発泡材料を活用した床版の力学挙動に関する基礎的研究

Fundamental Study on Mechanical Behavior of Slab Leveraged Expanded Foam

大西 弘志*, 西田 雅之** Hiroshi ONISHI and Masayuki NISHIDA

*大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻(〒565-0871,大阪府吹田市山田丘 2-1) **日本エフ・アール・ピー株式会社 技術部(〒541-0057,大阪市中央区北久宝寺町 2-2-13)

Recently, there are many challenges to confirm the possibilities of utility of the new materials in the infrastructures. In these challenges, researchers used many types of materials. The fiber reinforced polymer (FRP) is one of the most popular materials. The characteristics of FRP are lightweight and high specific strength. These characteristics are suitable for building the lightweight structures. And there are no Japanese own FRP deck structures. Then the authors carried out the fundamental study with new FRP slab leveraged expanded foam.

Key words: FRP, Expanded foam, Wheel load running test, Fatigue durability

1. はじめに

我が国では長年にわたり道路橋の疲労耐久性に関す る研究が進められている¹⁾. その成果の一環として, これまでに疲労耐久性に優れた多くの形式の床版が提 案され,実用化されている(図-1 参照). これらの床 版の多くは鋼とコンクリートの組み合わせで構成され ており,建設分野としては新素材となる繊維補強樹脂

(Fiber reinforced Polymer,以下,FRP とする)等の活 用はまだ十分には進んでいないと思われる.このよう な状況において,筆者はFRP と発泡材料を組み合わせ た超軽量床材が提案されていることに着目し,この床 材が構造体としてどの程度の性能を持っているのかを 調査することにした.当該床材は中空 FRP に発泡材料 を充填している構造を有しており,構造体としての強 度に不安があるため,通常の道路橋床版としての使用 よりも,延長床版等の下からの十分な支持が期待でき る環境での利用が想定される構造体であると判断して 定点疲労実験および輪荷重走行実験を行い,耐荷力と 耐疲労性を評価した.

2. 実験の概要

本研究では GFRP (弾性率 13.7GPa, 引張強度 147MPa 程度)と発泡体(圧縮強度 0.05MPa 程度)を組み合わせ た床材の疲労耐久性を調べるために,定点載荷疲労試 験と輪荷重走行試験を実施した.以下に各試験の概要 について述べる.

2.1 定点載荷疲労試験

本研究では実験対象である床材の基本的な疲労耐久 性について把握を試みるために定点載荷疲労試験を実 施した.この疲労試験で使用した試験体の概要を図-2 に示す.この試験で使用した試験体の外形は幅 200mm



図-2 定点載荷疲労試験 試験体概要

×長さ207mm×厚さ83mmである. 試験体は図-2(a) に示される,厚さ 3mmの FRP 板で構成された中空断 面に発泡材料を充填した一様な断面を有する梁状構造 体を 207mm の長さで切断することにより製作されて いる.本試験ではこの構造体の基本的な疲労耐久性を 把握するために、構造体の上面中央に 50mm×50mm の載荷板を置き、サーボパルサー (EHF-EB10) を用い て繰り返し荷重を載荷した.載荷した荷重の大きさに ついては、舗装におけるホイールトラッキング試験に おける基準の面圧(6.12MPa; 50mm×50mmの範囲に載 荷する荷重としては 1.563kN)を基準として設定を行 い, できるだけ S-N 関係を把握できるように条件を決 定することにした(応力比 (= σ_{max}/σ_{min}): R=0.1, 載荷 速度:10Hz). なお,本試験における支持条件として, 底面に厚さ 5mm のゴム板を敷き,試験体底面の全面 にわたって支持している(**写真-1**参照).

試験時の計測項目は,載荷荷重,載荷位置の変位(以上,試験機よりの出力により計測),試験体上面のひずみ(2か所)である.計測には動ひずみレコーダー DC-204Rを使用している.

