

論文

リブ付きアーチフォームを適用したRC床版の性能確認試験

西條 龍*, 吉松秀和**, 街道 浩***, 松井繁之****, 表 真也*****, 三田村 浩*****

*修(工), 協立エンジ株式会社 エンジニアリング部 (〒114-0023 東京都北区滝野川 6-3-1)

**川田建設株式会社 技術部 (〒114-8505 東京都北区滝野川 6-3-1)

***博(工), 川田工業株式会社 鋼構造事業部 (〒550-0014 大阪市西区北堀江 1-22-19)

****工博, 大阪大学名誉教授 (〒565-0824 吹田市山田西 4-2-70-1006)

*****北海道大学大学院 北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

*****博(工), 株式会社 サンブリッジ (〒001-0025 札幌市北区北 25 条西 4 丁目 1-26)

リブ付きアーチフォームは、ポリプロピレン繊維で補強したセメント押出し成形板であり、軽量かつ強度が高く、RC部材の埋設型枠に適している。塩分や炭酸ガスの浸透が小さく、RC部材の耐久性が向上する。この成形板をRC床版に適用することにより、現場作業の安全性確保や省力化・工期の短縮・産業廃棄物の削減などの効果を発揮する。本論文は、この成形板の材料特性を示すと同時に、成形板を適用したRC床版の輪荷重走行試験と主桁作用に関する試験について報告する。

キーワード: リブ付き繊維補強セメント押出し成形板, RC床版, 埋設型枠, 輪荷重走行試験, 疲労耐久性

1. はじめに

KKフォーム¹⁾(以降, KKF と略す.) は, ポリプロピレン繊維で補強したセメント押出し成形板であり, 軽量であるとともに強度が高い。また, 塩分や炭酸ガスの内部への浸透速度が極めて小さく, 鉄筋コンクリートの塩害および中性化を防止し, 耐久性を大きく高めることができることから, RC部材の埋設型枠に適している。KKF の下面にリブを追加し曲面状に形成したリブ付きアーチフォーム(以降, RAF と略す.) は, 鋼橋のRC床版を適用対象として開発したものであり, 下面リブで床版自重・施工荷重に抵抗する剛性を与えており, 床版施工用の支保工・木製型枠・作業足場を省略することができる。現場作業の安全性確保や省力化・施工工期の短縮・産業廃棄物の削減などの効果を発揮するものである。鋼桁上へのRAFの敷設状況を写真-1に示す。

本論文では, RAF の材料特性を示すと同時に, RAF を適用したRC床版の施工方法, 輪荷重走行試験および主桁作用に関する試験の結果について報告する。

2. RAF の材料特性

RAF の一回の練り混ぜ量約 630kg 当りの材料配合を表-1に示す。原材料全体に対し, ポリプロピレン繊維を含む繊維補強材は重量比で約 8.8%の割合を占めている。



写真-1 RAFの敷設状況

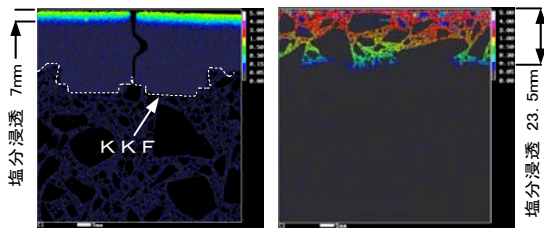
表-1 RAFの材料配合

結合材		配合水	繊維補強材	増粘材等
セメント	珪石粉末			
32.0	34.4	20.0	8.8	4.8

単位:%

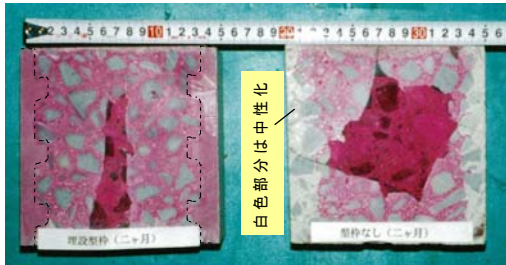


写真-2 RAFの押出し成形状況



(a) KKF 有り (b) KKF 無し

写真-3 6箇月間の塩分浸透深さ (EPMA 法)



