

添接鋼板補修された腐食劣化鋼管の  
耐荷・耐震性能に関する研究

古 西 和 夫

# 添接鋼板補修された腐食劣化鋼管の 耐荷・耐震性能に関する研究

平成 24 年 3 月

名古屋大学大学院工学研究科

社会基盤工学専攻

古 西 和 夫

## **Load Carrying Capacity and Earthquake-Resistant Performance of Corroded Steel Pipes Repaired by Steel Plate Patch**

### **ABSTRACT**

In recent years, the structures constructed at the high-growth period of Japanese economy are becoming old, and many cases of damaged structures have been reported. Corrosion is one of the most important causes of failure of steel structure. Especially, steel structures in marine environments are subjected to severely corrosive environments. It is understood that load carrying capacity and earthquake-resistant performance of steel structures will be reduced by corrosion.

According to the repair design manual of harbor steel structures, a patch plate is designed to make up for the thickness reduction due to corrosion. However, local buckling of corrosion-damaged pipe and patch plate is not considered in this design manual. Therefore, the study to understand the effect of local buckling of corrosion-damaged pipe and patch plate on the repair design is needed.

In this study, a finite element modeling procedure for a steel pipe repaired by patch plates is first proposed through a comparison of cyclic flexural behavior of repaired pipes between experiments and numerical analyses. Then, cyclic flexural behaviors of repaired pipes with and without a constant axial force are examined by numerical analysis to understand cyclic flexural behavior of repaired pipes and to determine required repair design to recover cyclic performance of the uncorroded pipe. Finally, flexural behavior of a harbor pier structure is examined numerically.

From the comparison with experimental and FE analysis results, it is shown that developed FE models are adequate to study behavior of repaired pipes and able to express local buckling shapes accurately.

In the study of cyclic flexural behavior of repaired pipes, local buckling behavior of reduced steel pipe by patch plate is explained from numerical results. 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. It is also found that it is effective to repair the corroded steel pipe by patch plates having yield stress equal to that of the steel pipe.

The FE model regarding the upper part of steel pile picked up from harbor pier is developed. It is the cantilever model of steel pipe. The free end of cantilever is the point of action of axial force and horizontal force. From the examination of cyclic flexural behavior of repaired pipe under an axial force, it is also shown that a required

thickness of patch plate becomes larger as the ratio of applied axial force to yield axial force becomes larger. Furthermore, a reduction in load carrying capacity of repaired pipe becomes larger as increase of the ratio of axial force.

From flexural behavior of the harbor pier model, it is also shown that a required thickness of patch plate is larger than the thickness reduction to secure the same load carrying capacity and ductility performance as those of an intact pipe. The ratio of required thickness of patch plate to corrosion thickness obtained by the harbor steel pier model is less than the ratio obtained by the partial model.



## 目 次

第 1 章 序 論-----	1
1.1 研究の背景-----	1
1.2 既往の研究-----	3
1.2.1 腐食形態および残存耐力に関する研究-----	3
1.2.2 溶接性状および耐荷力性能に関する研究-----	4
1.2.3 腐食劣化鋼管補修におけるライフサイクルコストに関する研究---	5
1.2.4 現行の設計法-----	5
1.3 本研究の目的と内容-----	6
第 2 章 再現可能な鋼板添接補修鋼管解析モデルの検証-----	10
2.1 緒言-----	10
2.2 繰返し曲げ載荷実験-----	10
2.2.1 供試体-----	10
2.2.2 使用鋼材-----	12
2.2.3 載荷方法-----	14
2.3 繰返し曲げ実験結果-----	17
2.3.1 供試体寸法実測値-----	17
2.3.2 荷重－変位曲線-----	17
2.3.3 崩壊形式-----	19
2.4 単調曲げ載荷実験と解析結果の比較-----	21
2.4.1 解析条件-----	21
2.4.2 解析結果の精度-----	24
2.4.3 実験と解析結果の比較-----	26
2.5 繰返し曲げ載荷実験と解析結果との比較-----	29
2.5.1 解析条件-----	29
2.5.2 実験と解析結果の比較-----	30
2.6 まとめ-----	36
第 3 章 鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ挙動解析-----	39
3.1 緒言-----	39
3.2 解析条件-----	39
3.2.1 境界条件-----	39
3.2.2 載荷方法-----	41
3.2.3 使用材料および硬化則-----	41
3.2.4 解析におけるパラメータ-----	41
3.2.5 変形性能評価-----	42

3.3	繰返し曲げ挙動解析結果-----	43
3.3.1	繰返し曲げ解析結果（その 1）-----	43
3.3.2	繰返し曲げ解析結果（その 2）-----	48
3.4	まとめ-----	53
第 4 章	軸力を受ける鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ挙動解析-----	55
4.1	緒言-----	55
4.2	解析モデル-----	55
4.2.1	栈橋モデル-----	55
4.2.2	使用材料-----	57
4.2.3	有限要素モデル-----	58
4.3	軸力を受ける繰返し曲げ挙動解析-----	58
4.3.1	解析条件-----	58
4.3.2	軸力を受ける鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ解析結果-----	59
4.3.3	軸力比による鋼板添接補修鋼管への影響-----	65
4.4	まとめ-----	68
第 5 章	栈橋モデルの曲げ挙動解析-----	69
5.1	緒言-----	69
5.2	解析モデル-----	69
5.2.1	解析対象栈橋-----	69
5.2.2	栈橋全体モデル-----	73
5.2.3	有限要素モデル-----	76
5.2.4	腐食厚分布-----	79
5.2.5	解析ケース-----	81
5.3	単調載荷曲げ挙動解析-----	83
5.3.1	解析用腐食量を使用した場合の解析結果-----	83
5.3.2	平均腐食量を使用した場合の比較-----	87
5.3.3	杭頭モーメントおよび地中部モーメント-----	88
5.3.4	単一鋼管モデルと栈橋モデルの結果比較-----	90
5.4	まとめ-----	91
第 6 章	結 言-----	93
6.1	各章のまとめ-----	93
6.2	設計への考察-----	94
6.3	今後の課題-----	95
謝辞	-----	96

# 第1章 序 論

## 1.1 研究の背景

わが国の港湾施設による貨物取扱量は年間約 30 億トンであり、わが国の経済活動に占める港湾施設の重要性は非常に大きい。港湾施設の社会資本ストックの多くは高度経済成長期に建設されており、建設後 40 年以上が経過している<sup>1.1)</sup>。この結果、構造物が耐用年数を迎えるため、2020 年頃から更新費が増大することが予想される。

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<sup>1.2)</sup>。

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」<sup>1.3)</sup>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設計は、確率論に基づいた信頼性設計法の導入が図られた。この改正にともない、港湾鋼構造物防食・補修マニュアル<sup>1.4)</sup>も 2009 年改訂された。

港湾鋼構造物の現地での被覆防食工法としては、水中硬化型被覆工法、ペトロラタム被覆工法、モルタル被覆工法、コンクリート被覆工法、電着被覆工法などがあり、補修工法としては、鋼板添接による補修工法、鉄筋コンクリートによる補修工法などがある。本研究では、腐食した鋼構造物の当初の耐荷性能を確保することが可能な補修工法のうち鋼板添接による補修工法について検討を行う。図 1.1 に腐食劣化鋼管例を、図 1.2 に鋼板添接による補修工法を施工した鋼管の補修例を示す。今後は、腐食して耐荷力の低下した港湾鋼構造物が増加することが予想され、補修設計を行って港湾鋼構造物の長寿命化を図る必要がある。

鋼板添接による補修工法は、腐食減肉部を添接鋼板で被覆し、既設鋼材と添接鋼板とをすみ肉溶接で接合して、既設鋼材と添接鋼板で力を伝達するようにした工法である。既設鋼材と添接鋼材との溶接方法には、乾式水中溶接と湿式水中溶接とに分けられる<sup>1.5)</sup> <sup>1.6)</sup>。湿式水中溶接は、ドライチャンバーの建設の必要がなく、施工速度も速く、経済的であることが知られており<sup>1.5)</sup> <sup>1.7)</sup> <sup>1.8)</sup>、栈橋の補修に広く用いられている。しかし、施工条件の悪さによる影響、急冷による熱影響部の硬化などの問題が知られている。



図 1.1 腐食した港湾鋼構造物の例



図 1.2 鋼板添接による補修された港湾鋼構造物の例

腐食劣化した鋼部材の補修設計においては、補修後の鋼部材の保有性能が要求性能を満足するよう、設計断面耐力が設計断面力を上回る設計が行われる。この場合、設計断面耐力の計算の際には、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。

現行の「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル」<sup>1.4)</sup>には、残存耐力評価において局部座屈に関する記述はあるものの、局部座屈を考慮した必要添接板厚に関して明らかにされていないのが現状である。したがって、本研究では、今後増加すると考えられる海洋構造物である腐食劣化鋼管構造物の補修設計において、鋼板添接補修鋼管の局部座屈を明らかにし、局部座屈を考慮した腐食劣化鋼管の補修に関する検討を行う。

## 1.2 既往の研究

本研究より以前に、渡邊により腐食劣化鋼管の耐力性能評価に関する研究<sup>1.9)</sup>が行われている。渡邊の研究では、腐食形状評価と腐食表面形状モデル作成、水中溶接すみ肉溶接継手挙動、および鋼板添接補修鋼管の耐力特性評価実験が行われている。耐力実験は2007年度に実施され、圧縮載荷実験および曲げ載荷実験が行われ、圧縮載荷実験および単調曲げ載荷実験について報告されている。単調曲げ載荷実験の延長で行われた繰返し曲げ載荷実験については報告されていないため、本研究においては、繰返し曲げ載荷実験の一部についても報告する。

### 1.2.1 腐食形態および残存耐力に関する研究

港湾環境下における鋼構造物の腐食が問題となる範囲は、満潮面より上の飛沫帯および干潮面直下の部分である。腐食環境と腐食進行の関係については、電気化学的な取り扱いの文献<sup>1.10)</sup>や、防錆上の保護皮膜や腐食生成物が金属表面から剥離される場合の金属腐食を扱った文献<sup>1.11)</sup>が見られる。また、海洋環境下において曝露された鋼構造物防食工の調査結果より効果を評価した文献<sup>1.12)</sup>や、海岸地帯におけるアルミニウム溶射鋼橋の耐食性について報告した文献<sup>1.13)</sup>が見られる。

補修設計を行うにあたっては腐食形状が力学特性に与える影響を評価することが必要であり、腐食形状の精密な測定、腐食形状のモデル化、および腐食形状を考慮した耐力実験や解析が行われてきた。

文献<sup>1.14)</sup>では、長期間曝露された鋼管を用いて、鋼材の詳細なデータを収集している。この計測結果を反映させた腐食劣化鋼管モデルを作成し、数値シミュレーションにより腐食劣化鋼管の性能評価を行っており、腐食劣化鋼管の評価には平均板厚を標準偏差で補正することが有効であることを示している。

文献 1.15)では、文献 1.14)の鋼管より引張試験片を取り出し、表面腐食形状の計測を行い、引張試験を実施している。引張力を受ける腐食劣化鋼材の有効板厚は最小断面での平均板厚を用いると精度よく評価できることを示している。また、文献 1.16)では、文献 1.14)の腐食劣化鋼管より取り出した円形鋼管の圧縮試験を行って、腐食劣化鋼管の耐荷性状を調べ、汎用構造解析コード ABAQUS を用いて腐食劣化鋼管の圧縮耐荷力解析を行っている。実用性を考えた場合の腐食劣化鋼管の圧縮強度評価として Plantema の提案式<sup>1.17)</sup>を用いて簡易的に評価している。

文献 1.18)では、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。また、実際の腐食性状を考慮した鋼板に対しても同様なシミュレーションを実施し、腐食形状が残存性能に与える影響について多方面より検討している。

文献 1.19)では、海洋曝露された鋼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、文献 1.20)では、全面腐食あるいは塗膜劣化による孔食を有する鋼管の圧縮および曲げ強度について、強度実験および有限要素解析を実施して、性能評価を行っている。

実際の構造物の腐食箇所における板厚を精密に計測することは困難であるため、シミュレーションモデルによって腐食性状を評価することが行われている。腐食形状をモデル化する手法として、ピットがポアソン過程に従って空間内を埋めていくもの<sup>1.21)・1.22)・1.23)</sup>、自己相関関係を利用した正規確立場モデル<sup>1.24)</sup>などがある。腐食形状モデルとしては、さまざまなモデルが提案されているが、モデル妥当性の検証は平均と標準偏差、歪度、尖度といった統計的特性、あるいはスペクトル分析によるものが主である<sup>1.25)</sup>。

## 1.2.2 溶接性状および耐荷力性能に関する研究

鋼板添接補修工法は、添接鋼板を溶接により接合することになり、乾式水中溶接と湿式水中溶接の溶接環境の違いによる溶接部特性に与える影響については、種々の研究成果<sup>1.26)・1.27)</sup>がある。また、鋼管に鋼板を溶接して耐荷力を確保するため、溶接性能によっては補修鋼管の耐荷力へ大きな影響を及ぼすため、次のような種々の研究が行われている。

文献 1.28)では、鋼板溶接補修の継手に関して、溶接継手実験を行って強度、変形性能、および破断性状について検討を行い、水中溶接と気中溶接との違いを確認している。

文献 1.29)では、水中溶接による鋼板添接補修工法によって補修された腐食劣化鋼管の耐荷力性能を明らかにするため、腐食を模擬した切削鋼管に添接板を溶接し、圧縮実験および4点曲げ載荷実験を行うとともに、弾塑性有限変位解析を行って耐荷力性能を予測可能とする解析モデルに必要な条件を検討している。

文献 1.30)では、気中溶接および水中溶接されたすみ肉溶接部の実験を行い、強度、変形性能、および破壊モードなどの力学的特性を検討している。また、文献 1.31)では、腐

食を模擬した切削鋼管に添接板を気中溶接および水中溶接して、すみ肉溶接部の挙動を明らかにし、すみ肉溶接の剛性を提案している。

鋼板添接補修工法の耐荷力評価時における力学的に問題となるのは、添接板の荷重分担率と、添接板による減肉部の座屈拘束の影響である。溶接による添接板補強の有効性を検討した研究<sup>1.32)</sup>や、載荷実験を行って添接荷重分担率の提案式を示した研究<sup>1.29)</sup>がある。座屈拘束された鋼管の挙動に関するものとしては文献<sup>1.33)~1.36)</sup>があり、ブレース材などへの適用が行われている。

### 1.2.3 腐食劣化鋼管補修におけるライフサイクルコストに関する研究

港湾鋼構造物が腐食により劣化が進んでくると、補修を行って耐荷力を確保することになるが、現在の社会情勢からライフサイクルコストを考慮に入れた適切な時期の補修による長寿命化が必須となっており、以下のような研究がある。

文献<sup>1.37)</sup>では、港湾の主要な係留施設のうち、矢板式岸壁について設計供用期間の破壊確率の正確な評価を行うとともに、その簡易評価法について検討しており、簡易推定法で十分な精度のライフサイクルカーブが評価できることを示している。

文献<sup>1.38)</sup>では、防食工の劣化モデルと腐食表面形状の経年変化作成モデルを用いて、海洋環境における鋼管杭の腐食表面の経年変化を予測し、鋼管杭の圧縮強度の経年変化を予測している。

文献<sup>1.39)</sup>では、弾塑性解析を用いて、腐食による栈橋下部工である鋼管杭の劣化にとまなう力学性能の低下を破壊確率により定量化し、それに基づいて補修工法と補修時期などを定めたライフサイクルシナリオを立案し、各サイクルのライフサイクルコストを算定することにより最適なライフサイクルシナリオを評価している。

### 1.2.4 現行の設計法

現行の補修設計は、「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル」<sup>1.4)</sup>に基づく信頼性設計法によっており、施設に要求される性能から定まる性能規定に満足するように設計が行われている。地震時の終局限界状態においては、設計断面耐力が設計断面力を上回るように設計されることになる。

断面耐力の評価において、腐食状況を考慮した部材の降伏の照査が基本となっており、平均残存板厚が 5mm 以下の場合には、局部座屈を起こす危険性が高いため、残存耐力はないものとするところになっている。しかし、設計的には腐食厚と同等以上の鋼板を添接することにより断面性能は確保するとしており、局部座屈に関しては十分に考慮されていないのが現状である。

腐食劣化鋼管は減肉して薄くなっており、また、添接板についても腐食減肉厚程度であり、腐食劣化鋼管と同様に薄板で構成された鋼板添接補修鋼管となり、局部座屈の影響が大きいものと推察される。したがって、腐食劣化鋼管の補修設計においては、局部座屈の

影響を十分に考慮して設計を行う必要があり，そのためには鋼板添接補修鋼管の曲げ挙動を明らかにする必要がある．

### 1.3 本研究の目的と内容

港湾環境下における腐食劣化鋼材の腐食形態に関する研究あるいは腐食劣化鋼材の残存耐力に関する研究は見られるものの，腐食劣化鋼構造物の補修設計に関する研究は少ないのが現状である．また，港湾鋼構造物における腐食劣化鋼構造物の補修設計は，一般的に港湾鋼構造物防食・補修マニュアル<sup>1.4)</sup>に基づいて行われている．この防食・補修マニュアルによる設計では，元鋼管の鋼管厚より薄い板厚となる補修部の減肉鋼管および添接鋼板の局部座屈については十分に考慮されていないのが現状であり，座屈耐力および繰返し載荷時の挙動を明らかにする必要がある．

したがって，本研究では，港湾鋼構造物のうち，栈橋等によく使用される鋼管杭を対象に，腐食劣化鋼管の耐力を確保するための鋼板添接補修された鋼管杭の弾塑性有限変位解析を行い，その挙動の概要について明らかにすることにより合理的な補修設計への一助となることを目的とするものである．以下に本研究の特徴を述べる．

#### (1) 繰返し曲げ載荷実験と解析モデルとの比較

2007 年度に実施された繰返し曲げ載荷実験<sup>1.9)</sup>について，有限要素モデルを作成し，実験結果と解析結果とを比較して解析モデルの妥当性について検討する．妥当性が確認されることにより，これ以降の解析モデル作成の基礎となり，鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ挙動，軸力を受ける場合の繰返し曲げ挙動，および栈橋モデルの曲げ挙動の解析が可能となる．

#### (2) 鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ挙動解析

(1) で作成された弾塑性有限要素モデルを使用して，腐食厚を変化させた鋼板添接補修鋼管の種々の径厚比パラメータに対する繰返し曲げ解析，鋼管径および降伏応力を変えた場合の繰返し曲げ挙動解析を行い，鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ挙動を明らかにするとともに，鋼板添接補修設計を行う場合の添接板厚に関する設計上の留意点について提案する．

#### (3) 軸力を受ける鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ挙動解析

通常，港湾鋼構造物に使用される鋼管杭は死荷重，上載荷重および地震時慣性力等により軸力を受けることになる．軸力を受けることにより，曲げのみが作用している場合に比べて鋼構造物全体の耐力が減少することになる．そこで，栈橋杭構造の一部を取り出し



て軸力を受ける片持梁モデルを作成し、繰返し曲げ挙動における軸力の影響について検討する。鋼板添接補修鋼管に作用する軸力の割合が増加した場合において、添接板の必要板厚の変化状況を明らかにし、鋼板添接補修設計に関する提案を行う。

#### (4) 栈橋モデルにおける曲げ挙動解析

鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ解析，軸力を受ける鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ解析で得られた知見に基づき，実際の栈橋構造をモデル化し，曲げ挙動解析を行う。解析モデルに上載荷重等を作用させ，栈橋構造の上部に強制変位を与えて，地震時慣性力による栈橋杭構造への影響を検討する。腐食分布モデルは，これまでの研究成果 1.2), 1.14)~1.16), 1.19)に基づき，実際の腐食分布に近いモデルであり，栈橋モデルの挙動および鋼板添接補修鋼管の添接板必要板厚を明らかにすることにより，鋼板添接補修設計に関する提案を行う。

### <参考文献>

- 1.1) 横田弘，宮崎正治，西園勝秀：港湾施設のライフサイクルマネジメントに関する研究，平成 17 年度国土交通省国土技術研究会，指定課題報告，2005.
- 1.2) 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.
- 1.3) 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.
- 1.4) 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.
- 1.5) Nixon, J. and Billingham, J. : A survey of underwater welding techniques, Endeavour, New Series, Vol.11, No.3, pp.143-148, 1987.
- 1.6) American Welding Society : Specifications for Underwater Welding, AWS D3.6M : 1999, American Welding Society, Miami, FL, 1999.
- 1.7) Wernicke, R. and Pohl, R.: Underwater wet repair welding and strength testing on pipe-patch joints, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 120, pp. 237-242, 1998.
- 1.8) Perez-Guerrero, F. and Liu, S. : Maintenance and repair welding in the open sea, Welding Journal, Vol.84, No.11, pp.54-59, 2005.
- 1.9) 渡邊尚彦：沿岸・海洋環境下の劣化鋼管の補修法と耐荷力性能評価に関する研究，名古屋大学学位論文，2009.
- 1.10) 松岡和巳，山本正弘，五戸清美：海水中に曝露されたマクロセル腐食現象の解析，Zairyo-to-Kankyo, 56, pp.99-105, 2007.
- 1.11) 福沢秀刀：剥離腐食と陰極剥離，防錆管理，pp.21-31, 2009.

- 1.12) 山路徹, 審良善和, 塩田昌弘, 久野賢二 : 三河港で 21 年曝露された鋼管杭の防食工における防食効果, 防錆管理, pp.8-13, 2009.
- 1.13) 植野修一 : 海岸地帯において設置後 30 年経過したアルミニウム溶射鋼橋の観察報告, 防錆管理, pp.14-18, 2009.
- 1.14) 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.
- 1.15) 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厚に関する考察, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.679-687, 2006.
- 1.16) 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.
- 1.17) Plantema, F.J. : Collapsing stresses of circular cylinders and round tubes, Report S.280, Nat Luchtvaart-laboratorium, Amsterdam, The Netherlands, 1946.
- 1.18) 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.
- 1.19) 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 A, Vol.64, No.1, pp.27-37, 2008.
- 1.20) 山根信, 松田漠, 柳原大輔, 田中王治, 藤久保昌彦, 岩尾直樹 : 海洋環境下の腐食鋼管部材の耐力評価について, 日本船舶海洋工学論文集, 第 3 号, pp.1-9, 2006.
- 1.21) 辻恒平, 久田俊明, 北川英夫 : Filtered Poisson Process に基づく全面腐食形状のモデル化とその評価, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.50, No.453, pp.1035-1041, 1984.
- 1.22) 藤井堅, 海田辰将, 中村秀治, 有尾一郎 : 経年変化を考慮した腐食表面生成モデル, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.657-665, 2004.
- 1.23) 山本規雄, 中井達郎 : 孔食部材の表面調査と腐食状態シミュレーション, 日本船舶海洋工学論文集, No.4, pp.287-294, 2006.
- 1.24) 貝沼重信, 細見直史, 金仁泰, 伊藤義人 : 鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的な腐食挙動に関する研究, 土木学会論文集, No.780/1-70, pp.97-114, 2005.
- 1.25) 辻恒平, 久田俊明, 北川英夫 : 腐食表面の三次元的不規則性のスペクトル解析による評価, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.49, No.439, pp.331-340, 1983.
- 1.26) Brown, R.T. and Masubuchi, K. : Fundamental research on underwater welding,

Welding Journal, Vol.54, No.6, pp.178-188, 1975.

- 1.27) 福手勤, 阿部正美, 長谷川博行, 松田史朗: 水中溶接された鋼矢板構造物の破断メカニズムと破断モードの改善に関する材料学的研究, 港湾技術研究所報告, 第 36 巻, 第 4 号, 1997.
- 1.28) 渡邊尚彦, 北根安雄, 伊藤義人: 一般構造用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.
- 1.29) 北根安雄, 伊藤義人, 渡邊尚彦, 松岡和巳: 水中溶接鋼板添接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.
- 1.30) Chen, X., Kitane, Y. and Itoh, Y. : Mechanical Properties of Fillet Weld Joints by Underwater Wet Welding in Repairing Corrosion-Damaged Offshore Steel Structures, Journal of Structural Engineering, Vol.56A, pp.742-755, 2010.
- 1.31) 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.
- 1.32) 太谷碧, 太田省三郎, 日野良治: 当板の有効性に関する研究, 溶接学会誌, Vol.26, No.9, pp.596-601, 1957.
- 1.33) 岸田英明, 高野昭信: 鋼管ぐいの座屈と端部補強, 日本建築学会構造系論文集, No.213, pp.29-39, 1973.
- 1.34) 桑原進, 多田元英, 米山隆也, 今井克彦: 二重鋼管の補剛性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.445, pp.151-158, 1993.
- 1.35) 鈴木敏郎, 小河利行, 小笠原朋隆: 薄肉鋼管により外側拘束された鋼管の塑性局部座屈に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.479, pp.93-99, 1996.
- 1.36) 加藤基規, 葛西昭, 馬翔, 宇佐美勉: 二重鋼管型座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.103-112, 2004.
- 1.37) 長尾毅, 尾崎竜三: 腐食の進行を考慮した矢板式岸壁のライフサイクルコストの簡易評価法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.249-260, 2009.
- 1.38) 藤井堅, 橋本和朗, 渡邊英一, 伊東義人, 杉浦邦征, 野上邦栄, 永田和寿, 中村秀治: 海洋環境における鋼管杭の圧縮強度の経年変化予測法, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.1, pp.92-105, 2010.
- 1.39) 横田弘: 港湾鋼構造の LCC 設計手法の確立に関する研究, 平成 22 年度 鋼構造研究・教育助成事業 研究報告書, 2010.

## 第2章 再現可能な鋼板添接補修鋼管解析モデルの検証

### 2.1 緒言

本実験は、気中あるいは水中で溶接された鋼管の繰返し曲げ耐荷力性能を実験的に明らかにし、現行設計法による鋼板添接補修による鋼管の耐荷力および耐震性能の妥当性を検討することを目的として2007年度に行われた実験である<sup>2.1)</sup>。

本実験においては、添接板が溶接された補修鋼管の圧縮荷重実験および曲げ荷重実験が行われ、曲げ荷重実験の延長として繰返し曲げ荷重実験が実施されている。このうち、圧縮荷重実験および曲げ荷重実験の結果については文献2.1)において明らかにされており、鋼管の崩壊形式および添接板の荷重分担について検討を行っている。なお、鋼板添接の溶接としては気中溶接および水中溶接を行い、溶接方法による比較検討を行っている。

鋼板添接補修された鋼管の耐震性能評価にあたっては、(1) 鋼板添接補修による減肉鋼管と添接板との荷重分担、(2) 添接板と鋼管の溶接挙動、(3) 減肉鋼管および補修添接板の座屈による耐震性能評価が問題として考えられる。(1)に関しては文献2.1)において検討されており、(2)については文献2.2)、2.3)、2.4)などで研究されている。また、(3)に関しては、二重鋼管の挙動を扱った文献2.5)などがあり、鋼管の圧縮荷重および単調曲げ荷重に関する研究としては文献2.1)などがある。しかし、腐食劣化鋼管を添接板により補修した補修鋼管を対象として、繰返し曲げ荷重実験を行い、座屈挙動を検討した研究はこれまで見当たらない。

本章では、鋼板添接補修された鋼管を対象に、耐荷力および繰返し曲げに着目した静的繰返し曲げ挙動に関する実験および弾塑性有限変位解析を行い、解析モデルの妥当性を検討した。

### 2.2 繰返し曲げ荷重実験

#### 2.2.1 供試体

文献2.1)では、鋼板添接補修鋼管の単調荷重曲げ耐荷力実験について報告されている、本研究においては、単調荷重曲げ実験<sup>2.1)</sup>の延長で引き続き行われた繰返し曲げ実験について概要を述べる。

本実験で曲げ荷重実験を行った供試体の概要を表2.1に示す。表2.1で、KN0Bは無欠損鋼管、KN1Bは減肉鋼管、KA2BおよびKW2Aはそれぞれ気中および水中溶接された溶接長が短い鋼板添接補修鋼管、KA3BおよびKW3Bはそれぞれ気中および水中溶接された溶接長が標準の鋼板添接補修鋼管、KA4BおよびKW4Aはそれぞれ気中および水中溶接されたスリットのある鋼板添接補修鋼管を示す。これらの供試体のうち、単調曲げ解

表 2.1 供試体概要






供試体タイプ	Type 0	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
					
供試体名	KN0B	KN1B	KA2B KW2B	KA3B KW3B	KA4B KW4B

表 2.2 解析対象の供試体

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	<p style="text-align: center;">2500</p>	0	0	KN0B
Type 1	<p style="text-align: center;">2500 1175    75   75    1175</p>	6	0	KN1B
Type 3	<p style="text-align: center;">2500 850    400   400    850 75   75 300   200   300</p> <p>* 添接板スリットの中心角は30°</p>	6	6	KW3B1 KA3B

\*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

析および繰返し曲げ解析を行った供試体は無欠損鋼管（Type0）、減肉鋼管（Type1）および鋼板添接補修鋼管（Type3）の3タイプとし、供試体寸法を表 2.2 に示す。

本実験では、港湾構造物である栈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。径厚比が小さいと、局部座屈は発生せず、全断面塑性化による曲げ破壊となる。しかし、本実験の断面欠損部の径厚比は約 15 となり、曲げを受ける鋼管の耐荷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る<sup>2.6)</sup>。

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 減少させた減肉鋼管を使用した。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。

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<sup>2.7)</sup>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) 鋼板添接補修鋼管の曲げ耐荷力を無欠損の鋼管耐荷力まで回復させる。
- 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。

## 2.2.2 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 2.1 および図 2.2 に示し、得られた材料定数を表 2.3 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 2.1 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力ひずみ関係を R Model に示す。図 2.2 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。

表 2.3 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

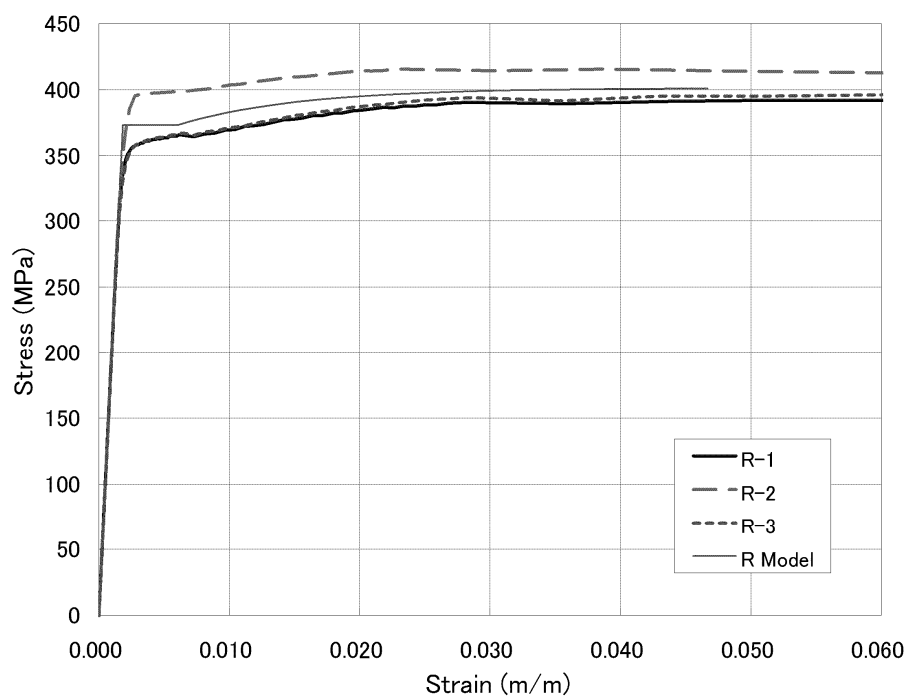


図 2.1 鋼管の応力-ひずみ曲線 (STK400)

