

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 31 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760422

研究課題名(和文) 腐食損傷した鋼管杭の添接板補修による性能回復効果の定量的把握手法の確立

研究課題名(英文) Evaluation method of post-repair performance of corrosion-damaged steel pipe piles by patch plate repair

研究代表者

北根 安雄 (Kitane, Yasuo)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10444415

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、鋼板添接補修およびCFRP接着補修による腐食した鋼管杭の性能回復に与える腐食粗さの影響を明らかにするため、腐食粗さを有する減肉鋼管杭と補修後の鋼管杭について有限要素法により検討した。減肉鋼管の静的曲げ耐荷力は、平均板厚が同じでも腐食粗さによりばらつきが生じるが、補修後耐荷力のばらつきは、補修前に比較して小さくなる。また、CFRP接着補修において、断面欠損部に表面粗さが存在する場合、粗さの振幅が大きくなるにつれ鋼板最小板厚部分の応力が大きくなり、欠損部の最小板厚を基準として補修に必要なCFRP板の板厚を設計しても、粗さのない場合の応力まで回復できないことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：This study investigates the effect of surface roughness on repair performance of steel patch plate repair and CFRP bonding repair for corroded steel pipe piles by numerical analysis. Load carrying capacity of corrosion-damaged pipe piles varies depending on surface roughness characteristics even though the average thickness is the same. However, the variation of load carrying capacity due to surface roughness is less after those piles are repaired. As for CFRP bonding repair, surface roughness at the thickness-reduced portion will lead to increased stress, resulting in a larger required thickness of CFRP than the case without the surface roughness.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：鋼管杭 腐食損傷 性能回復 補修 CFRP 接着

1. 研究開始当初の背景

現在、建設後数十年を経過した海岸・海洋鋼構造物が日本全国に数多く存在し、更新や補修・補強が必要となっている。港湾岸壁に限れば、20年後には建設後50年以上経過した港湾岸壁が全体の50%以上となり、維持補修費・更新費が港湾事業費全体に占める割合が大幅に増加すると予想されている。このような状況の中、腐食損傷した鋼構造物を合理的に補修し延命化を図ることが喫緊の課題である。

本研究は、海洋環境下の鋼構造物の中でも重要構造物に多用される鋼管杭に着目し、腐食損傷した鋼管杭の補修方法として、添接板補修を取り上げる。海洋環境下において腐食損傷した鋼管杭の補修方法としては、水中溶接による鋼板添接補修や鉄筋コンクリート被覆などが現在頻繁に行われているが、特に湿式水中溶接による鋼板添接補修は、補修部をドライな環境にする必要がなく、最も経済的な補修方法の一つである。

腐食した鋼管杭の補修設計は、現在、「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル」に示されているように、腐食による平均減肉厚を考慮したのち、設計荷重に耐えるように添接板厚を決定しているが、実際にどの程度性能が回復するのかについては、これまでに詳細な検討がない。研究代表者は、湿式水中溶接による鋼板添接補修工法で補修された鋼管杭や鋼矢板の性能回復を正確に評価することを最終目標として、すでにこれまでいくつかの研究成果を挙げているが、一様に板厚が減肉した鋼管の場合についてのみ設計手法を提案しており、実際に腐食損傷した鋼管杭の補修に関しては、これまでに提案した補修設計手法の適用性が明らかではない現状がある。

また、近年、添接板補修の一つとして、炭素繊維強化樹脂 (CFRP) シートの接着補修が新たな補修工法として検討され始めている。CFRP 接着補修は、CFRP の軽量性と接着という施工の容易さから、補修方法が技術的に確立されれば、そのインパクトは大きい。研究代表者はこれまでに、CFRP シートの水中における接着補修の可能性について検討してきており、一様に減肉した鋼板に対するCFRPの必要板厚および接着長を提案してきたが、実際に腐食した凹凸をもつ鋼管杭の補修に関しては、その効果を確認できていない。

2. 研究の目的

本研究では、腐食損傷により板厚が減少し、板厚が一樣でない鋼管に鋼板添接補修またはCFRP接着補修を施した場合の性能回復効果を検討し、腐食凹凸が性能回復効果に与える影響を定量的に評価することを目的とする。