(a) KKF 有り(0mm) (b) KKF 無し(25mm)

写真-4 中性化促進試験

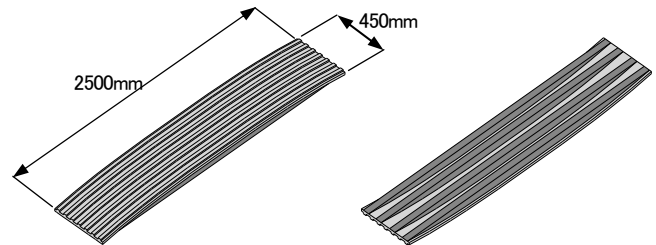
写真-2に RAF の製造の状況を示す。

塩分浸透性については、RAF と同配合で押し成形した厚さ 25mm の KKF を使用し、文献 2) に従って試験を実施しており、6 箇月間の浸漬結果を写真-3 に示す。KKF 有りの試験体(a)では塩分浸透は表面から 7mm に留まっているが、KKF 無しのコンクリートだけの試験体(b)では、表面から 23.5mm まで塩分が浸透している。

一方、炭酸ガスの浸透性については、厚さ 20mm の KKF を使用し、文献 3) に従って炭酸ガス濃度 5%、温度 20%、湿度 60% の条件下において試験を実施した。促進試験を 60 日間実施した試験体にフェノールフタレイン発色法による中性化深さの測定法を適用した結果を写真-4 に示す。KKF 有りの試験体(a)では中性化深さは表面 (0mm) に留まっているが、KKF 無しのコンクリートだけの試験体(b)では、表面から 25mm まで炭酸ガスが浸透している。以上より、RAF は塩分や炭酸ガスの浸透速度が極めて小さい緻密な組織により構成されており、材料の劣化に対する耐久性が非常に高いことが分かる。

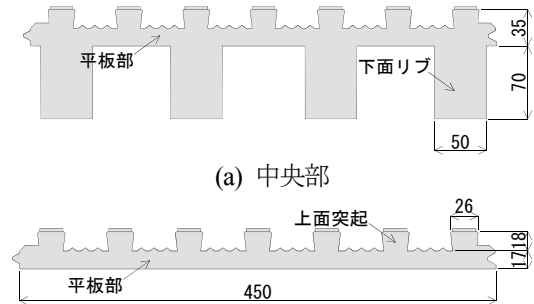
3. RAF の形状および施工方法

RAF は床版支間が 3.0m 以下の鋼鉄桁橋の RC 床版を適用の対象としている。RAF の形状および断面形状は図-1、図-2 に示すように、1 パネルあたりの幅を 450mm、長さを 2,500mm 程度とし、上面には 7 本の突起を、下面には 4 本のリブを有している。平板部の厚さは 17mm、上面の突起の寸法は幅が 26mm、高さが 18mm である。また、下面のリブは幅を 50mm、高さを 70mm とし、押し直後に中央の高さ 70mm の放物線状の成形台に乗せて蒸気養生・硬化させる。硬化後に両端部のリブの付け根を結ぶ水平面でリブを切断して仕上がりとなる。なお、RAF の上面の多数の突起により、コンクリートとの一体