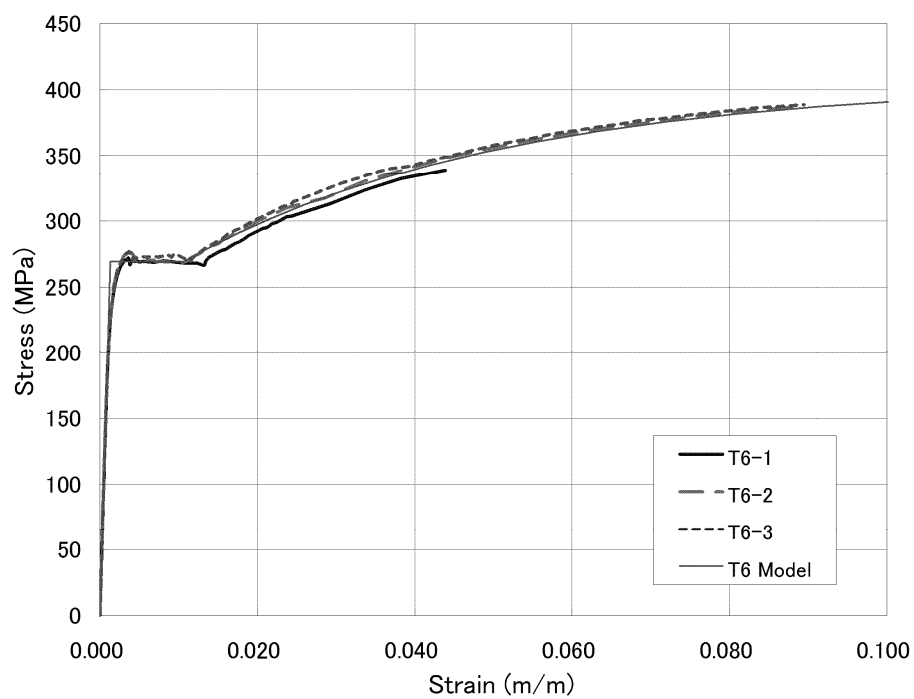


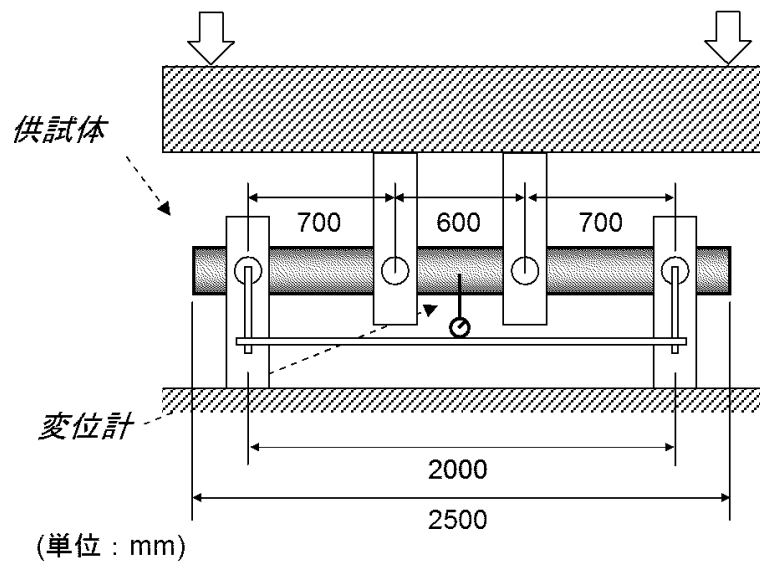
図 2.2 添接板の応力-ひずみ曲線 (SM400)

### 2.2.3 載荷方法

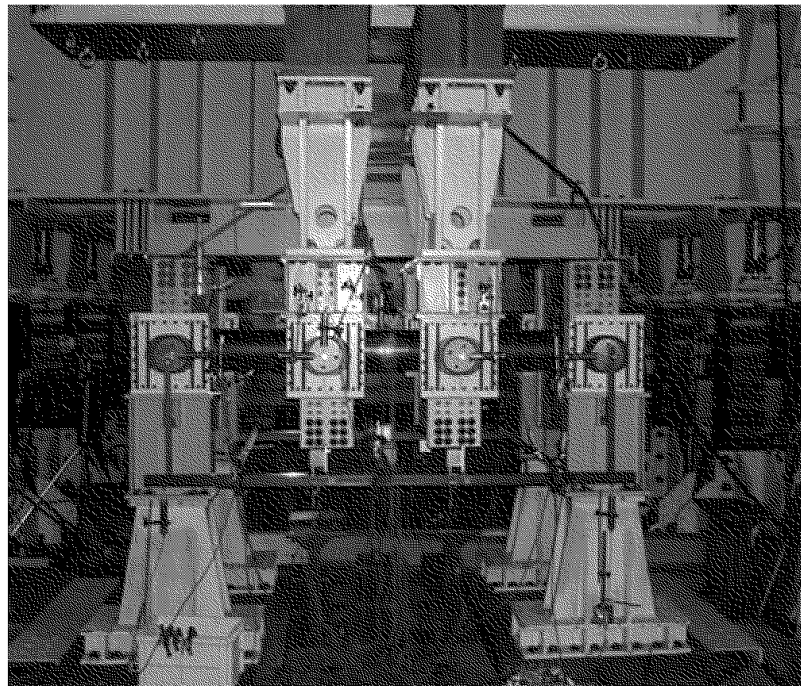
両端単純支持となる 4 点曲げ載荷実験の概略図を図 2.3 に示す。繰返し曲げ載荷では、最大荷重を過ぎて、最大荷重の 90%に荷重が除荷するまで単調載荷を行った後、荷重がゼロになるまで除荷し、その時の変位を基準として、降伏変位整数倍漸増による正負交番繰返し載荷を行った。繰返し載荷は、 $-\delta_y, \delta_y, -\delta_y, \delta_y, -2\delta_y, 2\delta_y, -2\delta_y, 2\delta_y, -3\delta_y, 3\delta_y, -3\delta_y, 3\delta_y, \dots$ と  $\delta_y$  ずつ変位を漸増させた交番載荷であり、同じ変位を 2 回ずつ繰返ししている。ここで、 $\delta_y$  はそれぞれの供試体の降伏変位である。繰返し載荷実験は、最初から正負交番繰返し載荷を行うのが一般的であるが、本実験は、鋼板添接補修鋼管の曲げ耐荷力評価および添接板と減肉鋼管との荷重分担率算定が主要な目的であり、最大荷重後の繰返し曲げ載荷実験となった。

実験では、4MN アクチュエータ（理研精機株式会社製）を 2 本使用し、変位制御により載荷を行った。図 2.3 の載荷方法概要に示すように支点間距離は 2,000mm、載荷点距離は 600mm、支点－載荷点間距離は 700mm である。支点および載荷点では、図 2.4 の曲げ実験鋼管支持方法に示すように、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）により治具に固定されている。



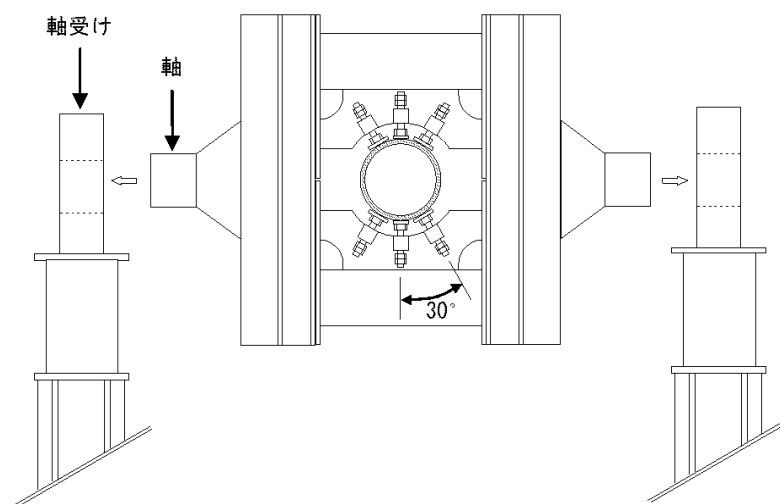


(a) 概略図

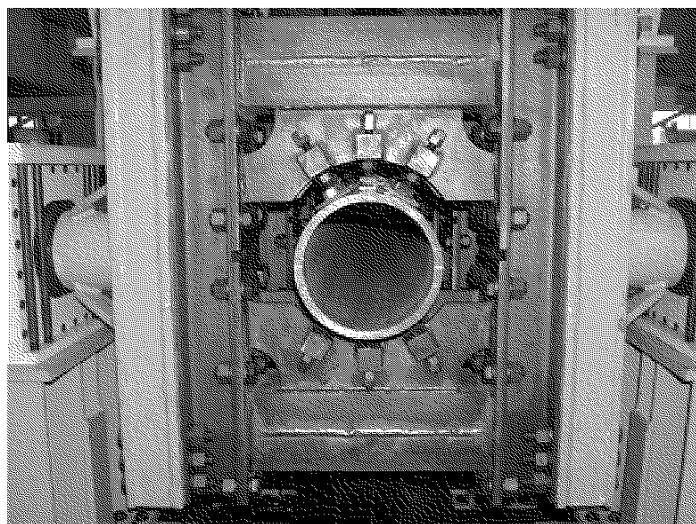


(b) 載荷装置写真

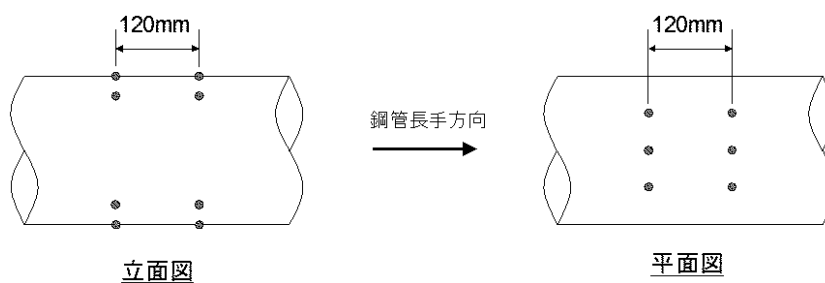
図 2.3 載荷方法概要



(a) 鋼管支持冶具概略図



(b) 支持冶具写真



(c) 一支持点におけるボルト支持位置

図 2.4 曲げ実験鋼管支持方法

## 2.3 繰返し曲げ実験結果

### 2.3.1 供試体寸法実測値

各供試体の寸法を実測した結果を表 2.4 に示す。この表には、実測寸法と表 2.3 に示す降伏応力から求められる理論降伏荷重も示す。表中の理論降伏荷重は、4 点曲げ実験での載荷点 2 点での荷重の合計である。

表 2.4 曲げ実験供試体寸法実測値および理論降伏荷重

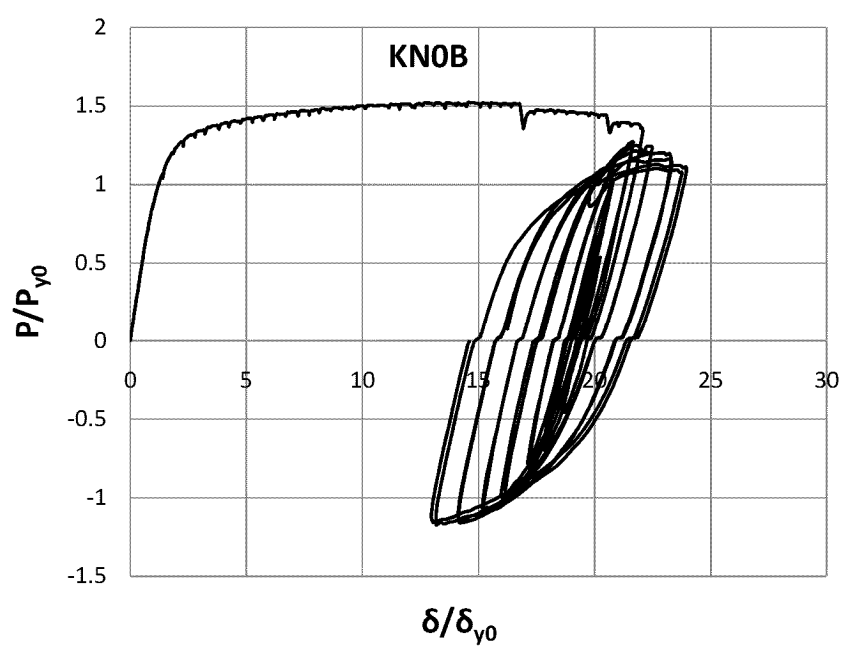
	KN0B	KN1B	KW3B1	KA3B
鋼管外径(mm)	217.3	216.4	216.3	216.3
鋼管板厚(mm)	12.0	12.1	12.1	12.1
減肉部板厚(mm)	—	6.49	6.78	6.67
添接板厚(mm)	—	—	5.93	6.04
鋼管断面2次モーメント( $10^7\text{mm}^4$ )	4.09	4.07	4.06	4.06
(添接板+減肉鋼管)断面2次モーメント*( $10^7\text{mm}^4$ )	—	2.00	4.65	4.67
理論降伏モーメント( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )	141	73	110	110
理論降伏荷重(kN)	403	209	315	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

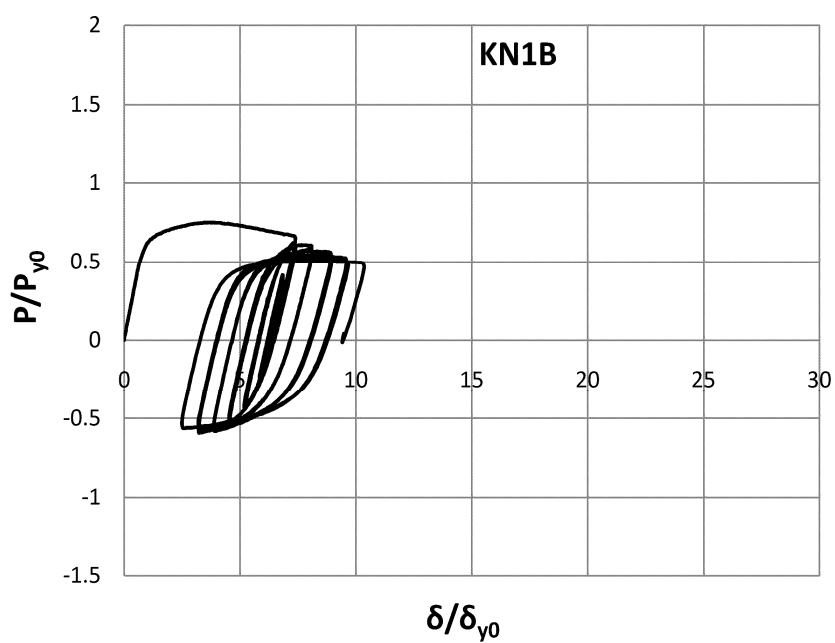
### 2.3.2 荷重—変位関係

図 2.5 に繰返し曲げ解析を行った KN0B, KN1B および KW3B1 のスパン中央における荷重変位曲線を示す。この図における縦軸の  $P$  および横軸の  $\delta$  はそれぞれ荷重の合計値およびスパン中央の変位であり、無欠損鋼管の場合の降伏荷重 ( $P_{y0}=403\text{kN}$ ) および降伏変位 ( $\delta_{y0}=7.1\text{mm}$ ) で無次元化されている。

図 2.5(a)に示す KN0B のケースにおける荷重の  $0\text{kN}$  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、載荷方法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。

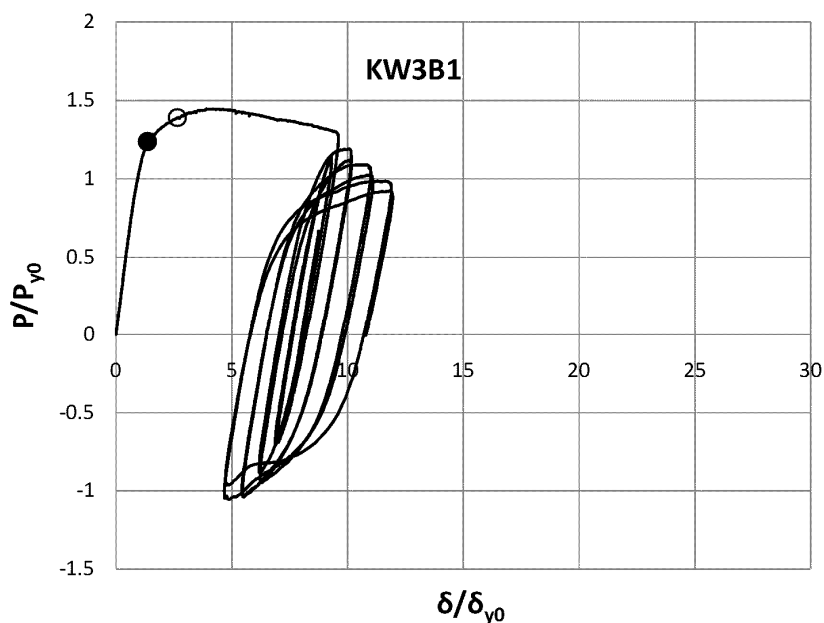


(a) KN0B



(b) KN1B

図 2.5 荷重－変位曲線（その 1）



(c) KW3B1

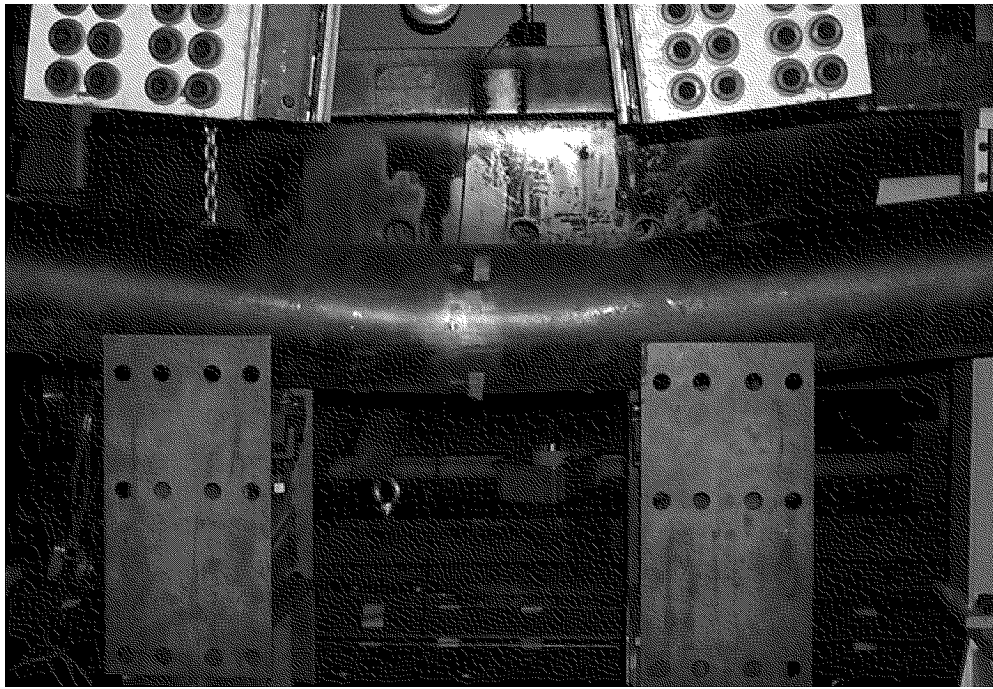
図 2.5 荷重－変位曲線（その 2）

### 2.3.3 崩壊形式

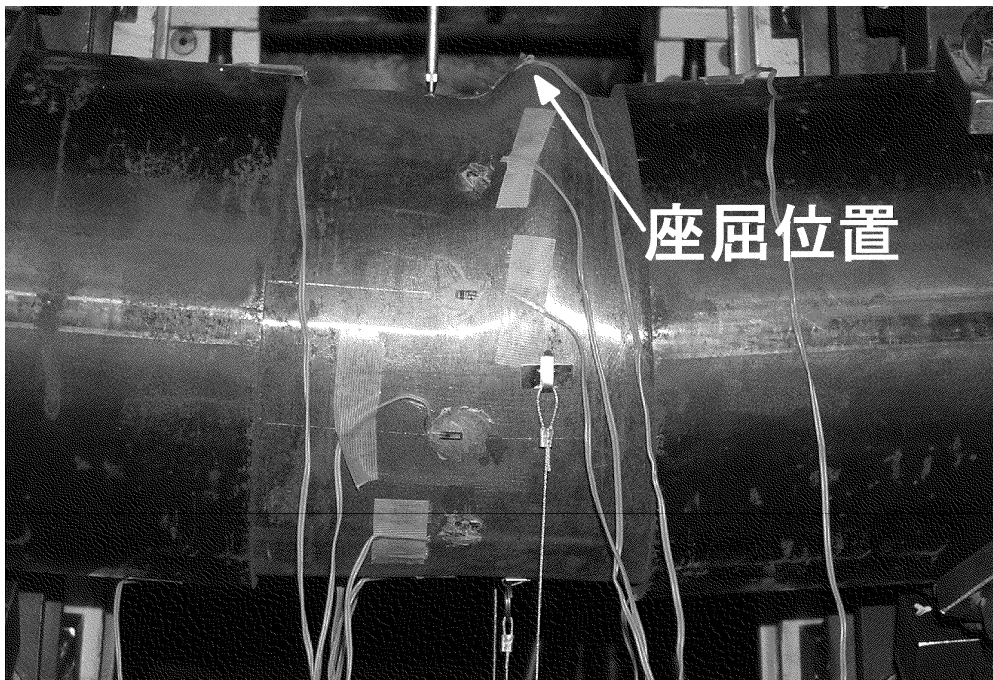
図 2.6 に各供試体の最終状況写真を示す。

曲げ載荷実験における崩壊形式は、KN0B 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 2.5(c)の●点）。その後、最大荷重前に添接板上側の突合わせ溶接部に亀裂が発生し（図 2.5(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が添接板周方向に大きく進展し添接板が破断した。

本研究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（表 2.1 の KW2B, KW3B1, KW3B2 および KW4B）の水中溶接補修供試体のうち 2 体（表 2.1 の KW3B1 および KW3B2）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はにつながったかは、これまでに特定できていないが、3 体（表 2.1 の KA2B, KA3B および KA4B）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。

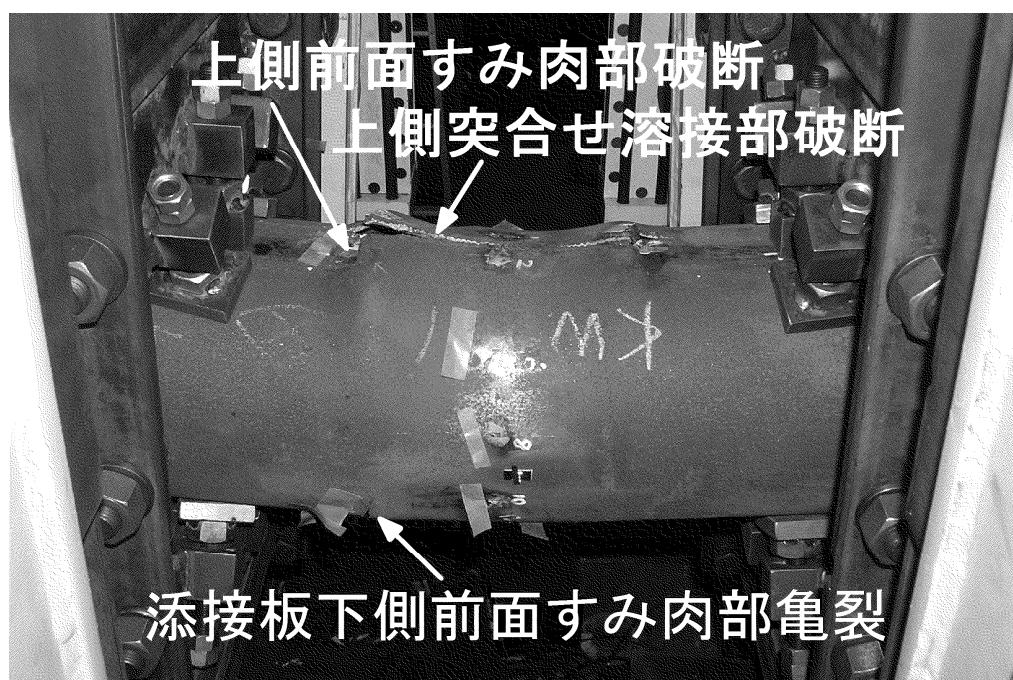


(a) KN0B



(b) KN1B (減肉部)

図 2.6 供試体最終状況写真 (その 1)



(c) KW3B1 (鋼板添接補修部)

図 2.6 供試体最終状況写真 (その 2)

## 2.4 単調曲げ載荷実験と解析結果の比較

### 2.4.1 解析条件

繰返し曲げ解析を行う前に、表 2.4 に示す KN0B、KN1B および KA3B の供試体について単調曲げ解析を行った。検討結果を以下に述べる。

#### (1) 解析モデル

曲げを受ける鋼板添接補修された減肉鋼管の解析対象鋼管の概略図を図 2.7 に示す。解析モデルは、単純支持された鋼管の減肉部が等曲げを受けるように設定した。

支点および載荷点の条件は、図 2.8 に示すように、支点および載荷点位置の鋼管中心点を各々の参照節点として設定し、支点および載荷点断面の各々の接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。載荷実験では、載荷点および支点はダイヤフラムなどで剛にして実験を行うのが通常であるが、今回の供試体にそのような部材の取付けが困難であったため、載荷点部分の鋼管に変形が発生している。そのため、実験では剛な境界条件となっていないが、単調曲げ解析においては大きな影響はないものと考え、このモデル

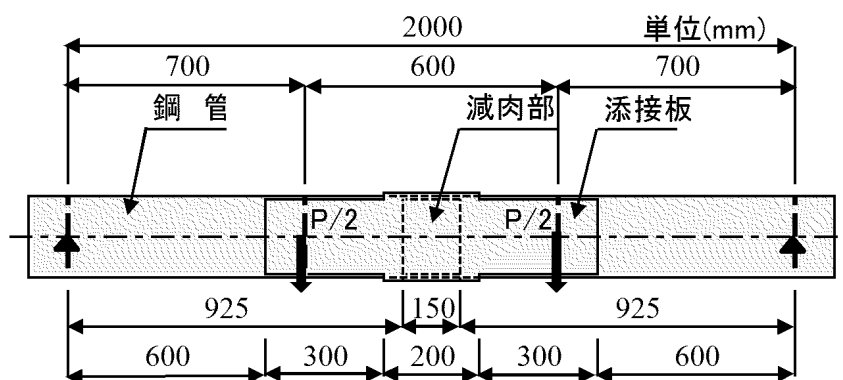


図 2.7 解析対象鋼管 ( $\phi 216.3$ )

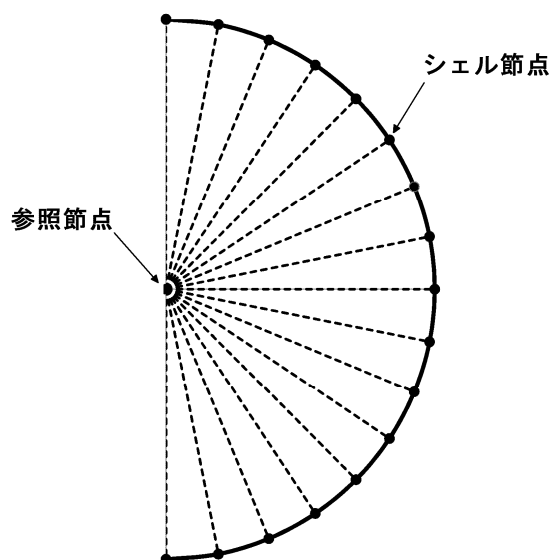


図 2.8 参照節点

にて解析を行う。なお、繰返し曲げ解析における実験結果との比較においては、繰返し時における載荷方向の反転を考慮した境界条件モデルにて解析を行う。

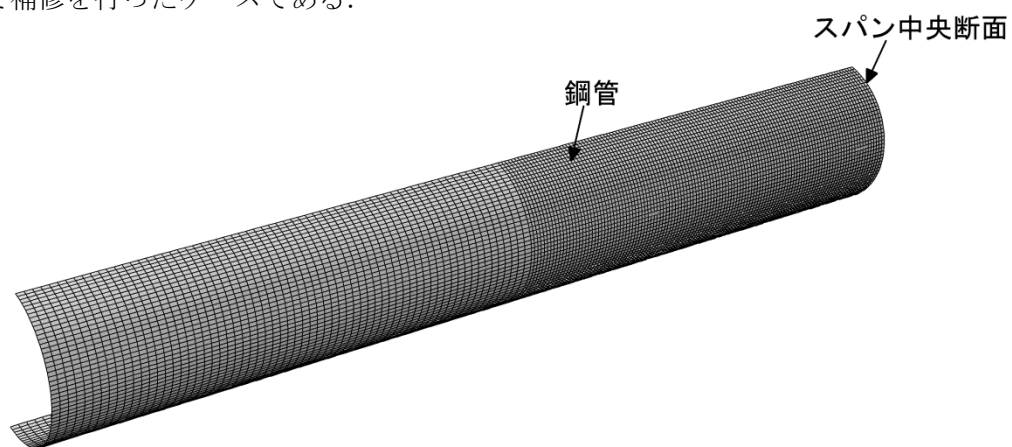
## (2) 有限要素モデル

解析には汎用有限要素解析プログラム ABAQUS ver.6.8<sup>2,8)</sup>を使用した。図 2.9 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。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部は梁要素を用いて鋼管と添接板の節点を接合した。

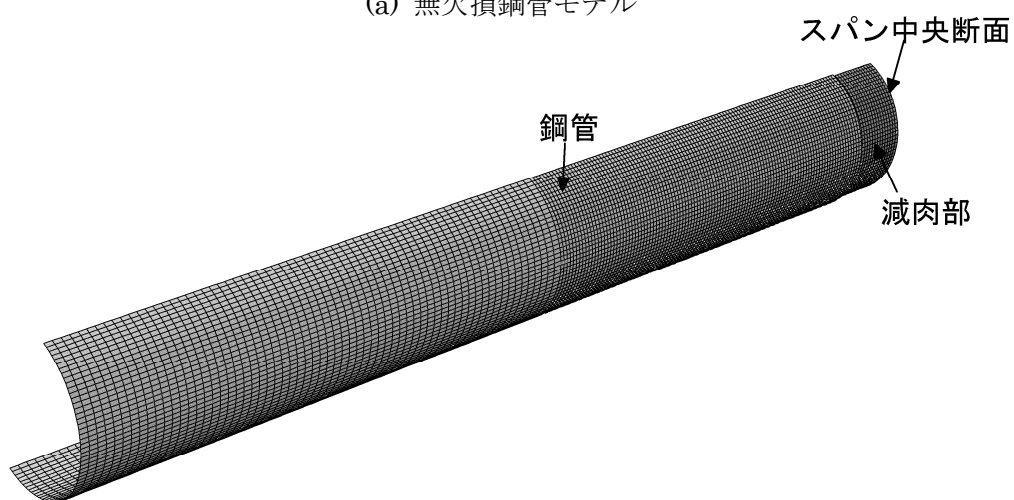
解析ケースは3種類あり、図2.9(a)の無欠損鋼管は腐食をしていない元の鋼管のケース、



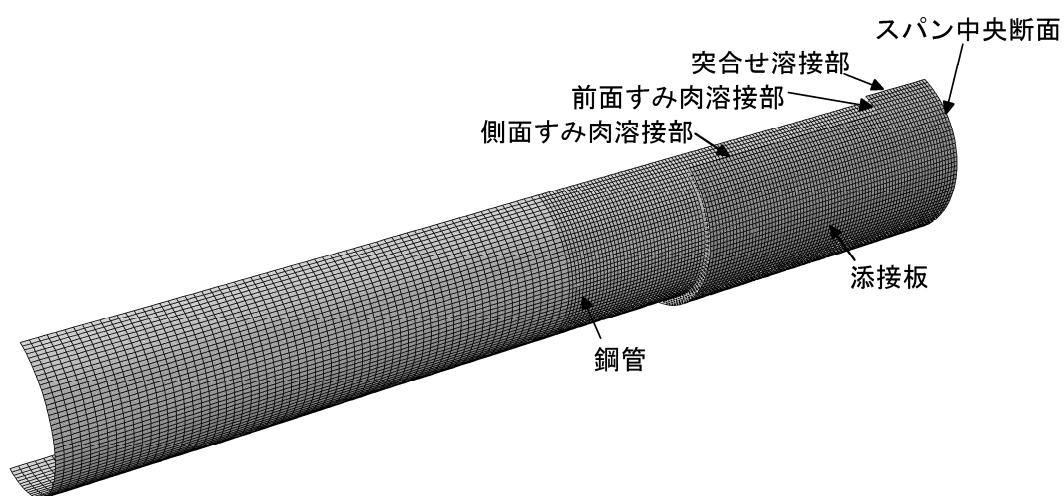
図 2.9(b)減肉鋼管は減肉した鋼管のケースであり，図 2.9(c)鋼板添接補修鋼管は減肉部を添接板で補修を行ったケースである。



(a) 無欠損鋼管モデル



(b) 減肉鋼管モデル



(c) 鋼板添接補修鋼管モデル

図 2.9 解析モデル例

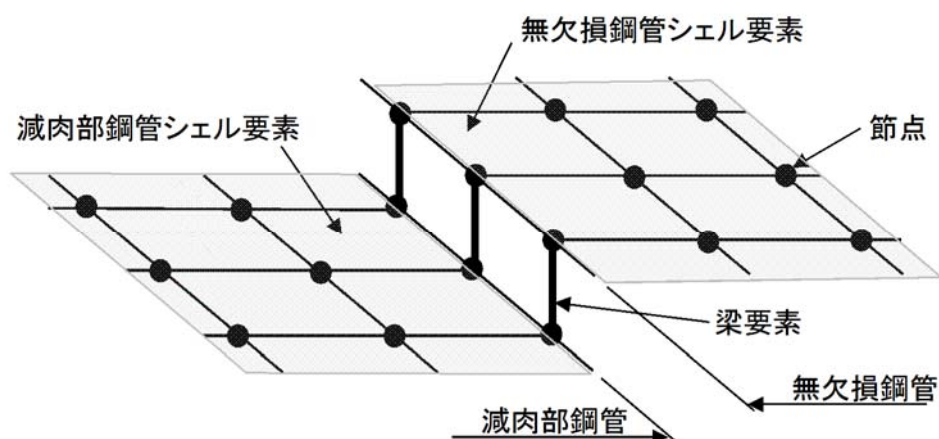


図 2.10 減肉部のモデル化

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 2.10 に示すようにすみ肉溶接部と同様に梁要素を用いて偏心の影響をモデル化した。

### (3) 硬化則

降伏後の硬化則は、等方硬化則を使用した。

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。

## 2.4.2 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、単調曲げ载荷を行った無欠損鋼管（外径=216.3mm，板厚=12.7mm）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<sup>2.9) 2.10)</sup>による外挿値による精度比較を行った。

$$f_{ex} = \frac{N_2 N_3}{(N_2 - N_1)(N_3 - N_1)} f_1 + \frac{N_3 N_1}{(N_3 - N_2)(N_1 - N_2)} f_2 + \frac{N_1 N_2}{(N_1 - N_3)(N_2 - N_3)} f_3 \quad (2.1)$$

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(2.1)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ものであるとして外挿値の計算を行った.

