

## 鋼板添接補修鋼管杭棧橋の地震時挙動と必要添接板厚に関する検討

Required patch plate thickness based on seismic behavior of steel piled jetty repaired by steel patch plate

古西和夫\*, 北根安雄\*\*, 伊藤義人\*\*\*  
Kazuo Furunishi, Yasuo Kitane, Yoshito Itoh\*博士(工), 東洋技研コンサルタント株式会社, 名古屋支社(〒460-0003 名古屋市中区錦1丁目)  
furunisi\_k@toyogiken-ccei.co.jp

\*\*Ph.D., 名古屋大学大学院准教授, 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*\*工博, 名古屋大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

This paper presents a study on seismic behavior of steel piled jetty repaired by steel patch plates, and shows a study concerned with a required thickness of steel patch plate. In this study, the whole FE model is used to study the seismic behavior of a piled jetty. Furthermore, the cantilever FE model is examined to propose a required thickness of steel patch plate. From the time history response analysis, it is shown that seismic behavior of the steel piled jetty repaired by steel patch plates becomes almost the same as behavior of the intact piled jetty. Based on pushover analyses of a number of cantilever FE models, an empirical formula to determine the required thickness of patch plate is proposed for the repair design of corroded steel pile.

*Key Words: corroded steel pipe, patch plate, seismic behavior, repair design*

キーワード: 腐食鋼管杭, 添接板, 地震時挙動, 補修設計

## 1. まえがき

近年, 高度経済成長期に建設された構造物が劣化・損傷し, ストックされた構造物の維持管理の重要性が広く認識されている. 鋼構造物では腐食が劣化・損傷の主要原因の1つであり, 特に厳しい腐食環境下にある港湾鋼構造物では, 防食が十分に施されていない場合, 耐荷力および耐震性能の低下が著しい構造物が存在する.

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>1)</sup>は平成19年7月に改訂され, これまでの許容応力度法による仕様規定から全面的な性能規定へ移行した. しかし, 腐食鋼管杭の鋼板溶接による補修設計においては, 腐食鋼管杭の減肉量をもとに, 必要な断面積や断面二次モーメントに対して, 添接板の板厚が決定されており, 補修部の減肉鋼管杭と添接板の座屈挙動や変形性能については十分に考慮されていないのが現状である.

そこで著者ら<sup>2)</sup>は, 添接板補修された腐食鋼管の繰り返し曲げ実験結果と解析結果の比較検討を行った. さらに, 鋼管杭の片持梁モデルを作成して軸力を受ける添接板補修鋼管杭の繰り返し曲げ挙動解析を行い, 必要添接板厚に関して考察を行った<sup>3)</sup>. その後, 添接板補修され

た腐食鋼管棧橋の全体モデルを作成して, 耐荷力および変形性能を調べるためプッシュオーバー解析を行い, 必要添接板厚の妥当性について検討を行った<sup>4)</sup>.

本研究では, プッシュオーバー解析を行った棧橋全体モデルを, 等価なモデルに置き換えて地震時の時刻歴応答解析を行い, プッシュオーバー解析により決定された必要添接板厚によって補修された鋼管杭棧橋の耐震性を確認することにより, 必要添接板厚の妥当性を検証する. また, 種々のパラメータを持つ片持梁モデルに対してプッシュオーバー解析を行い, 補修設計のための必要添接板厚に関する設計式について提案を行う.

## 2. 棧橋解析モデル

## 2.1 解析対象棧橋

解析対象棧橋は, 文献5)中の解析例である図-1に示す直杭式横棧橋を対象とする. 棧橋奥行き方向の杭間隔は6.5mで, 杭先端は良質地盤に支持されており, 上部コンクリートに作用する鉛直荷重は死荷重および上載荷重である. 海底地盤の上層部は軟弱層のため, 図-1に示すように良質砂置換で改良を行っており, 二層の地盤

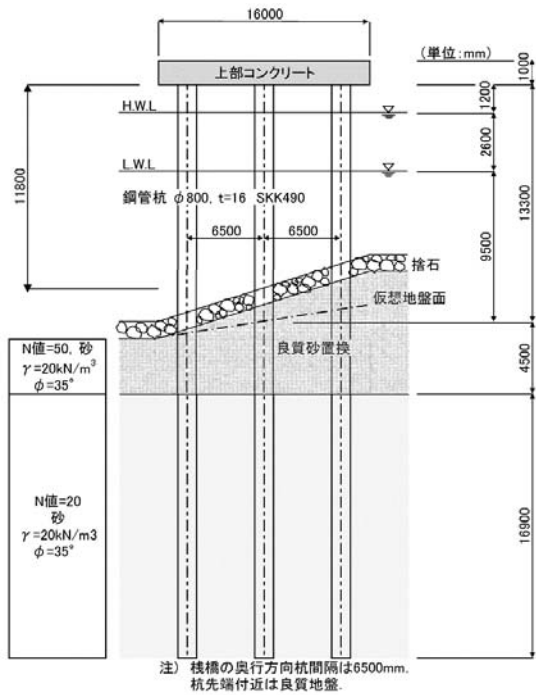


図-1 解析対象栈橋

のN値、単位体積重量 $\gamma$ および内部摩擦角 $\phi$ の値を図中に示す。港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>1)</sup>により、図中に示す仮想地盤面を設定している。

## 2.2 時刻歴応答解析モデル

時刻歴応答解析モデルを図-2に示す。このモデルは、文献4)に示した図-3のプッシュオーバー解析モデルを、杭下端より地震波を入力して地震応答解析を行うように変更したモデルであり、その概要は下記のようなものである。

- 1) 奥行き方向の対称性を考慮して鋼管杭 1/2 モデルにより解析を行う。
- 2) 栈橋全体の耐力力は鋼管杭上部の局部座屈により決定されることが予想され、図-2に示すように上部6000mmの部分シェル要素でモデル化する。
- 3) 上部コンクリートは弾性梁でモデル化し、上部コンクリートとシェル要素は剛性梁要素で結合する。
- 4) シェル要素から下方の鋼管杭は弾塑性梁要素（パイプ要素）でモデル化する。
- 5) 時刻歴応答解析モデルのバネ支点位置は、図-3のプッシュオーバー解析により得られた鋼管杭の最大曲げモーメント位置とする。
- 6) 時刻歴応答解析モデルの支点の3つのバネ定数は道路橋示方書-下部工編<sup>9)</sup>の“杭のバネ定数”による。
- 7) 上部コンクリートに作用する鉛直荷重は杭1列当たり死荷重86kN/mおよび上載荷重65kN/mであり、鋼管杭の自重も考慮する。