(a) 表面 (b) 裏面

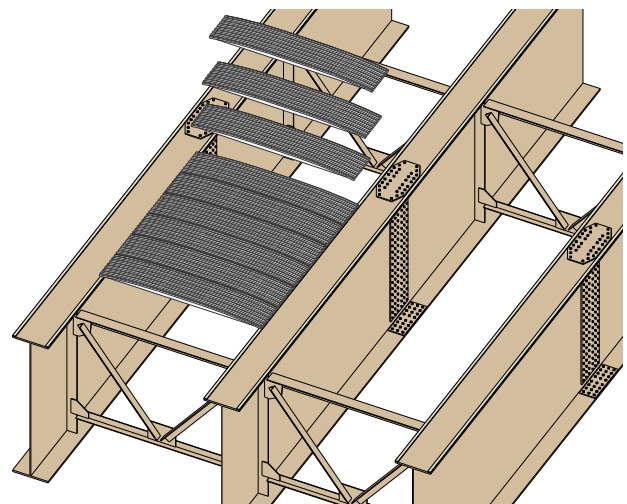
図-1 RAF の表面および裏面の形状



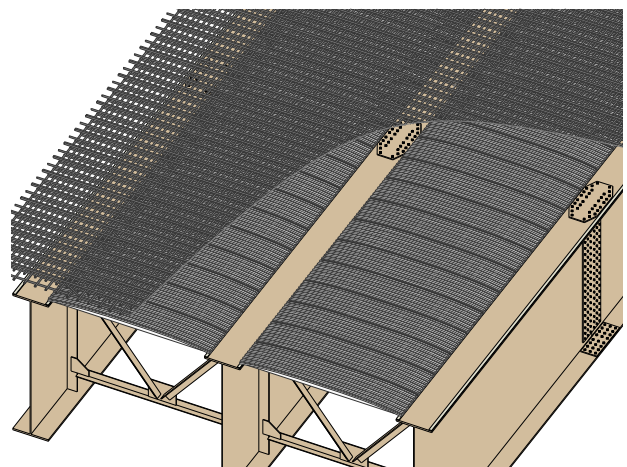
(a) 中央部

(b) 端部

図-2 RAF の断面形状



(a) RAF の敷設



(b) 鉄筋の配筋

図-3 RAF の施工概念図

性を確保している。

RAF の施工方法は、図-3(a)に示すように鋼桁の上フランジの縁端に幅 40mm 程度のペースト状の接着剤を塗布し、その上に RAF を敷設する。RAF 同士の継ぎ目は図-2 に示すように、平板の端部が互いに嵌合する形状を採用しており、嵌合後に上面に接着剤を塗布する。鋼桁の上フランジの添接板については、RAF の据付けを容易にするために、上フランジの縁端から 50mm 程度控えておくことが望ましい。鋼桁上に RAF を敷設した後は、図-3(b)に示すように RAF 上に鉄筋を配筋し、コンクリートを打設する。なお、配筋は RC 床版と同様である。

4. 輪荷重走行試験

4.1 輪荷重走行試験の概要

RAF を適用した RC 床版の疲労耐久性の確認、RAF とコンクリートの一体性の評価、RAF のひび割れ状況の把握、RAF の目地部の挙動の把握、RAF の構造部材としての有効性の評価などを目的として、輪荷重走行試験を実施する。

走行試験の状況を写真-5 に示す。走行試験の荷重方法は表-2 および図-4 に示すとおりであり、わが国の幹線道路において 100 年以上の供用に相当する等価繰返し回数⁴⁾ (載荷荷重 190kN, 走行回数 60 万回) を載荷するものとした。なお、走行試験には幅 500mm × 長さ 200mm の載荷板を適用した。

(1) 試験体

試験体は図-5 に示すように、2 本の主桁に支持された床版であり、幅 2.92m, 長さ 5.00m としている。床版支間は 2.67m, 床版厚は 190mm であり、床版厚には下面リブを除く RAF の厚さを含んでいる。床版と主桁の接合は、主桁の上フランジにφ19×150 のスタッドジベルを 2 列配置しており、橋軸方向の間隔は 150mm としている。床版のコンクリートの設計基準強度は 24N/mm² とし、材料試験の結果を表-3 に示す。

