

# 論文 小径ループ継手を有するプレキャスト梁を用いた栈橋の実規模実験による性能評価

高淵 稔貴\*1・竹中 寛\*2・高橋 佑弥\*3・對馬 健\*4

**要旨:** 昨今, 生産性向上の観点から, 栈橋に対してもプレキャストコンクリートの導入が進んできている。栈橋にプレキャストコンクリートの梁を使用する場合, 杭頭曲げモーメントを円滑に伝達するため, 主鉄筋と鋼管杭を海上で溶接接合することが一般的である。著者らは, 溶接作業を排除し, 現場打ちコンクリートの施工範囲を縮小できる, ループ継手を有した新しい杭頭部の接合法を提案している。本稿では, 当社が保有する栈橋の改修工事に当該工法を適用し, 新設した栈橋において水平載荷試験による性能検証を試みた。その結果, 当該工法を用いたプレキャスト栈橋は, 既存の性能照査方法で, 安全側に評価できることを確認した。

**キーワード:** プレキャストコンクリート, 小径ループ継手, 実規模実験, 水平変位

## 1. はじめに

昨今, 建設現場における生産性を向上させるため, 栈橋などの港湾構造物に対してもプレキャスト(以下, PCaと称す)化の期待が高まっている。そのひとつに杭式栈橋の上部コンクリートのPCa化がある。大型起重機にて一括架設を行い, 海上作業を効率化する工法がある一方で, 現地状況等により大型船舶や重機類の使用が制限され, より小型の重機で施工できる程度まで部材を分割することが望ましい場合には, 隣接する基礎杭間の梁をPCa化する方法が考えられる。この場合, 従来は梁の主鉄筋を鋼管杭に現場溶接にて連結し, 杭頭部のコンクリートを現場打ちにて施工しているが, 海上の狭隘な場所で溶接作業を行わなければならない, 熟練工が不足する海外の建設現場などにおいては課題となる。そこで著者らは, PCa床版などで実用化されているループ継手を応用した, 図-1に示す杭頭部の新しい接合法を考案した。当該工法は, 従来, 床版等で用いられている上側に配置した鉄筋と下側に配置した鉄筋を連結する一体型のループ継手と異なり, 梁の下側鉄筋のみまたは上下の鉄筋の端部を各々ループ状にして分離配置する接合法(以下, 小径ループ継手接合と称す)を用いたもので, ループ径を小さくすることにより, 同図に示す一体型のループ継手に比べて, 現場打ちコンクリートの施工範囲を縮小できる。当該工法の施工イメージを図-2に示す。ループ加工した鉄筋を溶接した杭頭鋼管は, 梁受け材に設置後, 鋼管杭との隙間にモルタル等を充填することで一体化する(a)。その後, 杭頭鋼管のループ鉄筋とPCa梁のループ鉄筋が所定の重ね合わせ形状となるようPCa梁を設置し, ループ継手内部に横方向鉄筋を配置する(b)。その後,

杭頭部の鉄筋および型枠の組立て, 杭頭部コンクリート打込み(c), PCa床版(ハーフPCa)の設置, 梁上側筋の配筋(d), 床版コンクリートの打込みという流れで施工を行う。当該工法については, これまでに梁部材を用いた曲げ耐力, せん断耐力の評価<sup>1) 2)</sup>や, 杭頭部を模擬し

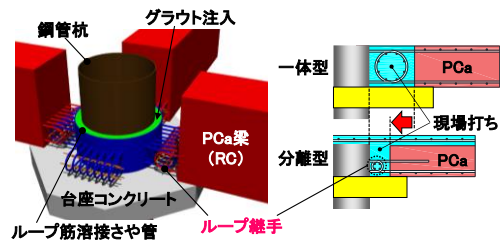
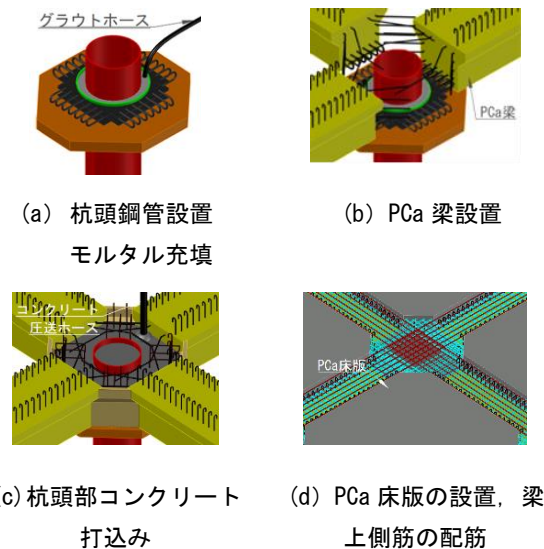


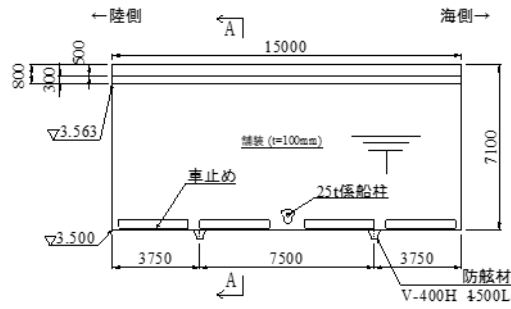
図-1 小径ループ継手接合の概念図



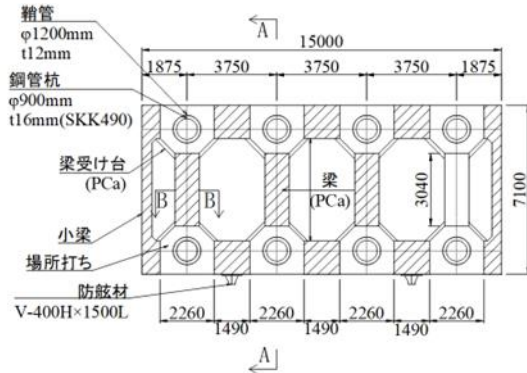
(a) 杭頭鋼管設置  
モルタル充填 (b) PCa 梁設置  
(c) 杭頭部コンクリート  
打込み (d) PCa 床版の設置, 梁  
上側筋の配筋

図-2 施工イメージ

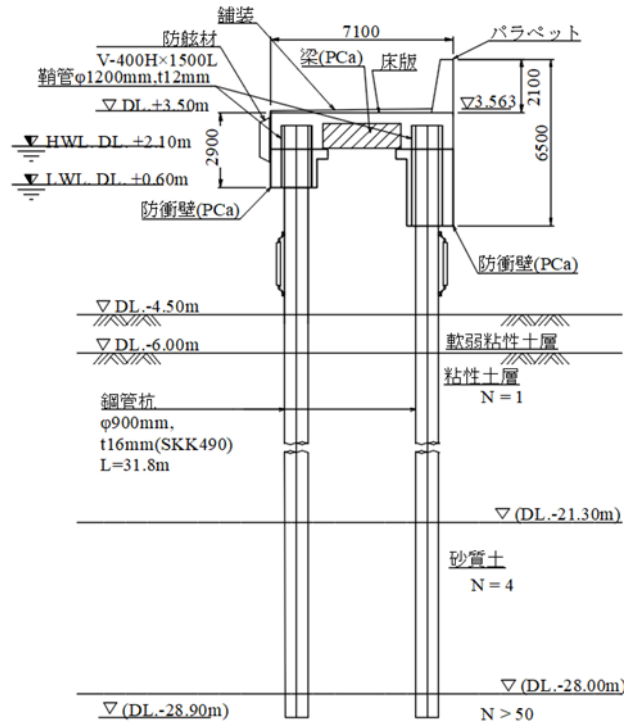
\*1 東洋建設(株) 総合技術研究所 主任研究員 (正会員)  
 \*2 東洋建設(株) 総合技術研究所 材料研究室長 博士(工学) (正会員)  
 \*3 東洋建設(株) 総合技術研究所 主任研究員 修士(工学) (正会員)  
 \*4 東洋建設(株) 九州支店 修士(工学)



(a) 平面図



(b) PCa 梁配置図



(c) 標準断面図 (A-A 断面)

図-3 対象構造物の概要

た試験体を用いた交番荷重実験等での耐力を検証してきた<sup>3)</sup>。今回、施工性や実構造物における構造性能の確認を目的として、当社が保有する栈橋の改修工事に当該工法を適用し、施工上の課題の確認および新設した栈橋において実構造物の水平荷重試験による性能検証を試みた。

本稿では、施工前に実施した解析的検討（以下、事前検討称す）と実構造物における水平荷重試験の結果の比較により行った栈橋の構造性能評価について述べる。

## 2. 事前検討による性能推定

### 2.1 対象構造物の概要

対象構造物の概要を図-3に示す。図中のハッチング部が当該工法を適用した PCa 梁である。対象構造物は、弊社が兵庫県西宮市鳴尾浜に保有する杭式構造の栈橋である。全長 280m の栈橋の内、老朽化した 15m 範囲を撤去して当該工法を適用した栈橋を新たに建設した。なお、鋼管杭の全長は 31.8m である。

### 2.2 栈橋の水平変位

事前に栈橋の水平荷重試験の条件に合わせたフレーム解析により、荷重に対する栈橋上部工の水平変位量を予測した。なお、想定される変位量の上限と下限の目安を推定するため、表-1に示す2ケースの条件で解析を行った。ケース1は一般の設計でモデル化されるように、防舷壁部分については防舷壁の剛性の効果を無視して杭の剛性を与え、地盤は設計で支持地盤として考慮される

表-1 フレームモデルの概要

ケース 1	ケース 2

-6.00m 以下のみに線形分布ばねを考慮した。一方、ケース2ではより現実的なモデルとして、防舷壁部の剛性を考慮し、地盤についても-4.50m まで分布する軟弱地盤部分について受働土圧を上限とするパイロニア形の非線形ばねでモデル化した。また、陸側及び海側の隣接する既設栈橋についてもそれぞれ単体でモデル化した。荷重重は、接岸時を想定した設計荷重(防舷材反力)とし、480kN の荷重を2か所(後掲する図-5参照)に作用させている。栈橋水平変位の予測値を表-2に示す。栈橋の水平変位の予測値は、既設栈橋と新設栈橋の相対変位で 36.6~73.3mm、絶対変位で 31.3~60.5mm 程度であった。

### 2.3 鉄筋ひずみ

鉄筋ひずみは、ひび割れが発生しない場合と、ひび割れが発生する場合の2ケースについて計算した。対象断面は、栈橋法線に直交する梁とし、道路橋示方書<sup>4)</sup>の有効断面の考え方にに基づき算定した。鉄筋ひずみ推定を行う断面図を図-4に示す。ひび割れが発生しない場合の鉄筋ひずみについては、全断面有効とし、コンクリート断面によってモーメントに抵抗するとしてひずみを求め、鉄筋位置でのコンクリートひずみを鉄筋のひずみとした。なお、断面上に生じる応力分布が中立軸からの距離に比例し直線的に分布するとしている。また、ひび割れが発生する場合の鉄筋ひずみは、断面の平面保持を仮定し、コンクリートの引張抵抗を無視して鉄筋のみで引張応力に抵抗するものとしてひずみを算定した。鉄筋ひずみの予測値を表-3に示す。本実験で生じる最大荷重時の鉄筋ひずみは、上段鉄筋で48~451 $\mu$ の範囲、下段鉄筋で58~504 $\mu$ の範囲のひずみが生じるものと推定した。

### 3. 栈橋の水平載荷試験

#### 3.1 実験方法

栈橋の水平載荷試験の概要図を図-5に示す。新設栈橋に設置した50tジャッキ2基にて栈橋の岸壁法線に対して直角に変位する様に、反力桁に水平荷重を加え、新設栈橋に設計荷重を作用させた。反力桁は、床版に埋め込んだアンカーで床版と反力桁固定用の鋼材を接合し、鋼材で反力桁を挟み込むことで、既設栈橋に固定した。載荷荷重は、2箇所を設置されている防舷材の設計荷重に相当する荷重とし、ジャッキ1ヶ所当たり、最大で500kNを作用させた。荷重の載荷位置は防舷材の位置と異なるが、今回対象とした栈橋構造では床版が同一面上に存在し、防舷材反力のような水平方向の荷重に対して、面内にはほぼ剛体として挙動する。その際、梁部材は杭とラーメン構造を形成するため、荷重作用方向の曲げモーメントが卓越し、軸方向力は一般に無視できる。この考えに基づき、法線直角方向に発生する梁端部の設計曲げモーメントが発生するような載荷重を左右均等に載荷することで、防舷材反力作用時の挙動を再現している。なお、2基のジャッキは同時に均等な力が作用するようにコントロールし、それぞれ0kNから500kNまで荷重を増加させた後、0kNまで除荷した。

載荷荷重の時刻歴を図-6に示す。L1およびL2はそれぞれのジャッキの荷重を示しており、載荷から除荷まで2本のジャッキにはほぼ均等に荷重が作用していることから、荷重値については平均値を用いて整理した。

#### 3.2 計測項目

載荷時の計測項目を表-4に、荷重、反力桁および既設栈橋と新設栈橋の栈橋変位の計測位置を図-7に示す。

表-2 フレーム解析による栈橋水平変位の予測値

一ヶ所当たりの作用荷重(kN)	既設栈橋との相対変位(mm)				絶対変位(mm)	
	陸側		海側		ケース1	ケース2
	ケース1	ケース2	ケース1	ケース2		
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100	13.9	6.5	15.3	7.0	12.6	5.4
200	27.9	14.0	30.5	14.9	25.2	11.8
300	41.8	21.6	45.8	23.0	37.8	18.3
400	55.7	29.8	61.0	31.6	50.4	25.4
480	66.9	36.6	73.3	38.8	60.5	31.3

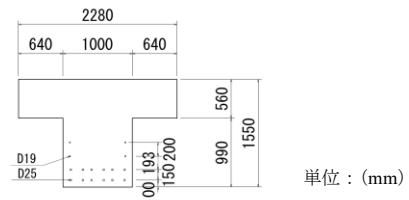


図-4 鉄筋ひずみ推定を行う断面図  
(図-3中のB-B断面)

表-3 載荷時に推定される鉄筋ひずみの予測値

一ヶ所当たりの作用荷重(kN)	継手部鉄筋ひずみ( $\mu$ )			
	ひび割れ発生なし		ひび割れ発生あり	
	下段鉄筋	上段鉄筋	下段鉄筋	上段鉄筋
0	0	0	0	0
100	11	9	66	59
200	23	19	179	160
300	36	29	293	262
400	48	40	409	367
480	58	48	504	451

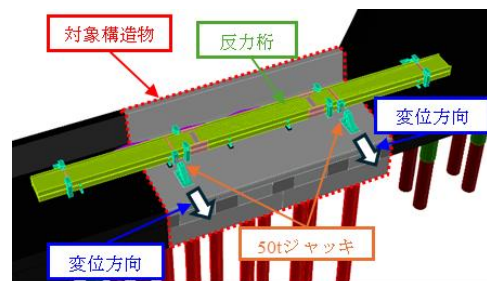


図-5 水平載荷試験の概要図

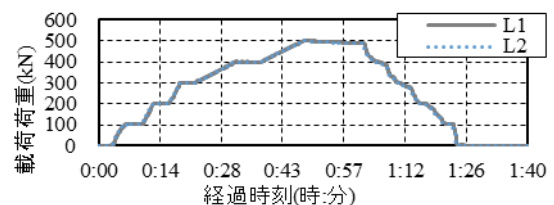


図-6 載荷荷重の時刻歴

表-4 計測項目

計測項目	計測機器	記号	点数	備考
載荷荷重	荷重計	L1、L2	2	載荷点で計測
反力桁たわみ	変位計	D3、D4	2	
栈橋変位	変位計	D1、D2	2	既設栈橋との相対変位
	トータルステーション	TS1、TS2	2	栈橋前面の絶対変位
鉄筋ひずみ	ひずみゲージ	図-8参照	84	

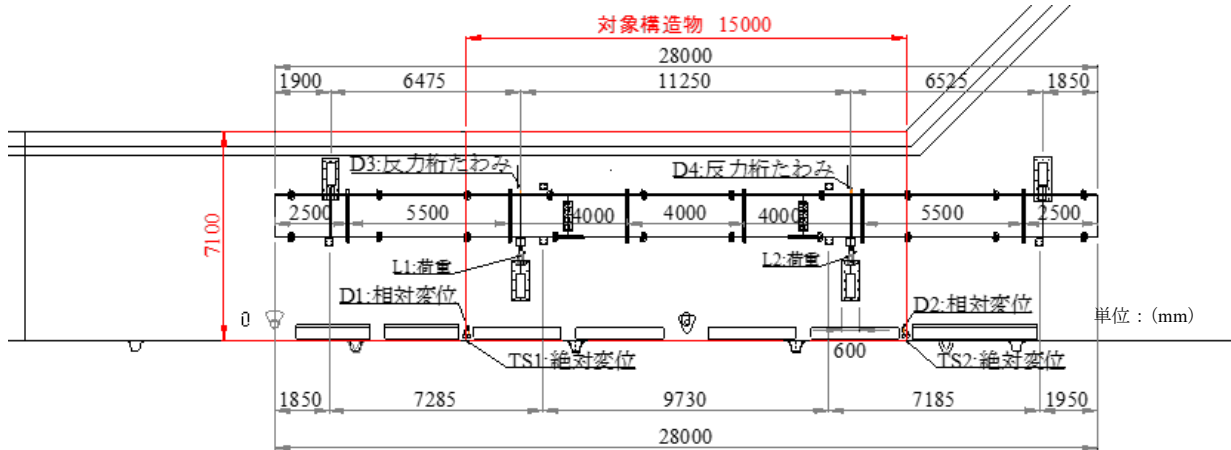


図-7 計測箇所(荷重, 反力桁たわみ, 栈橋変位)

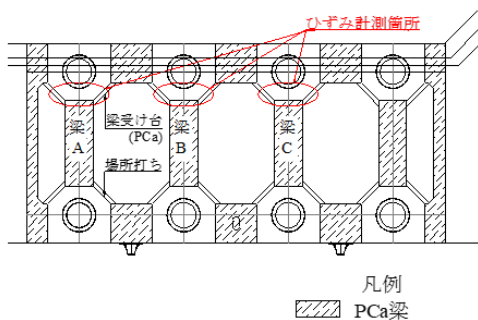


図-8 鉄筋ひずみの計測対象

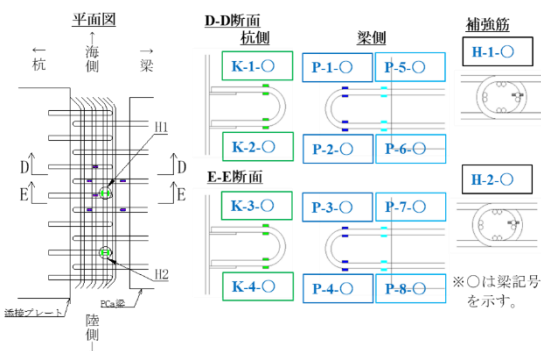


図-9 鉄筋ひずみの計測位置および記号

新設栈橋の絶対変位は防舷材設置側における岸壁法線の出入りとし、対象栈橋から離れた荷の影響を受けない場所に設置したトータルステーションを用いて、新設栈橋の端部の変位を自動追尾と目視の両方で計測した。なお、目視による計測は、既設栈橋との境界付近にアルミロッドを設置しその値を読み取った。鉄筋ひずみの計測箇所を図-8、鉄筋ひずみの計測位置および記号を図-9に示す。栈橋法線直交梁と鋼管杭の接合部を対象とし、PCa 梁側および鋼管杭側のループ鉄筋とループ内に配置した横方向の補強鉄筋(以下、補強筋)のひずみを計測した。

### 3.3 実験結果および考察

#### (1) 反力桁のたわみ

載荷点における反力桁のたわみ量の実測値(D3,D4)と

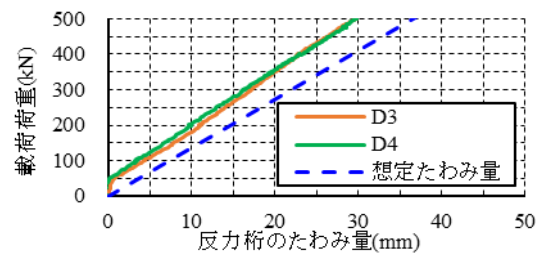


図-10 反力桁のたわみ量と載荷荷重の関係

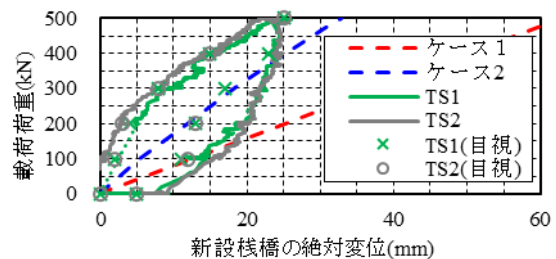


図-11 絶対変位と載荷荷重の関係

載荷荷重の関係を図-10に示す。ここで、反力桁のたわみは、新設栈橋との相対変位により計測しており、図-7に示す位置に設置した変位計により得られた値を、同図に示す相対変位(D1,D2)の計測値を用いて、既設栈橋上の支持点を基準としたたわみ量に補正している。図-10中に併記した想定たわみ量は、計算により求めた載荷時に反力桁に生じるたわみ量を指す。実測値は50kNまで変化がなく、50kN以降に増加しており、想定たわみ量と乖離が生じている。一方、剛性(傾き)については、想定たわみ量とほぼ同等であった。

荷重が50kN以上になると想定たわみ量の傾きと同程度に増加していることから、載荷開始直後の想定たわみ量と実測値が乖離した要因は、反力桁の自重による摩擦力等の影響が考えられる。

#### (2) 栈橋の水平変位

絶対変位と載荷荷重の関係を図-11に示す。図中のケース1および2は、事前解析の結果を示す。また、TS1

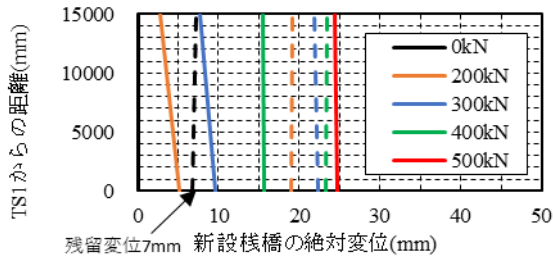


図-1 2 各荷重時点における栈橋前面の  
栈橋法線に対する傾き

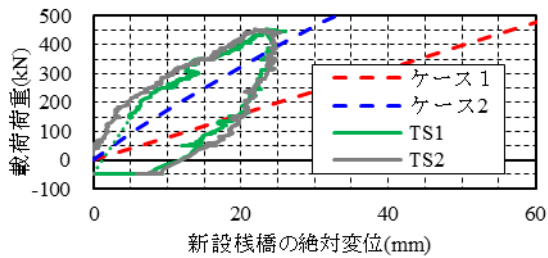
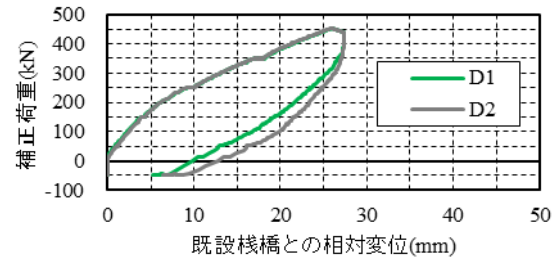


図-1 3 絶対変位と補正荷重の関係

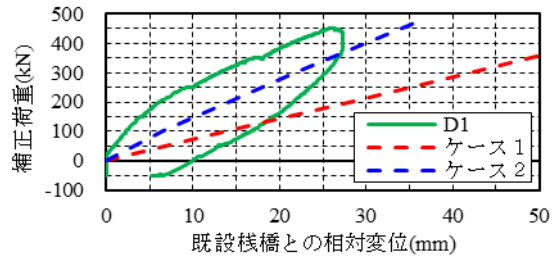
および TS2 は自動追尾計測の結果を示しており、TS1 (目視) および TS2 (目視) は、目視による計測結果を示す。なお、荷重時において TS1 の機械による変位の自動追尾計測が 200kN まで機械の誤作動により正常に記録できなかったため、TS1 の結果については 0kN と 200kN の値を直線で結び、点線で示している。各荷重時点における栈橋前面の栈橋法線に対する傾きを図-1 2 に示す。図中の破線は除荷過程における各荷重時の値を示す。縦軸は TS1 の法線平行方向の位置を 0m とし、TS2 の計測位置を 15m (改修栈橋延長) としたものであり、各荷重時の法線の傾きを簡易的に示している。300kN 時までは、TS1 側 (陸側) の変位が先行しているが、400kN 時にその差がなくなり、その後 500kN および除荷過程においては変位の偏りがなかった。図より除荷後には 7mm 程度の残留変位が生じていた。

絶対変位と補正荷重の関係を図-1 3 に示す。補正荷重とは、図-1 0 の反力桁のたわみ量と載荷荷重の関係において、反力桁にたわみが生じはじめた荷重が 50kN 程度であったことから、この値を計測値から差し引いて補正した荷重である。TS1、TS2 とともに、同図に併記したケース 2 の予測値と比べると、同一変位になるときの荷重は 100kN 程度大きかった。絶対変位が 2.5mm 程度生じてからの傾きが、ケース 2 の予測値の傾きと概ね同等であることから、この荷重差は、事前検討で考慮していなかった隣接する既設栈橋との載荷初期のかみ合いに伴う抵抗や地盤条件の違い等が影響して生じたものと推察される。

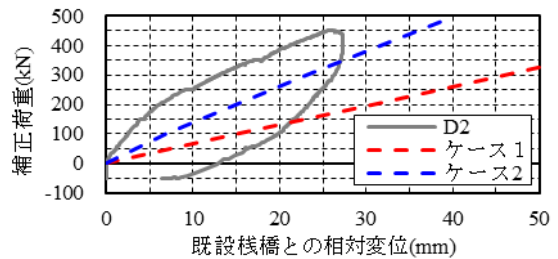
相対変位と補正荷重の関係を図-1 4 示す。荷重時は D1 側 (陸側) と D2 側 (海側) に差は無く、除荷時の残



(a) D1 と D2 の比較



(b) 事前検討との比較 (D1 側)



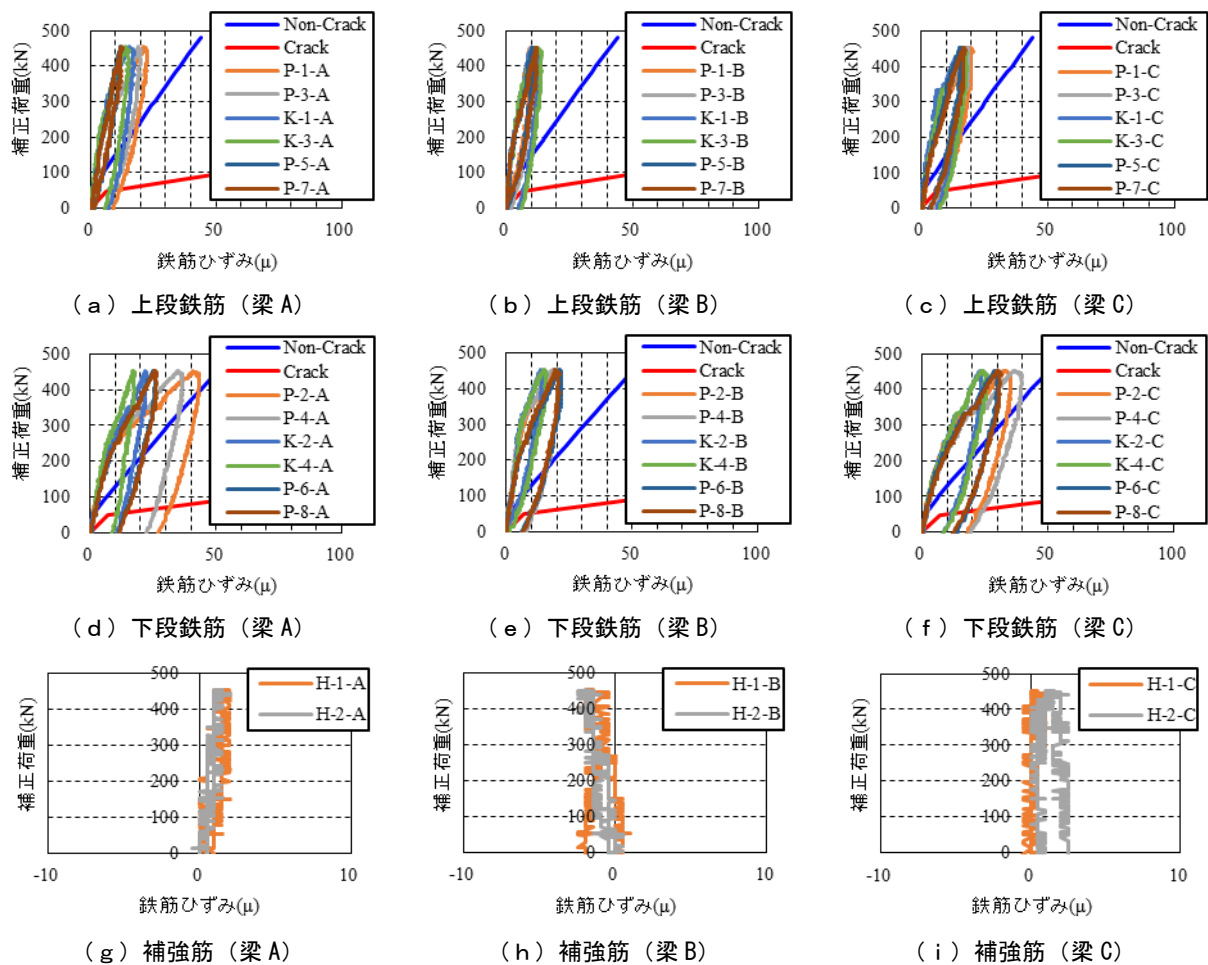
(c) 事前検討との比較 (D2 側)

図-1 4 相対変位と補正荷重の関係

留変位は D2 側の方が大きかった。相対変位についても絶対変位とほぼ同様の関係が見られた。

### (3) 鉄筋ひずみ

鉄筋ひずみと補正荷重の関係を図-1 5 に示す。図中の鉄筋ひずみは、図-9 の各計測箇所の上または左右両面に貼付けたワイヤストレインゲージの計測値を平均したものである。また、Non-Crack および Crack は、それぞれ、表-3 におけるひび割れ発生なしとひび割れ発生ありの事前検討結果を示している。ループ鉄筋のひずみは、特に下段鉄筋において、曲げ始点部 (P、K-1~4) が直線部 (K-5~8) に比べて相対的に大きくなる傾向が認められたが、いずれの梁の計測箇所においても、事前検討におけるひび割れが発生していない状態での鉄筋ひずみよりも小さい値を示した。一方で横方向鉄筋については、ひずみがほとんど生じておらず、本実験の載荷荷重の範囲においては、ループ内部に顕著な損傷はなかったものと推察される。以上の結果より、鉄筋ひずみの計測値が予測値より小さく、一番大きくひずみが生じている箇所においても想定ひずみを超えなかったことから、鉄筋ひずみに対しても、事前検討の結果は安全側に評価できていたといえる。



図一 15 鉄筋ひずみと補正荷重の関係

なお、荷重後に杭頭接合部のひび割れ発生の有無を確認するため、栈橋下面からの目視調査を行ったが、損傷等の異常は確認されなかった。

#### 4. まとめ

実構造物で実施した水平荷重試験により、以下の知見が得られた。

- (1) 荷重と絶対変位および相対変位の関係より、栈橋の水平変位の測定値は、事前検討の予測値よりやや小さく、荷重初期を除いて同様の傾きで推移する。
- (2) 荷重と鉄筋ひずみの関係より、鉄筋ひずみは、事前検討におけるひび割れが発生しない場合の予測値よりも小さくなる。

以上の結果から、供用時において想定される荷重の範囲について、事前検討による予測が安全側に評価できており、小径ループ継手接合を用いたプレキャスト栈橋において、既往の設計手法での照査が有効であることが確認できた。

#### 参考文献

- 1) 竹中寛, 末岡英二, 水谷征治, 合田和哉, 白庄司健之, 中嶋道雄, 常盤敏, 岩波光保: 栈橋を対象としたループ継手を有する梁の力学性状について, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, No.2, I\_551-556, 2019
- 2) 竹中寛, 高橋佑弥, 水谷征治, 合田和哉, 白庄司健之, 中嶋道雄, 常盤敏, 岩波光保: ループ継手を有するプレキャスト梁の接合部の耐力評価, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.76, No.2, I\_552-557, 2019
- 3) 高橋 佑弥, 竹中 寛, 高淵 稔貴, 水谷 征治, 合田和哉, 白庄司 健之, 常盤 敏: 小径ループ継手を有するプレキャスト接合部の耐力に関する実験的検討, 土木学会論文集, 80 卷 18 号, 24-18067, 2024
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 [コンクリート橋編], 2017