

論文 埋設型床版下面補強工法で補強された RC 床版の輪荷重走行試験による補強性能評価

高海 克彦*1・村田 征也*2・彌永 穂高*3・小沼 恵太郎*4

要旨: 損傷をうけた RC 床版の下面かぶりに補強筋を埋め込んで補強する埋設型床版下面補強工法を開発した。鉄筋埋設型工法と FRP 格子筋埋設型工法を従来工法と比較するために、RC 床版の一部を取り出したはり曲げ試験と床版に対して輪荷重走行試験を行った。試験の結果、たわみおよび鉄筋ひずみの低減において埋設型床版下面補強工法は、従来工法と同等の効果があることがわかった。また、ひび割れの分散ならびに補強面の浮きの防止に関しては、従来工法より効果を発揮するとの結論を得た。

キーワード: RC 床版補強, 埋設型床版下面補強, 輪荷重走行, 疲労耐久性, ひび割れ分散

1. はじめに

我が国の道路橋は、建設後 50 年以上を経過したものが急速に増え、交通量や重量車両の増加と相俟って、道路橋床版の損傷による劣化が顕著となっている。こうした損傷を受けた床版の補修及び補強は、道路橋床版の延命化には喫緊の課題である¹⁾。

本研究で対象とする補強工法は、RC 橋脚の耐震補強とひび割れ分散の両効果を有する工法として開発された埋設型橋脚耐震補強工法を基にしたものであり、これを損傷を受けた RC 床版の下面からの補強に適用し、静的曲げ試験と輪荷重走行試験²⁾によって本工法の補強効果の検討を行ったものである。

2. 埋設型床版下面補強工法

これまで、損傷を受けた RC 床版の補強工法は、各種開発されてきており、大きく分けると上面からの補強と、下面からの補強である。RC 床版の下面補強は、損傷を受けた RC 床版の下面の下地処理後、下面に格子鉄筋を固定し増厚する工法（従来工法とよぶ）がよく用いられてきている³⁾。これに対し埋設型床版下面補強工法（埋設型工法とよぶ）とは、損傷した RC 床版の下面かぶりに補強筋を埋設するための溝を縦横に切削し、補強筋を溝に埋設後、エポキシ樹脂で定着固定し表面をポリマーセメントモルタルで被覆する工法である。図-1 に本研究で対象とした a) 従来工法と b) 埋設型工法の断面図を示す。補強筋として鉄筋や FRP が考えられる。本研究では、鉄筋を縦横別々に施工する鉄筋埋設型工法と FRP 連続繊維を格子状に一体成型した補強材（以下、FRP 格子筋とよぶ）を用いる FRP 格子筋埋設型工法の 2 ケースを対象

とした。

3. 静的曲げ試験

3.1 はり供試体

RC 床版の輪荷重走行試験に先立って、RC 床版の一部を模した RC はりを作製し、曲げ載荷試験を行った。呼び強度 27 のレディミクストコンクリートと D13 (SD345) の鉄筋を用いて、長さ 2200mm×幅 620mm×高さ 150mm の RC はり 4 体を先ず製作した。いずれの供試体もはり軸方向下側鉄筋は 120mm 間隔、はり直角方向鉄筋は 240mm 間隔で配置し、下面かぶりは 30mm である。はり軸方向鉄筋比は、0.01 である。上側鉄筋配置は、下側鉄筋配置の半分とし、せん断補強筋は配置していない。4 体の供試体は、補強前の RC 供試体、従来工法で補強した供試体、鉄筋埋設型工法で補強した供試体および FRP

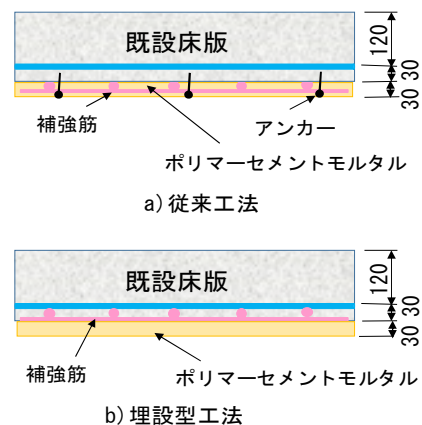


図-1 床版下面補強工法

*1 山口大学 工学部社会建設工学科准教授 工博 (正会員)