(2) 測定項目および測定方法

試験体のたわみは変位計により、RAF とコンクリート表面および鉄筋のひずみをひずみゲージにより測定した。RAF の目地部にはπゲージを配置し、目地部の開閉



写真-5 輪荷重走行試験状況

表-2 輪荷重走行試験の等価損傷²⁾

走行回数	載荷荷重 P (衝撃を考慮)	N _{eq-s}
回	kN	
60,000	120.0	0.00000068
120,000	150.0	0.00002345
600,000	190.0	0.00239580
		0.00241993

実橋が1年で受ける等価繰返し回数 N_{eq-a} = 0.00001399

N_{eq-s}/N_{eq-a} = 173 年

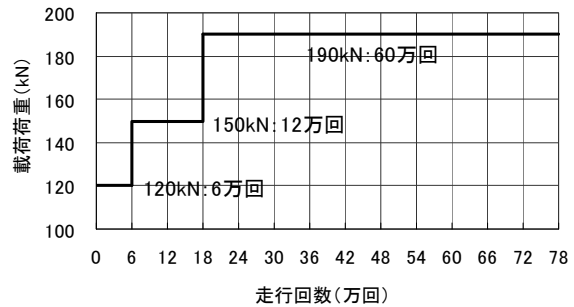


図-4 輪荷重走行試験の荷重および回数

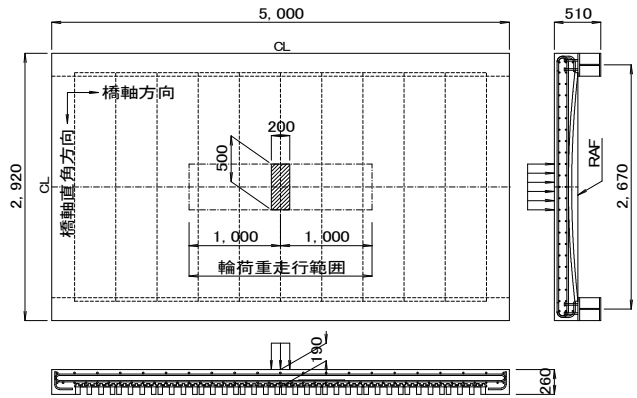


図-5 試験体詳細図

表-3 材料試験結果

	圧縮		引張	
	強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
コンクリート	23	23.8	2.12	—
RAF 押出方向	62	16.1	15.8	17.7
RAF 押出直角方向	55	12.8	12.6	15.7

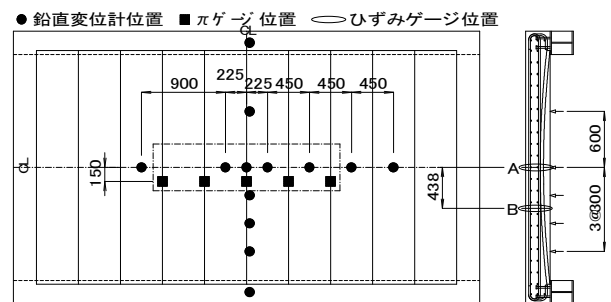


図-6 変位計およびゲージ位置

量を測定した。ゲージ類の設置位置は図-6に示す。

4.2 FEM解析の概要

試験体を図-7に示すようにモデル化したFEM解析により測定結果との比較を行う。解析プログラムには汎用有限要素法解析プログラムFEMLEEGを使用し、弾性解析を実施した。RAF、コンクリートのヤング係数は材料試験により求めた値を使用し、ポアソン比は道路橋示方書に示されている値を用いた。荷重位置については、測定時に荷重した試験体中央位置とした。

解析に用いたモデルは、全断面を有効としたモデル(全断面有効モデル)、RAFの下面リブと引張側コンクリートを無視しRAFの平板部を有効としたモデル(引張側コン無視・RAF平板部有効モデル)、引張側コンクリートとRAF全体を無視したモデル(引張側コン無視・RAF無視モデル)の3種とした。

