

報告 超高強度繊維補強コンクリートによる RC スラブの補強工法の開発

白井 貴之*1・笠倉 亮太*2・渡辺 勉*3・仁平 達也*4

要旨：鉄筋腐食等の経年劣化を生じた既設スラブを、パネル状に成形した超高強度繊維補強コンクリートを用いて補修・補強する工法を考案し、補強スラブを模擬した試験体について静的載荷試験、および疲労試験を行った。さらに、本工法を実構造物に適用した場合の騒音の低減効果について解析的に検討した。静的載荷試験では、補強による剛性および最大耐力の向上を確認し、補強部まで一体として挙動すると仮定した計算方法で概ね評価できることが分かった。疲労試験では、繰返し載荷による剛性の低下等がないことを確認した。また、スラブを補強することによってスラブ剛性が向上し、騒音低減効果があることを確認した。

キーワード：鉄筋腐食, 補修・補強, UFC, RC スラブ

1. はじめに

近年、鋼材腐食等による RC ラーメン高架橋中間スラブの変状が報告されている。変状が発生したスラブの下面に対する補修・補強工法として、一般的に、断面修復工法や鋼板接着工法等が挙げられる。しかしながら、ウォータージェット等によるはつり作業時の騒音や振動が問題になる場合がある。また、鉄筋腐食が著しく、性能が大きく低下したと懸念される場合には、新たな鋼材を設置する等の抜本的な対策を講じる可能性が考えられる。

これらの現状を考慮し、著者らは、はつり作業を必要とせず、高耐久性の型枠を部材の構成材料として用いることで、補強後の断面修復材やコンクリートのはく離・はく落の危険性がなく、かつ耐力向上が可能となる工法について検討している。具体的には、高い耐久性を有し、自由な造形が可能な超高強度繊維補強コンクリート¹⁾ (以下、UFC と記す) に着目し、図-1 に示すように工法について検討している。本報告では、実中間スラブを模擬した試験体により、静的載荷試験と疲労試験を実施し、開発した補強工法の有効性を検討する。また、補強工法による剛性向上に着目し、車両の高速化に伴う構造物音の

低減効果についても検討する。

2. 補強工法の概要

図-1 に補強工法の概要を示す。既設 RC ラーメン高架橋中間スラブの下面にアンカー筋を設置し、UFC パネルを吊り下げる。その後、鋼製プレートで連結しつつ隙間なく設置する。これにより、UFC パネルは埋設型枠だけでなく引張材としても考慮することが出来る。既設スラブとパネルの間には、既設スラブの鋼材腐食の程度や補強後の想定する耐力を鑑みて、軸方向鉄筋と配力筋を設置する。パネルと既設スラブ間には無収縮モルタルを注入する。なお、事前に既設スラブのコンクリートの浮き等をはつり落とすだけで、断面修復工法等で実施する大規模なはつり作業等は行わない。

図-2 に UFC パネルを示す。人力での施工が可能となるように、1 枚の寸法を縦 564×横 564×厚さ 16 mm とし、重量は、人力で運べる重さ程度の約 13kg/枚とする。UFC パネルは、あと施工アンカー 2 本により吊り下げ、図-2 に示すように、鋼製の連結プレートにより隣接するパネルとの接合を図りつつ、埋設型枠の役割も果たすよ

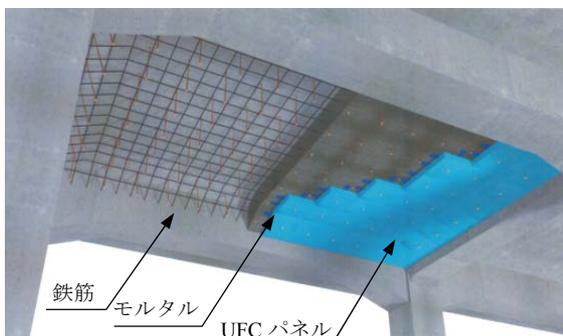


図-1 工法イメージ

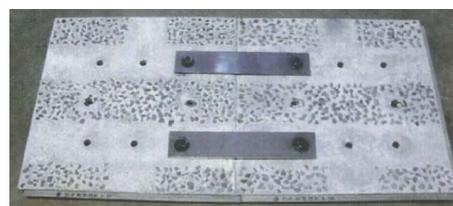


図-2 UFC パネル (2 枚連結した場合)