表 2.5 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 2.5 に示すように, 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, 载荷による断面変形過程において, 減肉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.

表 2.5 要素分割数と精度

		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	

中村らの研究<sup>2.11), 2.12)</sup>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 2.11 に解析により得られた減肉鋼管の曲げ荷重下での座屈形状を示す. 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 2.12 に鋼板添接補修鋼管の添接板と鋼管減肉部との接触状況を示している. この図において, 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, 60 分割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.

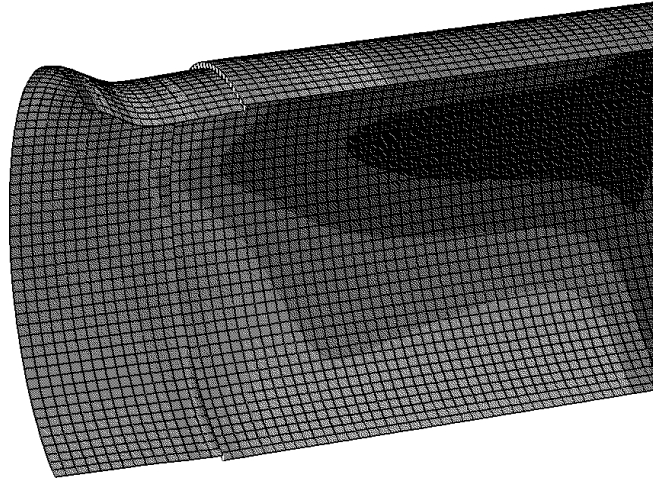


図 2.11 減肉鋼管の座屈状況

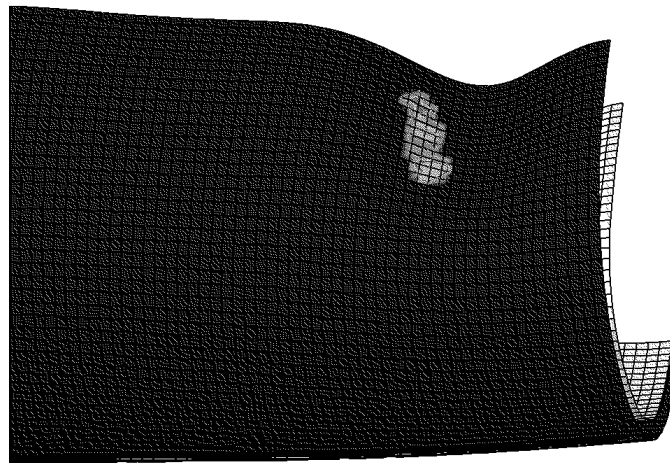
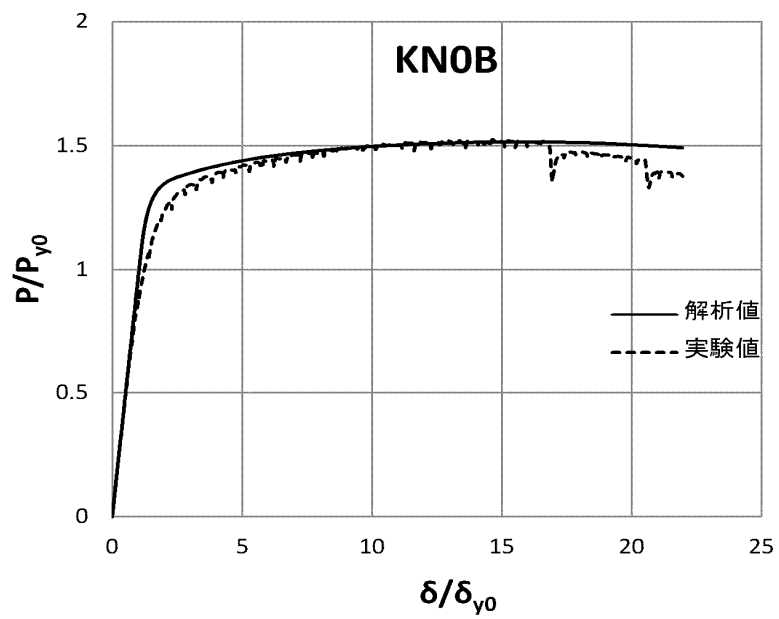


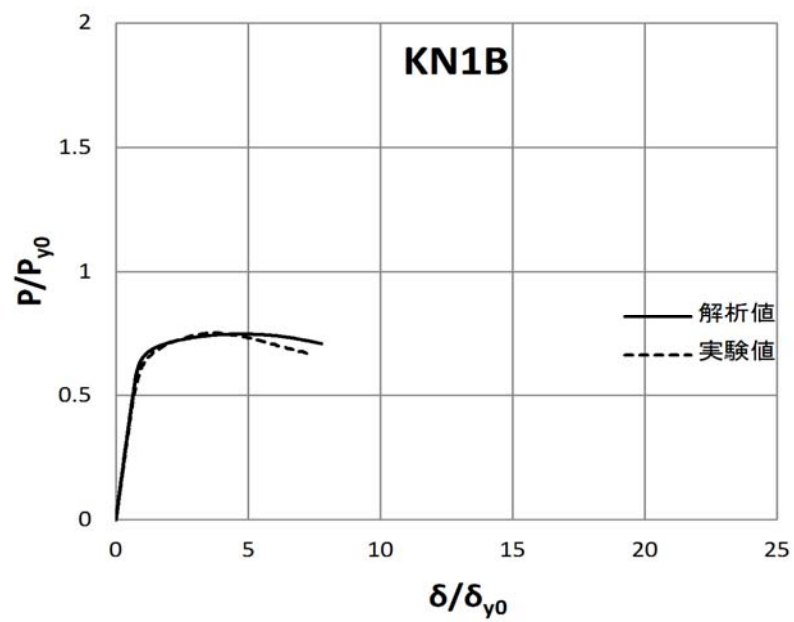
図 2.12 鋼板添接補修鋼管の接触状況

#### 2.4.3 実験と解析結果の比較

単調曲げ実験を行った 3 つのケース（KN0B, KN1B および KA3B）について弾塑性有限変位解析を行った．スパン中央での荷重－変位関係について図 2.13 に示す．

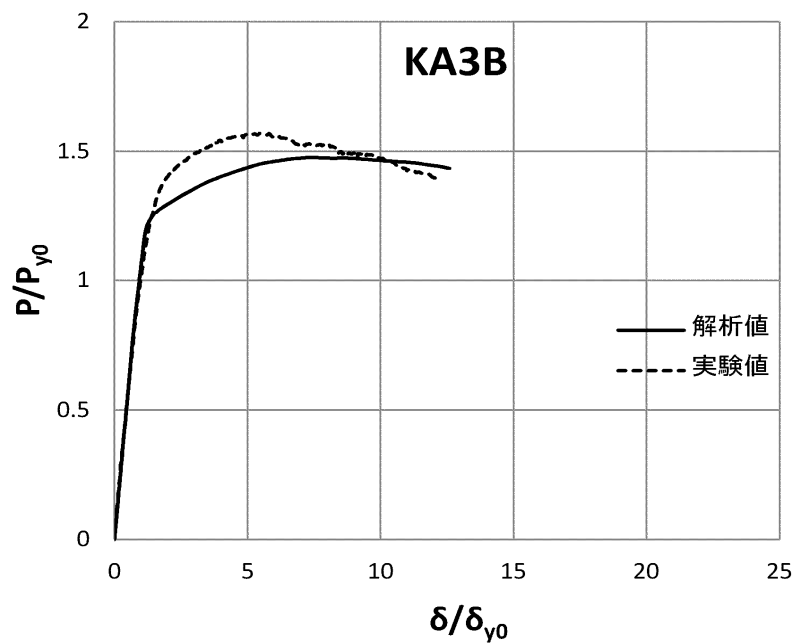


(a) KN0B



(b) KN1B

図 2.13 スパン中央における荷重－変位曲線（その 1）



(c) KA3B

図 2.13 スパン中央における荷重－変位曲線（その 2）

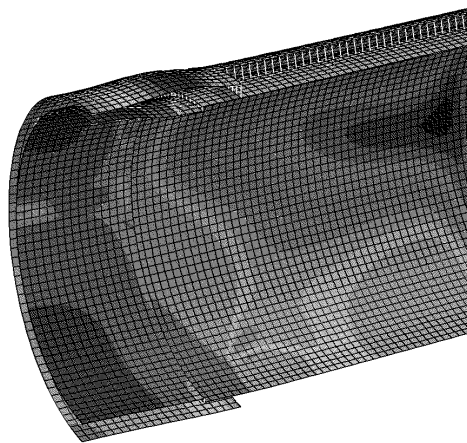


図 2.14 KA3B の座屈状況

実験結果と解析結果を比較すると, KN0B および KN1B については初期剛性および最大荷重はほぼ合っていることがわかる. KA3B については, 初期剛性および最大荷重後の荷重－変位曲線はほぼ合っているものの, 最大荷重は実験値の方が大きい値を示している. 実験結果と解析結果との最大荷重の違いの原因は明らかではないが, 図 2.14 に示すように, 解析結果では降伏後減肉部近傍の添接板が座屈しており, 実験でも同様に減肉部近傍の添



図 2.15 KA3B の実験後供試体

接板のひずみが急増して、図 2.15 に示すように減肉部近傍の添接板が少し膨らんだ状態となっており、座屈形状はほぼ一致している。

## 2.5 繰返し曲げ載荷実験と解析結果の比較

### 2.5.1 解析条件

表 2.4 の供試体のうち、KN0B、KN1B および KW3B1 のケースについて繰返し曲げ解析を行った。解析条件は、“2.4 単調曲げ載荷実験と解析結果の比較”の場合と同様であるが、載荷点および支点の解析条件を一致させるため、以下の境界条件で解析を行った。

“2.4 単調曲げ載荷実験と解析結果の比較”においては、載荷点と支点の条件として、支点および載荷点位置の鋼管中心点を各々の参照節点として設定し、支点および載荷点断面の各々の接点集合をそれぞれの剛体運動に結合させて解析を行っていたが、ここでは、繰返し時の載荷方向を変える場合に載荷プレートと鋼管との間にできる隙間を再現して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 2.16 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。

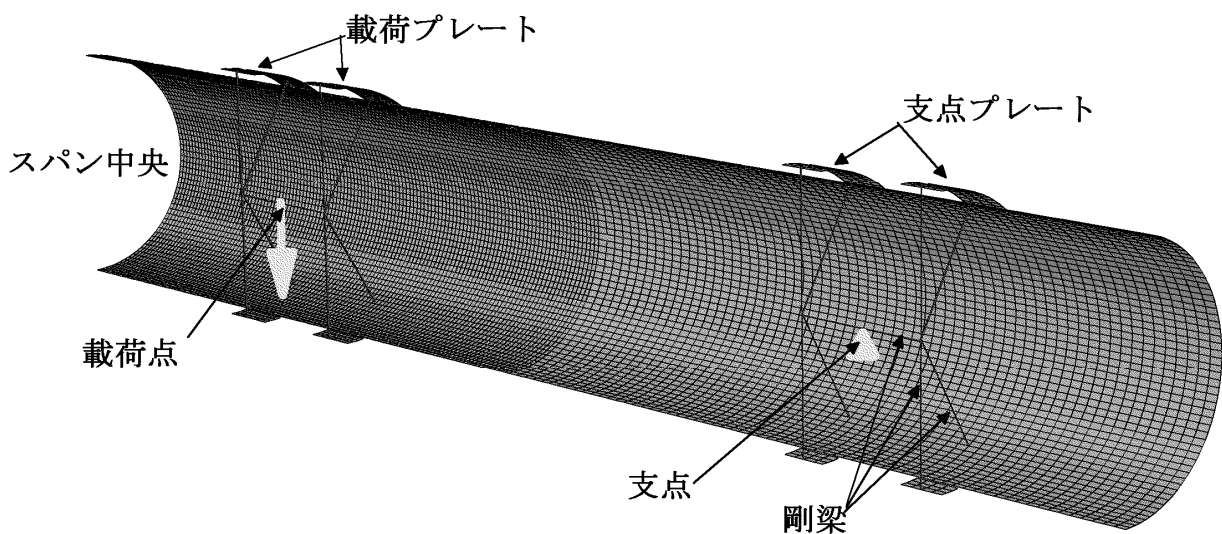


図 2.16 载荷プレートおよび支点プレートのモデル化

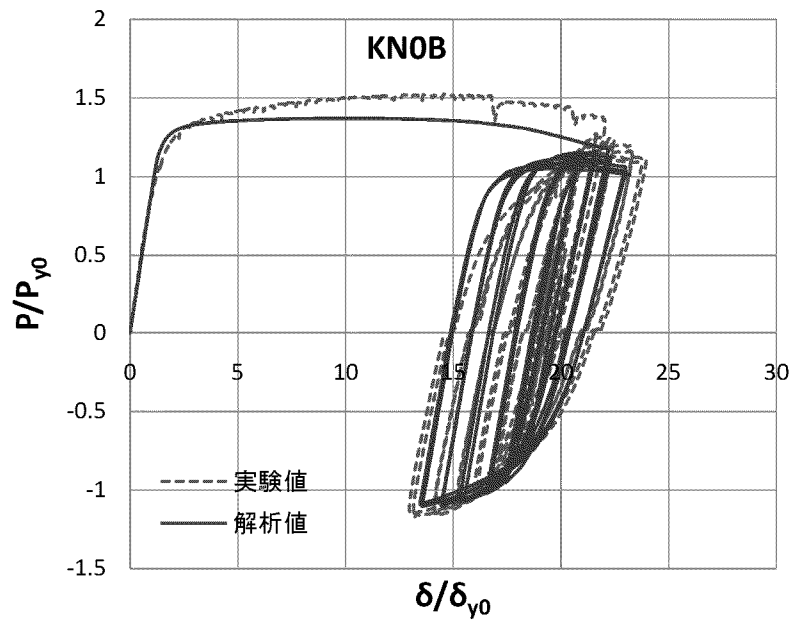
降伏後の硬化則は、繰返し時において、塑性変形が生じた後の荷重反転時に降伏応力が減少するバウジンガー効果を考慮するため、非線形等方・移動硬化則を使用した。等方硬化挙動では降伏曲面の大きさを考慮し、移動硬化則成分は線形 Ziegler 硬化則と非線形性を導入する緩和項を考慮している。

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。

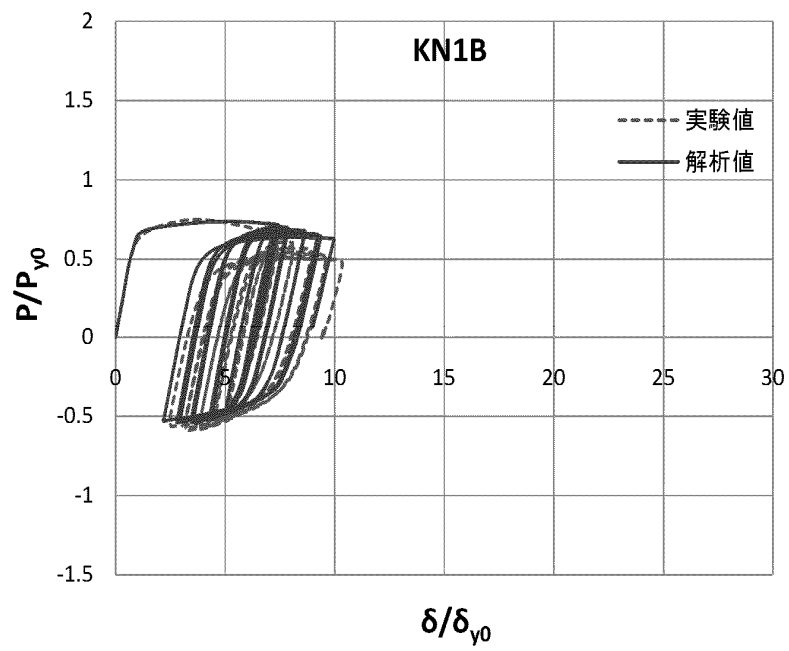
### 2.5.2 実験と解析結果の比較

曲げ繰返し実験を行った 3 つのケースについて、弾塑性有限変位解析を行った。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 2.17 に示す。



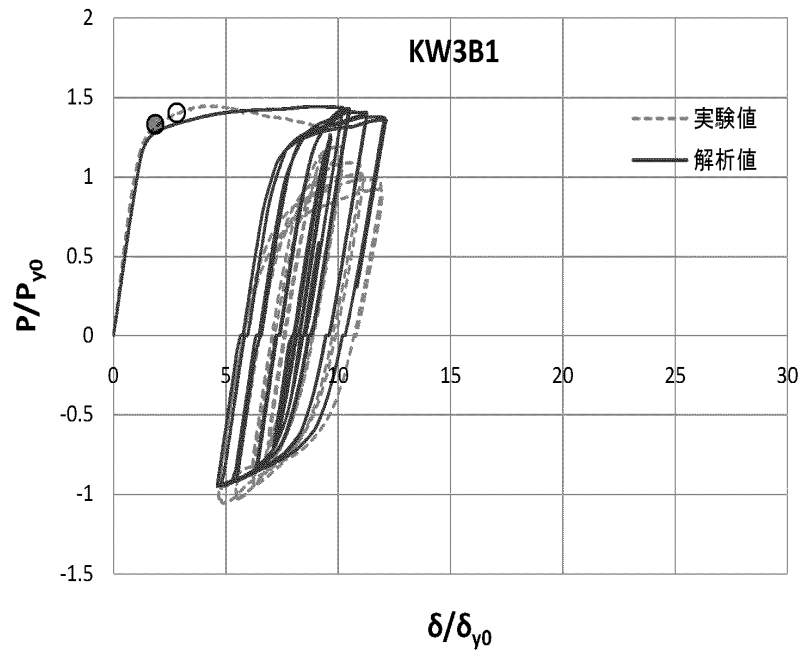


(a) KN0B



(b) KN1B

図 2.17 スパン中央における荷重－変位曲線（その 1）



(c) KW3B1

図 2.17 スパン中央における荷重－変位曲線（その 2）

図 2.17(a)で KN0B 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．単調増加部の実験値と解析値の違いは，図 2.18 に示すように，载荷プレート部で鋼管のへこみが発生して扁平化しているために発生しているものと考えられる．実験結果の崩壊形式は全断面塑性化による曲げ破壊であるが，図 2.19 に示す実験後の写真によると，発生時期は不明であるが载荷プレート部で同様なへこみが発生しているのがわかる．“2.4 単調曲げ载荷実験と解析結果との比較”において，载荷点部境界条件を剛体挙動するものとして拘束していた場合の方が，実験値と解析値の一致が見られることより，载荷プレート部のへこみの発生時期が，実験と解析とで異なることが考えられる．

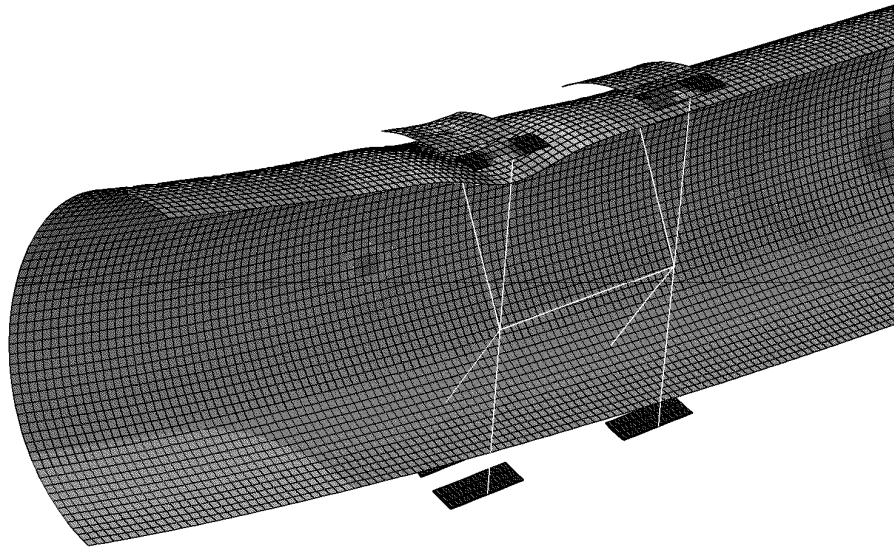


図 2.18 载荷プレート部の鋼管のへこみ状況



図 2.19 実験後の鋼管載荷点部のへこみ状況



図 2.20 KN1B の実験後供試体

図 2.17(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みられる．実験においては，図 2.4 に示す鋼管の支持および載荷点で，繰返し載荷中に載荷方向を変える際，鋼管の扁平化により治具と鋼管の間にでき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，中央部近傍の減肉部区間に曲げ局部座屈が発生した．その崩壊後の座屈状況を図 2.20 に示す．

図 2.17(c)に示す KW3B1 では単調載荷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履歴ループ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．解析結果によると，図 2.21 に示すように減肉鋼管がスパン中央で，添接板が減肉部端部付近で座屈しており，実験においても同様に，図 2.22 に示す実験後の崩壊写真では減肉部端部付近の添接板が少し膨らんで座屈変形を起こしていることがわかる．解析では，減肉部で鋼管および添接板の座屈が発生し，その塑性変形が残ったままの繰返し曲げ載荷となったため，荷重－変位曲線における正負の履歴ループは非対称となっているものと考えられる．

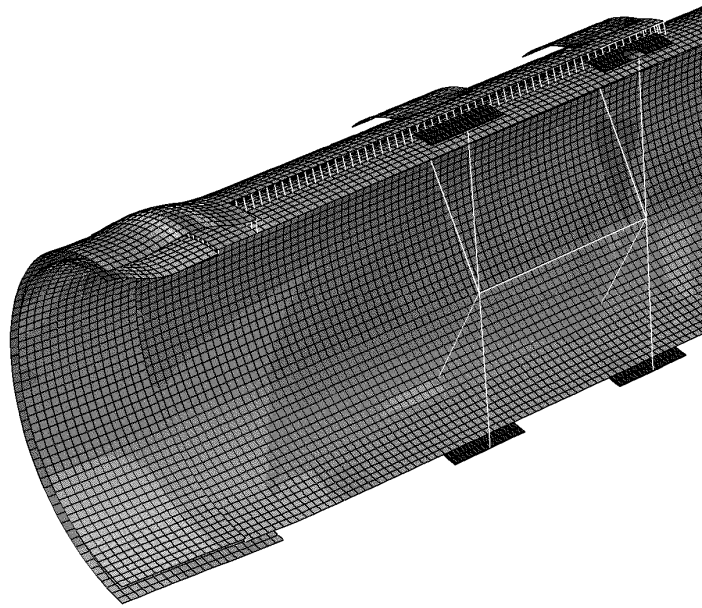


図 2.21 KW3B1 の座屈変形図



図 2.22 KW3B1 実験後供試体

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<sup>2.4)</sup>。

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必要があると考えられる。

以上より、実験と解析結果を比較すると、解析の境界条件が実験の境界条件と完全に一致していないため、溶接部の亀裂あるいは破断が生じたため、実験結果と解析結果とが一致しない部分があった。しかしながら、多少の違いはあるものの、1) 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、2) 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<sup>2.4)</sup>こと、および 3) 解析モデルの解析精度は十分であり添接板と鋼管との接触状態も十分に表されていることを考慮すると、鋼板添接補修鋼管の溶接の破断が起きないとした解析モデルによる鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ耐荷力性能評価はほぼ可能であると考えられる。

## 2.6 まとめ

港湾構造物の栈橋鋼管が腐食した場合の補修方法としてよく使用される鋼板添接補修された鋼管の挙動を明らかにするため、曲げ単調載荷実験の延長上で行われた繰返し曲げ実験と解析結果との比較を行った。

実験は、一般構造用炭素鋼鋼管の STK400 (外径=216.3mm, 板厚=12.7mm) を使用した 4 点曲げ載荷実験である。実験は、腐食前である無欠損鋼管、腐食後を想定したスパン中央部に長さ 150mm にわたって一様に切削した減肉鋼管、および減肉鋼管に添接板を溶接した鋼板添接補修鋼管の 3 ケースである。

有限要素解析モデルを作成し、解析結果の精度について検討し、解析結果と実験結果を比較して解析モデルの妥当性を検討した。

本章の結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 有限要素モデルの精度について検討し、1/4 モデルの円周方向を 60 分割した結果は十分な精度があることを確認した。また、局部座屈形状および鋼管と添接板との接触状況も十分に表すことができる分割数であることを確認した。

- (2) 節点集合の自由度を参照節点の剛体運動で拘束する載荷点の境界条件として、単調曲げ載荷実験結果と解析結果を比較した。その結果、無欠損鋼管、減肉鋼管の荷重－変位曲線はほぼ一致していたが、鋼板添接補修鋼管の場合には、最大荷重は実験値の方が高い結果となった。最大荷重の違いの原因は明らかではないが、解析では減肉部端部の添接板において座屈が発生しており、実験でも同様な座屈変形は見られ、座屈形状はほぼ一致している。
- (3) 繰返し曲げ解析においては、繰返し時の載荷方向を変える場合に載荷プレートと鋼管との間にできる隙間を再現して実験条件と解析条件を合わせるため、載荷プレートおよび支点プレートを用いて支持し、接触問題として扱うための有限要素解析モデルを作成した。
- (4) 無欠損鋼管のケースにおいては、最大荷重において差はあるものの、繰返し時における実験結果と解析結果はほぼ一致しており、崩壊形式も実験と同様に局部座屈はなく全体たわみ変形によるものであった。解析においては、載荷プレート部に鋼管のへこみ部が発生したため最大荷重に差ができたものと考えられる。実験においても鋼管の同様なへこみは発生しており、実験と解析とのへこみの発生時期が異なることが考えられる。
- (5) 減肉鋼管のケースにおいては、実験時における鋼管の扁平化による隙間解消のためのボルト締め直しステップが解析において考慮されていないため、若干の差異があった。また、実験時と同様に、減肉部において局部座屈が発生する解析結果となった。
- (6) 鋼板添接補修鋼管のケースにおいては、単調載荷時の最大荷重はほぼ一致しているものの、実験時における前面すみ肉溶接部および突合せ溶接部の亀裂発生により、繰返し時において実験結果と解析結果の差異が生じた。
- (7) 鋼板添接補修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結果、解析結果と実験結果は必ずしも一致しているとは言えないが、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、前面すみ肉溶接の破断は鋼板添接補修鋼管の耐力力評価に大きな影響を与えないこと、解析モデルの解析精度は十分であり添接板と鋼管との接触状態も十分に表されていることを考慮すると、溶接の破断が起きないとした解析モデルによる鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ耐力力性能評価はほぼ可能であると考えられる。

## ＜参考文献＞

- 2.1) 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力力実験，構造工学論文集，Vol.55A，pp.889-902，2009.

- 2.2) 渡邊尚彦, 北根安雄, 伊藤義人 : 一般構造用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.
- 2.3) Chen X., Kitane Y. and Itoh Y. : Mechanical Properties of Fillet Weld Joints by Underwater Wet Welding in Repairing Corrosion-Damaged Offshore Steel Structures, Journal of Structural Engineering, Vol.56A, pp.742-755, 2010.
- 2.4) 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.
- 2.5) 加藤基規, 葛西昭, 馬翔, 宇佐美勉 : 二重鋼管型座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.103-112, 2004.
- 2.6) 土木学会 : 座屈設計ガイドライン 改訂 2 版[2005 年版], 2005.
- 2.7) 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.
- 2.8) Dassault Systemes : ABAQUS/Standard User's Manual, ver.6.8, 2008.
- 2.9) Richardson, L.F. : Philos. Trans. Royal Soc. London, Ser.A.210, pp.307-357, 1910.
- 2.10) 三上市蔵, 米沢博 : 外挿法による差分解・有限要素解の精度改良, 第 30 回年次学術講演会概要集第 1 部, 1975.
- 2.11) 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.
- 2.12) 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.



