

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成23年 4月18日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760345

研究課題名（和文） 断面損傷を有する鋼製部材のねじりを考慮した2方向動的挙動と耐震照査に関する研究

研究課題名（英文） Horizontal 2 dimensional behaviors and seismic performance of steel members with corrosion damages

研究代表者

永田 和寿 (NAGATA KAZUTOSHI)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40301238

研究成果の概要（和文）：本研究では矩形断面を有する鋼製橋脚を対象とし、腐食損傷を有する鋼製橋脚の水平2方向挙動を実験的および解析的に明らかにすることを研究目的とした。具体的には、種々の荷重下における鋼構造物の力学的挙動を評価するために、ねじりと静的水平2方向繰り返し荷重を同時に作用させた厳しい載荷条件下での鋼製橋脚の力学的挙動に対して、腐食損傷の有無が与える影響について検討を行った。また、実験結果の対比および実験ケースを補完するため、局部座屈を精度良く表現できるようにシェル要素を用いた汎用有限要素解析コードABAQUSによる弾塑性有限変位解析を実施した。これらの実験的・解析的検討により、断面損傷を有する鋼製部材のねじりを考慮した2方向動的挙動と耐震性能を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Many steel structures have been faced the problem of deterioration in Japan. Severe damages will be caused in such deteriorated structures subjected to huge earthquake. It is necessary to secure safety of such structures to earthquakes. However, 2 dimensional horizontal behavior of seismic response of structures with damages by corrosion has been hardly researched. Therefore, in this study experiments intended for rectangular steel bridge piers with damages by corrosion in the corners were conducted in order to evaluate two-dimensional behavior. It was found that local buckling occurred at not only the stiffened plates but also the corners in the piers which have corrosion at the corners. Therefore, compared with a pier without corrosion, deterioration of strength of the pier with corrossions was remarkable. As a conclusion, suitable maintenance is necessary so that structures may not receive severe damage in huge earthquake.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：耐震構造

1. 研究開始当初の背景

近年日本は世界的にみても地震が頻繁に

発生しており、1995年の兵庫県南部地震や2004年の新潟中越地震などの大規模な地震

が発生している。更に昨今、東北地方においては、マグニチュード9.0の未曾有の大規模な震災に見舞われ、土木鋼構造物全般における耐震安全性によりいっそうの注目が集まっている。日本の鋼構造物の現状は、高度経済成長期に建設されたものが多く、近年その大半が、老朽化の時代を迎えている。このような鋼構造物は、当時の耐震基準に従って低く設計されているうえ、老朽化により耐震性能の劣化も考えられる。老朽化した鋼構造物の地震時における耐震安全性を確保することは重要であるが、現在の日本の財政状況からみても再構築ではなく、腐食した鋼構造物を補修・維持管理することで長寿命化を図る必要がある。

これまでの構造物の耐震性能を評価する研究では、例えば、鉛直地震動の影響は少ないとして2方向成分の影響を考慮した鋼製橋脚に対する水平2方向繰り返し荷重の研究が行われてきた。また、ねじりが作用する逆L形鋼製箱形断面を有する橋脚の耐震性能を評価する研究もなされてきた。しかしながら、より現実の地震による影響を考慮する上で、ねじりを受ける構造物ではこれらの水平2方向荷重と同時にねじりも考慮し、より厳しい条件下での挙動を把握する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、矩形断面を有する鋼製橋脚を対象とし、腐食損傷を有する鋼製橋脚の水平2方向挙動を実験的および解析的に明らかにすることを研究目的とした。具体的には、種々の荷重下における鋼構造物の力学的挙動を評価するために、ねじりと静的水平2方向繰り返し荷重を同時に作用させた厳しい載荷条件下での鋼製橋脚の力学的挙動に対して、腐食損傷の有無が与える影響について検討を行った。また、載荷実験では実験の制約上実験ケースが限られているため、実験結果の対比および実験ケースを補完するため、局部座屈を精度良く表現できるようにシェル要素を用いた汎用有限要素解析コードABAQUSによる弾塑性有限変位解析を実施した。