3. 研究の方法

前述の研究目的を達成するため、本研究では以下のタスクを行う。まず、海洋環境下の

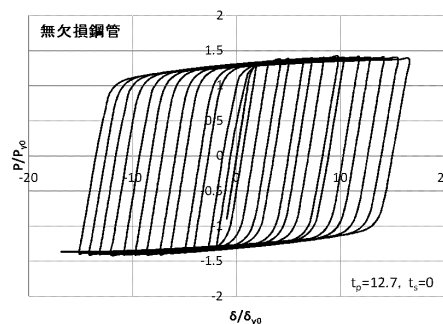
腐食特性を模擬できる腐食表面生成モデルを作成する。次に作成された腐食表面モデルをFEM解析モデルに反映させ、腐食量や鋼管サイズなどをパラメトリックに変化させて、鋼板溶接補修鋼管の曲げ耐荷力解析を行い、性能回復効果と腐食量や表面粗さとの関係を明らかにする。また、鋼板溶接補修鋼管の繰返し曲げ挙動とエネルギー吸収に必要な板厚との関係を明らかにする。次に、CFRP接着補修を対象として、表面粗さとCFRP接着補修の補修効果の関係を解析的に明らかにする。表面粗さのパラメータとして、粗さの振幅と波長を考慮する。また、表面粗さが断面欠損部に存在する場合と定着部である鋼板一般部に存在する場合で、粗さの影響がどのように変化するのか検討する。

4. 研究成果

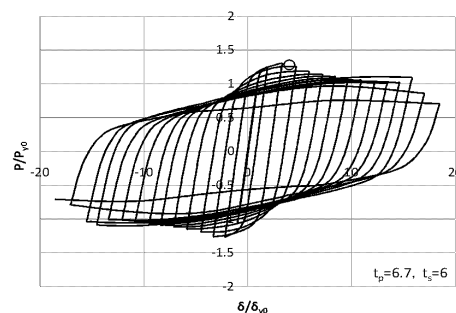
(1) 繰返し曲げ荷重を受ける鋼板添接補修された鋼管杭のエネルギー吸収性能

鋼板添接補修工法によって補修された鋼管杭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い、補修後のエネルギー吸収性能の回復について検討した。

腐食減肉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に比べて大幅に低下することを明らかにした。これは、添接板によって断面欠損を補っても、2重鋼管となっており、最大荷重後の耐力低下が急速に進むことが原因である。したがって、減肉鋼管と添接板の局部座屈を考慮して無欠



(a) 無欠損鋼管



(b) 6mm 減肉, 6mm 添接板

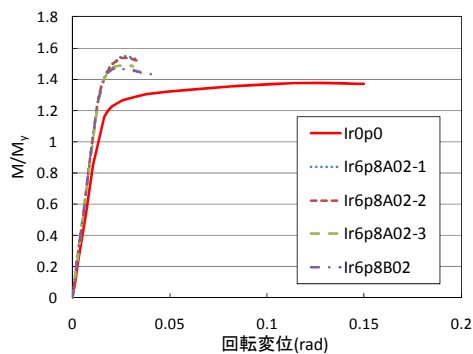
図1 無欠損鋼管と補修鋼管の繰返し曲げ挙動の比較の一例

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が明らかとなった。

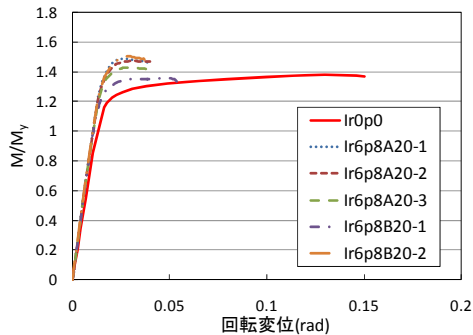
図1に外径=216.3mm、板厚=12.7mmの鋼管杭を対象とし、無欠損鋼管と150mm長の区間6mm減肉させた鋼管を6mm厚添接板で補修した補修鋼管の繰返し曲げ挙動の比較を示す。

(2) 腐食表面粗さが鋼板添接補修の性能回復効果に与える影響

腐食粗さが鋼板添接補修後の耐荷性能回復に与える影響を検討するため、腐食粗さを有する減肉鋼管杭と鋼板添接補修後の鋼管杭について静的曲げ解析を行った。さまざまな粗さパラメータを持つ腐食表面を2つの異