表-1 既設スラブの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
59	44.8	168	285	804	1026	2.85

*1 西武鉄道株式会社 工務部 施設課 工修 (正会員)

*2 東急建設株式会社 技術研究所 土木研究室 工修 (正会員)

*3 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学研究室 工修 (正会員)

*4 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室 工修 (正会員)

う隙間なく設置する。パネルと既設スラブの間の厚さは、軸方向鉄筋 (D13) と配力筋 (D10) のあきが最低限確保できる厚さ 46mm とし、パネル厚さを加えた補強部の厚さを 62mm とする。

3. 静的載荷試験

3.1 試験体形状および配筋

試験体の既設スラブ部の形状および配筋は、実際の高架橋スラブを模擬して製作した。試験体は無補強の試験体 No.1 と、No.1 と同一諸元のスラブを当該工法により補強した試験体 No.2 である。No.1 の形状は、幅 1,100×高さ 250×スパン 3,000mm とした。試験体の軸方向鉄筋には SD345-D16 を 9 本、配力筋には SD345-D10 をそれぞれ等間隔で配筋した。図-3 に No.2 試験体の概要を示す。補強部と UFC パネルの間には、SD345-D13 を 9 本配置した。補強部の増厚量 (UFC パネル+無収縮モルタル) は 62mm とした。既設スラブと補強部の境界にポリエチレンフィルムを挟むことで、既設スラブと無収縮モルタルとの付着強度を期待せず、UFC パネルと既設スラ

ブは、アンカー筋のみにより一体化を図る構造とした。

3.2 使用材料

表-1 に既設スラブ部のコンクリート配合を示す。表-2 に材料試験結果を示す。UFC パネルは、超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)¹⁾ に適合した材料を用いて製作した。

3.3 載荷方法

本実験では、実構造物に作用する自重および活荷重による正の曲げモーメント部を対象とし、図-3 に示すように、試験体のスパン中央に 1 点集中の静的単調載荷とした。なお、No.1 は、実構造物において列車通過時に作用する軸方向引張鉄筋の応力状態を想定し、既設スラブの軸方向引張鉄筋ひずみが 1,200 μ (引張側鉄筋の応力が 220N/mm² 程度) となるまで載荷し、No.2 は終局状態まで載荷した。

3.4 実験結果

(1)破壊までの経緯

No.1 は、50kN で試験体下縁に曲げひび割れを生じ、115kN で引張鉄筋ひずみが 1,200 μ となったため載荷を終

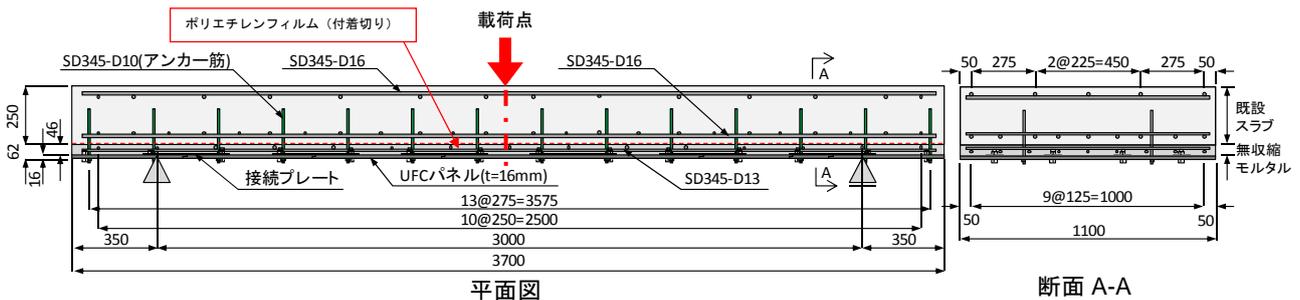


図-3 静的載荷試験 No.2 試験体概要

表-2 材料試験結果 (静的載荷試験体)