4.3 輪荷重走行試験の結果

(1) 活荷重たわみ

試験体中央における荷重時と除荷時の測定値の差を設計荷重100kNに換算した弾性たわみの経時変化を図-8に示す。図中には、上述した3種のFEMモデルの解析値を同時に示す。荷重初期の測定値は全断面有効のモデルに等しい。走行回数および荷重の増加に伴うたわみの増分は比較的小さく、荷重終了時においては引張側コンクリートを無視しRAFの平板部を有効とした解析値を下回っている。松井・前田が提案した弾性たわみによる劣化度評価式⁴⁾を適用すると、本試験体の劣化度は使用限界値1.00に対し0.40程度となり、走行試験による損傷の程度は比較的小さいものと推定できる。

$$D_s = \frac{W - W_0}{W_c - W_0} = \frac{0.470 - 0.349}{0.650 - 0.349} = 0.40 \leq 1.00 \quad \text{式(1)}$$

ここに、 D_s ：劣化度、 W ：活荷重分のたわみの測定値(mm)、 W_0 ：全断面有効モデルの解析値(mm)、 W_c ：引張側コン無視・RAF無視モデルの解析値(mm)

また、設計荷重100kNに換算した橋軸方向および橋軸直角方向の弾性たわみの分布を図-9に示す。弾性たわみの分布は荷重初期において全断面有効の解析値とおおむね一致した。荷重終了時においても、引張側コンクリートとRAF全体を無視したモデルの解析値の72%程度の値にしか至っていないことから、引張強度の高いRAFがコンクリート床版と固着し、曲げひび割れが発生しても繊維によってRAFの引張剛性を保持し、コンクリート床版と合成効果が持続されて疲労耐久性を向上しているものと考えられる。

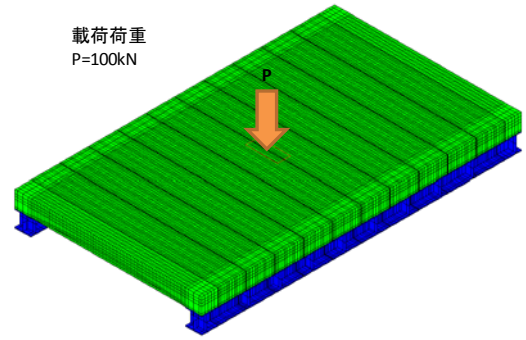


図-7 輪荷重走行試験体のFEM解析モデル

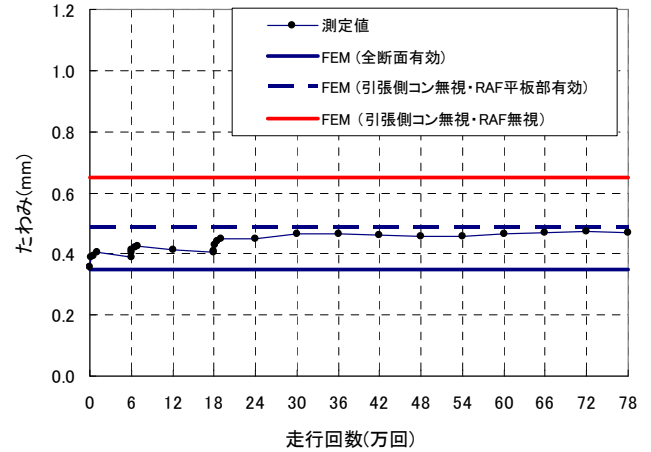
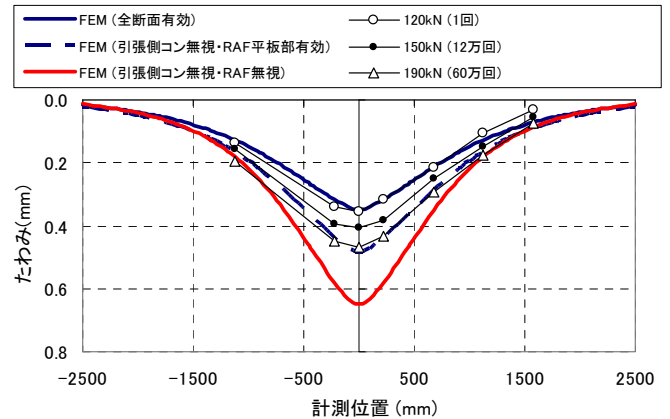
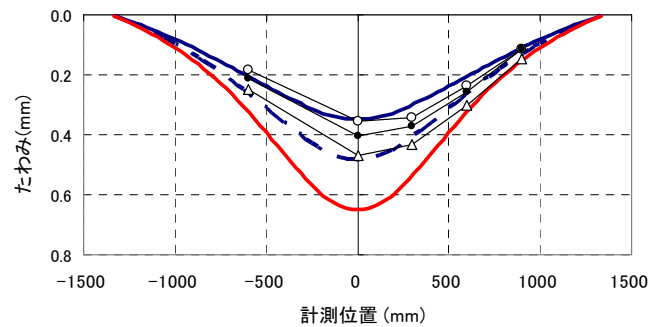