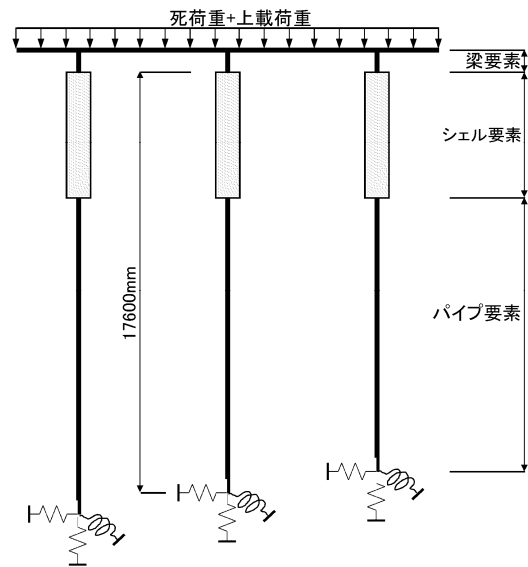


図-2 時刻歴応答解析モデル

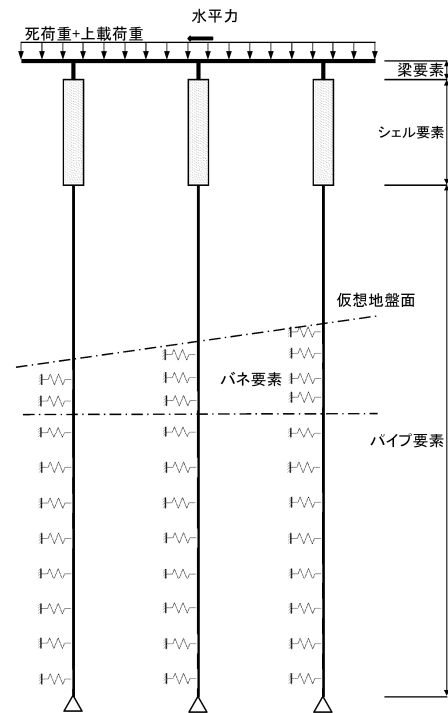


図-3 プッシュオーバー解析モデル<sup>4)</sup>

- 8) 地震時動水圧の影響を考慮するための水の付加重量は上部コンクリート重量の5%程度であり、解析においては考慮していない。

図-2に示す栈橋モデルのシェル要素部分の有限要素モデルを図-4に示す。図-4は、腐食減肉部を添接板で補修した場合のモデルを示している。シェル要素部の1/2鋼管断面円周方向分割数は60分割とし、軸方向要素は正方形に近い要素形状（最小寸法：20.5mm×20mm）とな

表-1 解析モデルに使用した鋼材の機械的性質

材料	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	引張強度時の ひずみ(%)
SKK490 SM490	315	490	2×10 <sup>5</sup>	0.3	18

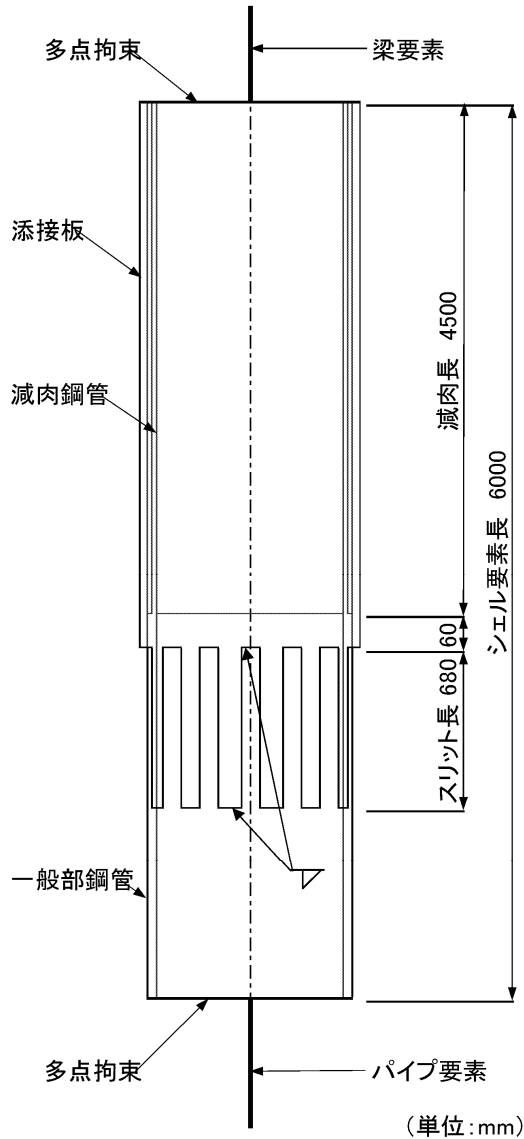


図-4 有限要素モデル

るようにして解析を行った。腐食減肉部の板厚は 2.3 に示す鋼管杭の腐食分布をモデル化し、腐食減肉部板厚を軸方向に変化させて解析を行った。鋼管および添接板は薄肉シェルを対象とした 4 節点シェル要素 (S4) でモデル化した。また、添接板と鋼管の接合は文献 7) に示されているすみ肉溶接の剛性 (剛性  $k_{w0}$ : 縦断方向 = 14kN/mm/mm, 横断方向 = 41kN/mm/mm) 使用して、弾性バネのコネクター要素 (弾性バネ  $k = k_{w0} \times l_c$ :  $l_c$  は 1 つのコネクター要素で示されるすみ肉溶接長) で接合した。