試験体	既設スラブコンクリート		無収縮モルタル		UFC	既設スラブ軸方向鉄筋		補強部軸方向鉄筋		アンカー筋	
	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
No.1	33.3	29.0	-	-	-	389	185	-	-	-	-
No.2	37.0	35.5	63.5	29.5*	211.3	380	178	375	196	399	190

*無収縮モルタルのヤング係数は、メーカー推奨値を参照

表-3 荷重変位曲線計算値の算定条件

計算値	補強鉄筋考慮	UFC考慮	計算方法	
			重ね梁	計算方法
1	○	×	重ね梁	既設スラブと補強部のモルタルを重ね梁として計算
2	○	×	RC断面	既設スラブと補強部のモルタルを一体として計算
3	○	○	RC断面	文献1を参考に既設スラブと補強部のUFCまでを一体として計算

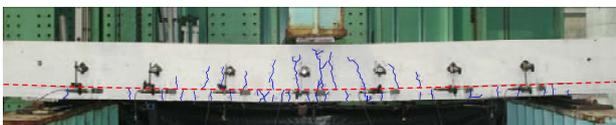


図-4 軸方向鉄筋降伏後 (398kN) の状況

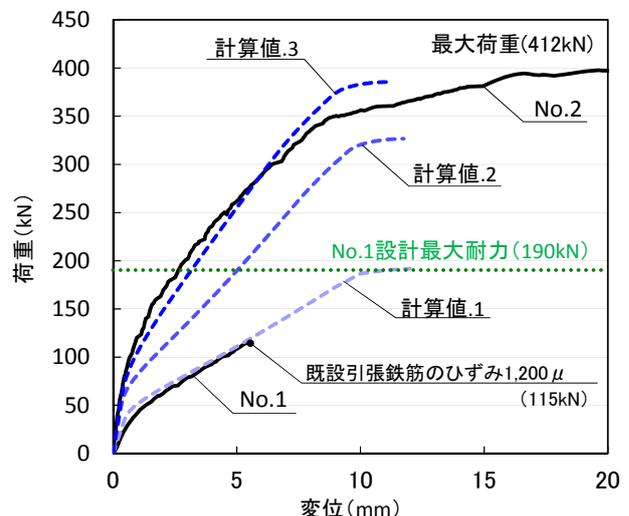


図-5 試験体の荷重変位曲線

了した。No.2 は、120kN で既設スラブに、140kN で補強部の無収縮モルタルに、220kN で UFC パネルに曲げひび割れが発生した。340kN で既設スラブの軸方向引張鉄筋が降伏し、396kN で補強部の軸方向鉄筋が降伏した。図-4 に軸方向鉄筋降伏後の 398kN 荷重時の破壊状況を示す。その後は荷重が漸増し、その後スパン中央のコンクリート上縁にコンクリートの圧壊の傾向が表れたが、最終的には 412kN となった。荷重終了時のアンカー鉄筋の抜け出し、破断および UFC パネルのはく落は確認されなかった。なお、補強部の軸方向鉄筋の降伏 (396kN) 以降、スラブ中央付近の UFC パネルに発生したひび割れ幅が増大し、最大荷重時程度では折損した。これは、UFC パネルが既設スラブの曲率に追随出来なくなったものと考えられる。