図-8 弾性たわみの経時変化



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-9 弾性たわみ分布

(2) 鉄筋ひずみの経時変化

主鉄筋の弾性ひずみの経時変化を図-10に示す。弾性たわみと同様に走行回数の増加による弾性ひずみの増分は比較的小さく、荷重終了時においても引張側コンクリートを無視し RAF の平板部を有効とした解析値を下回っている。

(3) 床版下面ひび割れの分布

図-11に床版下面のひび割れの発生状況を示す。図は床版の橋軸方向および橋軸直角方向の中心線で分割した4分の1の部分である。ひび割れの状況は他の部分も同様である。図中の青色の線が下面リブ、赤色の線がRAFの平板部に発生したひび割れである。ひび割れの発生順序は、120kNの初期荷重で下面リブに1本のひび割れが発生し、6万回終了時ですべての下面リブに2~4本のひび割れが発生した。150kNの12万回終了時では、ひび割れの本数が約4~5本まで増え、ひび割れの発生範囲も桁端のコンクリート部まで拡大した。また、このとき初めてRAFの平板部の下縁にひび割れが確認された。190kNの荷重により、下面リブのひび割れ本数が増え、RAFの平板部の下縁のひび割れも荷重走行範囲に拡大した。荷重終了時においては、ひび割れの本数は、下面リブには支間中央部の1.5mの範囲に5~6本、RAFの平板部の下縁には1~2本となった。

ひび割れ幅については、クラックゲージを用いて確認し、下面リブの下縁において190kN走行時0.30mm、除荷時0.20mmであり、RAFの平板部の下縁において190kN走行時0.15mm、除荷時0.10mmであった。

(4) RAFの目地部の挙動

試験体中央への荷重荷重における、目地部の開閉量の荷重時と除荷時の測定値の差を図-12に示す。荷重点直下である中央のπゲージの開閉量は荷重初期において0.03mm程度、荷重終了時において0.06mm程度であった。なお、目視によって目地部の開閉状況の観察を行ったが、目視では荷重終了時まで目地の動きを確認することができなかった。

(5) ひずみ分布図

試験体中央における床版断面の橋軸直角方向の設計荷重100kNに換算した弾性ひずみの分布を図-13に示す。荷重初期の測定値は全断面有効とした解析値とほぼ一致し、圧縮側鉄筋から下面リブまで直線分布に近い値を示していることから、断面の平面保持が成り立ち、下面リブが床版の断面剛性に寄与し一体として挙動している。また、荷重終了時の鉄筋のひずみの測定値は、RAFの下面リブと引張側コンクリートを無視しRAFの平板部を有効としたモデルの解析値に近い値を示していることから、下面リブがひび割れた後もRAFの平板部が床版の剛性に寄与しているものと考えられる。