*2 山口大学 大学院理工学研究科 (学生会員)

*3 株式会社アーテック (正会員)

*4 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (正会員)

格子筋埋設型工法で補強した供試体である。補強鉄筋はD10、補強材の配置間隔は、鉄筋およびFRP格子筋ともはり軸方向及び直角方向に75mmとした。補強鉄筋比は、0.84である。従来工法の格子鉄筋は、前もって溶接により格子筋としたものを用いた。従来工法および埋設型工法で用いた鉄筋はSD345、FRP格子筋は中弾性カーボン製で、各々の材料特性を表-1に示す。補強後下面に塗布するポリマーセメントの厚さを3cmとして、補強した3体の補強後の高さは180mmに統一した。

表-1 補強鉄筋とFRPの材料特性

種別	降伏強度	引張強度	弾性係数
鉄筋	345	-	200,000
FRP	-	1,200	165,000

(N/mm²)

3.2 曲げ試験実施方法

3.1に示したRCはり供試体に対して、単純支持支間を図-2に示すように1,800mm、載荷点距離を600mmとして、直径50mm、長さ620mmの鋼棒を介した左右対称2点線載荷を載荷速度4.9kN/minで行い供試体のたわみと鉄筋ひずみを測定した。図-2に荷重載荷位置とたわみ測定位置、図-3に鉄筋ひずみ測定位置を示す。

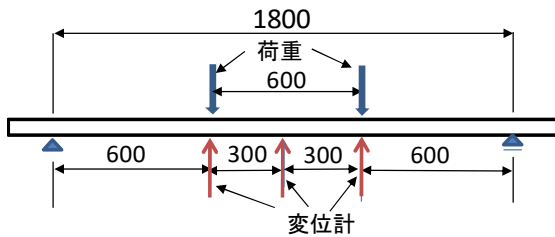


図-2 荷重およびたわみ測定位置

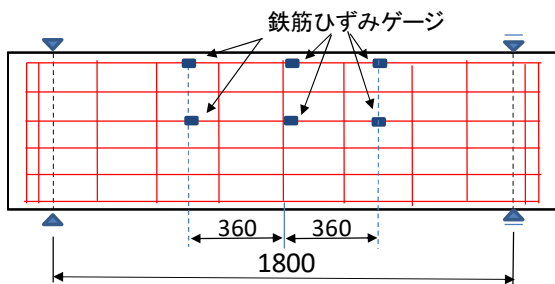


図-3 鉄筋ひずみ測定位置

3.3 曲げ試験の結果

図-4に供試体支間中央の荷重-たわみ関係図を示す。補強を行っていない供試体（補強前）は、最大荷重

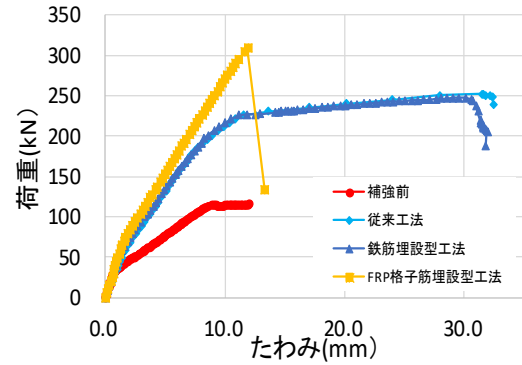


図-4 荷重-たわみの関係図

115kN、最大たわみ12mmで曲げ破壊を生じた。

これに対して、鉄筋を用いた従来工法によって補強した供試体及び鉄筋埋設型工法の供試体においては、荷重-たわみ関係はほとんど同一の経緯をたどり、いずれも曲げ破壊に至った。両供試体の最大荷重は約250kN、最大たわみは約31mmで、補強前の2倍以上の耐力の増加、2.5倍の靱性が得られた。これは、補強筋量を補強前の鉄筋量と同程度としたことによる。靱性の伸びも、同特性の鉄筋を用いたことによると考えられ、補強筋に鉄筋を用いた場合には従来工法と埋設型工法には、たわみに関しては補強性能には差異は見られない。

一方、FRP格子筋埋設型工法を施した供試体では、載荷荷重が310kN、たわみが12mmとなった時点で、せん断破壊を生じた。これは、FRP自体は、鉄筋より弾性係数は小さいが、引張強度が鉄筋よりかなり高いために、

