

論文 定着金物を用いた連続繊維シートによる劣化スラブの補強効果

高橋 茂治^{*1}・福山 洋^{*2}・鈴木 英之^{*3}・中村 洋行^{*4}

要旨: 定着金物と炭素繊維シートを用いた補強工法は、主に既存建物の補強を目的に開発された工法であり、既存梁開孔増設に対する補強、柱、梁の耐力向上を目的とした補強にその効果が確認されている。今回、既存建物の室内空間を極力低減しないで済む本工法を、スラブの補強に適用することを考え、実大実験によりその補強効果を検証した。その結果、本工法による補強は、劣化スラブの振動、長期クリープに対する性能を回復させることが確認された。そして、その補強効果の解析的な検討を行った。

キーワード: スラブ補強、炭素繊維シート、定着金物、振動性能、長期クリープ

1. はじめに

近年、地球環境問題の観点より、既存ストックの長寿命化による有効利用が重要な課題となってきた。既存構造物をリニューアル、コンバージョンする上で、用途変更に伴う荷重増大に対する補強、経年劣化に対する補強は不可避であり、特に劣化スラブについては、たわみ障害、振動障害等、ユーザーの日常使用に及ぼす影響は大きく、早急の補強が必要となる。本報は、鋳鋼製の定着金物と炭素繊維シート（以下、CFシートという。）を用いた補強工法（以下、本工法という。）をスラブに適用した場合の補強効果確認実験の報告である。

本工法の概要を図-1に示す。本工法は、図-2、図-3に示すように、定着金物内面側とコンクリート躯体でCFシートを押さえるとともに、シートの余長部分を折り返し、金物外面に接着することで定着を確保し、この金物をボルトのせん断抵抗又は引張抵抗でコンクリートと一体化することにより、鉄筋コンクリート部材の補強を行う工法である。主に既存構造物の補強を目的に開発され、リニューアルに伴う既存梁への開孔要求に対する補強、梁の耐力向上等の効果が確認されている。（文献[1]、文献[2]）

今回行った実験（写真-1）では、試験的に劣化させた実大スケールの一方向スラブに対して、本工法による補強を行い、その補強効果を確認した。

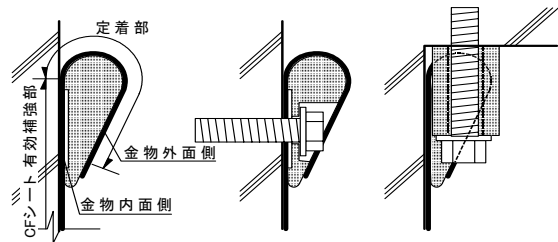


写真-1 本工法のスラブへの適用

補強効果は、振動計測によりその剛性の変化を調べることで確認することとし、さらに長期クリープ性状を確認するための長期載荷実験を行った。本報ではその途中経過の報告と、補強効果の解析的な検討を示す。



図-1 工法の概要



a. CFシートの定着 b. タイプAの定着 c. タイプBの定着

図-2 CFシートのコンクリートへの定着



a.タイプ A b.タイプ B

図-3 定着金物の形状

*1 川口テクノソリューション（株） 設計部 部長（正会員）

*2（独）建築研究所 構造研究グループ 上席研究員 工博（正会員）

*3 安藤建設（株）技術研究所 構造研究室 上席研究員 博士（工）（正会員）

*4（株）コンステック 補強技術本部 本部長 工修（正会員）

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の諸元を表-1、形状および配筋図を図-4(a)、(b)に示す。試験体は、両端に梁型を持つ一方スラブとし、実大スケールの3体とした。スラブ厚さは130mm、内法スパンは4500mmとした。S-1は補強を施さない試験体、SR-2とSR-3は後述する方法でひび割れを発生させた後に、CFシートによる補強を施した試験体であり、SR-2はスラブの上面のみ、SR-3はスラブの上下面にCFシートを貼り付けた。

2.2 材料試験結果

試験体に使用した材料の試験結果を表-2に示す。

表-1 試験体諸元

試験体	スラブ厚 (mm)	内法スパン (mm)	スラブ筋引張鉄筋比	CFシート補強
S-1	130	4500	上端、下端共 7-D10 0.327%	無し
SR-2				上面のみ
SR-3				上下両面