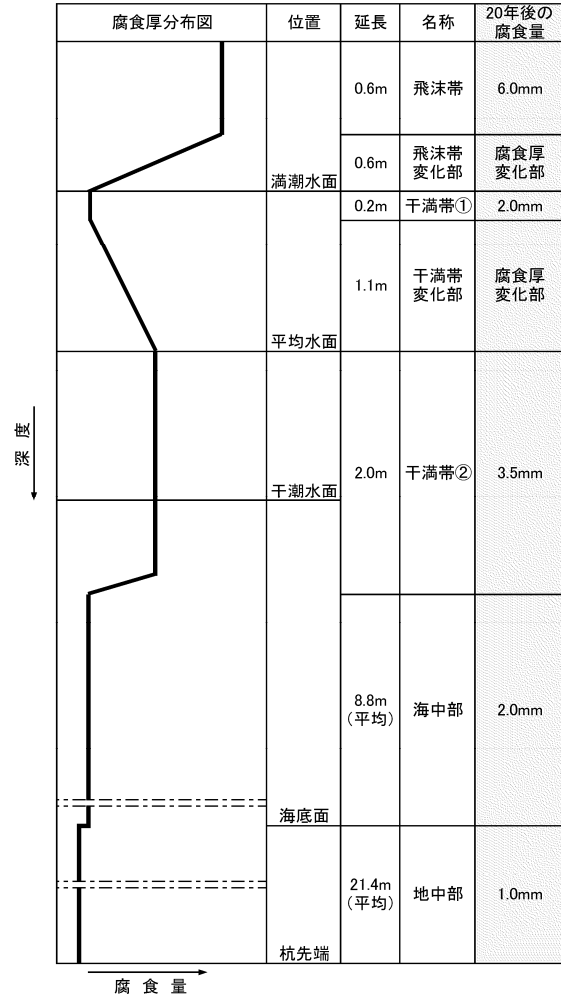


図-5 腐食厚分布

鋼管および添接板と梁要素、鋼管とパイプ要素は多点拘束により結合して解析を行った。モデル全体の要素数は 98811 となった。

栈橋に使用されている鋼管杭の材質は SKK490 で、添接板は鋼管杭と同等の機械的性質を有する SM490 を使用した。これらの材料定数を表-1 に示す。

解析には汎用有限要素プログラム ABAQUS ver.6.9<sup>8)</sup> を使用した。応力-ひずみ曲線はバイリニア型とし、降伏後の硬化則は線形 Ziegler の移動硬化則を使用した。なお、本研究では添接板補修された栈橋腐食減肉鋼管の挙動を明らかにすることを目的としており、鋼管の残留応力および初期不整は考慮していない。ただし、腐食鋼管の中心面の偏芯は考慮している。なお、数値解析は、名古屋

大学情報センターのスパコン CX400（富士通社製，計算速度 470 テラフリップス）を使用した。

### 2.3 腐食厚分布

鋼管杭の腐食環境は，飛沫帯，干満帯，海中部，海底土中部に分けられ，鋼管杭軸方向の腐食環境に応じた腐食分布を考慮してモデル化を行った。モデル化においては，実際の無防食鋼材の腐食状況に関する文献 9)，10) を参考にした。本研究では，腐食減肉鋼管杭の解析モデルにおいて腐食凹凸を考慮しておらず，耐荷力を評価するためには腐食量のバラツキを考慮する必要があるため，沿岸開発センターの板厚算定式<sup>11)</sup>により耐荷力評価に使用する有効板厚を算定した。使用した腐食厚分布<sup>4)</sup>を図-5に示す。

### 3. 解析モデルの比較

無欠損鋼管杭栈橋および補修鋼管杭栈橋について，図-2 の時刻歴応答解析モデルを用いてプッシュオーバー解析を行い，図-3 のプッシュオーバー解析モデルとの結果の比較を図-6 に示す。ここで， $P$  は上部コンクリートに作用する水平力で， $P_{y0}$  は無欠損鋼管杭栈橋のプッシュオーバー解析モデルで最初に降伏が生じる水平力で

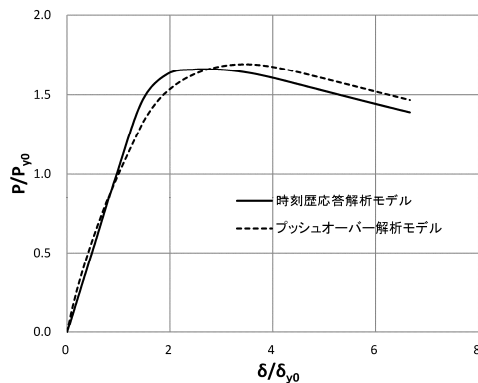
ある。 $\delta$  は上部コンクリートの水平変位で， $\delta_{y0}$  はプッシュオーバー解析モデルに  $P_{y0}$  が作用した場合の水平変位である。なお，プッシュオーバー解析モデルにおける横方向地盤バネは，バネ位置での受動土圧を地盤反力の上限值とする弾塑性バネ<sup>4)</sup>であり，荷重-変位曲線は非線形となる。

図-6 より，最大荷重時での変位に若干差異がみられるが，プッシュオーバー解析モデルの最大荷重時変位における水平力は大きく，初期剛性もほぼ一致しており，本研究では最大荷重時近傍を対象としているため解析モデルとして採用する。

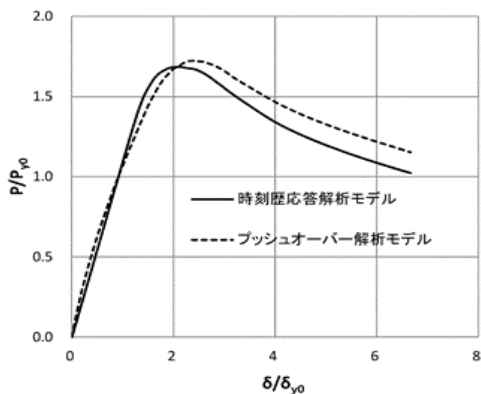
### 4. 時刻歴応答解析

#### 4.1 入力地震波

各港湾において耐震解析に使用する入力地震波が規定されているが，ここでは，最近の大きな地震動を考慮できる入力地震波を使用する。解析対象栈橋の地盤種別は II 種地盤であり，レベル 2 地震動（タイプ I）として東北地方太平洋沖地震の仙台河川国道事務所構内 EW 成分を，レベル 2 地震動（タイプ II）として兵庫県南部地震の JR 西日本鷹取駅構内 NS 成分<sup>12)</sup>を用いて解析を行う。使用した入力地震波形を図-7 に示す。

