

# 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

## Cyclic flexural behavior of thickness-reduced steel pipe repaired by welded patch plate

古西 和夫\* 北根 安雄\*\* 渡邊 尚彦\*\*\* 伊藤 義人\*\*\*\*

Kazuo FURUNISHI\* Yasuo KITANE\*\* Naohiko WATANABE\*\*\* Yoshito ITOH\*\*\*\*

**ABSTRACT** This paper presents a study on cyclic flexural behavior of thickness-reduced steel pipe repaired by welded patch plates. In this study, cyclic flexural tests of repaired pipes are performed, and the experimental results are compared with finite element (FE) analyses. In FE analyses, several combinations of patch plate thickness and reduced pipe thickness are modeled. From numerical results, the buckling behavior of thickness-reduced steel pipe repaired by patch plate is explained. 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.

Key words: 腐食鋼管, 補修, 添接板, 耐荷力, 繰返し曲げ挙動  
Corroded steel pipe, Repair, Patch plate, Load carrying capacity, Cyclic flexural behavior

### 1. はじめに

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沿岸環境下にあるため, 腐食による損傷は重大であり, 鋼構造物の耐荷力および耐震性能の低下を生じることになる。

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評価に関する研究を行う土木学会小委員会が設置された。この小委員会の中で, 材料の耐久性評価および防食工の性能評価を研究するグループと腐食構造物の残存性能評価を研究するグループの 2 つのワーキンググループが設置され研究が行われた[1]。

小委員会の研究成果によると, 港湾鋼構造物の腐食研究のため, 藤井ら[2]は長期間曝露された鋼管を用いて腐食データを収集し, 数値シミュレーションにより腐食鋼部材の性能評価を行っている。山沢ら[3]は海洋曝露されたアングル材を対象に, 腐食形状, 板厚減少量, 腐食速度などの腐食形態の評価および計測間隔の違いによる表面形状の再現性について検討している。また, 杉浦ら[4]は腐食鋼管より引張試験片を取り出して引張試験を実施し, 腐食鋼管の有効板厚について評価を行っている。

さらに, 田村ら[5], [6]は腐食鋼管の残存耐力に関して, 腐食鋼管の圧縮実験を行うとともに, 汎用有限要素法プログラムを用いて圧縮耐荷力解析を行い, 圧縮強度評価として Plantema の提案式を用いて簡易に評価が行われている。また, 腐食形状を単純にモデル化し, 不均一な板厚分布を有する周辺単純支持の鋼板に対する圧縮耐荷力性状を数値シミュレーションにより明らかにしている。

北根ら[7]は腐食鋼管の補修および補強に関する研究として, 腐食に相当する切削した鋼管に添接板を溶接して載荷実験を行い, 有限要素解析により耐荷力性能評価が行われている。さらに, 渡邊ら[8]は腐食鋼管の鋼板溶接工法として, 気中溶接の場合と水中溶接の場合について, すみ肉溶接の強度と変形性能, および破断性状に関する比較を行っている。

このように腐食に関する評価方法の研究および腐食鋼構造物の耐荷力の研究が進められている中,

\*工修 名古屋大学大学院博士課程後期課程  
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)  
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 1-6-10)  
\*\* 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)  
\*\*\*博(工) 岐阜工業高等専門学校助教  
(〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑 2236-2)  
\*\*\*\*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)

「港湾の施設の技術上の基準」[9]は 2007 年に改正され、これまでの許容応力度法を基本としてきた性能照査は、確率論に基づいた信頼性設計法の導入が図られた。この改正に伴い、港湾鋼構造物防食・補修マニュアル[10]も 2009 年改訂された。

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・補強後の鋼部材の保有性能が要求性能を満足するように、抵抗断面力が発生断面力を上回るように設計される。しかしながら、抵抗断面力の計算の際には、腐食減肉分を補うように添接板の板厚が設計され応力計算が行われるが、補修部つまり減肉部や添接板における座屈耐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。したがって、本研究においては、添接板補修された鋼管減肉部の繰返し曲げ挙動について検討を行うものである。

港湾構造物の棧橋鋼管部は図-1 に示すように飛沫帯および干潮面下の腐食速度が大きく、腐食状況は長さ方向および周方向についても一様ではない。本研究では、添接板補修した断面欠損鋼管杭の耐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ている。腐食鋼管の耐力としては、文献[2]で示しているように、腐食性状を入力すれば耐力を求めることができることが明らかになっているので、今回のモデルと組み合わせることによって実際の補修鋼管の耐力を求めることができる。また、棧橋鋼管部は軸力と曲げを受けることになるが、曲げの影響が大きいと考え、軸力と曲げを受ける研究を行うための前段階として繰返し曲げのみを受ける場合について検討を行った。

## 2. 補修鋼管の繰返し曲げ実験

### 2.1 供試体

文献[7]において、補修鋼管の単調載荷曲げ耐力実験について報告されているが、今回はその実験の延長で行われた繰返し曲げ実験について報

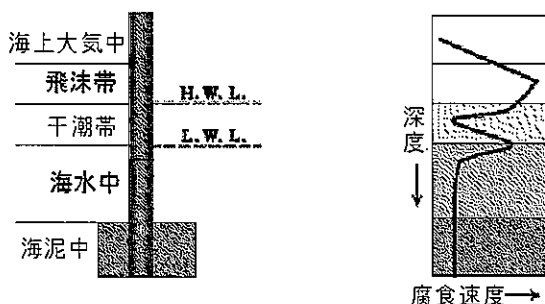


図-1 鋼管杭の腐食ゾーン

告する。

本実験では、港湾構造物である棧橋などで使用される鋼管杭の補修を対象としている。JISA5525で規定されている鋼管杭は SKK400 (あるいは SKK490) であるが、実験可能な寸法を考慮して、JISG3444 に規定される STK400 (一般構造用炭素鋼鋼管、外径=216.3mm、板厚=12.7mm) を使用した。JISA5525 に規定されている鋼管杭の径厚比はおよそ 15~50 の範囲にあるため、本研究で使用した鋼管は、一般的な鋼管杭より径厚比が小さい。しかし、曲げを受ける鋼管の耐力は圧縮側に生じる局部座屈の影響が大きいと推定され、径厚比が 50 以下であれば塑性域での曲げ局部座屈を生じることになり、径厚比の影響が少ないと考えられる[11]。

本実験では、腐食による板厚減少を模擬するため、長さ方向に 150mm の部分を円周方向に一様に切削し、板厚を 6mm 減少させた断面欠損鋼管を使用した。なお、切削による材質影響については影響が少ないものと考えここでは考慮していない。本実験で使用した鋼管寸法の場合、圧縮荷重下において、6mm 減肉後も減肉部では塑性座屈を起こし、その時の座屈波長は 75mm 程度と予想されたため、減肉部長さを約 2 倍の 150mm とした。供試体としては、無欠損鋼管 (Type0)、断面欠損鋼管 (Type1) および添接板補修鋼管 (Type3) の 3 タイプとし、その概要を表-1 に示す。

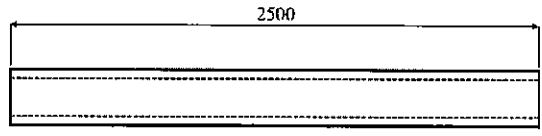
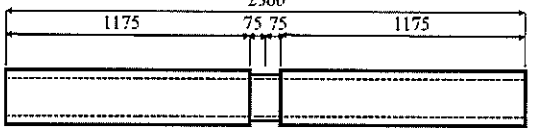
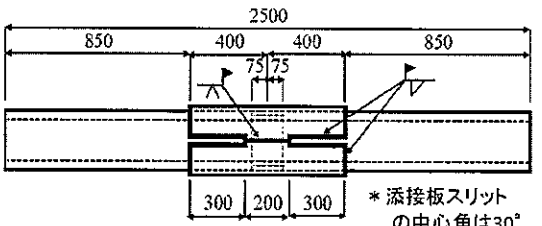
鋼板添接補修工法による補修設計は、港湾鋼構造物防食・補修マニュアル[12]に従って許容応力度設計を行い、添接板の必要板厚および必要溶接長を決定した。設計に使用した条件と仮定を以下に示す。

- (1) 添接板補修鋼管の曲げ耐力を無欠損の鋼管の耐力まで回復させる。
- (2) 添接板は、鋼管にすみ肉溶接され、設計溶接脚長は 6mm とする。
- (3) すみ肉溶接の設計はすべてせん断力による。

