

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[†]

古西和夫* 北根安雄** 伊藤義人***

Cyclic Flexural Behavior of Steel Pipes Repaired by Patch Plate Subjected to Constant Axial Force

by

Kazuo FURUNISHI*, Yasuo KITANE** and Yoshito ITOH***

This paper presents a study on cyclic flexural behavior of steel pipes repaired by patch plate subjected to constant axial force. In this study, repaired steel pipes of piled pier are modeled. In FE analyses, steel pipes having various pipe diameters are analyzed under several levels of constant axial compressive stress to understand the buckling behavior of steel pipe repaired by patch plate. It is shown that a required thickness of patch plate is larger than the thickness reduction to achieve the same level of ductility performance in the repaired pipe as in the intact pipe. Furthermore, it is found that the required thickness of patch plate increases with the level of axial force.

Key words: Corroded steel pipe, Repair, Patch plate, Load carrying capacity, Cyclic flexural behavior, Axial force

1 緒 言

近年、高度経済成長期に建設された構造物が老朽化し様々な損傷事例が報告されている。鋼構造物においては腐食が大きな原因となり、維持管理の重要性が認識されている。特に港湾鋼構造物は厳しい腐食環境下にあり、防食されていない場合や防食が機能していない場合、耐荷力および耐震性能の低下を生じることになり、所定の機能を発揮できない。

海岸部の鋼構造物の腐食防止のため、平成15年度に沿岸環境における鋼・複合構造物の防食および耐久性能評価に関する委員会が土木学会に設置され、研究が行われた。¹⁾これらの研究の中で、北根ら²⁾は腐食鋼管の補修後性能を明らかにすることを目的として、腐食を模擬するため切削した鋼管に添接板を溶接して添接板補修鋼管の圧縮および曲げ載荷実験を行い、さらに有限要素解析を行うことで補修鋼管の耐荷力性能評価を行った。また、渡邊ら³⁾は腐食鋼管の鋼板溶接補修工法に関して、湿式水中すみ肉溶接の強度と変形性能、および破断性状を気中溶接との比較により明らかにしている。

このように腐食に関する評価方法の研究および腐食劣化鋼構造物の耐荷力の研究が進められている中、「港湾の施設の技術上の基準」⁴⁾は2007年に改訂され、これまでの許容応力度法を基本としてきた考え方から、確率論に基づいた信頼性設計法の導入が図られた。しかしながら、腐食した鋼部材に対する補修・補強の設計においては、補修部つまり減肉部や添接板における座屈耐荷力や

繰返し載荷時の挙動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⁵⁾は、添接板補修された鋼管減肉部の繰返し曲げ挙動に関する繰返し曲げ実験を行い、実験結果と解析結果との比較検討を行った。さらに、繰返し曲げ有限要素解析を行って添接補修鋼管の挙動を明らかにし、添接板補修鋼管において、無欠損鋼管と同等の繰返しエネルギー吸収性能を得るためには、添接板の必要板厚が通常の設計断面計算により応力度から決定される板厚以上になることを示した。

本研究は、港湾鋼構造物である栈橋の腐食部をモデル化し、軸力を受ける添接板補修鋼管の繰返し曲げ挙動について非線形有限要素解析を行うことにより、補修鋼管の繰返し曲げ載荷時のエネルギー吸収性能に与える軸力の影響を明らかにすることを目的としている。

2 解析モデル

2.1 栈橋のモデル化

一般的な直杭式横栈橋および無防食鋼材の深さ方向の腐食速度の概要図をFig. 1に示す。この図に示すように、栈橋の鋼杭の干潮面直下位置と満潮面より上の飛沫帯で腐食速度が大きくなる。

Fig. 1の鋼管杭を取り出した図をFig. 2に示す。Fig. 2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 δ 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。横栈橋の地盤面はFig. 1に示すように良質砂に置

[†] 原稿受理 平成23年9月8日 Received Sep. 8, 2011 ©2012 The Society of Materials Science, Japan

* 名古屋大学大学院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, Dept. Civil. Eng., Nagoya Univ., Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

** 名古屋大学大学院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, Dept. Civil. Eng., Nagoya Univ., Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

*** 正会員 名古屋大学大学院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, Dept. Civil. Eng., Nagoya Univ., Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

