

論文

RC 床版下面への新しい炭素繊維シート補強工法の開発

須田郁慧*, 石原陽介**, 田中伸幸***, 小森篤也****, 佐藤勝太*****, 佐野匠*****

* 首都高速道路(株),技術部,(〒100-8930 東京都千代田区霞が関 1-4-1)

** 首都高速道路(株),更新・建設局,(〒103-0023 東京都中央区日本橋本町 2-2-2)

*** パシフィックコンサルタンツ(株),大阪交通基盤事業部,(〒530-0004 大阪府大阪市北区堂島浜 1-2-1)

**** 工博,日鉄ケミカル&マテリアル(株),コンポジット事業部,(〒103-0027 東京都中央区日本橋 1-13-1)

***** 日鉄ケミカル&マテリアル(株),コンポジット事業部,(〒103-0027 東京都中央区日本橋 1-13-1)

***** 住友大阪セメント(株),セメント・コンクリート研究所,(〒274-8601 千葉県船橋市豊富町 585)

首都高速道路における床版補強は、下面への炭素繊維格子接着工法を標準としているが、炭素繊維定着に使用する材料は危険物や可燃物に該当するため、足場内作業における安全性を確保すべく、非危険物による床版炭素繊維補強工法を開発した。補強効果の確認のため、種々の材料試験、実物大梁曲げ試験および輪荷重走行試験（施工性確認試験含む）を実施し、従来工法と同量の炭素繊維目付量で十分な耐荷力と疲労耐久性が確保可能なことを確認した。

キーワード：床版補強，炭素繊維シート，非危険物，補強効果

1. はじめに

首都高速道路では、吊り足場内の塗装塗替え工事中に二度の火災が発生し、二度目の火災では2名の作業員が犠牲となった。このような火災を再び引き起こさないよう、密閉した足場空間で使用する材料を非危険物や不燃物に移行する取り組みを進めている。これまで RC 床版下面のひび割れ損傷が顕在化した区間において、疲労耐久性の向上を目的として炭素繊維格子接着工法による補強を標準的に実施してきた。従来使用しているプライマーおよび含浸接着剤は消防法上の危険物に該当し、不陸修正材は指定可燃物に該当することから、非危険物だけを用いた RC 床版の炭素繊維補強を実現させるため、材料の組合せを再検討し、新たな炭素繊維補強工法を開発した。補強材の設置形状は従来工法と同様に全面接着ではなく、炭素繊維シートを主鉄筋および配力鉄筋方向に間隔を空けて格子状に配置することで既設床版の維持管理性に配慮可能な格子接着を前提としている。

本稿では、非危険物を使用した炭素繊維補強工法の開発とその補強効果の確認として実施した材料試験、実物大梁曲げ試験および輪荷重走行試験の結果を報告する。

2. 開発した炭素繊維シート補強の基本的性質

2.1 使用材料と補強層の構成

RC 床版下面の補強層を構成する材料のうち、従来は、

液状のエポキシ樹脂接着剤が危険物第四類第三石油類、不陸修正材として用いるパテ状のエポキシ樹脂接着剤が指定可燃物であった。これに対して、表-1 に示すように新たに開発した補強層は、プライマー、接着層、補強材の全ての材料を非危険物の材料とした。図-1 に示す補強層の構成断面は、従来の接着剤である液状のエポキシ樹脂接着剤に代わり、高靱性ポリマーセメントモルタル（以下、高靱性 PCM）を接着層として使用し、この中に、硅砂を付着させて表面処理した炭素繊維ストランドシート（以下、表面処理 CFSS）を埋設させる構成とした。接着層の高靱性 PCM は不陸修正を兼ねるため、従来の不陸修正材が不要なこと、また、エポキシ樹脂の紫外線劣化防止を目的として施していた仕上げ塗装が不要とな

表-1 開発した使用材料

補強層	種類
プライマー	水性エポキシ樹脂
接着層	高靱性ポリマーセメントモルタル
補強材	表面処理した炭素繊維ストランドシート

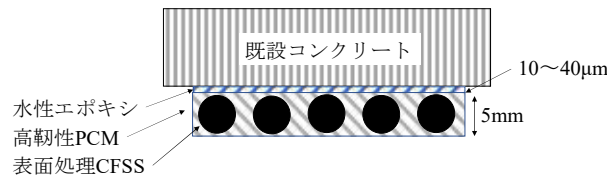


図-1 補強層の構成

る。また、従来のエポキシ樹脂プライマーは、最短でも翌日まで硬化養生が必要であったが、水性エポキシ樹脂プライマーは速乾性であり同日内に次工程に移ることができ、施工期間が短縮される。

2.2 基本的性質の評価

開発した新たな補強層の既設床版コンクリート面への付着性能を従来工法と同程度とすることを目標とし、基本的性質を把握するための要素試験を行った。要素試験は、土木学会が定める JSCE-E 543-2013²⁾「連続繊維シートとコンクリートとの付着試験方法(案)」に準拠し、コンクリートブロック供試体を作製した後、表面処理 CFSS を接着させ、付着強度や界面剥離破壊エネルギーなどの付着性能を評価・比較検討を行うものとした。表-2 に試験の水準、図-2 に供試体の概略図を示す。供試体は 1 水準に対して 3 体実施し、このうち供試体 No.2 の 3 体中 1 体にひずみゲージを離型フィルムから 30mm ピッチで貼付した。これにより、供試体中央に予め設けた亀裂(予亀裂)からの距離と CFSS のひずみの関係が明らかになるデータも取得した。

補強材および接着剤の材料特性を表-3 および表-4 に、使用したコンクリートの配合および材料諸元を表-5 に示す。供試体のコンクリート強度と静弾性係数は材齢 28 日において、それぞれ 42.8N/mm²、26.4kN/mm²であった。なお、比較対象となる付着特性は、炭素繊維による補強量と試験が同一である岸田らの研究¹⁾の結果を用いた。結果の一覧を表-6 に示す。試験結果における付着特性評価として、界面剥離破壊エネルギーについて式(1)により算出した。結果、界面剥離破壊エネルギー G_f は、限界状態の値²⁾とされる 0.50N/mm を上回り、また、研究評価された中村らの研究³⁾で PCM と打ち継ぎ用エポキシ樹脂接着剤を用いた場合の 0.70N/mm も上回った。このことから、コンクリートと補強層の付着性能は 2 種類の既往の研究との比較より、同等以上と評価されることが確認された。

$$G_f = \frac{P_{max}^2}{8b^2E_f t} \quad (1)$$

ここに、 P_{max} ：最大荷重(N)、 b ：シートの幅(mm)、 E_f ：弾性係数(N/mm²)、 t ：繊維シート的设计厚さ(mm)である。

また、付着強度は繊維シートの有効付着長を求める設計用付着強度⁴⁾とされる 0.44N/mm²を上回っている。

以上の基本的性質を踏まえ、従来工法と同程度の付着性能が期待できると考え、これを確認するため実物大の供試体で実験を行うこととした。

3. 実物大供試体を用いた载荷試験

実物床版断面と同じ形状の梁状供試体の静的载荷試

表-2 試験の水準(供試体の種類)

No	補強材		プライマー			不陸修正	接着剤	
	種類	表面処理	種類	塗布量	施工間隔		種類	塗布量
1	CFシート	-	エポキシ樹脂	0.20 kg/m ²	24hr.	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	1.0kg/m ²
2	CFSS	有	水性エポキシ	0.15 kg/m ²	0.5hr.	-	PCM改良品	施工厚 5mm

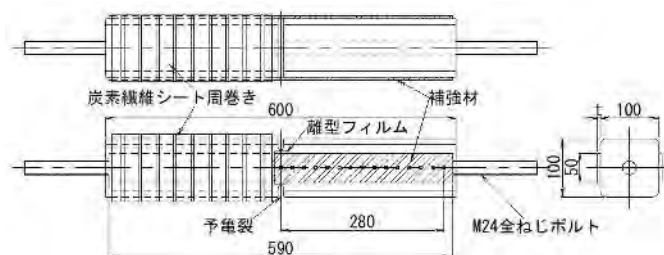


図-2 付着強度試験供試体の概略図

表-3 補強材の材料特性

規格	種類	繊維目付量(g/m ²)	設計厚さ(mm)	弾性係数(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	素線間距離(mm)
中弾性型炭素繊維	CFシート	450	0.247	3.9×10 ⁵	2900	-
	CFSS		0.297			5.0

表-4 接着剤の材料特性

種類	引張強度(N/mm ²)	曲げ強度(N/mm ²)	引張せん断強度(N/mm ²)	圧縮強度(N/mm ²)	圧縮弾性率(kN/mm ²)
エポキシ樹脂	35.8	58.8	25.8	78.3	4.0
高靱性PCM	3.6	9.8	-	52.9	20.7

表-5 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位水量(kg/m ³)					混和剤(C×%)	
		W	C	S	G1	G2	AD	AE
50.0	44.8	163	326	797	424	586	0.25	0.003

W：上水道水、C：普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)

S：掛川市産山砂(表乾密度 2.58g/cm³)、G1：富谷産砕石(203(表乾密度 2.66g/cm³))、G2：富谷産 1305(表乾密度 2.65g/cm³)、AD：AE 減水剤、AE：空気連行剤

表-6 補強材および接着剤の材料特性

供試体		界面剥離破壊エネルギー G_f (N/mm)	付着強度 τ_u (N/mm ²)
開発工法		1.51	1.75
従来工法	普 27-MM-湿潤	1.27	1.83
	普 35-MM-湿潤	0.92	1.55
	普 40-MM-湿潤	0.95	1.58
	普 35-MM-気中	1.15	1.74

験によるせん断耐力およびひび割れ性状、超らによる研究⁹⁾のせん断耐力式との比較などを行い、輪荷重走行試験を実施することで疲労耐久性を評価した。

3.1 梁状供試体の静的载荷試験

梁状供試体の静的载荷試験を実施することで、従来工法と開発工法で最大耐力や破壊形態に差異が生じるかの比較を行った。

図-3 に補強前の梁状供試体の概要を示す。梁高および支間は、後述する輪荷重走行試験の床版厚および床版支間に合せた。梁幅は、普通 RC 床版の輪荷重走行試験の使用限界付近で生じる梁状化の幅と同程度となるように設定した。また、载荷板の大きさは輪荷重走行試験で使用している板と同じ 500mm×200mm の载荷板を用いた。コンクリートの配合を表-7、コンクリートの材料試験結果を表-8 に示す。また、図-4 に供試体の寸法およびシート接着方法を示す。供試体 No.1 は、従来の炭素繊維シートで、継手を設けず 1 枚で接着させた。開発工法を適用する No.2 および No.3 は、表面処理 CFSS のハンチ部への確実な接着を考慮して、ハンチ部からの押え処理を追加し、複数枚で接着している点異なる。また、No.3 は、最大曲げモーメントが発生する床版支間中央部にシートの継手がある場合を想定した供試体である。

実際の現場状況に合わせるため供試体にある程度の損傷を与えた後に補強を行うこととし、たわみ劣化度 $D_\delta = 0.7$ 程度になるまで予備载荷（载荷荷重 50kN）を行った。ここで、劣化の算出方法について、式(2)に示す。

$$D_\delta = \frac{\delta - \delta_o}{\delta_c - \delta_o} \quad (2)$$

ここに、 D_δ ：たわみによる劣化度、 δ ：载荷荷重により発生するたわみ、 δ_c ：引張側コンクリート無視の場合の理論たわみ、 δ_o ：全断面有効の場合の理論たわみである。

その後、各供試体の補強を行い、供試体に破壊が生じるまで载荷を行った。試験結果を図-5 に、最大荷重の比較を表-9 に示す。グラフは、予備载荷時の変位と足し合わせて結果を表示している。No.1 の最大荷重と比較して、No.2、No.3 は約 1.15 倍～1.2 倍となった。

従来工法である No.1 は、最大荷重 130kN 到達・除荷後、再度 127kN まで载荷した時点で供試体左側に斜め方向のひび割れが発生した。以降は変位の増加とともに荷重が徐々に低下し、変位が 12mm を超過した時点で試験を終了した。開発工法による補強の 2 ケースのうち、No.2 は 150kN 到達直後、No.3 は 157kN で斜めひび割れの発生とともに荷重が大きく低下し、試験を終了した。

図-6 に No.3 のひび割れ図を示す。せん断補強筋のない梁の载荷試験で見られる斜めせん断ひび割れを伴った

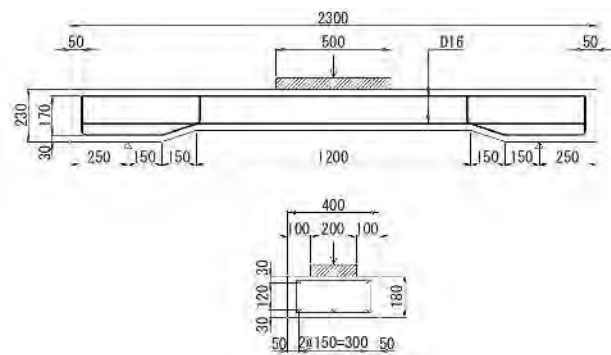


図-3 梁状供試体

表-7 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位水量(kg/m³)						混和剤 (C×%)
		W	C	S1	S2	G1	G2	
54.9	46.9	162	295	599	263	550	450	1.00

W：上水道水、C：普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）

S1：愛知川産川砂（表乾密度 2.61g/cm³）、S2：多賀産砕砂（表乾密度 2.67g/cm³）G1：多賀産碎石（2013（表乾密度 2.69g/cm³）、G2：多賀産 1305（表乾密度 2.69g/cm³）、AD：AE 減水剤

表-8 コンクリートの材料試験結果

	材齢(日)	圧縮強度 (N/mm²)	静弾性係数 (kN/mm²)	割裂引張強度 (N/mm²)	せん断強度 (N/mm²)
予備载荷	28	38.5	32.8	3.19	6.8
本载荷	720	40.8	32.9	3.36	7.1

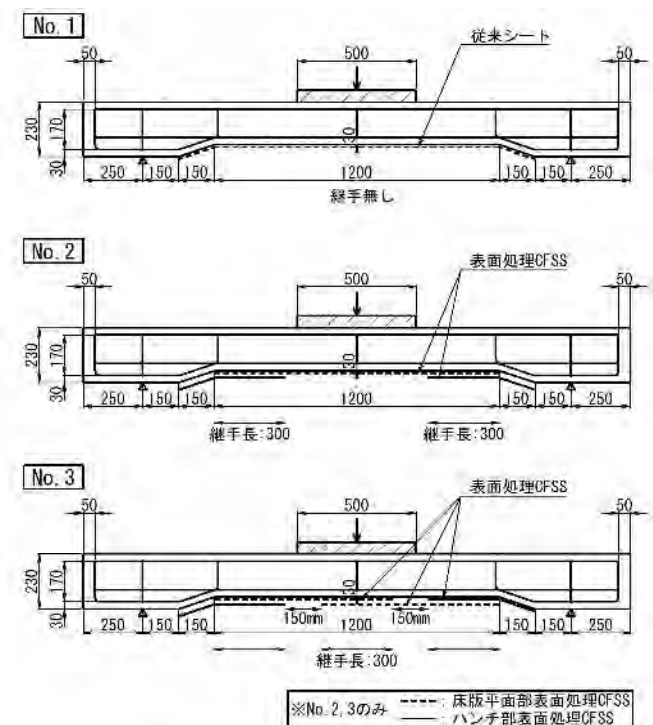


図-4 梁状供試体の補強条件

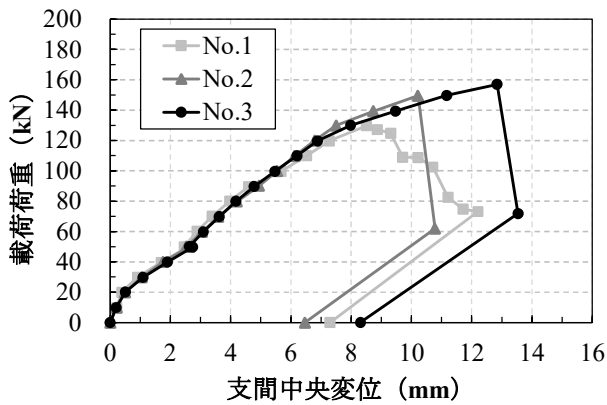


図-5 各供試体の荷重－変位関係

表-9 静的荷重試験の最大荷重の比較

No	工法	継手位置	最大荷重 (kN)	No.1 を基準とした最大荷重比
1	従来工法	無し	129.8	1.00
2	開発工法	ハンチ部	149.5	1.15
3		ハンチ部＋ 荷重点直下	157.1	1.20

破壊であったが、終局時に補強材の剥離などの現象は一切生じなかった。

ここで、従来工法と開発工法における最大せん断耐力の違いを考察するため、趙・丸山により提案されたせん断耐力式⁹⁾ (以下、趙・丸山式とする) を用いて、No.3 のせん断耐力について、砂付き CFSS の剛性が 1 層分である場合と 2 層分である場合の 2 通りを計算し、実測値と比較した。

$$V_c = 0.07p_t' \frac{1}{3} f_c' \frac{4}{9} \left(\frac{d}{1000} \right)^{-\frac{1}{4}} \left[0.34 + \frac{3}{\left(\frac{a}{d} \right)} \right] b_w d \quad (3a)$$

$$p_t' = 100 \frac{A_t}{(b_w d)} \cdot \left(\frac{E_t}{E_c} \right) \quad (3b)$$

ここに、 V_c : コンクリートにより受け持たれるせん断耐力 (kN), p_t' : 軸方向引張補強筋の鉄筋比 (砂付き CFSS 考慮), f_c' : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²), d : 有効高さ (mm), b_w : 腹部の幅 (mm), a/d : せん断スパン比, A_t : 軸方向引張補強筋の断面積 (mm²), E_t : 軸方向引張補強筋の弾性係数, E_c : コンクリートの弾性係数である。なお、計算には高靱性 PCM の約 5~10mm の厚みは考慮していない。

表面処理 CFSS の軸方向鉄筋の換算パラメータを表-10 に、趙・丸山式によるせん断耐力の算定結果を表-11 に示す。計算の結果、表面処理 CFSS を 2 層分考慮した

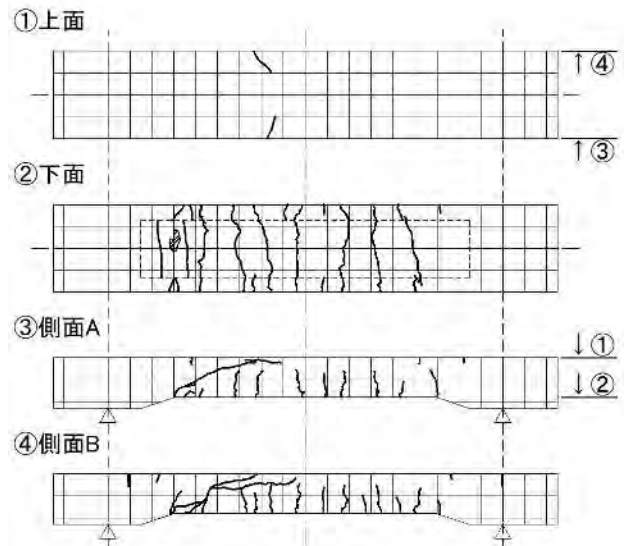


図-6 荷重試験終了時のひび割れ図 (No.3)

表-10 砂付き CFSS のパラメータ

引張補強筋種類	鉄筋	CFSS 1 層	CFSS 2 層
CFSS 設計厚み	mm	—	0.297
CFSS 幅	mm	—	250
断面積	mm ²	595.8	123.5
有効高さ	mm	150	185
弾性係数	N/mm ²	200,000	390,000
鉄筋と補強筋の弾性係数比	—	1.00	1.95
鉄筋換算の総断面積	mm ²	595.8	240.8

表-11 せん断耐力の算定結果

計算条件	計算値	No.3 試験値	試験値/ 計算値
砂付き CFSS1 層	148kN	157.1kN	1.06
砂付き CFSS2 層	160kN		0.98

場合の計算値 160kN と No.3 のせん断耐力 157kN が概ね一致した。このことから、供試体のせん断区間の大部分が表面処理 CFSS の継手位置となっており、2 層の表面処理 CFSS が配置されていることがコンクリートのせん断耐力増加に寄与した可能性が高いと考える。この効果は、RC 床版下面の補強に対しても寄与すると考えられ、開発した補強方法は、従来工法と比べて最大耐力が同程度以上で、遜色ない補強効果が得られることが確認された。なお、表-8 において、予備荷重から本載荷まで時間的間隔があるのは、試験機の都合によるものである。

3.2 輪荷重走行試験による疲労耐久性の検証

床版に作用するせん断応力の交番作用の再現が可能で

あり、普通 RC 床版の損傷機構解明を目的に開発された輪荷重走行試験機を用いて、開発工法で補強した床版の疲労耐久性を確認した。

供試体寸法は、図-7 に示すように 2,000mm（橋軸直角方向）×3,000mm（橋軸方向）×180mm（厚さ）とした。これは、首都高速道路においては床版厚さ 180mm 未満の床版補強が完了しており、今後補強対象となる RC 床版は 180mm～200mm 程度であることに基づき設定したものである。なお、コンクリートは、梁状供試体と同一ロットで製作したものであるが、試験材齢が異なるため、追加で実施した要素試験の結果を表-12 に示す。

載荷方式は、従来工法で疲労耐久性を確認した岡田らの研究⁶⁾と同じ条件とし、走行回数で直接比較が行えるように配慮している。なお、予備載荷は 147kN で 6 万回走行させ、補強前のたわみ劣化度は約 0.7 となった。図-8 に載荷プログラムを示す。従来工法で補強した床版が破壊に至った回数と同等の、予備載荷含めた累計 100.6 万回を超えた段階で荷重を上げて劣化を促進させている。

RC 床版下面への補強材割り付けを図-9 に示す。床版主筋方向にプライマー塗布後、コテで高粘性 PCM を下塗りし、表面処理 CFSS をローラーで埋設するように貼り付け、配力筋方向も同様に施工してコテにて表面を平滑に仕上げた。表面処理 CFSS を貼り付ける際の高粘性 PCM のダレなどの問題はなかった。また、プライマーの養生時間や高粘性 PCM の工程短縮効果により、3m×2m の範囲の施工を 2 日から 1 日に短縮できた。補強完成時の状況を写真-1 に示す。

輪荷重走行試験における走行回数と供試体中央の変位の関係を図-10 に示す。変位は基準荷重の 117.6kN で静的載荷した結果と計測時の走行回数における載荷荷重で静的載荷した結果をそれぞれ示す。補強実施後の載荷時変位は減少し、以降は走行回数の増加に伴い同変位が徐々に増加した。同一荷重で走行している間はおおむね変位の増加勾配は一定であり、荷重の増加により変位の増加勾配が大きくなる傾向を示した。一方、活荷重変位については荷重が増加しても大きく変化せず、累計走行回数 100 万回を過ぎたあたりからわずかに増加する傾向を示す程度であった。試験は累計走行回数 126 万回で供試体下面の補強シートの一部に剥離が発生し、床版内で押抜きせん断破壊に至ったと判断して終了した。

輪荷重走行試験の結果について、松井らが提案している RC 床版の S-N 関係式⁷⁾に、繰返し変動荷重に対してマイナー則が適用できるものとして、各荷重ステップでの走行回数を一定の評価荷重 P_0 に対して換算した式(4)で示す累積等価繰返し走行回数 N_{eq} を算定した。

$$N_{eq} = \sum (P_i / P_0)^m n_i \quad (4)$$

ここに、 N_{eq} ：基準荷重 P_0 に換算した等価繰返し走行回数、 P_i ：実際に載荷した荷重(kN)、 P_0 ：基準荷重(本検討

では 147kN)、 n_i ：荷重 P_i の走行回数、 m ：12.76 で S-N 曲線の傾きの逆数である。

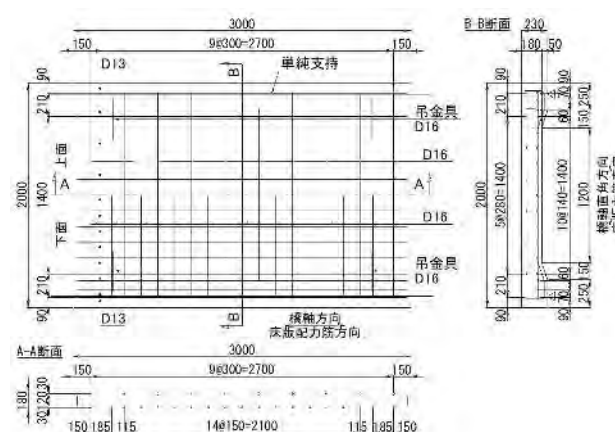


図-7 輪荷重走行試験供試体

表-12 コンクリートの材料試験結果

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)
743	41.3	33.3	3.27	6.6

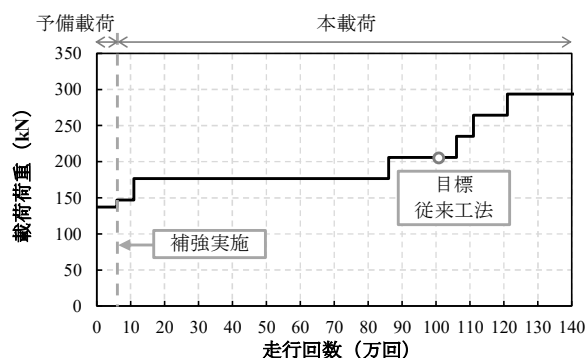


図-8 輪荷重走行試験の載荷プログラム

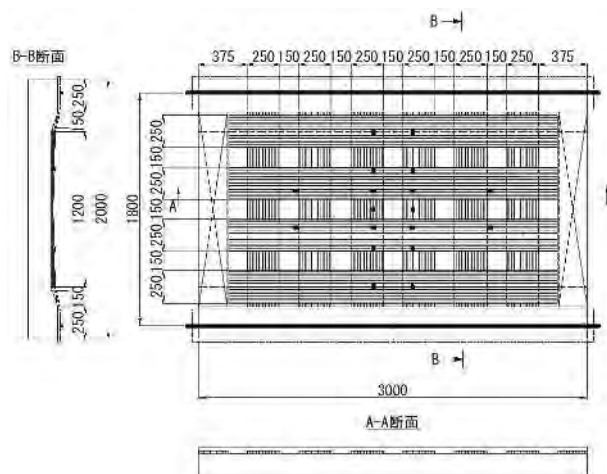


図-9 開発工法の補強材割り付け図



写真-1 補強完成時状況

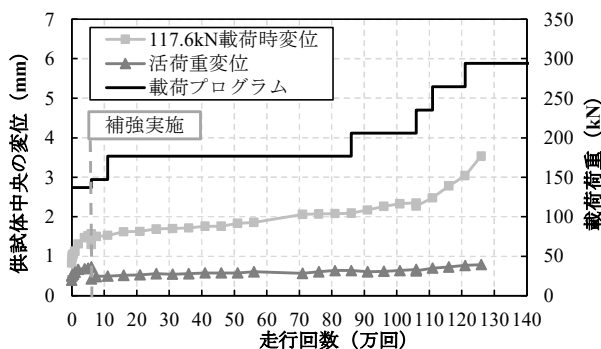


図-10 走行回数-供試体中央変位の関係

以上により算出した等価繰返し走行回数を表-13に示す。開発工法は従来工法の30倍以上の走行回数となり、優れた疲労耐久性を有している。従来工法より走行回数が増加した理由は、3.1に示したように、開発工法の静的耐力が約15～20%向上したことが主要因と考えられる。また、従来工法では格子貼した炭素繊維シートが設置した向きの荷重にのみ抵抗するのに対し、開発工法では炭素繊維シートだけでなく接着層として使用した高靱性PCMが床版に対して面的に抵抗したことさらに走行回数が増加した可能性も考えられる。

図-11に示す切断面の状況から、主鉄筋方向に斜めせん断ひび割れの発生が確認され、終局は従来工法と同様に、押抜きせん断型の破壊形態と推定される。

4. まとめ

RC床版の下面への炭素繊維シートの接着による補強を前提に、従来工法の課題であった吊足場への危険物および可燃物の持ち込みが不要となる材料を組み合わせた新しい炭素繊維シート補強に対して、耐荷力および疲労耐久性を確認した結果、従来工法と同程度以上の補強効果があることを確認できた。開発工法の現場適用にあたっては、安全性の向上だけでなく、プライマーから次工程がほぼ連続施工可能で、かつ仕上げの塗装が不要となるため、養生の手待ちが生じないことから、

表-13 等価繰返し回数の算定結果

	147kN等価繰返し 走行回数 (回)	比
従来工法	1.76×10^7	1.0
開発工法	5.70×10^8	32.3

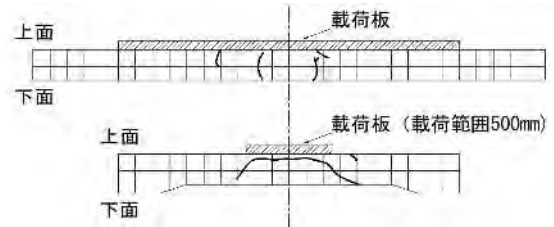


図-11 試験終了時供試体のひび割れ状況
(上段：配力筋方向，下段：主鉄筋方向)

現場における生産性の向上も期待できるため、今後は試験施工等を通じてこれらの効果を確認していく。

謝辞

補強効果の確認のため、累計120万回を超える繰返し輪荷重走行試験に協力を頂いた株式会社 IHI インフラシステム北村耕一氏に対して、ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 岸田政彦, 井田達郎, 樋口祐治, 小森篤也: 軽量コンクリート(Ⅱ種)と炭素繊維シートの付着特性に関する実験的研究および一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1189-1194, 2017.
- 2) 土木学会, コンクリートライブラリー101 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, 2000.7
- 3) 中村智, 山口浩平, 小森篤也, 日野伸一: 各種接着剤とCFRPストランドシートにより積層補強したRCはりの曲げ補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.1405-1410, 2011.
- 4) 土木研究所, コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(Ⅲ), 1999.12
- 5) 趙唯堅, 丸山久一: 連続繊維補強コンクリートはりのせん断耐荷機構とせん断耐力評価, 土木学会論文集 No.578/V-37, pp.1-17, 1997.
- 6) 岡田昌雅, 大西弘志, 松井繁之, 小林朗: 格子配置された炭素繊維シートによる床版補強効果 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.175-180, 2003.
- 7) 松井繁之: 橋梁の寿命予測 一道路橋RC床版の疲労寿命予測一, 安全工学, Vol. 30, No. 6, pp.432-440, 1991.

(2024年7月12日受付)