表-2 使用材料の材料試験結果

コンクリート	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	1/3 割線剛性 (kN/mm ²)	
	32	29.2	25	
スラブ筋 D10	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	伸び率 (%)
	347	487	186	22.5

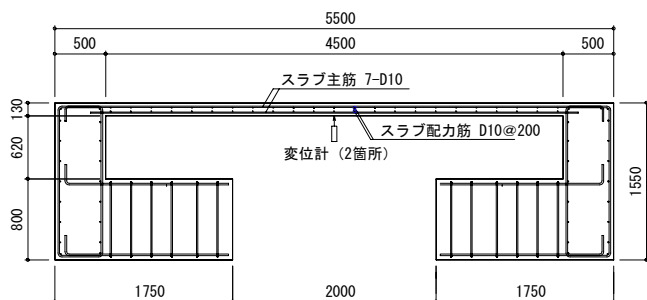


図-4(a) 立面形状および配筋要領

2.3 試験体の劣化

(1) 加力方法

試験体中央部に加力を行うことにより、経年劣化した状態を想定したスラブ試験体とする。図-5に加力装置を示す。スパンの中央部に加力ビームを置き、加力ビーム両端のPC鋼棒に取り付けたナットを締めることで、スラブ中央に1点集中の線荷重を与えた。この時、加力ビームが水平を保つように両端の変位計をモニターしながら、鉄筋のひずみが降伏ひずみに到達するまで載荷した。

荷重の測定はPC鋼棒を通したセンターホール型ロードセルによった。また、スラブの鉛直変位はスパンの中央にて二箇所の変位計で計測した。ひずみの測定は、ストレインゲージをスラブ端部の上端筋、および中央下端筋に貼りつけて計測した。写真-2に加力状況を示す。

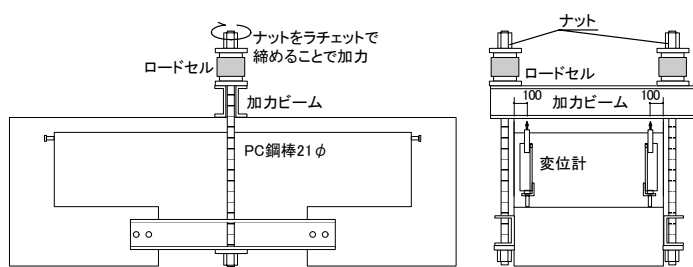


図-5 加力装置

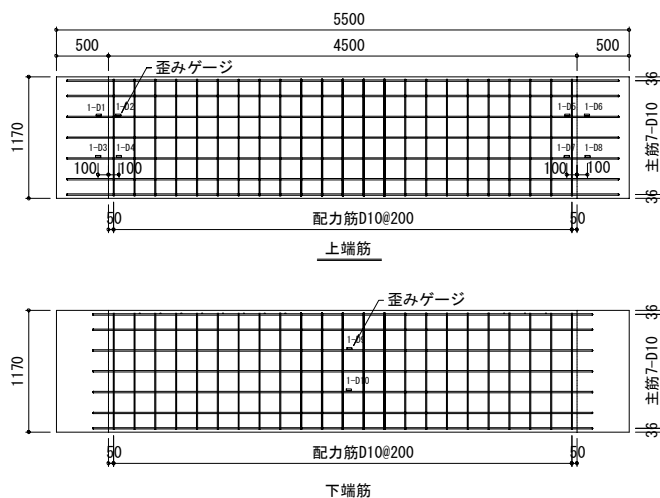


図-4(b) 平面形状および配筋要領



写真-2 加力状況

(2) 加力経過

加力は、コンクリート打設後 32 日目に行った。加力前にひび割れが発生していないことを目視で確認している。図-6 に中央集中荷重時の荷重-中央たわみ関係を示す。いずれの試験体も 10kN 前後で中央下面、固定端上面の順に曲げひび割れが発生し、その後、剛性が低下した。スラブ筋のひずみは固定端側上面が最も大きく、降伏ひずみ近傍の 2000μ に達するまで加力を行った。概ね中央部の鉛直変位が 17mm まで加力したが、この時のひび割れ幅は、固定端上端で 0.7~0.9mm、中央部下端で 0.3~0.4mm であった。その後、ナットを緩めることで除荷をした。除荷後の中央部の残留変位は約 10mm であり、ひび割れ幅は、いずれの試験体も、固定端上面で 0.5~0.7mm、中央部下端で 0.15~0.2mm であった。図-7 に SR-3 試験体のひび割れ状況を示す。