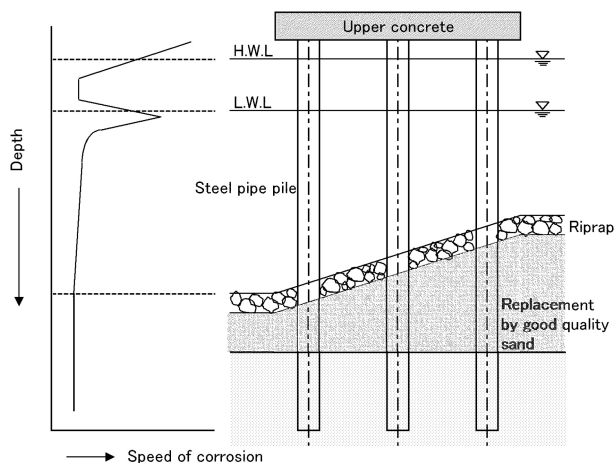


Fig. 1 Typical piled pier and corrosion rate.

き換えられている場合が多く、杭径 $\phi 600\text{mm} \sim 800\text{mm}$ の鋼管杭を対象として曲げモーメントを計算すると、杭の曲げ剛性および良質砂を N 値 = 50 (N 値：標準貫入試験により求められるもので、地盤の締り程度や地盤定数の推定に使用する数値) と想定して算出した水平方向地盤反力係数より、上部コンクリートから地盤面までの突出長 h (約 10m) の約 60% の位置が曲げモーメントのゼロ点となる。したがって、栈橋の前面水深を約 10m と想定し、曲げモーメントのゼロ点より上の鋼管杭を取り出し、長さ 6m の片持梁を解析対象として梁先端に軸力 V および繰返し水平荷重 P が作用する Fig. 3 に示すモデルを考える。ここでは、添接板補修した断面欠損鋼管杭の耐荷力性能を評価可能な解析モデルを開発することを目的として、断面欠損が一定の区間のみ一様に生じた理想化された状態を検討の対象とし、その長さを干潮面下の腐食部から上部コンクリートまでの 3m と想定した。

解析鋼管杭としては、鋼管径 $\phi 600\text{mm}$, $\phi 700\text{mm}$ および $\phi 800\text{mm}$ とし、鋼管厚は 16mm を対象とした。減肉部の厚さは元の鋼管厚の半分が腐食したものと想定し

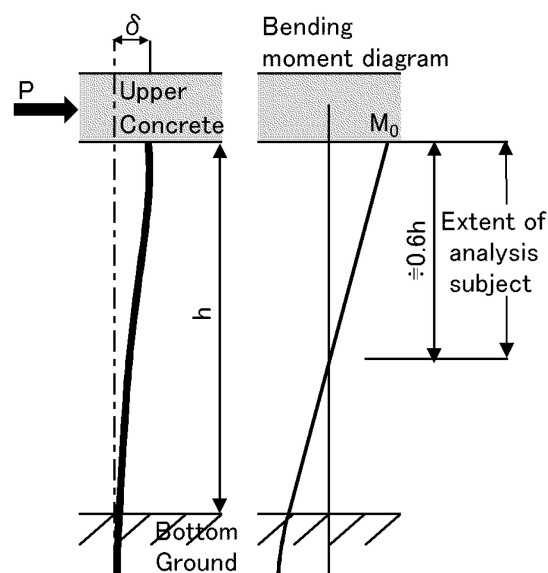


Fig. 2 Displacement and bending moment of pile subjected to horizontal force.

8mm とし、減肉長は前述したように 3m である。添接板の側面すみ肉溶接長は、鋼管に降伏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”⁶⁾に基づき算出した。その結果、スリット数は 12 箇所、溶接脚長は 9mm、溶接長は 495mm ($\phi 600$), 585mm ($\phi 700$) および 675mm ($\phi 800$) となった。

2・2 使用材料

解析対象とした鋼管杭は栈橋などで一般的に使用される JISA5525 で規定されている SKK490 を使用し、添接板については SKK490 と同等な機械的性質を有する JISG3106 に規定されている SM490 を使用した。これらの材料の物理定数を Table 1 に示す。

