

接岸・荷役分離方式と鋼板・炭素繊維接着工法により早期復旧した荷役栈橋の震災復旧

Earthquake Disaster Reconstruction of Damaged Unloading Pier by Steel Plate and Carbon Fiber Bonding Method
(Berthing Function and Unloading Function is Separately Considered)

東亜建設工業株式会社 正会員 吉田 敏
東亜建設工業株式会社 日南田 登志朗
東亜建設工業株式会社 正会員 守分 敦郎

1. まえがき

平成7年1月17日未明発生した阪神・淡路大震災は、神戸港を中心に未曾有の被害をもたらした。

神戸港の穀物物流バースである当荷役栈橋も、鋼管杭杭頭部肉厚変化点付近の座屈、上部コンクリートのひび割れ、剥離、剥落等全体に渡り甚大な被害を受けた。被害状況をまとめると、①走行クレーン倒壊による上部工スラブの押抜きせん断破壊、②レールの水平破断、③上部工梁端部には付着割裂ひび割れそして斜めせん断ひび割れが、また梁中央部には曲げひび割れがほぼ全体に発生、④杭頭部は上下方向地震力による水平ひび割れ、さらに杭頭曲げモーメントによる縦ひび割れが発生、⑤鋼管杭の頭部肉厚変化点付近には全鋼管杭の40%に座屈発生であった。

当荷役栈橋は、その社会的重要性及び使命から早期復旧・供用開始が最優先された。

栈橋復旧の補修・補強工法は、①水平力（船舶接岸力）に対応するため栈橋前面にドルフィンの新設し接岸・荷役を分離する、②鋼管杭の座屈部分はスタッドジベルと鋼板巻立てコンクリート被覆工で、③上部コンクリートのひび割れ・剥離・剥落部はVカット樹脂充填及び無収縮モルタル充填後鋼板・炭素繊維接着工法、で行った。そして復旧後は速やかに計測工を行い安全確認を行った。当稿は、栈橋機能を接岸と荷役に分離し、鋼板及び炭素繊維接着工法で早期復旧させた荷役栈橋の設計・施工について報告する。

2. 対象施設及び地盤特性

当荷役栈橋は、神戸港東部4工区の南側に位置し、昭和44年頃施工されている（図-1）。

構造は、延長L=214m(10ブロック)の直杭式(φ1200 n=192本)横栈橋で、バケット式アンローダ(500t/h)2基・ニューマチックローダ(300t/h)1基を搭載し、最大80,000DWT級貨物船が着栈できる。

当地区の海底地盤特性は、-24m以浅の軟弱層と-24m以深の砂と砂礫の交互に分けられる。当荷役栈橋の被災前の標準断面図を図-2に示す。軟弱層区間は、部分的に砂杭の振動圧入（置換率70%）による地盤改良が行われているのが特徴である。