2.2 輪荷重走行試験

本研究では、より実際の使用状態に近い環境での疲 労耐久性を把握するために、定点に作用する繰り返し 荷重載荷だけでなく、輪荷重走行による疲労試験を実 施した.使用した試験体の概要を図-3に示す.試験体 の外形寸法は長さ300mm×幅305mm×厚さ83mmで ある.この試験体も定点載荷試験で用いられた試験体 と同様、厚さ3mmのFRP板で構成された中空断面に 発泡材料を充填した一様な断面を有する梁状構造体を 305mmの長さで切断することにより製作されている. また、この試験では床材内部に補剛用の板を挿入した ものとそうでないものを用意し、疲労耐久性にどの程 度の差が生じるのかを調べることにした.

本試験では試験機として大阪大学が保有するランダ ムホイールトラッキング試験機(RWT 試験機)²⁾を使 用し,走行位置を試験体の中央に固定し(底面全面を 支持),移動しないという設定で輪荷重の走行を行った. 輪荷重の大きさとしては試験機で設定できる最少荷重 である 6.91kN での試験を行った.ちなみにこの荷重で 載荷したときの面圧は 17.3MPa となり,ホイールトラ ッキング試験の面圧の倍以上の圧力となっている.

試験時の計測項目は図-3(b), (c) に示されてい る①~④の点に貼付されたひずみゲージ(2 軸)の値 である.計測には定点載荷疲労試験と同様,動ひずみ レコーダーDC-204Rを使用し,走行期間中 200Hz で動 的計測を実施した.



写真-1 定点載荷疲労試験 試験体設置状況





3. 実験結果と考察

3.1 定点載荷疲労試験

(1) 静的載荷試験

本研究では、疲労試験を実施するにあたり、その評価の基準となる静的強度を求めるための載荷試験を疲労試験と全く同じ載荷条件で実施した.その結果、最大荷重 29.26kN で破壊に至ることが分かった.この試験で得られた荷重-変位関係を図-4,ひずみ計側点で確認できた荷重-ひずみ関係を図-5,ひずみ計測点間のひずみの大小関係を図-6 に示す.図-4 を確認すると、破壊時の変形は9.5mm 程度のように見えるものの、試験開始時に 1mm近くのなじみのような現象がみられることから、実際には8.5mm 程度の変形で破壊していると判断される.また、図-4 と図-5 を合わせて確認すると、試験の初期の段階(変形では2.5mm,ひずみでは1800 μ 程度まで)では線形を保っており、それ以降

表-1 定点載荷疲労試験の結果

No.	最大荷重(kN)	試験終了時 載荷回数	備考
1	3.40	2,000,000	未破壊
2	4.60	2,000,000	未破壊
4	15.63	35,117	破壞
5	12.50	5,230,000	未破壊
6	14.07	441,124	破壞
7	14.85	292,948	破壞
8	15.24	59,127	破壞
10	14.46	75,780	破壞
11	13.68	1,093,814	破壞
12	13.29	3,143,526	破壞

注1) No.3 は実験開始時に試験機の誤作動により破壊.

注2) No.9 は静的載荷試験で使用.



(a) 計測点①でのひずみ振幅の変化



(b)計測点②でのひずみ振幅の変化

図-7 定点疲労試験 ひずみ振幅の変化

も粘りのある挙動を示していることがわかる.また, 計測点①におけるひずみと計測点②におけるひずみを 比較すると(図-6),試験体の構造が一方向材的である にもかかわらずどちらの方向にもほぼ同等のひずみが 発生しており,試験体としての異方性が小さく見える ことがわかる.この原因としては FRP 内部に充填され た発泡材が FRP を支持したために,上面の FRP が一 方向に曲がろうとするのを阻害した結果であると推察 される.