以上の実験的および解析的検討により、これらの結果の妥当性を確認するとともに、角部に腐食損傷を有する矩形鋼製橋脚の水平2方向挙動・耐震性能について考察を行った。

3. 研究の方法

(1) 載荷実験による検討

本研究で参考とした橋脚は、高度経済成長期の古い耐震基準で製作された、矩形断面を有するT型の鋼製橋脚である。矩形断面の外側角部は溜水などによる腐食の影響は受けにくく腐食損傷の事例も多くないと思われるが、この部位は膜厚が確保しにくく角部が

腐食損傷した橋脚も存在し、このような橋脚に地震力が作用した場合には大きな損傷が生じると思われる。そのため、本研究では角部に腐食による断面欠損を与えることとした。

載荷実験前に、供試体の材料特性を把握するために、単調引張試験を行った。

参考橋脚を約1/9にスケールダウンした供試体を製作した。腐食による板厚減少をすべての角部に与え、損傷部の板厚は健全部(3.2mm)の半分(1.6mm)とした。損傷の範囲は断面の幅方向に角部からすべて10mmとし、高さ方向に供試体の下端側から3パネル分とした。3パネル分としたのは供試体製作前に行われた予備検討において下から2パネル目が座屈したケースがあったためである。今回は角部の腐食による耐震性能の違いを明確に評価するための実験を行うという主旨で、腐食による板厚減少率を大きめ目の50%とした。なお、供試体の各種パラメータは参考橋脚のパラメータとおおむね等しくなるように設計した。今回の供試体は、兵庫県南部地震以前に設計された耐震設計基準が現在より古い基準で設計されているため、耐震性能に劣るパラメータとなっている。以後、腐食損傷を有しない供試体をModel-1と呼び、腐食損傷を有する供試体をModel-2と呼ぶ。

本研究では、京都大学と島津製作所によって開発された三次元構造物試験装置を使用した。この実験装置は、構造物もしくは構造部材の変形として、X-Y-Z軸方向並進3成分およびX-Y-Z軸回り回転3成分の合計6自由度の変位を任意に組み合わせて高精度な載荷を可能とするためのマルチ油圧ジャッキシステム、デジタル制御・計測装置、油圧供給装置、および自己釣り合い形式のフレームを組み合わせたものである。この試験装置では、実験供試体基部を上、頭部を下に設置される。

本実験では、Z軸に並進の方向のアクチュエータにより荷重一定制御により軸力の載荷を行った後に、ねじりを2本のアクチュエータの押し引きにより変位制御で一定量加えた状態で保持し、X軸とY軸に並進の方向の2本のアクチュエータを用いて、2方向水平面内の載荷を行った。この際、実験供試体の正確な変位量により実験を制御するために、実験供試体の基部が基準となるように設置した外部変位計を用いて荷重載荷位置の変位を計測することにより、変形量を正確に計測した。

供試体の載荷部分に降伏軸力の15%の一定軸力を荷重制御で作用させた状態で、数値解析により降伏ねじり量を算出し、その約80%を変位制御で与えた。その後、水平2方向繰り返し載荷を外部変位制御で行った。水平2方向載荷の基本となる初期水平降伏変位 δ_y

および水平降伏荷重 H_y は、Bernoulli-Euler のはり理論で算出した。水平2方向繰り返し載荷の載荷経路はダイヤモンド形載荷で、初期水平降伏変位 δy の3倍まで行った。

(2) 数値解析による検討

実験結果の妥当性を確認し、また実験結果を補完する目的で、載荷実験で使用した供試体を対象として解析を行った。数値解析には局部座屈を精度良く表現できるようにシェル要素を用いた汎用有限要素解析コード ABAQUS による弾塑性有限変位解析を実施した。

橋脚部は4節点のシェル要素で要素分割し、載荷部は剛体のはり要素を使用した。橋脚部の下端を完全固定とし、載荷部の上端を載荷点とした。

橋脚の断面は実験供試体と同じである。腐食損傷をすべての角部に与え、損傷部の板厚は健全部 (3.2mm) の半分 (1.6mm) とし、損傷の範囲は断面の長さ方向に角部からすべて 10mm とし、高さ方向に解析モデルの下端側から3パネル分とした。ここでは、載荷実験同様に、角部に腐食のない健全な断面のみを有するモデルを Model-1 とし、角部に腐食による断面欠損を有するモデルを Model-2 と呼ぶことにする。