### 2.2 使用鋼材

本実験で使用した鋼管 STK400 と添接板 SM400 の材料引張試験より得られた応力-ひずみ曲線を図-2 に示し、得られた材料定数を表-2 に示す。JIS5 号引張試験片をそれぞれの材料に 3 体ずつ用意して材料引張試験を行った。図-2(a)の R-1, R-2 および R-3 は鋼管から切り出した試験片の結果を示し、弾性係数、降伏応力、ひずみ硬化開始ひずみに 3 試験片の平均値を用いた解析に使用する応

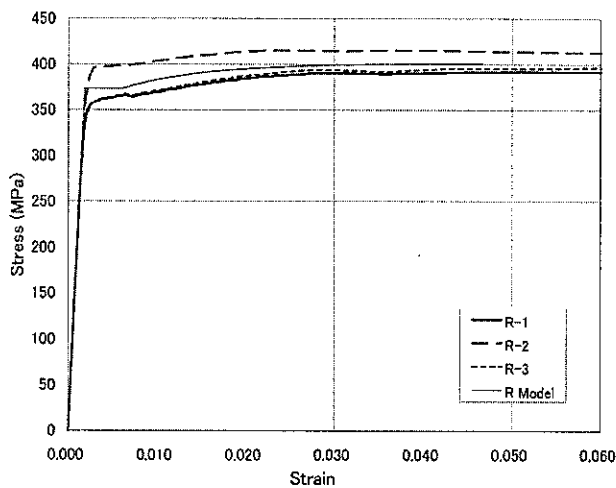
表-1 供試体概要

供試体タイプ	寸法平面図 (単位: mm)	減肉量 (mm)	添接板厚 (mm)	供試体名
Type 0		0	0	KN0B
Type 1		6	0	KN1B
Type 3		6	6	KW3B1

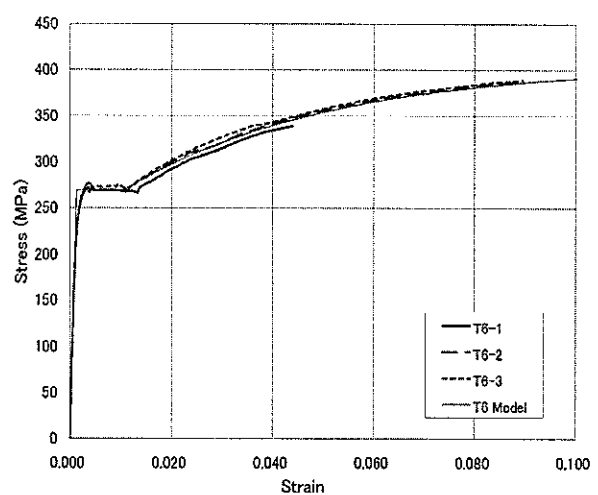
\*添接板スリットは上下対象にあり、上記図面の垂直方向が載荷方向となる

表-2 材料試験結果

材料	JIS規格	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)
鋼管	STK400	203.6	0.282	374	401
添接板 (t=6mm)	SM400B	204.6	0.282	269	406



(a) 鋼管 (STK400)



(b) 添接板 (SM400)

図-2 応力-ひずみ曲線

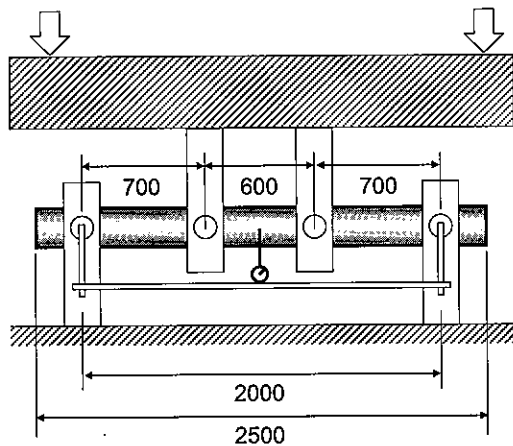
力ひずみ関係を R Model に示す。

図-2 (b) の T6-1, T6-2 および T6-3 は 6mm 厚の添接板から切り出した各試験片の結果を示し、弾性係数、降伏応力、ひずみ硬化開始ひずみに 3 試験片の平均値を用いた解析に使用する応力ひずみ関係を T6 Model に示す。

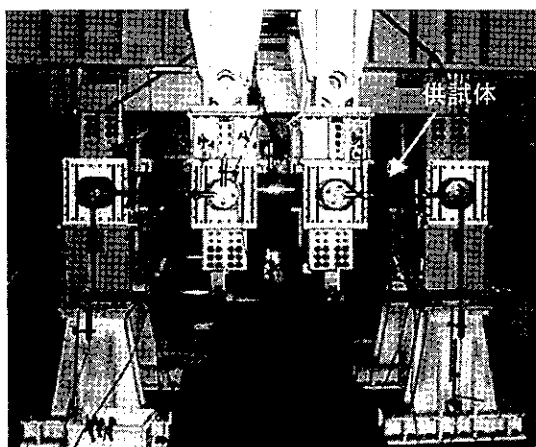
### 2. 3 荷重方法

両端単純支持となる 4 点曲げ荷重実験の概略図を図-3 に示す。繰返し曲げ荷重では、最大荷重を過ぎて、最大荷重の 90% に荷重が除荷するまで単調荷重を行った後、荷重がゼロになるまで除荷し、その時の変位を基準として、降伏変位整数倍漸増による正負交番繰返し荷重を行った。繰返し荷重は、 $-\delta_y, \delta_y, -\delta_y, \delta_y, -2\delta_y, 2\delta_y, -2\delta_y, 2\delta_y, -3\delta_y, 3\delta_y, -3\delta_y, 3\delta_y, \dots$  と  $\delta_y$  ずつ変位を漸増させた交番荷重であり、同じ変位を 2 回ずつ繰返している。ここで、 $\delta_y$  はそれぞれの供試体の降伏変位である。

実験では、4MN アクチュエータ (理研精機株式



(a) 概略図 単位 (mm)



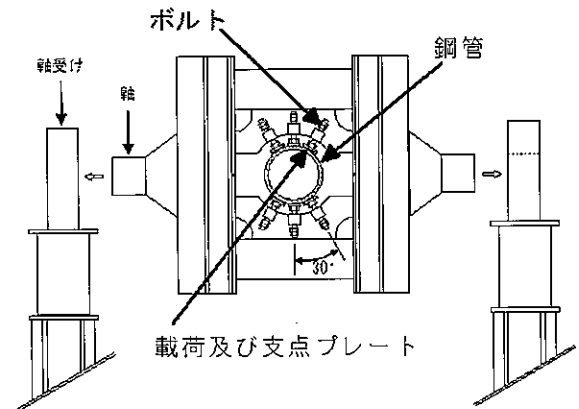
(b) 荷重装置写真

図-3 荷重方法概要

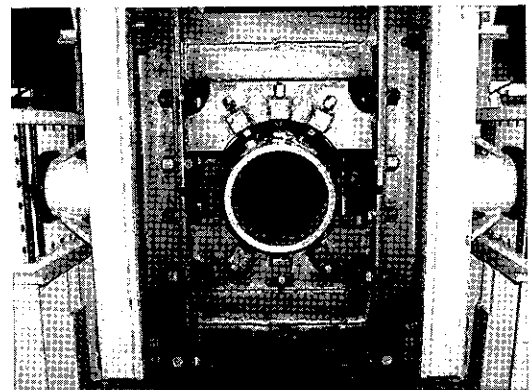
会社製) を 2 本使用し、変位制御により荷重を行った。図-3(a) に示すように、支点間距離は 2,000mm, 荷重点距離は 600mm, 支点-荷重点間距離は 700mm である。支点および荷重点では、図-4 に示すように、支持用治具を軸受で受けることで鋼管の回転を許容し、鋼管は支持用治具に外側から上下それぞれ 6 本、計 12 本のボルト (M16) により固定されている。

### 2. 4 繰返し曲げ実験結果

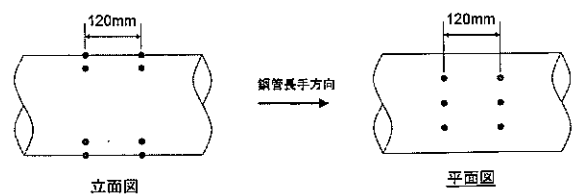
表-3 に曲げ供試体の寸法実測値と理論降伏荷重を示す。また、図-5 に各ケースのスパン中央



