

令和元年5月9日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06468

研究課題名(和文) 鋼桁端部構造の耐震設計法の高度化に関する研究

研究課題名(英文) Study on updated seismic design method of girder end structures in steel girder bridge

研究代表者

松村 政秀 (Masahide, Matsumura)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60315976

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：鋼橋上部構造の桁端部には、地震時の水平方向の荷重作用により多様な地震被害が生じ、早期復旧の妨げとなった。そこで、本研究では、地震により橋軸直角方向に水平力を受ける鋼橋桁端部の性能を評価し、L2地震動に対する鋼桁の耐震設計法および耐震構造、補強法の高度化を図ることを計画した。その結果、鋼橋上部構造の全体解析の結果、橋軸直角方向に変位制限を受ける桁端部には、支点上補剛材の座屈や桁の曲げねじり変形が生じることがわかった。また、L2地震動に対応する桁端部の耐震性能の向上には、従来よりも2.3倍増厚した支点上補剛材や、支点上補剛材の座屈変形を拘束する補強構造を採用が効果的であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鋼橋桁端部には、腐食や疲労による損傷が生じ、これまで、これらに対する補強法や性能評価に関する研究が多く行われてきた。しかし、兵庫県南部地震以降、増大した設計地震荷重に対して、鋼橋桁端部の耐震設計法は必ずしも対応していなかった。本研究により、強地震時に橋軸直角方向に地震荷重を受ける、既存構造に対する耐震補強構造、および新設・既設に対する耐震設計法に関して、従来構造では耐震性能が不十分であり、設計荷重レベルを上げたり、耐震性向上を考慮した補強構造を採用することの重要性に関して有用な知見を得たことの意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：Damages of girder end structures of a steel girder bridge by lateral force during an earthquake disturb an early recovery of bridge service. Hence this research aims to update structural details and seismic design method of the girder end structures against a large earthquake, like the Level 2 Earthquake in bridge design. Dynamic response analysis results of the girder bridge indicate that buckling damage of vertical stiffeners at the end supports and torsional bending deformations of the girder occur by the attack of the earthquake. Also revealed in this study are adoptions of about 2.3 times thicker plate of the vertical stiffeners and of buckling prevention by additional strengthening members will improve seismic performance against the Level 2 Earthquake of the girder end structures.

研究分野：橋梁の耐震

キーワード：鋼橋 桁端部 耐震 耐震構造 耐震設計法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

兵庫県南部地震以降、上部構造を支持する橋脚や支承の設計法、それらの地震時インタラクションを推定する地震応答解析手法の高度化が図られ、近年の地震被害でも耐震補強された橋脚に損傷はほとんど生じなかった。しかし、鋼上部構造の高耐震化は遅れており、横桁や対傾構の座屈・損傷、支承部周辺の部材の破損など桁端部や中間支点部に多様な損傷形態が生じ、直後の緊急車両通行可否の判断やその後の早期復旧に支障を来した。これを受け、これまでに被災を受けていない構造として充腹形式の横桁構造（平成 24 年度道示 耐震設計編）やコンクリート巻き立て構造の採用が奨励されている。しかし、既存構造を対象として、兵庫県南部地震で損傷したニーブレース形式を除くと横荷重に対する桁端部構造の高耐震化に関する研究は数少なく、特にもう 1 つの主形式である逆 V 字型に斜材を配する対傾構形式の損傷メカニズムや耐震設計に関する知見が蓄積されていない。

そこで、維持管理性や耐震性といった観点から桁端部構造に要求される機能・性能を整理し、桁端部構造の保有性能を評価し、横荷重に対する鋼桁の耐震設計法および耐震補強法の高度化を図る。

2. 研究の目的

本研究では、維持管理性や耐震性といった観点から桁端部構造に要求される機能・性能を整理・分類し、鋼橋全体の地震時挙動を明らかにした上で、桁端部構造の保有性能を評価し、L2 地震動（横荷重）に対する鋼桁の耐震設計法および耐震補強法の高度化を図る。

3. 研究の方法

(1) 桁端部構造への要求性能の明確化

支承や支承周辺の部材が頻繁に取り替えられてきた経緯を踏まえ、文献調査、実務設計者へのヒアリング等を通じ、鋼橋桁端部の、現行設計手法の問題点や課題点、レベル 2 地震動に相当する水平力作用に対する桁端部構造への要求性能を明確にする。

(2) 数値解析による桁端部の耐荷力挙動・地震時挙動の解明

鋼橋桁端部の耐荷力特性および地震時応答を、数値解析により明らかにする。

(3) レベル 2 地震動に対応した耐震設計法の提案

設計地震荷重を L1 地震動相当から L2 地震動へ更新するとともに、床版と桁構造の荷重分担を考慮した載荷方法を提案し、橋軸直角方向にレベル 2 地震動相当の地震力作用を受ける場合の耐震設計法を提案する。

(4) 維持管理性にも配慮した桁端部構造の提案

耐震性能の向上に加え、維持管理性をも考慮する場合の桁端部構造、耐震補強構造を提案する。

4. 研究成果

(1) 桁端部構造への要求性能の明確化

鋼 I 桁橋は桁橋の代表的な構造であり、薄い鋼板を溶接して組立てた I 型断面桁により床版を支持し鉛直荷重に抵抗するとともに、主桁間に荷重分配横桁を配し、さらに橋軸直角方向の水平力の作用により面外変形が生じないように、桁端部には端対傾構や端横桁等が設置される。採用実績の豊富な桁端部構造の 1 つに、隣接する主桁間の支点上補剛材を上弦材および下弦材により連結するとともに、上下弦材間に逆 V 形に L 字形断面の斜材を配置した端対傾構構造が挙げられるが、地震時の橋軸直角方向の水平力作用による損傷が顕著である（図-1）。



図-1 対傾構、支点上補剛材の地震被害

ここで、端対傾構形式の桁端部構造の設計では、風荷重や地震荷重等の水平荷重を上・下弦材に各々 1/2 ずつ作用させ、各部材に生じる応力度が許容応力度以下になるような断面が設計され、レベル 1 地震動相当を対象とする設計地震荷重は、設計水平震度（=0.2~0.3）がとられてきた。そのため、これら損傷発生の要因には、桁端部がレベル 1 地震動相当の設計荷重に対して耐震設計されていることも挙げられ、平成 24 年に改定された道路橋示方書には、レベル 2 地震動に対して十分な強度を期待できる桁端部構造として、端横桁を用いる充腹形式が例示されている。端横桁等の下端と主桁下フランジ間において支点上補剛材が溶接された主桁ウェブ（以下、ウェブギャップという）の高さが大きいと橋軸直角方向の慣性力を隣接する桁に伝達できないことから、ウェブギャップ部の高さを低くすることが望ましいとされている。

しかし、両形式とも、施工上の制約からウェブギャップ部を無くすことはできず、本研究開始直後の熊本地震においても、橋軸直角方向の地震力の作用により、端対傾構の面外変形、支点上鉛直補剛材や対傾構斜材の座屈などの多様な被害が報告された。したがって、支点上補剛材と主桁ウェブからなるウェブギャップ部を、維持管理性や腐食・疲労などの経年劣化に対して配慮した上で如何に耐震補強するのかが課題であることが改めて確認できた。

(2) 数値解析による桁端部の耐荷力挙動・地震時挙動の解明

代表的な鋼 I 桁橋として、設計例として取り上げられている単純合成桁橋を対象に、上部構造全体モデル、および桁端部から 800mm の範囲を取り出した桁端部モデル、を対象として水平荷重を静的に作用させる数値解析を実施した(図-2)。

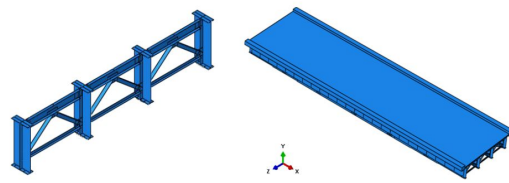


図-2 桁端部モデル，上部構造全体モデル

上部構造全体をモデル化した全橋モデルを図-2 に示す。これらのモデルは、両端が十分に剛性を有する橋台に支持された単純桁橋とし、支承条件として橋軸方向を固定 (F 端) と可動 (M 端) とし、橋軸直角方向を固定とする。桁端部における配置が非対称な、下横構もモデル化している。床版は複合材タイプのシェル要素でモデル化した。シェル要素の最上面にアスファルト舗装を設置し、それ以下の床版厚中央で上下 2 層に分けて、鉄筋断面と等価な断面になるような板厚を決定し、鉄筋層を上下 2 層の中央に挿入している。