鋼材の構成則には移動硬化則を使用し、塑性勾配を弾性勾配の 1/100 とした。

解析における載荷の手順は、実験と同様にはじめに降伏軸力の 15% の一定軸力を荷重制御で作用させた状態で、降伏ねじり量の約 80% を変位制御で与えた。その後、水平2方向繰り返し載荷を変位制御で行った。2方向繰り返し載荷の方法は変位制御とし、ダイヤモンド型の載荷を行った。水平2方向のそれぞれの初期降伏変位 δy_0 を基準として $(0, 0) \rightarrow (0.5 \delta y_0, 0) \rightarrow (0, 0.5 \delta y_0) \rightarrow (-0.5 \delta y_0, 0) \rightarrow (0, -0.5 \delta y_0) \rightarrow (0.5 \delta y_0, 0) \rightarrow (\delta y_0, 0) \rightarrow (0, \delta y_0) \dots$ と初期降伏変位の3倍まで順次漸増させた4サイクルの載荷を行った。

4. 研究成果

(1) 載荷実験による検討結果

腐食損傷の有無による耐震性能の比較のために、図-1 および図-2 に載荷実験で得られた X 軸方向と Y 軸方向の荷重-変位曲線をそれぞれ示す。図-1 についてみると、弾性状態である 1 サイクル目の $0.5 \delta y$ までは Model-1 (健全な断面を持つ供試体)、Model-2 (腐食損傷による断面欠損を模擬した供試体) において、耐力の差異は少ない。塑性状態に達する 2 サイクル目の $1 \delta y$ でも大きな差異は見られない。しかし、3 サイクル目の $2 \delta y$ では、最大荷重で Model-2 は Model-1 に比べ 13% 程度低くなっていることがわかる。さらに、4 サイクル目の $3 \delta y$ での

荷重では、25% 程度低くなっていることがわかる。

次に、図-2 についてみると、弾性状態である 1 サイクル目の $0.5 \delta y$ までは Model-1, Model-2 において、耐力の差異は少ない。降伏状態に達する 2 サイクル目の $1 \delta y$ でも大きな差異は見られない。しかし、3 サイクル目の $2 \delta y$ では、最大荷重で Model-2 は Model-1 に比べ 10% 程度低くなっていることがわかる。さらに、4 サイクル目の $3 \delta y$ での荷重では、45% 程度低くなっていることがわかる。

なお、Model-1 の載荷実験においては、載荷が不安定になったため、4 サイクル目で実験を中止した。

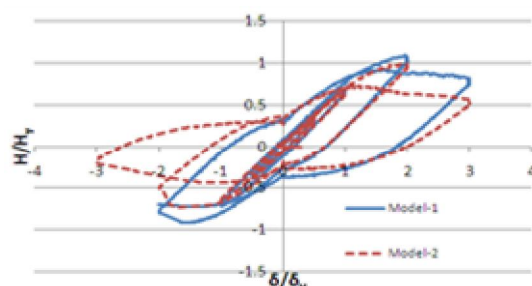


図-1 荷重-変位曲線(X軸方向)

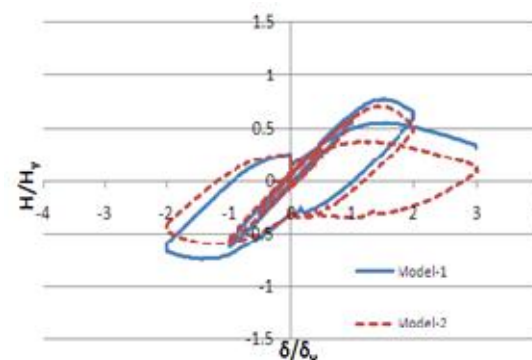


図-2 荷重-変位曲線(Y軸方向)

図-3 および図-4 に載荷実験で得られた X 軸方向と Y 軸方向の荷重の包絡線をそれぞれ示す。これらの図についてみると、0~2 サイクル目の δy までは Model-1, Model-2 において、荷重に大きな変化は見られないことがわかる。