2.4 補強方法

SR-2, SR-3 試験体は本工法による補強を施した。図-8 に SR-3 の補強要領図を示す。補強に使用した CF シートは目付量 300g/m^2 、ヤング係数 230GPa 、シート幅が 250mm であり、これを二つ折りとして、125mm 幅の 2 層とした。これをスパン方向と繊維方向が一致するようにエポキシ樹脂を含浸させながら貼り付けた。写真-3 に補強要領を示す。ひび割れ導入载荷による変形が約 10mm 残留していたが、単管とジャッキベースを用いて残留変形を零とした。サポートを立てた状態で CF シートを貼り付け、CF シートの端部は上面、下面共に定着金物で固定した。ここで、スラブ上端の CF シートの定着には写真-3(5)に示すタイプ A の平型金物、下端の定着には写真-3(6)に示すタイプ B の縦型金物を使用した。

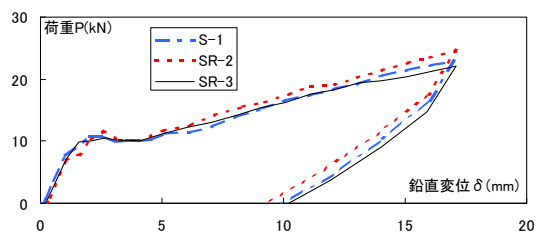


図-6 中央集中荷重時の荷重-中央たわみ関係

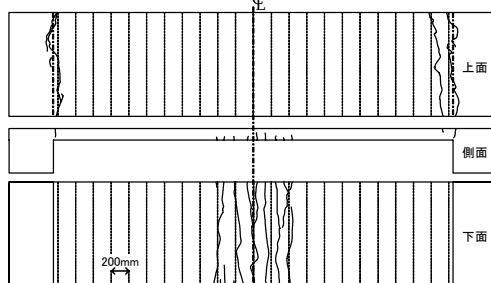


図-7 ひび割れ状況 (SR-3)

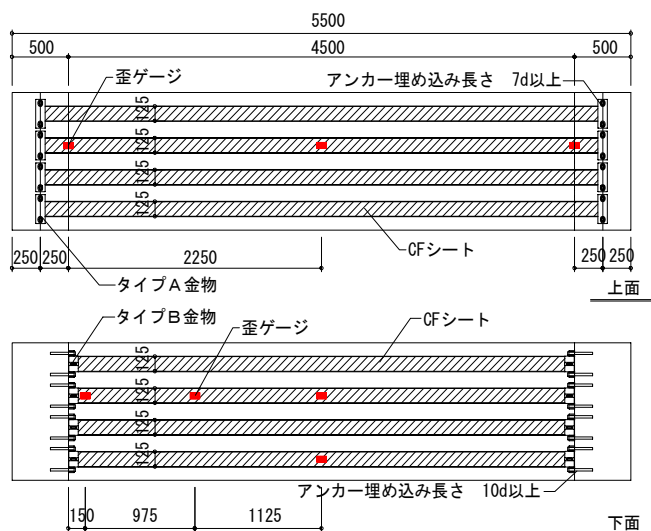


図-8 SR-3 試験体補強要領図



(1) ジャッキアップ



(2) エポキシ樹脂塗布



(3) CFシート貼り付け



(4) 金物に定着



(5) スラブ上端 (タイプ A 金物)



(6) スラブ下端 (タイプ B 金物)

写真-3 補強要領

通常の長期荷重によるスラブ下面のひび割れはスパンの中央付近に発生する。CF シートでこのようなひび割れを補強する場合、余長部分で CF シートの定着が確保されていれば、シート端部の定着金物は必要ない（図－9 (a)）。しかし、実際のスラブでは、固定端部分の曲げひび割れが下面まで貫通していることがあり、その場合はスラブの下面に貼る CF シートも端部で定着する必要がある（図－9 (b)）。今回の実験では、固定端側のひび割れはスラブ下面まで貫通していなかったが（写真－4）、縦型プレートの施工性を確認する意味も含めてスラブ下面の CF シートも梁部分に定着した。サポートは、CF シートの施工から 4 週間後に除去した。

