

上面増厚および下面CFRP接着により補強したRC床版の曲げ強度に関する実験研究

大垣 賀津雄¹・星名 誉紀²・柴崎 晃³・原田 拓也⁴
長谷 俊彦⁵・赤江 信哉⁶・石田 学⁷

¹正会員 ものづくり大学教授 技能工芸学部建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)
E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

²学生会員 ものづくり大学 技能工芸学部建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)
E-mail: b01712137@iot.ac.jp

³正会員 高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)
E-mail: a.shibasaki.aa@ri-nexco.co.jp

⁴正会員 中日本高速道路 秦野工事事務所 (〒257-0017 神奈川県秦野市立野台 1-4)
E-mail: t.harada.ab@c-nexco.co.jp

⁵正会員 高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)
E-mail: t.nagatani.aa@ri-nexco.co.jp

⁶正会員 太平洋マテリアル株式会社 (〒285-0802 千葉県佐倉市大作2-4-2)
E-mail: shinya-akae@taiheiyo-m.co.jp

⁷正会員 太平洋マテリアル株式会社 (〒114-0014 東京都北区田端6-1-1)
E-mail: manabu-ishida@taiheiyo-m.co.jp

RC 床版は上面からの水や塩分の浸入の影響により、輪荷重走行の多い部位で経年劣化することが知られている。その対策として床版防水工の重要性が明らかになっているが、床版防水工の長期的な性能を確保するためには、基盤となる床版が健全である必要がある。そのため、床版表面の不陸調整材料の性能が重要と考え、表面に流動性のある高強度緻密モルタルを施工し、正曲げや負曲げの載荷実験を実施した。

その結果、2cm 程度の薄層でも上面増厚の代替補強になる可能性があることがわかった。本文は、高強度緻密モルタルや鋼繊維補強コンクリート等の各種補強用上面増厚層と、下面の CFRP シート補強をパラメータに加えて、静的曲げ載荷実験を実施した。その結果、等価応力ブロック法により補強後の終局曲げ強度を推定できることがわかった。

Key Words: *Bending Strength, RC Slab, Top Thickening, CFRP Bonding,*

1. はじめに

RC 床版は輪荷重走行の影響で経年劣化することが知られている。その大きな原因の一つに、上面からの水や塩分の浸入が考えられるが、その対策として床版防水工の重要性が明らかになっている。しかしながら、維持管理の現場においては、既に床版の劣化が顕在化している場合や、過去の舗装改良時に床版が切削機によって損傷している場合がある。床版防水（特に高性能床版防水）は、健全かつ表面が平滑な床版を想定して開発されてい

ることから、このような床版に床版防水を施工しても、接着不良によって供用後に舗装損傷などの不具合を引き起こすことが懸念される。

従って、床版防水工の長期的な性能を確保するためには、基盤となる床版が健全である必要があり、床版の断面修復等の補修材料や表面の不陸調整材料の性能が重要となる。しかも、実際の RC 床版補修工事では、床版の断面修復、不陸調整、防水工および舗装を含めた施工時間が限られる場合に、適用できる材料は少なく、現実的には課題が十分解決できていない。

このような状況の中で、床版表面の不陸調整材料として超緻密高強度繊維補強材料を用いれば、防水性能も期待できるとの報告がある¹⁴⁾。そこで、床版表面の不陸調整材料の性能が重要と考え、表面に流動性のある高強度緻密モルタルを施工し、正曲げや負曲げの静的載荷実験による基礎的な検討を実施している⁵⁶⁾。

その結果、2cm程度の薄層でも上面増厚の代替補強になる可能性があることがわかった。ここでは、さらなる強度向上の可能性や計算による評価方法を検討するため、上面増厚層に高強度緻密モルタル、超高強度緻密モルタル、鋼繊維補強コンクリートを適用し、下面には中弾性CFRPシートによる補強をパラメータに加えて、静的曲げ載荷実験を実施した⁷⁾。

本文は、これらの基礎的な実験内容を報告するものである。また、床版断面に作用する力のモーメントのつり合いにより、曲げひび割れ発生荷重、鉄筋降伏荷重、および等価応力ブロック法⁸⁾による終局荷重を計算し、実験結果と比較考察するものである。

2. 曲げ載荷実験

(1) 実験供試体

曲げ載荷実験を行う供試体は図-1に示すとおりである。厚さ220mmのRC床版供試体CASE-1を基準と考え、以下のような補強パラメータを設定した。厚さ200mmのRC床版供試体の表面に、厚さ20mmの高強度緻密モルタルによる上面増厚層を施工した供試体をCASE-2、同様に厚さ20mmの超高強度緻密モルタルを施工した供試体をCASE-3、厚さ50mmの鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRCと呼ぶ)を施工した供試体CASE-4からなる。

