埋設伸縮装置としての疲労耐久性が実証されたとともに、破壊時におけるたわみからも、大型車両の荷重変動も大幅に減少されるものと考えられる。

参考文献

- 1) 杉岡弘一，宮本実信，村上信吉ほか，阪神高速道路における鋼床版用連続繊維シート支持埋設型伸縮装置の適用，土木学会第 59 回年次学術講演会，2004
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 ， ， ， 2002