(a) 鋼管支持治具概略図



(b) 支持治具写真



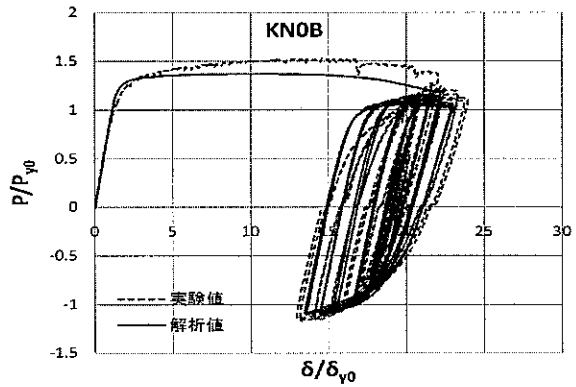
(c) 一支持点におけるボルト支持位置

図-4 曲げ実験鋼管支持方法

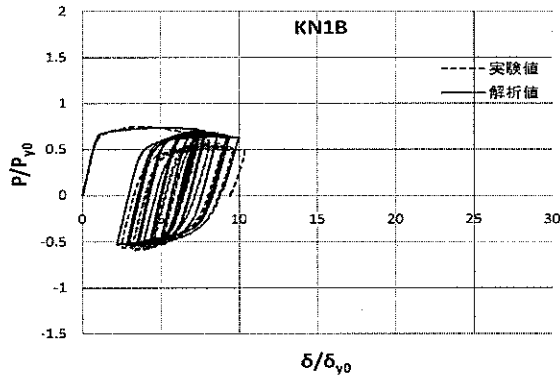
表-3 曲げ実験供試体寸法実測値と理論降伏荷重

	KN0B	KN1B	KW3B1
鋼管外径(mm)	217.3	216.4	216.3
鋼管板厚(mm)	12.0	12.1	12.1
減肉部板厚(mm)	—	6.49	6.78
添接板厚(mm)	—	—	5.93
鋼管断面2次モーメント( $10^7\text{mm}^4$ )	4.09	4.07	4.06
(添接板+減肉鋼管)断面2次モーメント*( $10^7\text{mm}^4$ )	—	2.00	4.65
理論降伏モーメント( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )	141	73	110
理論降伏荷重( $\text{kN}$ )	403	209	315

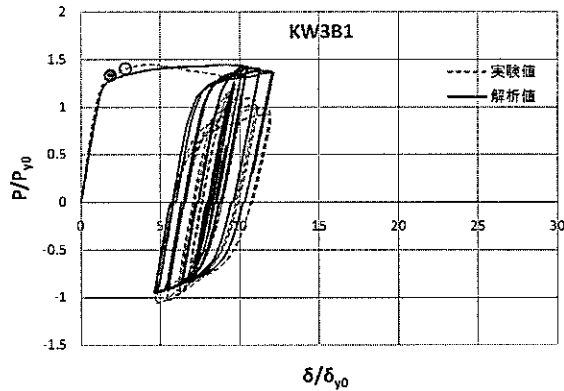
\*断面図心に関する添接板および減肉鋼管それぞれの断面2次モーメントの合計



(a) KN0B

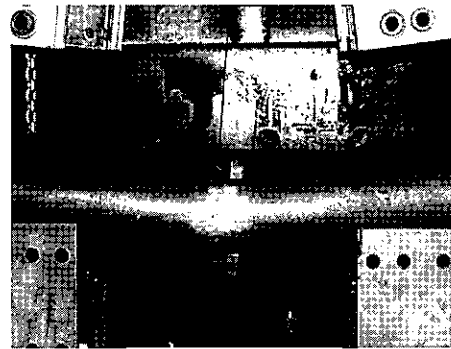


(b) KN1B

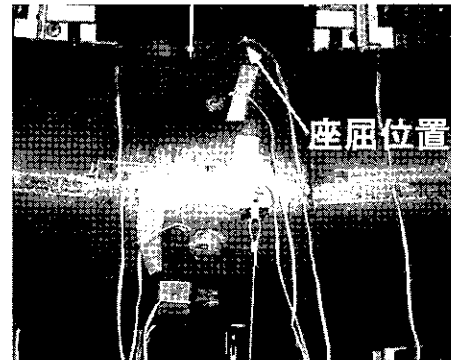


(c) KW3B1

図-5 支間中央における荷重-変位曲線



(a) KN0B



(b) KN1B (断面欠損部)



(c) KW3B1 (補修部)

図-6 供試体最終状況写真

における荷重-変位曲線（青色破線）を示す。この図の縦軸と横軸は無欠損鋼管の場合の降伏荷重および降伏変位で無次元化している。図-5(a)に示す KNOB のケースにおける荷重の 0kN 近傍での不連続性は、載荷中は鋼管が扁平化し、載荷していない支持ボルトとの間に隙間ができるため、繰返し載荷において載荷方向を反転した時、隙間がなくなるまで荷重が作用しないためである。その他のケースについては、載荷方向を反転させる前に支持ボルトを締め直し、支持ボルトと鋼管の隙間をなくしてから逆方向の載荷を行った。

曲げ載荷実験における崩壊形式は、KNOB については等曲げ区間で全断面塑性化した曲げ破壊、KN1B については減肉部で降伏後、減肉部の上側において局部座屈が発生した。また、KW3B1 については、降伏後、下側添接板の内側前面すみ肉部に亀裂が発生した（図-5(c)の●点）。その後、最大荷重前に添接板上側の突合せ溶接部に亀裂が発生し（図-5(c)の○点）、繰返し載荷時に、上側の突合せ溶接部の亀裂が溶接線方向に進展し、また下側の前面すみ肉の亀裂は添接板周方向に大きく進展し添接板が破断した。

本稿で実験結果を報告していない実験供試体も含めると、4 体の水中溶接補修供試体のうち 2 体に突合せ溶接部での亀裂が見られ、残りの 2 体では亀裂は発生しなかった。また、亀裂が発生した 2 体とも最大荷重直前での亀裂発生であった。何に起因して亀裂発生の有無につながったかは、これまでに特定できていないが、3 体の気中溶接補修供試体では発生していないことから、水中溶接部の性能に起因していることが考えられる。今後、原因を明らかにし、このような突合せ溶接での破断を起ささないような設計が必要である。

図-6 に各供試体の最終状況写真を示す。

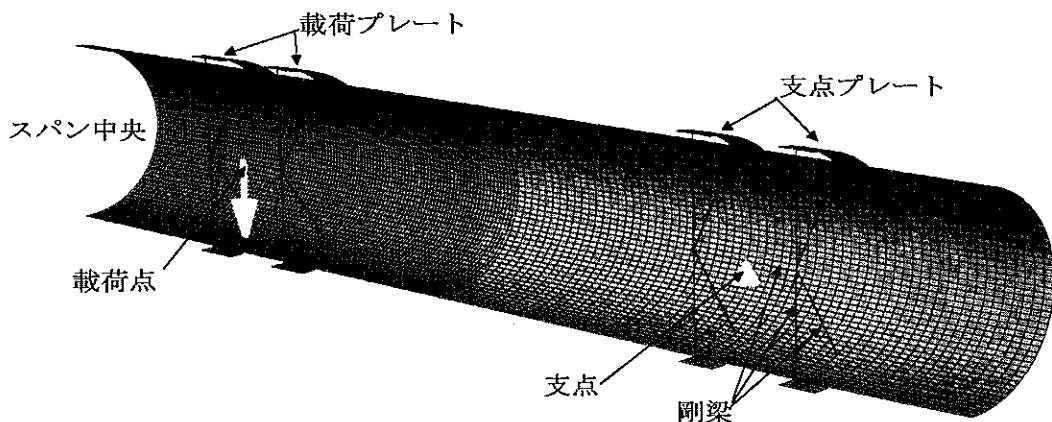


図-8 荷重プレートおよび支点プレートのモデル化

### 3. 有限要素解析による実験結果の再現

#### 3.1 解析モデル条件

繰返し曲げを受ける添接板補修された断面欠損鋼管の解析対象鋼管の概略図を図-7 に示す。解析モデルは、単純支持された鋼管の断面欠損部が等曲げを受けるように設定した。

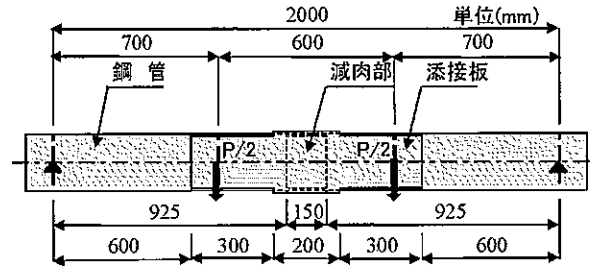
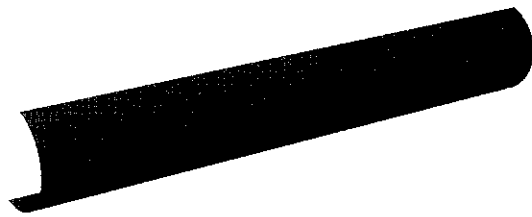