供試体AシリーズはCFRPによる下面補強を行っておらず、普通コンクリートを施工した供試体CASE-1Aと、上面増厚補強を行ったCASE-2A~4Aからなる。また、各供試体のBシリーズは下面の曲げ引張側にCFRPシートによる補強を施している。CFRPシートは中弾性タイプで、目付量 471g/m^2 、引張強度 $3,672\text{N/mm}^2$ 、弾性率 $4.1 \times 10^5\text{N/mm}^2$ のものを100mmおきに2層縞貼付けしている。したがって、実験供試体の種類は、表-1に示す計8体となる。同表中()内数値は、基盤となる普通コンクリート、および上面増厚材の圧縮強度試験値(材令28日)である。

(2) 載荷方法

載荷方法は図-2に示すとおり、2mの床版支間中央に500mm×200mmの接地面で正曲げ載荷を、荷重制御による単調増加により実施した。

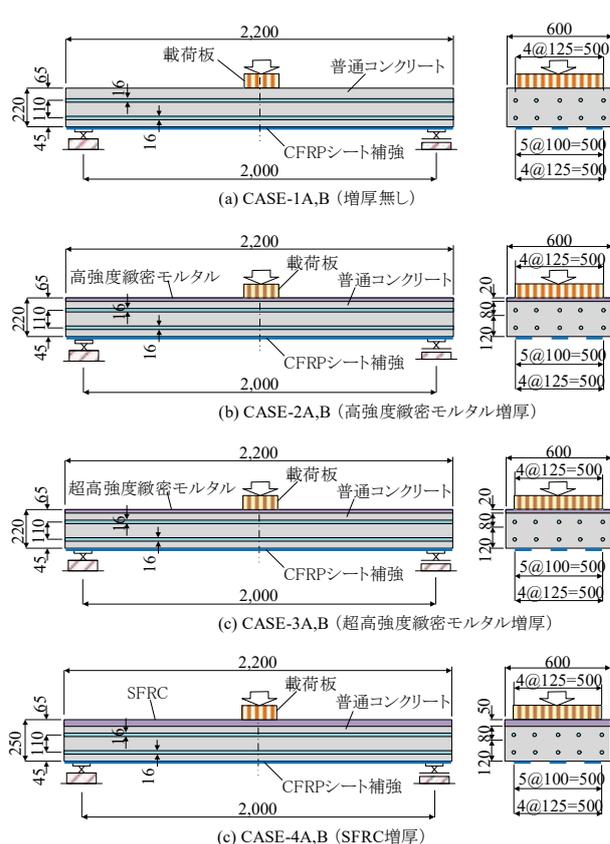


図-1 実験供試体

表-1 実験供試体の種類

供試体	上面増厚	下面CFRP補強
CASE-1A	なし、普通コンクリートのみ	なし
CASE-1B	(24 N/mm ²)	あり
CASE-2A	高強度緻密モルタル	なし
CASE-2B	(81 N/mm ²)	あり
CASE-3A	超高強度緻密モルタル	なし
CASE-3B	(137 N/mm ²)	あり
CASE-4A	鋼繊維補強コンクリート	なし
CASE-4B	SFRC (50 N/mm ²)	あり



図-2 曲げ載荷実験の状況

3. 実験結果

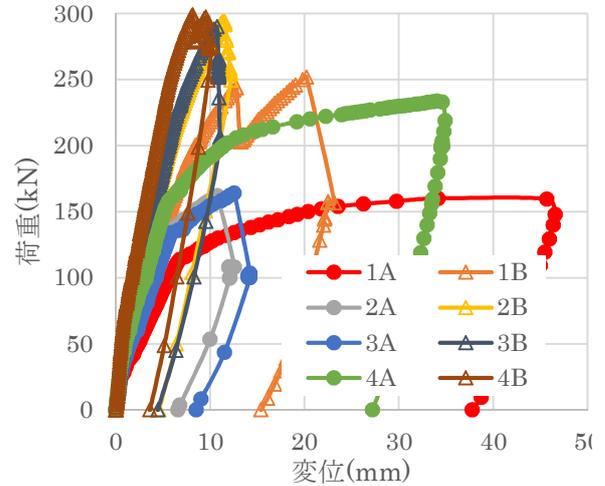
曲げ載荷実験による荷重強度の結果を表-2 にまとめて示す。同表中、ひび割れ発生荷重は 50mm 間隔で並べた 9 個の π 型変位計のいずれかの値が急激に増加した時の荷重である。また、ひび割れ発生後一定の剛性で鉛直変位が増加していくが、ある荷重で変位が急増する。この時を鉄筋降伏と定義してその荷重を記載した。さらに、B タイプは下面に CFRP シート貼付けているが、供試体のどこかで CFRP に破壊音が生じて、部分的に CFRP のはく離が発生した荷重も記載している。最後に載荷実験における最大荷重を示している。

同表から、高強度緻密モルタルや CFRP シートを用いれば、ひび割れ発生荷重や鉄筋降伏荷重が増加することがわかる。また、CFRP を施工した供試体 B の鉄筋降伏荷重は、CFRP を施工していない供試体 A に対して 1.5~1.7 倍の増加があり、鉄筋降伏を 1 つの終局状態と考えると、補強効果が大きいことがわかる。また、CFRP シートの剥がれた荷重で CASE-3B、CASE-4B は最大荷重を迎えており、CFRP シートに作用する水平せん断力に基盤コンクリート下表面の限界があり、CFRP シート補強効果を検討する上で重要である。