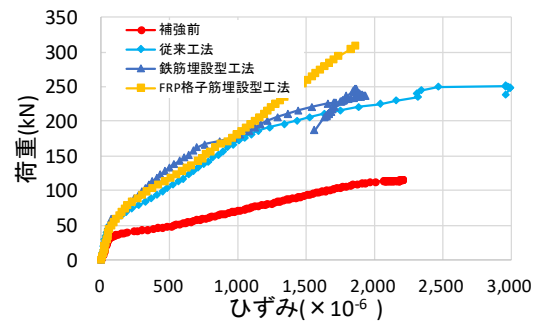


図-5 荷重-鉄筋ひずみの関係図

補強材に鉄筋を用いた供試体と異なった破壊形式を呈したと考えられる。最終たわみは、補強前の供試体とほぼ同じで、靱性は期待できない。

図-4の荷重経歴に対応して、図-5に供試体支間中央側鉄筋ひずみゲージの荷重-ひずみの関係を示す。鉄筋を用いた供試体では、最大荷重で鉄筋は降伏している。

補強を行っていない供試体と補強を施した供試体のひずみ特性の差は顕著である。無補強供試体の終局強度に近い荷重 100 kN での、補強後の供試体でのひずみは 1/3 以下に抑制されている。ひずみにおいて鉄筋埋設型工法の差異がほとんどないことから、この結果は補強鉄筋と FRP 格子筋の施工に起因すると考えられる。

4. 輪荷重走行試験

4.1 輪荷重走行試験概要

曲げ試験の結果を踏まえ、RC 床版に対して輪荷重走行試験を行った。RC 床版は図-6 に示すように、橋軸方向 4500mm×橋軸直角方向 2300mm×床版厚 150mm とした。鉄筋の配置間隔とかぶり厚は、はり試験体と同じである。床版主方向は単純支持、他の 2 辺は自由とした。移動荷重は図-6 に示すように供試体中央に載荷し、走行長さは 3.6m である。RC 床版は 2 体製作し、各々輪荷重によって初期損傷（床版支間中央部において静的荷重載荷時 8mm、除荷時 4mm 程度のたわみ）を与えるため、初期の 1 万回目までは 100kN で、その後 28 万回目までは 120 kN の輪荷重走行を行った。走行回数は、1 往復を 1 回と数えた。走行回数 1 万回までは 1000 回ごとに、それ

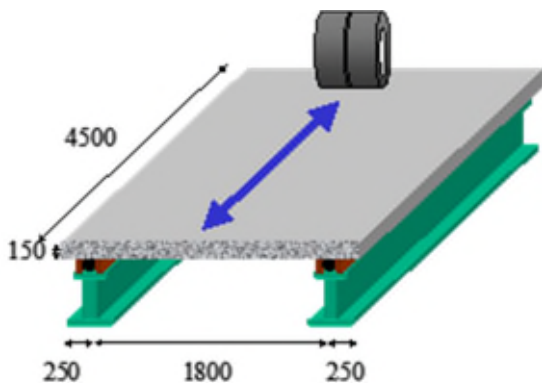


図-6 床版寸法と輪荷重走行模式図

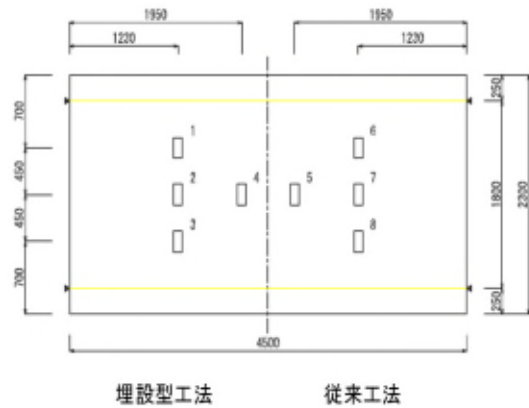


図-7 たわみ測定位置

以降は 1 万回ごとに当該荷重で静的載荷し、載荷時と除荷時の床版支間中央におけるたわみ、床版支間中央における支間方向の鉄筋ひずみの測定および床版下面のひび割れを観察した。