2.5 振動測定方法

バンダマシン用のゴムタイヤ（重量 7.3kg）を約 50cm の高さからスラブの中央部に落下させ、その時に生じるスラブの自由振動を加速度計で計測した。振動測定は、中央加力実験前の健全時、同実験後の劣化時、本工法による補強後の計 3 回行った。（写真－5）

2.6 長期荷重実験

サポートの除去と同時に、長期荷重によるクリープ試験を開始した。試験体中央部に 500l の水槽を置き、それを満水にすることで長期荷重を開始した（写真－6）。水槽の重量と併せて載荷荷重は 5.1kN となる。この時、両端がピンの状態の中央部モーメントは 5.74kN・m となる。この値は 1.94kN/m² の分布荷重時の中央部モーメントであり、住宅用の積載荷重 1.8kN/m² にほぼ等しい（図－10）。

3. 実験結果

3.1 振動測定結果

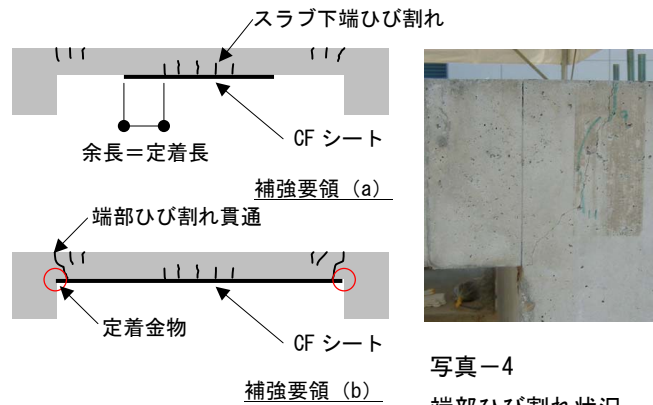
(1) 固有振動数の推移

図－11 に振動計測結果の FFT 解析結果を示す。加力によりスラブにひび割れが発生することで、固有振動数が低下し(12.5Hz)，その後の補強によって固有振動数が上昇することが確認された。劣化時に一次固有振動数の少し高いところに小さなピークが存在する。これは、ねじれ方向の一次固有振動数であると思われる。この小さなピークは、両面補強を施すことで無くなった。

同図 d に各試験体の固有振動数の推移を示す。ひび割れの導入によって、劣化時に健全時の 57% まで低下した固有振動数は上面補強で 73%，上下両面補強で 92% まで回復した（表－3）。尚，補強時に無補強試験体の固有振動数が、13.25Hz とひび割れ導入時より若干大きいのは、加力後約 1 ヶ月経過したため、鉄筋の時効硬化等の影響によるものと推察される。