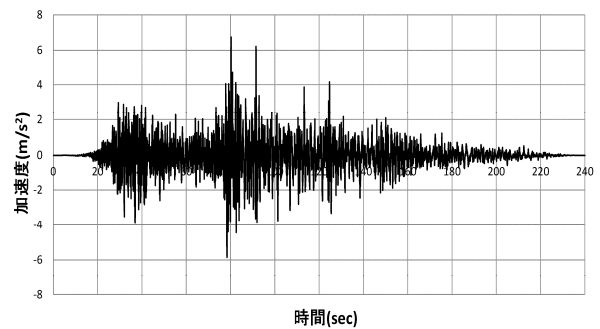


(a) 無欠損鋼管杭栈橋

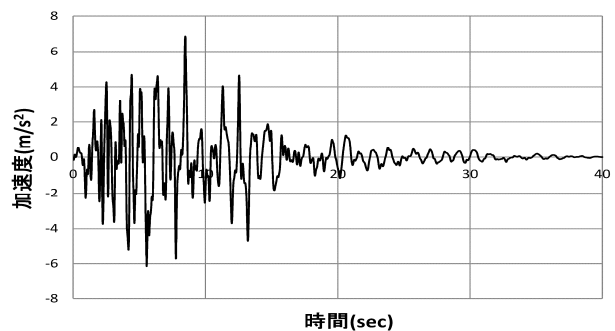


(b) 補修鋼管杭栈橋

図-6 両モデルの解析結果の比較

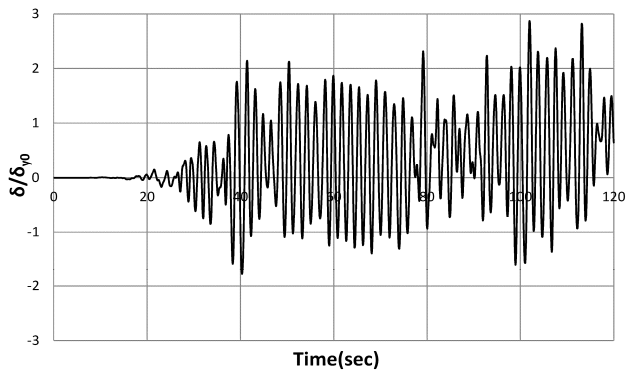


(a) 仙台河川国道事務所構内 EW 成分

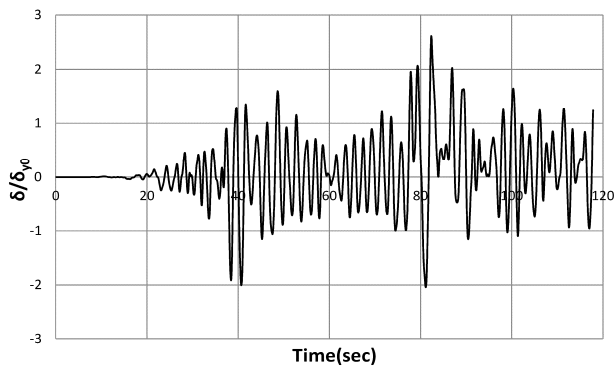


(b) JR 西日本鷹取駅構内 NS 成分

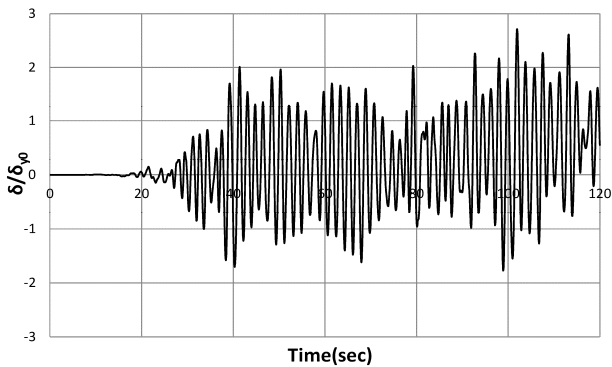
図-7 入力地震波



(a) 無欠損鋼管杭棧橋



(b) 腐食鋼管杭棧橋



(c) 添接板補修鋼管杭棧橋

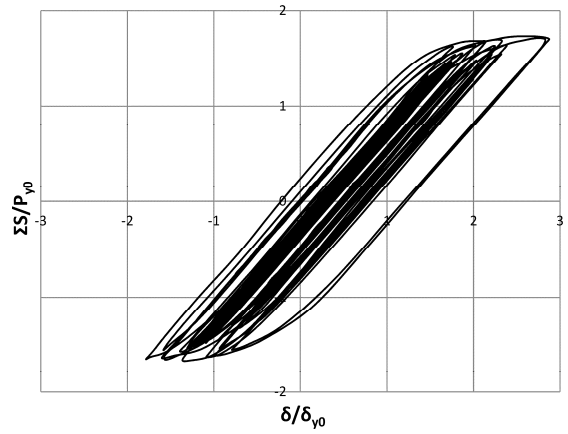
図-8 応答変位 (レベル2 タイプI)

表-2 最大応答水平変位 ( $\delta / \delta_{y0}$ )

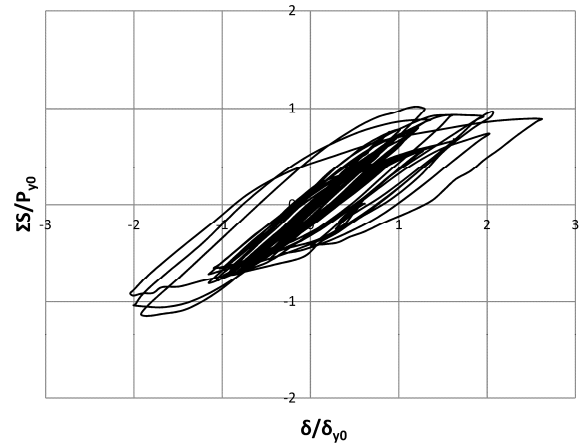
	無欠損鋼管棧橋	腐食鋼管棧橋	補修鋼管棧橋
タイプ I	2.87	2.62	2.72
タイプ II	2.44	2.36	2.44

#### 4.2 レベル2 (タイプI) 地震時の挙動

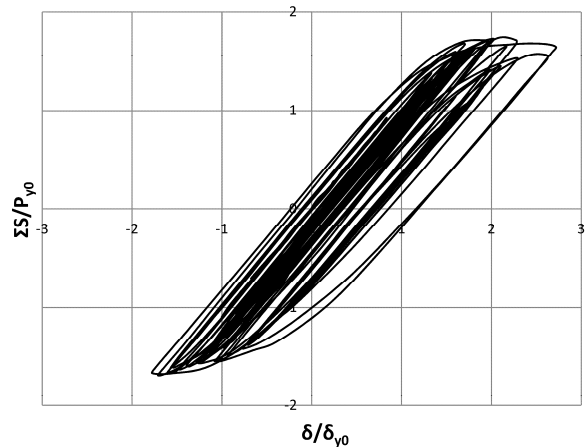
無欠損鋼管杭棧橋, 腐食減肉鋼管杭棧橋および添接板補修鋼管杭棧橋のレベル2 (タイプI) 地震動による上部コンクリート部での応答変位履歴 (120 秒間) を図-8 に示す。また, 最大応答水平変位を表-2 に示す。添接



(a) 無欠損鋼管杭棧橋



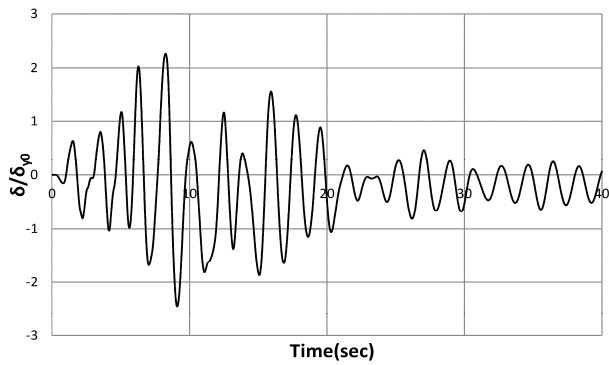
(b) 腐食減肉鋼管杭棧橋



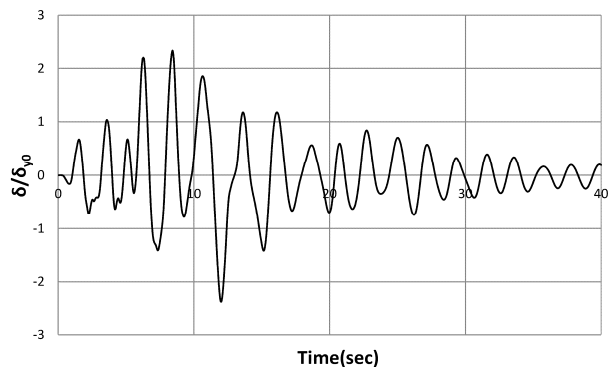
(c) 添接板補修鋼管杭棧橋

図-9 応答変位-基部せん断力関係 (レベル2 タイプI)