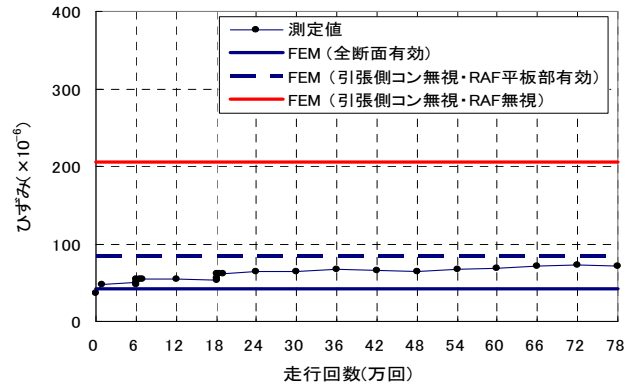


図-10 主鉄筋の弾性ひずみの経時変化

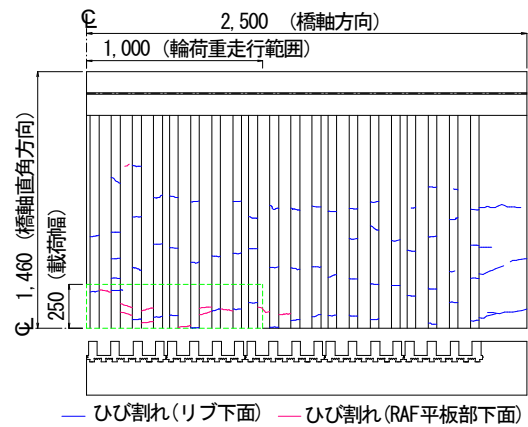


図-11 下面のひび割れの発生状況 (1/4部分を示す。)

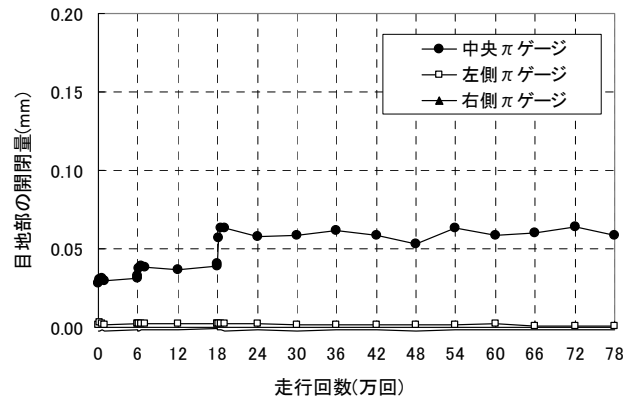


図-12 目地の開閉量の経時変化

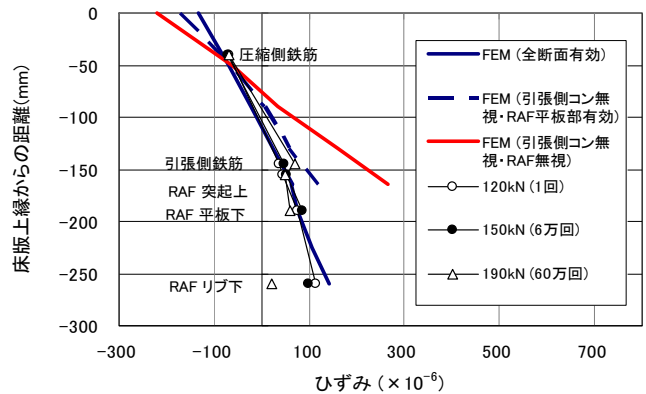


図-13 床版断面のひずみ分布

5. 主桁作用に関する試験

5.1 主桁作用に関する試験の概要

RAF を適用したRC床版の主桁作用に関する挙動を明らかにするため、上記の輪荷重走行試験の試験体に鋼桁を取付けて静的載荷試験を実施した。ここでは、主桁作用のうち正曲げモーメントを受ける部位を対象とした。また、走行試験による影響を評価するため、走行試験の前後で同様な静的載荷試験を行い、両者を比較した。