## 第 3 章 鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ挙動解析

### 3.1 緒言

第 2 章では、無欠損鋼管、減肉鋼管および鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ実験を行い、数値解析モデルとして有限要素解析モデルを作成し、実験と解析結果の比較を行って解析モデルの妥当性について検討を行った。本章では、第 2 章で作成した解析モデルを使用して、種々のパラメータについて解析を行い、現在の腐食劣化鋼管の補修設計における問題点および設計への考察を行う。

現行設計法<sup>3.1)</sup>では、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、設計断面耐力が設計断面力を上回るように設計される。しかし、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。したがって、本章においては、鋼板添接補修された鋼管減肉部が等曲げを受けるように単純梁モデルを設定し、載荷点に強制変位を与えた場合の繰返し曲げ挙動について検討する。

実際の港湾構造物に使用される鋼管の荷重状態は、軸力および曲げの繰返し荷重を受けることになるが、ここでは鋼管の主な挙動となる繰返し曲げ挙動に注目して、一般構造用炭素鋼鋼管の外径=216.3mm および 508mm, 板厚=12.7mm を対象に、減肉厚, 添接板厚, および降伏応力を変えた種々のパラメータに対して弾塑性有限変位解析を行うこととする。

### 3.2 解析条件

#### 3.2.1 境界条件

鋼板添接補修された減肉鋼管の解析モデルは、第 2 章と同様に、単純支持された鋼管の減肉部が等曲げを受けるように図 3.1 のように設定した。ここでは、実験と同じ鋼管外径である  $\phi 216.3\text{mm}$  の場合と  $\phi 508\text{mm}$  の場合について解析を行った。なお、 $\phi 508$  の場合には、鋼管および添接板の降伏応力が大きい場合と小さい場合を想定したケースについても解析を行った。

第 2 章においては、主に実験の載荷条件を考慮した境界条件により解析を行った。しかし、実際の栈橋構造において荷重集中点となる箇所としては、杭頭およびジャケット式栈橋のような格点が考えられるが、杭頭はコンクリートに埋め込まれており、ジャケット式栈橋の格点はダイヤフラム等により剛な構造となっており、荷重集中点では断面変形が生じないとするのが妥当であると考えられる。したがって、支点および載荷点の条件は第 2 章の単調曲げ解析の場合と同じように、図 3.2 に示すように、支点および載荷点位置の鋼管中心点を各々の参照節点として設定し、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。



### 3.2.2 載荷方法

繰返し曲げ解析は，無欠損鋼管の載荷点における降伏変位を減肉鋼管および鋼板添接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．ここで，無欠損鋼管のスパン中央における降伏変位  $\delta_{y0}$ ，および降伏荷重  $P_{y0}$  は表 3.1 に示す値であり，鋼板添接補修鋼管の変位  $\delta$  および荷重  $P$  はそれぞれ  $\delta_{y0}$  および  $P_{y0}$  により無次元化を行った．

### 3.2.3 使用材料および硬化則

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，第 2 章で実験に使用した一般構造用炭素鋼鋼管 STK400（外径=216.3mm，板厚=12.7mm），外径の異なる一般構造用炭素鋼鋼管 STK400（外径=508mm，板厚=12.7mm），および溶接構造用鋼材 SM400 を使用して解析を行った．

降伏点などの材料定数は表 2.3 に示される試験結果を使用し，硬化則についても第 2 章の繰返し曲げ載荷解析と同様に，非線形等方・移動硬化則を適用した．

### 3.2.4 解析におけるパラメータ

本章における減肉長は  $\phi 216.3$  の場合は減肉長を  $L=150\text{mm}$  とし， $\phi 508$  の場合には  $L=360\text{mm}$  と一定にして解析を行った．減肉長については，Plantema の局部座屈波長の理論解<sup>3.2)</sup>  $l=3\sqrt{Rt}$  より求めた長さの 2~3 波長分として設定した．ここに， $R$  は鋼管の板厚中心線の半径， $t$  は鋼管板厚である．

鋼管減肉部の厚さ  $t_p$  は， $\phi 216.3$  の鋼管については  $t_p=3\text{mm}\sim 9.5\text{mm}$ ， $\phi 508$  の鋼管については  $t_p=6.7\text{mm}$  とし，添接板厚  $t_s$  は， $\phi 216.3$  の鋼管については  $t_s=6\text{mm}\sim 12\text{mm}$ ， $\phi 508$  の鋼管については  $t_s=9\text{mm}\sim 13\text{mm}$  として解析を行った．鋼管径，減肉部鋼管厚，添接板厚，降伏応力などの影響を見るため，式(3.1)の径厚比パラメータ<sup>3.3)</sup>を使用した．

$$R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_y}{E} \sqrt{3(1-\nu^2)} \quad (3.1)$$

表 3.1 降伏変位および降伏荷重

鋼管径 (mm)	降伏変位 $\delta_{y0}$ (mm)	降伏荷重 $P_{y0}$ (kN)	使用材料		摘 要
			鋼管	添接板	
216.3	7.1	418	STK400	SM400	
508	18.9	1001	STK400	SM400	
	18.9	1001	STK400	STK400相当	降伏応力が大きい場合
	13.5	722	SM400相当	SM400相当	降伏応力が小さい場合

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

### 3.2.5 変形性能評価

エネルギー吸収部材の耐震性能照査は、地震による応答変形が終局点に対応する変形より小さければ安全と考える変形照査法により行われている。また、梁要素を用いた複合非線形動的解析による応答ひずみによるひずみ照査法もある<sup>3.4)</sup>。道路橋示方書<sup>3.5)</sup>では、地震後の使用性照査は、最大応答変位から経験式を用いて残留変位を求めて照査をしている。

建築鋼構造では、繰返し変形時の履歴を考え、エネルギー吸収量（荷重－変形履歴曲線が囲む面積）あるいは累積塑性変形などで耐震性能を評価する場合もある<sup>3.4)</sup>。

弾塑性系構造物が地震時に吸収する全エネルギー量は、最大塑性率と同様に構造物の損傷に関係の深い量であり、鋼構造では破壊の規準として全エネルギー吸収量を用いるのがよいとされている<sup>3.6)</sup>。

港湾鋼構造物である栈橋の耐震強化施設についてはレベル 2 地震動に対する動的解析法による照査によることになっている。その性能規定<sup>3.7)</sup>によると、耐震強化施設（特定（緊急物資輸送対応））（使用性）の場合、栈橋を構成する杭の中に 2 箇所以上で全塑性モーメントに達している杭が存在しないこと、耐震強化施設（標準（緊急物資輸送対応））（修復性）の場合、栈橋を構成する杭の中に 1 箇所のみで全塑性モーメントに達しているまたは全塑性モーメントに達していない杭が存在することを照査することである。また、栈橋の変形量についてはレベル 1 地震動に関する岸壁法線の変形に関する規定があるのみで、レベル 2 地震動に関する栈橋の変形量については規定されてなく、栈橋の動的な変形を適切に考慮して、限界値を設定して変形性能を照査してもよいことになっている。

本研究では、最大荷重および最大荷重前後の座屈挙動を対象としており、エネルギー吸収量を変形性能評価の指標と考えた図 3.3 に示す履歴ループ面積、および耐荷力となる最

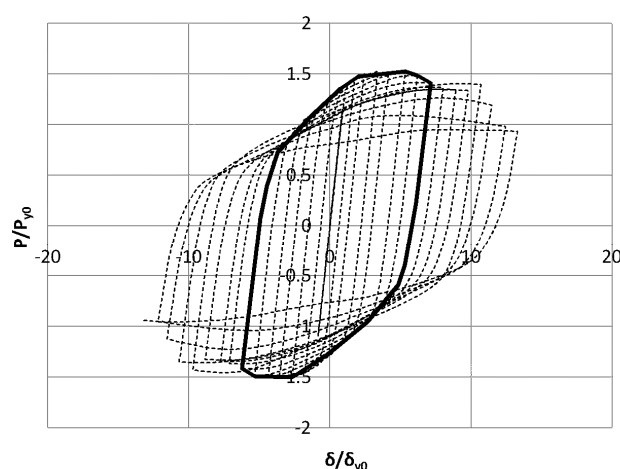


図 3.3 エネルギー吸収量算出例

大荷重により評価する。鋼板添接補修鋼板が無欠損鋼管の変形性能を確保するためには、エネルギー吸収量である履歴ループ面積比  $A_{cy}/A_{cy0}$  を 1.0 以上確保する必要があると考えて評価する。ここに、 $A_{cy}$  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、鋼板添接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 3.3 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、鋼板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。

### 3.3 繰返し曲げ挙動解析結果

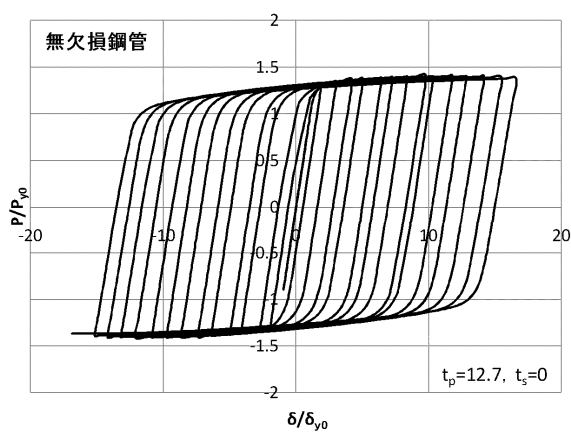
#### 3.3.1 繰返し曲げ解析結果（その 1）

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、第 2 章で実験に使用した一般構造用炭素鋼鋼管 STK400（外径=216.3mm，板厚=12.7mm）について、表 3.2 に示すように、減肉長は  $L=150\text{mm}$  と一定にして、減肉部厚（3mm~9.5mm）および添接板厚（6mm~12mm）を種々変えて解析を行った。

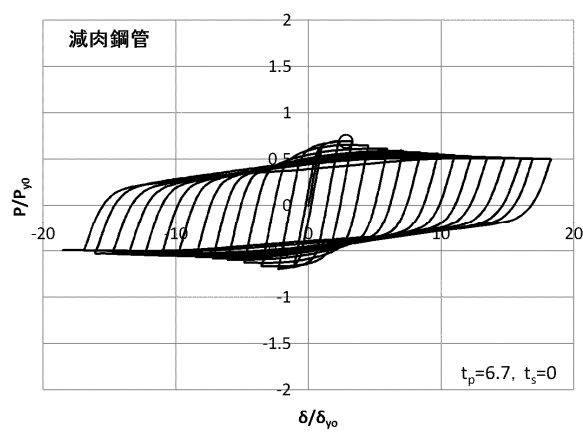
繰返し曲げ解析を行った各ケースの荷重－変位曲線を図 3.4 に示す。ここで、 $\delta_{y0}$ （=7.1mm）および  $P_{y0}$ （=418kN）はそれぞれ無欠損鋼管のスパン中央における降伏変位および降伏荷重である。

表 3.2 繰返し曲げ解析ケース条件

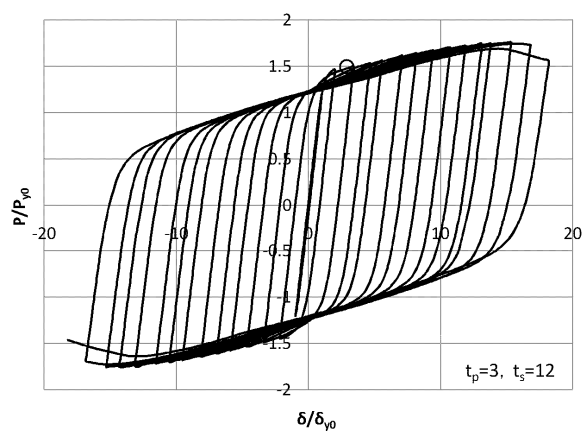
Case No.	鋼 管(STK400)							添 接 板(SM400)			
	鋼管径 (mm)	鋼管厚 (mm)	減肉長 (mm)	減肉部厚 (mm)	弾性係数 (GPa)	降伏応力 (MPa)	ポアソン 比	添接板厚 (mm)	弾性係数 (GPa)	降伏応力 (MPa)	ポアソン 比
Case No.1 (無欠損鋼管)	216.3	12.7	150	12.7	203.6	374	0.282	—	204.6	269	0.282
Case No.2 (減肉鋼管)				6.7				—			
Case No.3				3.0				12.0			
Case No.4				3.5				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			



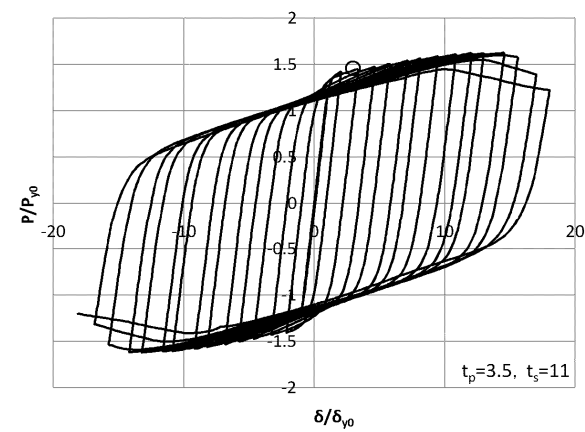
(a) Case No.1



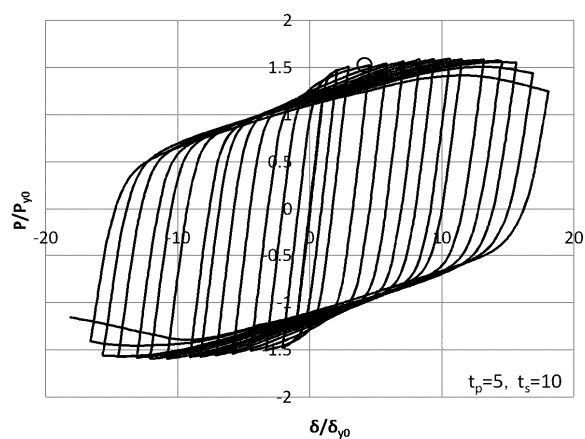
(b) Case No.2



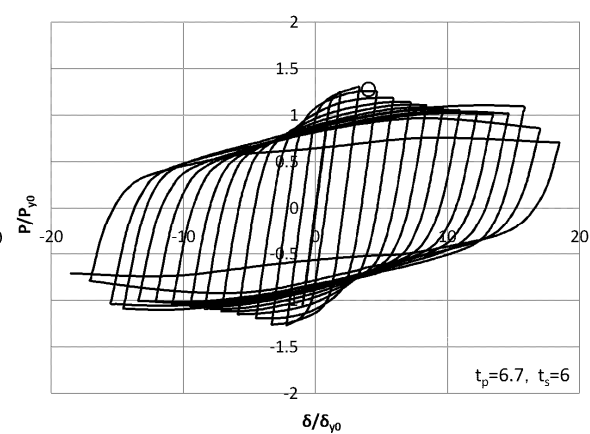
(c) Case No.3



(d) Case No.4

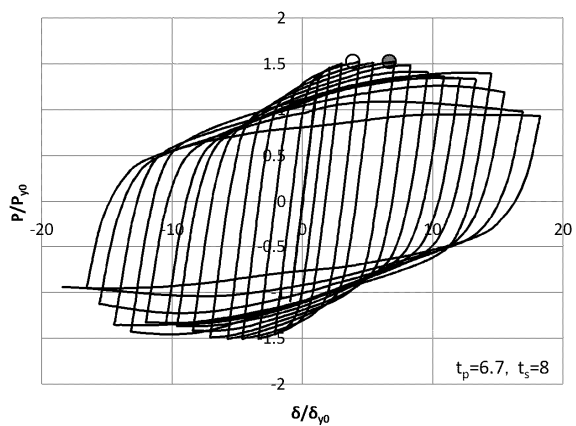


(e) Case No.5

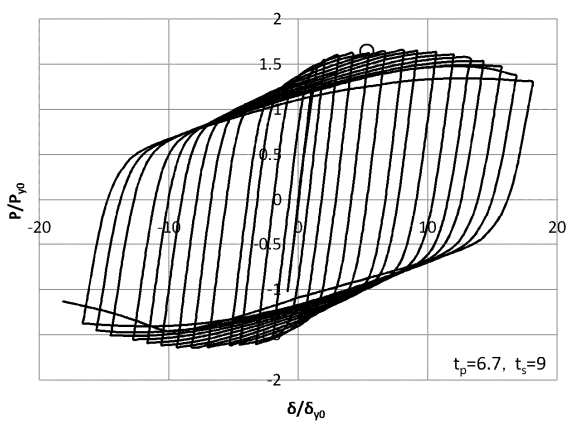


(f) Case No.6

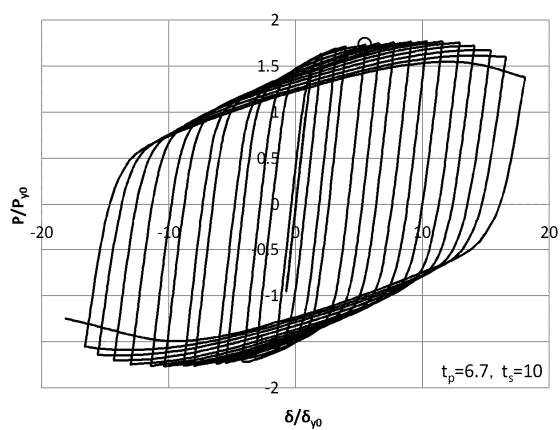
図 3.4 スパン中央における荷重－変位曲線（その 1）



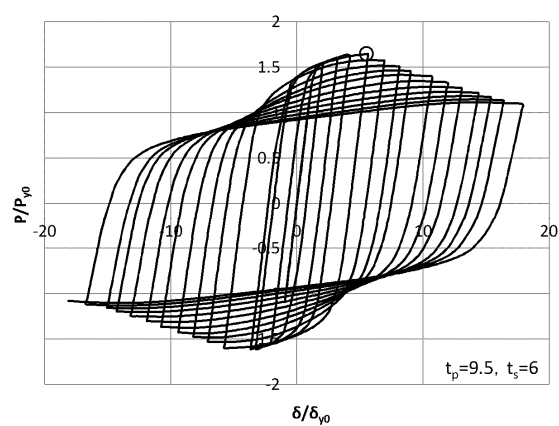
(g) Case No.7



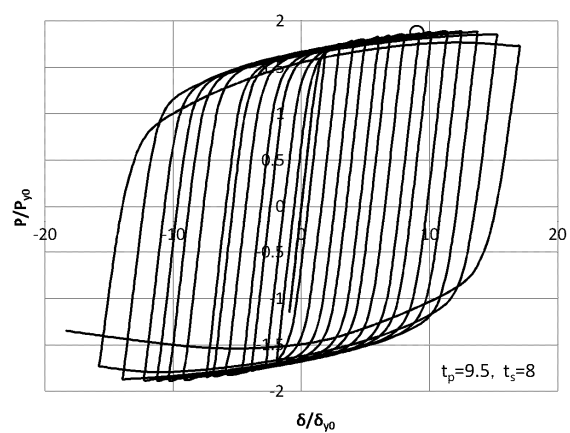
(h) Case No.8



(i) Case No.9



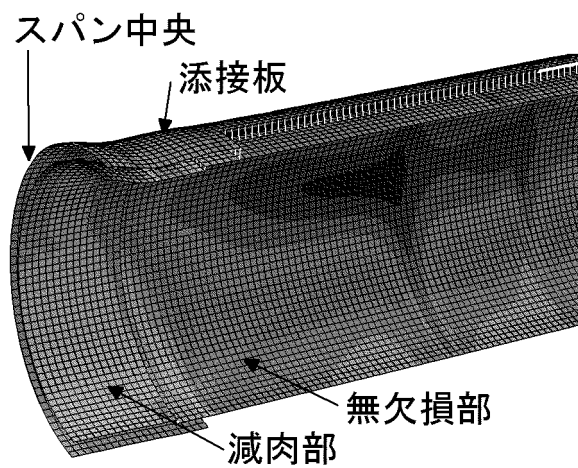
(j) Case No.10



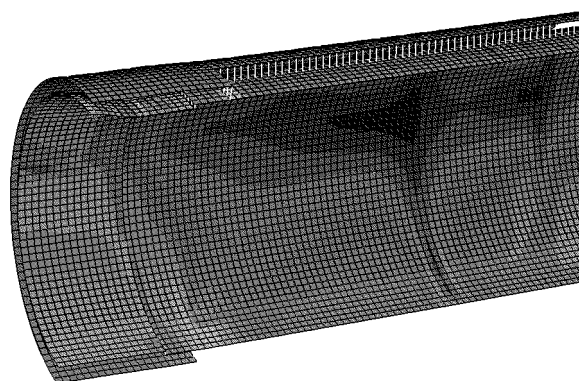
(k) Case No.11

図 3.4 スパン中央における荷重－変位曲線（その 2）

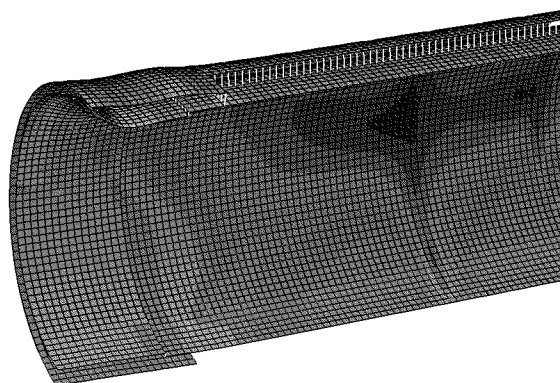
図 3.4 の中で，○印の部分は局部座屈が最初に発生した点である．この点での座屈変形図の代表的例として Case No.6 および Case No.7 の場合について図 3.5 に示す．ここで，図 3.5(b)は減肉部に最初の局部座屈が発生した時の座屈変形図であり，図 3.5(c)は添接板に最初の局部座屈が発生した座屈変形図である．



(a) Case No.6 (図 3.4(f)の○点)



(b) Case No.7 (図 3.4(g)の○点)



(c) Case No.7 (図 3.4(g)の●点)

図 3.5 局部座屈変形図



表 3.3 に繰返し曲げ解析結果の一覧表を示す．ここで， $R_t$  は式(3.1)に示す径厚比パラメータ<sup>3.3)</sup>であり， $R_{t,p}$  および  $R_{t,s}$  はそれぞれ腐食劣化鋼管および添接板の径厚比パラメータを示す．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．

各ケースの変形状況は以下のようなものである．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 の減肉鋼管は，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っている．

減肉鋼管および添接板の座屈に影響するものとしては，径厚比パラメータの他に減肉鋼管と添接板の荷重分担率が考えられる．添接板の荷重分担率に関しては文献 3.8)がある．この文献では，圧縮実験および曲げ実験を実施して，減肉鋼管と添接板の荷重分担率を算出するとともに，荷重分担率の簡易計算式を提案しており，同厚の添接板を使用した場合，圧縮載荷に比べて曲げ載荷の方が添接板の分担率が高くなることを示している．しかし，減肉厚と同厚の添接板を用いた曲げ載荷の場合では若干添接板の分担率が高くなる程度であることを考慮すると，塑性域での局部座屈には径厚比パラメータの影響が大きいものと考えられる．

鋼板添接補修鋼管の載荷時の変形状況は以下のようなものである．Case No.6, No.10 および No.11 以外の鋼板添接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．

表 3.3 繰返し曲げ解析結果

Case No. $\phi 216.3 \times 12.7$	腐食劣化鋼管		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(減肉)	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

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。表 3.3 より、鋼板添接補修鋼管の耐荷力は無欠損鋼管の約 93%に低下しているが、繰返し曲げ変形性能は無欠損鋼管の約 35%に低下しており、変形性能の低下が著しいことがわかる。

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ので、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。

港湾鋼構造物防食・補修マニュアル<sup>3.1)</sup>によると、減肉鋼管の補修は減肉厚と同厚の添接板により補修すれば元鋼管の耐力を満足することになるが、減肉鋼管および添接板の板厚が元鋼管より薄いため局部座屈が発生することになり、表 3.3 より元鋼管の変形性能を確保するためには減肉厚より厚い添接板の板厚が必要であることがわかる。

### 3.3.2 繰返し曲げ解析結果（その 2）

前節では、一般構造用炭素鋼鋼管 STK400 の外径が 216.3mm の鋼管を対象としてきたが、ここでは、外径寸法、板厚および降伏応力を変えた径厚比パラメータに対して解析を行い、鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ挙動について検討する。

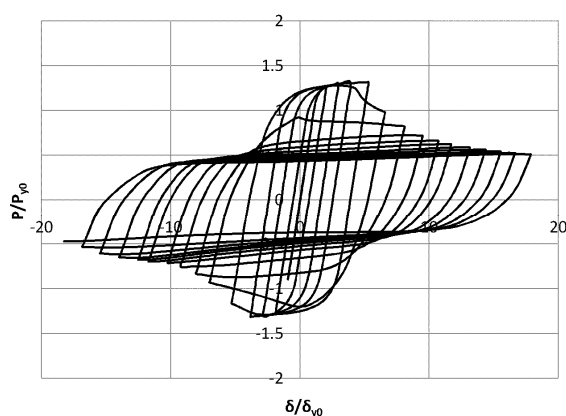
#### （1）径厚比が異なる場合の検討

対象鋼管は外径=508mm、板厚=12.7mm の一般構造用鋼管 STK400 である。

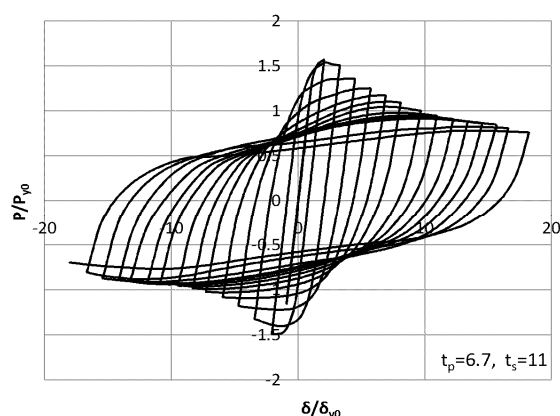
解析モデルは図 3.1(b)に示すもので、減肉部の鋼管厚=6.7mm、減肉長=360mm として、添接板厚が 11mm~13mm の場合について解析を行った。なお、弾性係数、降伏応力およびポアソン比については、実験時の供試体と同じもの（表 2.3）を使用した。

表 3.4 径厚比を変えた場合の解析結果

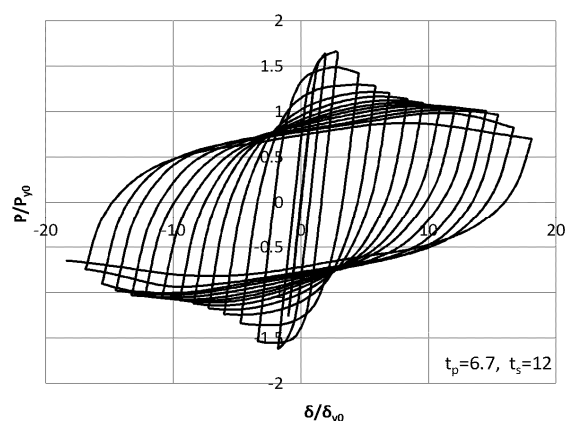
Case No. φ508×12.7	腐食劣化鋼管		添接板		P <sub>max</sub> (kN)	A <sub>cy</sub>	A <sub>cy</sub> /A <sub>cy0</sub>
	板厚 t <sub>p</sub> (mm)	径厚比 R <sub>t,p</sub>	板厚 t <sub>s</sub> (mm)	径厚比 R <sub>t,s</sub>			
Case No.21(無欠損)	12.7	0.0596	-	-	1318	A <sub>cy0</sub> = 12.7	1.000
Case No.22	6.7	0.1115	11.0	0.0517	1569	5.8	0.459
Case No.23	6.7	0.1115	12.0	0.0475	1653	8.2	0.642
Case No.24	6.7	0.1115	13.0	0.0439	1664	13.7	1.077



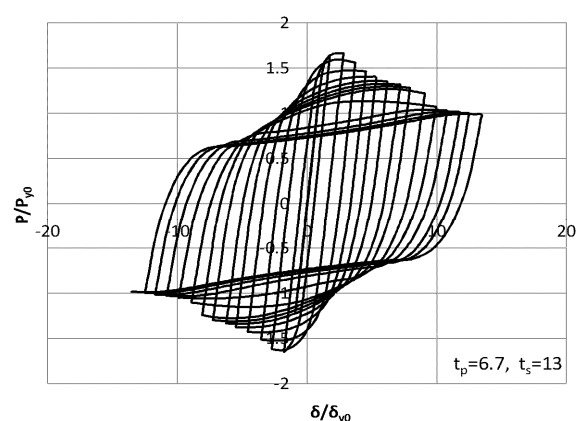
(a) Case No.21



(b) Case No.22



(c) Case No.23



(d) Case No.24

図 3.6 スパン中央における荷重－変位曲線

各ケースの解析結果を表 3.4 に、スパン中央における荷重－変位曲線を図 3.6 に示す。この図で、 $P_{y0}$  ( $=1001\text{kN}$ ) および  $\delta_{y0}$  ( $=18.9\text{mm}$ ) は無欠損鋼管の降伏荷重および降伏変位である。

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。図 3.4(a) 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ので、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 の鋼板添接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部で座屈変形が生じており（図 3.7 参照）、添接板の補修効果は十分にあることがわかる。

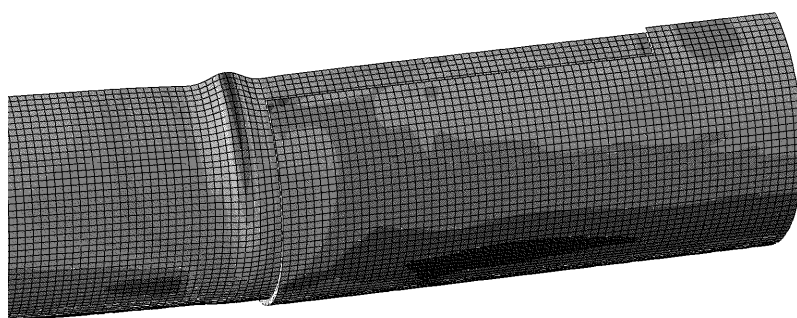


図 3.7 Case No.24 座屈状況図

## (2) 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 ( $\sigma_y=374\text{MPa}$ : 表 2.3 の STK400 に対応) と小さい場合 ( $\sigma_y=269\text{MPa}$ : 表 2.3 の SM400B に対応) 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結果を表 3.5 に, その荷重－変位曲線を図 3.8 に示す. 図 3.8 で,  $P_{y0}$  (=1001kN) および  $\delta_{y0}$  (=18.9mm) は無欠損鋼管の降伏荷重および降伏変位である.

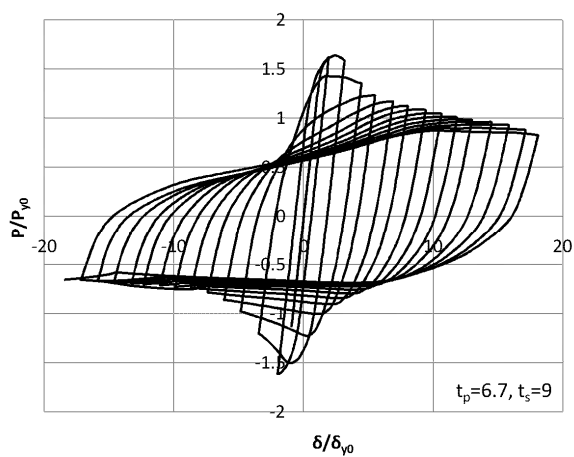
また, 降伏応力が小さい場合の解析結果を表 3.6 に, その荷重－変位曲線を図 3.9 に示す. 図 3.9 で,  $P_{y0}$  (=722kN) および  $\delta_{y0}$  (=13.5mm) は無欠損鋼管の降伏荷重および降伏変位である.