しかし、3 サイクル目の $2 \delta y$ になると Model-1 は Model-2 に比べ最大荷重が大きいことがわかる。3~34 サイクル目の $2 \delta y \sim 3 \delta y$ で見られる最大荷重後の低下は Model-2 が Model-1 に比べ、大きいことがわかる。

以上のことより、供試体の変形が小さいときには腐食による断面欠損の影響は小さく、橋脚の変形が大きくなるにつれてその影響

が大きくなることわかる。さらに、Model-1 に関して最大荷重の低下率は図-3 の X 軸方向で約 15%、図-4 の Y 軸方向で約 29%である。一方、Model-2 では X 軸方向で約 23%、Y 軸方向では約 47%となっており、本研究で対象とした腐食損傷は耐荷性能に影響を与えていることがわかる。

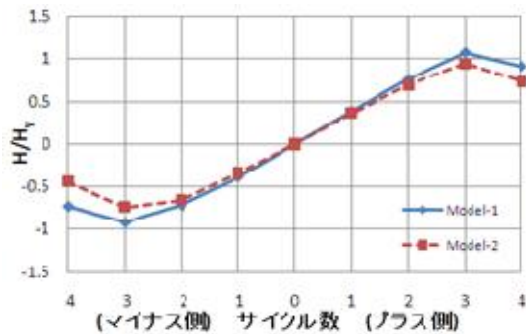


図-3 包絡線(X軸方向)

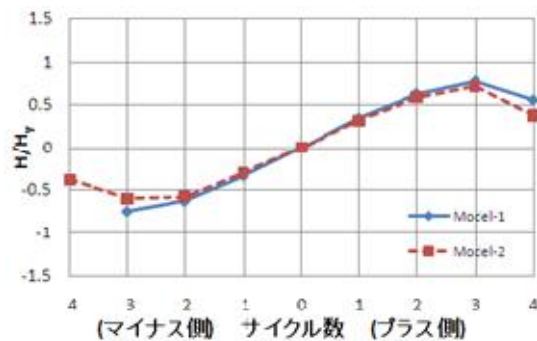


図-4 包絡線(Y軸方向)

(2) 数値解析による検討結果

健全なモデルである Model-1 の実験結果および解析結果の X 軸方向および Y 軸方向をそれぞれ図-5 と図-6 に示す。腐食損傷を有するモデルである Model-2 の実験結果および解析結果の X 軸方向および Y 軸方向をそれぞれ図-7 と図-8 に示す。これらの図において実験結果と解析結果は概ね挙動が一致しており、載荷実験ならびに数値解析の妥当性が確認できる。実験結果と同様であるが、 $2\delta_y$ の 3 サイクル目で最大荷重を迎え、 $3\delta_y$ の 4 サイクル目で耐荷力が低下していることがわかる。耐荷力の低下は腐食損傷を有する Model-2 で顕著であることがわかる。座屈損傷の形態は載荷実験と同様であり、健全なモデル Model-1 では板パネルの座屈損傷が支配的であるのに対し、腐食損傷を有するモデル Model-2 では板パネルの座屈損傷に加え、腐食損傷部である角部にも座屈が生じていた。

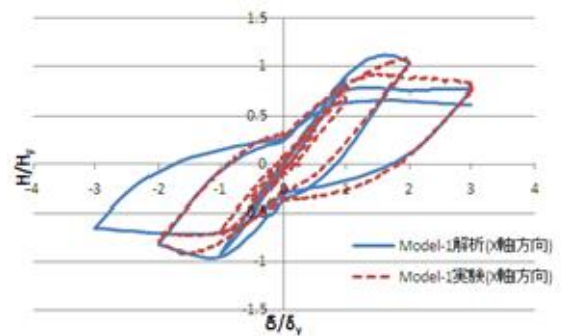


図-5 解析と実験の荷重-変位曲線 (Model-1, X軸方向)

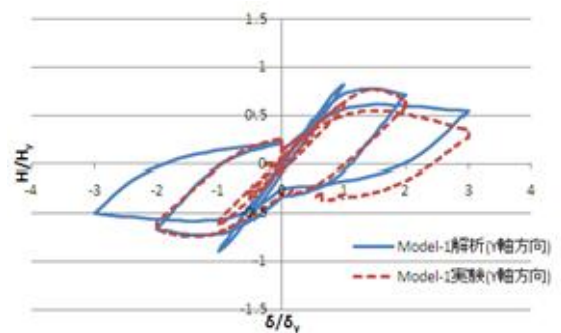


図-6 解析と実験の荷重-変位曲線 (Model-1, Y軸方向)

