

CFRP 支持埋設型伸縮装置の疲労耐久性に関する研究

The fatigue durability study on blind expansion joint using continuous fiber sheet

阿部 忠*, 木田哲量**, 小森篤也***, 樋田俊一***

Tadashi ABE, Tetsukazu KIDA, Atsuya KOMORI and Syuniti HIDA

*博(工), 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

**工博, 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

*** 日鉄コンポジット(株) (〒 103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8)

Abstract : The new type of blind expansion joint using carbon fiber reinforced polymer as tension member of traffic load has been proposed in order to reduce the traffic noise and to stabilize the drivability through the smooth joint surface. In this study, the fatigue loading tests on the blind expansion joint of different expansion conditions, and the static loading test on the joint which had been suffered 2 million cycles of fatigue load were conducted. As results, the deflection at the loading of the joint was not increased after 2 millions of cyclic loading, and the static load at failure was 910kN, which is as high as the failure load of RC slab. In the real application, the noise of the traffic was measured before and after the application, and the noise was reduced by 5.3db. So the new expansion joint proved to be highly durable on fatigue, to be tough, and to be effective for reducing the noise.

Key words: CFRP, blind expansion joint, fatigue experiment, static load test, load-carrying capacity, low-frequency noise

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 次

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。さらに、CFRP 埋設型伸縮装置の設置後における段差によって発生する低周波音に対する社会環境への適合性についても評価する。

2. 大型自動車の荷重変動

独立行政法人土木研究所は、大型自動車伸縮継手の段差部を走行する際に発生する荷重変動および衝撃力に関する実験を行い、大型自動車の荷重変動を図-1のように報告している²⁾。これによると、タンデム式ダンプトラックの総重量は中軸で 37.73kN、後軸で 37.14kN であり、この軸重量に対して 2.77 倍～2.86 倍の荷重変動となっている。次に、タンデム式ダンプトラックが段差部通過後の荷重分布および包絡線を図-2のように示している³⁾。これによるとタンデム式ダンプトラックの場合、段差部から 2m, 8m の位置で最大荷重が生じており、段差量 20mm の場合の動的係数 $i = 1.0$ をみると、動的係数が 1.0 以下に減衰される位置は段差部から 14m に及んでいる。したがって、実橋の伸縮継手を通過する際に、その近傍の床版には大きな荷重変動が作用することになる。

一方、RC 床版のひび割れ損傷や寿命の低下は、主

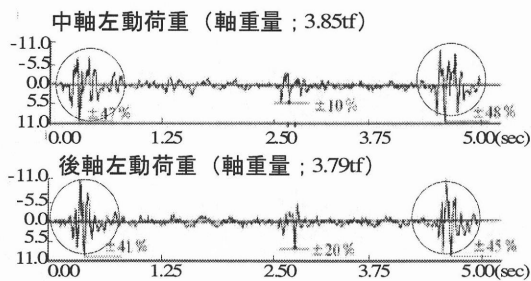


図-1 大型自動車の荷重変動²⁾

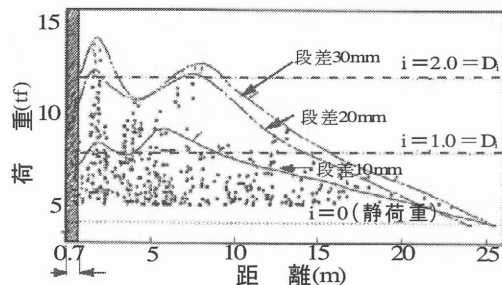


図-2 段差部通過後の荷重分布および包絡線³⁾

に交通量の増大や過積載車両の走行による疲労現象によるものであるが、伸縮装置の段差、路面の凹凸によって発生する荷重変動の影響も大きい。これらのことから筆者らは、伸縮装置の段差によって発生する大型自動車の荷重変動に着目し、荷重変動が RC 床版に及ぼす動的影響を評価するために室内実験を行ってきた⁴⁾。これによると、伸縮継手を通過するときの荷重変動が軸重量に対して $\pm 30\%$ を想定した場合の衝撃係数は $i=0.500$ となり、道路橋示方書・同解説 I⁵⁾ (以下、道示 I とする) が規定する衝撃係数を上回る結果となった。したがって、橋梁では車両が伸縮継手を通過する時に大きな荷重変動が生じるとともに、同時に発生する騒音・振動の原因にもなっている。これらの問題解決の 1 つとしてノージョイント化や埋設ジョイント化が進められ、一部の高架橋では既に実施されている。