2・3 有限要素モデル

Fig. 3 の片持梁解析モデルを有限要素モデルとしたものを Fig. 4 に示す。なお、繰返し曲げを受ける鋼管の対

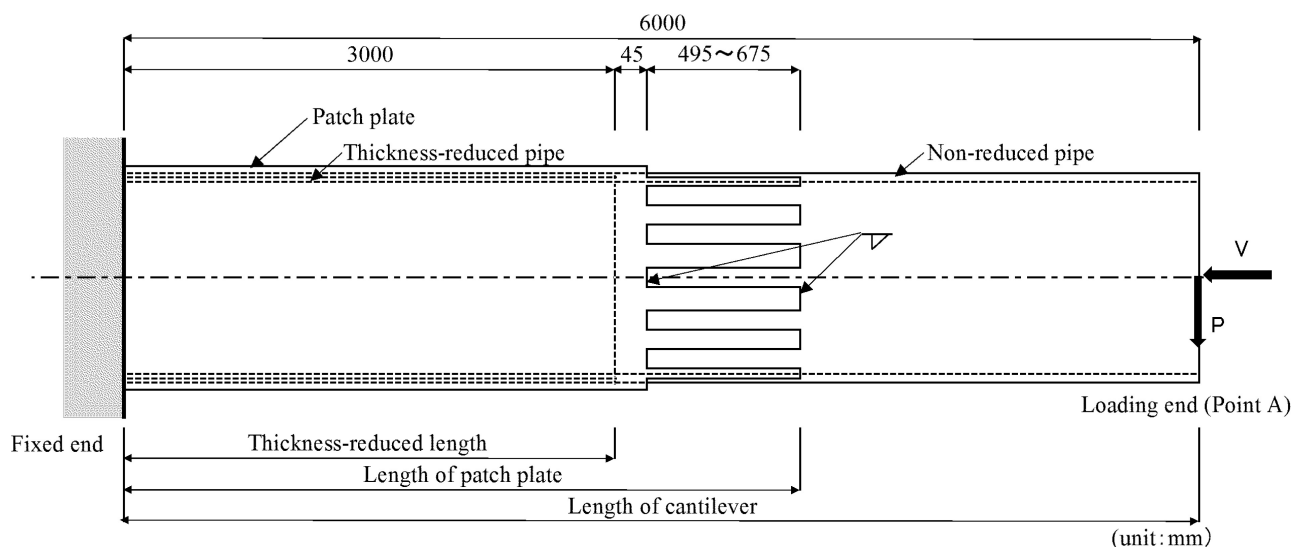


Fig. 3 Analyzed model of thickness-reduced pipe repaired by patch plate.

Table 1 Mechanical properties of steel.

Material	Yield stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Young's modulus (N/mm ²)	Poisson's ratio	Strain at tensile strength (%)
SKK490 SM490	315	490	2×10^5	0.3	18

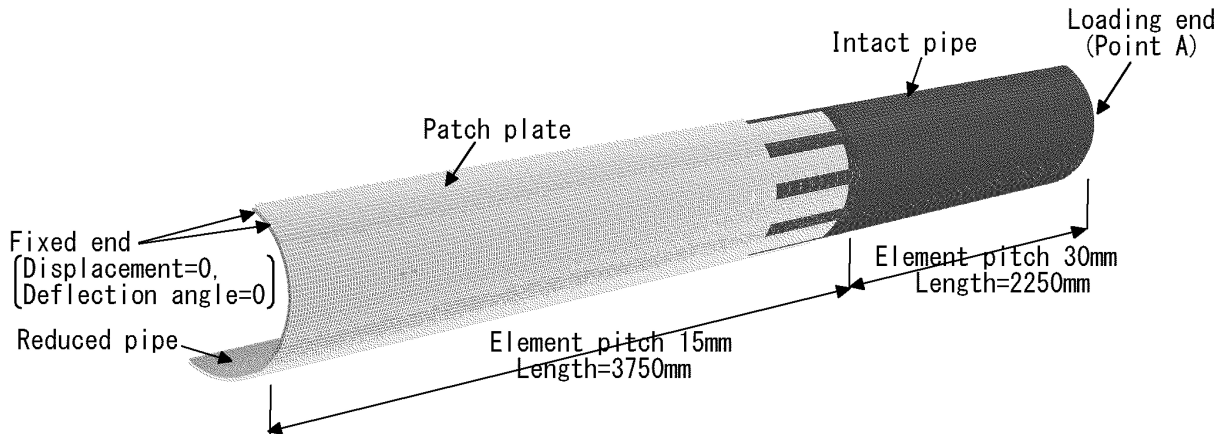


Fig. 4 Finite element model.