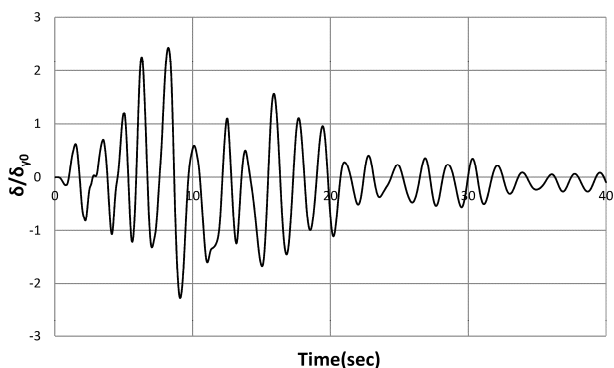
板補修鋼管杭棧橋の添接板厚は, 文献4)のプッシュオーバー解析モデルによる解析結果に基づき必要添接板厚を9mmとして解析を行った。これらの図より, 無欠損鋼管杭棧橋と添接板補修鋼管杭棧橋とは, ほぼ同じ挙動をしているのがわかる。腐食減肉鋼管杭棧橋において, 最大応答変位の時刻はずれるが, 無欠損鋼管杭棧橋および添



(a) 無欠損鋼管杭栈橋



(b) 腐食減肉鋼管杭栈橋

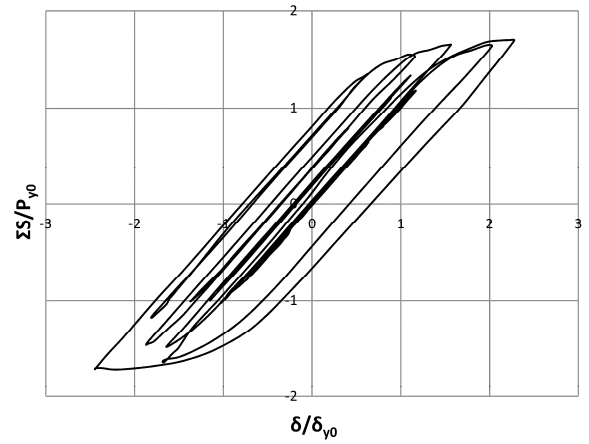


(c) 添接板補修鋼管杭栈橋

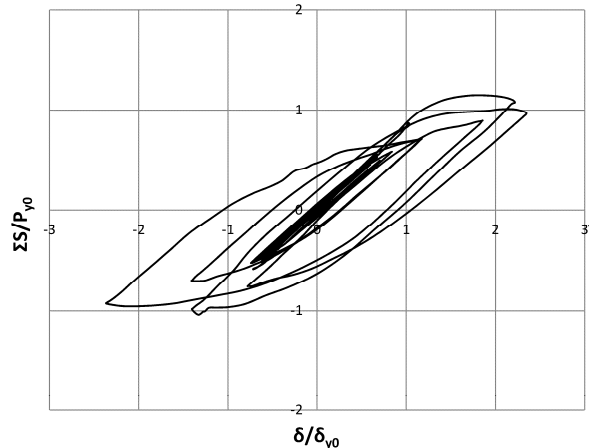
図-10 応答変位 (レベル2 タイプ II)

接板補修鋼管杭栈橋の場合と比較して応答変位が大きくなっていないのは、腐食減肉鋼管杭栈橋の固有周期が無欠損鋼管杭栈橋および添接板補修鋼管杭栈橋より長いため、地震時慣性力が小さくなる結果であると考えられる。

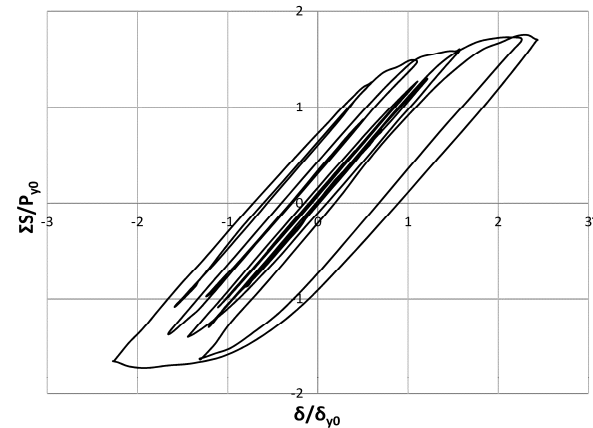
図-9 に上部コンクリート部の応答変位と基部せん断力との関係を示す。ここで、縦軸の  $\Sigma S$  は杭下端のせん断力の杭3本の合計である。図-8の応答変位と同様に、無欠損鋼管杭栈橋と添接板補修鋼管杭栈橋とは、ほぼ同じ挙動をしていることがわかる。また、腐食減肉鋼管杭栈橋は復元力特性の低下が著しいことがわかる。



(a) 無欠損鋼管杭栈橋



(b) 腐食減肉鋼管杭栈橋



(c) 添接板補修鋼管杭栈橋

図-11 応答変位-基部せん断力関係 (レベル2 タイプ II)

### 4.3 レベル2 (タイプ II) 地震時の挙動

無欠損鋼管杭栈橋、腐食減肉鋼管杭栈橋および添接板補修鋼管杭栈橋のレベル2 (タイプ II) 地震動による応答変位履歴 (40 秒間) を図-10 に示す。図-10 より、無欠損鋼管杭栈橋と添接板補修鋼管杭栈橋とは、ほぼ同じ挙動をしているのがわかる。また、腐食減肉鋼管杭栈橋の場合には、無欠損鋼管杭栈橋および添接板補修鋼管

杭栈橋と異なる時刻に最大応答変位が生じている。

図-11 に上部コンクリート部の応答変位と基部せん断力との関係を示す。図-10 の応答変位と同様に、無欠損鋼管杭栈橋と添接板補修鋼管杭栈橋とは、ほぼ同じ挙動をしていることがわかる。また、タイプ I の場合と同様に、腐食減肉鋼管杭栈橋は復元力特性の低下が著しいことがわかる。

タイプ I およびタイプ II のそれぞれ 1 種類の厳しい地震波形に対する時刻歴応答解析結果であり、必ずしも汎用的ではないが、プッシュオーバー解析により求められた添接板厚を使用した補修鋼管杭栈橋は、無欠損鋼管杭栈橋とほぼ同等の耐震性能が回復していることが確認できた。