図-7 解析対象鋼管 (φ216.3)

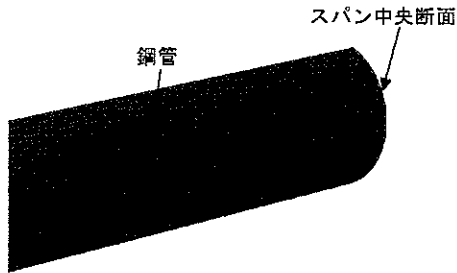
なお、実験値と解析値との比較においては、実験条件と解析条件を合わせるため、載荷点および支点において図-8 に示すような載荷プレートおよび支点プレートを用いて支持し、その部分は接触問題として解析を行った。

鋼管の形状寸法については、繰返し曲げ実験を行った供試体である外径=216.3mm、板厚=12.7mm の鋼管 (STK400) を対象とした。

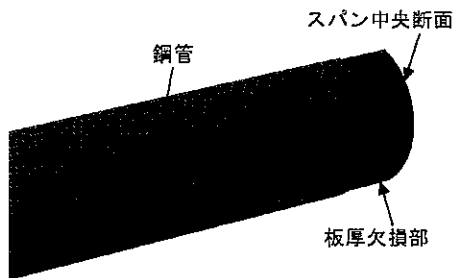
解析には汎用有限要素解析プログラム ABAQUS ver.6.8[13]を使用した。図-9 に解析モデル例を示す。等曲げを受けている鋼管であるため、解析モデルは 1/4 モデルとした（図-9(a)参照）。鋼管および添接板は薄肉シェルを対象とした 4 節点シェル要素 (S4) でモデル化し、鋼管と添接板のすみ肉溶接部は剛な梁要素を用いて鋼管と添接板の節点を接合した。減肉部の板厚不連続部は応力集中の発生が考えられるが、本研究では補修部の曲げ局部座屈を対象としており、曲げ局部座屈は



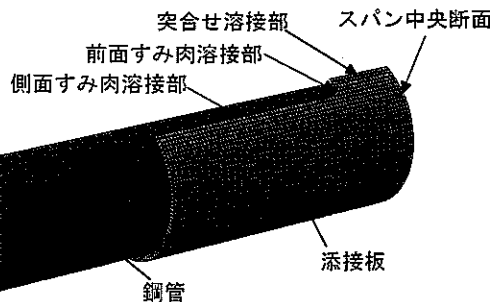
(a) 無欠損鋼管の 1/4 モデル



(b) 無欠損鋼管モデル (スパン中央部のみ表示)



(c) 減肉鋼管モデル(スパン中央部のみ表示)



(d) 添接板補修鋼管モデル (スパン中央部のみ表示)

図-9 解析モデル例

減肉区間に生じるものと考えられ、応力集中より板厚不連続による曲げモーメントの影響がより大きいと考え、板厚不連続部は図-10 に示すようにすみ肉溶接部と同様に剛な梁要素を用いて偏心の影響をモデル化した。

降伏後の硬化則は、非線形等方・移動硬化則を使用した。等方硬化挙動では降伏曲面の大きさ変化を考慮し、移動硬化成分は線形 Ziegler 硬化則と非線形性を導入する緩和項を考慮している。

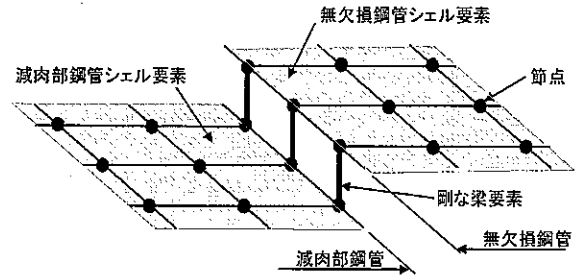


図-10 減肉部のモデル化

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3種類あり、図-9 (b) 無欠損鋼管は腐食をしていない元の鋼管のケースであり、図-9 (c) は減肉鋼管のケースであり、図-9 (d) 添接板補修鋼管は板厚欠損部を添接板にて補修を行ったケースである。

### 3. 2 要素分割数による解析結果の精度

有限要素分割数による解析結果の精度比較は、図-9(a) の解析モデルに単調載荷を行った無欠損鋼管の最大荷重と最大荷重時のスパン中央のたわみについて行った。鋼管 1/2 断面の円周方向分割数を 60 分割, 30 分割, および 16 分割した場合の解析結果を用いて, L.F.Richardson の外挿式から導かれた次式[14]による外挿値により, 要素分割数による精度比較を行った。

$$f_{ex} = \frac{N_2 N_3}{(N_2 - N_1)(N_3 - N_1)} f_1 + \frac{N_3 N_1}{(N_3 - N_2)(N_1 - N_2)} f_2 + \frac{N_1 N_2}{(N_1 - N_3)(N_2 - N_3)} f_3 \quad (1)$$

ここで、 $f_{ex}$  は真の解の外挿値、 $N_i$  は分割数の平方の逆数 ( $1/n_i^2$ )、 $f_i$  は分割数  $n_i$  に対する解析解である。式(1)は2方向の分割数の比が一定の場合に用いることができるものである。今回の解析の場合、円周方向 60 分割の場合には要素寸法 (円周方向×軸方向) は 5.4mm×5mm, 30 分割の場合には 10.7mm×10mm, 16 分割の場合には 20.1mm×25mm であり、要素形状がほぼ正方形に近いものであるため、円周方向と軸方向の分割数の比は同じであるものとして外挿値の計算を行った。表-4 に円周方向の要素分割数と精度の比較を示す。表中の誤差とは、解析結果の、真の解の外挿値からの誤差である。表-4 に示すように、

表-4 要素分割数と精度

		円周方向分割数			外挿値
		16	30	60	
最大荷重	kN	590.8	589.0	589.6	589.9
誤差	%	0.15	0.16	0.05	
スパン中央変位	mm	150.0	153.9	155.3	155.8
誤差	%	3.72	1.21	0.32	

円周方向 16 分割で十分な精度の解析結果が得られているものと判断できる。

しかし、荷重による断面変形過程において、板厚欠損鋼管と添接板の接触による影響が考えられるとともに、座屈変形を正確に把握する必要がある。したがって、要素分割数は円周方向に 60 分割とし、鋼管長手方向はスパン中央部（スパン長の 60%）の要素寸法を 5mm ピッチで、残りの支点付近の要素寸法を 10mm ピッチで分割して解析を行うこととした。

中村ら[15], [16]の研究によると、座屈変形を正確に表現できる解析モデルの作成にあたっては、要素の形状比に配慮して座屈箇所に必要な数の要素を配置する必要がある。分割数としては、象脚形座屈変形が発生する軸方向範囲に対して 5 要素以上の分割とし、要素の形状は正方形に近づけるのが望ましいとしている。

図-11 に解析により得られた減肉鋼管の曲げ荷重下での座屈状況を示す。これより、座屈箇所の要素数は 5 要素以上確保されており、座屈性状を正確にとらえることができる解析モデルであることがわかる。

図-12 に添接板補修減肉鋼管(外径=216.3mm, 鋼管板厚=12.7mm, 減肉部板厚=6.7mm, 減肉長=550mm, 添接板厚=9mm)の添接板と鋼管減肉部との接触状況を示している。ここで、減肉長を 550mm とし前述の実験供試体より長くしたのは、減肉部が短いと添接板と減肉鋼管の接触が起こらない場合があり、接触の発生をより起こりやすくするためである。この図で周囲と色が異なる部分が接触部分である。前述したように、この分割数で局部座屈形状を十分に表現でき、また、小さい領域の接触であっても接触部分を考慮することが可能であることがわかった。

### 3. 3 実験結果と解析結果の比較

曲げ繰返し実験を行った 3 つのケースについて、有限要素解析を行った。スパン中央での荷重-変位関係について、実験結果と解析結果との比較を

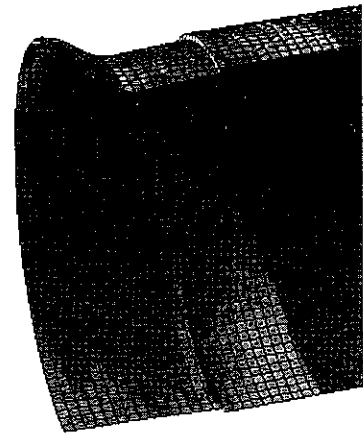


図-11 減肉鋼管の座屈状況

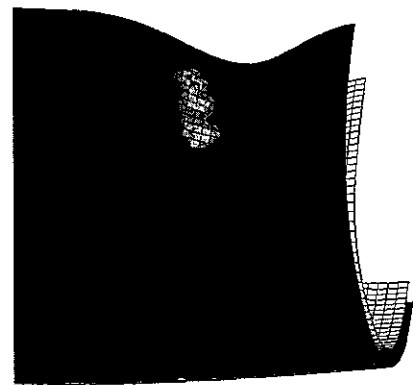


図-12 添接鋼管の接触状況

図-5 に示す。ここで、 $\delta_{y0}$  は無欠損鋼管における理論降伏変位であり、 $P_{y0}$  は理論降伏荷重である。図-5(a)で KNOB の実験結果と解析結果を比較すると、最大荷重は若干差があるものの、繰返し部分はほぼ一致している結果となった。変形状況は実験結果と同様に局部座屈はなく、全体のたわみ変形が生じた。