称性を考慮して 1/2 有限要素モデルとした。鋼管および添接板は薄肉シェルを対象とした 4 節点シェル要素でモデル化し、鋼管と添接板のすみ肉溶接部はコネクター要素を用いて接合した。鋼管と添接板のすみ肉溶接部のコネクター要素の剛性は、文献 7) に示されているすみ肉溶接の剛性提案式により求められた剛性を使用した。

1/2 鋼管モデルの要素分割数は、円周方向に 60 分割し、鋼管長手方向は固定部（スパン長の 62.5%）の要素寸法を 15mm ピッチで、残りの載荷点付近の要素寸法を 30mm ピッチで分割して解析を行った。この分割数の精度は十分であることが著者らの研究⁵⁾で確認されており、添接板と鋼管との接触状況も十分表せることがわかっている。

3 軸力を受ける繰返し曲げ解析

3・1 解析条件

解析には汎用有限要素解析プログラム ABAQUS ver.6.9⁸⁾を使用した。降伏後の硬化則は、線形 Ziegler の移動硬化則を使用した（硬化勾配 $= E/204$, E : 弾性係数）。

なお、理想的な添接板補修された減肉鋼管の挙動をまず明らかにすることを目的と考え、ここでは残留応力および初期不整については考慮していない。

解析ケースは、鋼管径 $\phi 600$, $\phi 700$ および $\phi 800$ に対して、腐食をしていない無欠損鋼管のケースと、8mm 腐食して減肉部の板厚が 8mm となった減肉鋼管を添接板で補修したケースである。なお、栈橋の死荷重、上載荷重および地震荷重による軸力増分を考慮した作用軸力については、一般の栈橋の軸力が鋼管降伏応力の 5% ~ 20% 程度と考えられ、鋼管降伏応力に対する軸方向圧縮力の比が 0%, 10%, 20% および 25% の場合について解析を行った。

繰返し曲げ解析は、上記軸力 V が作用している鋼管に、無欠損鋼管の降伏変位 (δ_{y0}) を添接板補修鋼管の載荷点

(モデル上の A 点, Fig. 3 および Fig. 4) に δ_{y0} , $-\delta_{y0}$, $2\delta_{y0}$, $-2\delta_{y0}$, ... と与えて、載荷点の変位と水平力 P との関係の求めた。一般的港湾構造物において、作用軸力における死荷重の割合は降伏応力に対して 3% 程度、上載荷重および地震時水平力による軸力の割合は 5%-20% である。したがって、ここでは補修後鋼管に全軸力（死荷重 + 上載荷重 + 地震荷重による増分）を作用させて解析した。

3・2 軸力を受ける鋼管の繰返し曲げ解析結果

繰返し曲げ解析を行った結果を Table 2 に示す。Table 2 で、 V/V_y は鋼管の降伏軸力に対する作用軸力の比、 t_p および t_s はそれぞれ減肉部の鋼管板厚および添接板板厚、 P_{max} は解析時の最大水平力、 R_{tp} および R_{ts} はそれぞれ式 (1) に示す鋼管および添接板の径厚比パラメータ、 A は載荷点における対象鋼管の水平力-変位履歴から得られる履歴ループ面積、 A/A_0 は無欠損鋼管の履歴ループ面積に対する対象鋼管の履歴ループ面積の比を示す。

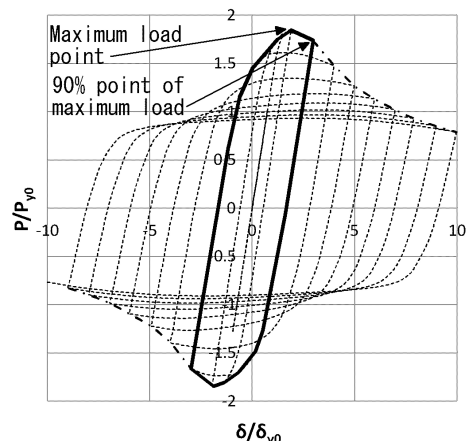


Fig. 5 Hysteresis loop.

Table 2 Analysis results of pipes subjected to cyclic bending and constant axial force.