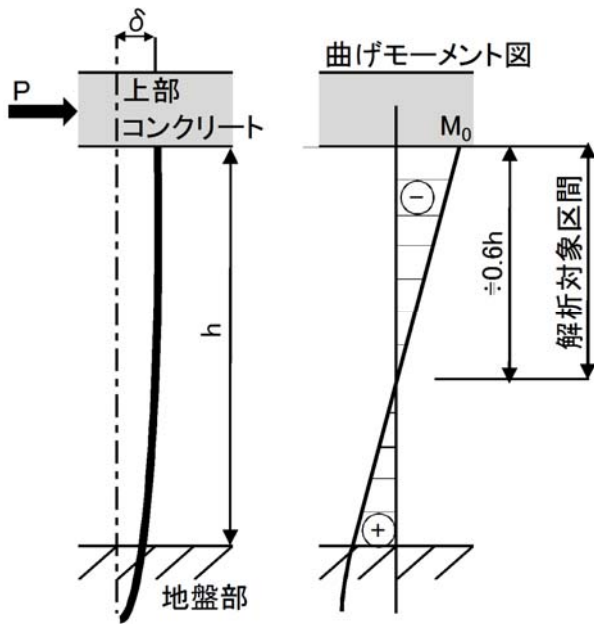


図-12 水平力を受ける杭の変位と曲げモーメント図

## 5. 補修設計における必要添接板厚

### 5.1 栈橋モデル

図-1 の栈橋より鋼管杭を取り出したものを図-12 に示す。図-12 は、鋼管杭の杭頭が固定されている上部コンクリート部に水平力 P (地震時慣性力) を受けて水平変位  $\delta$  が生じた変位図およびその場合の杭の曲げモーメント図を示している。図-1 に示す地盤および鋼管径では、上部コンクリートから地盤面までの突出長の約 60% の位置が曲げモーメントのゼロ点となり、このゼロ点より上の鋼管杭を取り出し、先端に軸方向外力 N および水平力 P が作用する図-13 に示す片持梁モデル<sup>3)</sup>を考える。この片持梁モデルに軸方向外力 N を作用させた後、水平力 P を徐々に増加させプッシュオーバー解析を行う。

添接板の側面すみ肉溶接長は、鋼管杭に降伏曲げモーメントが作用するものとして「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル」<sup>13)</sup>に基づき算出し、溶接長確保のためのスリット数を 12 箇所とした。

### 5.2 必要添接板厚の評価条件

プッシュオーバー解析により、添接板補修鋼管杭が無欠損鋼管杭と同等な耐震性能を確保するための評価条件は以下のように定めた。

- 1) 図-14 に示す添接板補修鋼管杭の荷重-変位曲線の面積 (吸収エネルギー) が無欠損鋼管杭のエネルギー面積を確保できるように決定する。ここで、無欠損鋼管杭の面積は最大水平荷重  $P_{max}$  までの面積 (図-14 の着色部面積) とし、添接板補修鋼管杭の面積は補修であることと、補修部が二重鋼管になっており、局部座屈波形が急激に大きくならないことを考慮し最大水平荷重の 90% (図-14 の斜線部) までを許容する。
- 2) 添接板補修鋼管杭の最大水平荷重は無欠損鋼管杭の最大水平荷重以上であること。

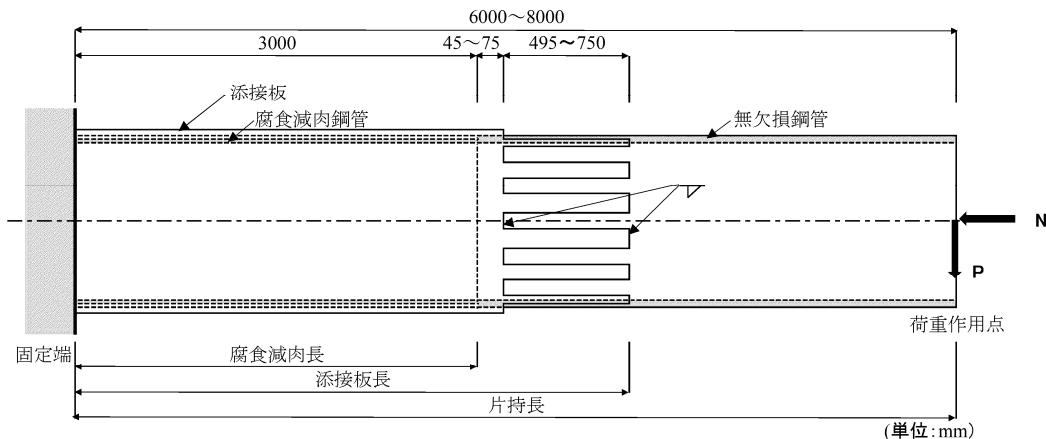


図-13 添接板補修鋼管の片持梁モデル

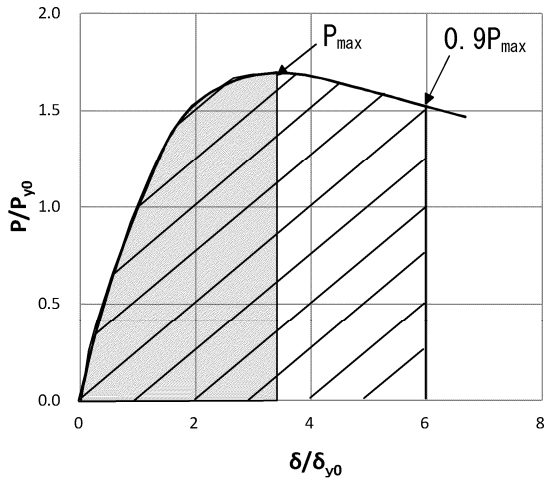


図-14 荷重-変位曲線により算定される面積

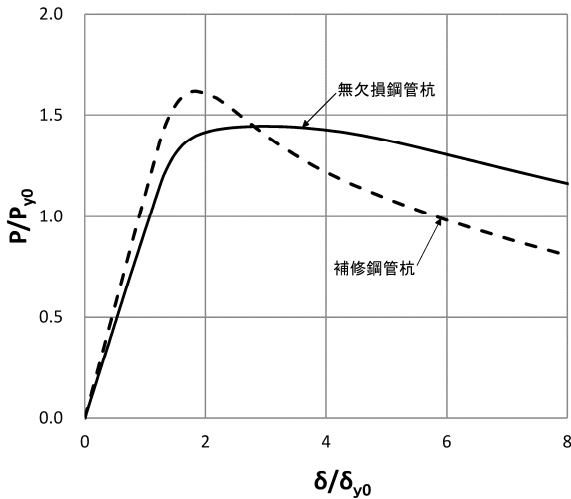
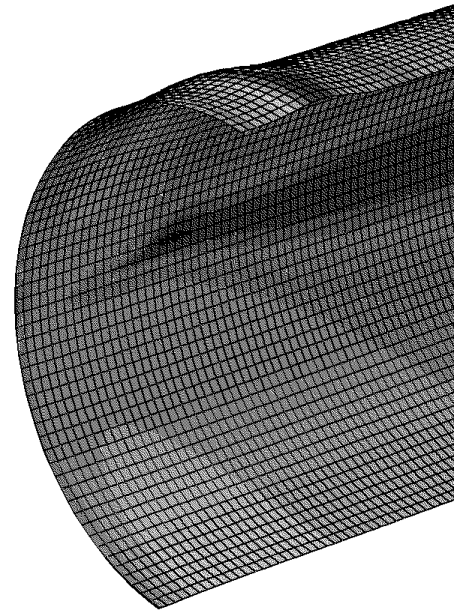