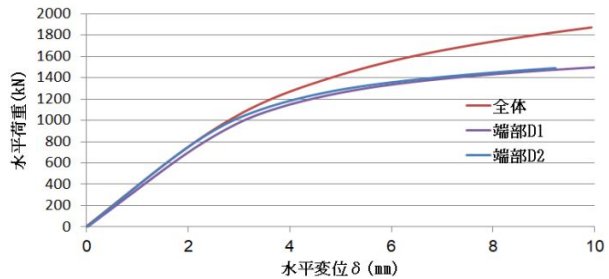


図-3 荷重 - 変位関係 (桁端部，上部構造全体モデル)

橋軸直角方向に作用させる水平荷重は、(A) 地震時の質量分布に応じた慣性力の作用を近似できるように、モデルの全要素に加速度を漸増させる方法、および(B)一様強制変位を床版の側面に載荷する方法、とした。なお、I 種地盤のレベル 2 タイプ II の地震動に相当する弾性域内の設計水平震度は 1.53 (4758 kN)である。

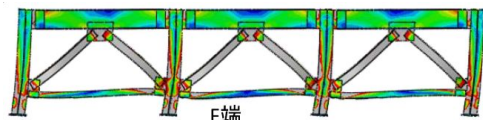
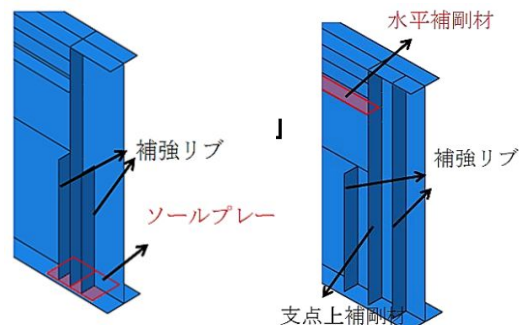


図-4 桁端部，ウェブギャップ部の変形

桁端部モデルの解析結果(図-2)によると、充腹形式に採用されている端横桁は十分な強度と剛性を示すこと、対傾構形式では斜材に座屈が生じ(図-3)、充腹形式に比べ剛性と強度が不足していること、斜材座屈が生じないように設計した対傾構形式および充腹形式では、せん断変形がウェブギャップに集中し、桁端部の剛性や終局耐力の決定にはウェブギャップの耐荷性能が支配的であることがわかった。しかし、桁端部モデルによると RC 床版や鋼桁からなる上部構造の変形が考慮できず、上部構造全体の耐荷挙動や地震時挙動、および水平荷重の載荷方法が、桁端部が終局に至る挙動や地震時挙動に与える影響が不明確であるという課題が挙げられた。一方、全体モデルの解析結果によると、桁端部では桁端部モデルと同様に、中桁と外桁のウェブギャップ部、斜材の降伏、座屈の順に損傷が生じるものの、桁端部付近における主桁の曲げ変形やねじり変形が、桁端部の損傷・変形の要因であり、桁端部モデルではこれらが考慮できず、上部構造全体モデルを用いることが有用であることがわかった。

(3) 補強構造の効果

上部構造全体モデルを対象に、レベル 2 地震動を入力する地震応答解析を実施した。その結果、対傾構形式では、支点上補剛材のウェブギャップ部と斜材のほぼ全領域およびガセットプレートが塑性化し、それ以外の桁端部材、主構部材が弾性内であることがわかった。また、一部損傷が生じた状態ではあるが、桁端部における反力の最大値は、約 4,300kN であり、設計水平震度 1.34 に相当する水平力がレベル 2 地震時に作用することが明らかとなった。



「補強リブ19-1/4」「補強リブ8-全長」

図-5 補強リブによる補強モデルの例

施工上の制約を考慮した桁端部の耐震(補強)構造として、支点上補剛材の剛性を増加させてモデル(補剛材 35)、支点上補剛材の両側(ソ

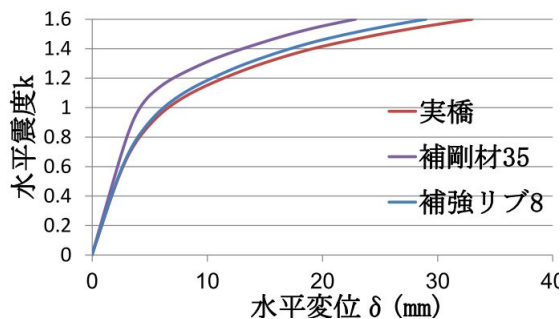


図-6 荷重 - 変位関係 (肉厚補剛材，補強リブ)