同等の初期損傷を与えた 2 供試体に対する補強として、1 体は供試体中央にて橋軸直角方向で二つに区切り、半分には下面増厚工法の従来工法を、もう半分には鉄筋埋設型工法を施した（従来工法+鉄筋埋設型工法）。もう 1 体は、同様に半分を従来工法、片方を FRP 格子筋埋設型工法で補強した（従来工法+FRP 格子筋埋設型工法）。補強方法は、各供試体ともはり試験体で実施した方法と同じである。補強後の供試体では、従来工法を施した片辺を (E)、鉄筋埋設型工法を施した片辺を (R)、FRP 格子筋埋設型工法を施した片辺を (F) とした。補強後、2 週間養生後移動載荷を再開した。

補強後は 120 kN で輪荷重載荷し、1 万回ごとに当該荷重で静的載荷を行い、たわみと鉄筋ひずみを測定すると同時にハンマーで下面を打撃し、“浮き”の発生を

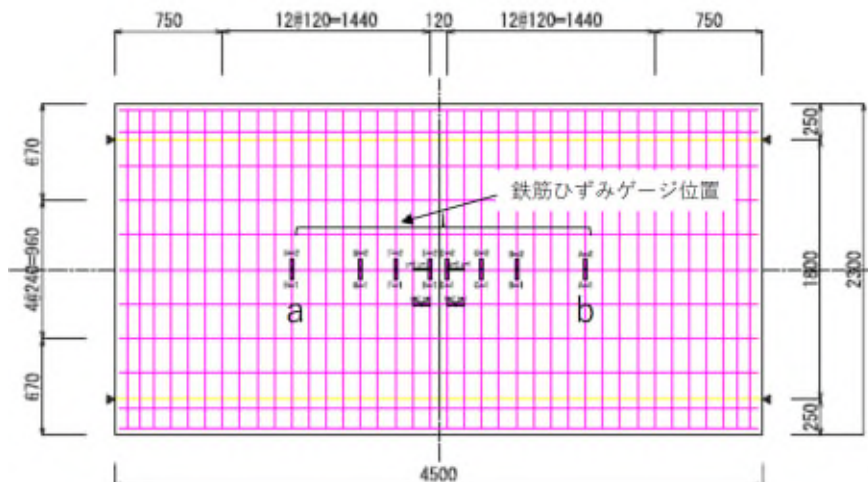


図-8 鉄筋ひずみ測定位置

観察した。図-7にたわみ測定位置、図-8に鉄筋ひずみ測定位置を示す。研究日程上24万回まで移動載荷を継続させたが、供試体の破壊には至らなかった。

4.2 輪荷重試験結果

4.2.1 疲労性能の結果

4.2.1.1 従来工法 (E) と鉄筋埋設型工法 (R) 試験結果

図-9に両工法における測定回数毎に床版中央に静的載荷した時の床版支間中央(図-7の測定点2と7)のたわみと走行回数の関係を示す。走行回数28万回までが補

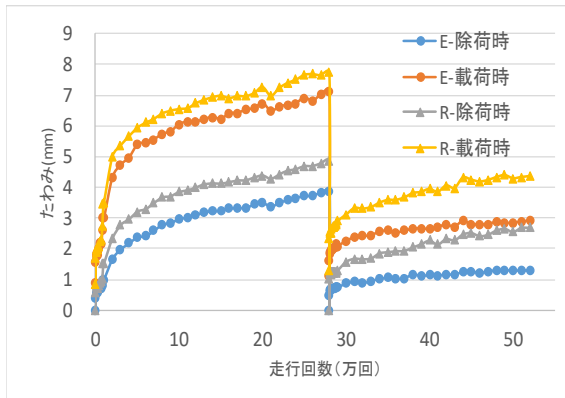


図-9 補強前後の走行回数とたわみ関係

強前、それ以降が補強後のたわみである。記号Eが従来工法による補強結果、記号Rが鉄筋埋設型工法による補強結果である。ただし、前述したように両工法は供試体を左右に分けて施工するので、28万回までの補強前は、理論的には同一のはずである。しかし、載荷時および除荷時に、供試体左右でたわみの差異が生じている。これは、供試体の不整や不陸が生じていたためと思われる。補強後は、いずれの工法においても、載荷時および除荷時のたわみは低減している。ただし、鉄筋埋設型工法では、補強後に走行回数が増加すると、従来工法に比べてたわみの漸増傾向が見られた。これは、供試体の不陸の影響、および鉄筋埋設型工法は縦横補強鉄筋を別々に施工するため、鉄筋交差部の結合性状の影響によると考えられる。

本実験では、補強実施前の試験片の初期損傷の値が異なる。そこで、補強効果の相対比較をするため、式(1)のような比率に計算によりたわみの抑制率を計算した。補強前のたわみ(D_b)として28万回終了時、補強後のたわみ(D_a)として52万回終了時のたわみを採用した。

$$\text{たわみ抑制率(\%)} = \left(1 - \frac{D_a}{D_b}\right) \times 100 \quad (1)$$

式(1)で計算すると、従来工法では、載荷時に60%、除荷時に66%、鉄筋埋設型工法では、載荷時に46%、除荷時に45%となり、従来工法がたわみ抑制率が大きいこ

とが示された。

たわみに対応して、両工法を実施した供試体床版支間中央(図-8のゲージaとb)の床版主方向鉄筋のひずみを、図-10に示す。28万回の補強までは、床版左右のひずみの差異は図-9のたわみの差異ほど顕著ではない。除

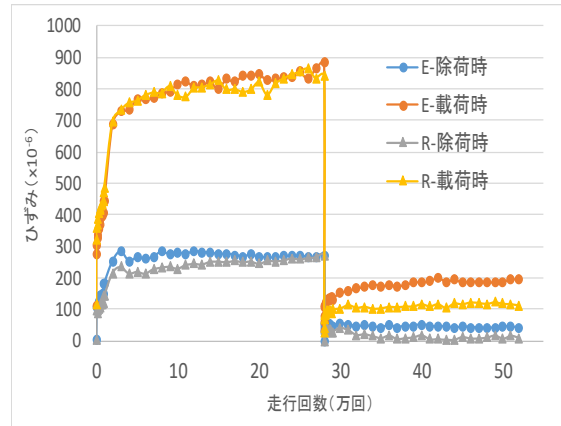


図-10 補強前後の走行回数とひずみ関係

荷時のひずみに若干の差異が見られるほどである。これは、従来工法は、補強格子鉄筋を床版下面に施工するため、もともとの床版鉄筋と補強筋の距離は約50mmである。一方、鉄筋埋設型工法では、鉄筋を床版かぶりに埋め込んでいるので、床版鉄筋と補強筋の上下距離は設計上約20mmである。この影響により鉄筋埋設型工法の鉄筋ひずみが従来工法に比べて小さいと考えられる。

4.2.1.2 従来工法 (E) と FRP 格子筋埋設型工法 (F) 試験結果

図-11に従来工法 (E) と FRP 格子筋埋設型工法 (F) の走行回数とたわみの関係を示す。この供試体の補強前、左右での支間中央部において載荷時および除荷時のたわみの差異はほとんど生じていない。両工法による補強後たわみもほとんど差異はなく、たわみに対する補強効果は、FRP 格子筋埋設型工法は従来工法と同等の効果があると思われる。因みに、両工法のたわみの抑制率を式(1)で求めると、従来工法では載荷時に60%、除荷時に70%、

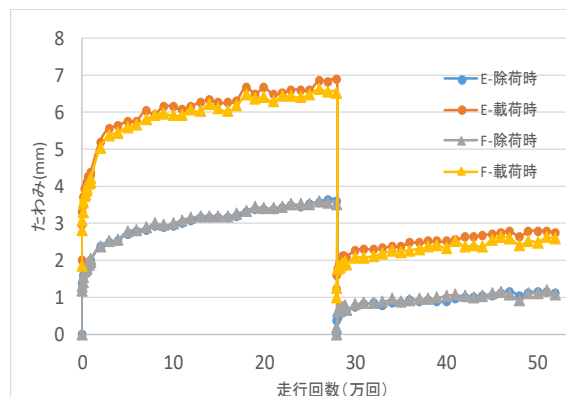


図-11 補強前後の走行回数とたわみ関係

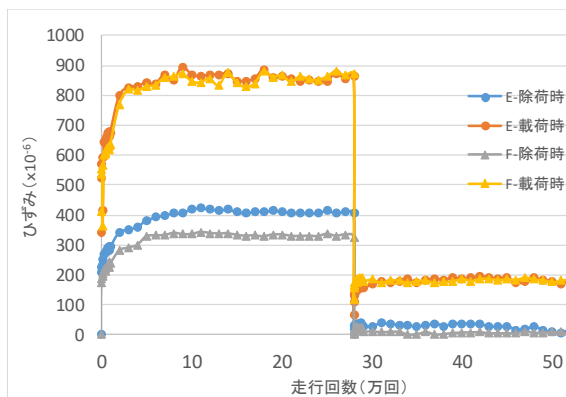


図-12 補強前後の走行回数とひずみ関係

FRP 格子筋埋設型工法では、載荷時に 61%、除荷時に 70%で、数値上の相対比較もほぼ同一となった。

二通りの埋設型工法において、たわみの抑制率の比較から、鉄筋埋設型工法に比べて FRP 格子筋埋設型工法がたわみの抑制率が高い。

図-12 に従来工法 (E) と FRP 格子筋埋設型工法 (F) の走行回数と鉄筋ひずみ (図-8 のゲージ a と b) の関係を示す。ひずみの低減において、FRP 格子筋埋設型工法による補強後は、従来工法と同程度の効果がある。

4.2.2 ひび割れ特性の比較

所定走行回数ごとの静的載荷時に、床版下面のひび割れをトレースし、打音により浮きの調査を行った。写真



写真-1 補強前ひびわれ

-1 から写真-4 に各供試体のひび割れおよび浮きの進展状況を示す。写真上の左右方向が、輪荷重走行方向である。

補強前は、走行回数 500 回時に輪荷重走行方向に 1 方向ひび割れが発生し、1 万回以降に 2 方向ひび割れとなった。10 万回以降には新たなひび割れの発生は減り、ひび割れ幅の増加が観察された。

従来工法では、補強前に発生したひび割れに比べてひび割れ幅は大幅に減少したが、浮き (写真-2 中の丸範囲) が広範囲に発生した。

鉄筋埋設型工法では、補強後走行回数 1000 回で 2 方

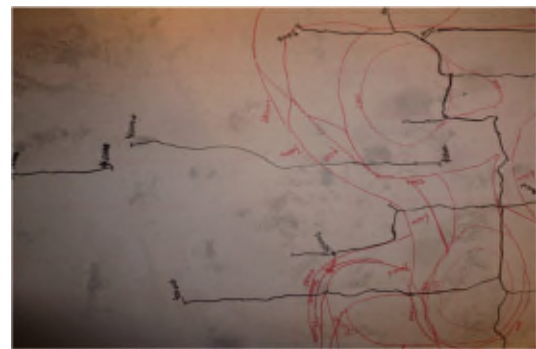


写真-2 従来工法のひび割れ

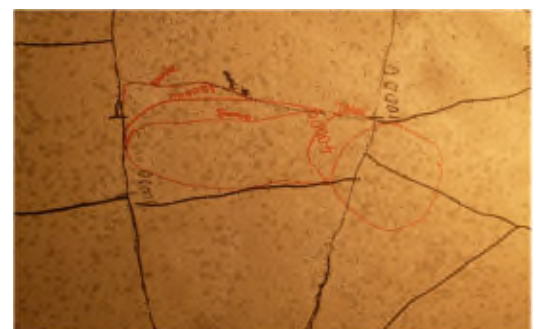


写真-3 鉄筋埋設型工法ひび割れ



写真-4 FRP 格子筋埋設型工法のひびわれ

向ひび割れが発生した。ひび割れ本数は多数観察されたが、浮きの発生個所は少なく、その範囲も小さかった。

FRP 格子筋埋設型工法では、ひび割れは荷重走行方向の 1 方向ひび割れにとどまっていた。浮きの発生も鉄筋埋設型工法と同様に少数で狭範囲であった。

走行回数 52 万回終了時の床版下面のひび割れと浮きの分布図を、図-13 と図-14 に示す。図中の格子線は、補強筋、太線がひび割れ、斜め斜線部が浮きである。両図とも床版左右中心軸付近に浮きが見られるが、この個所は、二つの補強工法の施工継ぎ目であり、不連続な部分であるために生じたと考えられる。

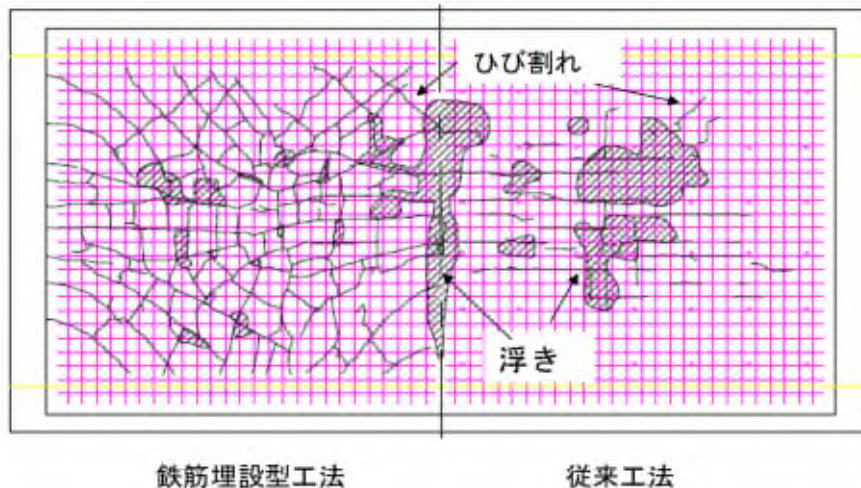


図-13 輪荷重走行試験終了時のひび割れと浮きの分布

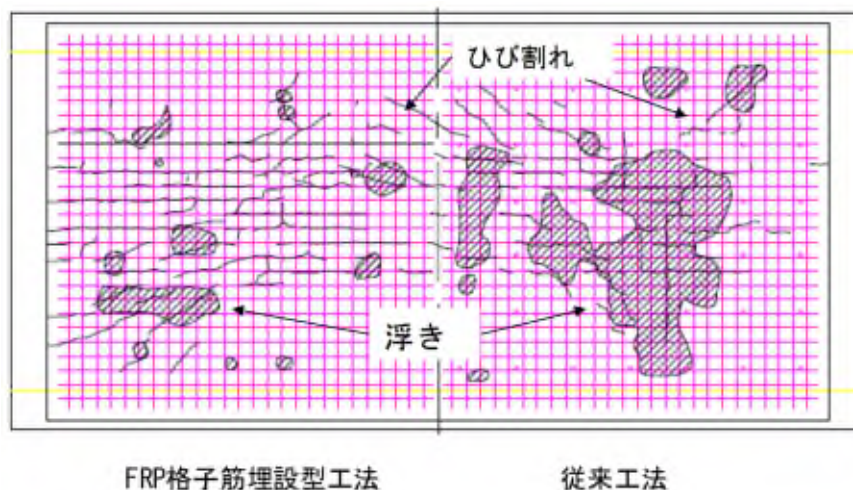


図-14 輪荷重走行試験終了時のひび割れと浮きの分布

従来工法と二つの埋設型工法を比較すると、埋設型工法は浮きの発生が抑制されている。殊に、FRP 格子筋埋設型工法では、ひび割れが床版支間に対して直角の1方向ひび割れで、分散されているのが分かる。

5. 結論

本研究は、損傷を受けた RC 床版の下面補強方法において、埋設型工法を開発し、従来工法と、曲げ特性および輪荷重走行試験による疲労特性およびひび割れと浮きの特性の比較検討を行ったものである。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) FRP 格子筋埋設型工法で施工された床版は、従来工法で施工された床版と同等程度まで疲労耐久性がある。鉄筋埋設型工法はたわみでは補強後のたわみは大きい、鉄筋ひずみは従来工法と同等に低下さ

せている。

- (2) 埋設型工法では従来工法で多く発生していた床版下面の浮きを抑制する効果があった。殊に FRP 格子筋埋設型工法では、ひび割れの方向はほぼ一方向であり、ひび割れ分散に大きな効果があった。

6. 参考文献

- 1) 例えば、松井繁之編著：道路橋床版，森北出版，pp. 5～18，2007年10月
- 2) 土木学会：道路橋床版の要求性能と維持管理技術，土木学会，pp. 1～pp. 57，2008年6月
- 3) 横山和昭・鹿野善則・紫桃孝一郎：下面増厚した RC 床版の輪荷重走行試験による疲労耐久性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26, No. 2, pp. 1717～pp. 1722，2004年7月