図-5 (b)に示す KN1B については、実験結果と解析結果はほぼ一致しているものの、繰返し領域では若干違いが見られる。実験においては、図-4 に示す鋼管の支持および荷重点で、繰返し荷重中に荷重方向を変える際、鋼管の扁平化により治具と鋼管の間に出来た隙間をボルトを締め直すことにより無くしているが、解析においてはこの作業が反映されていない。実験では、ボルトの締め直しにより、鋼管の変形が拘束され扁平化がより進んだものと推測され、実験値と解析値との間に若干の差異がでたものと考えられる。ただし、解析における変形状況は、実験結果と同様に、減肉部区間に曲げ局部座屈が発生した。

図-5(c)に示す KW3B1 では単調荷重時の最大



荷重はほぼ一致しているものの、実験結果における繰返し部のルーブ面積が解析結果と比較して小さくなっている。これは、実験において単調載荷中の最大荷重直前に添接板下側前面すみ肉部および上側突合わせ溶接部に亀裂が発生したこと、また繰返し載荷時に繰返し数の増加と共に下側の前面すみ肉の亀裂が添接板周方向に進展したことにより、繰返し時の耐荷力が大きく減少した結果であると考えられる。

本実験は、鋼管供試体の単調曲げ載荷実験を最大荷重を超えて荷重が最大荷重の90%に除荷するまで載荷を行った後、引き続いて繰返し実験を実施したものである。単調載荷中に前面すみ肉溶接部および突合せ溶接部の亀裂が発生し、繰返し実験の初期から亀裂が存在している。この前面すみ肉溶接部の強度は補修設計では最初から考慮されておらず、また、前面すみ肉溶接の有無で補修鋼管の耐荷力性能は大きく変化しないことが報告されている[17]。

突合せ溶接の破断は、その後の耐荷力性能に大きく影響を与えることは明らかであるが、亀裂の発生が最大荷重直前であったため、最大荷重までの挙動には影響がない。ただし、実際の補修では、突合せ溶接が破断しないよう溶接部の設計を行うべきと考える。

以上より、実験と解析結果を比較すると、多少の違いはあるものの、性能評価の対象とする領域が最大荷重が発生する程度までであること、および前面すみ肉溶接部は補修鋼管の挙動へ与える影響が少ない[17]ことを考慮し、添接板補修減肉鋼管の溶接の破断が起きないとした解析モデルを用

いて添接板補修鋼管の繰返し曲げ耐荷力性能を検討する。

#### 4. 繰返し曲げ挙動解析

##### 4.1 解析条件

鋼板添接補修された鋼管が曲げ繰返しを受ける場合の挙動を数値解析的に明らかにするため、表-5に示すように、減肉長は $L=150\text{mm}$ と一定にして、減肉部板厚(3mm~9.5mm)および添接板厚(6mm~12mm)を種々変えて解析を行った。なお、弾性係数、降伏応力およびポアソン比等の材料定数は、実験時の供試体データと同じものを使用した。

境界条件は、図-7に示す単純支持で、減肉部が等曲げを受けるようにした。また、支点および載荷点位置の鋼管中心点を各々の参照節点(図-13)として設定し、支点および載荷点断面の各々の節点集合をそれぞれの剛体運動に結合させて解析を行った。

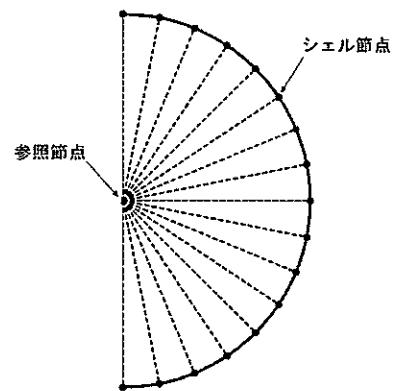
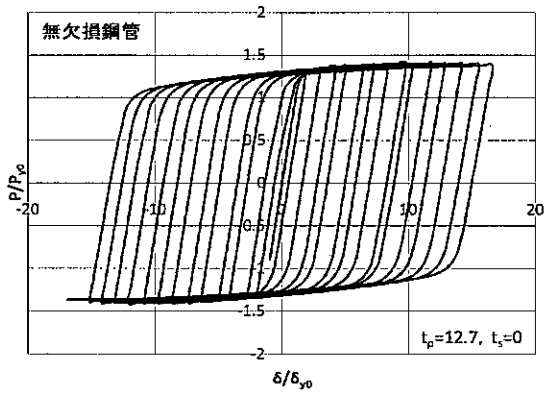


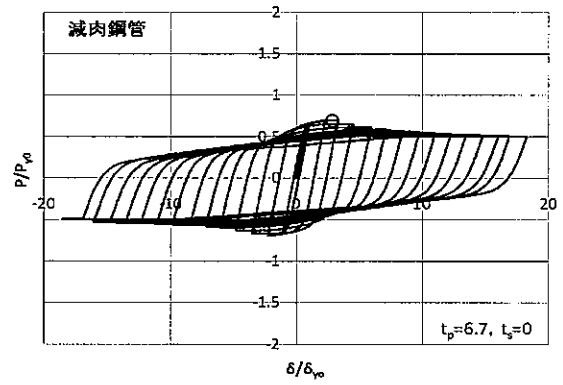
図-13 参照節点

表-5 繰返し曲げ解析ケース条件

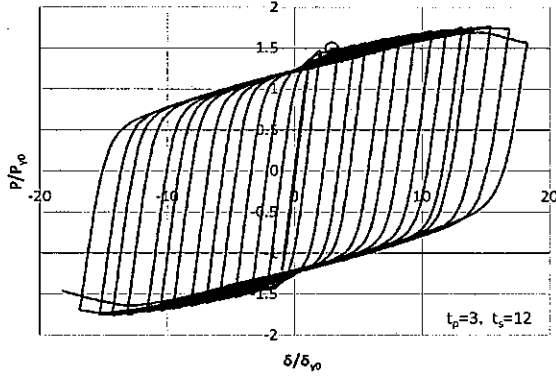
Case No.	鋼管(STK400)							添接板(SM400)			
	鋼管径 (mm)	鋼管厚 (mm)	減肉長 (mm)	減肉部厚 (mm)	弾性係数 (GPa)	降伏応力 (MPa)	ポアソン 比	添接板厚 (mm)	弾性係数 (GPa)	降伏応力 (MPa)	ポアソン 比
Case No.1 (無欠損鋼管)	216.3	12.7	150	12.7	203.6	374	0.282	-	204.6	269	0.282
Case No.2 (減肉鋼管)				6.7				-			
Case No.3				3.0				12.0			
Case No.4				3.5				11.0			
Case No.5				5.0				10.0			
Case No.6				6.7				6.0			
Case No.7				6.7				8.0			
Case No.8				6.7				9.0			
Case No.9				6.7				10.0			
Case No.10				9.5				6.0			
Case No.11				9.5				8.0			