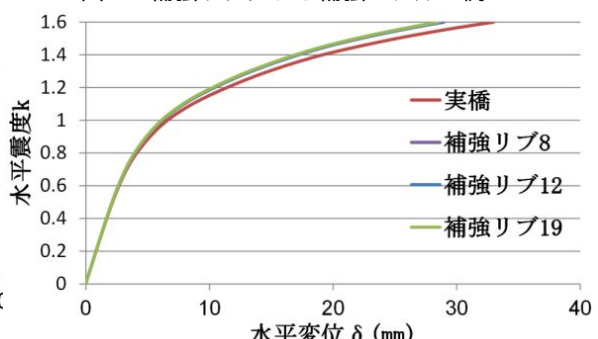


図-7 荷重 - 変位関係 (補強リブの剛性)

ールプレート内)に、異なる長さや支点上補剛材からの距離の補強リブを設置したモデル(補強リブ8,補強リブ19)の有効性をプッシュオーバー解析により検討した(図-4)。その結果,補強リブの設置は支点上補剛材への作用応力の低減に効果的であり,補強リブの設置位置が支点上補剛材に近いほど,桁端部全体の剛性や耐荷力に与える影響が大きいことがわかった(図-6,図-7,図-8)。

(4)レベル2地震動を考慮した耐震設計における水平荷重の載荷方法

(2)(3)で実施した,プッシュオーバー解析と動的応答解析の結果に基づいて,床版-主桁上フランジ間,主桁下フランジ-ソールプレート間の作用せん断力に着目し,レベル2地震動に対応した設計地震荷重の載荷方法を検討する。すなわち,設計地震荷重をL1地震動相当からL2地震動へ更新するとともに,床版と桁構造の荷重分担を考慮した載荷方法を提案し,橋軸直角方向にレベル2地震動相当の地震力作用を受ける場合の耐震設計法を提案する。

検討の結果,水平震度が0.2~0.6の範囲では,両者の作用比率は0.6でほぼ一定であった。すなわち,支点反力Pがかかるとすると,桁端部付近の床版と桁端部の間に0.6P,上弦材と下弦材の中心位置にそれぞれ0.36Pと0.04Pの水平荷重が作用し,床版を含めた鋼I桁上部に水平力の96%が作用することが明らかとなった。したがって,図-9に示すように,現行の設計法である,レベル1地震動に相当する設計地震力(水平震度0.2~0.3)を,桁端部の上弦材に50%,下弦材に50%作用させる設計法に代わり,レベル2地震動に相当する設計地震力(設計水平震度1.4)を桁端部の上弦材にのみ作用させて,桁端部構造を設計する方法が合理的かつ実状に近いと考えられる。

(5)まとめ

以上より,既存構造では端対傾構斜材や主桁下端と横つなぎ材との間の主桁部の塑性化・変形が認められ,レベル2地震動に対して安全性を確保するためには,補強を要することを明らかにした。また,鋼橋桁端部の地震時における橋軸直角方向挙動には,橋軸直角方向の水平力作用だけでなく,当初影響が小さいと考えていた複数の主桁を有することによる橋軸方向の変形,床版による鋼桁の変形拘束などが無視できないことが明らかになった。このことは,RC床版のモデル化およびRC床版と鋼桁との接続のモデル化が,橋軸方向の挙動に与える影響が大きいことを示している。さらに,既存構造の耐震性能向上のためには支点上補剛材の補強あるいは補強リブの追加・設置が有効であり,レベル2地震動に対する設計法として,レベル2地震用の設計水平震度を1.4とし,桁端部の上弦材にのみ作用させて,桁端部構造を耐震設計する方法を提案した。しかし,ウェブギャップ部を補強すると,支承および支承取り付け用ボルトなどが相対的に弱点となりやすく,より効率よく,桁端部構造への過大な地震力作用を低減するためには,支点上補剛材近傍に補強リブをボルト接合する方法以外の方策,例えば,桁端にダンパー(本研究ではベロースダンパー)あるいは犠牲部材を用いる方法を組み合わせることも有用であることがわかった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

頭井 洋, 田中賢太郎, 松村政秀, 佐合 大, 姫野岳彦, 桁の温度伸縮に対するベロースダンパーの疲労損傷評価, 鋼構造論文集, 日本鋼構造協会, 査読有, Vol.25, No.97, pp.13-23, 2018.3

山本淳史, 中西泰之, 松村政秀, 山口隆司, 犠牲部材を用いる鋼上路式アーチ橋の損傷制御に関する基礎的研究, 鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, 査読有, 第25巻, pp.335-342, 2017.11

Ahmed Arafat, Hiroshi Zui, Kentaro Tanaka, Masahide Matsumura, Kunitomo Sugiura, Cyclic loading test and analysis of U type steel bellows as energy absorbers for bridges, Proceedings of Constructional Steel, JSSC, 査読有, Vol.25, pp.319-327, 2017.11

松村政秀, 幸田真也, 小野 潔, 山口隆司, ボルト接合されたL字形材による鋼板パネルの補強効果に関する研究, 構造工学論文集, 査読有, Vol.63A, pp.749-762, 土木学会, 2017.3

松村政秀, 有山大地, 山口隆司, 水平荷重を受ける鋼I桁橋桁端部の耐荷性能に関する解析的研究, 構造工学論文集, 査読有, Vol.63A, pp.763-773, 土木学会, 2017.3

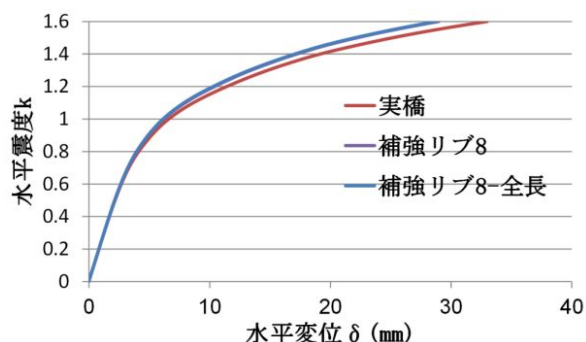


図-8 荷重-変位関係(補強リブの長さ)

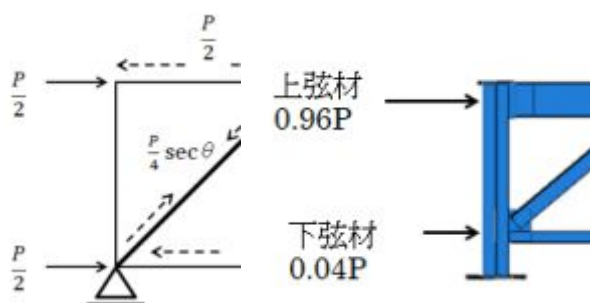


図-9 設計地震荷重の載荷方向(現行,提案)

潘 棟, 松村政秀, 杉浦邦征, 鈴木康夫, 水平方向に地震力を受ける鋼 I 桁橋の耐荷挙動に関する解析的研究, 鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, 査読有, 第 24 巻, pp.139-143, 2016.11

〔学会発表〕(計 10 件)

Masahide Matsumura, Kunitomo Sugiura and Yasuo Suzuki, Analytical study on transverse resistance of steel girder bridge with RC deck, Proceedings of the 12th Japanese-German Bridge Symposium, -, Munich, Germany, 2018.9

A.M. Arafat, Hiroshi Zui, Kentaro Tanaka, Hiroshi Shinmyou, Dai Sagou, Masahide Matsumura and Kunitomo Sugiura, Cyclic and Static Loading Test of U-Shape Steel Bellows to Be Used As Energy Absorber, Proceedings of the 9th International Symposium on Steel Structures ISSS-2017, -, Jeju, Korea, 1-4 November, 2017.11

Ahmed Arafat, Masahide Matsumura, Suzuki Yasuo and Kunitomo Sugiura, Application of steel bellows damper as energy absorber for bridges, The 30th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering November 2-4, 2017, Taiwan

Dong Pan, Masahide Matsumura, Kunitomo Sugiura and Yasuo Suzuki, Analysis research on resistance of steel I-shaped girder bridge to lateral earthquake load, The 30th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering November 2-4, 2017, Taiwan

田中賢太郎, 頭井 洋, 松村政秀, 佐合 大, 境田孝吉, 疲労試験および FEM 解析による U 型鋼製ペローズの疲労強度の検討, 第 20 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム, 6pages, 土木学会, 2017.7

Dong Pan, Masahide Matsumura, Kunitomo Sugiura and Yasuo Suzuki, Analysis research on resistance of steel I-shaped girder bridge to lateral earthquake load, Proceedings of the 11th Japanese-German Bridge Symposium, -, Aug.30-31, Osaka, Japan, 2016.8

〔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)研究分担者

研究分担者氏名 : 葛西 昭

ローマ字氏名 : (KASAI, Akira)

所属研究機関名 : 熊本大学

部局名 : 大学院先端科学研究部

職名 : 准教授

研究者番号 (8 桁) : 20303670

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。