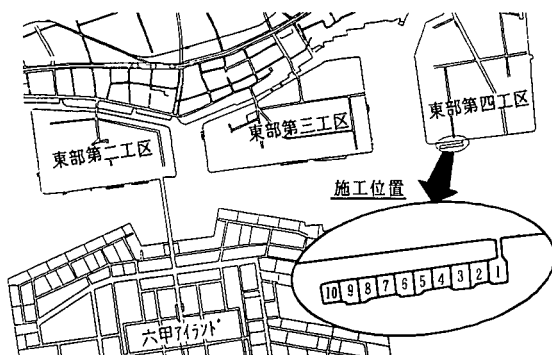


図-1 位置図

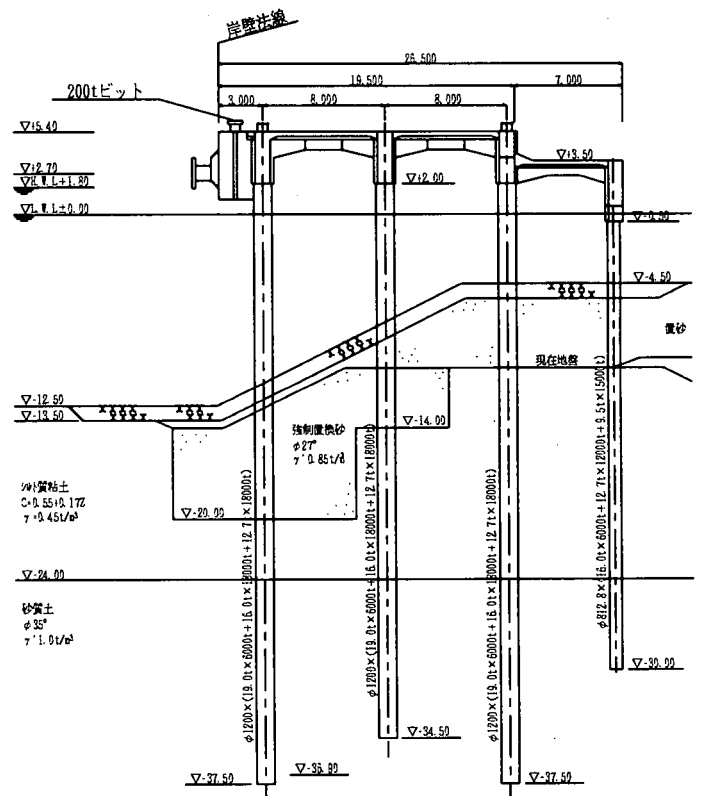


図-2 被災前標準断面図

○キーワード ; 栈橋復旧、接岸荷役分離、鋼板接着工、炭素繊維接着工

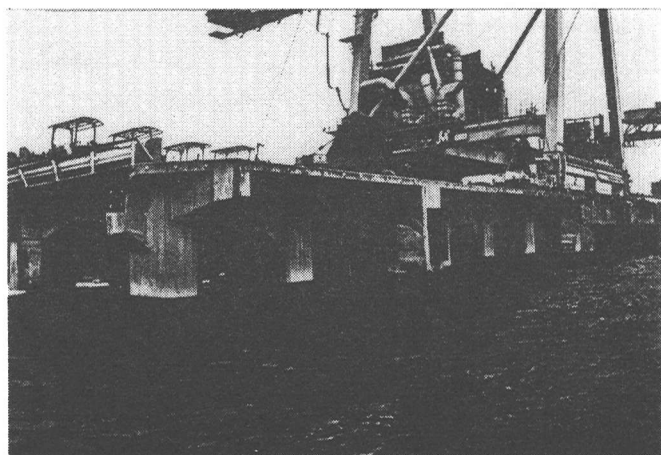
○連絡先 ; 横浜市中区日本大通18KRCビル7F TEL 045-664-1336, FAX 045-663-7834

3. 被災状況と損傷パターンの分類

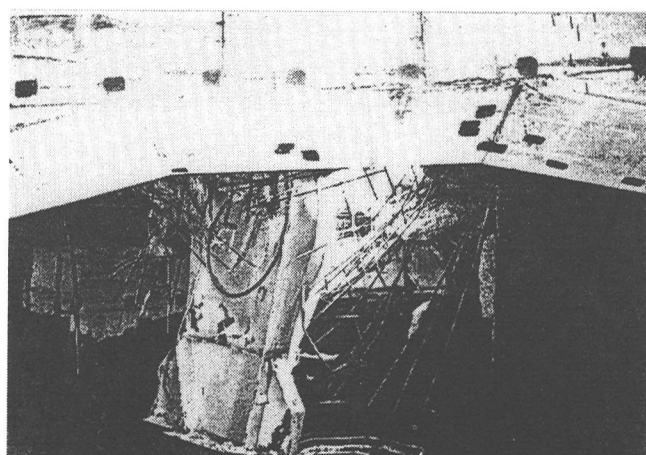
荷役栈橋のほぼ全般に渡り、ひび割れ、剥離、剥落が発生し、特に杭頭部、梁端部付近に被害が集中した。また鋼管杭頭部は、座屈が発生した（被災状況全景 写真－1）。

3-1. 床版の被災状況

栈橋上面から調査した結果、ニューマチックロードの倒壊による破損（押抜きせん断破壊）が最も大きな損傷であった（写真－1）。しかしそれ以外の床版においては、外観上大きな損傷はみられず、ニューマチックロードの倒壊による破損付近においても、顕著なひび割れ、圧壊は確認されなかった。また底面側からの目視調査でも、塩害劣化の補修箇所があるものの、地震荷重による被害は上述の押抜きせん断破壊がみられた床版だけであった。