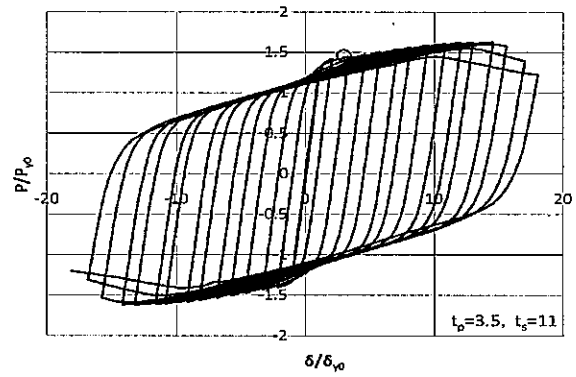
(a) Case No.1



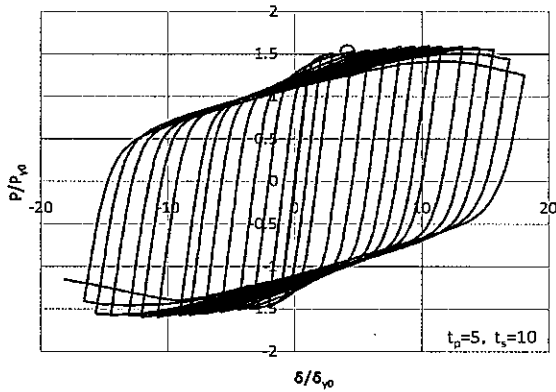
(b) Case No.2



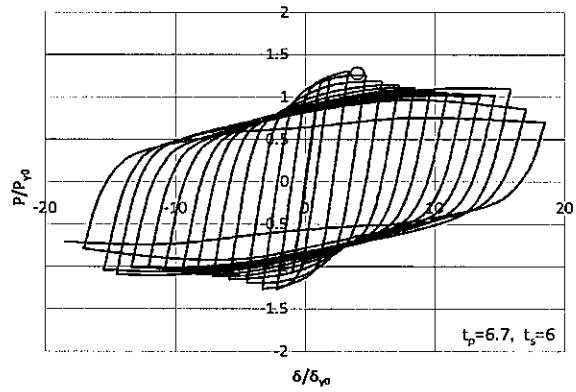
(c) Case No.3



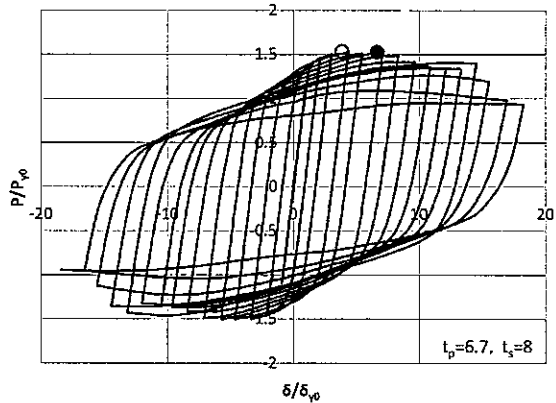
(d) Case No.4



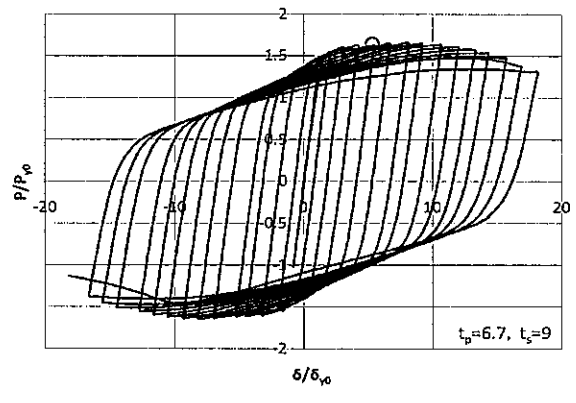
(e) Case No.5



(f) Case No.6

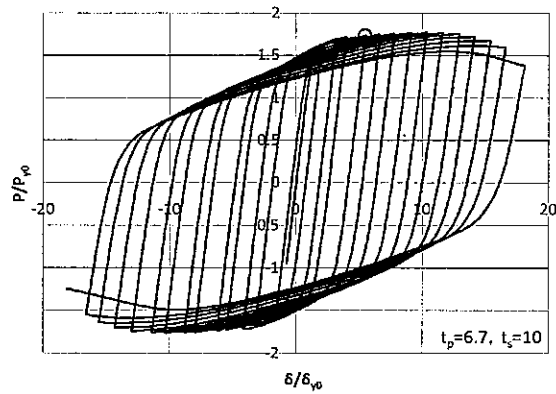


(g) Case No.7

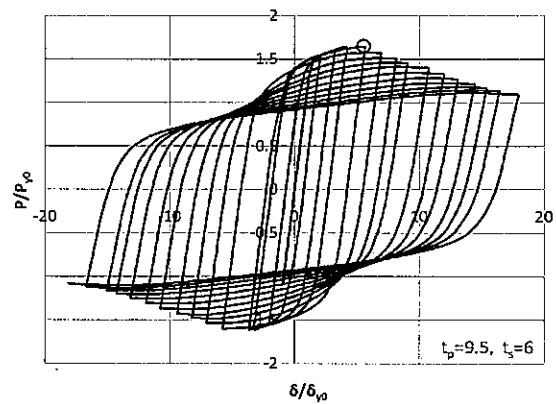


(h) Case No.8

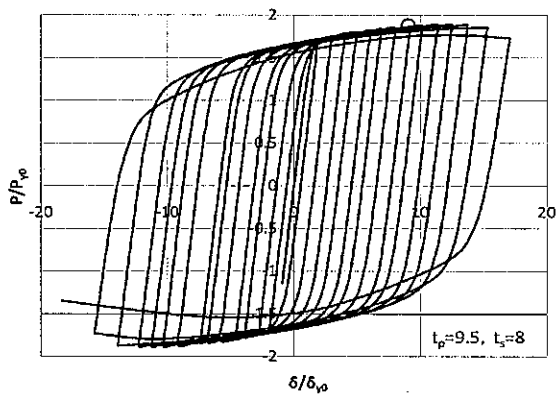
図-14 スパン中央における荷重-変位曲線 (その1)



(i) Case No.9

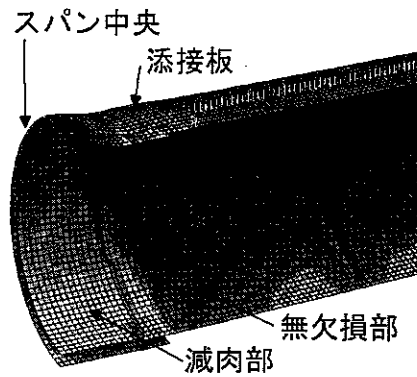


(j) Case No.10

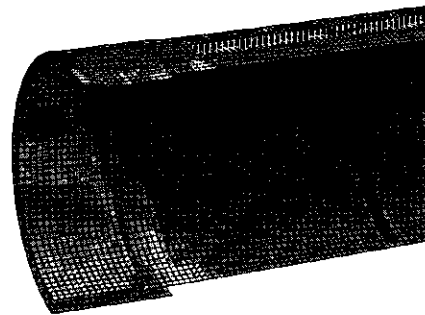


(k) Case No.11

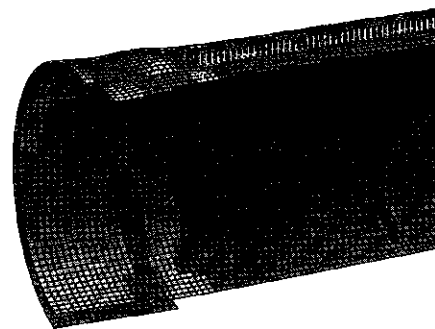
図-14 スパン中央における荷重-変位曲線 (その2)



(a) Case No.6 (図-14(f)の○点)



(b) Case No.7 (図-14(g)の○点)



(c) Case No.7 (図-14(g)の●点)

図-15 局部座屈変形図

繰返し曲げ解析は、無欠損鋼管の降伏変位を減肉鋼管および添接板補修鋼管の載荷点に  $\delta_{y0}$ ,  $-\delta_{y0}$ ,  $2\delta_{y0}$ ,  $-2\delta_{y0}$ , ... と与えて、スパン中央の変位と荷重との関係を求めた。

#### 4. 2 繰返し曲げ解析結果

繰返し曲げ解析を行った各ケースの荷重-変位曲線を図-14 に示す。ここで、 $\delta_{y0}$  および  $P_{y0}$  はそれぞれ無欠損鋼管のスパン中央における降伏変位および降伏荷重である。図-14 の中で、○印の部

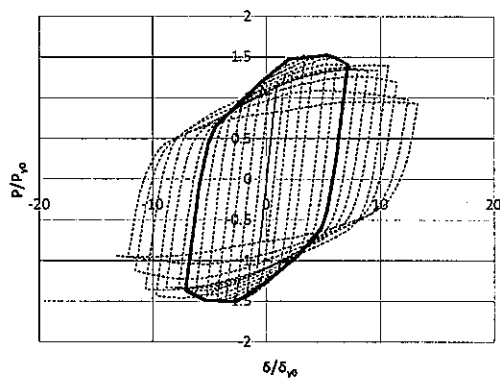


図-16 エネルギー吸収量算出例

分は局部座屈が最初に発生した点である。この点での座屈変形図の代表的例として、Case No.6 および Case No.7 の場合について図-15 に示す。ここで、図-15(b)は減肉部に最初の局部座屈が発生した時の座屈変形図であり、図 15(c)は添接板に最初の局部座屈が発生した時の座屈変形図である。