図-15 荷重-変位曲線

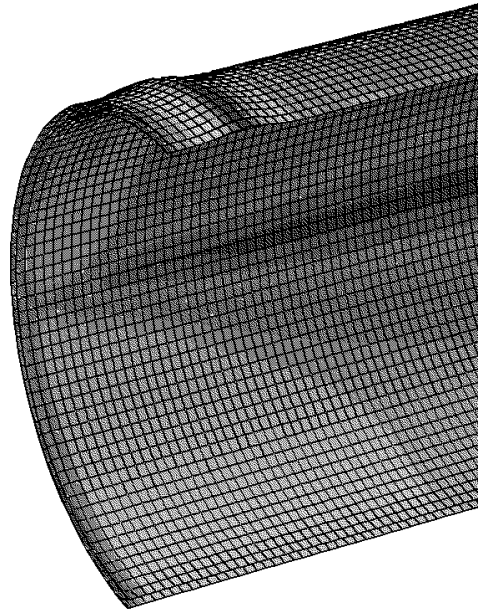
- 3) 一般に鋼管杭上部は杭径程度のコンクリートが充填されており、道路橋示方書・同解説-耐震設計編<sup>12)</sup>の鋼製橋脚の許容ひずみを適用し、許容ひずみ $\epsilon_a$ は降伏ひずみ $\epsilon_y$ の5倍とする。したがって、1)で求めた面積より $\epsilon_a$ により算定された面積の方が小さいなら後者の面積を適用する。

### 5.3 プッシュオーバー解析結果

検討対象鋼管杭としては、鋼管径 $\phi 600\text{mm}$ 、 $\phi 700\text{mm}$ 、 $\phi 800\text{mm}$ および $900\text{mm}$ 、鋼管厚は $12\text{mm}$ および $16\text{mm}$ 、腐食量は $6\text{mm}$ 、 $8\text{mm}$ および $10\text{mm}$ 、片持梁の張出し長は $6000\text{mm}$ 、 $7500\text{mm}$ および $8000\text{mm}$ 、鋼管杭材質は主にSKK490を対象とし、その他SKK400についても解析を行った。作用軸力は $N/N_y=0\%$ 、 $5\%$ 、 $10\%$ 、 $15\%$ および $20\%$ で、ここに $N_y$ は無欠損鋼管杭の降伏軸力である。鋼管径 $\phi 600\sim\phi 800$ 、鋼管厚 $16\text{mm}$ 、腐食量は板厚の $1/2$ 、張出し長 $6\text{m}$ 、材質SKK490、 $N/N_y$ は $10\%$ のケースを主に、



(a) 無欠損鋼管



(b) 添接板補修鋼管

図-16 局部座屈変形図

合計で106ケースの解析を行った。解析を行った計算ケース一覧表を表-3に示す。また、解析によって得られる必要添接板厚を $0.1\text{mm}$ 単位で求め、提案式算定のためのデータとした。

解析結果の一例として、時刻歴応答解析を行ったケースに対応する片持梁モデルを用いたプッシュオーバー解析の荷重-変位曲線を図-15に示す。ここで、 $P_{y0}$ および $\delta_{y0}$ はそれぞれ片持梁モデルにおける無欠損鋼管杭の降伏水平力および降伏変位である。解析鋼管杭について、鋼管径は $800\text{mm}$ 、無欠損鋼管厚は $16\text{mm}$ 、腐食鋼管杭の腐食量は $6\text{mm}$ 、添接板厚は $8.5\text{mm}$ 、軸力比は図-1の解



表-3 計算ケース一覧表

鋼管径 (mm)	元鋼管厚 (mm)	張出長 (mm)	鋼管の 降伏応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	添接板の 降伏応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	腐食厚(mm)					計算 ケース 数
					軸力比					
					0%	5%	10%	15%	20%	
600	16	6000	315	315	6,8,10	6,8,10	6,8,10	6,8,10	6,8,10	15
			235	235	8	-	8	-	8	3
			235	315	-	-	8	-	-	1
		7500	315	315	6,8	-	6,8	-	6,8	6
	12	6000	315	315	6	6	6	6	6	5
700	16	6000	315	315	6,8,10	6,8,10	6,8,10	6,8,10	6,8,10	15
			235	235	8	-	8	-	8	3
			235	315	-	-	8	-	-	1
		7500	315	315	6,8	-	6,8	-	6,8	6
	12	6000	315	315	6	6	6	6	6	5
800	16	6000	315	315	6,8,10	6,8,10	6,8,10	6,8,10	6,8,10	15
			235	235	8	-	6,8,10	-	8	5
			235	315	-	-	6,8,10	-	-	3
		8000	315	315	6,8	8	6,8	8	6,8	8
	12	6000	315	315	6	6	6	6	6	5
900	16	6000	315	315	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	10
計算ケース数合計										106

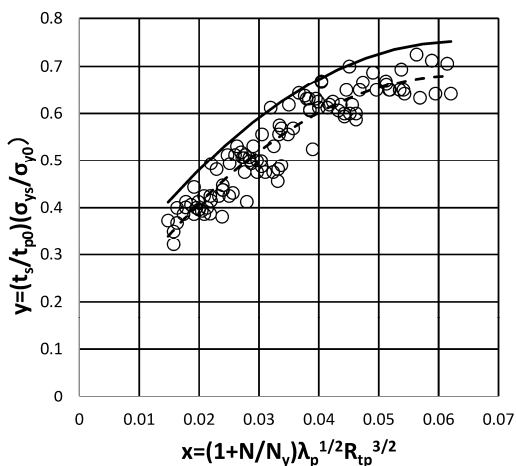


図-17 必要添接板厚の提案式

析対象栈橋モデルの軸力比が約 10% のため  $N/N_y=10\%$  とした。栈橋モデルのプッシュオーバー解析で 1mm 毎に求めた必要添接板厚は 9mm であったが、片持梁モデルの解析結果によると添接板厚は 8.5mm となっており、ほぼ一致した結果が得られた。

図-15 に示す添接板補修鋼管杭では、添接板および腐食鋼管杭のそれぞれの板厚が無欠損鋼管杭板厚と比較して薄いため、無欠損鋼管杭より局部座屈の進行が速く、最大荷重後の耐荷力低下が著しいことがわかる。無欠損鋼管杭および添接板補修鋼管杭の最大荷重時付近での局部座屈による変形図をそれぞれ図-16(a)および図-16(b)に示す。