(2) 定点載荷疲労試験

今回実施した定点載荷疲労試験の結果を表-1 に示



図-9 定点疲労試験 塑性変形発生量の変化

す. 試験体 No.1 と No.2 は 200 万回を打ち切り限界と して試験を実施し,それ以外は 500 万回を目標回数と して疲労試験を実施した. 試験中に計測点①と②で計 測されたひずみの振幅の変化を図-7 に,試験体中央に おける変位の振幅の変化を図-8,試験体中央における 塑性変形の発生状況を図-9,本試験で得られた S-N 関 係を図-10 に示す.

図-7を確認すると、破壊した試験体のひずみ振幅は 試験の進行に伴って漸増し、終局に至って急激な増加 を見せるという共通の傾向を示すことがわかる.この 中でも、未破壊であったもの(No.5)や比較的寿命が 長いもの(No.11, No.12)とそれ以外のものを比較す ると、寿命が短くなっている試験体では計測点のいず れかのひずみ振幅が大きいか、両方とも比較的大きな ひずみ振幅を持っていることがわかるがいずれも明確 な差というほどの違いとみることは困難であり、試験 体間の個体差である可能性がある.

これに対し,図-8や図-9に示す,試験体中央におけ る変位の振幅や塑性変形量の変化を見てみると,変位 振幅では破壊の直前に大きくその値が増大する状況が 確認でき,塑性変形量の変化においても,より早期に 大きな塑性変形を生じた試験体から破壊していること がわかる.このことから,この構造体の劣化程度を把 握するにはその変形,特に塑性変形の量を確認するこ とが重要であると考えることができる.

本研究により得られた,定点疲労試験における S-N 関係(図-10)を確認すると,今回の試験結果はある程 度の誤差は含んでいるものの,一定の傾向とある程度 のまとまりは示していることがわかる.今回のデータ



図-10 定点疲労試験 S-N 関係



写真-2 輪荷重走行試験 試験体設置状況

表-2 輪荷重走行試験の結果

No.	リブの有無	最大走行往復回数	最終状況
1	あり	210,000	破壊
2	なし	25,000	破壊
3	なし	59,600	破壊

について近似曲線を求めると次のようになる.

 $(\Delta P/P_{max}) = -0.015 ln(N) + 0.06259$ (1)

ここで、 ΔP :荷重振幅 (kN) P_{max} :静的耐力 (kN) N:載荷回数

また、本試験の結果より、ΔP/P_{max}=0.4 付近が疲労 限ととらえて良い限界値になっている可能性も確認で きる.これはホイールトラッキング試験の面圧の 8.5 倍に相当する荷重となっており、このことから、定点 疲労試験においては十分な疲労耐久性を発揮できてい ると結論付けて良いものと考えられる.

3.2 輪荷重走行試験

輪荷重走行試験時の試験体設置状況を**写真-2** に示 す.今回の試験では,輪荷重が試験体に乗る際に発生 する衝撃を極力緩和するために走行面に当たる位置に



(a) No. 2 試験体(リブなし)破壊状況



(b) No.3 試験体(リブなし)破壊状況



(c) No. 1 試験体 (リブあり) 破壊状況写真-3 輪荷重走行試験 試験体破壊状況

薄い鉄板(t=1.2mm)を敷設し、走行試験を実施して いる. 今回の試験では走行回数の上限を 20 万往復(40 万回)としている.今回の試験結果を表-2に示す.こ の試験では既定の走行回数に達したのは補強リブが設 置されている No.1 試験体のみであったが,この試験体 についてはデータの動きに少し乱れがあったことから 追加での走行を行ったところ、210,000 往復にて破壊 に至っている. 補強リブなしの試験体 (No.2, No.3) に関しては試験開始後の早期に破壊している. これら の試験体の破壊状況を写真-3に示す.ここに示された 写真を見ると、補強リブなしの試験体 No.2, No.3 に関 しては破壊の起点が輪荷重の進入位置である試験体端 部であることが疑われるような破壊形態を示している. このことは,試験時に必然的に発生してしまった進入, 退出部における試験体と走行路の間の隙間(≒10mm) を車輪が乗り越えて試験体上に進入する際に発生する 衝撃が破壊に関与している可能性を示唆しているもの と考えることができる. また, No.1 試験体に関しては リブなしの試験体と破壊形態が異なっており、試験体 の中央付近で補剛リブ際の FRP がきれいにせん断に よって破断されていることがわかる. このことから, この試験体は上面の FRP のせん断破壊により破壊に 至っているものと結論付けられる.ただし、この試験 においては載荷に用いた荷重が大きいこと(面圧で設 計荷重の2倍程度)や定点載荷試験でのS-N曲線の傾