表-6 に繰返し曲げ解析結果の一覧表を示す。ここで、 $R_t$  は式(2)に示す径厚比パラメータであり、 $R_{t,p}$  および  $R_{t,s}$  はそれぞれ腐食鋼管および添接板の径厚比パラメータを示す。

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

ここに、 $R$  は板厚中心の半径、 $t$  は板厚、 $\sigma_y$  は降伏応力、 $E$  は弾性係数および  $\nu$  はポアソン比である。また、 $P_{max}$  は最大荷重（両載荷点での合計荷重）であり、 $A_{cy}$  は対象鋼管の載荷点における履歴ループ面積であり、 $A_{cy0}$  は無欠損鋼管の履歴ループ面積である。

無欠損鋼管の履歴ループ面積  $A_{cy0}$  は、最大荷重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、対象鋼管の最大荷重の90%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、例えば図-16の実線で囲まれる面積として計算され、変形時のエネルギー吸収量と考えられる。また、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荷重の90%まで許容している。

各ケースの変形状況は以下のものである。Case No.1 の無欠損鋼管は、最大荷重後わずかにスパン中央部に曲げ変形が生じるものの、大きな局部座屈変形もない。Case No.2 の欠損鋼管は、最大荷重後座屈変形が始まり、繰返しが増すにつれて変形が急に大きくなる。

添接板補修鋼管の載荷時の変形状況は以下のようである。Case No.6, No.10 および No.11 以外の添接板補修鋼管のケースでは、鋼管の径厚比パラメータが添接板のそれより大きいため、最大荷重後鋼管が最初に座屈し始め、次に添接板が座屈し、その後座屈変形が増大する結果となっている。

Case No.6 については、鋼管と添接板の径厚比パラメータがほぼ等しく、鋼管と添接板がほぼ同時に座屈し始め、その後変形が大きくなっていく。

Case No.10 については、Case No.6 のケースと同様に、鋼管と添接板がほぼ同時に変形し始めるが、添接板の径厚比パラメータが鋼管のそれより大きいため、添接板の座屈変形の方が鋼管より大きくなっている。この両ケースの荷重-変位曲線を見ると、最大荷重後の荷重低下が他のケースと比較して大きくなっており、添接板による補修効果が少ないことがわかる。

Case No.11 についてののみ、スパン中央の減肉部と無欠損鋼管部の添接板近傍の両方で座屈変形が生じている。スパン中央部の座屈変形については、鋼管の径厚比パラメータが添接板のそれより大きく、座屈変形は鋼管の方が大きくなっている。

表-6 繰返し曲げ解析結果

Case No. φ216.3×12.7	腐食鋼管		添接板		$P_{max}$ (kN)	$A_{cy}$	$A_{cy}/A_{cy0}$
	板厚 $t_p$ (mm)	径厚比 $R_{t,p}$	板厚 $t_s$ (mm)	径厚比 $R_{t,s}$			
Case No.1(無欠損)	12.7	0.0245	-	-	588	$A_{cy0} = 39.9$	1.000
Case No.2(欠損)	6.7	0.0450	-	-	292	6.4	0.159
Case No.3	3.0	0.0987	12.0	0.0208	735	55.3	1.386
Case No.4	3.5	0.0848	11.0	0.0226	678	48.0	1.201
Case No.5	5.0	0.0598	10.0	0.0248	666	51.0	1.276
Case No.6	6.7	0.0450	6.0	0.0406	546	14.1	0.353
Case No.7	6.7	0.0450	8.0	0.0307	637	28.6	0.715
Case No.8	6.7	0.0450	9.0	0.0274	691	47.0	1.177
Case No.9	6.7	0.0450	10.0	0.0248	741	56.9	1.425
Case No.10	9.5	0.0322	6.0	0.0406	688	26.1	0.654
Case No.11	9.5	0.0322	8.0	0.0307	789	70.7	1.771



### 5. 2 径厚比が異なる場合の検討

対象鋼管は外径=508mm, 板厚=12.7mm の STK400 である。減肉部の鋼管厚=6.7mm, 減肉長=360mm として, 添接板厚が 11mm~13mm の場合について解析を行った。各ケースの解析結果を表-7に, 荷重-変位曲線を図-18に示す。

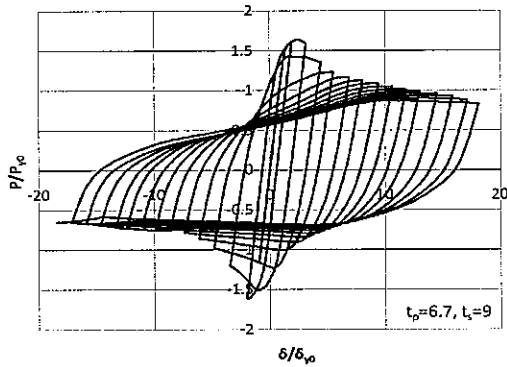
Case No.21 の無欠損鋼管は, 最大荷重後スパン中央部で座屈変形が始まり, 座屈変形が大きくなって荷重低下が起こっている。4. 2の Case No.1 の無欠損鋼管と比較して径厚比パラメータが大きいため, 座屈変形にともなって荷重低下が急激に生じていることが Case No.1 と異なる点である。

Case No.22 および Case No.23 の添接板補修鋼管のケースについては, 添接板の板厚が厚いにもかかわらず添接板の降伏応力が小さいため, 最大荷重後鋼管の座屈変形が始まり, 引き続き添接板も変形し, 添接板と鋼管の変形が増大している。Case No.24 のケースについては, 添接板端部近傍の無欠損鋼管部で座屈変形が生じており, 添接板の補修効果は十分にあることがわかる。

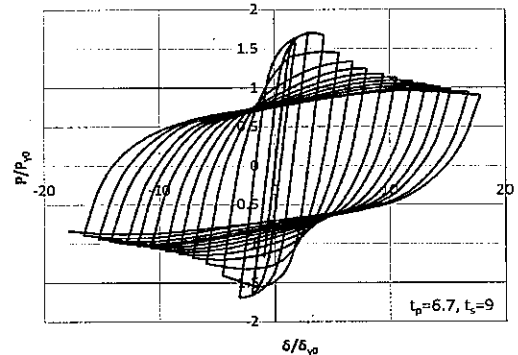
### 5. 3 降伏応力が異なる場合の検討

対象鋼管は外径=508mm, 板厚=12.7mm で, 減肉部の鋼管厚=6.7mm, 減肉長=360mm の鋼管に添接板厚が 9mm および 10mm の場合, 鋼管と添接板の降伏応力を同一にして, 降伏応力が大きい場合 ( $\sigma_y=374\text{MPa}$ ) と小さい場合 ( $\sigma_y=269\text{MPa}$ ) について解析を行った。これらの降伏応力は, 実験時の鋼管と添接板の供試体の引張試験により得られた降伏応力である。

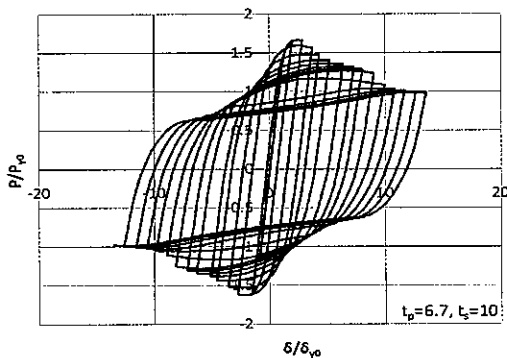
降伏応力が大きい場合の解析結果を表-8に, その荷重-変位曲線を図-19に示す。また, 降伏



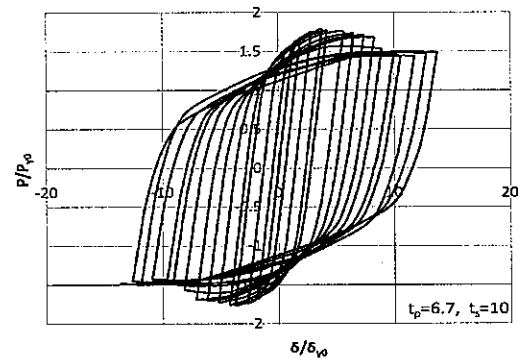
(a) Case No.32



(b) Case No.42



(b) Case No.33



(c) Case No.43

図-19 スパン中央における荷重-変位曲線 (降伏応力が大きい場合)

図-20 スパン中央における荷重-変位曲線 (降伏応力が小さい場合)