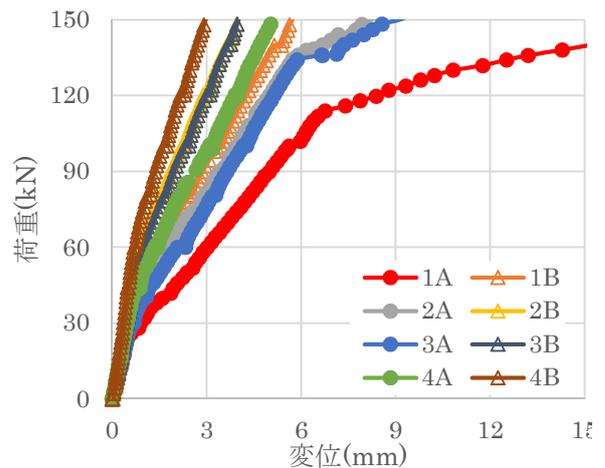
載荷点直下の荷重と鉛直変位の関係を図-3 に示す。供試体 A を比較すると、1A、2A、3A で最大荷重に大きな差が見られない。これは 1A 供試体では終局状態の鉛直変位が 40mm 以上であり、上面のコンクリートが圧壊するまで載荷している。一方、2A、3A 供試体における最大変位は 12~13mm 程度に留まっている。これは、図-4 に示すとおり、供試体の表面のモルタルが圧壊する前に、普通コンクリートとの接着面が水平せん断により剥がれている。このことが原因で、最大（終局）荷重の増加が不十分になったと考えられる。

しかしながら、鉄筋降伏荷重を 1 つの限界状態と考えると、高強度緻密モルタル等 2A、3A 供試体の補強効果は約 20% 程度向上していることが確認できる。

同図 b) に示した 150kN までの鉛直変位の関係から、ひび割れ発生後のグラフの傾き（剛性）を比較すると、1A、3A、2A、1B、4A、3B、2B、4B の順に大きくなっていることがわかる。これらについても、後述する計算で評価可能であるといえる。



a) 破壊までの挙動



b) 150kN までの挙動

図-3 荷重と鉛直変位の関係

表-2 曲げ載荷実験結果 (単位:kN)

供試体	ひび割れ	鉄筋降伏	CFRP 剥がれ	終局荷重	
RC	1A	26	116	-	160
	1B	44	190(1.64)	244	253(1.58)
高強度緻密モルタル	2A	40	140	-	163
	2B	56	216(1.54)	284	294(1.80)
超高強度緻密モルタル	3A	30	136	-	165
	3B	40	224(1.65)	290	290(1.76)
SFRC	4A	40	153	-	233
	4B	44	255(1.67)	299	299(1.28)

注) () 内数値は、供試体 A に対する供試体 B の比を示す。



図-4 上面増厚層の水平せん断による剥がれ状況

4. 各種強度の計算

(1) 材料諸元と寸法

基盤となる鉄筋コンクリート床版の材料諸元を表-3に、上面増厚材の材料諸元を表-4に示す。また、下面補強として貼付けた中弾性 CFRP シートの材料諸元を表-5に示す。

表-3,4 に示すコンクリートや上面増厚材のヤング係数は文献 8)を参考に与えたのもである。また、表-3 に示すコンクリートの曲げひび割れ強度 f_{ck} は下式(1)のとおりである⁸⁾。

$$f_{ck} = k_{ob} \cdot k_{lb} \cdot f_{ik} \quad (1)$$

$$\text{ここに, } k_{ob} = 1 + \frac{1}{0.85 + 4.5((h+h_m)/l_{ch})} \quad (2)$$

$$k_{lb} = \frac{0.55}{\sqrt[4]{h+h_m}} \quad ; \geq 0.4 \quad (3)$$

$$f_{ik} = 0.23 f_{ck}^{2/3} \quad (4)$$

$h+h_m$ (m): 床版全高であり、床版厚 $h = 200\text{mm}$ 、上面増厚高さ $h_m = 20\text{mm}$ の場合、 0.22m となる。

$$l_{ch} = G_F \cdot E_c / f_{ck}^2 \quad (\text{m}) \quad (5)$$

$$G_F = 10 (d_{max})^{1/3} \cdot f_{ck}^{1/3} \quad (6)$$

d_{max} : 粗骨材の最大寸法 (mm)

図-5 に今回使用した供試体の表面から中立軸までの距離を x とした場合について、ひずみ、断面に作用する分担力、および各種距離や寸法を示す。

(2) 初期ひび割れ発生荷重の計算

CFRP シートの有無にかかわらず、床版下縁のひずみが曲げひび割れ強度 f_{ck} に達した時にひび割れが発生すると考えられる。そのひずみは以下のとおりである。

$$\text{床版下縁(CFRPシート位置)ひずみ} \quad \varepsilon_{cl} = \varepsilon_{CF} = f_{ck} / E_c$$

上面から中立軸までの距離を x と仮定した場合の各種距離から、平面保持が成立つとした場合の各位置のひずみ、および分担力は以下のとおりである。

$$\text{床版上縁ひずみ} \quad \varepsilon_{cu} = -\varepsilon_{cl} \cdot x / (h+h_m-x)$$

$$\text{上面増厚下端境界ひずみ} \quad \varepsilon_{cb} = -\varepsilon_{cl} \cdot (x-h_m) / (h+h_m-x)$$

$$\text{圧縮鉄筋位置のひずみ} \quad \varepsilon_{cs} = -\varepsilon_{cl} \cdot (x-h_m-d'_u) / (h+h_m-x)$$

$$\text{引張鉄筋位置のひずみ} \quad \varepsilon_{ts} = \varepsilon_{cl} \cdot (h+h_m-x-d'_l) / (h+h_m-x)$$

$$\text{上面増厚材分担力} \quad P_{cm} = E_m \cdot 0.5 (\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{cb}) \cdot B \cdot h_m$$

$$\text{コンクリート(圧縮)分担力} \quad P_{cc} = E_c \cdot 0.5 \varepsilon_{cb} \cdot B \cdot (x-h_m)$$

$$\text{圧縮鉄筋分担力} \quad P_{cs} = E_s \cdot \varepsilon_{cs} \cdot A_{ds}$$

$$\text{コンクリート(引張)分担力} \quad P_{tc} = E_c \cdot 0.5 \varepsilon_{ts} \cdot B \cdot (h+h_m-x)$$

$$\text{引張鉄筋分担力} \quad P_{ts} = E_s \cdot \varepsilon_{ts} \cdot A_{dl}$$

$$\text{CFRPシート分担力} \quad P_{CF} = E_{CF} \cdot \varepsilon_{CF} \cdot A_{CF}$$

表-3 基盤鉄筋コンクリート床版の材料諸元

項目	記号	単位	適用値
供試体の幅	B	mm	600
鉄筋のヤング係数	E_s	N/mm ²	2.0×10^5
鉄筋の降伏点	f_{ys}	N/mm ²	362
圧縮鉄筋断面積×本数	A_{ds}	mm ²	198.6×5
引張鉄筋断面積×本数	A_{dl}	mm ²	198.6×5
圧縮鉄筋かぶり	d'_u	mm	45
引張鉄筋かぶり	d'_l	mm	45
コンクリートの設計基準強度	f_{ck}	N/mm ²	24
コンクリートのヤング係数	E_c	N/mm ²	2.5×10^4
コンクリート曲げひび割れ強度	f_{ctk}	N/mm ²	3.11
コンクリート強度低減係数	k_{lc}	—	0.85
コンクリートの圧縮強度	$k_{lc} f_{ck}$	N/mm ²	20.4
コンクリートの終局ひずみ	ε'_{cu}	μ	3500
等価応力ブロック係数	β	—	0.80
終局段階の有効高さ	$\beta x - h_m$	mm	47.2

表-4 上面増厚材の材料諸元

項目	記号	単位	CASE-3,4	CASE-5,6	CASE-7,8
圧縮試験強度	f_{cm}	N/mm ²	81	137	50
ヤング係数	E_m	N/mm ²	3.8×10^4	3.8×10^4	3.3×10^4
強度低減係数	k_{lm}	—	0.76	0.59	0.85
圧縮強度	$k_{lm} f_{cm}$	N/mm ²	61.3	80.7	42.5
終局ひずみ	ε'_{cu}	μ	2500	2500	3500
等価ブロック係数	β	—	0.72	0.72	0.80

表-5 中弾性 CFRP シートの材料諸元

項目	記号	単位	適用値
ヤング係数	E_{CF}	N/mm ²	4.1×10^5
断面積 (450g 目付×1 層分)	A_{CF}	mm ²	148
引張強度	f_{CF}	N/mm ²	3670
限界ひずみ	ε_{cCF}	μ	8950

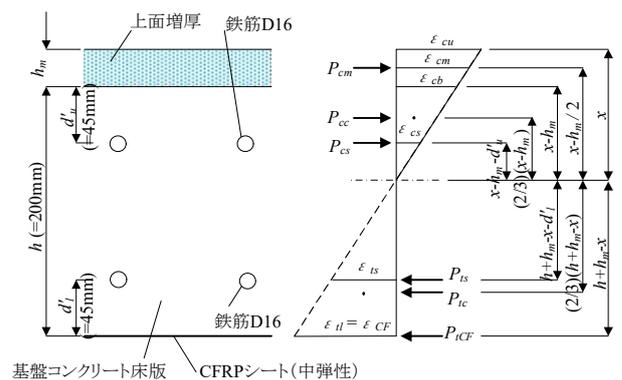


図-5 供試体断面の分担力

断面(圧縮側)の力のモーメント

$$M_{cr} = P_{cm}(x-h_m/2) + P_{cc}(2/3)(x-h_m) + P_{cs}(x-h_m-d'_u) \quad (7)$$

断面(引張側)の力のモーメント

$$M_{cr} = P_{tc}(2/3)(h+h_m-x) + P_{ts}(h+h_m-x-d'_l) + P_{CF}(h+h_m-x) \quad (8)$$

したがって、コンクリート床版下面のひび割れ発生時の各力のモーメントの合計 $M_{cr} + M_{kr} = 0$ から、中立軸 x を算出する。求められた中立軸 x から、ひび割れ発生時の曲げモーメント M_{cr} は下式(9)のとおりである。

$$M_{cr} = -M_{cr'} + M_{kr} = -2 \cdot M_{cr'} = 2 \cdot M_{kr} \quad (9)$$

また、ひび割れ発生荷重は、**図-6** に示すとおり、曲げモーメント M_{cr} と載荷荷重 P_{cr} の関係から、下式(10)で与えられる。

$$P_{cr} = 2 M_{cr} \quad (10)$$

(3) 鉄筋降伏荷重の計算

引張側の鉄筋の応力度が降伏点 f_{ys} に達した時のひずみは以下のとおりである。

$$\text{引張鉄筋位置のひずみ} \quad \varepsilon_s = f_{ys} / E_s$$

同様に上面から中立軸までの距離を x と仮定した場合の各位置のひずみ、および分担力は以下のとおりである。

床版下縁(CFRPシート位置)ひずみ

$$\varepsilon_{dl} = \varepsilon_{CF} = \varepsilon_s (h + h_m - x) / (h + h_m - x - d')$$

床版上縁ひずみ

$$\varepsilon_{cu} = -\varepsilon_s \cdot x / (h + h_m - x - d')$$

上面増厚下端境界ひずみ

$$\varepsilon_{cb} = -\varepsilon_s \cdot (x - h_m) / (h + h_m - x - d')$$

圧縮鉄筋位置のひずみ

$$\varepsilon_{cs} = -\varepsilon_s \cdot (x - h_m - d'_s) / (h + h_m - x - d')$$

引張鉄筋分担力

$$P_s = f_{ys} \cdot A_{dl}$$

CFRPシート分担力

$$P_{CF} = E_{CF} \cdot \varepsilon_{CF} \cdot A_{CF}$$

圧縮鉄筋分担力

$$P_{cs} = E_s \cdot \varepsilon_{cs} \cdot A_{ds}$$

引張側鉄筋が降伏点に達するような限界状態においては、圧縮側のコンクリートや上面増厚材の応力度もフックの法則が成り立たないので、応力ひずみの式(11)により圧縮応力度を算出して分担力を求めることとする⁸⁾。

$$\sigma'_{cc} = k_l f_{ck} \cdot \frac{\varepsilon'_{cc}}{0.002} \cdot \left(2 - \frac{\varepsilon'_{cc}}{0.002}\right) \quad (11)$$

ここに、強度低減係数 k_l は、下式(12)から求められる。

$$k_l = 1 - 0.003 f_{ck} \quad ; k_l \leq 0.85 \quad (12)$$

したがって、上面増厚材の平均応力度 σ'_{cm} は、式(11)に**表-4**の強度低減係数 k_{lm} と圧縮強度 f_{ckm} を代入する。また、 ε'_{cc} には床版上縁ひずみ ε_{cu} と上面増厚下端境界ひずみ ε_{cb} の平均値を代入すればよい。この際、圧縮限界ひずみ ε'_{cu} は下式(13)で与えられ、その値以下にあることを確認する。

$$\varepsilon'_{cu} = \frac{155 - f'_{ck}}{30000} \quad ; -0.0035 \leq \varepsilon'_{cu} \leq -0.0025 \quad (13)$$

これにより、上面増厚材分担力 P_{cm} は下式(14)で与えられる。

$$P_{cm} = \sigma'_{cm} \cdot B \cdot h_m \quad (14)$$

同様に、基盤コンクリート上縁の応力度 σ'_{cc} は、式(11)に**表-3**の k_{lc} と f_{ck} を入れ、 ε'_{cc} には上面増厚下端境界ひずみ ε_{cb} を代入すればよい。

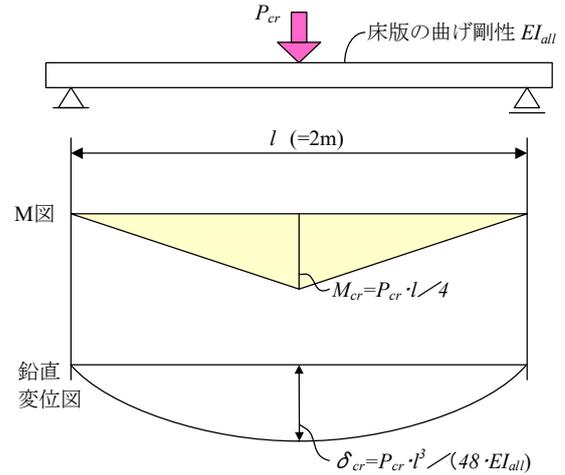


図-6 供試体の曲げモーメントと鉛直変位

よって、コンクリート(圧縮)分担力 P_{cc} は下式で与えられる。

$$P_{cc} = 0.5 \sigma'_{cc} \cdot B \cdot (x - h_m) \quad (15)$$

コンクリート(引張)分担力 P_{cc} は、中立軸までひび割れが発生した段階と考慮して0となり、式(8)の第1項無視して力のモーメントを計算し、 $M_{cr} + M_{kr} = 0$ から中立軸 x を算出する。したがって、引張側の鉄筋の応力度が降伏点に達した時の曲げモーメント M_{cr} は式(9)から、鉄筋降伏荷重は式(10)から同様に求められる。

(4) 曲げ剛性の計算

図-6 に示すとおり、載荷実験における供試体中央の鉛直変位 δ_{cr} の計算には、ヤング係数や断面2次モーメントを評価する必要がある。ここでは、**図-3b)**に示したとおり、ひび割れ発生後で引張鉄筋降伏までの鉛直変位は一定の傾き(曲げ剛性)を持っているので、この状態を前提に計算式を検討した。すなわち、(11)式から求まる上面増厚材や基盤コンクリートの応力度から、割線ヤング係数を逆算する。

$$E_{cm} = \sigma'_{cm} / \varepsilon_{cm} \quad (16)$$

$$E_{cc} = \sigma'_{cc} / \varepsilon_{cb} \quad (17)$$

また、各部位が分担する断面2次モーメントを下式から算出する。

$$I_{cm} = B \cdot h_m \cdot (x - h_m / 2)^2 \quad (18)$$

$$I_{cc} = 0.25 \cdot B \cdot (x - h_m)^3 \quad (19)$$

$$I_s = A_{dl} \cdot (h + h_m - x - d'_i)^2 \quad (20)$$

$$I_{CF} = A_{CF} \cdot (h + h_m - x)^2 \quad (21)$$

したがって、補強されたRC床版全体の等価曲げ剛性 $E \cdot I_{all}$ 、および供試体の鉛直変位剛性 α_{cal} は下式で与えられる。

$$EI_{all} = E_{cm} \cdot I_{cm} + E_{cc} \cdot I_{cc} + E_s \cdot I_s + E_{CF} \cdot I_{CF} \quad (22)$$

$$\alpha_{cal} = 48 EI_{all} / P^3 \quad (23)$$

(5) 等価応力ブロック法による終局荷重の計算

図-7 に等価応力ブロック法による終局段階のひずみ、断面に作用する分担力、および各種距離や寸法を示す。

等価応力ブロック係数 β は、式(13)による圧縮限界ひずみ ε'_{cu} から下式(24)により求められる。

$$\beta = 0.52 + 80 \varepsilon'_{cu} \quad (24)$$

等価応力ブロックを適用する高さは、床版上面から中立軸までの距離 x を用いて、 βx で与えられる。この間に上面増厚材と基盤コンクリートの分担する応力ブロックがあり、上面増厚材分担力 P_{ucm} は下式(25)で、基盤コンクリートの分担力 P_{ucc} は下式(26)で与えられる。

$$P_{ucm} = k_{lm} \cdot f'_{ckm} \cdot B \cdot h_m \quad (25)$$

$$P_{ucc} = k_l \cdot f'_{ck} \cdot B \cdot (\beta x - h_m) \quad (26)$$

引張鉄筋分担力 $P_{us} = f_{ys} \cdot A_d$

床版下縁(CFRPシート位置)ひずみ

$$\varepsilon_{ul} = \varepsilon_{uCF} = -\varepsilon'_{cu} (h + h_m - x) / x$$

CFRPシート分担力 $P_{uCF} = E_{CF} \cdot \varepsilon_{uCF} \cdot A_{CF}$

以上から、等価応力ブロック法による終局モーメント M_{ucal} は下式(27)で与えられる。また、その時の荷重 P_{ucal} は式(28)から同様に求められる。

$$M_{ucal} = P_{ucm} (x - h_m / 2) + P_{ucc} (x - h_m - 0.5 (\beta x - h_m)) + P_{us} (h + h_m - x - d') + P_{uCF} (h + h_m - x) \quad (27)$$

$$P_{ucal} = 2 M_{ucal} \quad (28)$$

5. 実験値と計算値の比較

(1) 初期ひび割れ発生荷重

ひび割れ発生荷重について、実験から得られた値と上述の計算から得られた値を表-6 に比較した。両者は多少のばらつきがあり、特にBシリーズの実験値が計算値より大きくなっている。これは下面に CFRP 層があるため、供試体の下面の乾燥収縮が抑えられ、それに起因する引張応力度が減少したことが一因であると考えられる。