3. 埋設型伸縮装置の概要、基本構造および試験体寸法

3.1 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し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

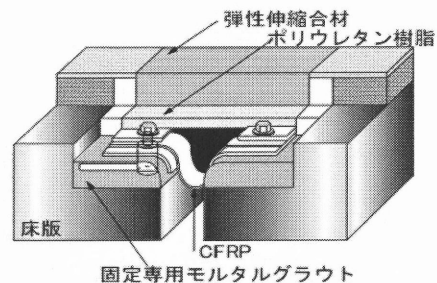


図-3 CFRP埋設型伸縮装置の基本構造

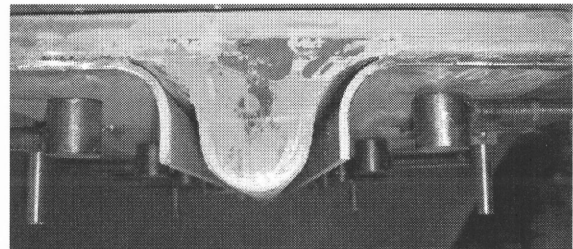


図-4 CFRP埋設型伸縮装置 (床版に設置する前)

認が重要である。ノージョイント工法には、①主げた連結工法、②横げた連結工法、③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、既設の床版および沓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。

3.2 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-3、4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する内容となっている。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% 以上の軟質ウレタンゴムで構成され、CFRP から弾性伸縮舗装合材まで強固に化学的に接着されている。

3.3 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-5の

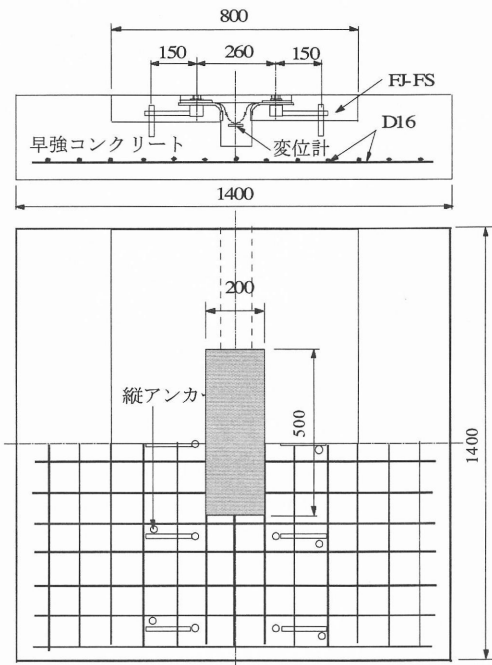


図-5 供試体寸法

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Iとし、冬期を想定した供試体をタイプII、夏期を想定した供試体をタイプIIIとする。

なお、本埋設伸縮装置は弾性伸縮舗装装置を備えて埋設化される伸縮装置構造であるが、本実験の場合は、特殊伸縮性樹脂モルタル合材とCFRP繊維シート部分の耐久性を評価することから伸縮装置本体での評価を実施することとした。