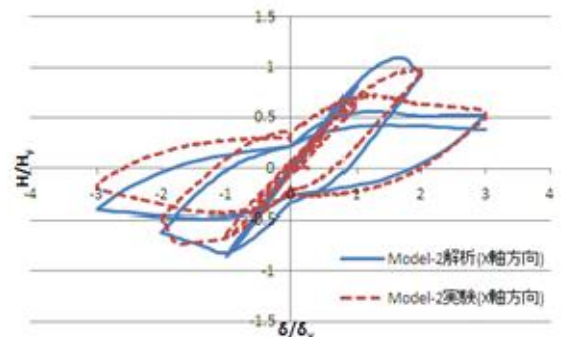


図-7 解析と実験の荷重-変位曲線 (Model-2, X軸方向)

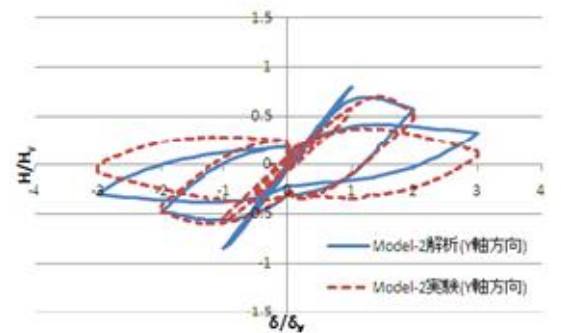


図-8 解析と実験の荷重-変位曲線 (Model-2, Y軸方向)

本解析手法の妥当性が検証できたため、本パラメトリック解析ではねじり量と腐食形状をパラメータとした解析を行い、考察を行った。以下にこれらについて述べる。

①ねじりに関する考察

本研究では実験の制約上、実験供試体は健全なモデルと腐食損傷を有するモデルとそれぞれ1体ずつしか実験が行えなかったため、不確定要素のねじり量については厳しい荷重状態（降伏ねじり量の80%）で実験を行った。そこで、ねじり量を変化させることで、ねじりに関する考察を行った。ねじり量については、ねじりを加えないケースと、ねじりを降伏ねじり量の40%と80%を加えたケースの合計3ケースで解析を行った。

健全なモデルであるModel-1のX軸方向およびY軸方向の $2\delta y$ の3サイクル目と $3\delta y$ の4サイクル目最大荷重 H_{max} を降伏荷重 H_y で無次元化したグラフをそれぞれ図-9と図-10に示す。腐食損傷を有するModel-2についても図-11と図-12に示す。

これらのグラフから、Model-1、Model-2ともに降伏ねじり量の40%であってもねじりを加えなかった場合と大きな差異はなく、ねじりが耐荷力に与える影響は大きくないことがわかる。降伏ねじり量の80%になるとその影響が現れ、その影響は腐食損傷を有するModel-2で大きいことがわかる。以上のことから、ねじりを受ける部材はその程度にもよるが、角部の腐食損傷により注意する必要がある。

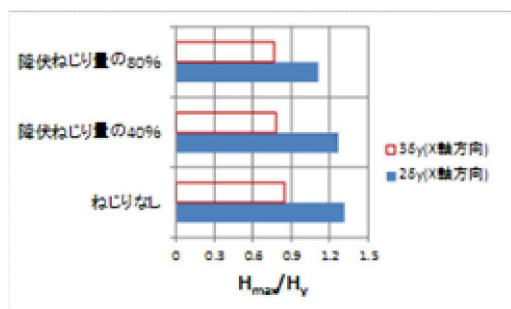


図-9 ねじりに関する耐荷力の比較 (Model-1, X軸方向)