#### 5.4 必要添接板厚設計式の提案

すべての解析ケースで得られた必要添接板厚結果をプロットしたものを図-17 に示す。この図における横軸 (x 軸) のパラメータは、鋼製パイプ断面橋脚に関する弾塑性挙動の研究<sup>14)</sup> に示されているパラメータを使用した。ここで、 $N/N_y$  は軸力比、 $\lambda_p$  は腐食減肉鋼管杭の細長比パラメータ、 $R_{tp}$  は腐食減肉鋼管杭の径厚比パラメータであり、次式で示される。

$$\lambda_p = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{yp}}{E}} \frac{\ell}{r_p} \quad (1)$$

$$R_{tp} = \frac{R_p}{t_p} \frac{\sigma_{yp}}{E} \sqrt{3(1-\mu^2)} \quad (2)$$

上式において、 $\sigma_{yp}$ 、 $R_p$ 、 $t_p$ 、 $r_p$  および  $\mu$  はそれぞれ腐食減肉鋼管杭の降伏応力度、減肉鋼管の板厚中心線半径、減肉鋼管厚、断面二次半径および軸圧縮力を受ける片持梁の有効座屈長である。また、 $E$  および  $\mu$  は弾性係数およびポアソン比である。縦軸 (y 軸) のパラメータは、無欠損鋼管厚に対する添接板厚比で、 $t_s$  は添接板厚、 $t_{p0}$  は無欠損鋼管厚、 $\sigma_{ys}$  は添接板の降伏応力度、 $\sigma_{y0}$  は基準降伏応力度で  $\sigma_{y0}=315\text{N/mm}^2$  (SKK490 を基準) である。

図-17 で破線は二次放物線を仮定した非線形最小二乗法により求められたデータの平均値の近似曲線であり、実線は解析結果を包絡するように平均値の近似曲線に標準偏差 ( $s=0.036$ ) の 2 倍を加えた上限曲線である。必要

添接板厚の提案式はこの上限曲線とし、次式で表される。

$$y = -144x^2 + 18.3x + 0.172 \quad (3)$$

ここで、上式の適用範囲は5.3で得られた解析結果の範囲であり、 $0.015 \leq (1+N/N_y) \lambda_p^{1/2} R_{p32} \leq 0.060$ 、 $0 \leq N/N_y \leq 0.2$ 、 $0.07 \leq R_p \leq 0.17$ 、 $0.5 \leq \lambda_p \leq 0.9$  および  $0.375 \leq t_{cor}/t_{p0} \leq 0.625$  とする。 $t_{cor}$  は無欠損鋼管厚からの腐食減肉厚である。

## 5.5 提案式の確認

図-1に示した対象栈橋について5.4の必要添接板厚の提案式を適用し、提案式の妥当性を確認する。プッシュオーバー解析モデルの杭頭部の腐食減肉厚は6mmであり、有効座屈長として図-1に示す仮想地盤面からの鋼管杭の突出長 $l=13.3\text{m}$ を使用して、式(3)より添接板の必要板厚 $t_{req}$ を算出すると $t_{req}=9.1\text{mm}$ となる。この結果より、 $t_s=9\text{mm}$ の添接板を使用することにより、無欠損鋼管杭と同等の耐震性能を回復することが可能となった。1ケースのみの比較ではあるが、時刻歴応答解析結果およびプッシュオーバー解析結果により、この提案式より求められた添接板厚は、無欠損鋼管杭と同等の耐震性能を回復できることが確認できた。

## 6. 結言

本研究では、港湾構造物である直杭式栈橋について、無欠損鋼管杭、腐食鋼管杭および添接板補修鋼管杭に対して地震時の時刻歴応答解析を行って耐震性能を明らかにした。また、片持梁モデルのプッシュオーバー解析を行って、腐食鋼管杭の補修設計を行う場合の必要添接板厚算定について検討した。本研究により得られた主な結論は以下のようになる。

- 1) 添接板補修鋼管杭栈橋について、タイプⅠおよびタイプⅡレベル2の二つの代表的な地震動を入力して時刻歴応答解析を行った結果ではあるが、栈橋のプッシュオーバー解析により決定した必要添接板厚で補修した腐食鋼管杭の耐震性能は無欠損鋼管杭栈橋と同等まで回復していることを確認できた。
- 2) 片持梁モデルのプッシュオーバー解析により、腐食鋼管杭のパラメータに対する必要添接板厚の設計提案式を示した。
- 3) 解析対象である栈橋の腐食鋼管杭の必要添接板厚について、提案式により算定された板厚を使用することにより、無欠損鋼管杭と同等の耐震性能を回復できることを例示で示した。

表者：伊藤義人) を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、(社)日本港湾協会、2007。
- 2) 古西和夫、北根安雄、渡邊尚彦、伊藤義人：添接板補修された断面欠損鋼管の繰返し曲げ挙動に関する研究、鋼構造論文集、Vol.18, No.72, pp.1-16, 2011。
- 3) 古西和夫、北根安雄、伊藤義人：軸力を受ける添接板補修鋼管の繰返し曲げ挙動に関する研究、材料、日本材料学会、Vol.61, No.6, pp.543-549, 2012。
- 4) 古西和夫、北根安雄、伊藤義人：鋼板添接補修された鋼管栈橋の耐荷力と変形性能に関する研究、材料、日本材料学会、Vol.62, No.5, pp.319-326, 2013。
- 5) 鹿島出版会：新・土木設計の要点-海洋・港湾構造物、2007。
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説-下部工編一、2014。
- 7) Xiao Chen, Yasuo Kitane, Yoshito Itoh: Evaluation of repair design on corrosion-damaged steel pipe piles using welded patch plates under compression, 構造工学論文集、Vol.57A, pp.756-768, 2011。
- 8) Dassault Systèmes：- ABAQUS/Standard User's Manual-, ver.6.9, 2010。
- 9) 田村功、渡邊英一、伊藤義人、藤井堅、野上邦栄、杉浦邦征、永田和寿、岡扶樹：海洋環境において腐食した鋼管の形状計測と残存耐力に関する検討、構造工学論文集、Vol.51A, pp.1103-1110, 2005。
- 10) 藤井堅、近藤恒樹、田村功、渡邊英一、伊藤義人、杉浦邦征、野上邦栄、永田和寿：海洋環境において腐食した円形鋼管残存圧縮耐力、構造工学論文集、Vol.52A, pp.721-730, 2006。
- 11) 財団法人沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(改訂版)、1997。
- 12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説-耐震設計編一、2014。
- 13) 財団法人沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(2009年版)、2009。
- 14) 葛漢彬、高聖彬、宇佐美勉、松村寿男：鋼製パイプ断面橋脚の繰返し弾塑性挙動に関する数値解析的研究、土木学会論文集、No.577/I-41, pp.181-190, 1997。

(2014年9月24日受付)

(2015年2月1日受理)

## 謝辞

本研究の一部は(一社)日本鉄鋼連盟の支援(研究代