4. 伸縮量に関する実験結果

4.1 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

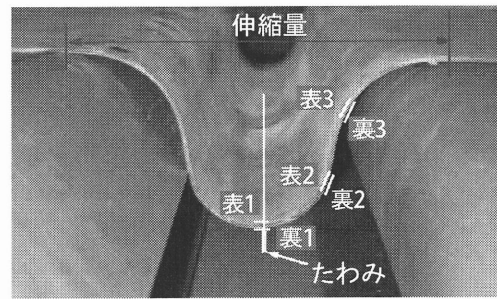
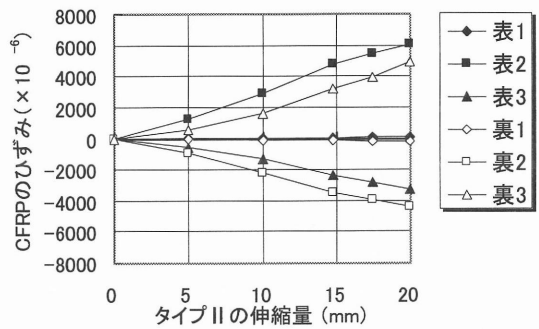
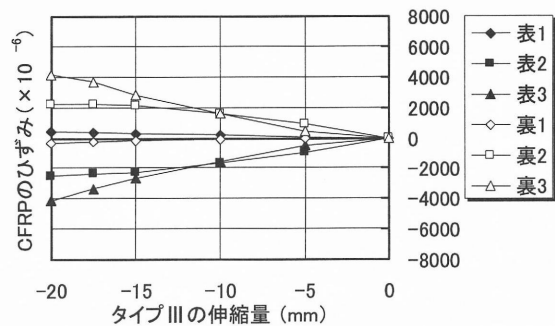


図-6 ひずみ・たわみ計測位置



(1)タイプII



(2)タイプIII

図-7 伸縮量とひずみの関係

みゲージ位置およびたわみ計測位置を図-6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IIの場合を図-7(1)、タイプIIIの場合を図-7(2)に示す。

冬期を想定したタイプIIにおけるCFRPの伸縮量とひずみの関係は図-7(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も計測点2と同様に表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II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IIIの場合には図-7(2)より、縮

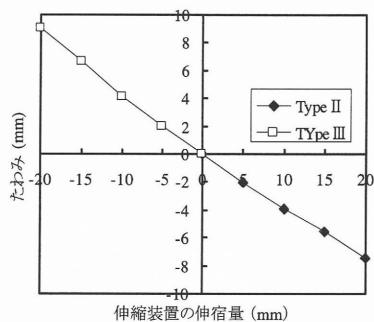


図-8 伸縮量とたわみの関係

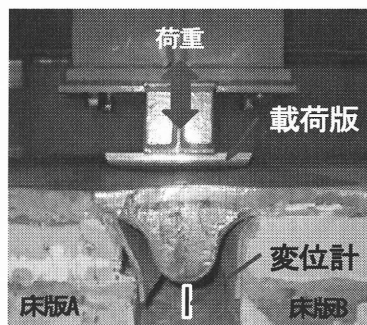


図-9 荷重載荷状況

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。

4.2 伸縮量とたわみの関係

伸縮量とたわみの関係は図-8に示す。タイプIIは伸縮量に比例してたわみが線形的に増加し、伸縮量が20mmで-7.49mmである。また、タイプIIIは伸縮量が-20mmで、タイプIIIも同様な増加傾向を示し、伸縮量が-20.0mm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。

5. CFRP埋設型伸縮装置の疲労実験および静荷重実験

5.1 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Iに規定するT荷重100kN ($1\text{N}/\text{mm}^2$)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、道示Iでは $50\text{cm} \times 20\text{cm}$ (接地面積 1000cm^2)としているが、本実験では図-3、4に示す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-9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10000毎に測定し 2×10^6 回までとする。

5.2 疲労実験後の静荷重実験

疲労実験後にタイプI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。

6. 結果および考察

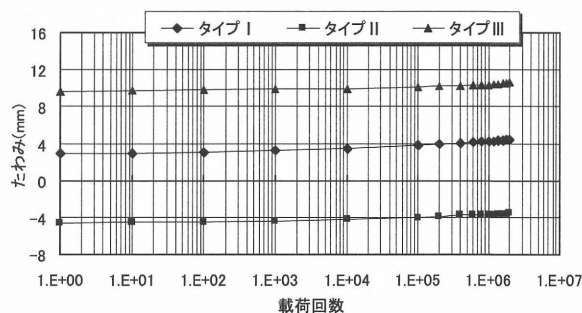
6.1 伸縮時および疲労・静荷重におけるたわみ

伸縮時の伸縮量とたわみの関係を図-10(1)、残留たわみを図-10(2)に示す。

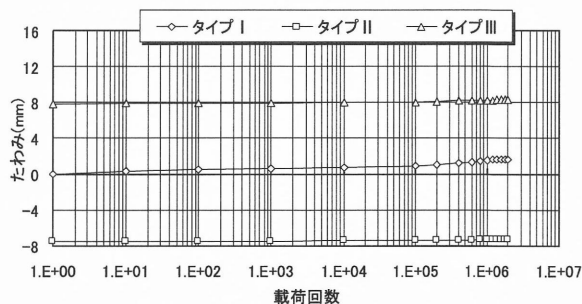
(1) 定点疲労実験

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I、II、IIIともに載荷回数200万回までは疲労実験1回からタイプIは1.56mm、タイプII、III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