Diameter of Pipe	Ratio of Axial Force	Thickness		Maximum Transverse Load	Parameter of Ratio of Diameter-Thickness		Hysteresis Loop	
		Pipe	Patch Plate		Pipe	Patch Plate	Area	Ratio of Area
D(mm)	V/V _y (%)	t _p (mm)	t _s (mm)	P _{max} (kN)	R _{tp}	R _{ts}	A	A/A ₀
600	0	16	0	316	0.0474	0.0000	12.82	1.000
		8	13	410	0.0936	0.0613	13.61	1.062
	10	16	0	281	0.0474	0.0000	9.67	1.000
		8	14	410	0.0936	0.0570	10.42	1.078
	20	16	0	265	0.0474	0.0000	7.35	1.000
		8	14	388	0.0936	0.0570	7.82	1.064
	25	16	0	260	0.0474	0.0000	4.89	1.000
		8	16	421	0.0936	0.0500	8.35	1.708
	700	16	0	427	0.0555	0.0000	10.08	1.000
		8	14	583	0.1098	0.0663	14.07	1.396
	10	16	0	391	0.0555	0.0000	7.45	1.000
		8	14	558	0.1098	0.0663	10.96	1.471
	20	16	0	365	0.0555	0.0000	7.47	1.000
		8	15	562	0.1098	0.0619	7.97	1.067
	25	16	0	350	0.0555	0.0000	5.04	1.000
		8	16	576	0.1098	0.0581	8.45	1.677
800	0	16	0	553	0.0637	0.0000	7.42	1.000
		8	13	718	0.1260	0.0813	9.98	1.345
	10	16	0	517	0.0637	0.0000	5.44	1.000
		8	14	725	0.1260	0.0755	7.52	1.382
	20	16	0	482	0.0637	0.0000	5.29	1.000
		8	16	768	0.1260	0.0663	8.32	1.573
	25	16	0	464	0.0637	0.0000	5.05	1.000
		8	17	791	0.1260	0.0624	8.62	1.707

$$R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_y}{E} \sqrt{3(1-\nu^2)} \quad (1)$$

ここに, R は板厚中心の半径, t は板厚, σ_y は降伏応力, E は弾性係数および ν はポアソン比である.

履歴ループ面積は, 例えば Fig. 5 の実線で囲まれる面積として計算される. Fig. 5 において, 点線は履歴ループを, 一点鎖線は履歴ループの包絡線を示している. 無欠損鋼管の履歴ループ面積は, 最大水平力までの履歴ループにより囲まれる面積であり, 添接板補修鋼管の履歴ループ面積は, 対象鋼管の最大水平力の 90% 除荷点に相当する履歴ループで囲まれる面積である. 履歴ループ面積は変形時のエネルギー吸収量であり, 補修鋼管の変形性能を確保するためには履歴ループ面積比が無欠損鋼管と同等以上となるよう 1 以上確保する必要があると考えられる. ここで, 添接補修鋼管については補修であることを考慮して最大水平力の 90% 除荷点まで許容している. この図で, P/P_{y0} は軸力が作用しない場合の無欠損鋼管の降伏水平荷重に対する対象鋼管の水平力比であり, δ/δ_{y0} は同じく無欠損鋼管の降伏水平変位に対する対象鋼管の水平変位比である.

解析結果のうち, 鋼管径が $\phi 700$ で軸力比が 0%, 10% および 20% の場合の載荷点における水平力-変位曲線を Fig. 6 に示す. これらの図で, 第 1 象限における破線は履歴曲線の包絡線である. また, Fig. 6 (d) に示す解析

ケースにおける固定端付近における局部座屈変形図を Fig. 7 に示す.

Fig. 6 より, 添接板補修鋼管の場合, 最大水平力後急速に水平力が低下しているが, これは減肉鋼管の板厚が薄いため減肉鋼管にまず曲げ局部座屈を生じ, 次に添接板が局部座屈を起こしているためである. 最大水平力後の水平力低下の勾配は, 軸力比の増加にともなって大きくなっていることがわかる.

各減肉鋼管が無欠損鋼管のエネルギー吸収性能を確保するために必要な添接板厚と軸力比との関係を Fig. 8 に示す. この図より, 各々の鋼管径に対して, 軸力比が大きくなるにつれて, 無欠損鋼管のエネルギー吸収性能を確保するためには添接板厚が厚くなっていることがわかる. これは, 軸力が作用していることにより軸力による付加モーメントが増加し, 曲げ局部座屈が生じやすくなっているためであると考えられる. また, 現行設計法によって設計された添接板必要板厚は $t_s = 9\text{mm}$ であるが, 無欠損鋼管と同等なエネルギー吸収性能を確保するためには添接板設計必要厚より厚い板厚が必要であることがわかる.

無欠損鋼管と補修鋼管のエネルギー吸収性能に与える軸力比の影響について考察するため, $\phi 600$ の鋼管について 8mm の減肉を想定し添接板厚 13mm で補修を行った補修鋼管に対して, 軸力比を変化させた場合の繰り返し曲げ解析を行い, その結果を Table 3 に示す. ここで,

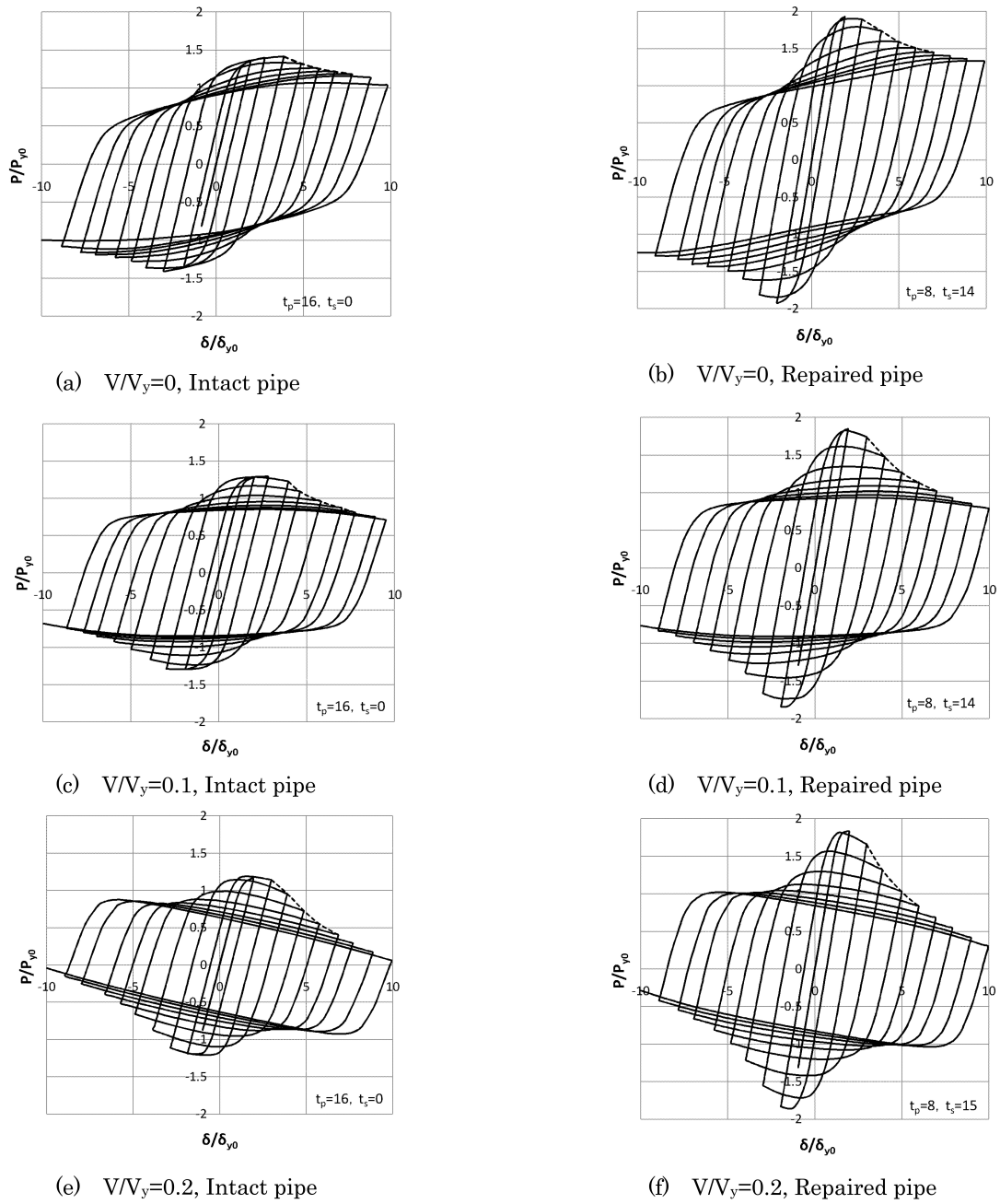
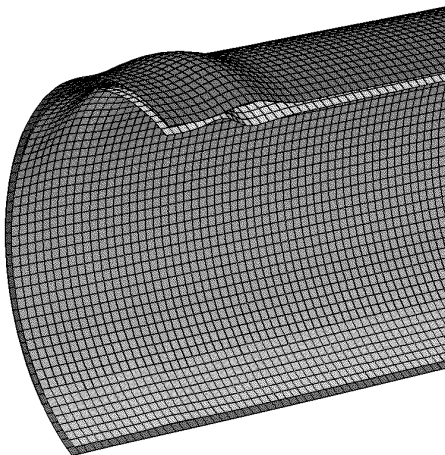
Fig. 6 Transverse load-displacement curves($\phi 700$).

Fig. 7 Buckling deformation at the fixed end.

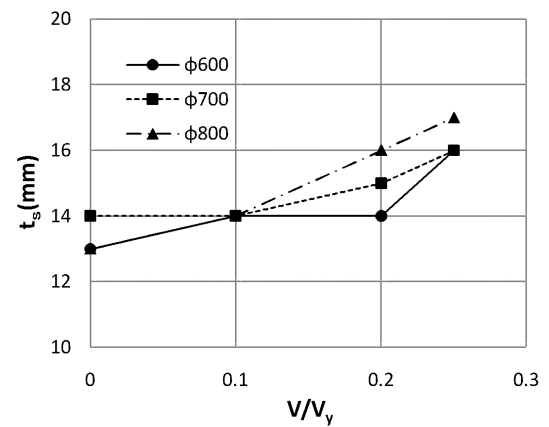


Fig. 8 Relationship of axial force ratio and patch plate thickness.

Table 3 Change of maximum transverse load ratio and hysteresis loop area ratio according to axial force ratio.

Diameter of Pipe	Thickness		Ratio of Axial Force	Maximum Transverse Load		Hysteresis Loop	
	Pipe	Patch Plate		Load	Ratio of Load	Area	Ratio of Area
D(mm)	t_p (mm)	t_s (mm)	V/V_y (%)	P_{max} (kN)	P_{max}/P_{maxV0}	A	A/A_{V0}
600	16	0	0	316	1.000	12.82	1.000
			10	281	0.889	9.67	0.754
			20	265	0.839	7.35	0.573
			25	260	0.823	4.89	0.381
	8	13	0	410	1.000	13.61	1.000
			10	388	0.946	7.11	0.522
			20	367	0.895	3.96	0.291
			25	355	0.866	4.03	0.296

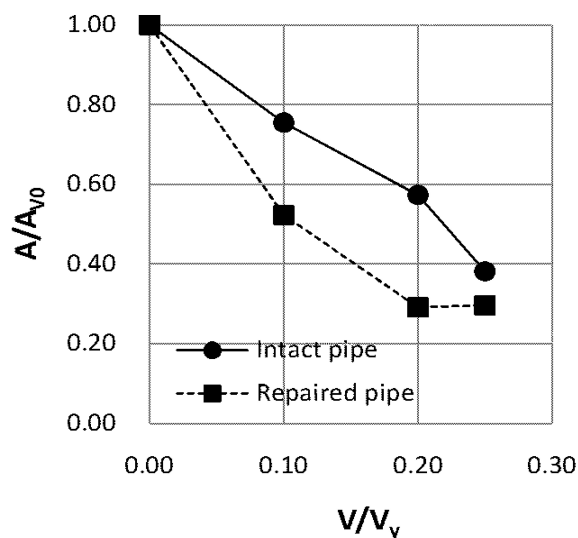


Fig. 9 Relationship of axial force ratio and hysteresis loop area ratio.

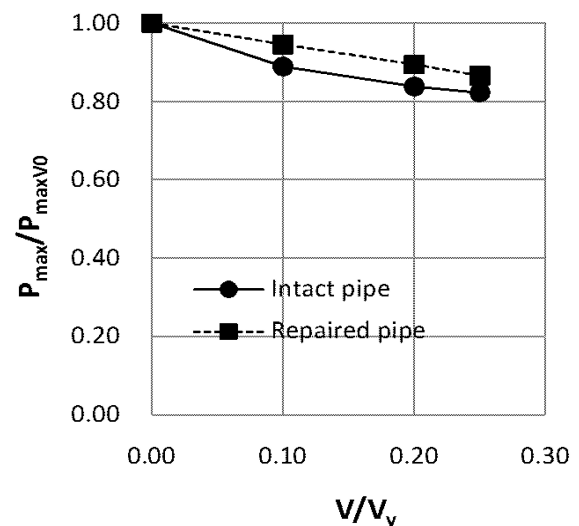


Fig. 10 Relationship of axial force ratio and maximum transverse load ratio.

P_{maxV0} は軸力比 0% の場合の無欠損鋼管および補修鋼管の最大水平力であり、 A_{V0} は軸力比 0% の場合の無欠損鋼管および補修鋼管の履歴ループ面積である。Fig. 9 は軸力比と履歴ループ面積比 (A/A_{V0}) の関係を示し、Fig. 10 は軸力比と最大水平力比 (P_{max}/P_{maxV0}) の関係を示す。Fig. 9 より、軸力比が大きくなるにつれて履歴ループ面積比の減少が大きく、無欠損鋼管より補修鋼管の方が減少割合が大きいことがわかる。Fig. 10 において軸力比の増加による最大水平力の減少率を見ると、軸力比の増加につれてほぼ線形的に減少していることがわかる。また、Fig. 9 と Fig. 10 を比較すると、最大水平力の減少率より履歴ループ面積の減少率の方が大きいことがわかる。これは、補修鋼管における減肉部の板厚および添接板の板厚が無欠損鋼管の板厚より薄いことによる局所座屈が発生しやすく、局所座屈後の水平力低下が著しいためであると考えられる。

4 結 言

本研究では、港湾構造物である栈橋の鋼管杭が腐食により減肉し、添接板補修工法により補修された場合を想

定し、軸力作用下の補修鋼管の繰返し曲げ挙動を明らかにするために、補修鋼管杭を片持梁にモデル化し、一定軸力が作用する鋼管（鋼管径 $\phi 600$, $\phi 700$, $\phi 800$ ）が繰返し曲げを受ける場合について弾塑性有限変位解析を行った。本研究により得られた主な結論を以下に示す。

(1) 無欠損鋼管の繰返し曲げ時のエネルギー吸収性能を確保するためには、腐食減厚分を補う現行設計法によって計算された必要添接板厚より厚い板厚が必要であることを明らかにした。

(2) 添接板補修鋼管に作用する軸力が大きくなるにつれて、無欠損鋼管の変形性能を確保するための添接板必要板厚は厚くなることを定量的に示した。

(3) 無欠損鋼管および補修鋼管の軸力比が増加するにつれて、最大水平力後の水平力低下が著しくなることを示した。また、無欠損鋼管より補修鋼管の方が最大水平力後の水平力減少率が大きいことを示した。

今後、港湾構造物である栈橋等の実際の条件による解析を進め、最適な設計に関する検討を行う必要がある。

参 考 文 献

- 1) Japan Society of Civil Engineers, "Guidelines of evaluation of durability and load-carrying capacity for steel structures under marine environment" (2009).
- 2) Y. Kitane, Y. Itoh, N. Watanabe and K. Matuoka, "Compressive and flexural tests of thickness-reduced steel pipes repaired with patch plates using underwater wet welding", Journal of Structural Engineering, JSCE, Vol.55A, pp.889-902 (2009).
- 3) N. Watanabe, Y. Kitane and Y. Itoh, "Modeling of joint behavior of steel pipes repaired with steel plates by underwater wet welding", Journal of Structural Engineering, JSCE, Vol.55A, pp.903-914 (2009).
- 4) The Ports & Harbours Association of Japan, "Technical standards and commentaries for port and harbor facilities", The Ports & Harbours Association of Japan (2007).
- 5) K. Furunishi, Y. Kitane, N. Watanabe and Y. Itoh, "Cyclic flexural behavior of thickness-reduced steel pipe repaired by welded patch plate", Proceedings of The 5th Tokai Branch Meeting of the Society of Materials Science, pp.65-66 (2011).
- 6) Coastal Development Institute of Technology, "Port steel structure corrosion-prevention and repair manual", version 2009 (2009).
- 7) X. Chen, Y. Kitane and Y. Itoh, "Evaluation of repair design on corrosion-damaged steel pipe piles using welded patch plate", Journal of Structural Engineering, JSCE, Vol.57A, pp.756-768 (2011).
- 8) Dassault Systemes, "ABAQUS/Standard user's manual", version 6.9 (2010).