図-12 輪荷重走行試験 ひずみ振幅の変化 (No. 2) きの小ささなどを考慮すると、重交通路線でない路線 での活用を目指す余地はあるものと考えられる.

No.1 試験体と No.2 試験体で計測されたひずみ振幅の変動を図-11 と図-12 に示す. これらの図を見ると,



試験体の寿命の長短やひずみ計測方向の違いに関わら ず、ひずみ振幅は試験開始時からその破壊の直前まで 一定の値を保っており、破壊の直前になってようやく 急増するという傾向を持っていることがわかる.この 傾向は No.3 試験体でも確認できているため, 今回の試 験に共通の傾向である可能性がある.このような傾向 は他のコンクリート系床版の多くとは異なる傾向であ り、このような傾向をもたらした原因としては①試験 体として用いた FRP 構造体に特有の傾向, ②試験体の 支持条件に起因する傾向,の2つが考えられることか ら更なる検討を加える必要があるものと考えられる. また、今回計測したひずみの振幅に方向による影響が 確認できるのかどうかを見るために、方向ごとのひず み振幅の比較を行った(図-13). その結果,当初の予 想に反して補剛リブの直上を走行させた No.1 試験体 では荷重走行方向のひずみ振幅が大きくなる傾向が認 められ,それに反して補剛リブなしの No.2 試験体では 荷重走行方向、走行直角方向のひずみ振幅にそれほど 大きな差は出にくいという結果を得た. No.1 試験体の 傾向に関しては補剛リブが直接輪荷重を支持してしま ったために、試験体上面に局所変形が出にくくなった 結果であると考えることができる. これに対し, No.2 試験体の結果は当初それほど大きな抵抗を期待してい なかった発泡体を含めたシステムが試験体端部におい て荷重を支持した結果として2方向のひずみ振幅がほ ぼ同等の大きさになったものであると推定できる.

4. まとめ

本研究では FRP と発泡体を組み合わせた構造体に ついてその性能を調査するための基礎的な研究を行っ た.その結果,次のような知見を得ることができた.

1) 静的載荷試験の結果,比較的大きな面圧まで耐え られることがわかった.また,中に充填された発



図-13 輪荷重走行試験 方向別ひずみ振幅の比較

泡体の効果により、局所的には等方性を示すこと がわかった.

- 2) 定点載荷疲労試験の結果,非常に傾きの緩やかな S-N 曲線を得ることができ、今回の試験条件においては疲労限となる面圧の大きさはホイールトラッキング試験で用いられる面圧の8.5倍程度であることが推定できた。
- 3) 輪荷重走行試験では今回の試験体は比較的早期に 破壊する結果となった.この原因としては輪荷重 が試験体に進入するときに発生する衝撃ではない かと疑われる破壊形態が確認できた.また,それ なりの荷重が補剛リブの上を通ると上面の FRP が 破断する可能性も確認できた.これらの事象については更なる検討が必要であると思われる.

謝辞

本研究は平成 23 年度地域産業支援力強化事業補助 金(「道路橋への適用を目指した複合 FRP 床版の共同実 証開発」,研究代表者:大西弘志)で行われた研究の一 部を取りまとめたものである.ここに記して関係各位 に謝意を表すものとする.

参考文献

- 例えば、松井繁之編著:道路橋床版、森北出版、 2007.10
- 2) 青木康素,大西弘志,松井繁之,田口仁:床版防 水システムのせん断付着疲労耐久性評価に関する 研究,第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.143-148,2006.07