(1) たわみ上限



(2) 残留たわみ

図-10 載荷回数とたわみの関係

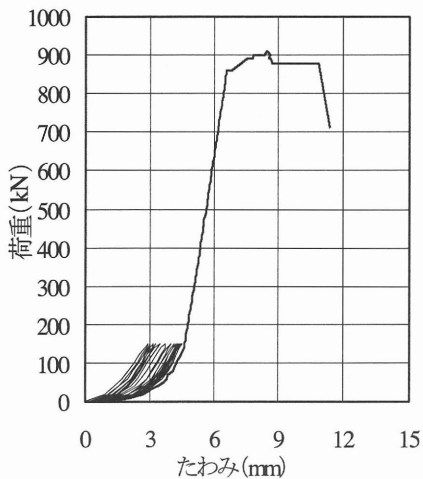


図- 11 荷重とたわみの関係

みはタイプ I が 4.49mm, 荷重除荷時の残留たわみは 1.02mm である。タイプ II 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 III 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 I に規定する 100kN に衝撃計数 0.50 を割増した荷重 150kN に載荷版の応力比 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。

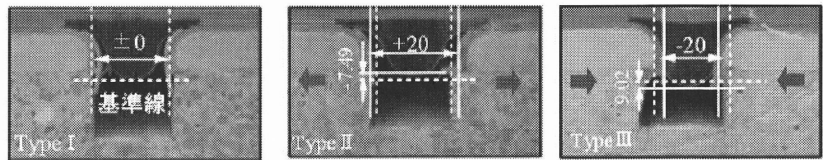
(2)疲労実験後の静荷重実験

タイプ I 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- 11 に示す。図- 11 より, タイプ I 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 I 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押抜きせん断耐荷力を上回っている。

6.2 破壊状況

載荷回数 200 万回の疲労実験における各供試体の切断面を図- 12 に示す。また, タイプ I における載荷回数 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- 13 に示す。

図- 12 より載荷回数 200 万回の疲労実験後の軸方向の切断面では RC 床版 A, B 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



(1)タイプ I

(2)タイプ II

(3)タイプ III

図- 12 破壊状況(切断面)

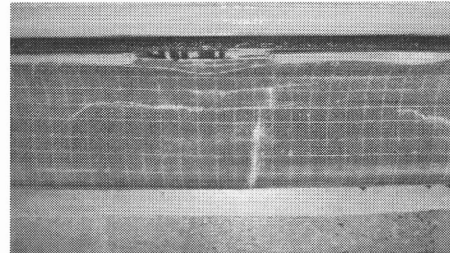


図- 13 静荷重実験におけるCFRPのはく離状況

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 I 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- 13 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。

7. 埋設ジョイントの低騒音性能評価

炭素繊維シートを用いた埋設伸縮装置の試験施工後に騒音, 地盤振動, 低周波空気振動について関口⁹⁾により大型車両を用いての実験が行われ音圧・振動レベルの低減効果が試験施工により確認されている。そこで, CFRP 埋設伸縮装置と従来の露出型伸縮装置の音圧レベルを計測し, 埋設型の伸縮装置の騒音性能が社会環境への適合性について評価する。実験は, 国道 2 号線での施工現場で改良工事前と改良後の大型車両の発生騒音の測定を行った。定位置は, 伸縮装置を取り付けした床版から 1m の位置で計測する。なお, 改良前の伸縮装置はフィンガータイプであり, 改良後の伸縮装置は, 本 CFRP 埋設型伸縮装置である。試験条件を以下に示す。

試験場所: 国道 2 号線, 広島市安芸区狭戸橋

試験方法: 普通騒音計による 1/3 オクターブ分析および FFT 分析, (橋台背面から 1m の位置)

橋梁形式: PC 橋

試験内容: FFT 分析による発生音周波数 (1kHz 以下) 時系列普通騒音発生状況 (モード: LC)

以上より, FFT 分析による発生音周波数を図- 14, および時系列普通騒音発生状況を図- 15 に示す。

FFT 分析による発生音周波数は図- 14 に示すように, 埋設型伸縮装置を設置した後は, 低周波数帯域で騒音音圧レベルの減少が見られるが, これは伸縮装置の衝

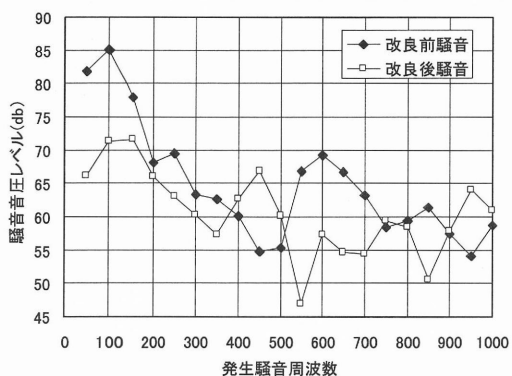


図-14 FFT分析による発生音周波数(1kHz以下)

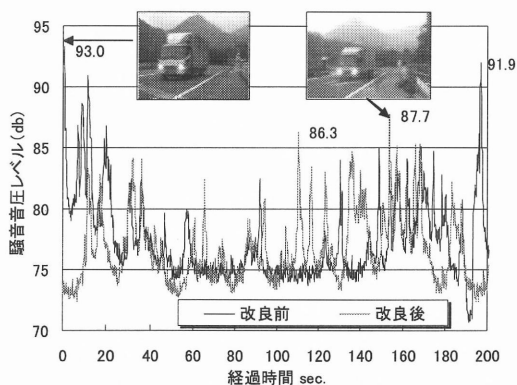


図-15 時系列普通騒音発生状況(モード:LC)

撃音と振動音の減少である。また、タイヤ衝突落下による伸縮装置自体の固有騒音測定結果と同様であることが確認された。なお、今回の騒音測定結果は施工現場での測定であることから車両エンジン音、河川流水音(非車両走行時の環境騒音約73db)なども混在している。

時系列普通騒音発生状況は図-15に示すように、走行車両が異なるものの普通騒音評価では、フィンガータイプ伸縮装置の全体の騒音音圧レベルは最大93dbであり、改良後は埋設型伸縮装置の場合は87.7dbである。その比は0.94となり6%が低減されている。(-5.3dbの低減はエネルギー値で約1/3である)また、埋設型伸縮装置には専用の弾性伸縮舗装が施されていることも騒音に対する低減効果が発揮されたものである。したがって、CFRP支持埋設型伸縮装置は、周辺路面と同時にMMA樹脂系薄層で一体として不陸・段差なく仕上げられ、伸縮装置に起因する段差、不陸が生じないため、大型車両が伸縮装置を通過することによる衝撃による騒音・振動低減の効果が確認された。

8. 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±20mmの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I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。

(4)低周波音に対しては、従来型のフィンガータイプの伸縮装置に対してCFRP埋設伸縮装置を設置した場合は6%の音圧が低減されている。したがって、埋設伸縮装置には大型車両の輪荷重が伸縮装置を通過する際の衝撃音が低減されたことから、この付近の床版に作用する変動荷重、衝撃荷重を大幅に改善されたものと考えられる。

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) 建設省土木研究所構造研究室: 橋梁設計動荷重に関する試験調査報告書(VIII-1985), 土木研究所資料, No.2258, 1985
- 3) 建設省土木研究所構造研究室: 橋の衝撃荷重に関する試験調査報告書(I-1987), 土木研究所資料, No.2426, 1987
- 4) 阿部 忠, 木田哲量, 星埜正明, 加藤清志, 徐銘謙: 走行振動荷重を受けるRCはり・床版の耐力および動的影響に関する実験研究, 土木学会論文集A, Vol. 62 No.1, 2006.1
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説I, II, III, 2002
- 6) 関口幹夫: 炭素繊維シー埋設ジョイント工法による騒音・振動低減効果について, 東京都土木技研年報, pp. 111-116, 1998