写真－1 被災状況全景

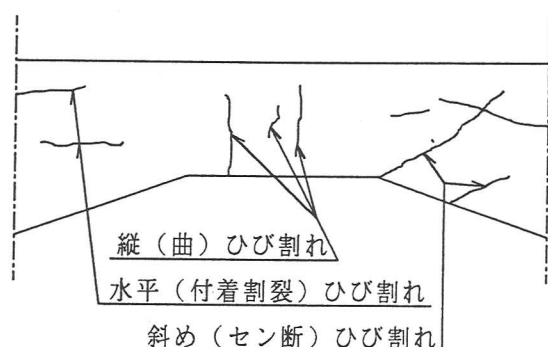


写真－2 ニューマチックロード倒壊による破損

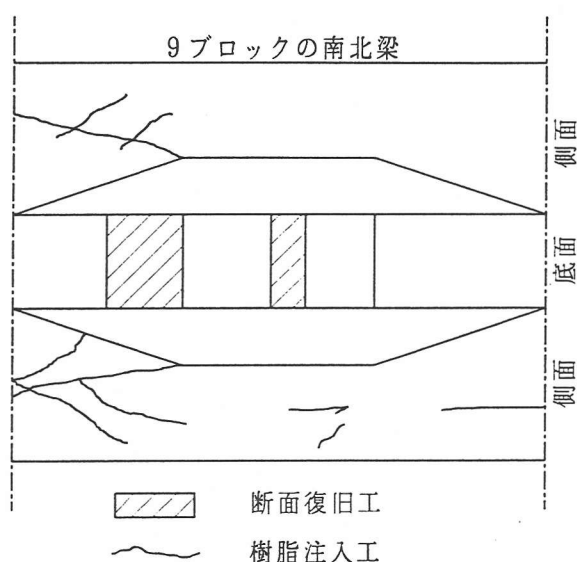
3-2. 梁部材の損傷パターン

梁部材のひび割れパターンは、梁端部に発生した水平（付着割裂）ひび割れ、そして斜め（せん断）ひび割れ、梁中央に発生した縦（曲げ）ひび割れに分類される。梁端部に発生した水平ひび割れ、斜めひび割れは、ほとんど全ての梁部材に発生した。特に荷役機械等の重量物が載荷されていた区間の被害が大きかった。ひび割れ長さ及び幅は、種々多様であったが、概ね長さ 50～70cm 程度以下、幅 0.5～1.0mm 程度以下であった。梁中央の縦ひび割れ発生数は、梁端部の水平、斜めひび割れの発生数に比べて少ないが、そのひび割れ長さ及び幅は同程度であった。さらに梁端部の水平、斜めひび割れが数多く発生している部分は、剥離、剥落している箇所が多数確認された。

梁部材ひび割れ発生状況のパターン図を図－3 に、梁部材ひび割れ状況展開図を図－4 に示す。



図－3 梁部材ひび割れ発生パターン図



図－4 梁部材のひび割れ状況展開図

3-3. 杭頭部の損傷パターン

杭頭部のひび割れパターンは、縦ひび割れと水平ひび割れに分類できる。縦ひび割れは、ほとんど全ての杭頭部に発生した。特に栈橋の西側ブロックで多く発生した。水平ひび割れは、縦ひび割れほど多く発生していないが、栈橋東側ブロックより西側ブロックで多く発生した。縦ひび割れの発生状況は、杭頭部の上から下まで入っているのが多く、また数列平行して入っているものが多かった。水平ひび割れの発生状況は、梁部材との接合付近から杭頭中央付近の区間に多く発生し、数列平行に入っている状況が多かった。さらに縦ひび割れと水平ひび割れが同時に入っている状況は、栈橋西側 8, 10 ブロックで多かった。さらに縦ひび割れと水平ひび割れが同時に数多く発生している部分では、梁部材同様、剥離、剥落が多数確認された。杭頭部ひび割れ発生パターン図を図-5に、そして杭頭部ひび割れ状況展開図を図-6に示す。

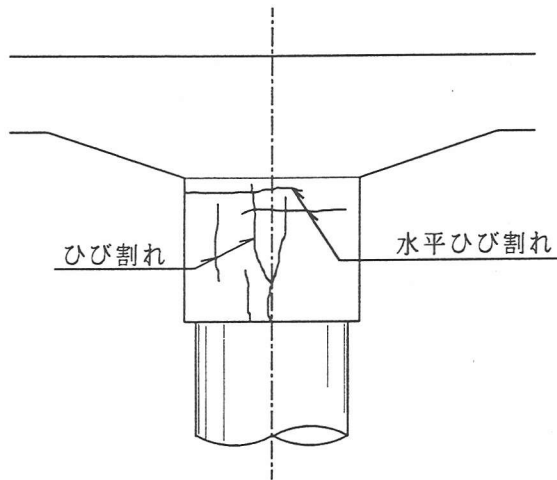


図-5 杭頭部ひび割れ発生パターン図

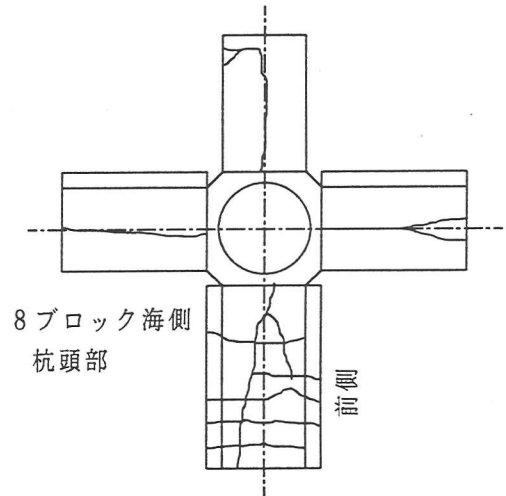


図-6 杭頭部ひび割れ状況展開図

3-4. 鋼管杭の座屈状況

鋼管杭の座屈状況は、次の通りにまとめられる。

- ① 栈橋全体に渡って水面下 2m~3m の肉厚変化点付近でへこみ・膨らみが発生、② そのへこみ・膨らみ量は 10mm~70mm 前後で長さは杭の半円周に及んだ、③ そしてへこみ・膨らみはほとんど陸側（北側）に向かって発生し特に栈橋西側ブロックで多かった、④ さらに部分的に破断（スパイラル溶接部など）している杭も確認された、尚海土中の座屈発生については不明。