表-8 降伏応力が大きい場合の解析結果

Case No. φ508×12.7	腐食鋼管		添接板		P <sub>max</sub> (kN)	A <sub>cy</sub>	A <sub>cy</sub> /A <sub>cy0</sub>
	板厚 t <sub>p</sub> (mm)	径厚比 R <sub>t,p</sub>	板厚 t <sub>s</sub> (mm)	径厚比 R <sub>t,s</sub>			
Case No.31(無欠損)	12.7	0.0596			1318	A <sub>cy0</sub> =12.7	1.000
Case No.32	6.7	0.1115	9.0	0.0877	1639	5.7	0.452
Case No.33	6.7	0.1115	10.0	0.0791	1667	13.4	1.054

表-9 降伏応力が小さい場合の解析結果

Case No. φ508×12.7	腐食鋼管		添接板		P <sub>max</sub> (kN)	A <sub>cy</sub>	A <sub>cy</sub> /A <sub>cy0</sub>
	板厚 t <sub>p</sub> (mm)	径厚比 R <sub>t,p</sub>	板厚 t <sub>s</sub> (mm)	径厚比 R <sub>t,s</sub>			
Case No.41(無欠損)	12.7	0.0427			997	A <sub>cy0</sub> =25.3	1.000
Case No.42	6.7	0.0800	9.0	0.0629	1230	11.1	0.437
Case No.43	6.7	0.0800	10.0	0.0568	1286	33.9	1.339

応力が小さい場合の解析結果を表-9に、その荷重-変位曲線を図-20に示す。

降伏応力が小さい Case No.41 の無欠損鋼管の曲げ繰返し挙動は、図-18(a)の Case No.21 に示す降伏応力が大きい場合と同様の繰返し曲げ挙動となっている。

添接板補修鋼管のうち、Case No.33 および Case No.43 については、スパン中央の減肉部で座屈変形は生じず、スパン中央より断面力の小さい添接板端部近傍の無欠損鋼管部で座屈変形が生じており、補修部分は十分な耐荷力があることがわかる。

Case No.32 および Case No.42 については、最大荷重付近で鋼管が少し膨らみ、その後添接板も同様に局部変形し、徐々に座屈変形が大きくなった。

## 6. 補修設計への考察

腐食鋼管の補修設計が行われる際、腐食減肉分を補うように添接板の板厚が設計される。しかし、補修後の変形性能を確保するためには、添接板補修鋼管のエネルギー吸収能力を無欠損鋼管のそれと同等に確保する必要があると考えられる。

表-6~9より、減肉鋼管の補修後の変形性能を確保するためには、腐食厚に相当する板厚より厚い添接板が必要であることがわかる。例えば、減肉厚 6mm で、減肉部鋼管厚が 6.7mm の場合、外径=216.3mm の鋼管では添接板厚 t<sub>s</sub>=9mm 以上必要となり、外径=508mm の鋼管では t<sub>s</sub>=13mm 必要となっている。したがって、腐食厚と同じ厚さの添

接板で補修しても、鋼管および添接板が局部座屈を生じ、元の鋼管の変形性能を確保することができないことがわかる。

また、鋼管と添接板の降伏応力を同じにした場合で、6mm の減肉を考慮した Case No.33 および Case No.43 では、必要な添接板厚は t<sub>s</sub>=10mm 以上となり、鋼管と添接板の降伏応力が異なる場合と比較し必要な添接板の板厚が薄くなっている。これは、表-6 のケースでは、鋼管の降伏応力に比べて添接板の降伏応力が小さいため、添接板の降伏が早く、鋼管の座屈後の変形性能を確保できないためである。したがって、鋼管の材質と同程度の降伏応力を有する添接板による腐食鋼管の補修が効果的であると考えられる。

表-8 と表-9 を比較すると、腐食鋼管と添接板の降伏応力が同じ場合には、添接板の必要板厚は同じであり、径厚比パラメータにおける降伏応力の違いによる影響は少ないと考えられる。また、表-6 および表-7 より、腐食鋼管厚が同じでも腐食鋼管の径厚比パラメータが大きくなるにつれ、添接板の必要板厚は大きくなるがわかる。

## 7. まとめ

本研究では、腐食鋼管の補修方法として採用される鋼板添接補修工法によって補修された鋼管の繰返し曲げ耐荷力性能を明らかにするため、繰返し曲げ実験および有限要素法による弾塑性有限変位解析を行った。繰返し曲げ実験では、長さ

150mm にわたって一様に 6mm 切削した一般構造用炭素鋼鋼管 STK400 (外径=216.3mm, 板厚=12.7mm) に, 添接板を溶接し, 4 点曲げ繰返し載荷実験を行った. 本研究により得られた主な結論は以下ようになる.

- (1) 添接板補修減肉鋼管の繰返し曲げ載荷の弾塑性有限変位解析を行い, 載荷実験結果と比較したところ, 溶接部の亀裂は考慮できない解析モデルであるため, 溶接部の亀裂が発生しない添接板補修減肉鋼管の繰返し曲げ挙動解析には妥当な解析モデルであることがわかった.
- (2) 添接板補修減肉鋼管が繰返し曲げを受ける場合の局部座屈挙動を明らかにした.
- (3) 腐食減厚分を補う現行の設計法によって設計された鋼板添接補修鋼管の耐荷力は無欠損鋼管のそれより若干低い程度であるが, 繰返し曲げ変形性能は無欠損鋼管よりかなり劣ることを明らかにした.
- (4) 減肉鋼管と添接板の局部座屈を考慮して無欠損鋼管の変形性能を確保するためには, 腐食減厚に対する断面性能確保に必要な板厚より厚い添接板が必要であることを示した.

今後は, 変形性能を確保するための必要添接板厚の定量的評価を行い, 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ていくことで, 最適な設計に関する検討を行う予定である.

#### 謝辞

本研究の構造実験は, 愛知工業大学耐震実験センターおよび都市環境学科構造実験室で行い, 青木徹彦教授には実験に多大なサポートをいただいた. また, 本研究の一部は, 日本鉄鋼連盟による鋼構造研究・教育助成事業における 2007 年度一般研究助成 (研究代表者: 伊藤義人) を受けて行ったものである. ここに記して感謝の意を表します.

#### 参考文献

- [1] 土木学会: 海洋環境における鋼構造物の耐久・耐荷性能評価ガイドライン, 2009.
- [2] 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の残存圧縮耐力, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.721-730, 2006.
- [3] 山沢哲也, 野上邦栄, 伊藤義人, 渡邊英一, 杉浦邦征, 藤井堅, 永田和寿: 19.5 年海洋曝露された鋼アングル材の腐食形態, 土木学会論文集, Vol.64, No.1, pp.27-37, 2008.

- [4] 杉浦邦征, 田村功, 渡邊英一, 伊藤義人, 藤井堅, 野上邦栄, 永田和寿, 岡扶樹: 腐食鋼板の力学特性評価のための板厚計測および有効板に関する考察, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.679-687, 2006.
- [5] 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.
- [6] 杉浦邦征, 田村功, 渡邊英一, 伊藤義人, 藤井堅, 野上邦栄, 永田和寿: 腐食鋼板の圧縮強度の簡易評価法に関する検討, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.1, pp.43-55, 2007.
- [7] 北根安雄, 伊藤義人, 渡邊尚彦, 松岡和巳: 水中溶接鋼板添接補修された断面欠損鋼管の耐荷力実験, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.889-902, 2009.
- [8] 渡邊尚彦, 北根安雄, 伊藤義人: 一般構造鋼管へのあて板湿式水中溶接補修の継手挙動のモデル化, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.903-914, 2009.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 土木学会: 座屈設計ガイドライン 改訂 2 版 [2005 年版], 2005.
- [12] 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.
- [13] Dassault Systemes: ABAQUS/Standard User's Manual, ver.6.8, 2008.
- [14] Richardson, L.F.: Philos. Trans. Royal Soc. London, Ser.A, 210, pp.307-357, 1910.
- [15] 大坪秀臣, 中村秀治, 松浦真一, 小久保邦雄, 大坪敬: 軸対称要素を用いた弾塑性座屈解析, 日本機械学会論文集, Vol.58, No.556, pp.104-112, 1992.
- [16] 松浦真一, 中村秀治, 小木曾誠太郎, 大坪秀臣: 高速増殖炉の耐震座屈設計法に関する研究 (第 5 報, 座屈解析法の適用性評価), 日本機械学会論文集, Vol.61, No.585, pp.138-146, 1995.
- [17] Chen, X., Kitane, Y. and Itoh, Y.: Evaluation of repair design on corrosion-damaged steel pipe piles using welded patch plates, Journal of Structural Engineering, Vol.57A, pp.756-768, 2011.

(2011年2月14日原稿受理)