2) 計算値との比較

一方向梁の固有振動数算出式（式（1））と測定結果の比較を表－4 に示す。健全時，劣化時の測定値は、概ね



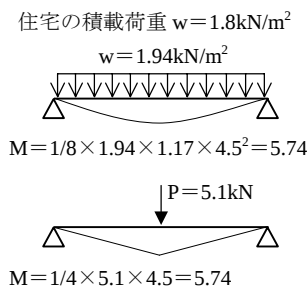
図－9 ひび割れ状況と補強要領



S-1 試験体

SR-2 試験体

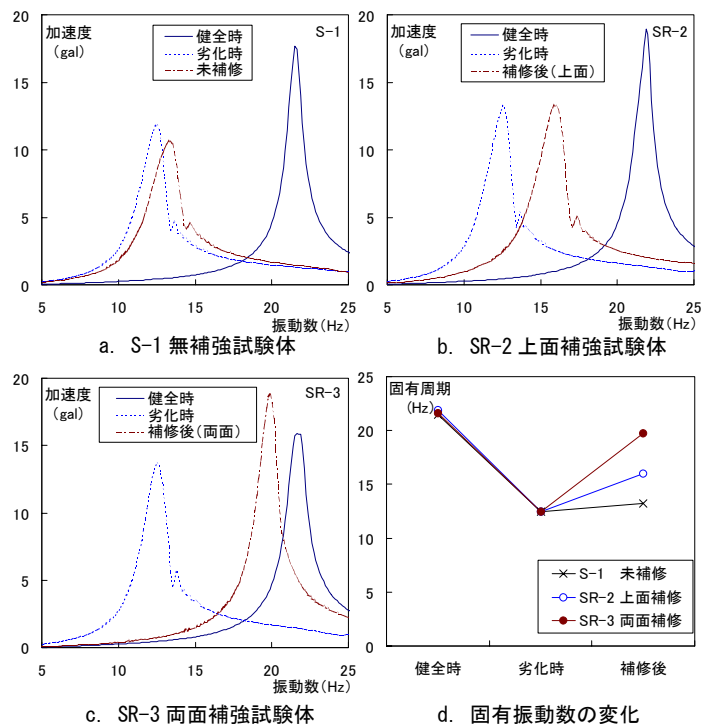
写真－5 試験体振動測定状況



図－10 長期荷重荷重



写真－6 長期荷重実験状況



図－11 FFT 解析結果と固有振動数

既往式による計算値に一致している。

$$f_v = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A \cdot l_x^4}} \quad (1)$$

ここで、

c ; 固定度係数

単純梁 : 9.87 両端固定梁 : 22.7

E ; コンクリートのヤング係数 (N/mm²)

I ; 断面 2 次モーメント (mm⁴)

ρ ; 密度 (N・sec²/mm⁴)

A ; 断面積 (mm²)

l_x ; スパン (mm)

表-3 固有振動数測定結果

	S-1 無補強	SR-2 上面補強	SR-3 上下面補強
健全時	21.5Hz	21.9Hz	21.6Hz
劣化時	12.5Hz (58%)	12.5Hz (57%)	12.5Hz (58%)
補強時	13.25Hz (62%)	16.0Hz (73%)	19.8Hz (92%)

※ () 内は健全時に対する低下率を示す

表-4 計算値との比較

	計算値	S-1 計算値/測定値	SR-2 計算値/測定値	SR-3 計算値/測定値
健全時	21.13Hz	0.983	0.964	0.978
劣化時	13.00Hz	1.040	1.040	1.040

※ 劣化時の計算値は、配力筋までひび割れが達していると仮定して
スラブ厚 80mm として算出した

3.2 サポート撤去時の歪分布

図-12 にサポート撤去時の、CF シート及び、鉄筋の歪分布を示す。ここで、歪みの値はサポートを撤去する直前に初期値を取り直している。端部上端引張り応力に対しては、上端 CF シートがほとんどの応力を負担している。中央下端応力に対しては、上面のみ補強した SR-2 試験体については、鉄筋が負担しているが、上下面補強した SR-3 の場合は CF シートが大部分を負担しており、補強により負担する応力の割合が、鉄筋から CF シートに移行しているのがわかる。

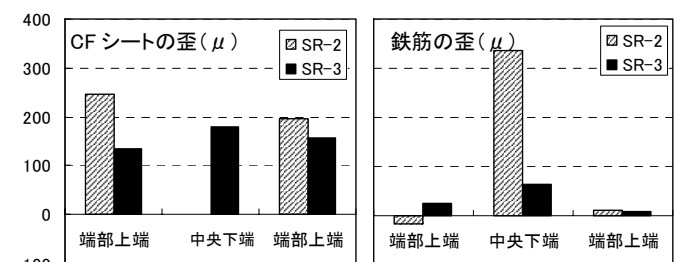


図-12 サポート撤去時の歪分布

3.3 長期载荷実験経過

図-13 に長期载荷による中央部のたわみの推移を示す。ここで、SR-2 と SR-3 は補強工事時に残留変形をほぼ零にしている。S-1 の鉛直変位はひび割れ導入加力実験からの累積である。横軸の目盛りは 1 ヶ月であり、クリープ試験の開始から約 6 ヶ月が経過したデータを示す。長期载荷開始直後から概ね 1 ヶ月の間でクリープ変形が進行し、6 ヶ月経過時点ではほとんどクリープ変位の進行は見られない。たわみは、無補強の S-1 が 14.5mm、上面補強の SR-2 が約 10mm、両面補強の SR-3 が約 6mm であり、補強量が多い程たわみが小さくなっていた。

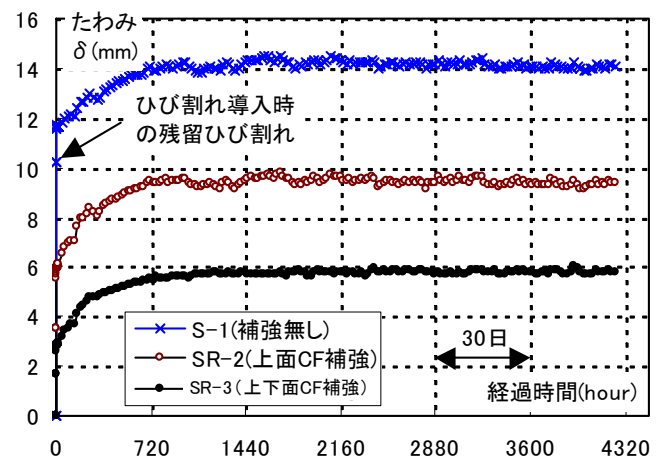


図-13 長期载荷による中央部変位の推移

4. 実験結果に対する解析的検討

4.1 解析モデル

図-14 に固有値解析に用いた線材置換モデルを示す。部材芯を床スラブ断面並びに梁断面中央に定義し、床スラブ部を 45 分割 (部材長 100mm) した。

床スラブ端部の部材においては梁フェース位置まで剛域 (250mm) を仮定し、梁下端を固定とした。材料特性は、コンクリートのみを考慮し、鉄筋による影響は無視した。コンクリート強度は 29.2N/mm² とし、ヤング係数は 25.0kN/mm² とした。また、試験体の比重は 24kN/m³ とした。シート補強による剛性の上昇は、低減スラブ厚で考慮しており、シートの剛性は無視している。

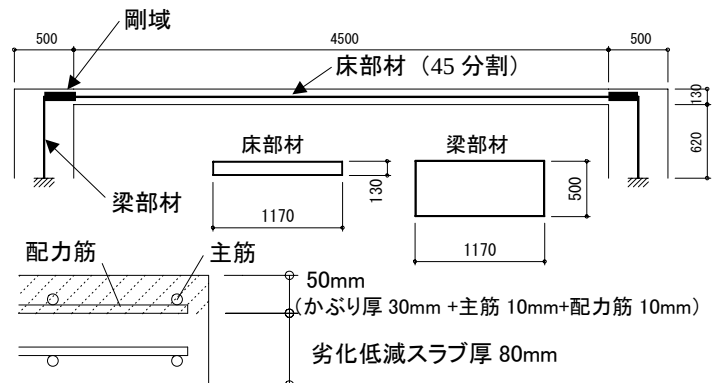


図-14 固有値解析モデル

ひび割れが生じた部分は、スラブ厚の低減により解析モデルに反映した。補強前の低減スラブ厚は、スラブ主筋が降伏歪みに達していることを考慮し、スラブ配力筋までひび割れが生じているものと仮定し、80mmとした。

補強後の低減スラブ厚に関しては、低減率とひび割れ影響範囲を変動因子としたパラメトリックスタディを行い、実験値と同等となる低減スラブ厚、ひび割れ影響範囲を決定する。但し、ひび割れ部分と健全部分の中立軸の相違による影響は無視した。

4.2 解析パラメータ

補強後の低減スラブ厚及び、ひび割れ影響範囲の変動因子を表-5に示す。低減スラブ厚は、健全時と上下面補強後の固有振動数の比率 ($19.8\text{Hz} / 21.6\text{Hz} = 0.92$) から10%低減を中央値とした5ケースとした。ひび割れ影響範囲は、スラブ端部上端は梁フェース近傍にのみひび割れが生じたことから、両端のそれぞれ1要素のみスラブ厚を低減し、スラブ中央部下端については、目視で確認できたひび割れ範囲は1m程度であることから、スラブ厚低減範囲を1m~2mの範囲で変動させることとした。

