

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560570

研究課題名(和文) 既設鋼桁橋の維持管理性向上手法の開発

研究課題名(英文) Development of Method of Improving Inspectability of Existing Steel Girder Bridges

研究代表者

山口 栄輝 (YAMAGUCHI, Eiki)

九州工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90200609

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：鋼橋端横桁の維持管理性向上を目的とした研究である。有限要素法によって研究を進めたが、橋梁全体の解析は多大な計算労力が必要となるため、まず端横桁単体モデルを構築し、その妥当性を検証した。次いで、腐食が、端横桁の水平荷重下耐荷力に大きな影響を及ぼし得ることを明らかにした。端横桁の腐食予防には点検が重要であるが、点検できない橋梁も多い。そこで、端横桁ウェブに点検孔を設置することとし、それに伴う耐荷力低下を検討した。孔の大きさ、形状のみならず、設置位置も影響することが明らかになり、最適な設置位置を提案した。最後に、点検孔設置時の補強方法を検討し、補強の効果を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The objective is to improve the inspectability of an end cross girder of a steel bridge. The finite element method is the mainstay, but the analysis of the whole bridge is an insurmountable task. The end cross girder model is therefore constructed first. Since the end cross girder is very susceptible to corrosion, the influence of corrosion on the load-carrying capacity of the end cross girder is investigated, showing that the corrosion can deteriorate the load-carrying capacity considerably. For the prevention, inspection is essential, but in many bridges it is not easy as the end cross girder is so close to a parapet. In the present study, the setup of an inspection hole is considered to solve the problem. To this end, the influence of an inspection hole on the load-carrying capacity is studied. It is found that not only the size and the shape but also the location influences load-carrying capacity. Reinforcement methods are then investigated and their effectiveness is revealed.

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：端横桁 鋼桁橋 腐食 点検孔 ダブリング補強 補剛材

1. 研究開始当初の背景

(1) 橋梁の桁端部は、伸縮装置からの漏水があり、また一般に風通しもよくないため、腐食しやすい環境にある。実際、鋼橋の顕著な腐食の多くは、桁端部で生じている。

(2) 端横桁は、死活荷重のみならず、水平荷重を主桁に分配し、支承に伝達する役割を担っている。耐震上、重要な部材であり、2012年チリ地震では、端横桁を有していない多くの橋梁が被災した。

(3) (1)のことから、端横桁が腐食している事例は多い。耐荷力が低下して地震時に担うべき役割を果たせなくなっている可能性がある。

(4) 腐食防止には点検が必須であるが、橋梁端部は狭隘空間を形成し、点検が困難なことが多い。特に端横桁は、パラペットとの間が非常に狭く、点検や再塗装などの維持管理行為が事実上実施不可能な事例が多い。

2. 研究の目的

(1) 鋼橋の主部材である端横桁の維持管理性を向上させる方法の提案を目的とする。この主目的を達成するために、以下の項目を目的として研究を遂行する。

(2) 腐食が、端横桁の耐荷力に及ぼす影響を明らかにする。

(3) 維持管理性向上のために、点検孔を設置する。点検孔設置が端横桁の耐荷力に及ぼす影響(耐荷力の低下)を明らかにする。

(4) 点検孔設置の影響を減じるための方法を検討する。

3. 研究の方法

(1) 有限要素法を用いた数値解析が本研究の主たる方法である。耐荷力評価は非線形解析で行う。その際には、材料非線形、幾何学的非線形の両方を考慮し、初期不整の影響も組み込む。解析はすべて、シェル要素で全領域をモデル化した3次元有限要素解析である。

(2) 端横桁は鋼橋を構成する部材であり、鋼橋の一部として挙動する。しかしながら、鋼橋全体の非線形解析は多大な計算労力を必要とするため、実施困難である。そこで、端横桁単体モデル(以下では、端横桁モデルと呼ぶ)を構築し、それを用いて検討する。

(3) 腐食が耐荷力に及ぼす影響を検討する。荷重は死荷重と水平荷重とする。死荷重は上部工の重量で一定、水平荷重は地震荷重を模擬するもので、漸次増加させる。水平荷重の最大値が耐荷力である。

(4) 形状や大きさの異なる4個の点検孔を取り上げ、端横桁ウェブへの設置に伴う耐荷力低下を検討する。点検孔設置候補は、大きな点検孔の場合はウェブ内の3箇所、小さな点検孔は9箇所とする。

(5) 解析の妥当性を確認するために、有孔端横桁実験供試体を製作し、載荷実験を行う。

4. 研究成果

(1) 端横桁モデル

日本橋梁建設協会「合成桁の設計例と解説」(2000年)で、設計例に取り上げられている梁を解析対象とする。端横桁モデルは、この橋梁の端横桁、支点上垂直補剛材、主桁の一部で構成する(図-1)。端横桁モデルに取り込む主桁長は、道路橋示方書鋼橋編の荷重集中点の補剛材の頂にならう。端横桁上フランジはコンクリート床板と接合され、また橋軸方向の荷重は作用させないことから、上フランジの橋軸方向の変位、橋軸直角方向まわりの回転を拘束する。支点は単純支持とし、橋軸直角方向まわりの回転自由度以外は拘束する。

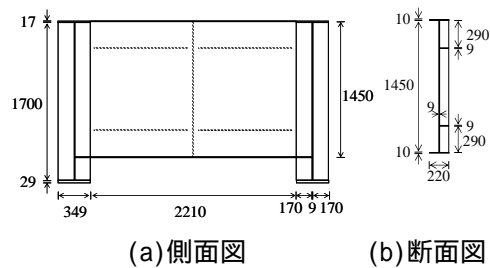


図 - 1 端横桁 (単位: mm)

この端横桁モデルの妥当性を検討するために、全橋モデルも構築し、両者の線形解析結果を比較した。

水平荷重下では、端横桁モデルと全橋モデルではほぼ同じ応力状態が得られたが、死荷重下では、端横桁モデルの応力が全橋モデルの応力を大きく下回った。端横桁モデルの死荷重は、「合成桁の設計例と解説」で端横桁が負担するとされている分である。過小評価はそのことによると考え、主桁負担分の死荷重も主桁と垂直補剛材の連結部に作用させたところ、端横桁モデルの応力状態は大きく改善し、端横桁モデルによる解析でも妥当な結果が得られることが明らかとなった。そこで、本研究の解析では、主桁負担分の死荷重も作用させた上で、端横桁モデルによる解析を行うこととした。

(2) 腐食の影響

国総研資料第196号(2004年)を参考に、端横桁ウェブに10種類の腐食パターンを考えることとした。また、各腐食パターンにおいて、それぞれ3通りの腐食領域、板厚減を

考察対象とした。腐食のない健全な桁を含めると、合計で 91 種類の端横桁モデルの解析を行った。加えて、端横桁下フランジと主桁が切り離された場合についても検討した。

この解析は、材料非線形と幾何学的非線形性の両方を考慮した複合非線形解析である。その際には、初期不整として、残留応力と初期変形を導入している。残留応力は、板の連結部で降伏応力 σ_y 、そこから離れた圧縮応力域では $-0.3 \sigma_y$ である。初期状態でこの応力分布を導入するために、まず温度分布を与えて熱応力解析を行い、その結果を取り込んで残留応力分布とする。熱応力解析による応力分布なので、実際の残留応力と同じく、自平衡状態になっている。

座屈固有値解析を行い、得られた最小座屈荷重のモードを初期変形モードとする。その上で、道路橋示方書鋼橋編に規定されている部材精度の許容値を用いて、初期変形を決定している。

この検討結果から次の成果が得られた。

端横桁に水平荷重が作用すると、垂直補剛材、水平補剛材、主桁ウェブに囲まれた 2 つのパネルでのせん断座屈、斜張力場の形成を経て、耐荷力に至るのが基本的な変形性状である。端横桁が腐食すると、変形性状が変化し、耐荷力が小さくなる。腐食領域、板厚減少が大きくなるほど、耐荷力は低下する傾向にあるが、その度合いは、腐食形態、腐食位置によって異なる。

耐荷力低下に及ぼす影響が大きい腐食は、WL と NL のタイプである。WL は図 - 2 に示す通り、ウェブの下側隅にできる三角形の腐食であり、NL は WL より幅が小さい三角形(底辺が $h/2$) の腐食領域である。両者を比較すると、 h が同じであれば、WL の方が影響度合いは大きい。腐食領域の面積が同じであれば、両者の差はほとんどない。

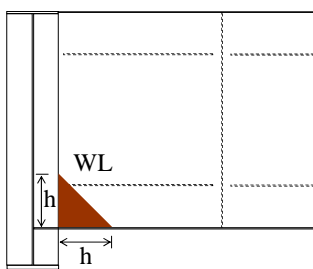


図 - 2 腐食パターン WL

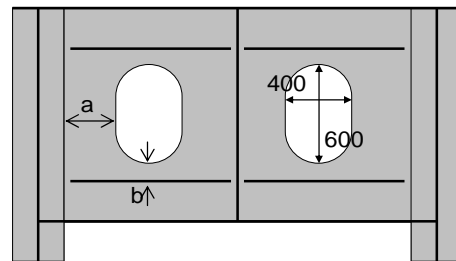
端横桁の下フランジは、主桁とボルトで結合されているが、その設計は必ずしも明確でない。そのため、大地震時に、端横桁下フランジと主桁の連結部が損傷を受け、切り離される可能性も否めない。この部分が腐食すると、切断される可能性はさらに大きくなる。そこで、そうした事態が起こった場合についても検討を加えた。

端横桁下フランジが主桁から切り離されると、耐荷力は健全桁で 11% 低下する。腐

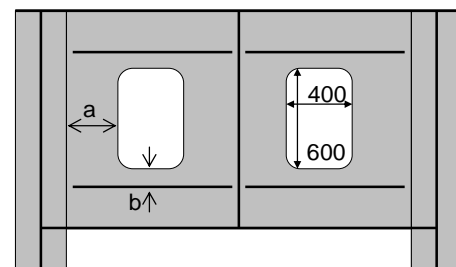
食桁の耐荷力低下はさらに大きい。端横桁下フランジと主桁との連結の有無で、水平荷重を受ける端横桁の変形性状は大きく変わり、ひいては橋梁の耐震性に多大な影響を及ぼしかねない。端横桁下フランジと主桁連結部の重要性に配慮した耐震設計、維持管理の早急な整備・充実が望まれる。

(3) 点検孔の影響

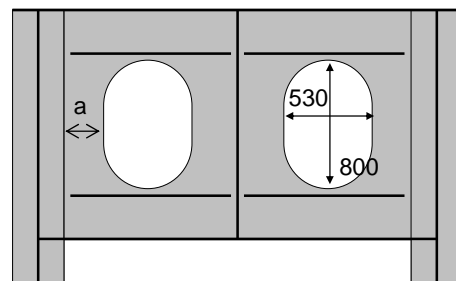
中井博らの調査(橋梁と基礎, 1996 年)によると、マンホールのサイズは 400×600 mm が全体の 95% 以上を占めている。形状は、長円形が最も多く全体の 62.0%、長方形が 38.0% である。点検や風通しを考えれば、点検孔は大きい方がよいことも考え合わせ、図 - 3 に示す 4 種類の点検孔モデルを検討対象とした。点検孔モデル A, C のコーナー部曲率半径は 200mm、点検孔モデル B, D のコーナー部曲率半径は 100mm である。この図に示すように、いずれのモデルでも、点検孔は左右対象位置に 2 個設けることとしている。



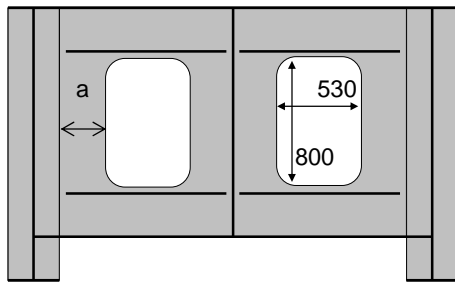
(a) 点検孔モデル A



(b) 点検孔モデル B



(c) 点検孔モデル C



(d)点検孔モデルD

図 - 3 点検孔モデル (単位 : mm)

点検孔設置位置は、点検孔モデル A, B が $a = 25, 350, 675\text{mm}$, $b = 25, 135, 245\text{mm}$ の組み合わせで 9 箇所、点検孔モデル C, D は $a = 25, 302.5, 580\text{mm}$ の 3 箇所である。

こうした点検孔を有する端横桁モデルを解析することにより、次の成果が得られた。

いずれの点検孔モデルでも、点検孔設置位置が端横桁中央に近いほど耐力力の低下は大きくなる。

3 箇所の上下方向設置位置も考えた点検孔モデル A, B では、主桁近傍の下部に設置した場合の耐力力低下が最も小さい。

(2)の腐食モデルからもわかるように、腐食は主桁付近に生じやすい。(3)の結果と考え合わせれば、点検孔は主桁近く(点検孔モデル A, B は、その下部)に設けるのが最適と判断される。

点検孔モデル A ~ D を有した端横桁の耐力力は、最適位置に設置した場合でも、点検孔がない場合の 77%, 72%, 61%, 56% に低下する。

(4) 補強方法

点検孔設置に伴い、端横桁の耐力力は低下するため、補強が必要となる。鋼板開口部の補強方法としては、ダブリングと補剛材の設置が考えられる。本研究では、ダブリング補強、補剛材補強、その併用を考察対象とする。ダブリングの幅と高さは、それぞれ点検孔の 2 倍とする。補剛材は点検孔の両脇に鉛直方向に設置し、板幅は 100mm とする。点検孔の位置は、(3)の検討結果に基づき、主桁近傍とする。点検孔モデル A, B については、主桁近傍の下方に設置する。

この検討結果から次の成果が得られた。

点検孔モデル A に補強を施した場合の水平荷重 - 水平変位応答を図 - 4 に示す。6 通りの補強 A ~ F を検討対象としている。補強 A, B はダブリング補強(補強 A の板厚は 9mm, 補強 B では 18mm)、補強 C, D は補剛材補強(補強 C の板厚は 18mm, 補強 D では 27mm)、補強 E, F はダブリングと補剛材の併用補強(補強 E は A と C, 補強 F は B と D の組み合わせ)である。図 - 4 より、補強 A, B の間、補強 C, D の間、補強 E, F の間では効果にほとんど差がないこと、補強 C, D の効果は大きくないこと、補強 A または B を施せば耐力力は無孔

の場合の 98%、補強 E または F により 99% にまで回復することが判明した。

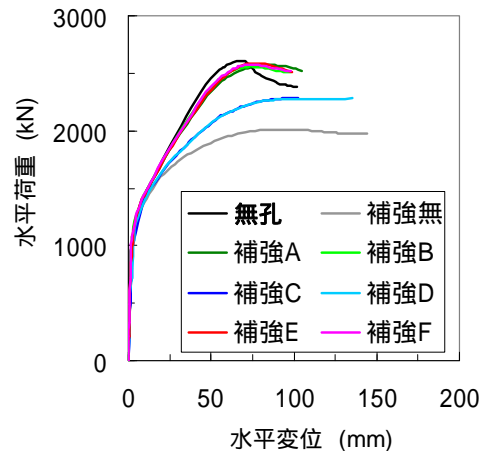


図 - 4 補強効果 (点検孔モデル A)

の結果を踏まえ、他の点検孔モデルにおいて、補強 A の効果を検討した。補強 A により、点検孔モデル A の耐力力は無孔端横桁の 98% まで回復したが、点検孔モデル B ~ D では、それぞれ 90%, 89%, 78% に留まり、10% 以上の耐力力低下が残ったままとなった。

の結果を踏まえ、ダブリング補強と補剛材補強の併用である補強 E の効果を検討した。点検孔モデル B の耐力力は無孔端横桁の耐力力を回復したが、点検孔モデル C, D の耐力力は 90% に留まった。

点検孔モデル A ではダブリング補強、点検孔モデル B ではダブリングと補剛材の併用補強で、点検孔がない端横桁の耐力力をほぼ確保できる。一方、点検孔モデル C, D では補強を施しても 10% の耐力力低下が残る。これらの点検孔の採用に際しては、耐震設計における安全性照査を慎重に行う必要がある。

(5) 載荷実験

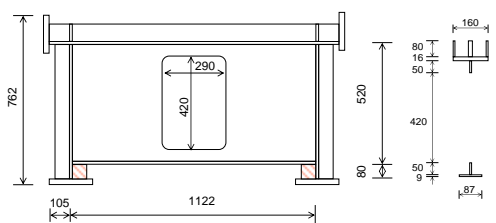
実験装置の能力等の関係で、実物大供試体での実験を行うことはできず、縮小モデルを製作した。そのために、解析で事前に種々の検討を行い、最終的には図 - 5 に示す端横桁モデルを用いることになった。図 - 6 には、供試体設置状況を示す。

上記(1) ~ (4)の検討では、水平荷重を分布荷重として上フランジに作用させている。それに対し、載荷実験では水平荷重を集中荷重として上フランジ端部に加えざるを得ず、実橋での床版の拘束効果を取り入れる必要もあり、上フランジ上に補剛リブを設置している(図 - 5 (c))。

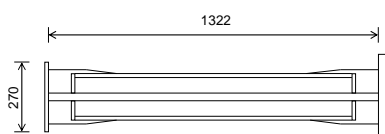
図 - 7 に載荷点での水平荷重 - 水平変位関係、図 - 8 にはウェブの水平荷重 - ひずみ関係(載荷点側の下フランジから 50mm 上方、主桁から 150mm 内側の点)を示している。なお、 x は橋軸直角方向、 z は鉛直方向である。

載荷実験では、下フランジと垂直補剛材間

の溶接に亀裂が生じて崩壊した。亀裂を伴う変形性状を解析で再現するのは容易でないため、载荷実験と解析の結果は最終段階で差が出ているが、それまでは概ね良好な一致が見られる。これより、本研究の解析は妥当であると判断された。



(a)側面図 (b)断面図



(c)上面図

図 - 5 実験供試体 (単位: mm)

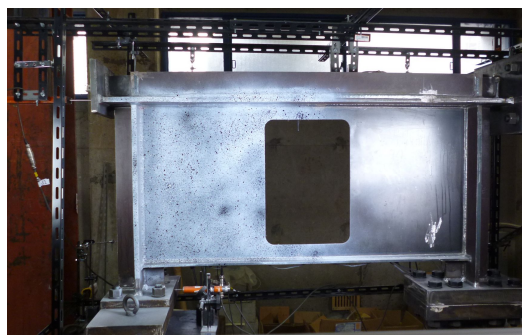


図 - 6 供試体設置状況

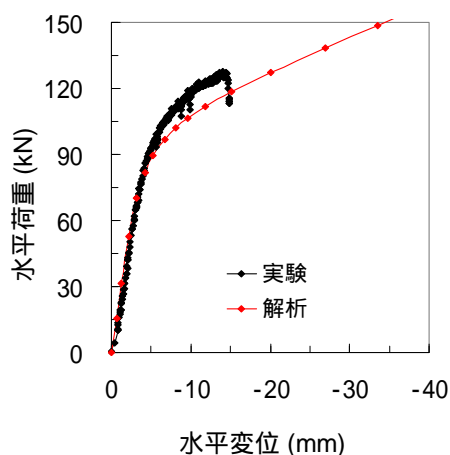


図 - 7 載荷点の水平荷重 - 水平変位曲線

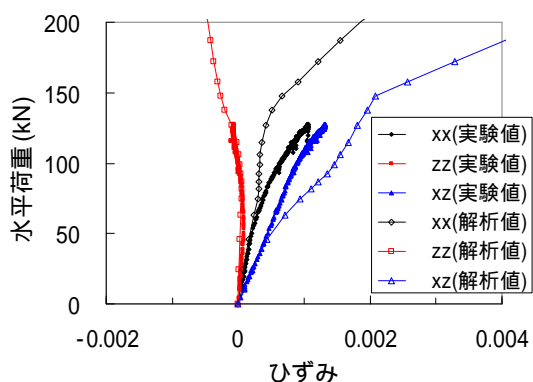


図 - 8 水平荷重 - ひずみ曲線

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

山口栄輝, 辻浩幸, 水平荷重を受ける端横桁の変形性状に及ぼす腐食の影響, 構造工学論文集, 査読有, Vol. 60A, pp.105-113, 2014.

Eiki Yamaguchi, Toshiaki Akagi, Structural Behavior of corroded steel bridge girder, Proceedings of 6th Civil Engineering Conference in Asia Region, 査読有, TS7, TS7-8 ~ TS7-13, 2013.

Eiki Yamaguchi, Hiroyuki Tsuji, Load-carrying capacity of corroded end cross-girder, Proceedings of the 29th US-Japan Bridge Engineering Workshop, 査読無, pp.223-230, 2013.

[学会発表](計1件)

Eiki Yamaguchi, Toshiaki Akagi, Influence of local corrosion on load-carrying capacity of steel I-section girder end, 7th International Symposium on Steel Structures, November 7-9, 2013, Jeju, Korea.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 栄輝 (YAMAGUCHI, Eiki)
九州工業大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 90200609