

緊張材に炭素繊維を用いたプレキャスト PC 床版の劣化調査

— 北九州港 葛葉地区棧橋 —

由井 陸粹*1・渡瀬 博*2・村井 伸康*3・立神 久雄*4

平成4年度の旧運輸省第四港湾建設局管轄の北九州港葛葉地区における岸壁改良工事の一部において、緊張材に炭素繊維を用いたプレキャスト PC 床版が試験的に採用された。この床版は、改良工事から5年経過した時点で、目視による外観調査を行い、改良工事から10年を迎えた時点においては、目視および赤外線カメラによる外観調査を行っているが、ひび割れ等の変状は確認されていない。

改良工事から20年経過した今回調査では、目視調査に加え、有効プレストレス量の確認、載荷試験を行い、健全性の確認を行ったので、その結果について報告するものである。

キーワード：CFRP、緊張材、棧橋、劣化、維持管理、調査

1. はじめに

わが国において、港湾は海上輸送と陸上輸送の接点として物流や人流を支え、国民の生活向上や発展に大きな役割を果たしてきた。一方で、岸壁、防波堤、棧橋などのコンクリート港湾施設は、つねに海水にさらされているため、外部からの塩分の浸透による内部鋼材の腐食が進行するなど、非常に厳しい環境に置かれている。また、高度経済成長期に集中的に整備されたことなどから、今後、劣化の進行による安全性の低下や補修補強費用の増大が懸念され、耐久性を高める材料の開発が切望される。

このような背景のなか、平成4年度の旧運輸省第四港湾建設局管轄の北九州港葛葉地区における岸壁改良工事の一部において、緊張材に炭素繊維を用いたプレキャスト PC 床版（以下、CFRP 床版と略す。）が試験的に採用された¹⁾。

このCFRP 床版は、炭素繊維緊張材を用いてプレテンション方式で製作された3枚のCFRP 床版を、現場において、炭素繊維緊張材を用いたポストテンション方式で連結し、場所打ちコンクリートと一体化して合成床版としたものである。

また、この床版は、施工から5年経過した時点で、目視

による外観調査を行い、施工から10年を迎えた時点においては、目視および赤外線カメラによる外観調査を行っているが、ひび割れ等の変状は確認されていない^{2,3)}。

今回は、施工から20年経過したので、目視調査に加え、有効プレストレス量の確認、載荷試験等を行い、健全性の確認を行った。

なお、今回の調査は、(一財)沿岸技術研究センターと港湾 PC 構造物研究会の共同で実施したものである。

2. 建設20年後のRC床版取替えについて

北九州港葛葉地区棧橋は、昭和40年から41年にかけて直杭式横棧橋構造で施工されたものである。棧橋は、海洋沿岸域の非常に厳しい環境に位置するため、とくに塩分の浸透に伴う鋼材の腐食は通常の構造物に比べて著しく早かった。昭和59年度の港湾構造物の腐食調査において、梁および床版のコンクリートのひび割れ、鉄筋腐食および鋼管杭の腐食が判明し、早急に補修が必要とされた。

この結果を受けて、平成2年度から4年度にかけて改良が行われ、既設床版は、切り出して撤去を行い、梁については断面修復を行った。梁の補修を行った後に、新規に製作したプレキャスト RC 床版を架設して、間隙部に場所打



*1 Rokusui YUI

(一財)沿岸技術研究センター
主任研究員



*2 Hiroshi WATASE

港湾PC構造物研究会



*3 Nobuyasu MURAI

港湾PC構造物研究会



*4 Hisao TATEGAMI

港湾PC構造物研究会

ちコンクリートを打設して一体化を図り改良を行った。一方、先に述べたように、改良工事の一部において、CFRP床版が試験的に採用された。このCFRP床版に用いた炭素繊維緊張材は、炭素繊維を多数束ね、それを樹脂により結合させ棒状に成形した複合材料である。高張力、高耐久性、軽量等の優れた性質を有しており、腐食環境の厳しい場所に建設されるコンクリート構造物の補強材としての使用に適している。

CFRP床版は工場で製作され、1方向をプレテンション方式によりプレストレスが導入されている。コンクリートは設計基準強度 500 kgf/cm² であり、塩害耐久性の向上のため、割裂防止のためのスパイラル筋や支圧補強のグリッド筋も炭素繊維製のものを使用した。現地ヤードにおいて工場製作したCFRP床版を3枚敷き並べ、目地コンクリートを打設後、炭素繊維緊張材をポストテンション方式により緊張定着し、3枚の版を一体化した。3枚の版を一体化する際に、炭素繊維緊張材の定着具が部材内部に残らないように、グラウト強度発現後に定着端部のコンクリートを切断して、緊張材とグラウトの付着により定着する方法が採用された。なお、シースにはステンレス製のものが使用されている。

図 - 1 に栈橋の構造図を、図 - 2 にCFRP床版の構造図を、写真 - 1 に炭素繊維緊張材の形状を示す。

3. 調査概要と結果

改良工事から20年を迎える今回の調査では、CFRP床

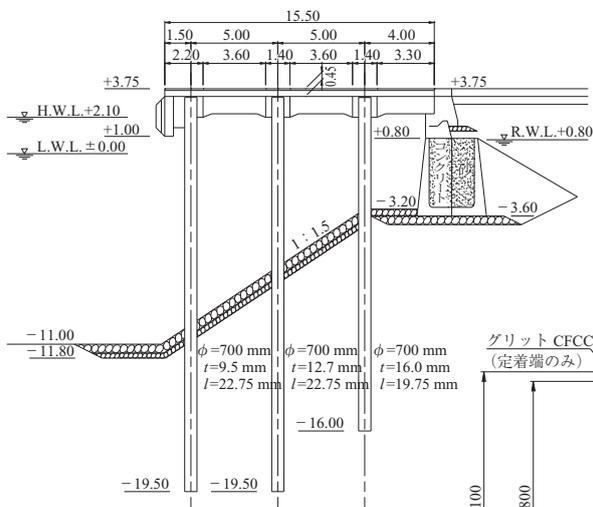


図 - 1 栈橋の構造図

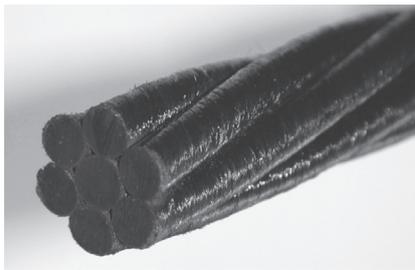


写真 - 1 炭素繊維緊張材の形状

版の健全性を確認するため、以下の項目に対する検討を行った。

- ① 目視調査, ② 有効プレストレス量の確認, ③ 載荷試験

3.1 目視調査

(1) 目視調査の目的

平成4年度の改良工事から10年後の平成15年(10年前)に、前回のCFRP床版劣化調査が行われた。改修工事から20年が経過して、前回調査時と同程度の健全性を保っているか、あるいは変状が生じているかを比較検証することが目的である。

(2) 目視調査の概要

目視調査は、船外機船で床版の下側に進入し、3~4mの距離から目視してひび割れスケッチを行うとともに、デジタルカメラで記録に残した。また、CFRP床版の1区画に、写真-2のように、簡易足場を設置して近接目視を行った。

(3) 目視調査の結果

施工から20年後のCFRP床版の下面の状況は、写真

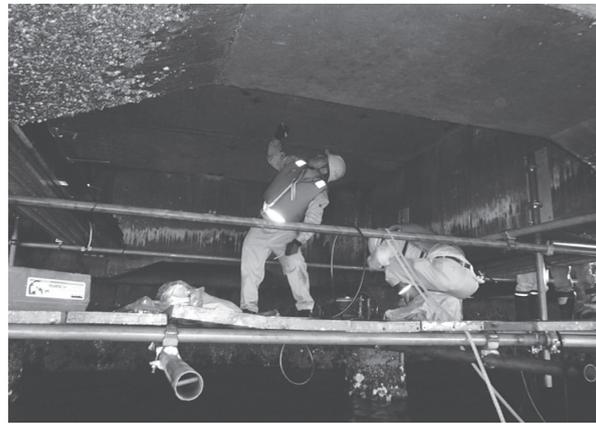


写真 - 2 簡易足場からの目視調査

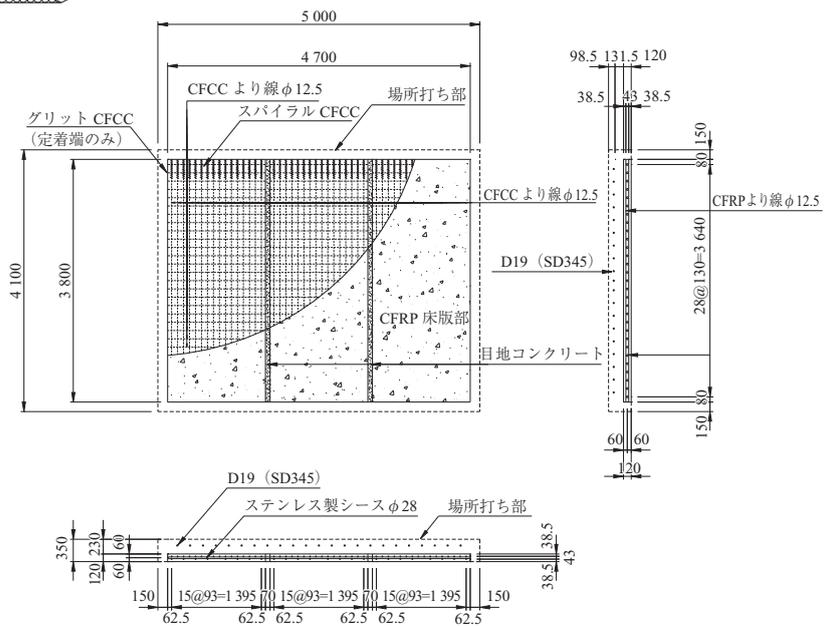


図 - 2 CFRP床版構造図

○特集／調査報告○

- 3 のように、10 年前と同様、ひび割れの発生や錆汁の滲出等はなかった。



写真 - 3 CFRP 床版下面の状況

梁の交差部で鋼管が埋め込まれた杭頭部は、写真 - 4 のように、その頂部に水平方向のひび割れがほぼ全箇所発生しており、また、セパレータ跡と思われる箇所からの錆汁が各所で見られた。ただし、この変状は 10 年前とほぼ同じ状況であり、最近になって進展した劣化ではないようである。

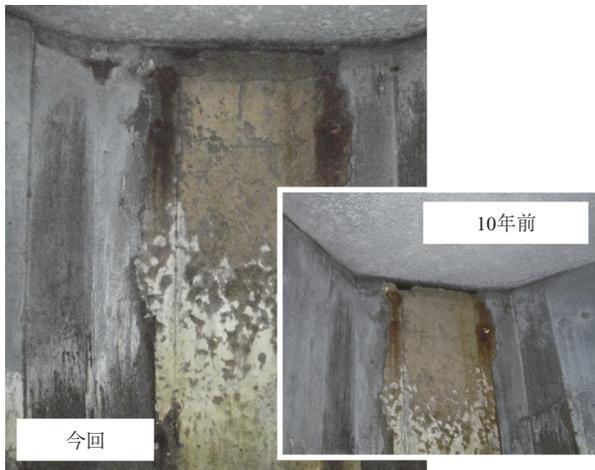


写真 - 4 杭頭部の状況

CFRP 床版本体の下面は点錆やひび割れ等の変状がなく、表 - 1 のように、「維持管理技術マニュアル」⁴⁾での判定としては「d」で、建設から 20 年が経過しても至って健全であった。

3.2 有効プレストレスの推定

(1) 計測目的

改良工事当時の文献⁵⁾から、プレストレスの有効係数はプレテンション側が 0.82、ポストテンション側が 0.85 を想定していたことがわかっているが、20 年経過した現

表 - 1 劣化度の判定基準

部位	判定基準	
RC スラブ	a	<input type="checkbox"/> 網目状のひび割れ (表面 50 % 以上) <input type="checkbox"/> かぶりのはく落 <input type="checkbox"/> 錆汁が広範囲に発生
	b	<input type="checkbox"/> 網目状のひび割れ (表面 50% 未満) <input type="checkbox"/> 錆汁が部分的に発生
	c	<input type="checkbox"/> 一方向のひび割れ、帯・線状のゲル <input type="checkbox"/> 錆汁が点状に発生
	d	<input type="checkbox"/> 変状なし
PC スラブ	a	<input type="checkbox"/> ひび割れ <input type="checkbox"/> 錆汁
	b	<input type="checkbox"/> -
	c	<input type="checkbox"/> -
	d	<input type="checkbox"/> 変状なし

在、残存プレストレス量がどの程度かは明らかでない。外観調査ではひび割れ等の劣化が見られないことから、プレストレスは現在も有効に作用していることが定性的には窺える。しかし、CFRP 床版の長期耐久性を検証するうえでは、残存するプレストレス量の定量的な評価が必要と考えられた。今回の調査は潮位の関係で作業時間がかぎられていること、また特殊な機材を必要としないことなどから、コア応力解放法によるプレストレス量の推定を実施した。

(2) 2 方向 PC 部材に対応した有効応力の推定式

今回実施したコア応力解放法による応力推定は、図 - 3 に示す概念図のようにコンクリート表面に 2 方向のひずみゲージを貼り、コアドリルで切込みを入れて解放されるひずみを計測するものである。コアドリルによる応力解放の実施状況を写真 - 5 に示す。

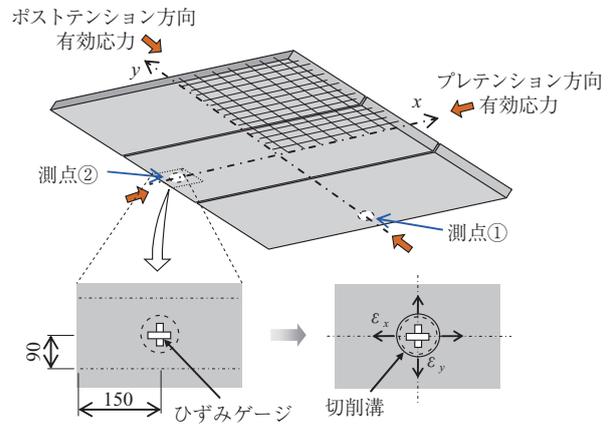


図 - 3 計測概念と計測位置

応力推定において注意すべき点は、計測されるひずみが有効プレストレスの解放ひずみ以外にも、内部拘束されたひずみやポアソンひずみも含むことにある。これを適切に評価しなければ、長期材齢を経た構造物の推定精度は期待できない。文献⁶⁾によると計測されるひずみは、4 種類のひずみとそれぞれのポアソンひずみによって成り立っており、その推定式の有効性や推定精度については、供試体および実橋梁の桁計測による検証が報告されている。



写真 - 5 コア切込みによる応力解放実施状況

ただし、今回測定した CFRP 床版は、周囲 4 辺を場所打ちコンクリートで梁に接合されているため、梁部が CFRP 版の収縮を拘束すると考えられる。この要因を追加すると、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon_x = & (\Delta \varepsilon_{x,e} - \nu \Delta \varepsilon_{y,e}) + (\Delta \varepsilon_{x,si} - \nu \Delta \varepsilon_{y,si}) \\ & + (\Delta \varepsilon_{x,sr} - \nu \Delta \varepsilon_{y,sr}) + (\Delta \varepsilon_{x,cr} - \nu \Delta \varepsilon_{y,cr}) \\ & + (\Delta \varepsilon_{x,br} - \nu \Delta \varepsilon_{y,br}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_y = & (\Delta \varepsilon_{y,e} - \nu \Delta \varepsilon_{x,e}) + (\Delta \varepsilon_{y,si} - \nu \Delta \varepsilon_{x,si}) \\ & + (\Delta \varepsilon_{y,sr} - \nu \Delta \varepsilon_{x,sr}) + (\Delta \varepsilon_{y,cr} - \nu \Delta \varepsilon_{x,cr}) \\ & + (\Delta \varepsilon_{y,br} - \nu \Delta \varepsilon_{x,br}) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、

ε_x : コア切込みで計測される x 方向の全解放ひずみ
 ν : コンクリートのポアソン比

$\Delta \varepsilon_{x,e}$: x 方向の有効応力による x 方向の解放ひずみ

$\Delta \varepsilon_{x,si}$: 乾燥収縮の深さ方向での不均一性に起因した内部拘束による x 方向の解放ひずみ

$\Delta \varepsilon_{x,sr}$: 乾燥収縮の鉄筋拘束による x 方向の解放ひずみ

$\Delta \varepsilon_{x,cr}$: クリープの鉄筋拘束による x 方向の解放ひずみ

$\Delta \varepsilon_{x,br}$: PC 版の収縮を周辺部材が拘束することによる x 方向の解放ひずみ

また、 y については x と置き換えて同様に定義される。

ここで、同一点での乾燥収縮の深さ方向の進行度合いは平面方向によらず一定と見なせば、次式が成り立つ。

$$\Delta \varepsilon_{x,si} = \Delta \varepsilon_{y,si} \quad (3)$$

また、CFRP 版は緊張材のみで鉄筋がない構造のため、内部拘束はないと考えると、

$$\Delta \varepsilon_{x,sr} = \Delta \varepsilon_{y,sr} = \Delta \varepsilon_{x,cr} = \Delta \varepsilon_{y,cr} = 0 \quad (4)$$

そして、梁の拘束度は x, y 方向について同程度と見なせば、

$$\Delta \varepsilon_{x,br} = \Delta \varepsilon_{y,br} \quad (5)$$

ここで式(1)、(2)に式(4)を代入して、 x 方向と y 方向の解放ひずみの差をとると、式(3)、(5)より、次式のように内部拘束応力による解放ひずみの大部分が消去される。

$$\varepsilon_x - \varepsilon_y = (1 + \nu) (\Delta \varepsilon_{x,e} - \Delta \varepsilon_{y,e}) \quad (6)$$

緊張材は 2 方向とも付着定着のため、それぞれの端部の

伝達長区間を計測することで、以下のように表せられる。

$$\varepsilon_{x1} - \varepsilon_{y1} = \varepsilon_1 (1 + \nu) (\Delta \varepsilon_{x,e} - \beta \cdot \Delta \varepsilon_{y,e}) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{y2} - \varepsilon_{x2} = \varepsilon_2 (1 + \nu) (\Delta \varepsilon_{y,e} - a \cdot \Delta \varepsilon_{x,e}) \quad (8)$$

ここに、 $\varepsilon_{x1}, \varepsilon_{y1}$: y 方向緊張材の伝達長区間内にある測点のコア切込みにより解放されるひずみ、 $\varepsilon_{x2}, \varepsilon_{y2}$: x 方向緊張材の伝達長区間内にある測点のコア切込みにより解放されるひずみ、 $a, (\text{または } \beta)$: x (または y) 方向緊張材の伝達区間内測点におけるプレストレスの伝達率 ($0 < a$ (または $\beta) < 1$)。

式(7)、(8)を整理すると、2 方向プレテンション PC 部材に対応した有効応力のひずみ成分は以下となり、これに弾性係数を乗ずれば有効応力が得られる。また、有効応力には自重の影響も含むが、単純支持の端部で計測したため、これを無視できる。

$$\Delta \varepsilon_{x,e} = \frac{\varepsilon_1 + \beta \cdot \varepsilon_2}{(1 + \nu)(1 - a \cdot \beta)} \quad (9)$$

$$\Delta \varepsilon_{y,e} = \frac{\varepsilon_2 + a \cdot \varepsilon_1}{(1 + \nu)(1 - a \cdot \beta)} \quad (10)$$

(3) 伝達長区間のプレストレス伝達率

計測は、図 - 3 の 2 箇所で行っている。ポストテンション材も定着具を切断撤去して、付着定着となっている。緊張材の伝達長は、メーカーの試験結果から 40ϕ (ϕ : 緊張材径 12.5 mm)³⁾、伝達区間の応力分布は 2 次放物線と見なせる。ゲージの中心点は、版端部から 150 mm の位置で、緊張材位置を交わした中間位置で計測した。計測点のプレストレス伝達率を計算すると、おのおの $a = 0.23$ 、 $\beta = 0.31$ となる。

(4) 有効応力の推定結果

版端部 2 箇所で行った計測したひずみと 2 方向のひずみ差を表 - 2 に示す。 x はプレテンション材方向で、 y はポストテンション材方向である。測点 ① は、プレテンション材としては標準部、ポストテンション材の端部にあたる測点のため、 x 方向の膨張ひずみは y 方向に比べて大きい値であった。一方測点 ② は、プレテンション材としては端部、ポストテンション材の標準部にあたる測点のため逆の傾向を示す結果であった。

表 - 2 計測ひずみ

箇所	ε_x	ε_y	ひずみ差
測点 ①	421 μ	228 μ	193 μ
測点 ②	187 μ	319 μ	132 μ

ポアソン比を 0.167、弾性係数を 33 000 N/mm² として、式(9)、(10)より算出した有効応力の推定結果を表 - 3 に示す。推定応力は、設計に比べ 2 方向とも 101 % とよく一致した結果が得られた。以上から、CFRP 床版の長期耐久性が確認できたと考えられる。

3.3 載荷試験

(1) 載荷試験の目的

本載荷試験は、重荷重の載荷による実構造物の変位やひ

○ 特集 / 調査報告 ○

表 - 3 有効応力の推定結果

項目	プレテンション材	ポストテンション材
推定有効ひずみ	216 μ	162 μ
推定有効応力度	7.12 N/mm ²	5.35 N/mm ²
設計有効応力度	7.04 N/mm ²	5.31 N/mm ²
推定値 / 設計値	101 %	101 %

ずみを計測し、解析値と比較することで、CFRP床版の内部ひび割れや場所打ち床版との剥離などの内部劣化を、間接的に推定することが目的である。

(2) 載荷試験の方法

CFRP床版への荷重載荷については、供用中の棧橋上での試験となることや、大規模な反力装置を準備できないことから、大型クレーンのアウトリガーを利用する載荷方法とした。図 - 4のようにCFRP床版の中央部にアウトリガーが位置するようクレーンを据付け、図 - 5のようにアウトリガーと敷板の間にロードセルを設置し、載荷荷重の測定を行うこととした。また、変位計測は床版下面に変位計を設置、ひずみの計測はひずみゲージを設置して、荷重の除荷・再載荷を数回繰返し、床版中央の鉛直変位およびひずみ値の履歴を記録した。なお、アウトリガーから得られる最大反力は、ブーム起伏角度が約45度のときに190 kNである。

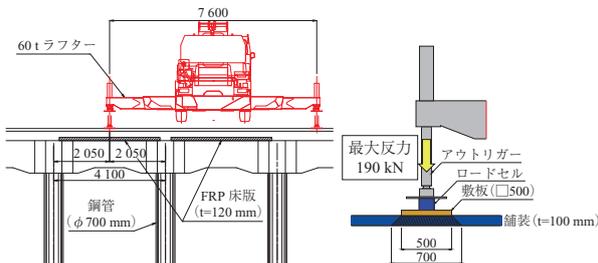


図 - 4 載荷要領図

図 - 5 荷重測定要領

(3) 事前解析

本CFRP床版は4辺固定版であり、正確な変形量や応力値を算定する必要があることから、載荷試験に先立ってFEM解析を行い、載荷荷重によるCFRP床版の挙動を把握することとした。図 - 6にFEM解析結果を示す。この結果、載荷荷重190 kNにおける床版中央の鉛直変位は

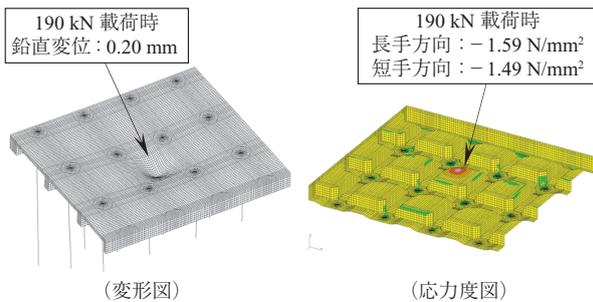


図 - 6 FEM解析結果

0.20 mmであり、これにより測定機器の性能などを設定した。また、試験荷重により床版下面に発生する引張応力度は、長手方向で -1.59 N/mm^2 、短手方向で -1.49 N/mm^2 であった。これに自重による応力度を加算しても -2.0 N/mm^2 程度であり、本試験によりCFRP床版へ損傷は与えないと判断した。

(4) 載荷試験状況

載荷試験状況を写真 - 6、載荷荷重の計測状況を写真 - 7に示す。反力装置となるクレーンには60 tラフターを使用し、ブームの起伏により荷重の除荷・再載荷を行った。



写真 - 6 載荷試験状況

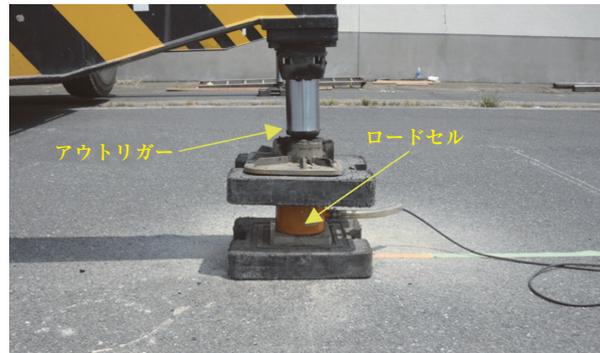


写真 - 7 載荷荷重の計測状況

(5) 載荷試験結果

荷重載荷の履歴図を図 - 7に示す。荷重は前述のように190 kNを上限として除荷・再載荷を5回行い、ひずみの履歴を計測した。CFRP床版の中央部で計測した荷重 - 変位履歴図を図 - 8に、荷重 - ひずみ履歴図を図 - 9に示す。試験で得られた測定値は、鉛直変位が平均約0.23 mm、ひずみが短手方向、長手方向ともに約55 μ 程度、応力度換算で 1.8 N/mm^2 との結果となった。これは、FEM解析によって得られた鉛直変位量および応力度と比べ、約15%程度大きい値である。ただし、載荷試験中の目視観察では、CFRP床版下面のひび割れは確認されておらず、履歴曲線もおおむね線形の挙動を示していることから、CFRP床版が剛性低下しているとは考えにくい。今回の解析値と計測値の誤差は、CFRP床版と梁との拘束度が、FEM解析と実構造物で異なることに起因しているものと

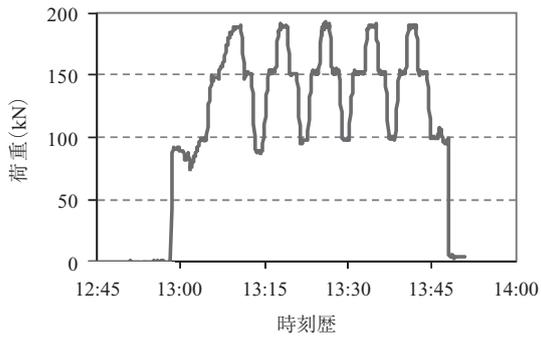


図 - 7 荷重載荷の履歴図

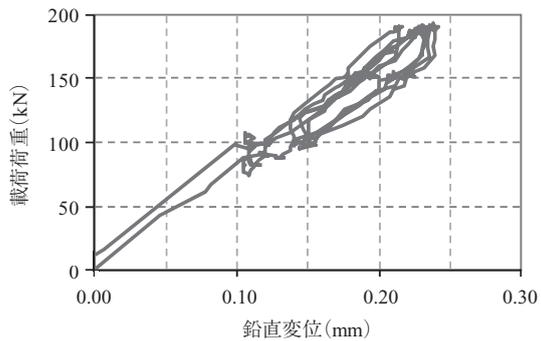


図 - 8 荷重 - 変位曲線

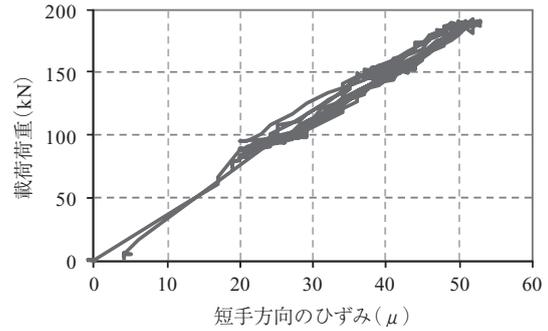
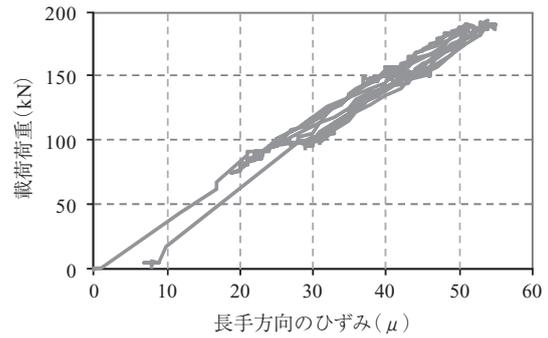


図 - 9 荷重 - ひずみ履歴図

考えられる。

以上より、今回の荷重試験結果と解析値に大きな離れはなく、CFRP床版の内部ひび割れや場所打ち床版との離れなどの内部劣化は生じていないと判断できる。

4. おわりに

北九州港葛葉地区棧橋は、昭和40年から41年にかけて直杭式横棧橋構造で施工され、昭和59年度の港湾構造物の腐食調査において、早急に補修が必要とされたことから、平成2年度から4年度にかけて改良工事が行われた。今回の調査では、改良工事後20年が経過したCFRP床版の目視調査、有効プレストレス量の確認、荷重試験を行った。

目視調査では、CFRP床版本体の下面にはひび割れ等の変状は無く、有効プレストレス量の調査では設計値のプレストレスが導入されていることが確認できた。また、荷重試験においては、CFRP床版の剛性低下は確認されなかった。

以上より、緊張材に炭素繊維を用いたプレキャストPC床版の長期にわたる有用性を確認することができたと考える。

謝辞

本調査は、(一財)沿岸技術研究センターと港湾PC構造物研究会の共同研究として実施したものである。

調査の実施にあたり助言をいただいた、東京工業大学の 大即信明 教授、西田孝弘 助教に心より御礼申し上げます。また、調査にご協力をいただいた、国土交通省九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所、北九州市 港湾空港

局港営部 港湾事務所、(独)港湾空港技術研究所および施設周辺の企業の方々に厚く御礼申し上げます。

(一財)沿岸技術研究センター

主任研究員：由井陸粹

CFRP床版調査WG (港湾PC構造物研究会)

主 査：佐藤祐輔

委 員：横川勝則、渡瀬 博、中山良直、小野滋久、井上博士、松本正之、村井伸康、星野展洋、桑野昌晴、森 晴夫、立神久雄

オブザーバー：内藤英晴、網野貴彦

参考文献

- 1) 財 沿岸開発技術研究センター：繊維系素材 (FRP) を用いた港湾構造物の技術開発に関する研究報告書、1993.3
- 2) 財 沿岸開発技術研究センター、港湾PC構造物研究会：北九州港 (葛葉地区岸壁) FRP床版劣化調査報告書、2004.3
- 3) 大柳修一、白石 悟、内藤英晴、佐藤裕輔：10年経過したCFRP棧橋の劣化調査とLCC検討、第13回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、プレストレスコンクリート工学会、pp.255～258、2004.10
- 4) 財 沿岸技術研究センター：港湾の施設の維持管理技術マニュアル、pp.182、2007.10
- 5) 廣田孝夫、清宮 理、鹿籠雅純、横井聰之：CFRPで補強した永久型枠を用いた合成梁の力学特性と棧橋床版への適用性、土木学会論文集 No.522/VI-28、pp.119-131、1995
- 6) 二井谷教治、渡瀬 博、阪田憲次、綾野克紀：コンクリート部材の有効応力の推定手法に関する研究、コンクリート工学論文集 vol.20、No.2 (57)、2009
- 7) 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物設計・施工マニュアル (案)、p.82、ACC倶楽部、2003

【2013年9月3日受付】