主桁作用の試験体は、走行試験の試験体の支持桁にボルトを介して鋼桁を取付けたものである。主桁作用の載荷時において、各部の発生応力が実橋に対応するとともに、RC床版に引張力が作用しないように、中立軸を床版の下縁よりも下に位置するように鋼桁の断面を設定した。載荷状況は写真-6 に示すように、鋼桁を単純支持し、支間中央の主桁上に荷重を載荷した。荷重の載荷面積は200mm×200mmとし、荷重は500kNまで単調増加させた。測定項目として、主桁の変形、RC床版と鋼桁のひずみ、RAFの目地部の開きを測定した。

主桁作用試験体のFEM解析モデルは図-14 に示すとおりであり、床版部は全断面有効としてモデル化した。

5.2 主桁作用に関する試験の結果

主桁の支間中央位置における走行試験実施の前後の荷重-たわみ関係を図-15 に示す。図中に全断面有効としたFEM解析値も示している。走行試験前と後の測定値は、載荷荷重が小さい範囲においてやや異なるものの、荷重が100kN以上の範囲ではほぼ同じ傾きを示していることから、走行試験の後においても床版の断面剛性に大きな変化がなく、走行試験におけるRAFのひび割れが主桁作用への影響が比較的小さいものと考えられる。

6. まとめ

本論文では、RAFの材料特性を示すとともに、RAFを適用したRC床版の施工方法、輪荷重走行試験および主桁作用に関する試験の結果について報告した。

本論文において、得られた結果は以下のとおりである。

- 1) わが国の幹線道路において100年以上の供用に相当する輪荷重走行試験によっても、RAFを適用したRC床版の試験体の劣化度は0.4程度であり、合成床版は十分な疲労耐久性を有する。
- 2) 輪荷重走行試験実施の前後において、走行試験の試験体に鋼桁を取付けて主桁作用に関する載荷試験を実施し、走行試験によるRAFのひび割れが主桁作用に及ぼす影響は小さいと言える。



写真-6 主桁作用の載荷状況

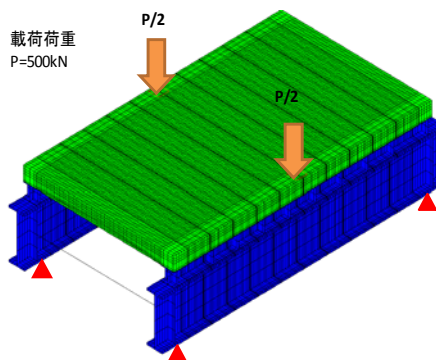


図-14 主桁作用試験体のFEM解析モデル

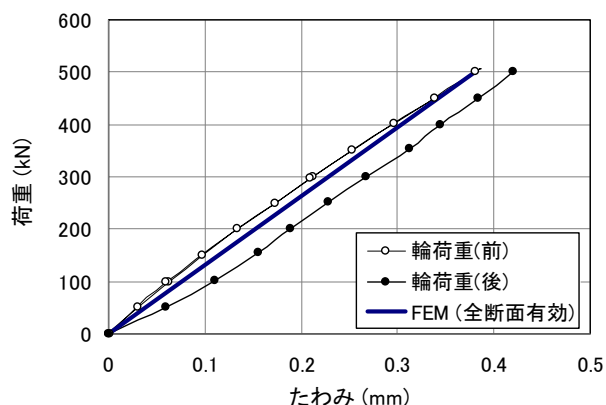


図-15 主桁作用試験の荷重-たわみ関係

謝辞

本論文の輪荷重走行試験の実施にあたっては、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所の方々にご多大なご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松井, 大西, 徳岡, 劉: 曲面状埋設型枠を用いたRC床版の疲労耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.667-672, 2003.
- 2) 土木学会基準試験: JSCE G574-2005 EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法(案), 2007.
- 3) 日本建築学会「高耐久性RC造設計施工指針(案)・同解説」付録1「コンクリートの促進中性化試験方法(案)」, 1991.
- 4) 松井繁之編著: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.