(2) 鉄筋降伏荷重

鉄筋降伏荷重について、実験における変位の急増点から推定した値と上述の計算から得られた値を表-6 に比較した。両者の比は 0.85~0.97 であり、実験値が計算値よりやや小さいものの比較的良好一致しているといえる。実験値の方が小さくなる理由としては、ひび割れ位置におけるその幅の広がりにより、局所的に鉄筋降伏が計算より早く生じることが想定される。

(3) 曲げ剛性の計算

図-3b)に示すとおり、ひび割れ発生後で引張鉄筋降伏までの鉛直変位は一定の傾き(曲げ剛性)を持っており、この傾きから載荷実験における供試体中央の鉛直変位剛性 α_{exp} を評価し、上述の計算値 α_{cal} とを表-6 に比較した。

同表から、実験値と計算値の比は 0.85~1.10 に分布しており、比較的良好一致していることがわかる。このことから、上面増厚材や CFRP シートは強度増加のみならず、たわみを減少させる効果が明らかであり、上述のような計算でほぼ評価できることがわかった。

(4) 終局荷重

載荷実験における最大荷重と上述の等価応力ブロック法による計算値を表-6 に比較した。同表から、実験値

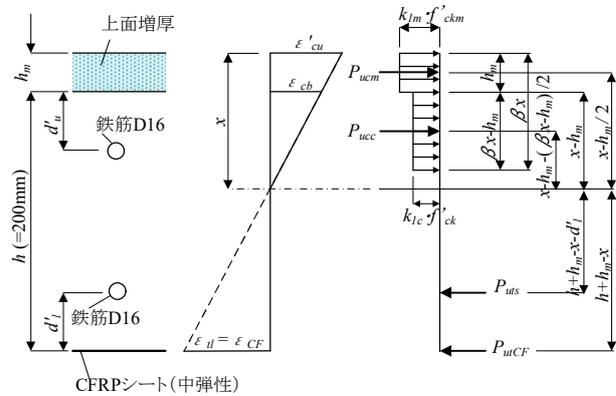


図-7 等価応力ブロック法による終局段階の分担力

表-6 実験と計算の比較結果

供試体	ひび割れ荷重 kN			鉄筋降伏荷重 kN			鉛直変位剛性 kN/mm ²			終局荷重 kN			
	実験 P_{exp}	計算 P_{cal}	P_{exp}/P_{cal}	実験 P_{exp}	計算 P_{cal}	P_{exp}/P_{cal}	実験 α_{exp}	計算 α_{cal}	$\alpha_{exp}/\alpha_{cal}$	実験 P_{exp}	計算 P_{cal}	P_{exp}/P_{cal}	
RC	1A	26	33	0.78	116	131	0.89	14.9	15.7	0.95	160	148	1.08
	1B	44	35	1.24	190	198	0.96	22.2	20.2	1.10	253	233	1.09
高強度緻密 モルタル	2A	40	36	1.13	140	153	0.91	17.7	20.9	0.85	163	187	0.87
	2B	56	38	1.48	216	229	0.94	28.7	28.0	1.02	294	284	1.04
超高強度緻密 モルタル	3A	30	36	0.84	136	160	0.85	19.5	22.6	0.86	165	203	0.81
	3B	40	38	1.06	224	238	0.94	29.6	30.6	0.97	290	315	0.92
SFRC	4A	40	45	0.88	153	181	0.85	24.1	28.4	0.85	233	236	0.99
	4B	44	48	0.92	255	264	0.97	39.2	38.1	1.03	299	385	0.78

と計算値の比は 0.78~1.08 に分布しており、比較的良好に一致している。

3章の実験結果において解説したとおり、2A, 3A 供試体は表面のモルタルが圧壊する前に、普通コンクリートとの接着面が水平せん断により剥がれており（図-4参照）、このことが原因で、最大（終局）荷重の増加が不十分になったため、計算値の方が13~19%大きくなっていると考えられる。

また、表-2に部分的にCFRPのはく離が発生した荷重を記載しているが、3B, 4B供試体はCFRPシートが載荷点直下付近で剥がれており、それと同時に耐力が低下している。一方計算ではCFRPの剥がれ限界で計算しているのではないため、CASE-4Bの計算終局荷重は22%大きい値になっている。

このCFRPシートのはく離は、支間中央付近の曲げひび割れ幅が広がり、その周辺から生じたコンクリート部材の水平せん断破壊であった。この破壊はCFRPシートの破断前に生じたコンクリート側の破壊であり、CFRPシート補強の終局強度評価に影響を与えることが分かった。CFRPシートのはく離抑制には、高伸度弾性パテ材が有効であるとの報告があり⁹⁾¹⁰⁾、今後、検討を加える必要性がある。

6. まとめ

本研究の成果は以下のとおりである。

- (1) ひび割れ発生荷重、鉄筋降伏荷重、鉄筋降伏後の鉛直変位剛性、および終局荷重の評価方法を示し、概ねよく一致することがわかった。
- (2) 2cm程度の薄層の高強度緻密モルタルを上面増厚として施工すると、鉄筋降伏荷重が20%程度上昇することがわかった。
- (3) 中弾性CFRPシートを100mm間隔で2層縞貼付けによる下面補強を施工したタイプBの鉄筋降伏荷重は、50%以上上昇した。
- (4) タイプBの最大荷重は、高強度緻密モルタルとSFRCで大差がなく、CFRPシートのはく離等の影響により、等価応力ブロックによる計算値の方が22%大きくなった。
- (5) 高強度緻密モルタル等の付着強度が低く、圧壊する前に水平せん断によるずれが生じており、等価応力ブロックによる計算値が13~19%大きくなった。

今後の課題は、以下のとおりである。

- ① 主桁直上の負曲げ載荷位置にも性能を発揮できる高強度高靱性緻密モルタルをエポキシ樹脂接着層を設けて施工した場合の性能確認。
- ② CFRPシート貼付けに剥がれ防止を目的とした高伸度弾性パテを用いた場合の性能確認⁹⁾¹⁰⁾。
- ③ 施工試験や試験施工による施工性や品質の確認
- ④ 移動輪荷重走行試験による耐久性の確認¹¹⁾

謝辞：本研究に際して、日鉄ケミカル&マテリアルの関係各位にCFRPシート施工でお世話になりました。心より感謝致します。

参考文献

- 1) 三田村浩, 今井隆, 松井繁之: 道路橋床版補修に適する超緻密高強度繊維補強材料の開発, 土木学会年次学術講演会, Vol.70, CS10-030, 2015.9
- 2) 松井繁之編著: 道路橋床版の長寿命化技術, 森北出版, 2016.9
- 3) 岩本康平, 松田浩, 森田千尋, 上坂康雄, 岡村哲夫: RC床版補修・補強材料としての超緻密高強度繊維補強コンクリートの材料物性に関する研究, 土木学会年次学術講演会, Vol.71, V-112, 2016.9
- 4) 植田健介, 三田村浩, 真鍋英規, 馬場弘毅: 松島橋床版補修工事における超緻密高強度繊維補強コンクリートの適用事例報告, 土木学会第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 2018.11
- 5) 大垣賀津雄, 鈴木仁士, 中島裕, 大久保藤和, 石田学, 広瀬剛, 豊田雄介: RC床版表面における高強度緻密モルタルの適用に関する基礎実験研究, 土木学会第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 2018.11
- 6) 関, 大垣, 中島, 赤江, 石田, 原田, 豊田: 高強度高靱性緻密モルタルの床版上面不陸調整層への適用性能に関する実験研究, 土木学会年次学術講演会, Vol.74, I-356, 2019.9
- 7) 柴崎晃, 原田拓也, 長谷俊彦, 大垣賀津雄, 星名誉紀, 赤江信哉, 石田学: 各種上面打替とCFRPによるRC床版の曲げ補強に関する実験研究, 土木学会年次学術講演会, Vol.75, V-346, 2020.9
- 8) 土木学会コンクリート委員会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2018.3
- 9) 永井幸太, 阿部忠, 小森篤也, 小林朗: 中・高弾性型CFS接着補強におけるポリウレタ樹脂を用いたRC床版の耐疲労性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, 2017
- 10) 新井崇裕, 山野辺慎一, 荒添正棋, 佐藤靖彦: ポリウレタ樹脂層を有する炭素繊維シート補強工法の高湿時における付着特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, 2014
- 11) 阿部忠, 水口和彦, 元燦豪, 川井豊: 疲労損傷を受けたRC床版の一次・二次補強法における耐疲労性の評価, 土木学会構造工学論文集, Vol.59A, 2013.3

(Received August 28, 2020)

EXPERIMENTAL STUDY ON BENDING STRENGTH OF RC SLAB REINFORCED BY TOP THICKENING AND BOTTOM CFRP BONDING

Kazuo OHGAKI, Yoshiki HOSHINA, Akira SHIBAZAKI, Takuya HARADA,
Toshihiko NAGATANI, Shinya AKAE and Manabu ISHIDA

It is known that RC floor slabs are deteriorated in the area where wheel load travels frequently due to the influence of water and salt infiltration from the top surface. Floor slab waterproofing is important as a countermeasure. In order to secure the long-term performance of floor slab waterproofing, the floor slab as the base must be sound. Therefore, we consider that the performance of the surface adjustment material on the floor slab is important, and we have conducted high-density dense mortar with fluidity on the surface and conducted bending loading experiments.

As a result, it was found that high strength dense mortar could be used as a substitute reinforcement for thickening the top surface by applying a thin layer of 20 mm. Therefore, various reinforcements such as high-strength dense mortar and steel fiber reinforced concrete are applied from the top. Also, CFRP sheet reinforcement is applied from the bottom surface. The static bending load test of these specimens was performed. Furthermore, the strength calculation method after reinforcement is proposed by the equivalent stress block method.