(2) 荷重-変位関係

図-5 に荷重-変位関係の実験値と、ひび割れによる剛性の変化を式 (1) により考慮した計算値を併せて示す。計算値は、表-3 に示すように、重ね梁として計算 (計算値 1) や既設部と補強部を一体として計算 (計算値 2: UFC パネル非考慮, 計算値 3: UFC パネル考慮) の 3 つの条件で算定した。

$$EI_r = E_c \left[\left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^4 \cdot I_g + \left\{ 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^4 \right\} \cdot I_e \right] \quad (1)$$

ここに、

EI_r : 曲げ剛性 (kN・mm²)

E_c : コンクリートのヤング係数 (kN/mm²)

M_{cr} : 曲げひび割れモーメント (kN・m)

M : 作用曲げモーメント (kN・m)

I_g : 全断面有効の断面 2 次モーメント (mm⁴)

I_e : 中立軸以下のコンクリートの引張抵抗を無視した断面 2 次モーメント (mm⁴)

No.2 の実験値は No.1 に比べ耐力や剛性が向上した。No.2 は、計算値 1 に比べて実験値の剛性が高く、UFC パネルを含めた補強部が剛性向上に寄与しているといえる。また、No.2 の実験値と計算値 2 と計算値 3 を比較すると、UFC パネルの材料特性を文献 1) により考慮した計算値 3 が、実験値を最も評価出来る結果となった。試験体は、既設スラブと補強部が重ね梁の挙動をするのではなく、アンカー筋がせん断力を伝達し、既設スラブと補強部が一体となって挙動し、UFC パネルが構造材料として考慮できる工法であることを確認した。計算の結果から、既設スラブの変状状況を考慮して、軸方向鉄筋の追加本数を調整させることで、補強部の耐力を調整することが可能となると考える。

(3) 補強による剛性の向上

図-6 に、補強による剛性の向上について示す。剛性は、原点と実験より得た荷重変位曲線の荷重 37.7kN の点を

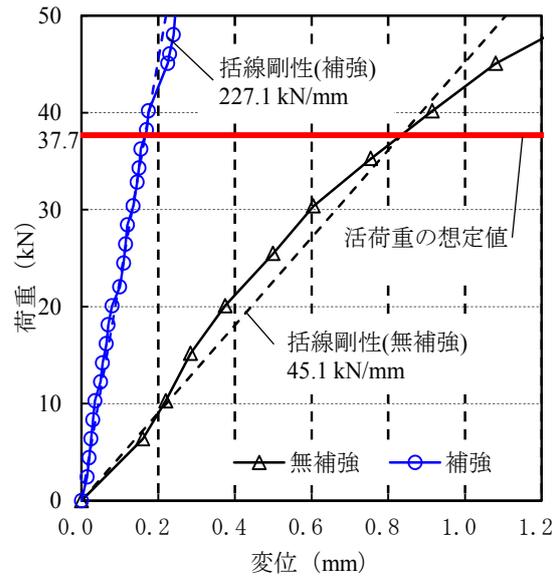


図-6 補強による剛性の変化

結んだ割線剛性で評価した。37.7kN は、活荷重作用時の実構造物の中間スラブに発生する曲げモーメントを試験体せん断スパンで除すことにより設定したものである。なお、当該荷重作用時に曲げひび割れは確認されてなかった。図-6 に示すように、無補強時の割線剛性が 45.1kN/mm であるのに対して補強後は 227.1kN/mm であり、UFC パネル補強によって剛性が約 5.0 倍に向上することが確認した。

3.5 静的荷重試験のまとめ

静的荷重試験の結果から以下の項目が確認できた。

- 1) 既設スラブの剛性および耐力が向上することを確認した。剛性の向上量は、実験値から求めた剛性の算定より約 5.0 倍となることを確認した。
- 2) 既設部と補強部の付着強度に期待することなく、アンカー筋のみによって補強効果を伝達できる工法であることを確認した。
- 3) 本工法による設計計算をする際は、補強部の UFC パネルまでを一体として挙動する仮定の下で、剛性および耐力を評価できることを確認した。