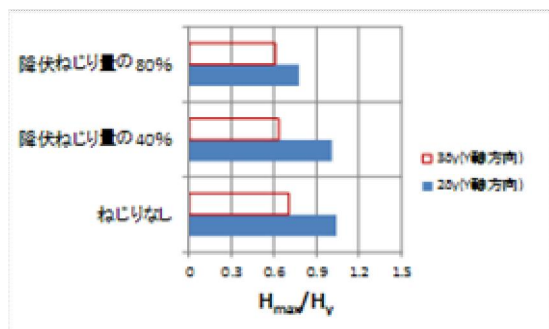


図-10 ねじりに関する耐荷力の比較 (Model-1, Y軸方向)

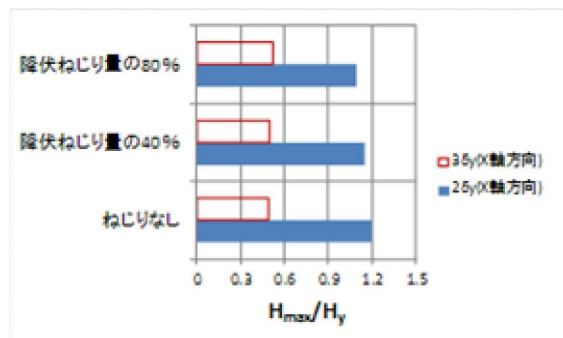


図-11 ねじりに関する耐荷力の比較 (Model-2, X軸方向)

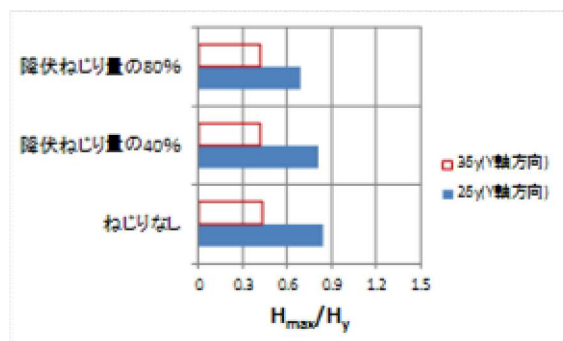


図-12 ねじりに関する耐荷力の比較 (Model-2, Y軸方向)

②腐食形状に関する考察

本研究では実験の制約上、実験供試体は健全なモデルと腐食損傷を有するモデルとそれぞれ1体ずつしか実験が行えなかったため、腐食形状については角部からの腐食幅は10mm、腐食深さは板厚の半分の1.6mm（腐食率50%）として実験を行った。そこで、腐食幅については10mmと20mmの2ケースに対して腐食深さを0.8mm（腐食率25%）、1.6mm（腐食率50%）、2.4mm（腐食率75%）と変化させた解析を行い、腐食形状に関する考察を行った。

健全なモデルであるX軸方向およびY軸方向の $2\delta y$ の3サイクル目と $3\delta y$ の4サイクル目最大荷重 H_{max} を降伏荷重 H_y で無次元化したグラフをそれぞれ図-13と図-14に示す。

これらの図より腐食幅と腐食深さが大きくなるにつれて耐荷力は低下することがわかる。特に、腐食幅20mm（板幅の約10%）で腐食深さが2.4mm（腐食率75%）になると著しく耐荷力が低下することがわかる。また、腐食による欠損体積が等しい図-13の腐食幅が10mmで腐食深さが1.6mmのケースと腐食幅が20mmで腐食深さが0.8mmのケースでは、前者にくらべて後者の耐荷力が低くなっており、腐食深さよりも腐食幅が耐荷性能に影響を与えていることがわかる。以上より、同程度の腐食であってもその形状により耐

荷性能は異なるため注意が必要である。

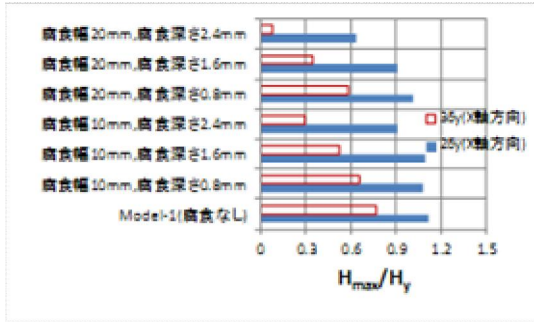


図-13 腐食形状による耐荷力の比較 (X軸方向)