鋼管杭の座屈位置図を図-7に、また座屈状況を写真-3に示す。

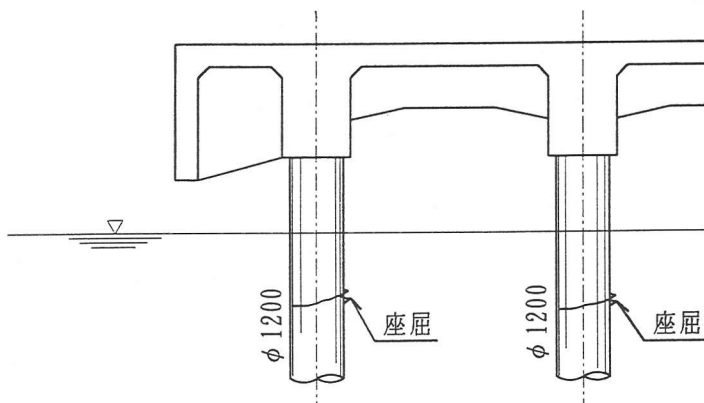


図-7 鋼管杭の座屈位置図

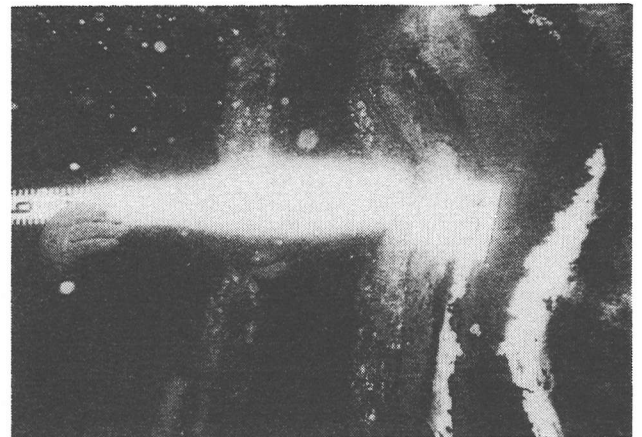


写真-3 座屈状況

4. 被災状況の分析と復旧方法の考え方

当荷役栈橋は、社会的重要性及び使命から早期復旧・供用開始を最優先とするであった。

4-1. 床版

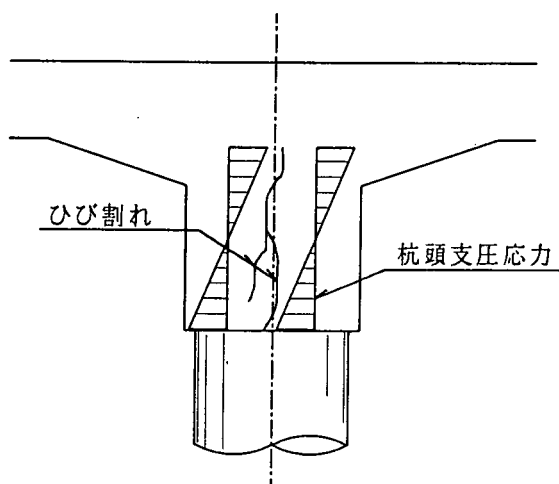
栈橋上面からの調査そして底面側からの目視調査において、ニューマチックローダ倒壊による破損（押し抜きせん断破壊）以外、外観上大きな損傷（ひび割れ、圧壊）は見られなかったので、床版は震災以前の状態を維持していると推測される。

4-2. 梁部材

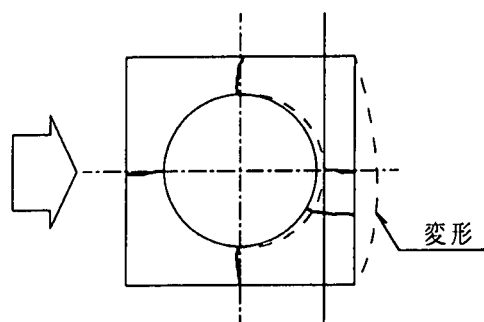
コンクリートのひび割れ幅と内部鉄筋応力度の関係は、鉄筋降伏点応力（ σ_{sy} ）が一般的に 3000～3500 kg f/cm² 程度であることを考慮に入れると、概ね 1mm 程度のひび割れで、内部鉄筋の降伏が生じると推測される¹⁾。一方当梁部材の水平（付着割裂）ひび割れと斜め（せん断）ひび割れ、そして曲げひび割れの状況はその長さで 50～70 cm 程度以下、幅で 0.5mm～1.0mm 程度以下であった。鉄筋の降伏が生じているか否かの選択は難しいが、当復旧方法は、①ひび割れ幅は 0.5mm～1.0mm 程度で、深さ方向の貫通はしておらず（目視）鉄筋のかぶり付近で止まっていると推測されること、②床版部の圧壊が見られないこと、③被災後も荷役設備荷重を載荷したまま梁形状を維持していること、などから今以上ひび割れ幅を広げさせないことを基本とし、Vカット樹脂充填、そして無収縮モルタル充填による断面成形で補修し、さらに梁側面にはせん断補強用鋼板、また梁底面には曲げ補強用炭素繊維を接着し補強することにした。

4-3. 杭頭部

杭頭部に発生した縦ひび割れの原因は、強い水平地震力によって杭頭部に大きな曲げモーメントそしてそれに伴う支圧応力が発生し、コンクリートが引張力を受け、鋼管杭に沿うひび割れが発生したと推測される（図－8）。この部分のコンクリートは、梁部材からの荷重を鋼管杭に伝達させる重要な部分であり、杭頭モーメントに対してコンクリートの支圧で受けるため、十分な拘束力を持つ補修・補強が必要となる。杭頭部のひび割れ・剥離部分の補修は、梁部材同様Vカット樹脂充填、無収縮モルタル充填そして鋼板接着工、そして炭素繊維接着工で行うが、①杭頭部形状が四角であることから鋼板及び炭素繊維の変形が予想されること（図－9）、②損傷が甚大でひび割れが杭表面に達しており補修しても拘束力が期待できないこと、などから水平荷重を直接当荷役栈橋に作用させないことを基本とした。即ち常時水平力の最大外力は船舶接岸力であることから、当荷役栈橋前面に接岸ドルフィンの新設し、接岸と荷役作業を分離するとした。



図－8 縦ひび割れ発生推測図



図－9 鋼板・炭素繊維変形予想図

水平ひび割れの原因は明確ではないが、大きな上下方向の地震力により引張力が作用し、また配筋上このような外力が考慮されていないことも原因の1つとなって、ひび割れが発生したと推測される。一般的直杭式栈橋では、通常の供用状態で大きな引張荷重の作用は少ないので特別な補強は必要ないものと推測されるが、耐久性向上と構造的安定から、縦ひび割れと同様の補修を行うとした。

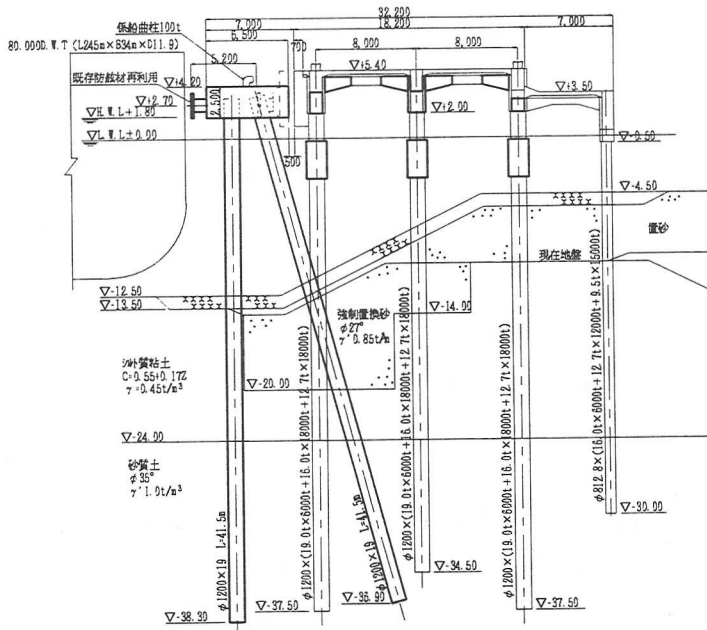
4-4. 鋼管杭

潜水士を入れての計測そして水上からの目視調査から次のことが判った。

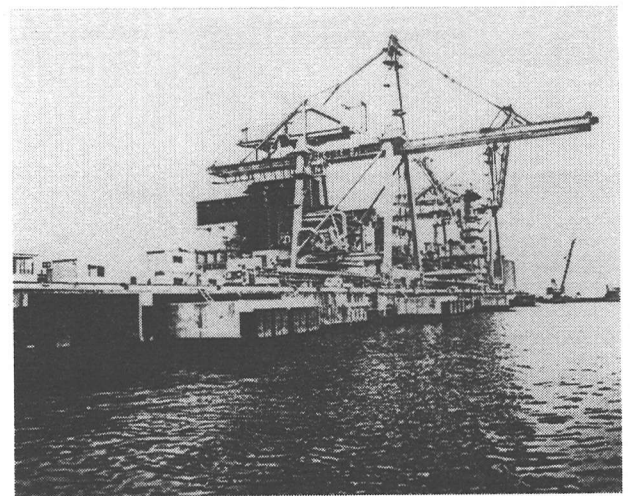
①梁部材同様被災後も荷役設備荷重を支えたまま自立している。②鋼管杭の傾斜はゼロであり海土中での座屈発生は推測されにくい。③杭頭部肉厚変化点付近座屈範囲及びスパイラル亀裂範囲はすべての杭で上下方向に0.5m～1.0m程度以下であった。以上のことから復旧方法は部分的な補修・補強で耐力維持できるとした。しかし水平外力に対しては、①鋼管杭の座屈後の水平力に対する残存耐力が不明であること、②杭頭コンクリートの耐力が期待できないこと、から対応できないとした。即ち鉛直荷重のみに対する対策として、座屈部分にスタッドジベルと鋼板巻立て鉄筋コンクリートを被覆させ補修・補強するとし、スパイラル部の亀裂は、鋼板の溶接により補修するとした。

5. 復旧断面及び復旧内容

当荷役棧橋の復旧断面図を図－10にまた完成後の全景を写真－4に示す。そして復旧工事の内容を表－1に示す。



図－10 復旧断面図



写真－4 完成後全景

表－1 数量表

主要工種	数量	備考
新設ドルフィン工	4基	鋼管杭(φ1200、L=41.5m)24本打設、π型防舷材
鋼管杭補修工	62本	スタッド工法、スタッド+鋼板溶接工法、鋼板溶接工法
既設コンクリート補修	1式	ひび割れ補修、断面修復工法、CFRP工法、鋼板接着工法
新設レール工	388m	74kg/cmレール、逸走防止金物、エンドストッパー
既設コンクリート復旧工	1箇所	開口部2.0×1.5m→4.0×3.0m撤去
鋼管杭防食工	24本	FRP被覆防食及び電気防食
計測工	1式	荷役作業及び波浪等が既設荷役棧橋に与える影響

6. 復旧工法(施工)の特徴

6-1. ひび割れ補修工と断面修復工

ひび割れ箇所の注入は、エポキシ樹脂で行った(図－11)(写真－5)。また断面修復工は、剥離・剥落深さを30mm、50mm、80mmに分類し、30mmの場合は軽量エポキシ樹脂パテ材、50mmは特殊ポリマーセメントモルタル、80mmは型枠をあて無収縮モルタル充填とした(図－12)。

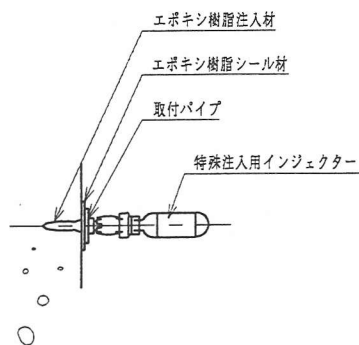


図-11 ひび割れ補修工

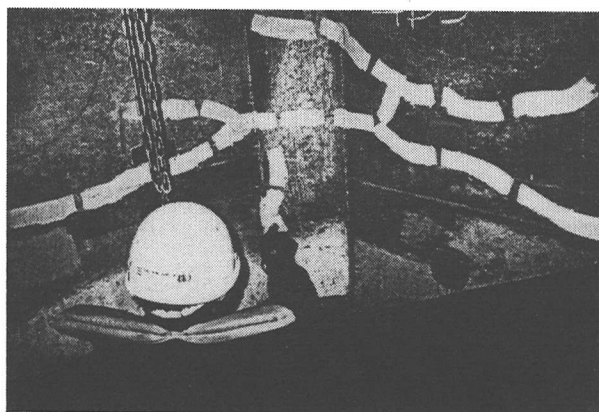


写真-5 エポキシ樹脂注入状況

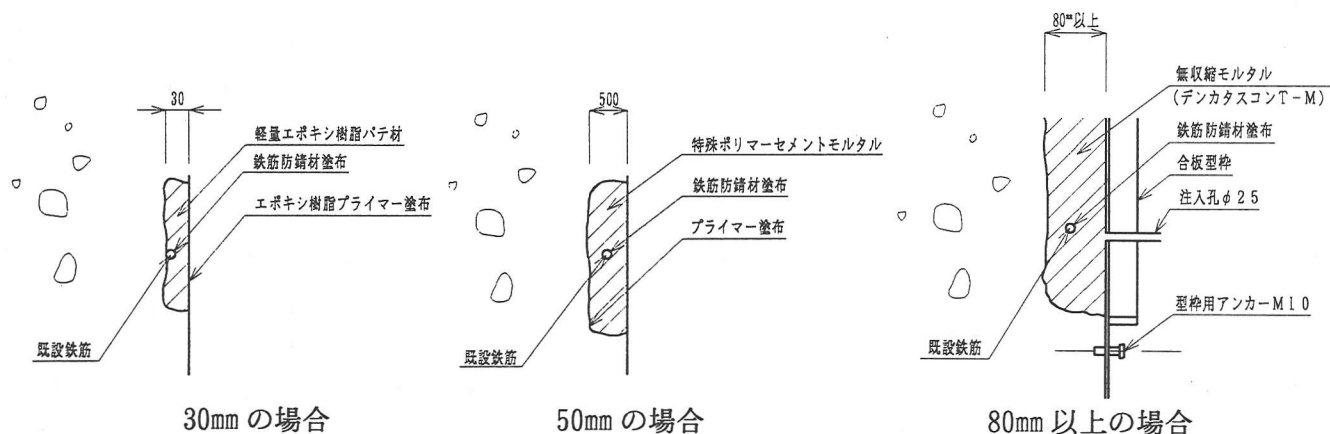


図-12 断面修復工

6-2. 鋼板接着工と炭素繊維接着工

①鋼板接着工

鋼板接着工は、梁部材のせん断補強として梁側面に鋼板 ($t=6\text{mm}$) を接着一体化させ、耐荷力を増強させる方法である。鋼板接着工の施工は、断面修復工で断面を復元そして表面処理した後アンカーボルトで鋼板 ($t=6\text{mm}$) を接着固定した。この時鋼板周囲及びアンカーボルト付近から注入材が漏れないようにエポキシ樹脂シール材でシールし、シール材が硬化した後エポキシ樹脂注入材を注入ポンプで注入した。

鋼板接着状況を写真-6に示す。また梁部材接着補強図を図-13に示す。

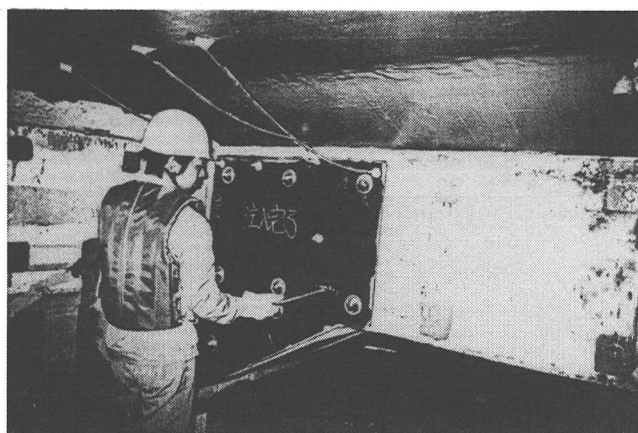


写真-6 鋼板接着状況

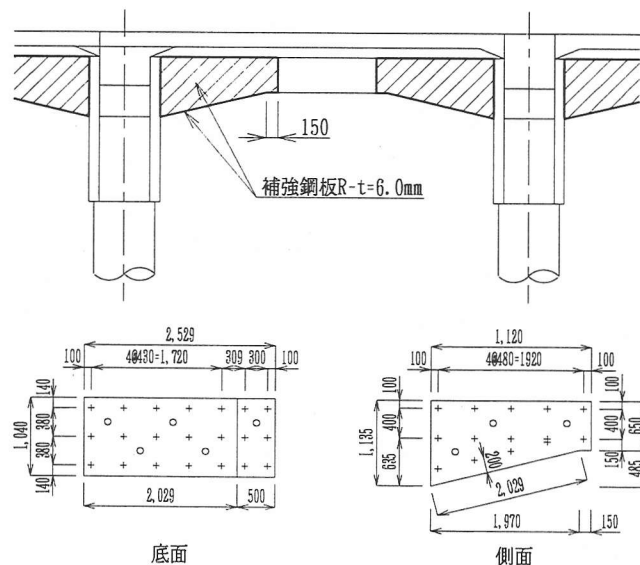
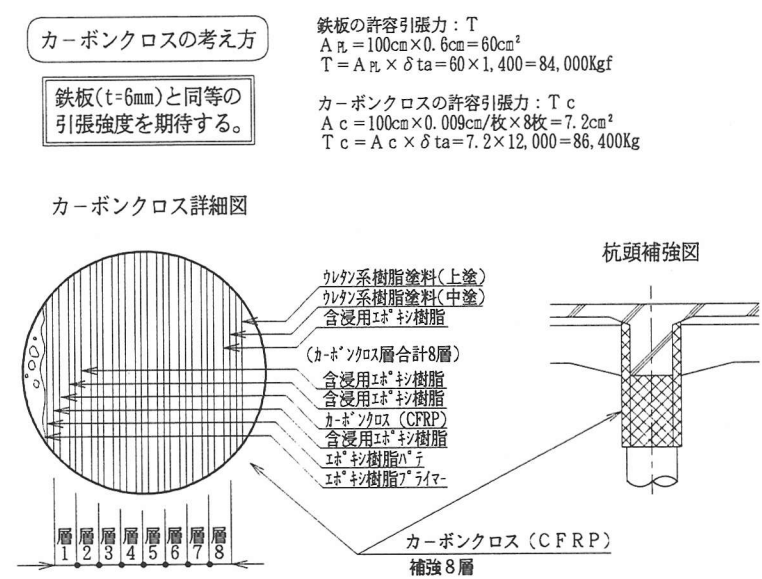


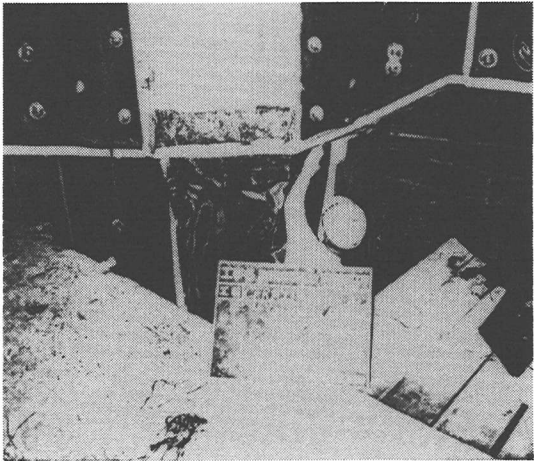
図-13 梁部材接着補強図

②炭素繊維接着工

炭素繊維接着工は、梁部材の底面そして杭頭部の曲げ引張補強として、炭素繊維シートをエポキシ樹脂で含浸させながら積層接着し耐荷力を増強させる方法である。炭素繊維接着工の施工は下地処理後プライマー塗布を行い不陸調整し、炭素繊維シートをエポキシ樹脂で含浸させながら順次積層していった。炭素繊維接着工の断面と考え方を図－１４に示す。そして炭素繊維接着状況を写真－７に示す。



図－１４ 炭素繊維接着工の断面と考え方



写真－７ 炭素繊維接着状況

7. 工程表

全体工程表を図－１５に示す。

月 日	1月			2月			3月			4月			5月			6月		
工 種	10	20	30	10	20	28	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
調査・設計・測量																		
接岸ドルフィン 新設工(4基)																		
鋼管杭座屈補修工																		
梁部材、杭頭部 補修工																		
アンローダレール 補修工																		
床版破損部補修工																		
鋼管杭防食工																		
計 測 工 (1年間計測)																		

図－１５ 全体工程表

8. 計測工

補修した荷役栈橋の安全確認のため、復旧後速やかに計測工を行った。

- ①杭に作用する鉛直荷重及び振動による影響を計測→鋼管杭頭部にひずみ計を取付(13本×2側=26ヶ)
- ②コンクリート梁部材、杭頭部の亀裂変位を計測 →コンクリート表面に亀裂変位計を取付(21ヶ所)(写真8)
- ③各ブロック間の目地間隔変位を計測 →各ブロック目地部に継目計を取付(9ヶ所)(写真-9)
- ④栈橋上の積載による鉄筋の発生応力を計測 →床版下部鉄筋にひずみゲージ取付(30ヶ所)
- ⑤栈橋上の積載による補強鋼板の応力を計測 →補強鋼板にひずみゲージ取付(20ヶ所)

計測工は、約1年間行ったが、大きな変化は見られなかった。

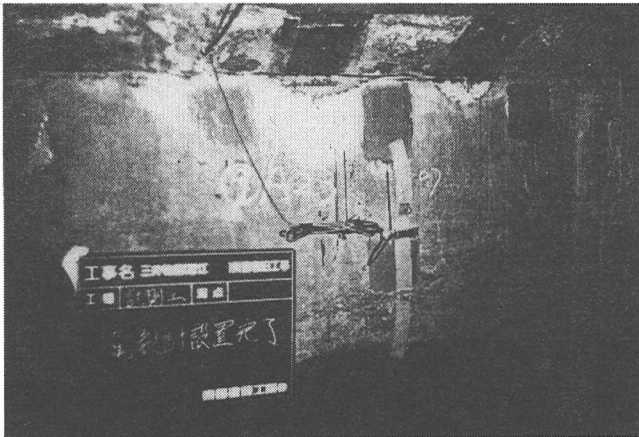


写真-8 亀裂変位計測 (亀裂変位計)

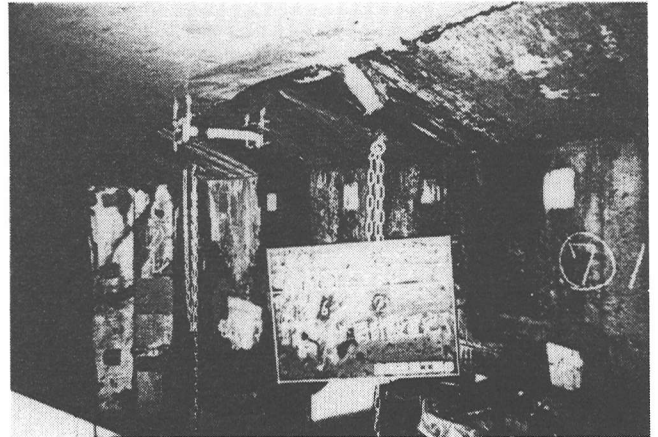


写真-9 目地間隔計測 (継目計)

9. あとがき

震災復旧工事は、予定通り4ヶ月で完了し、当栈橋は西日本を代表とする穀物物流バースとして現在その機能を充分発揮している。今回の様に、荷役栈橋を「接岸」と「荷役」に分離し、鋼板・炭素繊維接着工法により早期復旧した事例は初めてと思われる。炭素繊維接着工は、建築物・道路橋での適用例が主で、海上での事例は少ないと思われるが、港湾施設においてもこれからは耐震性を考えてじん性をもたせる構造研究が進むなか、炭素繊維やアラミド繊維シートによる補強の技術開発は、耐震補強・補修対策の汎用手段として期待される。

参考文献

- 1) .(社)土木学会；コンクリートライブラリー第61号 P202
- 2) .(社)日本港湾協会；港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 3) .(財)沿岸開発技術研究センター；港湾構造物補修マニュアル