解析結果を図-15に示す。Case4-1：低減率 7.5%（スラブ厚 120.25mm）ひび割れ影響範囲 1 m及び Case5-2：低減率 5.0%（スラブ厚 123.50mm）ひび割れ影響範囲 2 mの場合が実験値に近い値を示した。

4.3 解析結果及び、実験値との比較

前節 4.2 のパラメトリックスタディの結果、実験値に近い値を示した Case4-1, Case5-2 について、無補強時と端部上端補強時の固有値解析を行う。解析結果を表-6に示す。各解析ケースともに、計算値は概ね実験値に近い値を示すが、補強の有無による実験値に対する計算値の比率の変動を比較すると、Case5-2 のケースの方が変動が小さく（1.007~1.012）、試験体により近いモデルと考えられる。尚、無補強時の実験値については、前章、表-4における補強時の値を用いた。

5. まとめ

本実験の結果より、以下に示す知見が得られた。

- 1) ひび割れにより剛性が低下したスラブを、ジャッキアップし、本工法によるCFシート補強を施すことで、スラブの剛性が向上した。スラブ上面だけの補強でも剛性がある程度回復したが、上下面にCFシートを貼ることで、更に剛性が回復した。
- 2) 本工法によるCFシート補強によって、スラブのたわみを改善することができた。クリープ性状に関しては、長期載荷開始から1ヶ月の間でクリープ変形が進行したが、それ以降の進展は殆ど見られなかった。
- 3) 本工法による劣化スラブの補強効果は、線材置換モデルによる固有値解析により概ね評価できる。

表-5 変動要因

解析ケース	低減スラブ厚 (mm)	低減率 (%)	ひび割れ影響範囲
Case1	110.50	15.0	1m~2m @200
Case2	113.75	12.5	
Case3	117.00	10.0	
Case4	120.25	7.50	
Case5	123.50	5.00	

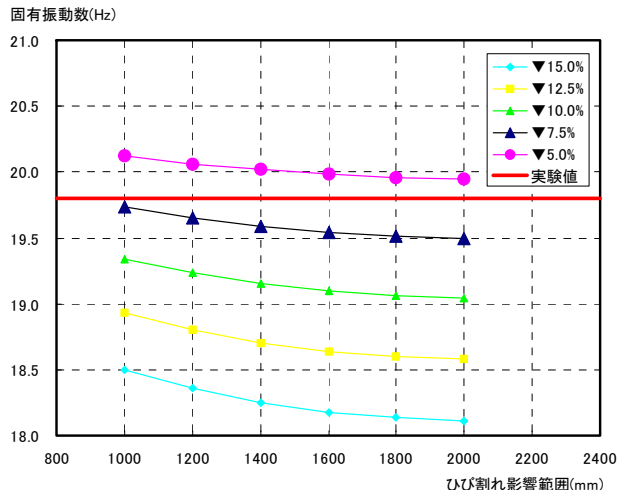


図-15 ひび割れ影響範囲と低減率

表-6 固有値解析結果と実験値の比較

解析ケース		固有振動数 (計算値)	固有振動数 (実験値)	計算／実験
Case4-1	無補強	13.76Hz	13.25Hz	1.038
	上面	16.37Hz	16.00Hz	1.023
	上下面	19.74Hz	19.80Hz	0.997
Case5-2	無補強	13.41Hz	13.25Hz	1.012
	上面	16.20Hz	16.00Hz	1.012
	上下面	19.95Hz	19.80Hz	1.007

参考文献

- [1] 中村洋行, 鈴木英之, 福山洋, 上田正生：連続繊維シートと鋼管により開孔補強された既存梁のせん断耐力評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.3, pp.1627-1632, 2007.7
- [2] 中村洋行ほか：定着金物を用いた連続繊維シートによるRC構造物補強工法の開発（その1~5）, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2, pp.473~482, 2007.8
- [3] 矢部喜堂ほか：壁付きRC柱の新しい耐震補強工法(CFアンカー)の開発（その1~8）, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2, pp.21~36, 1999.9
- [4] 新林実ほか：バリアフリー対応型ボイドスラブに関する実験研究（その8）, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2, pp.759~760, 2000.9
- [5] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法, 1999