表 3.5 降伏応力が大きい場合の解析結果

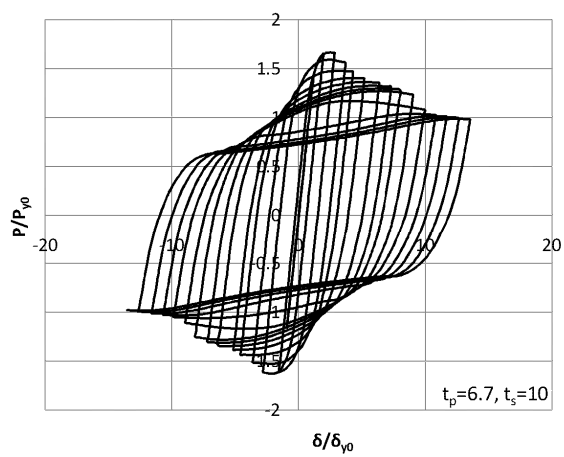
Case No. $\phi 508 \times 12.7$	腐食劣化鋼管		添接板		$P_{\max}$ (kN)	$A_{cy}$	$A_{cy}/A_{cy0}$
	板厚 $t_p$ (mm)	径厚比 $R_{t,p}$	板厚 $t_s$ (mm)	径厚比 $R_{t,s}$			
Case No.31(無欠損)	12.7	0.0596	-	-	1318	$A_{cy0}=12.7$	1.000
Case No.32	6.7	0.1115	9.0	0.0877	1639	5.7	0.452
Case No.33	6.7	0.1115	10.0	0.0791	1667	13.4	1.054

表 3.6 降伏応力が小さい場合の解析結果

Case No. $\phi 508 \times 12.7$	腐食劣化鋼管		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.41(無欠損)	12.7	0.0427	-	-	997	$A_{cy0}=25.3$	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

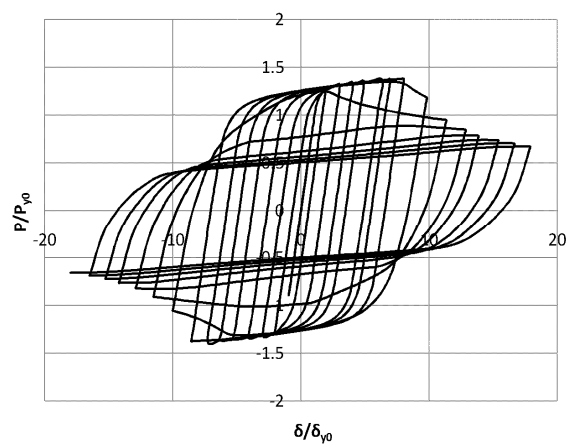


(a) Case No.32

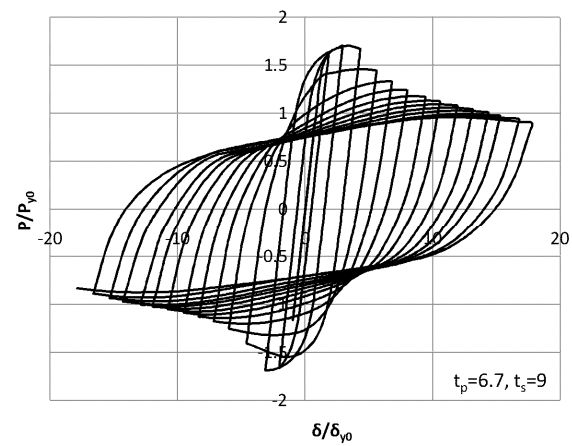


(b) Case No.33

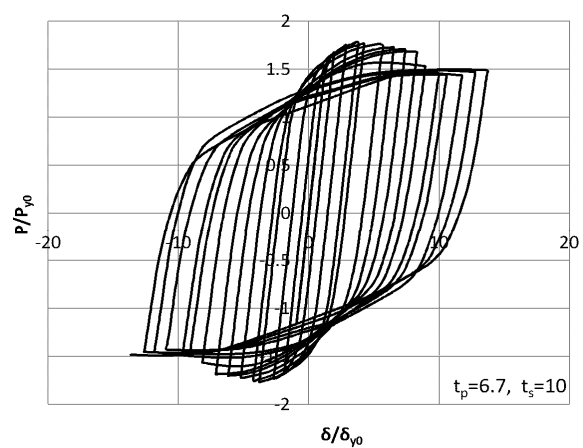
図 3.8 スパン中央における荷重－変位曲線（降伏応力が大きい場合）



(a) Case No.41



(b) Case No.42



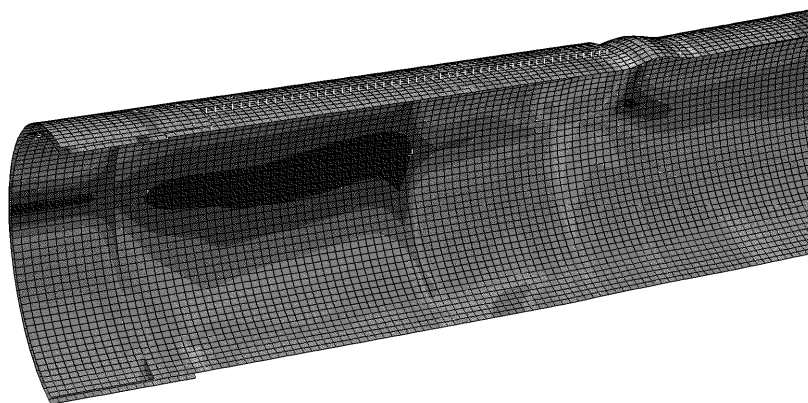
(c) Case No.43

図 3.9 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）

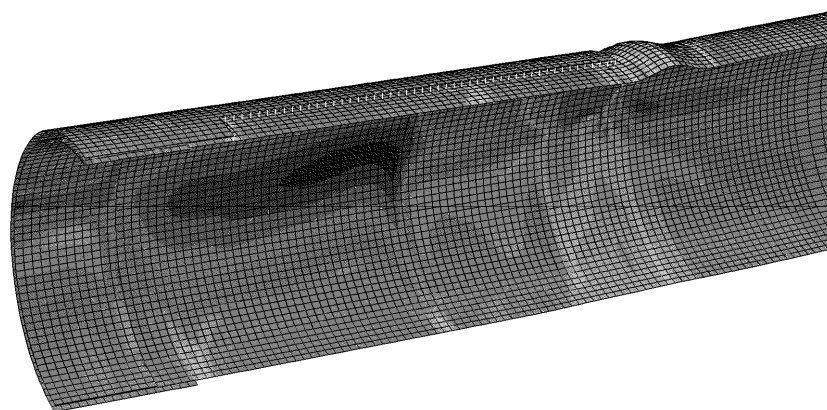
降伏応力が小さい Case No.41 の無欠損鋼管の曲げ繰返し挙動は、図 3.6(a)の Case No.21 に示す降伏応力が大きい場合と同様の繰返し曲げ挙動となっている。

鋼板添接補修鋼管のうち、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、添接板の補修部分は十分な耐荷力があることがわかる（図 3.10 参照）。

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ている。



(a) Case No.33



(b) Case No.43

図 3.10 座屈変形図

表 3.3～表 3.6 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板厚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  $t_s=9\text{mm}$  以上必要となり，外径=508mm の鋼管では  $t_s=13\text{mm}$  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  $t_s=10\text{mm}$  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 3.3 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 3.5 と表 3.6 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．

### 3.4 まとめ

本章では，腐食劣化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，有限要素法による弾塑性有限変位解析を行った．本章の結果をまとめると以下ようになる．

- (1) 鋼板添接補修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．
- (2) 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約 93%に低下しているが，繰返し曲げ変形性能は無欠損鋼管の約 35%に低下しており，変形性能の低下が著しいことを明らかにした．
- (3) 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， $\phi 216.3$  の腐食減厚 6mm の場合，断面性能確保に必要な板厚の 1.5 倍の添接板厚が必要であることを明らかにした．
- (4) 減肉鋼管を添接板で補修する場合，鋼管と同程度の降伏応力を有する添接板による補修が効果的であることが明らかになった．
- (5) 減肉鋼管と添接板の降伏応力が同じ場合には，径厚比パラメータにおける降伏応力の影響は少なく，添接板の必要板厚は降伏応力の違いによって変わらないことが明らかになった．

## ＜参考文献＞

- 3.1) 財団法人沿岸開発技術センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2009 年版），2009.
- 3.2) Plantema, F.J. : Collapsing stresses of circular cylinders and round tubes, Report S.280, Nat Luchtvaart-laboratorium, Amsterdam, The Netherlands, 1946.
- 3.3) 土木学会：座屈設計ガイドライン 改訂 2 版[2005 年版]，2005.
- 3.4) 社団法人日本鋼構造協会：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン，技報堂出版，2006.
- 3.5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002.
- 3.6) 柴田明德：最新耐震構造解析<第 2 版>，森北出版，2007.
- 3.7) 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.
- 3.8) 北根安雄，伊藤義人，渡邊尚彦，松岡和巳：水中溶接鋼板添接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.



## 第4章 軸力を受ける鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ挙動解析

### 4.1 緒言

第2章および第3章では、鋼板添接補修鋼管が繰返し曲げを受ける場合について検討を行い、補修設計への考察を行った。しかし、栈橋などの港湾構造物は鉛直荷重および地震時慣性力により鋼管杭には曲げのほか、軸力が作用することになる。実際の栈橋モデルの挙動解析の前に、繰返し曲げ挙動への軸力の影響について検討する必要がある。本章では、軸力を受ける繰返し曲げ挙動について検討する。

まず、栈橋の対象領域である鋼管杭を取り出して片持梁モデルを作成し、この片持梁モデルに軸力を作用させて繰返し曲げ解析を行い、繰返し曲げ挙動に与える軸力の影響について検討する。

地震時における栈橋の鋼管に作用する軸力は、死荷重および上載荷重による軸力および地震時慣性力による軸力が考えられ、死荷重および上載荷重による軸力は鋼管の降伏軸力の5%程度であり、この軸力に地震時慣性力の軸力が作用することになる。そこで、鋼管に降伏軸力の0%~25%の一定軸力が作用した状態に、繰返し曲げが作用する場合について弾塑性有限変位解析を行い、必要添接板厚、最大水平力およびエネルギー吸収性能への影響について検討を行う。

### 4.2 解析モデル

#### 4.2.1 栈橋モデル

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概要図<sup>4.1)</sup>を図4.1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。そこで、栈橋モデルから取り出した単一鋼管モデルに対して、干潮面直下位置より飛沫帯部分が腐食劣化したものと仮定し、その区間の鋼管厚を一律に減肉させて解析を行って検討する。

図4.1の鋼管杭を取り出した図を図4.2に示す。図4.2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 $\delta$ 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。横栈橋の地盤面は図4.1に示すように良質砂に置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、杭頭固定された突出単杭の上端に水平力が作用した場合の曲げモーメント<sup>4.2)</sup>を計算すると、杭の曲げ剛性および良質砂を $N$ 値=50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突出長の約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10mと想定し、曲げモーメントのゼロ点より上の鋼

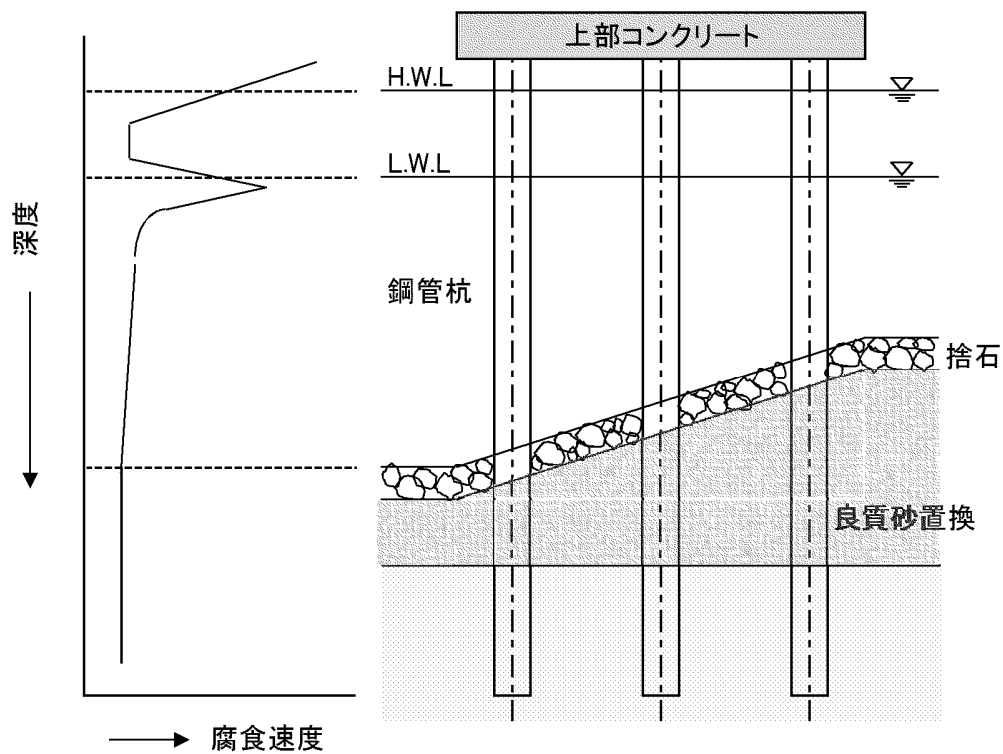


図 4.1 一般的な栈橋と腐食傾向図

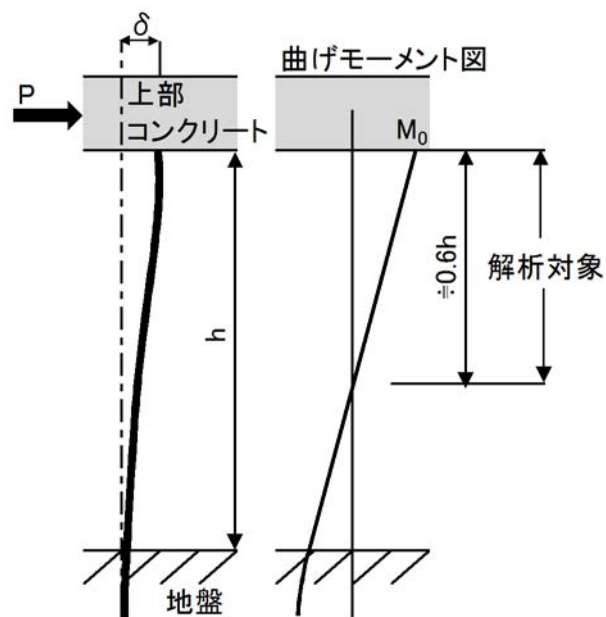


図 4.2 水平力を受ける杭の変位図および曲げモーメント図

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  $P$  が作用する図 4.3 に示すモデルを考える。ここでは、鋼板添接補修した減肉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、減肉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、減肉長を干潮面下 (-0.5m) の腐食部から上部コンクリートまでの腐食長を 3m と想定して解析を行う。

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 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”<sup>4.3)</sup>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。

#### 4.2.2 使用材料

解析対象とした鋼管杭には、栈橋などで一般的に使用される JIS A5525 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 JIS G3106 に規定されている SM490 を使用した。解析に使用したこれらの材料の材料定数を表 4.1 に示す。

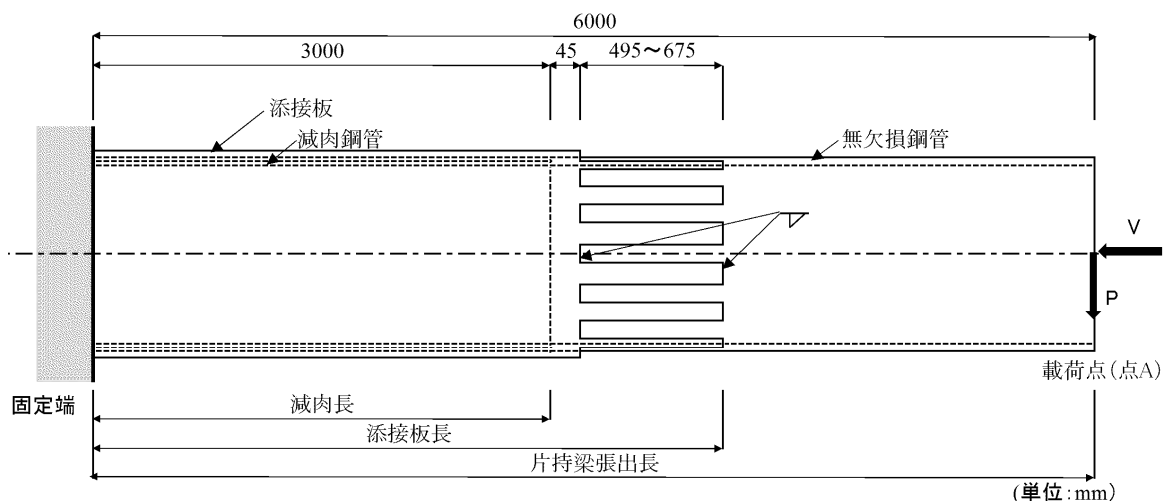


図 4.3 鋼板添接補修鋼管の解析モデル

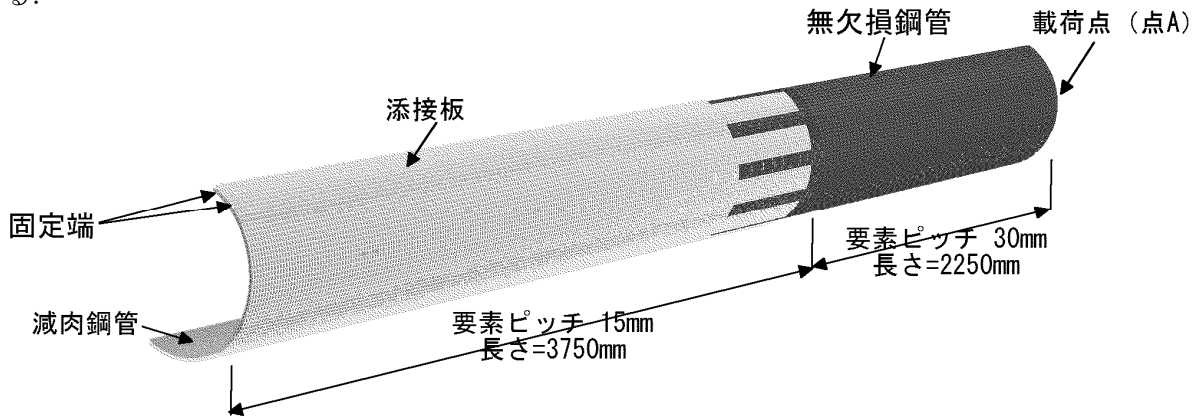
表 4.1 材料定数

材料	降伏応力 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	弾性係数 ( $\text{N/mm}^2$ )	ポアソン比	引張強度時の ひずみ(%)
SKK490 SM490	315	490	$2 \times 10^5$	0.3	18

### 4.2.3 有限要素モデル

図 4.3 の片持梁解析モデルを有限要素モデルとしたものを図 4.4 に示す．なお，繰返し曲げを受ける鋼管の対称性を考慮して 1/2 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，鋼管と添接板の溶接部はコネクター要素を用いて結合した．コネクター要素は，二つの異なる部分を結合している要素のモデル化に使用されるもので，非線形挙動および破壊の挙動についても考慮することができるものである．文献 4.4)において，水中すみ肉溶接および気中すみ肉溶接に関する実験結果より溶接部（前面すみ肉溶接および側面すみ肉溶接）の剛性，降伏応力および溶接強度を求め，すみ肉溶接部をコネクター要素によりモデル化して実験結果と解析結果の比較を行い，提案したコネクター要素の剛性式の妥当性が確認されている．本研究では，溶接部が水中となるため，水中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．なお，すみ肉溶接部は片持梁の自由端側にあるため弾性挙動することが確認されており，コネクター要素は弾性挙動するものとして解析を行った．

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側（張出長の 62.5%）の要素寸法を 15mm ピッチで，残りの载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は“2.4.2 解析結果の精度”において確認されており，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．



## 4.3 軸力を受ける繰返し曲げ挙動解析

### 4.3.1 解析条件

解析には汎用有限要素解析プログラム ABAQUS ver6.9<sup>4.5)</sup>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、上記軸力が作用している鋼管に、無欠損鋼管の降伏変位 ( $\delta_{y0}$ ) を鋼板添接補修鋼管の載荷点 (モデル上の A 点、図 4.3 および図 4.4) に  $\delta_{y0}$ 、 $-\delta_{y0}$ 、 $2\delta_{y0}$ 、 $-2\delta_{y0}$ 、 $\dots$  と与えて、載荷点の変位と水平力  $P$  との関係を求めた。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 5%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。

#### 4.3.2 軸力を受ける鋼板添接補修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表 4.2 に示す。表 4.2 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(3.1)に示す鋼管および添接板の径厚比パラメータ<sup>4.6)</sup>、 $A_{cy}$  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、 $A_{cy}/A_{cy0}$  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。なお、表 4.2 には  $A_{cy}/A_{cy0} \geq 1.0$  以上となる板厚のみを示している。

履歴ループ面積は、例えば図 4.5 の実線で囲まれる面積として計算される。図 4.5 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、鋼板添接

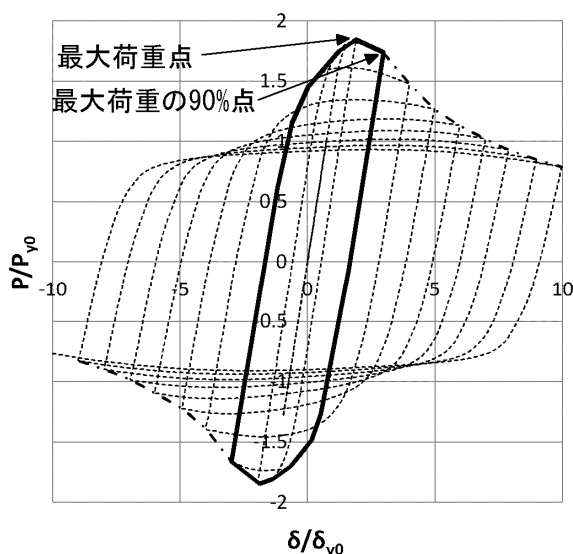


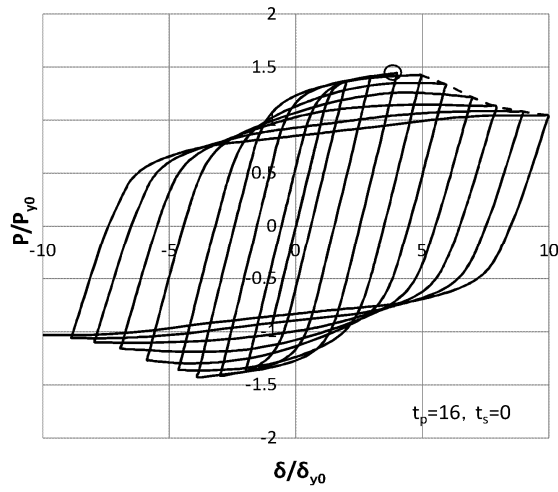
図 4.5 履歴ループ

表 4.2 軸力と繰返し曲げを受ける鋼管の解析結果

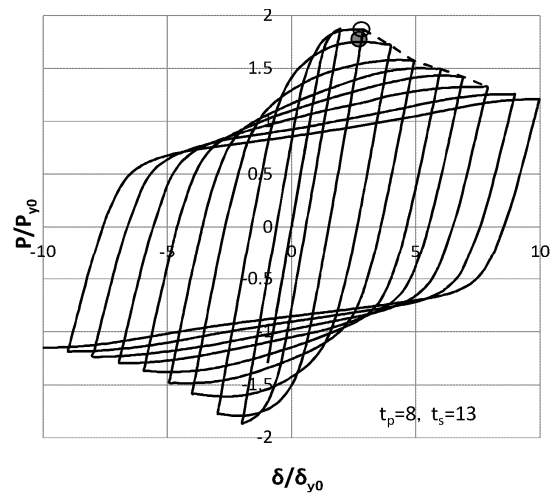
鋼管径	軸力比	板厚		最大荷重	径厚比パラメータ		履歴ループ	
		鋼管	添接板		鋼管	添接板	面積	面積比
D(mm)	V/V <sub>y</sub> (%)	t <sub>p</sub> (mm)	t <sub>s</sub> (mm)	P <sub>max</sub> (kN)	R <sub>tp</sub>	R <sub>ts</sub>	A <sub>cy</sub>	A <sub>cy</sub> /A <sub>cy0</sub>
600	0	16	0	316	0.0474	0.0000	12.82	1.000
		8	13	410	0.0936	0.0613	13.61	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	0	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

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とした。履歴ループ面積は変形時のエネルギー吸収量であり、鋼板添接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 1.0 以上確保する必要があると考えられる。ここで、鋼板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、 $\delta/\delta_{y0}$  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。

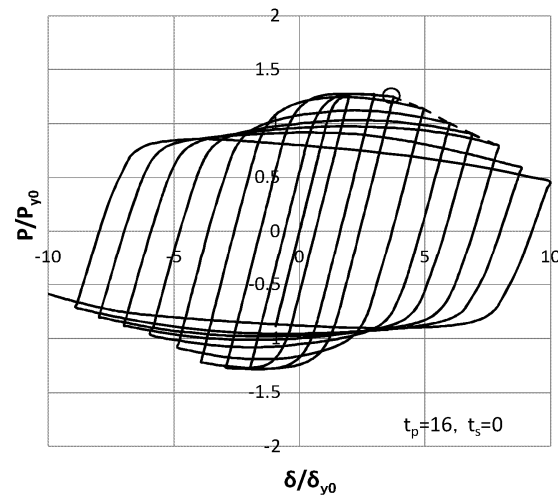
解析結果のうち、軸力比が 0%、10%および 20%の場合の載荷点における水平力－変位曲線を図 4.6、図 4.7 および図 4.8 に示す。図 4.6 は鋼管径  $\phi 600$  の場合、図 4.7 は鋼管径  $\phi 700$  の場合、図 4.8 は鋼管径  $\phi 800$  の場合を示している。無欠損鋼管の降伏水平荷重および降伏水平変位は、図 4.6 の  $\phi 600$  の場合は  $P_{y0}=219\text{kN}$ 、 $\delta_{y0}=63.0\text{mm}$  であり、図 4.7 の  $\phi 700$  の場合は  $P_{y0}=302\text{kN}$ 、 $\delta_{y0}=54.0\text{mm}$  であり、図 4.8 の  $\phi 800$  の場合は  $P_{y0}=398\text{kN}$ 、



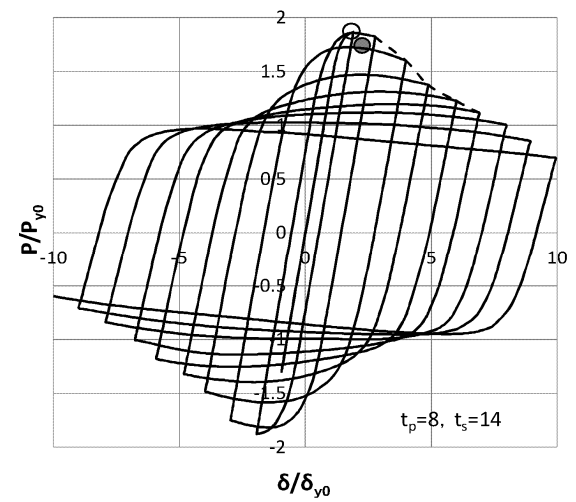
(a)  $V/V_y=0$ , 無欠損鋼管



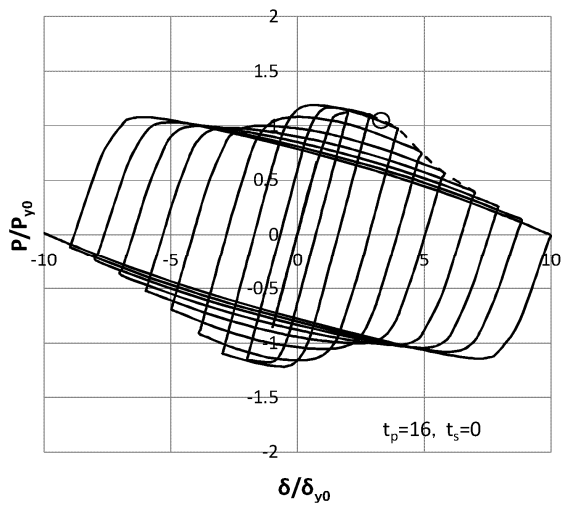
(b)  $V/V_y=0$ , 添接板補修鋼管



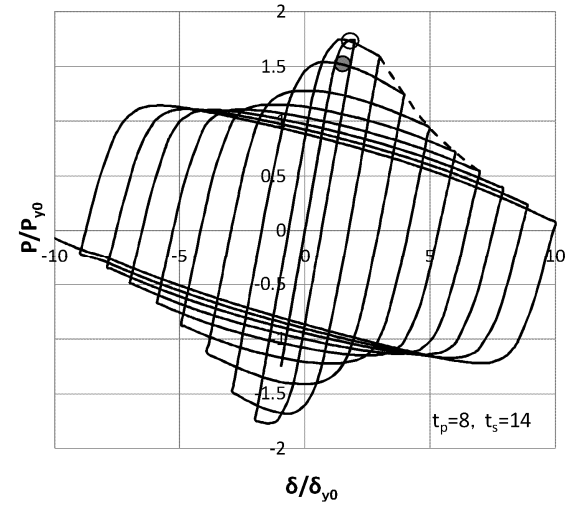
(c)  $V/V_y=0.1$ , 無欠損鋼管



(d)  $V/V_y=0.1$ , 添接板補修鋼管

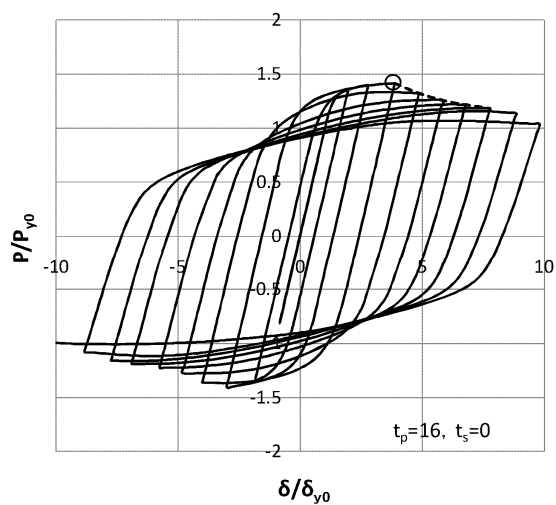


(e)  $V/V_y=0.2$ , 無欠損鋼管

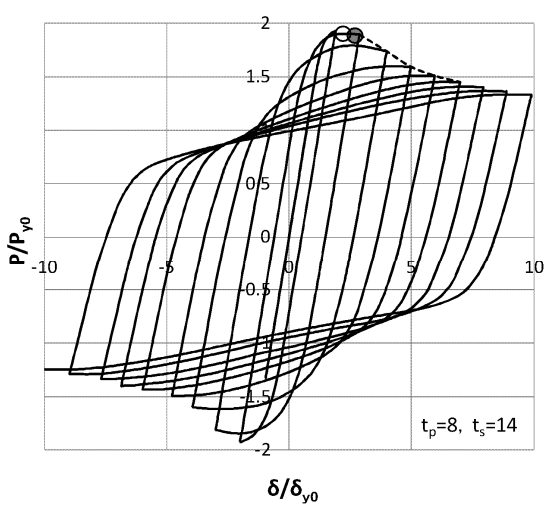


(f)  $V/V_y=0.2$ , 添接板補修鋼管

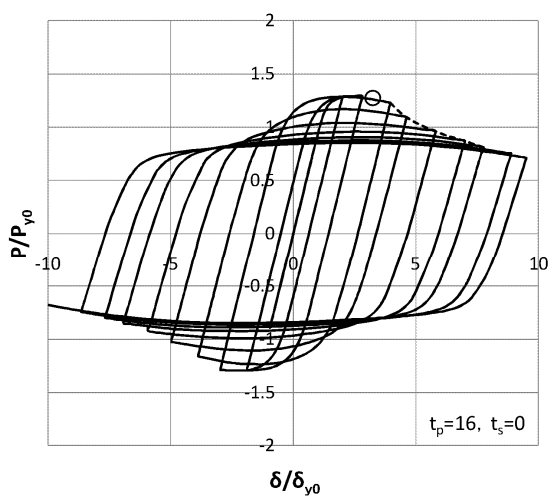
図 4.6 水平力－変位曲線 ( $\phi 600$ )



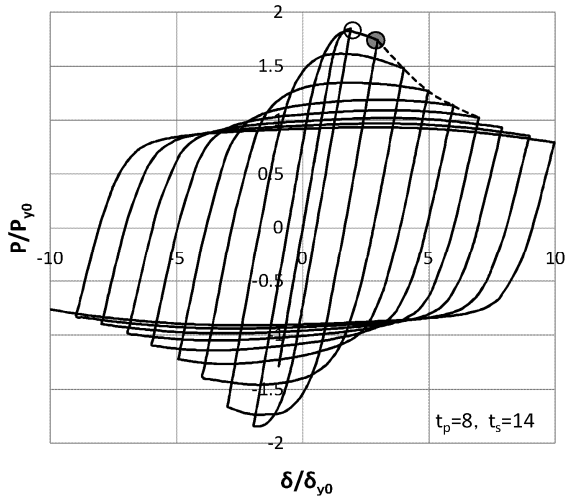
(a)  $V/V_y=0$ , 無欠損鋼管



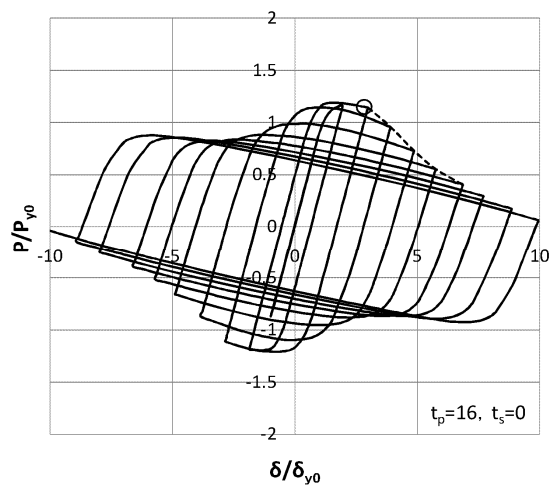
(b)  $V/V_y=0$ , 添接板補修鋼管



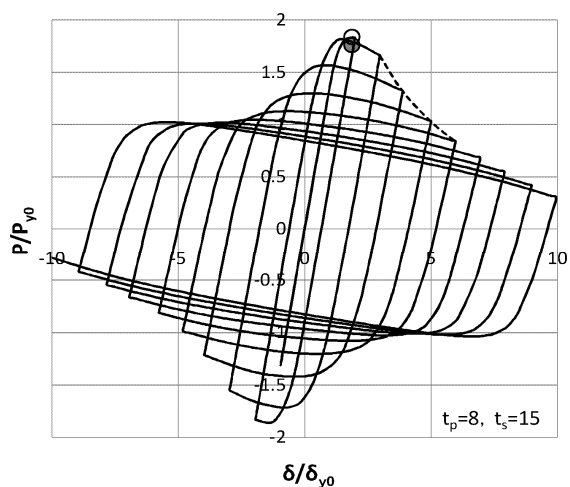
(c)  $V/V_y=0.1$ , 無欠損鋼管



(d)  $V/V_y=0.1$ , 添接板補修鋼管



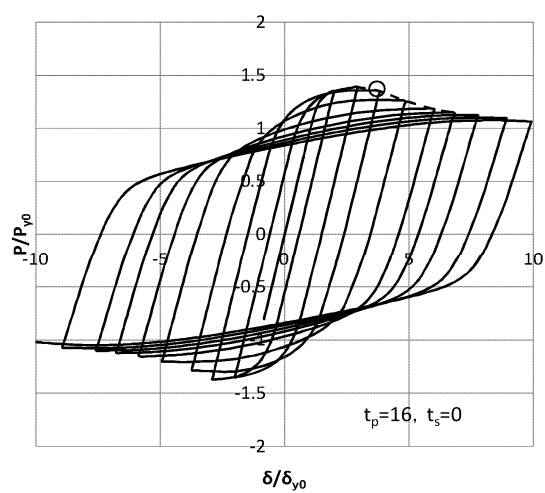
(e)  $V/V_y=0.2$ , 無欠損鋼管



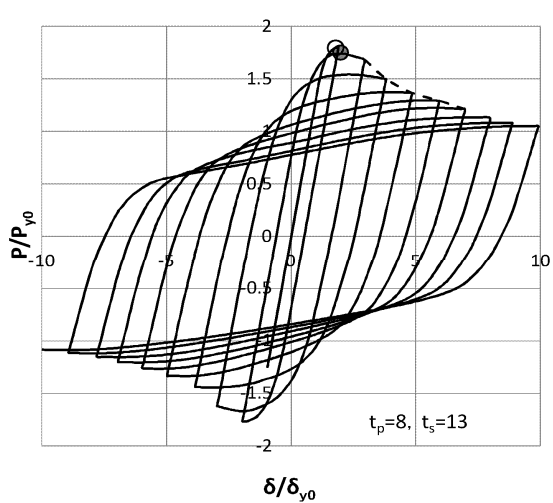
(f)  $V/V_y=0.2$ , 添接板補修鋼管

図 4.7 水平力－変位曲線 ( $\phi 700$ )

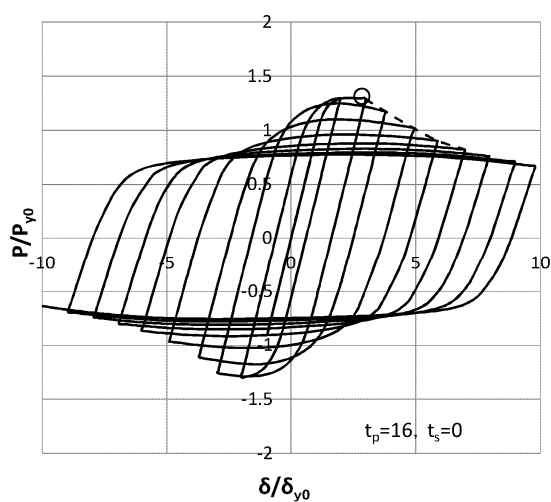




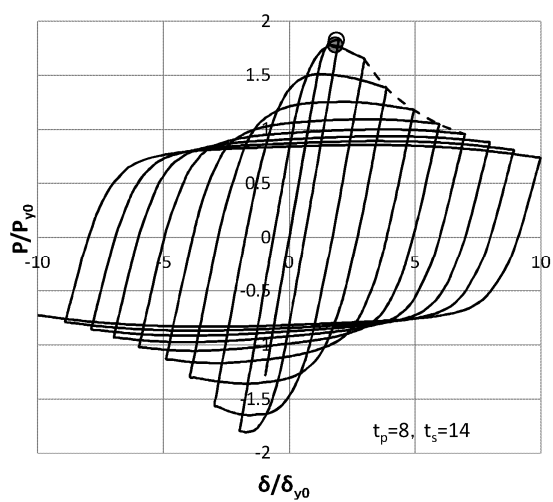
(a)  $V/V_y=0$ , 無欠損鋼管



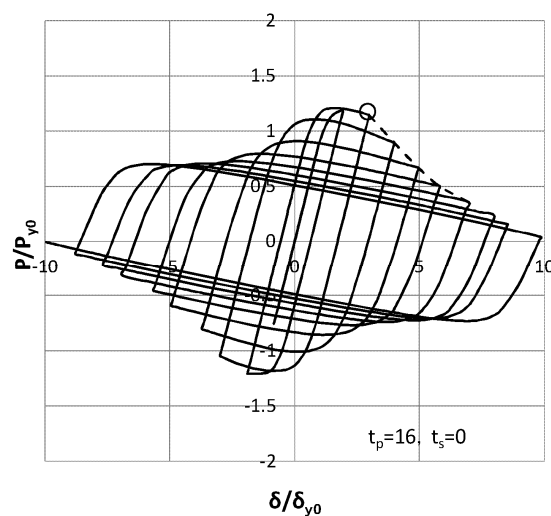
(b)  $V/V_y=0$ , 添接板補修鋼管



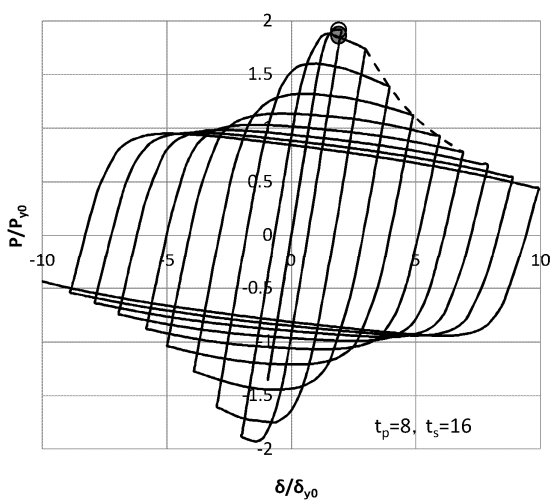
(c)  $V/V_y=0.1$ , 無欠損鋼管



(d)  $V/V_y=0.1$ , 添接板補修鋼管



(e)  $V/V_y=0.2$ , 無欠損鋼管



(f)  $V/V_y=0.2$ , 添接板補修鋼管

図 4.8 水平力－変位曲線 ( $\phi 800$ )

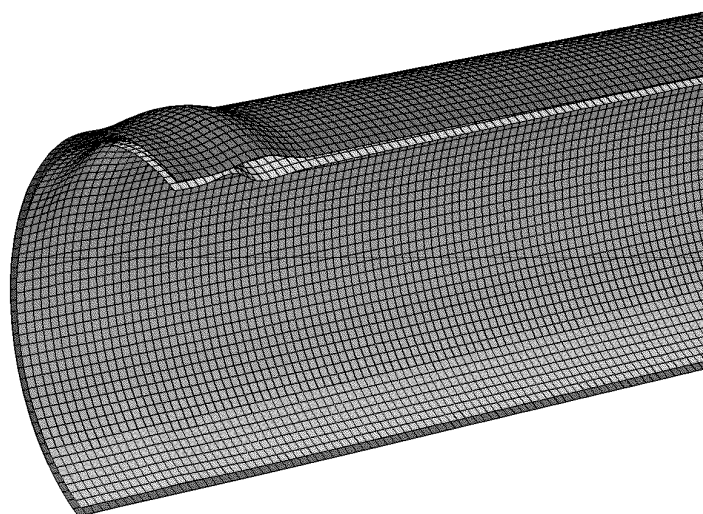


図 4.9 固定端付近の座屈変形図

$\delta_{y0}=47.3\text{mm}$  である。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り、図中の○点および●点はそれぞれ鋼管および添接板が局部座屈し始めた点である。また、図 4.7(d)に示す解析ケースについて固定端付近における局部座屈変形図を図 4.9 に示す。

$\phi 700$  で軸力比 10%の場合の最大荷重直後の座屈変形図を図 4.10 に、座屈変形が大きくなって水平荷重が低下し始めた座屈変形図を図 4.11 に示す（図 4.7(d)の場合）。これらの図より、最大荷重後、減肉鋼管と添接板がほぼ同時に座屈し始め、その後の繰返し曲げにより座屈変形が大きくなっているが、減肉鋼管の板厚が薄いため、座屈変形は添接板より大きくなっていることがわかる。また、図 4.6, 図 4.7 および図 4.8 より、最大水平力後の荷重低下の勾配は、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。

表 4.2 の結果より、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。

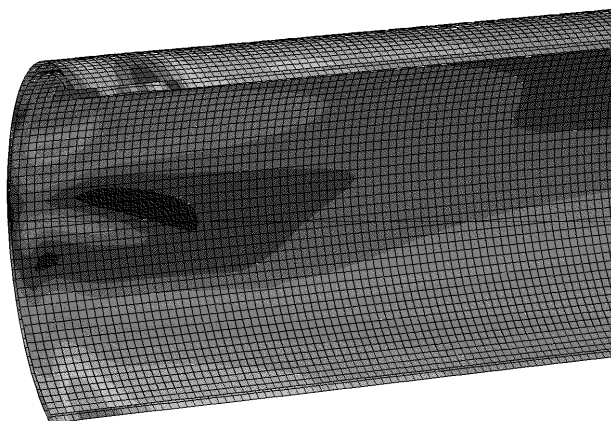


図 4.10 最大水平力後の座屈変形図（図 4.7(d)の○点）

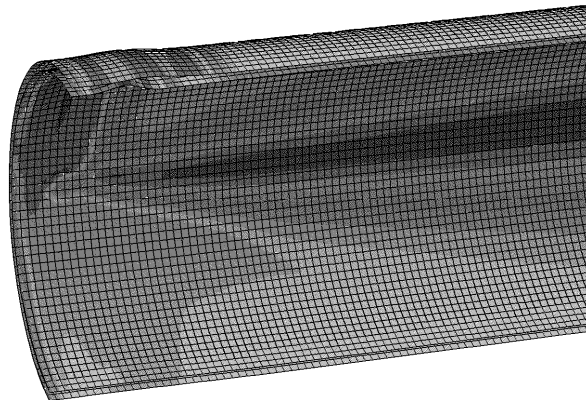


図 4.11 水平力低下が顕著となる座屈変形図（図 4.7(d)の●点）

#### 4.3.3 軸力比による鋼板添接補修鋼管への影響

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図 4.12 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の添接板厚が厚くなっていることがわかる。これは、軸力比が増加すると付加モーメントの影響が大きく最大水平荷重の低下が顕著となり、この荷重低下を抑えてエネルギー吸収性能を確保するためには、厚い添接板が必要となると考えられる。また、軸力比が大きくなると、局部座屈により減肉鋼管の断面抵抗性能が低下する結果、添接板厚も元鋼管厚以上となってくることがわかる。これは、曲げ座屈と軸圧縮座屈については相互の連成が大きいいため、連成座屈の評価にあたっては、一般的に軸力と曲げモーメントは 1 次の連成で考慮され<sup>4.6)</sup>、軸力比の増加による局部座屈強度が低下するためであると考えられる。

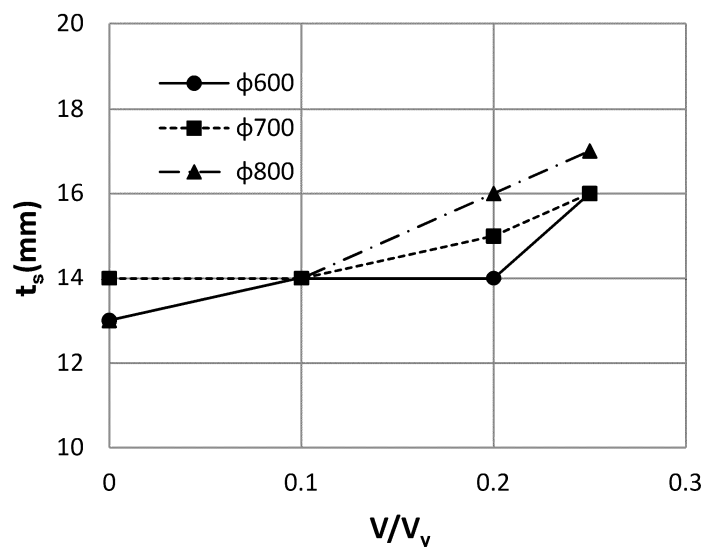


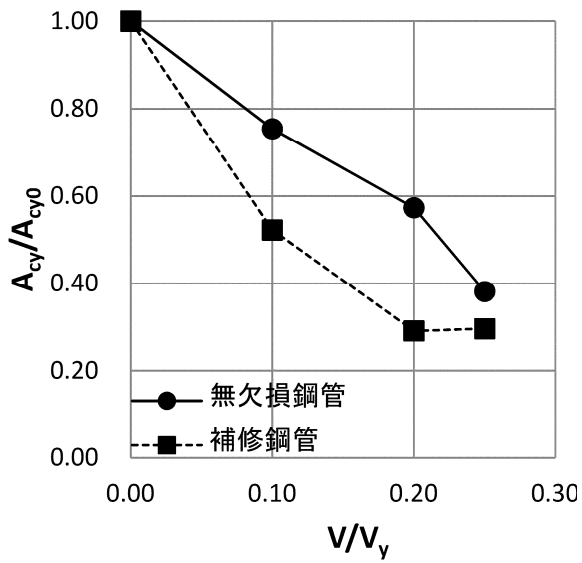
図 4.12 軸力比と添接板厚との関係

表 4.3 最大水平力および履歴ループ面積の軸力比による影響

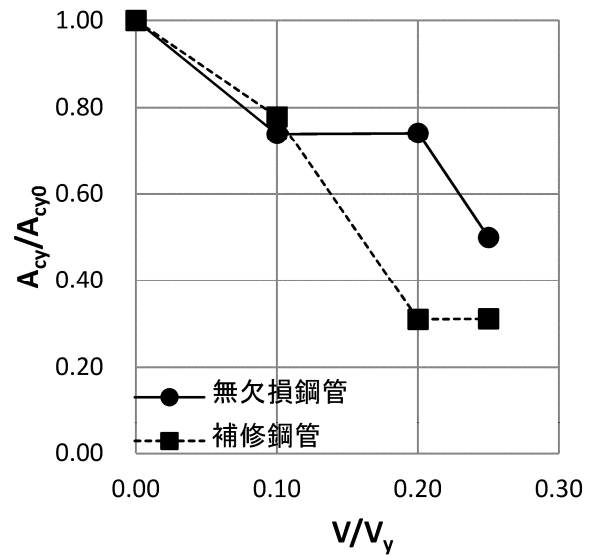
鋼管径	板厚		軸力比	最大荷重		履歴ループ	
	鋼管	添接板		荷重	荷重比	面積	面積比
D(mm)	$t_p$ (mm)	$t_s$ (mm)	$V/V_y(\%)$	$P_{max}$ (kN)	$P_{max}/P_{maxV0}$	$A_{cy}$	$A_{cy}/A_{cy0}$
600	16	0	0	316	1.000	12.82	1.000
			10	281	0.889	9.67	0.754
			20	265	0.839	7.35	0.573
			25	260	0.823	4.89	0.381
	8	13	0	410	1.000	13.61	1.000
			10	388	0.946	7.11	0.522
			20	367	0.895	3.96	0.291
			25	355	0.866	4.03	0.296
700	16	0	0	427	1.000	10.08	1.000
			10	391	0.916	7.45	0.739
			20	365	0.855	7.47	0.741
			25	350	0.820	5.04	0.500
	8	14	0	583	1.000	14.07	1.000
			10	558	0.957	10.96	0.779
			20	531	0.911	4.36	0.310
			25	518	0.889	4.38	0.311

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、 $\phi 600$ および $\phi 700$ の鋼管について8mmの減肉を想定し、添接板厚を $\phi 600$ 場合13mmで、 $\phi 700$ の場合14mm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返し曲げ解析を行い、その結果を表4.3に示す。ここで、 $P_{maxV0}$ は軸力比0%の場合の無欠損鋼管および鋼板添接補修鋼管の最大水平力であり、 $A_{cy0}$ は軸力比0%の場合の無欠損鋼管および鋼板添接補修鋼管の履歴ループ面積である。

$\phi 600$ および $\phi 700$ について、図4.13に軸力比と履歴ループ面積比( $A_{cy}/A_{cy0}$ )との関係を示し、図4.14に軸力比と最大水平力比( $P_{max}/P_{maxV0}$ )の関係を示す。図4.13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、無欠損鋼管より鋼板添接補修鋼管の方が減少割合が大きいことがわかる。図4.14における軸力比の増加による最大水平力の減少率をみると、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、図4.13と図4.14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、鋼板添接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ため曲げ局部座屈が発生しやすく、局部座屈後の荷重低下が著しいためであると考えられる。したがって、軸力による付加モーメントの影響、および軸力と曲げの連成局部座屈について考慮した補修設計が必要となることが考えられる。

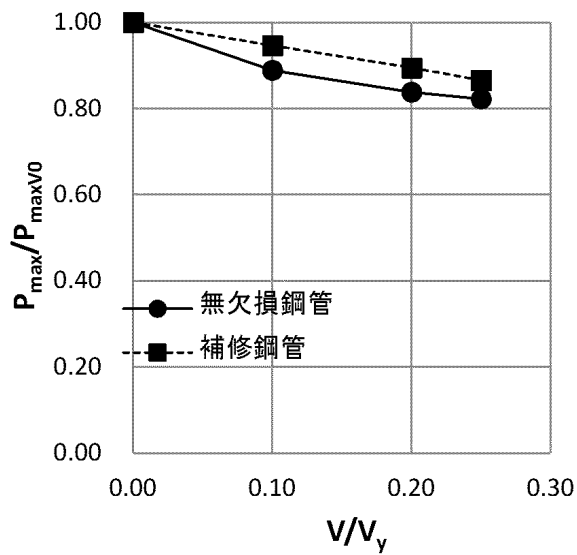


(a)  $\phi$  600

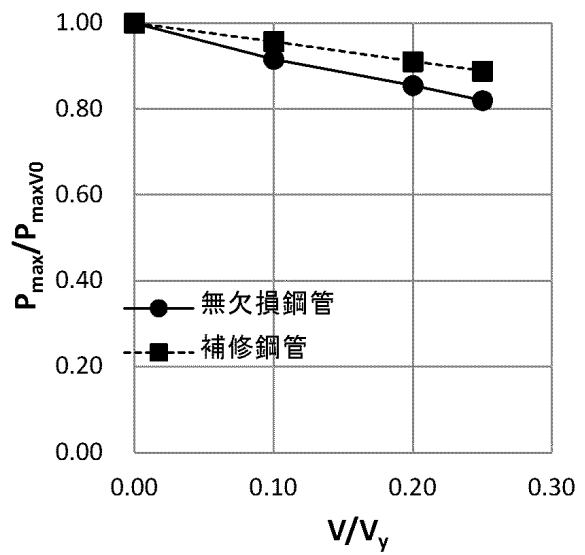


(b)  $\phi$  700

図 4.13 軸力比と履歴ループ面積比との関係



(a)  $\phi$  600



(b)  $\phi$  700

図 4.14 軸力比と最大水平力比との関係

## 4.4 まとめ

本章では、港湾構造物である栈橋の鋼管杭が腐食により減肉し、鋼板添接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（SKK490：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。本章では鋼管の減肉厚を一定として解析を行ったが、必要添接板厚を定量的に算定するためには、種々の減肉厚に対して解析する必要があると考えられる。本章の結果をまとめると以下のようになる。

- (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、腐食減肉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) 鋼板添接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傾向があることを明らかにした。
- (3) 無欠損鋼管および鋼板添接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明らかにした。また、無欠損鋼管より鋼板添接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明らかにした。したがって、付加モーメントの影響および軸力と曲げの連成座屈を考慮した補修設計が必要と考えられる。

## <参考文献>

- 4.1) 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.
- 4.2) 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.
- 4.3) 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.
- 4.4) 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.
- 4.5) Dassault Systems : ABAQUS/Standard user's manual, ver6.9, 2010.
- 4.6) 土木学会：座屈設計ガイドライン 改訂 2 版[2005 年版]，2005.

## 第5章 栈橋モデルの曲げ挙動解析

### 5.1 緒言

第2章では、弾塑性有限変位解析のための有限要素モデルを作成し、繰返し曲げを受ける鋼板添接補修鋼管の載荷実験結果と比較して解析モデルの妥当性について確認した。第3章では、作成した有限要素解析モデルを用いて種々のパラメータによる鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ挙動を明らかにし、鋼板添接補修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は、港湾鋼構造物の防食・補修マニュアル<sup>5.1)</sup>に基づいて補修設計を行った添接板厚より厚い板厚の添接板が必要であることを示した。

栈橋杭基礎の荷重状態に合った解析として、第4章では、鋼板添接補修鋼管の軸力を受ける繰返し曲げ解析を行い、軸力が鋼板添接補修鋼管に与える影響について明らかにし、軸力が大きくなるにしたがって必要添接板厚が厚くなることを示した。

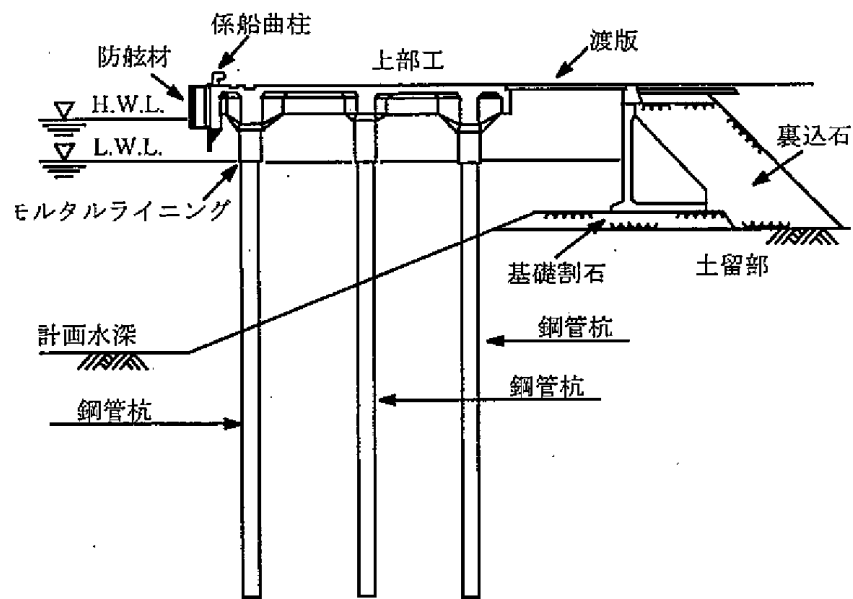
第2章から第4章までの結果を踏まえて、本章では実際の栈橋モデルを使用して耐震性能について検討を行う。実際の栈橋では、上部コンクリートの水平変位が増加するにつれて鋼板添接補修鋼管に作用する軸力は変動することになり、これまでの単一鋼管モデルと異なる挙動をすることが予想される。また、栈橋モデルにおいては、杭上端の塑性化が進むにつれて塑性ヒンジ化し、モーメントが他の杭に再配分されるとともに、地中部の曲げモーメントが増加することが予想される。したがって、これまでの片持梁モデルの繰返し曲げ挙動と異なる挙動について明らかにし、鋼板添接補修設計法の改良のための基礎データを得る。

### 5.2 解析モデル

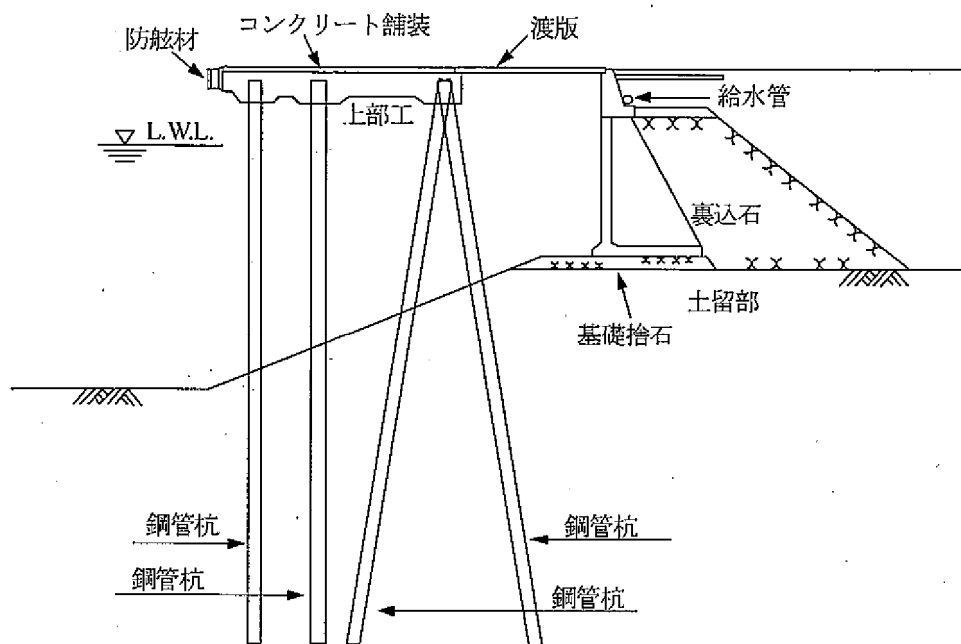
#### 5.2.1 解析対象栈橋

港湾施設としては、水域施設、外郭施設、係留施設、臨港交通施設、荷さばき施設などがあるが、ここでは係留施設のうち栈橋を解析対象としている。

港湾係留施設である栈橋には、図5.1に示すような形式がある<sup>5.2)</sup>。



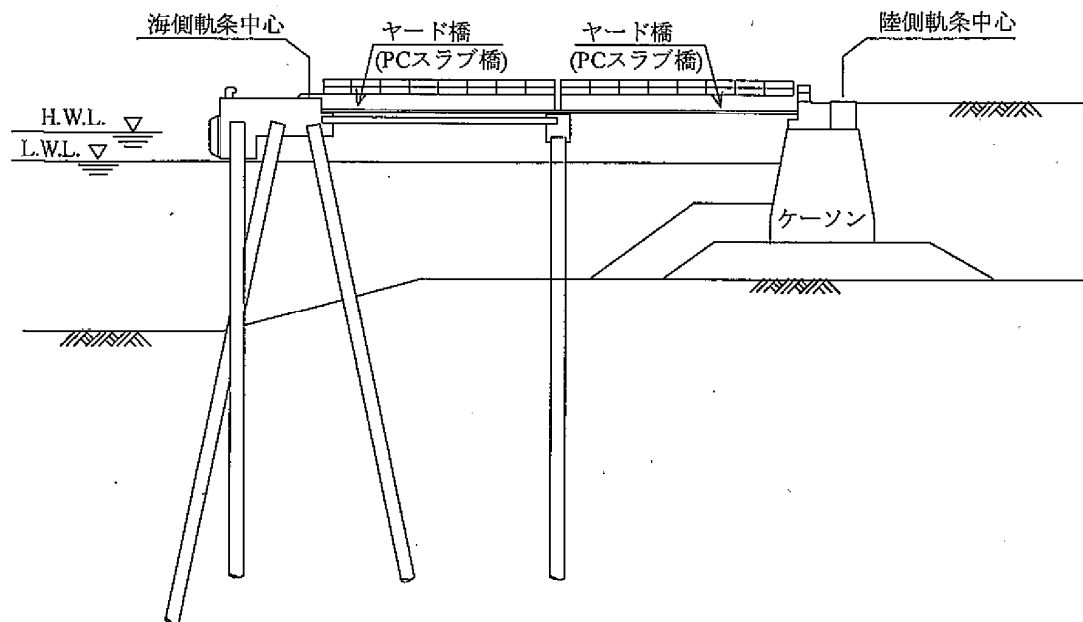
(a) 直杭式横棧橋



(b) 斜め組杭式横棧橋

図 5.1 棧橋構造の例 (その 1) 5.2)





(c) デタッチドピア

図 5.1 栈橋構造の例 (その 2) 5.2)

図 5.1(a)の直杭式横栈橋は、岸壁に沿って設置される直杭により構成されており、栈橋に作用する水平力に対して直杭で抵抗する栈橋で、一般的に見られるタイプの栈橋である。図 5.1(b)の斜め組杭式横栈橋は、栈橋に作用する水平力に対して斜め組杭で抵抗する栈橋で、直杭式栈橋に比べて水平変位を小さくできる形式である。図 5.1(c)のデタッチドピアは、鉱石などのばら荷専用施設で橋型クレーンの基礎となる栈橋である。

これらの栈橋形式のうち、最も一般的な栈橋形式であること、栈橋の地震時挙動が複雑でなく、地震時挙動を明らかにする目的のためには適していることを考慮し、解析対象を直杭式栈橋とする。また、中規模程度の栈橋を想定して、鋼管杭径 $\phi 800$ の栈橋を対象とする。

この章で解析を行う対象栈橋を図 5.2 に示す。



図 5.2 の解析対象栈橋は、文献 5.3)の直杭式横栈橋の設計例をもとに簡略化した栈橋である。この栈橋の概要は以下のである。

(1) 鉛直荷重

上部コンクリートに作用する鉛直荷重は以下に示す死荷重および上載荷重である。

$$\text{死荷重} = 90\text{kN/m}$$

$$\text{上載荷重} = 65\text{kN/m}$$

死荷重には、鋼管杭突出部の約半分の重量を含んでいる。鋼板添接補修鋼管の解析において、実際には減肉鋼管に死荷重が作用して、補修後上載荷重および地震時慣性力が作用することになるが、地震時慣性力の影響が大きいと考えられるため、第 4 章の場合と同様に本解析ではすべての鉛直荷重を鋼板添接補修鋼管に作用させて解析を行う。

(2) 海底地盤

海底地盤の上層部は軟弱層（シルト層：N 値=0～5）のため、図 5.2 に示すように良質砂置換で改良を行っている。杭下端付近は良質砂地盤であるが、杭への影響が少ないと考えられるため、解析上は図 5.2 に示すような 2 層地盤で簡略化して解析を行う。土質定数は図 5.2 に示すとおりである。

基準 5.2)により、前面水深と実斜面との 1/2 の高さのところに仮想地盤面を設定し、この仮想地盤面より上の地盤を無視して杭の横方向抵抗を計算する。

## 5.2.2 栈橋全体モデル

図 5.3 に解析対象の栈橋全体モデルを示す。栈橋全体モデルの概要については以下に述べる。

- 1) 栈橋の対称性を考慮して 1/2 モデルにより解析を行う。
- 2) 栈橋の上部コンクリートは弾性梁としてモデル化する。
- 3) 鋼管杭のうち、鋼管杭上部は腐食が激しく断面力も大きく、栈橋全体の耐荷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、鋼管杭上部をシェル要素でモデル化して検討する。
- 4) シェル要素と上部コンクリート梁要素は剛な弾性梁要素で結合する。
- 5) シェル要素より下方の鋼管杭は梁要素としてモデル化し、鋼管杭上部の塑性化にともなってモーメントが再配分されるため、弾塑性パイプ要素を使用する。
- 6) 地盤抵抗はバネ要素によりモデル化し、図 5.4 にバネ要素の荷重－変位関係を示す。ここに、 $P_s$  はバネに作用する力、 $\delta_s$  はバネの変位、 $k_H$  はバネ定数である。また、 $P_{pmax}$  はバネ位置での受働土圧であり、地盤反力の上限值 5.4)である。受働土圧の計算に使用する水平震度は、地盤の固有周期、栈橋の固有周期、照査用震度等から決定されるレベル 1 の震度である水平震度=0.17 を使用している 5.3)。
- 7) 鋼管杭下端は鉛直方向のみ拘束して解析する。

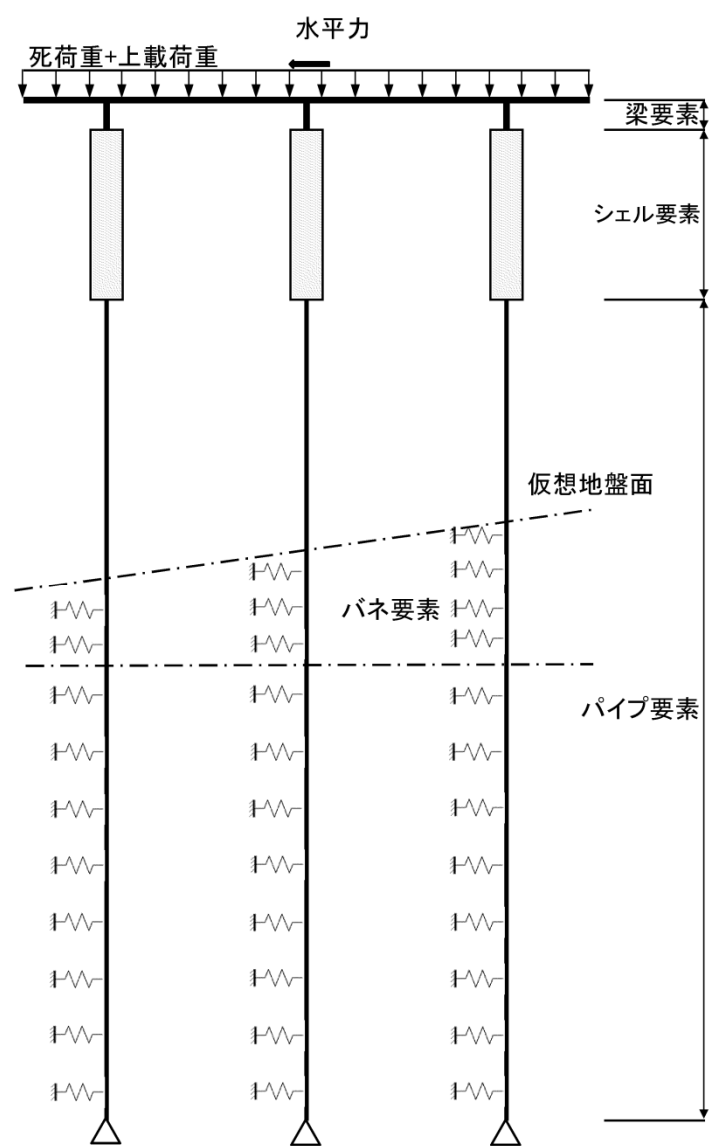


図 5.3 栈橋全体モデル

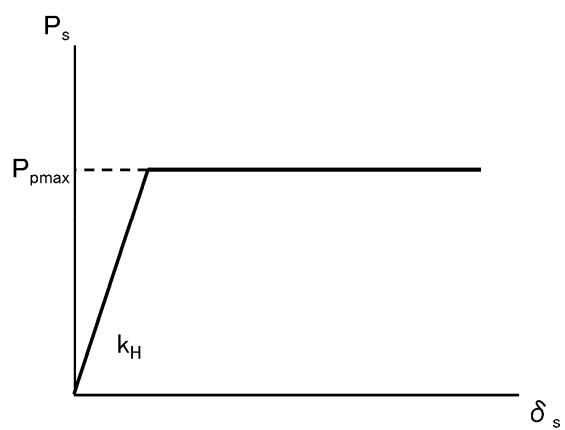


図 5.4 横方向地盤の荷重－変位関係

栈橋全体モデルの 1/2 モデルを解析する際、パイプ要素の 1/2 モデルは、図 5.5 に示すように元鋼管の板厚中心線を一致させ、板厚としては元鋼管板厚の 1/2 の板厚を使用して解析した。このモデル化の妥当性について、 $\phi 700 \times t16$  (SKK490) の無欠損鋼管に対して図 5.6 に示す片持梁モデルで検討した。

張出し長 6m の片持梁の先端に荷重を載荷して、シェル要素で解析した場合と板厚中心線は元鋼管と同じにして板厚を元鋼管の半分である 8mm の 2 本のパイプ要素とした場合について梁先端の荷重—変位関係を求め、その結果を図 5.7 に示す。図 5.7 において、○点は固定端近傍のシェル要素が座屈により少し膨らみ始めたポイントであり、●点は座屈が明らかになり最大荷重を示したポイントである。この結果より、鋼管が座屈するまではシェル要素とパイプ要素の結果はほぼ一致しており、鋼管が局部座屈を起こすまではパイプ要素の 1/2 モデル化は妥当であることがわかる。

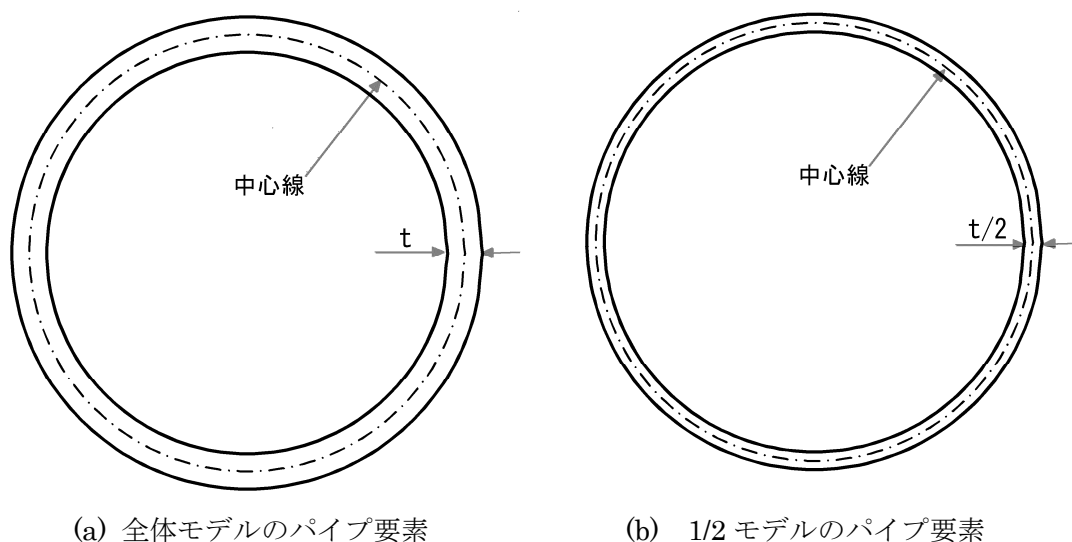


図 5.5 パイプ要素のモデル化

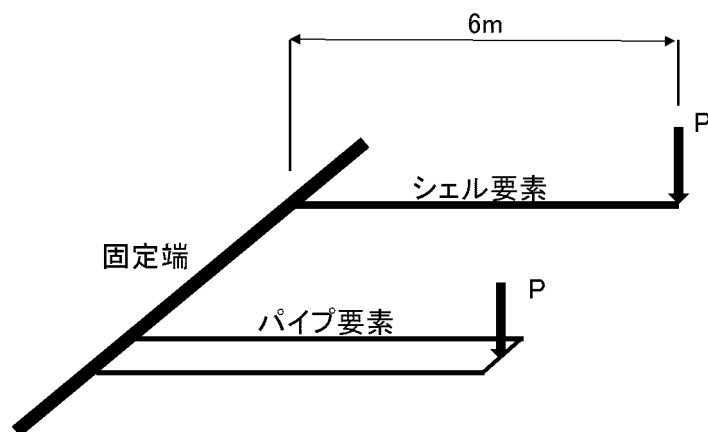


図 5.6 シェル要素とパイプ要素の載荷状態

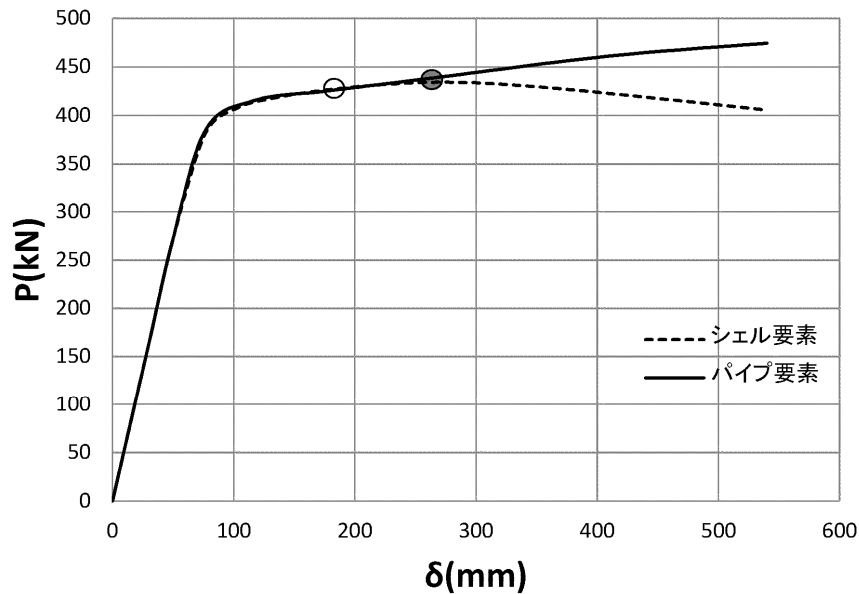


図 5.7 シェル要素とパイプ要素の荷重－変位曲線

### 5.2.3 有限要素モデル

#### (1) シェル要素

図 5.3 に示す栈橋全体モデルのシェル要素部分の詳細図を図 5.8 に示す。また、図 5.9 に栈橋全体の 1/2 モデルを示す。

有限要素モデルにおいて、1/2 鋼管断面の円周方向分割数はこれまでと同様に 60 分割とし、軸方向要素ピッチは 20mm として解析を行った。第 4 章では軸方向要素ピッチは 15mm であったが、本章では対象鋼管径が 800mm のみであり、要素形状を正方形に近い形状とするため軸方向要素ピッチを 20mm とした。

減肉部の板厚は、5.2.4 に示すように、実際に計測された鋼管杭の腐食分布をモデル化し、減肉部板厚を軸方向に変化させた板厚分布とした。

添接板と鋼管との接合は第 4 章と同様にコネクター要素で接合した。また、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。解析を行う杭頭部の最大減肉厚は 6mm であり、第 4 章より減肉量は少ないが、溶接部位置が鋼管杭のモーメントの小さい位置にあり、すみ肉脚長、スリット数などが鋼管杭の挙動に与える影響は少ないと考え、溶接部は第 4 章と同じモデルとして解析を行った。

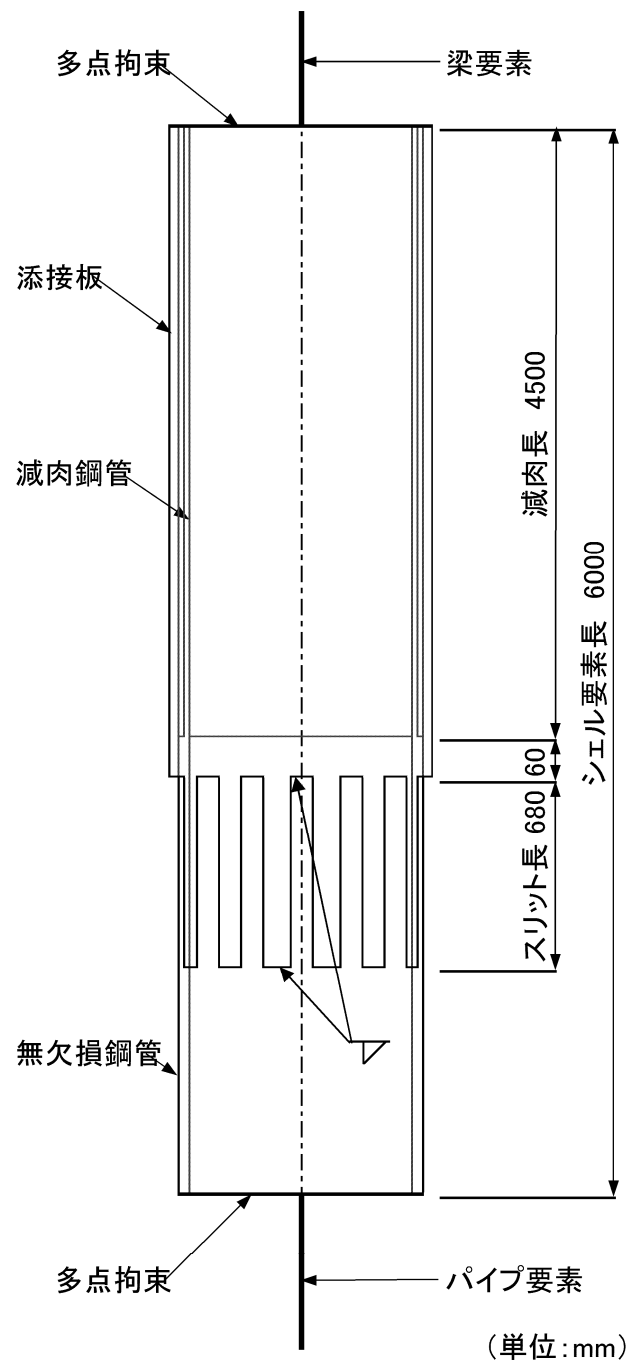


図 5.8 シェル要素部の詳細図

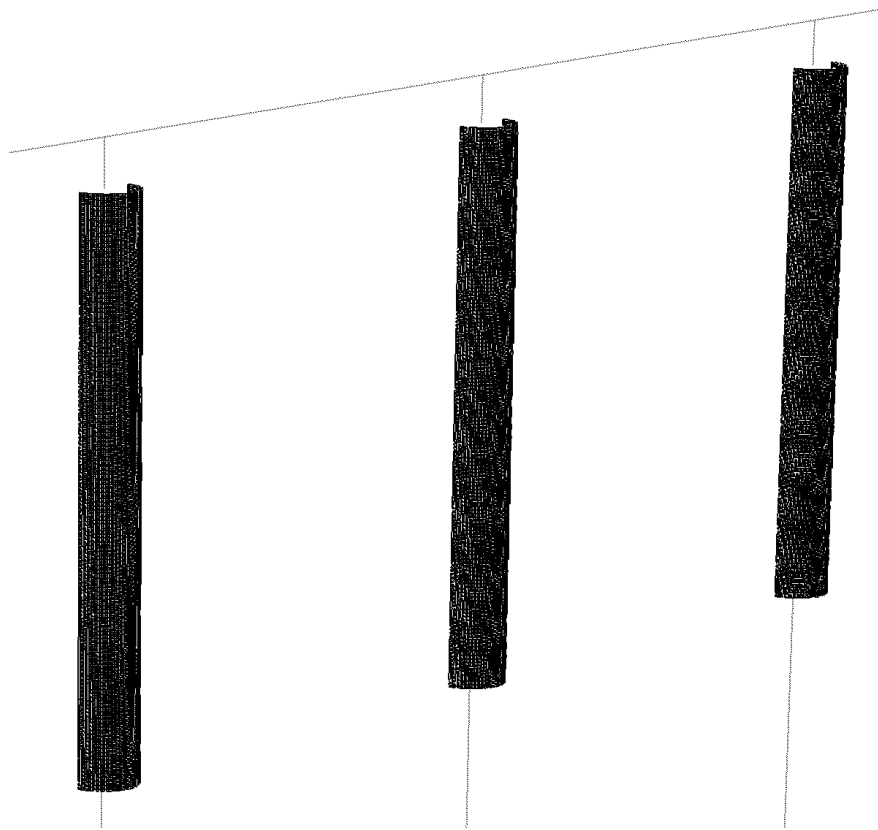


図 5.9 1/2 有限要素モデル

## (2) 材料定数

解析においては、第 4 章で使用した SKK490 および SM490 の材料定数を適用する。この材料定数を表 5.1 に示す。

表 5.1 材料定数

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	315	490	$2 \times 10^5$	0.3	18
SM490					

## (3) 硬化則

解析に使用した降伏後の硬化則は、第 4 章と同様に線形 Ziegler の移動硬化則を使用した（硬化勾配= $E/204$ ， $E$ ：弾性係数）。



## 5.2.4 腐食厚分布

解析にあたって、鋼管杭上部の腐食部については実際の腐食状況をモデルに反映するため、腐食分布を考慮したモデル化を行った。

海洋環境における鋼構造物の腐食状況は、飛沫帯、干満帯、海中部、海底土中部の各部位によって異なる。文献 5.5)によると、無防食鋼管杭の各部位における腐食速度は図 5.10 のようになることが示されている。

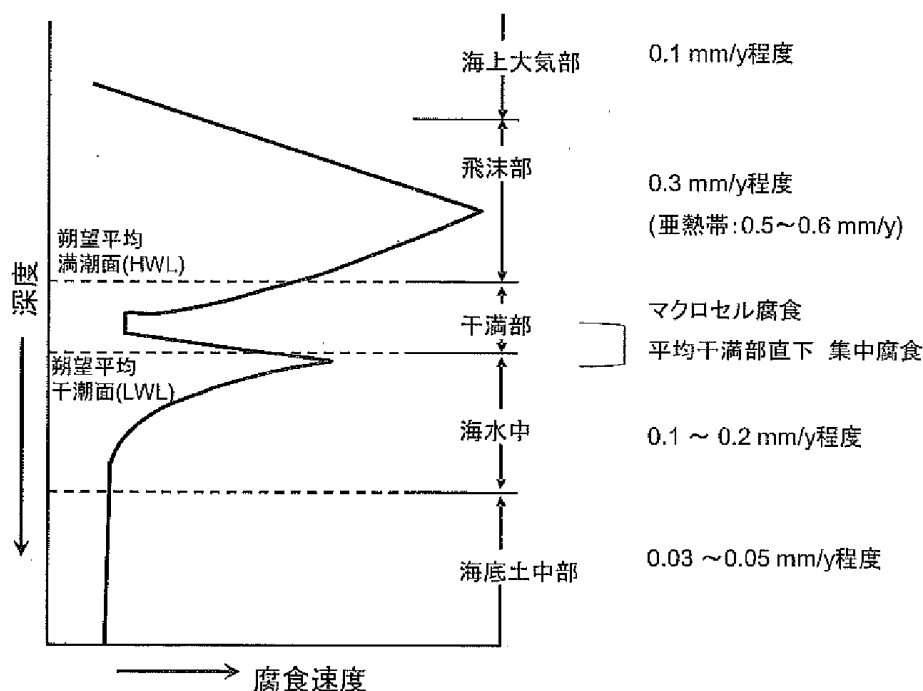


図 5.10 海洋鋼構造物の腐食傾向図 5.5)

実際の無防食鋼材の腐食状況の文献としては、鋼管に関する文献 5.6)、5.7)、5.8)、鋼アングル材の腐食に関する文献 5.9)、およびこれらの文献に基づくガイドライン 5.5)がある。文献 5.6)および 5.8)によるデータを表 5.2 に示す。これらのデータは 19.5 年間海洋曝露された鋼管（ $\phi 406.4 \times t9$ ）のデータであり、平均板厚および標準偏差が文献によるものである。

また、文献 5.5)による板厚分布と平均断面腐食量分布の例を図 5.11 に示す。図 5.11 は鋼アングル材の腐食量分布データであり、鋼管の腐食量とは異なる。

表 5.2 腐食厚および解析用板厚

曝露環境	平均板厚* (mm)	標準偏差* (mm)	平均腐食量 (mm)		解析用腐食量 (mm)
飛沫帯	5.28	1.84	3.72	3.84	6.0
	4.78	1.68	4.22		
	5.48	2.41	3.52		
	5.11	1.69	3.89		
干満帯	6.79	1.03	2.21	1.93	3.5
	7.35	1.39	1.65		
海中部	7.63	0.50	1.37	1.21	2.0
	7.76	0.53	1.24		
	7.73	0.43	1.27		
	7.75	1.02	1.25		
	7.99	0.94	1.01		
	7.89	0.83	1.11		

\*：文献 5.6)および 5.8)によるデータ

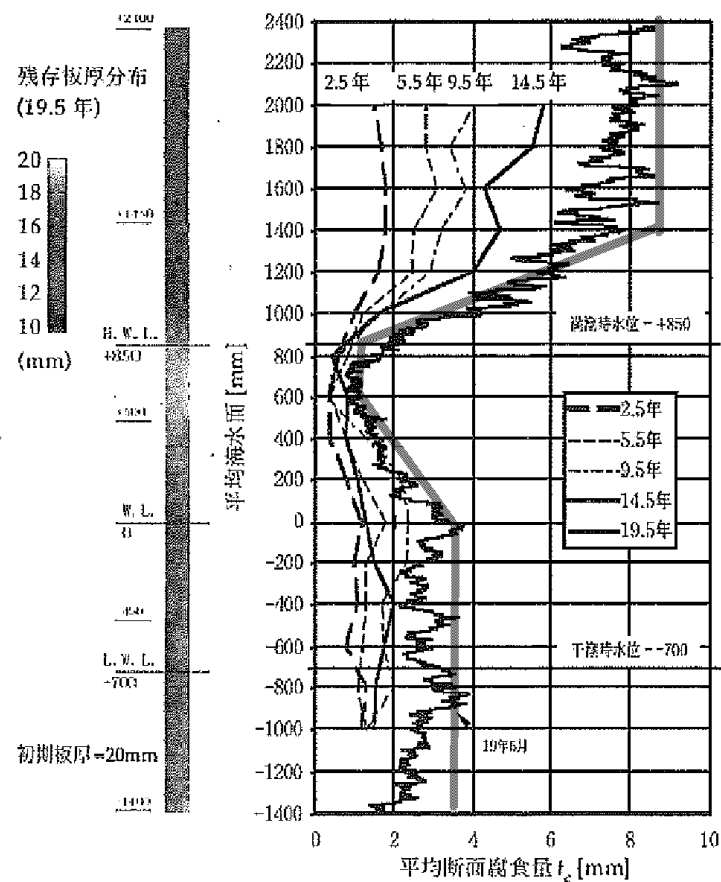


図 5.11 板厚分布と平均断面腐食量分布 5.5)

腐食劣化鋼管の耐荷力評価を行う際、平均板厚と標準偏差がよく用いられる。耐荷力評価に使用する有効板厚の算出方法としては藤井ら<sup>5.7)</sup>による方法、沿岸開発研究センター<sup>5.10)</sup>による方法がある。沿岸開発技術研究センターによる式を式(5.1)に示す。

$$t_R = t_{ave} - \alpha S \quad (5.1)$$

ここで、 $t_R$ ：有効板厚、 $t_{ave}$ ：平均板厚、 $S$ ：標準偏差であり、 $\alpha=1.0\sim1.5$ の数値となる定数である。

本章では、腐食劣化鋼管の耐荷力評価を行うため、平均腐食量のバラツキを考慮する必要がある、式(5.1)を参考にして求めた表 5.2 に示す解析用腐食量（ $\alpha=1.0$ ）を使用して解析を行う。

文献 5.5)により腐食厚分布をモデル化したものを図 5.12 に示す。図 5.12 は、図 5.11 における曝露期間が約 20 年の腐食厚分布をモデル化したもので、図 5.11 の太線に沿って表 5.2 により推定した腐食厚を示したものである。ここで、飛沫帯、干満帯②および海中部に対しては、表 5.2 で求められた腐食量を適用した。また、干満帯①については海中部と同じ腐食量とし、地中部については文献 5.5)より腐食量を 1mm とした。

#### 5.2.5 解析ケース

単調載荷曲げ挙動解析で行う解析ケースは、無欠損鋼管のケース、減肉鋼管のケース、および鋼板添接補修鋼管のケースである。鋼板添接補修鋼管の添接板厚は、腐食減肉厚と同じ厚さの 6mm の添接板、8mm および 9mm の添接板厚に対して解析を行った。また、腐食量を図 5.11 に示す平均腐食量とした場合の解析を実施し、解析用腐食量の場合との比較を行った。

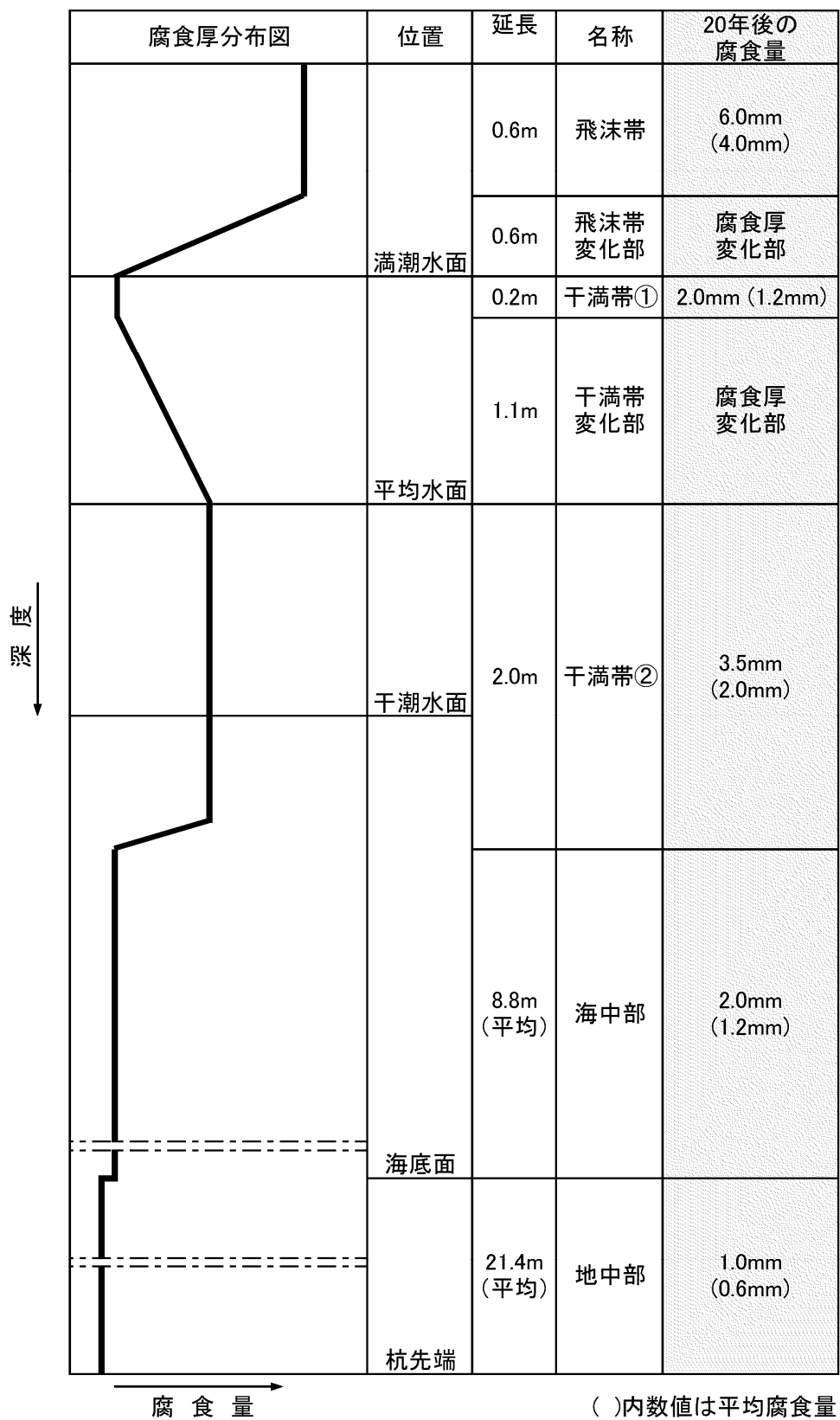
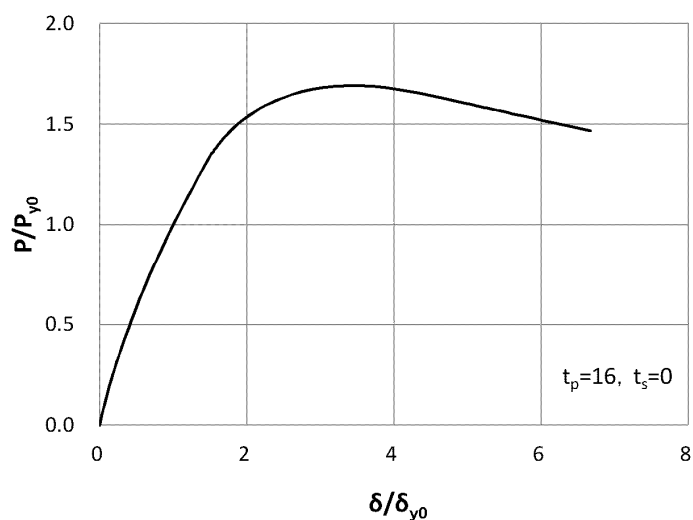


図 5.12 腐食分布図

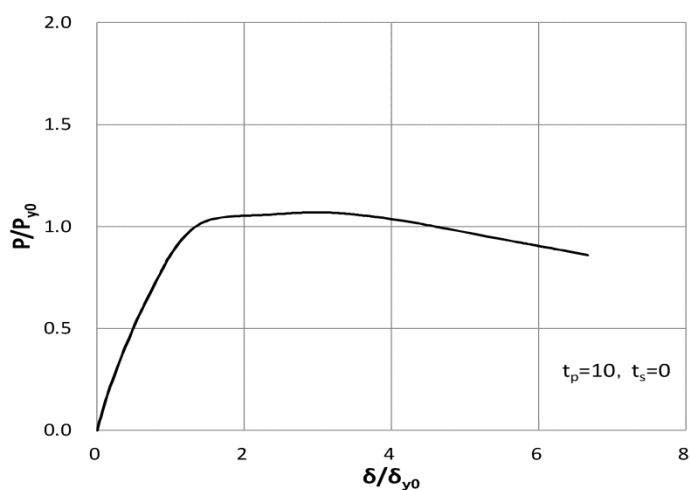
## 5.3 単調載荷曲げ挙動解析

### 5.3.1 解析用腐食量を使用した場合の解析結果

解析には汎用有限要素解析プログラム ABAQUS ver6.9<sup>5.11)</sup>を使用した。曲げ挙動解析は、中杭上端の載荷点に強制変位を陸側より海側方向に単調増加的に与えて、載荷点の変位と水平力  $P$  との関係を求めた。図 5.13 に解析結果の荷重－変位曲線を、解析結果を表 5.3 に示す。図 5.13 における水平力および載荷点の変位は、無欠損鋼管の解析において最初に降伏が生じる時の水平力 ( $P_{y0}=617\text{kN}$ ) および変位 ( $\delta_{y0}=225\text{mm}$ ) で無次元化されている。

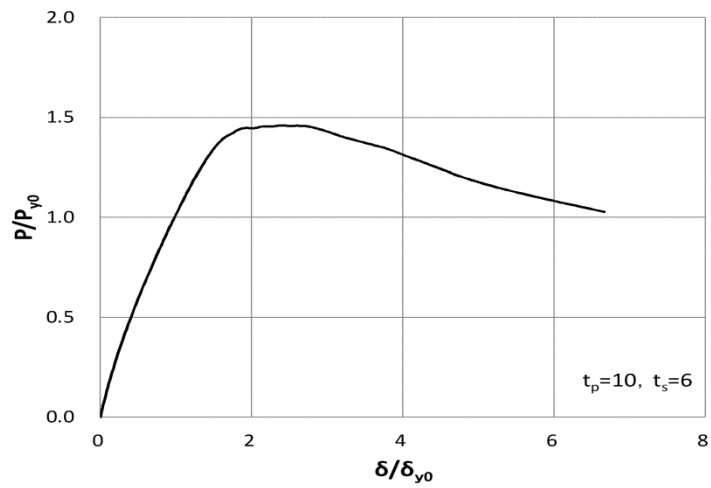


(a) Case No.1 (無欠損鋼管)

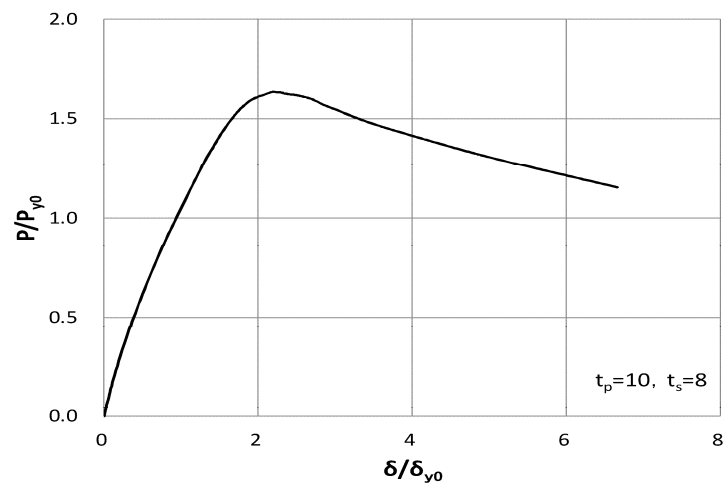


(b) Case No.2 (減肉鋼管)

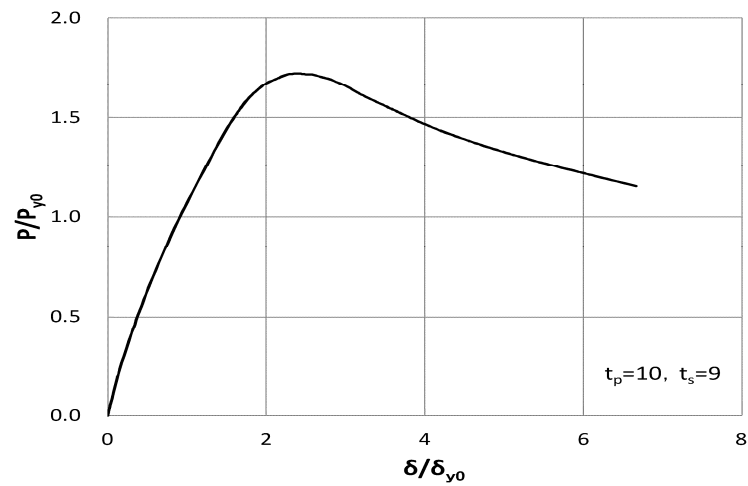
図 5.13 荷重－変位曲線 (その 1)



(c) Case No.3 (補修鋼管：添接板厚=6mm)



(d) Case No.4 (補修鋼管：添接板厚=8mm)



(e) Case No.5 (補修鋼管：添接板厚=9mm)

図 5.13 荷重－変位曲線 (その 2)

表 5.3 曲げ解析結果

ケース	添接板厚 (mm)	最大水平力		エネルギー面積	
		P(kN)	$P/P_{\max 0}$	A	$A/A_0$
Case No.1	無欠損鋼管	$P_{\max 0}=1044$	1.000	$A_0=4.03$	1.000
Case No.2	減肉鋼管	659	0.631	2.44	0.605
Case No.3	6	900	0.862	4.67	1.159
Case No.4	8	1007	0.965	4.20	1.042
Case No.5	9	1063	1.018	4.48	1.112

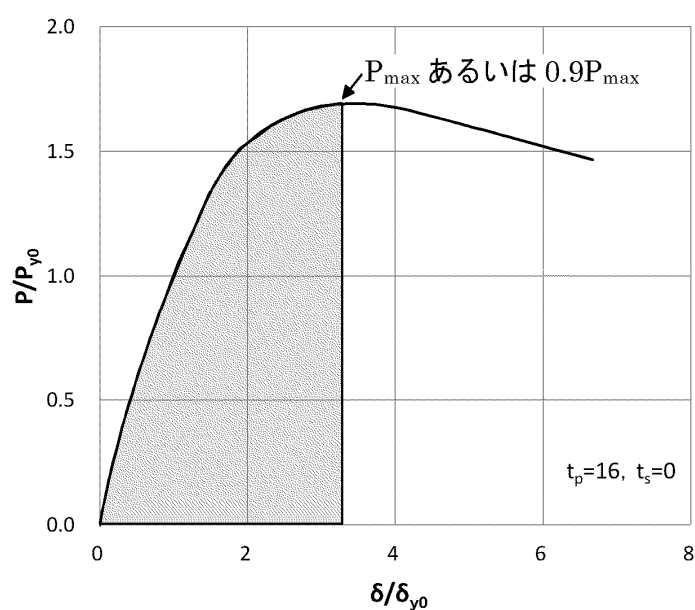


図 5.14 エネルギー面積算出例

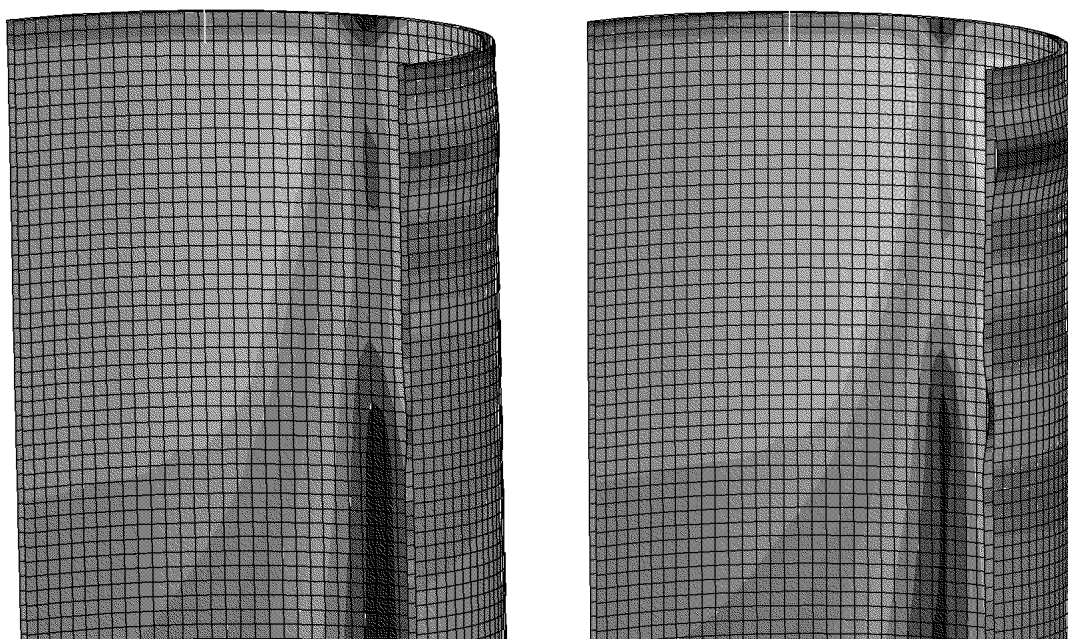
表 5.3 において、 $P_{\max 0}$ は無欠損鋼管の場合の最大水平力であり、 $A_0$ は図 5.14 に示す無欠損鋼管の場合のエネルギー面積である。エネルギー面積  $A$  は、無欠損鋼管および減肉鋼管の場合は最大水平力までの図 5.14 に示す面積であり、鋼板添接補修鋼管の場合は補修であることを考慮して最大水平力の 90%まで許容している。

鋼板添接補修鋼管が無欠損鋼管の耐荷性能および変形性能を確保するためには、最大水平力が無欠損鋼管の最大水平力 ( $P_{\max 0}$ ) 以上確保することができ、エネルギー面積比を 1 以上確保する必要がある。表 5.3 の解析結果より、最大腐食厚 6mm の場合の添接板の必要板厚は 9mm であることがわかる。表 5.3 の Case No.3 の添接板厚が 6mm の場合でもエネルギー面積比は 1 以上となっているが、これは添接板の板厚が薄いため、座屈により耐荷性能が低下し、モーメント再配分が生じて地中部のモーメントが増加する結果である

と考えられる．添接板厚が 6mm の場合，地中部の杭は荷重の増加に伴い降伏しており， $\delta/\delta_{y0}=4.4$  となると地中部の杭は全塑性モーメントに達する．

腐食量が 6mm の鋼管に対する必要添接板厚は 7mm であるが，無欠損鋼管と同等の耐力およびエネルギー吸収性能を確保するためには，添接板として 9mm の板厚が必要であることがわかった．これは，杭頭部における減肉鋼管および添接板の局部座屈により，耐力およびエネルギー吸収性能が低下する結果であり，補修設計を行う際には鋼管補修部の局部座屈を考慮した設計が必要である．

鋼板添接補修鋼管の添接板厚=9mm のケースについて，最大荷重時における海側杭，中杭，および陸側杭の座屈状況図を図 5.15 に示す．図 5.15 より，海側杭および中杭は減肉鋼管および添接板で座屈変形が発生しているが，陸側杭では添接板のみに座屈変形が発生していることがわかる．この場合の杭頭モーメントは陸側で大きく，軸力については海側杭および中杭で圧縮となり，陸側杭で引張となっており，軸力の影響により座屈形状が変わっているものと考えられる．

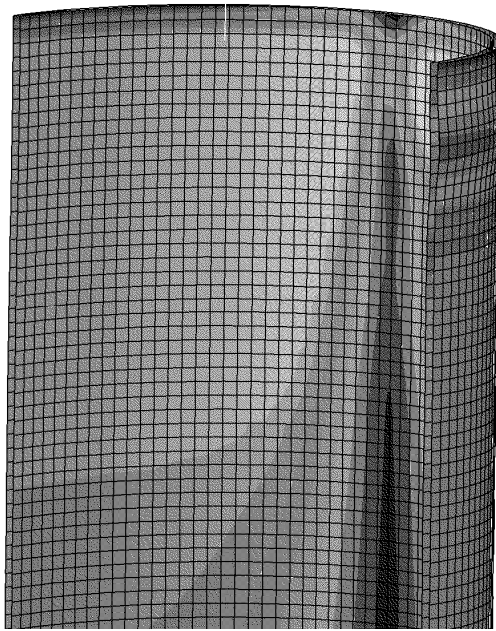


(a) 海側杭

(b) 中杭

図 5.15 補修鋼管（添接板厚=9mm）の座屈状況（その 1）



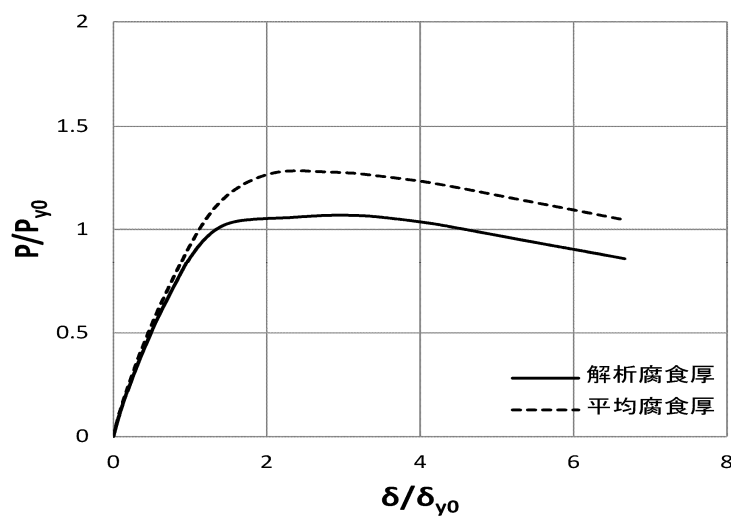


(c) 陸側杭

図 5.15 補修鋼管（添接板厚=9mm）の座屈状況（その 2）

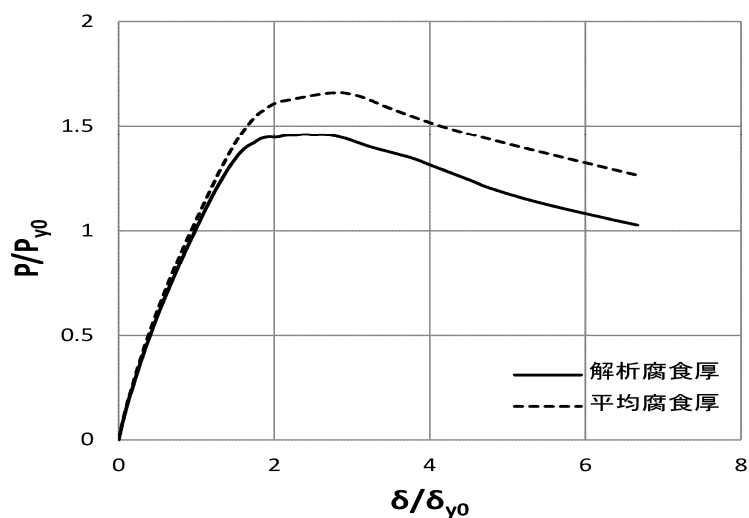
### 5.3.2 平均腐食量を使用した場合の比較

減肉鋼管のケースと鋼板添接補修鋼管で添接板厚が 6mm のケースについて、平均腐食量を使用した場合の単調載荷曲げ挙動解析結果の荷重－変位曲線を図 5.16 に示す。図 5.16 より、荷重－変位曲線はほぼ相似形状となっている。杭頭部における解析用腐食量に対する平均腐食量の減肉部鋼管厚比は 1.20 であり、同様に最大荷重比を求めると、減肉鋼管に対しては 1.20、鋼板添接補修鋼管に対しては 1.14 となり、杭頭部の減肉部鋼管厚の差が出た結果であることがわかる。



(a) 減肉鋼管のケース

図 5.16 平均腐食量を使用した場合の荷重－変位曲線（その 1）

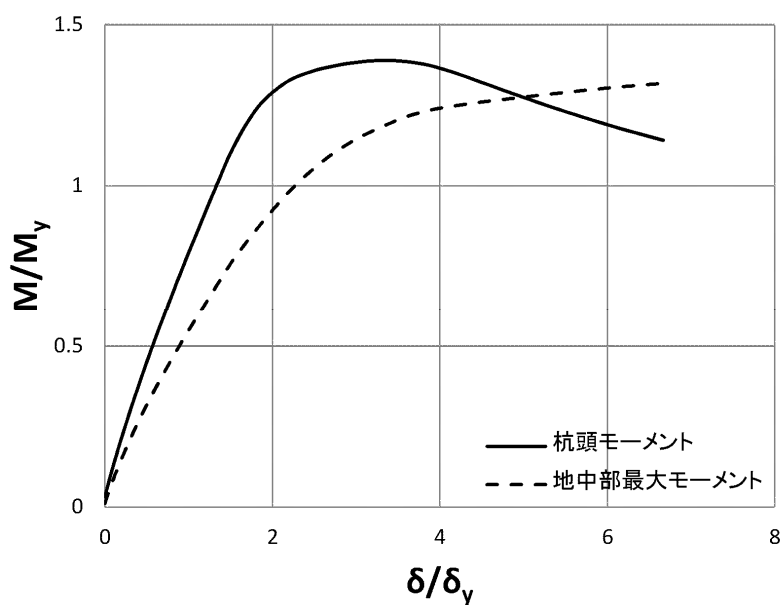


(b) 補修鋼管のケース（添接板厚=6mm）

図 5.16 平均腐食量を使用した場合の荷重－変位曲線（その 2）

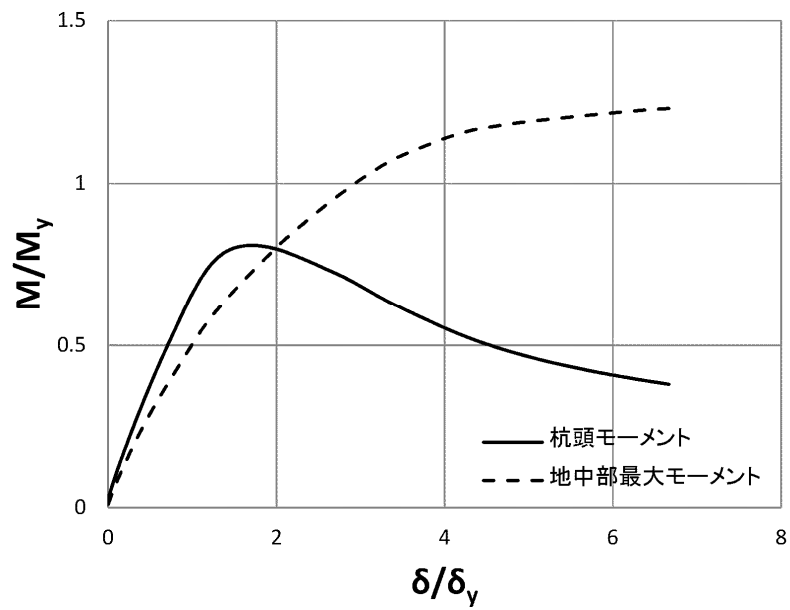
### 5.3.3 杭頭モーメントおよび地中部モーメント

杭頭モーメントが座屈により減少して地中部モーメントが増加する状況を把握するため、杭頭部変位の増加による海側鋼管杭の杭頭モーメントおよび地中部最大モーメントの変化状況を図 5.17 に示す。この図で、 $M_y$ は無欠損鋼管の降伏モーメントである。

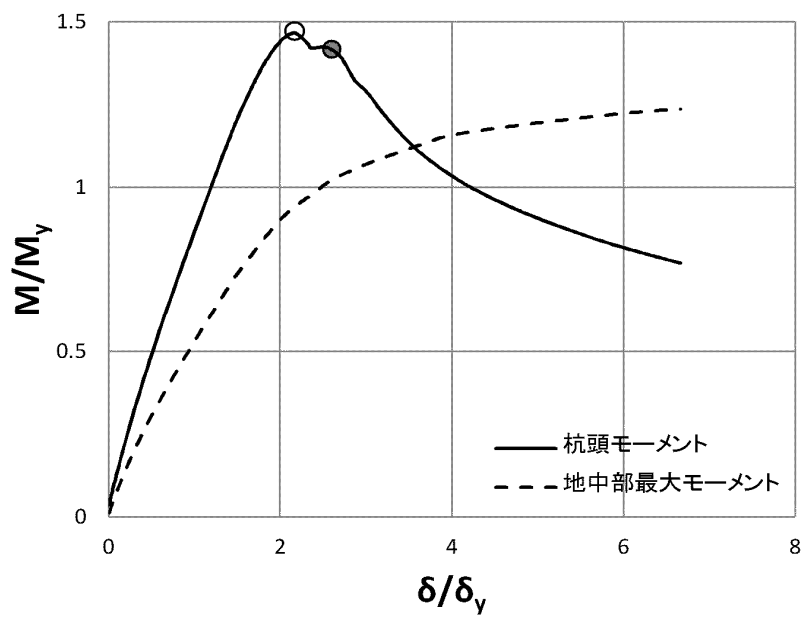


(a) 無欠損鋼管

図 5.17 杭頭および地中部最大モーメントと変位との関係（その 1）



(b) 減肉鋼管



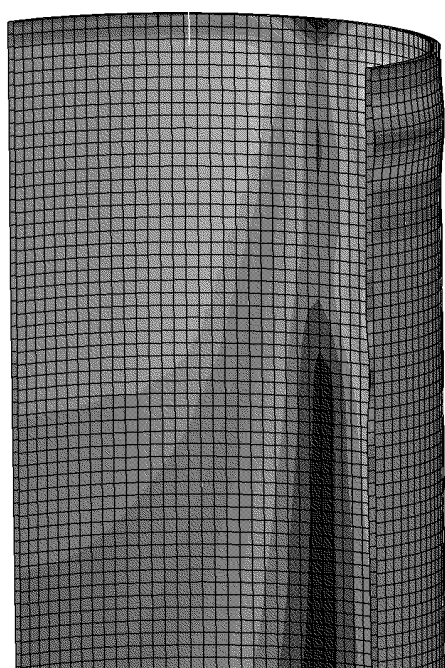
(c) 補修鋼管（添接板厚=8mm）

図 5.17 杭頭および地中部最大モーメントと変位との関係（その 2）

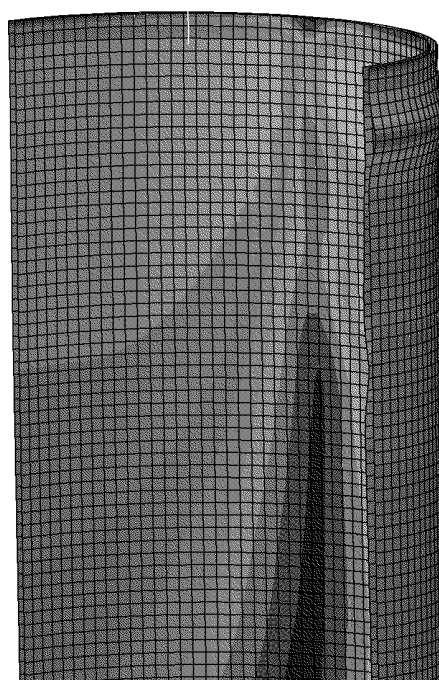
図 5.17 より, 無欠損鋼管の場合は杭頭部が座屈しても杭頭モーメントの急激な減少はないが, 減肉鋼管および鋼板添接補修鋼管の場合には座屈後の杭頭モーメントの減少が激しく, 特に減肉鋼管で激しいことがわかる. 図 5.17(c)の○点は添接板および減肉鋼管が座屈

し始めた点であり，●点は座屈変形が大きくなり始めた点である．これらの点における座屈状況図を図 5.18 に示す．この図で，減肉鋼管の杭頭部の他，途中で座屈が生じており，この部分は板厚が変化する部分であり，一様減肉鋼管と異なる点である．

図 5.17(a)と図 5.17(b)を比較すると，変形が進行した場合の地中部最大モーメントには大きな差が見られないことがわかる．これは，変形が小さい場合には減肉鋼管の地中部モーメントは小さいものの，変形が進行すると杭頭部が座屈により塑性ヒンジ化してモーメントが減少し，モーメント再配分により地中部のモーメントが増加していくためであると考えられる．



(a) 図 5.16(c)の○点



(b) 図 5.16(c)の●点

図 5.18 座屈状況図

#### 5.3.4 単一鋼管モデルと栈橋モデルの結果比較

第 3 章では繰返し曲げ載荷の解析を，第 4 章では軸力を受ける繰返し曲げ載荷の解析を単一鋼管モデル（単純梁モデルおよび片持梁モデル）で行ってきたが，本章では栈橋モデルにて単調曲げ載荷の解析を行った．これらの解析は境界条件および載荷パターンなどに違いがあるため一概に比較をすることはできないが，鋼板添接補修鋼管の弾塑性挙動の傾向を見ることは可能であると考えられ以下に考察を述べる．

片持梁モデルおよび栈橋モデルの解析において、減肉部および添接板の局部座屈が発生して耐荷力の低下およびエネルギー吸収性能の低下が生じており、港湾鋼構造物防食・補修マニュアル<sup>5.1)</sup>に基づいて設計された添接板必要板厚より厚い板厚が必要となることは片持梁モデルおよび栈橋モデルにおいて同じ結果となっている。

栈橋モデルの単調載荷曲げ解析において作用している軸力は最大で降伏軸力の約 13% であり、この場合の添接板の必要板厚は 9mm となり腐食量に対する比は (必要添接板厚/腐食厚) =  $9\text{mm}/6\text{mm}=1.50$  である。繰返し曲げという条件の違いはあるが、第 4 章における  $\phi 800$  の鋼管の軸力比が 10% の場合と比較すると、(必要添接板厚/腐食厚) =  $14\text{mm}/8\text{mm}=1.75$  となり、片持梁モデルより栈橋モデルの方が腐食量に対する必要添接板厚の比が小さくなっている。これは、栈橋モデルの場合、杭頭部の塑性化が進行して耐力が低下するにつれて他の杭および地中部の杭にモーメントが再配分され、片持梁モデルに比べて耐荷力およびエネルギー吸収性能の低下が著しくないためであると考えられる。

## 5.4 まとめ

本章では、第 2 章、第 3 章および第 4 章で行った鋼板添接補修された単一減肉鋼管モデルに対して行った繰返し曲げ挙動解析の結果に基づき、実際の栈橋モデルを作成し、単調増加曲げ弾塑性有限変位解析を行った。

解析を行った実際の栈橋モデルとしては、栈橋構造の上部コンクリート部を弾性梁要素で、解析対象となる杭頭部をシェル要素で、海中部および地中部の鋼管杭を弾塑性パイプ要素でモデルを作成した。また、地盤の横方向抵抗はバネ要素でモデル化し、横方向抵抗の最大値は地盤の受働土圧として解析を行った。また、減肉部分は無防食鋼管による栈橋構造が完成後 20 年経過したものと想定し、飛沫帯、干満帯、海中部および地中部の腐食鋼管を考慮した腐食モデルを作成して解析を行った。本章の結果をまとめると下記のようなになる。

- (1) 鋼板添接補修された腐食鋼管が無欠損鋼管と同等の耐荷性能および耐震性能を確保するためには、鋼板添接補修鋼管の耐荷力を無欠損鋼管の耐荷力以上とし、また、鋼板添接補修鋼管のエネルギー面積を無欠損鋼管のエネルギー面積以上とする必要がある。今回のモデルにおいては、腐食厚の 1.5 倍の添接板厚が必要であることを明らかにした。
- (2) 栈橋モデルで得られた結果と同じ鋼管径で軸力比がほぼ等しい片持梁モデルの繰返し曲げ解析結果と比較すると、無欠損鋼管と同等の耐荷力およびエネルギー吸収性能を鋼板添接補修鋼管において確保するための腐食厚に対する必要添接板厚

の比は、片持梁モデルより栈橋モデルで得られた値の方が小さいことを明らかにした。

## ＜参考文献＞

- 5.1) 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.
- 5.2) 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.
- 5.3) 鹿島建設土木設計本部：新・土木設計の要点⑥ー海洋・港湾構造物，鹿島出版会，2003.
- 5.4) 財団法人 沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集（平成 19 年改訂版），2007.
- 5.5) 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.
- 5.6) 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.
- 5.7) 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厚に関する考察，構造工学論文集，Vol.52A，pp.679-687，2006.
- 5.8) 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.
- 5.9) 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 A，Vol.64，No.1，pp.27-37，2008.
- 5.10) 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，1997.
- 5.11) Dassault Systems：ABAQUS/Standard user's manual，ver6.9，2010.

## 第 6 章 結 言

### 6.1 各章のまとめ

港湾鋼構造物の栈橋鋼管が腐食した場合の補修方法の一つである鋼板添接補修工法により補修された腐食劣化鋼管の弾塑性挙動を明らかにするため、鋼板添接補修鋼管の曲げ載荷実験結果と解析結果の比較、鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ挙動解析、軸力を受ける鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ挙動解析、および栈橋モデルによる単調曲げ挙動解析を行った。以下に各章のまとめを示す。

第 2 章では、鋼板添接補修鋼管の曲げ単調載荷実験の延長上で行われた繰返し曲げ実験と解析結果との比較を行った。実験は一般構造用炭素鋼鋼管の STK400 (外径=216.3mm, 板厚=12.7mm) を使用した 4 点曲げ実験である。実験は、腐食前である無欠損鋼管、腐食後を想定したスパン中央部を一様に切削した減肉鋼管、および減肉鋼管に添接板を溶接した鋼板添接補修鋼管の 3 ケースである。解析では、1/4 有限要素モデルを作成して解析精度について検討を行った。鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ載荷弾塑性有限変位解析を行い載荷実験結果と比較した結果、実験結果と解析結果は必ずしも一致しているとは言えないが、1) 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、2) 前面すみ肉溶接の破断は鋼板添接補修鋼管の耐荷力評価に大きな影響を与えないこと、および 3) 解析モデルの解析精度は十分であり添接板と鋼管との接触状態も十分に表されていることを考慮すると、溶接の破断が起きないとした解析モデルによる鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ耐荷力性能評価はほぼ可能であると考えられる。

今回の解析モデルの精度は十分であるが、実験と解析との境界条件の差が見られ、結果が必ずしも一致していない。実際の栈橋鋼管における荷重集中点は断面変形が生じにくい構造となっており、解析モデルとしては支点および載荷点で断面変形が生じないとした境界条件の設定が妥当であると考えられる。

第 3 章では、鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ耐荷力性能を明らかにするため、有限要素法による弾塑性有限変位解析を行った。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必要な添接板厚について明らかにするとともに、減肉鋼管を添接板で補修する場合において、鋼管と添接板の降伏応力に関する補修方法への影響についても明らかにした。

第 4 章では、軸力作用下での鋼板添接補修鋼管の繰返し曲げ挙動を明らかにするため、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 (SKK490 : 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。無欠損

鋼管の変形性能を確保するための必要添接板厚に関する軸力の影響について明らかにした。また、無欠損鋼管および鋼板添接補修鋼管の最大荷重後の荷重低下に関する軸力比の影響について明らかにした。

第5章では、実際の栈橋モデルを作成し単調曲げ弾塑性有限変位解析を行った。解析を行った実際の栈橋モデルとしては、栈橋構造の上部コンクリート部を弾性梁要素で、解析対象となる杭頭部をシェル要素で、海中部および地中部の鋼管杭を弾塑性パイプ要素でモデル化した。解析結果より、補修設計により設計される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。また、片持モデルと栈橋モデルについて解析結果の比較を行い、挙動の違いについて明らかにした。

## 6.2 設計への考察

実験結果との比較検討により妥当性が確認された弾塑性有限変位の有限要素モデルを使用して、腐食厚を変化させた種々の径厚比パラメータの鋼管に対して繰返し曲げ解析を行い、鋼板添接補修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。鋼管径  $\phi 216.3$  で腐食厚 6mm の鋼板添接補修鋼管の場合、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約 93%に低下しているが、繰返し曲げ変形性能は無欠損鋼管の約 35%に低下しており、変形性能の低下が著しいことを明らかにした。その結果、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の 1.5 倍の添接板厚が必要であることを示した。また、腐食鋼管を添接板で補修する場合、鋼管と同程度の降伏応力を有する添接板による補修が効果的であることを明らかにした。

港湾鋼構造物に使用される鋼管杭は曲げモーメントの他に軸力を受けており、軸力の影響を考慮するため片持梁モデルを作成して解析を行った。軸力を受ける無欠損鋼管の繰返し曲げ時のエネルギー吸収能を確保するためには、曲げのみが作用する場合と同様、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示した。また、鋼板添接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傾向があることを明らかにした。さらに、鋼板添接補修鋼管の軸力比が増加するにつれて、最大水平力後の荷重低下勾配が大きくなることを明らかにした。

実際の腐食厚分布を考慮した栈橋モデルを作成して、地震時慣性力による鋼板添接補修鋼管に与える影響について検討を行った。今回の栈橋モデルにおいて、鋼板添接補修鋼管の耐荷力を無欠損鋼管の耐荷力以上とし、変形性能となる補修鋼管のエネルギー面積を無欠損鋼管のエネルギー面積以上とするためには、鋼板添接補修鋼管の添接板厚としては鋼



管の腐食減肉厚の 1.5 倍必要であることを明らかにした。また、片持梁モデルと栈橋モデルの比較を行った結果、無欠損鋼管の耐荷力およびエネルギー吸収性能を確保するための鋼板添接補修鋼管の腐食厚に対する必要添接板厚の比は、片持梁モデルより栈橋モデルの方が小さくなることを明らかにした。

### 6.3 今後の課題

本研究では、港湾構造物の栈橋鋼管が腐食した場合の補修方法としてよく使用される鋼板添接補修された鋼管の曲げ弾塑性挙動を明らかにし、補修に必要となる添接板の板厚に関する傾向を明らかにすることができた。今後、補修設計を行うにあたり必要な課題としては以下のことが考えられる。

- (1) 実際の設計においては、与えられた条件に対する補修のために必要な添接板厚に関する設計提案式を定める必要がある。
- (2) 栈橋の腐食劣化鋼管杭の補修サイクルを考慮したライフサイクルコストを算定し、栈橋の最適の維持管理シナリオの確立が必要である。

## 謝 辞

著者がこの研究を始めたのは、名古屋大学大学院工学研究科 伊藤義人教授のお勧めによるものであり、現在に至るまで同教授から受けたご懇篤なご指導，ご助言に深く感謝いたします。

名古屋大学大学院 中村光教授，および名古屋工業大学大学院 小畑誠教授からは研究に関して有益なご指導をいただきました。

本研究全体にわたり，特に有限要素解析においては，名古屋大学大学院 北根安雄准教授から常に丁寧なご指導およびご助言を賜り，心より感謝いたします。

また，熊本大学大学院 葛西昭准教授からは弾塑性力学に関するご指導を，名古屋大学大学院 廣畑幹人助教からは研究全般に関するご助言をいただき，心より感謝いたします。

名古屋大学大学院博士後期課程への入学に際して，関西大学名誉教授 三上市蔵先生からご助言をいただき，入学後の研究においても多くのご指導を賜り，心より感謝いたします。

関西大学大学院 堂垣正博教授からは名古屋大学大学院博士後期課程への入学に際して，貴重なご助言を賜り，心より感謝いたします。

名古屋大学大学院博士後期課程への入学を認めていただいた東洋技研コンサルタント株式会社 代表取締役 重松哲郎社長，清水輝比古顧問に深く感謝するとともに，博士後期課程在学のため，業務においてご迷惑をおかけした東洋技研コンサルタント株式会社 名古屋支社の社員の皆様に深く感謝いたします。

著者の博士後期課程在学中，名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻の構造・材料工学講座の学生の皆様から支援をいただきました。ここに厚くお礼を申し上げます。

最後に，いつも陰ながら著者を支えてくれた妻をはじめ，家族に心より感謝します。