(a) 板厚分散値 0.16~0.2mm² の場合



(b) 板厚分散値 2.0mm² の場合

図2 無欠損鋼管と補修鋼管の曲げモーメント-回転変位関係

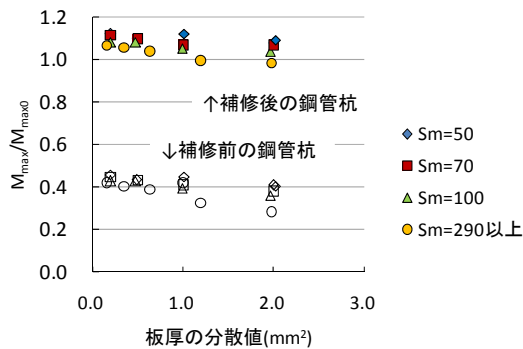


図3 板厚の分散値と平均波長 S_m による補修鋼管杭の最大曲げモーメントのばらつき

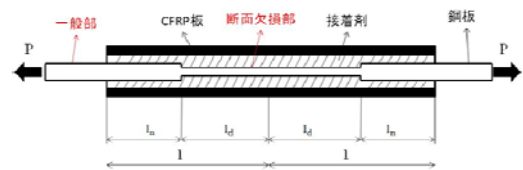
なる腐食表面形状再現モデルにより作成した。外径 650mm と 850mm の 2 種類の鋼管杭を対象とし、板厚はともに 12mm で、鋼種は SKK400 とした。

図2に外径 650mm の鋼管杭が、腐食により平均板厚 6mm に減肉した際に、6mm 厚の添接板で補修した場合の静的曲げ解析結果を示す。実線が無欠損鋼管で、その他の線が異なる腐食粗さを持つ補修鋼管である。また、図3には、板厚の分散値と粗さの平均波長 S_m による補修鋼管杭の最大曲げモーメントのばらつきを示す。最大曲げモーメントは、無欠損鋼管の最大曲げモーメントで無次元化している。

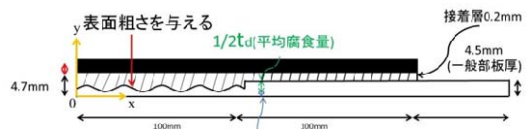
これらの結果より、減肉鋼管の静的曲げ耐荷力は、腐食粗さによりばらつきが生じ、静的曲げ耐荷力の現象は板厚の分散値が大きいほど大きく、粗さ曲線要素の平均波長が長いほど大きいという関係が明らかとなった。ただし、補修後耐荷力の腐食粗さによるばらつきは、補修前に比較して大幅に減少することが明らかとなった。

(3) 腐食表面粗さが CFRP 接着補修の性能回復効果に与える影響

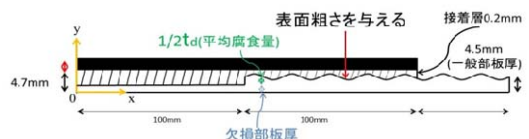
本研究では、鋼板の接着部分に表面粗さを与えたモデルを作成し、有限要素解析により CFRP 接着補修された鋼板をモデル化し、CFRP 接着補修の補修効果に表面粗さが与える影響を解析的に検討した。図4(a)に示すような断面欠損を有する鋼板(板厚 9mm)に両面から CFRP 板を接着し断面欠損を補修する場合を解析対象とした。図4(b)と(c)に示すように、断面欠損部に表面粗さを与える場合と、接着部の鋼板一般部に表面粗さを与える場合を検討した。断面欠損部の減肉量は、0.6mm