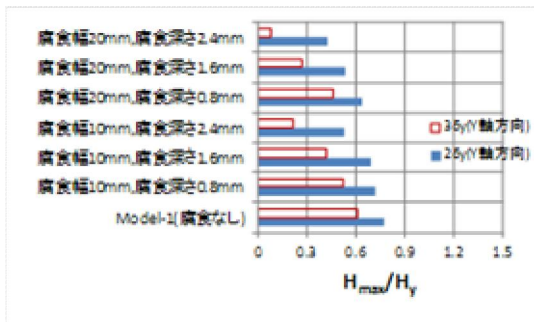


図-14 腐食形状による耐荷力の比較 (Y軸方向)

(3)まとめ

角部に腐食損傷を有する橋脚は健全な断面を持つ橋脚に比べて、耐力の差異は最大荷重を迎えるまではその差は10%と小さいものの、最大荷重後の差は強軸方向のX軸方向で25%程度、弱軸方向のY軸方向で45%程度と大きかった。

腐食損傷を有する橋脚では、座屈の進行が早く、座屈が角部で拘束されずに広がっていき、供試体の耐荷力の低下が著しいことが確認できた。

ねじりが水平2方向の耐荷力に与える影響について検討を行った。本検討ではその影響は大きくないことが明らかとなったが、ねじりと腐食損傷の程度によっては大きく耐荷性能を低下させる場合もあり、注意が必要である。

腐食形態が水平2方向の耐荷力に与える影響について検討を行った。腐食幅と腐食深さが大きくなるにつれて耐荷力は低下するが、腐食幅が耐荷力に与える影響が大きく、また同程度の腐食であってもその形状により耐荷性能は異なるため注意が必要である。

腐食により劣化した構造物が、大規模な地震時に大きな損傷を受ける恐れがあり、適切な維持管理を行う必要があると思われる。

本研究では限られた実験・解析ケースで検討を行い、角部に腐食損傷を有する矩形鋼製橋脚の挙動・耐荷性能について考察を行った

が、今後は実際に近い荷重状態、耐震性能の異なる種々の橋脚に対して様々な腐食形態を考慮した検討を行う必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 永田和寿, 加藤慶太郎, 杉浦邦征, 橋本国太郎, 北原武嗣, 角部に腐食損傷を有する矩形鋼製橋脚の水平2方向挙動に関する研究, 構造工学論文集, 査読有り, Vol.58A, 2012, pp.299-309
- ② 加藤慶太郎, 永田和寿, 杉浦邦征, 橋本国太郎, 北原武嗣, 腐食損傷を有する鋼製橋脚の水平2方向挙動に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 査読有り, 19巻, 2011, pp.281-288

[学会発表] (計5件)

- ① Kazutoshi NAGATA, Keitarou KATO, Kunitomo SUGIURA, Kunitaro HASHIMOTO and Takeshi KITAHARA, Behavior of rectangular steel bridge piers with corrosion damages in the corners subjected to 2 dimensional horizontal loading, The International Workshop on Advances in Seismic Experiments and Computations, 3.13.2012, Aichi
- ② 大竹輝, 永田和寿, 加藤慶太郎, 腐食損傷を有する矩形鋼製橋脚の水平2方向挙動に関する研究, 平成23年度土木学会中部支部研究発表会, 2012年3月8日, 長野県
- ③ 加藤慶太郎, 永田和寿, 杉浦邦征, 橋本国太郎, 北原武嗣, 腐食損傷を有する鋼製橋脚の水平2方向挙動に関する研究, 第19回鋼構造シンポジウム, 2011年11月17日, 東京都
- ④ 加藤慶太郎, 永田和寿, 杉浦邦征, 橋本国太郎, 腐食損傷を有した鋼製橋脚のねじりを考慮した水平2方向挙動に関する研究, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011年9月7日, 愛媛県
- ⑤ 加藤慶太郎, 岩原徳和, 永田和寿, 角部に腐食損傷を有する鋼製橋脚の水平2方向繰り返し荷重下の力学的挙動, 平成22年度土木学会中部支部研究発表会, 2011年3月4日, 愛知県

6. 研究組織

(1)研究代表者

永田 和寿 (NAGATA KAZUTOSHI)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・
准教授
研究者番号: 40301238