4. 疲労試験

4.1 試験体形状および配筋

実験に用いた試験体を図-7 に示す。試験体は、本工法によって補強した試験体であり、寸法等は、実スラブを想定しつつ、疲労試験機に設置できる重量等を考慮して作成した。補強方法は、3. 静的荷重試験と同様とした。

4.2 使用材料

スラブのコンクリートの配合および材料は、静的荷重試験と同様とした。表-4 に材料試験結果を示す。

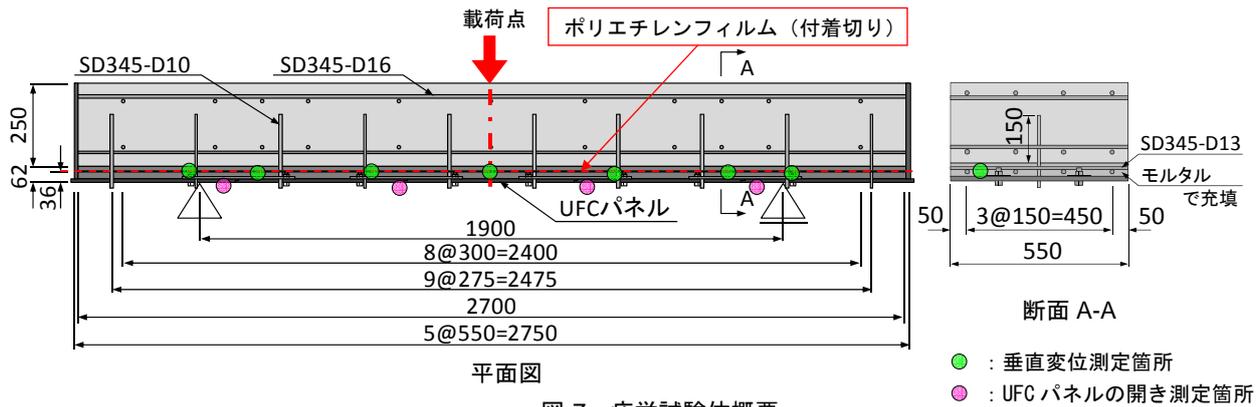


図-7 疲労試験体概要

表-4 材料試験結果（疲労試験体）

試験体	既設スラブコンクリート		無収縮モルタル		UFC	既設スラブ軸方向鉄筋		補強部軸方向鉄筋	
	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
疲労試験	40.9	36.6	69.3	27.2	211.3	365	195	380	180

表-5 疲労試験の载荷内容

項目	载荷内容
载荷荷重	最大 70.4kN 最小 10.0kN
繰返し回数	1, 10, 100, 1000, 1万回, 10万回, 100万回, 200万回
静的载荷試験	試験体が破壊するまで载荷
周波数	2.6 Hz

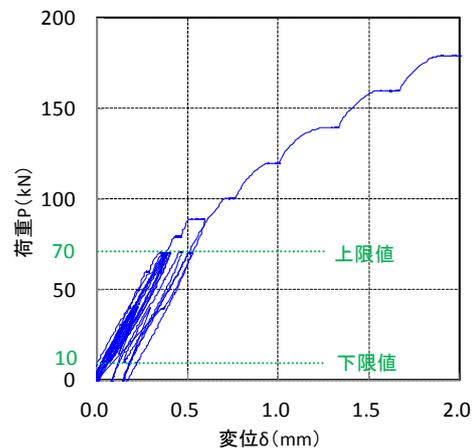


図-8 疲労試験後の荷重-変位曲線

4.3 载荷方法

本実験では、静的载荷試験と同様に、実構造物の正曲げモーメント部を対象とした。図-7に示すように、スパンは1900mmとして中央一点载荷とし、200万回までの繰返し载荷による疲労試験を行った。疲労試験終了後、静的に試験体が破壊するまで载荷した。測定は、表-5に示す所定の繰返し回数ごとに静的载荷を行った。たわみ等の計測に加えて、試験体底面におけるUFCパネル間の開きを計測し、繰返し载荷が試験体に及ぼす影響について検討した。図-7に計測箇所を示す。また、200万回繰返し試験終了後に試験体が破壊に至るまで静的载荷試験を行った。

繰返し载荷における下限荷重と上限荷重は、スラブに死荷重が作用している場合（下限値）と、死荷重+列車荷重が作用している場合（上限値）を想定した。すなわち、下限値は既設スラブの引張鉄筋の応力が30N/mm²となる荷重とし、上限値は引張側鉄筋の応力が220N/mm²となる荷重とした。なお、試験前に88.2kN载荷し、スパン中央付近にひび割れを発生させている。

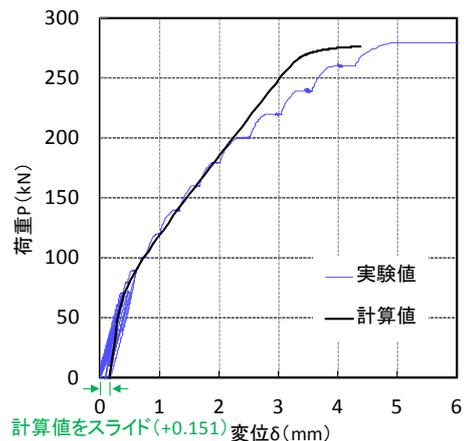


図-9 計算値と実験値の比較

4.5 実験結果

図-8に繰返し载荷後の試験体中央における最大荷重までの荷重-変位曲線を示す。図-9に実験値と計算値の比較を示す。計算値は、3.と同様にUFCパネルまでが一体として挙動していたと仮定して算出した方法とした。なお、計算値は、疲労試験終了後に破壊まで静的に载荷

表-6 繰返し载荷による剛性の変化

载荷回数 (回)	剛性 (kN/mm)	1回目に対する割合 (%)
1	192.6	100
10	172.2	89
100	166.6	87
1,000	166.1	86
1万	164.8	86
10万	180.7	94
100万	178.2	93
200万	178.5	93

した場合と比較するため、静的载荷時の残留変位分として0.15mm シフトさせた。

疲労試験中、ひび割れの極端な進展は見られなかった。繰返し载荷試験終了後に、静的に载荷した際には220kNでUFCパネルの下面にひび割れが発生し、280kNで既設スラブ部の軸方向引張鉄筋のひずみが2,000 μ に達した時点でUFCパネル下面のひび割れが増加し、336kNで最大荷重に到達し曲げ破壊した。また、3章と同様に、表-3の計算値3の方法で荷重-変位関係を検討したが、概ね実験値を評価出来る結果となった。

表-6に主な繰返し回数における試験体の曲げ剛性と、繰返し载荷1回終了後の剛性に対する割合を示す。表に示す値は、図-8に示した荷重変位曲線の、上限値と下限値の2点から主な繰返し回数ごとに割線剛性を算出したものである。多少の誤差を含んでいるものの、疲労による曲げ剛性の低下は小さく、200万回载荷終了時点で10%程度以内であった。

図-10に、载荷点の既設スラブ部下面位置における垂直変位量を測定した結果を示す。測定値は、概ね左右対称とした分布形状であり、局所的な変形や偏りはなかった。中央部のたわみの増分は、1回目载荷から200万回载荷で0.2mm程度であり、疲労による変位の増加も小さいものであった。また、試験体底面に設置したUFCパネルの継目部に設置した π ゲージによるUFCパネル間の目開き量も0.02mm以下であり、ほとんど変動が見られなかった。したがって、コンクリートと埋設型枠は一体となって挙動していると考えられる。

4.6 疲労試験のまとめ

疲労試験の結果から以下項目が確認できた。

- 200万回までの繰返し载荷において、本工法により補強したスラブは、疲労による曲げ剛性の低下は確認されなかった。
- 目視および π ゲージによるUFCパネル同士の目開きの測定より、疲労試験終了まで顕著な目開きは観察されなかった。

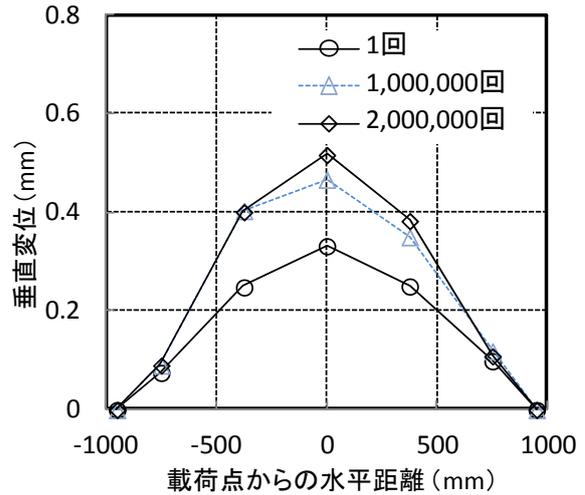


図-10 繰返し载荷後の垂直変位



図-11 解析対象構造物

表-7 解析ケース

ケース	単位面積当たりの重量	剛性
無補強	541 kg/m ²	1倍
補強	705 kg/m ²	5倍

5. 振動低減効果に関する解析的検討

5.1 検討概要

鉄道沿線の騒音を音源別にみると、構造物の部材振動に起因する構造物音がある。鉄道RC高架橋においては比較的剛性が大きく、これまで構造物音が問題となる事例は少なく、具体的な対策工に関する検討は不十分であるのが実情である。しかしながら、近年の列車の高速化によりRC高架橋においても、部材の動的応答の増大に伴う構造物音の発生が懸念されるようになってきた。

そこで本章では、本工法による既設スラブの剛性向上による振動低減効果に関して解析的な検討を行った。

5.2 検討手法

(1) 解析手法

構造物音を適切に評価するためには、構造物の部材振動を数百Hz程度までの高周波数領域まで再現する必要がある。そのため、振動伝播系の車両、軌道、構造物を詳細にモデル化することとした。

図-11に解析対象構造物を示す。表-7に各要素の材料定数を示す。剛性は、図-6の静的载荷試験の結果より補強することで約5倍に向上したため、この値を用いた。

対象構造物は、ブロック長 25m の 3 径間 RC ラーメン高架橋と前後のスパン 10m の調整桁（単版桁）である。

図-12 に解析モデルの概要を示す。車両/軌道と軌道/構造物で系を分割し、前者のモデルで加振力を求め、これを後者のモデルに入力して構造物の部材振動を求める手法を用いた²⁾。具体的には、車両/軌道系解析モデルにおける数値解析には鉄道総研開発の車両と鉄道構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARSIII を用いた。また、軌道/構造物系モデルにおける数値解析には線路構造物の汎用構造解析プログラム DIARIST を用いた³⁾。

(2) 車両の力学モデル

図-13 に車両の力学モデルを示す。車体、台車及び輪軸を剛体質点と仮定し、それらをばねとダンパでリンクした三次元力学モデルで、1 車両あたり 31 自由度を有する。列車は、車両モデルを車端に設けたばねとダンパで連結して構成する。本報告では、車両長 25m、輪重 60kN 程度の一般的な新幹線車両 6 両とした。

(3) 軌道及び構造物の力学モデル

軌道及び構造物は有限要素法によりモデル化する。具体的に使用した要素は、図-13 に示す通りである。高周波数までの振動を忠実に再現するためには、加振源となる車両のばね下質量を高周波数領域まで加振する必要があるため、レール頭頂面には線路方向に凹凸（実測値）を与えた。

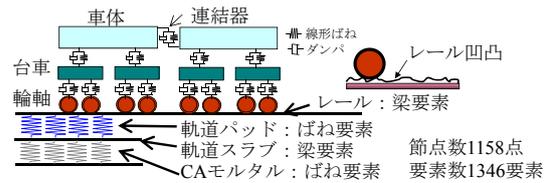
5.3 検討結果

図-14 に解析結果を示す。補強と無補強で中間スラブ中央の振動速度レベルを比較した。本工法の剛性増加により、中間スラブの振動を、オーバーオール値で 3.8dB 低減する効果を得ることができた。

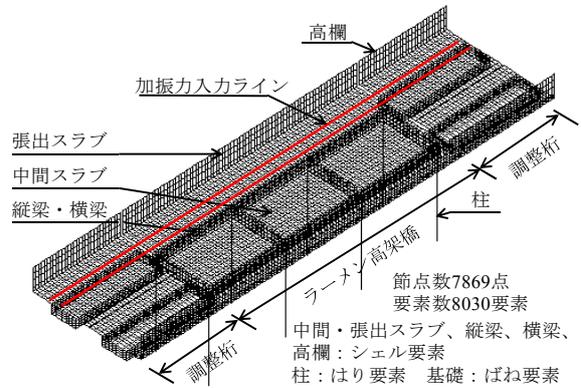
6. まとめ

- (1) 本工法により、既設スラブの剛性および耐力が向上することを確認した。
- (2) 本工法による設計計算をする際は、補強部の UFC パネルまでを一体として挙動する仮定の下で、剛性および耐力を評価できることが分かった。
- (3) 200 万回までの繰返し载荷において、本工法により補強したスラブは、疲労による曲げ剛性の低下は確認されなかった。
- (4) 目視および π ゲージによる UFC パネル同士の目開きの測定より、疲労試験終了まで顕著な目開きは観察されなかった。
- (5) 本工法により、中間スラブの中央における振動速度レベルは、オーバーオール値で 3.8dB の低減効果が期待できることが分かった。

謝辞：本研究を実施するに際して、太平洋セメント株式会社、関係各位より貴重な助言を頂きました。ここに記し、



(a) 車両/軌道系モデル



(b) 軌道/構造物系モデル

図-12 解析モデルの概要

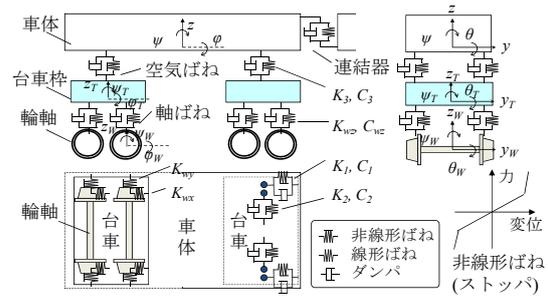


図-13 車両の力学モデル

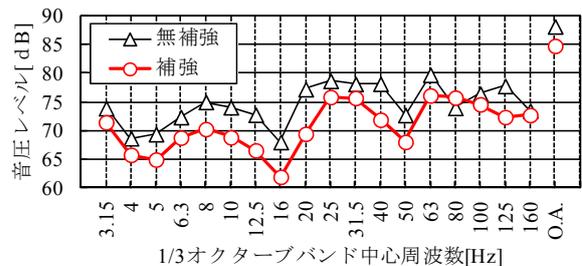


図-14 解析結果

感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，2004.9
- 2) 渡辺勉，曾我部正道，徳永宗正：鉄道構造物の部材振動に影響を及ぼす各種パラメータに関する解析的検討，第 19 回鉄道技術連合シンポジウム 公演論文集，No.12-79，pp.613-616，2012
- 3) 曾我部正道，松本信之，藤野陽三，涌井一，金森真，宮本雅章：共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究，土木学会論文集，No.724/I-62，pp.83-102，2003.1