(a) 解析対象の CFRP 接着鋼板



(b) 断面欠損部に表面粗さを持つ 1/4 モデル



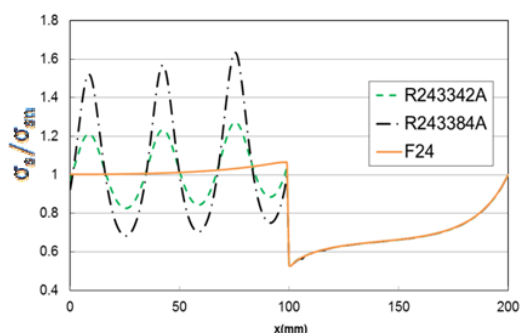
(c) 鋼板一般部に表面粗さを持つ 1/4 モデル

図4 解析モデル

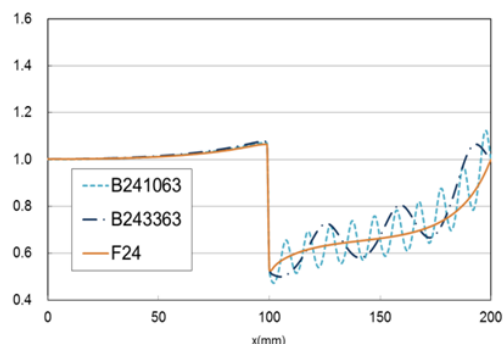
から最大 2.4mm とした。表面粗さは、正弦波を仮定し、振幅を 0.21mm から 0.84mm、波長を 10mm から 50mm の範囲とした。

図 5(a) は欠損部減肉量が 2.4mm の場合の粗さを持たない場合（実線）と粗さの波長が 33mm、振幅が 0.42mm と 0.84mm の場合の断面平均鋼板応力 σ_s の分布を示し、縦軸は回復目標である補強されていない健全部の鋼板 ($x > 200\text{mm}$) の応力 σ_{sn} で規準化されている。また、図 5(b) は、接着部分の一般部に波長が 10mm または 33mm で、振幅が 0.63mm の粗さが存在する場合の断面平均鋼板応力を示している。

断面欠損部に表面粗さが存在する場合には、粗さの振幅が大きくなるにつれ鋼板最小板厚部分の応力が大きくなり、欠損部の最小板厚を基準として補修に必要な CFRP 板の板厚を設計しても、粗さのない場合の応力まで回復できないことがわかった。さらに、一般部に表面粗さが存在する場合では、鋼板一般部の応力は粗さに応じて上下するが、断面欠損部の応力は粗さのない場合と大きな変化がなく、CFRP による接着補修性能への影響は大きくないことが明らかとなった。また、今回検討した粗さの範囲では、接着面に粗さが存在しても、補修に必要な CFRP 板の必要長さほとんど変化しなかった。



(a) 断面欠損部に表面粗さを持つ場合



(b) 鋼板一般部に表面粗さを持つ場合

図 5 CFRP 接着鋼板解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① 古西和夫, 北根安雄, 渡邊尚彦, 伊藤義人: 添接板補修された断面欠損鋼管の繰

返し曲げ挙動に関する研究, 鋼構造論文集, Vol. 18, No. 72, 2011, pp. 1-16.

- ② 古西和夫, 北根安雄, 伊藤義人: 鋼板添接補修された鋼管栈橋の耐荷力と変形性能に関する研究, 材料, Vol. 62, No. 5, 2013, pp. 319-326.

〔学会発表〕(計 4 件)

- ① Kitane, Y., Chen, X., Itoh, Y., and Ishikawa, T.: "Tensile and Compressive Test on Thickness-Reduced Steel Plate Repaired by CFRP Strand Sheet and Underwater Epoxy with Bond Defects," Proc. The Third Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, February 2-4, 2012, Sapporo, Japan, Paper T1B06 (on CD-ROM).
- ② 北根安雄, Xiao Chen, 鞍馬敦士, 伊藤義人: 水中 FRP 接着補修による断面欠損鋼板の性能回復効果に与える接着不良の影響に関する実験的研究, 平成 23 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 土木学会中部支部, 信州大学, 2012, pp. 49-50.
- ③ 西島悠太, 北根安雄, 伊藤義人: パルス渦電流を用いた非破壊検査による港湾鋼構造物の板厚測定に関する研究, 平成 23 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 土木学会中部支部, 信州大学, 2012, pp. 55-56.
- ④ 吉村浩寿, 北根安雄, 伊藤義人: 腐食鋼板への CFRP 接着補修における表面粗さが補修効果に与える影響, 第 68 回土木学会次学術講演会講演概要集, 土木学会, 日本大学津田沼キャンパス, 2013, pp. 693-694.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北根 安雄 (KITANE, Yasuo)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 10444415

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし