

支持状態が変化した既設鋼桁端部の圧縮耐力の評価法

戸崎 隆之* 吉田 善紀*
中田 裕喜* 小林 裕介*

Evaluation Method of Load Carrying Capacity for an Existing Steel Girder End under Inappropriate Support Conditions of a Line Bearing

Takayuki TOSAKI Yoshinori YOSHIDA
Yuki NAKATA Yusuke KOBAYASHI

The girder end is an important part to support the train and girder load and to transmit the load to the substructure. On the other hand, the bearing under the girder end often suffer the various damage. The lean or slide of a substructure due to an earthquake or a flood, makes the support conditions of the line bearing inappropriate. Since such inappropriate support conditions cause the stress of the girder end which isn't considered in the design, the load carrying capacity of the girder end could be decreased. In this study, the load carrying capacity and the buckling behavior under the inappropriate support conditions of the line bearing were evaluated by conducting a loading experiment with the full scale specimens of a rivet deck girder.

キーワード：耐力，線支承，支持状態，座屈

1. はじめに

鋼桁において、支点部は上部構造からの荷重を支持し、下部構造へ伝達する極めて重要な部位である。一方で、支点部は支承自体の損傷^{1) 2)}、支持状態の変化、支承部まわりの部材の腐食^{3) 4)}・疲労き裂等^{5) 6) 7)}、種々の変状が生じやすい部位でもある。

これらのうち支持状態の変化は、図1に示す支点部に部分的に隙が生じる変状（以下、「支点部の隙」と呼ぶ）や、支点の支持位置が橋軸方向に移動する変状（以下、「支点移動」と呼ぶ）である。このような変状は出水・地震等の突発的な支持性能の低下により生じる下部工の傾斜や滑動に起因することが多い。

これら災害時に鋼鉄道橋では大規模・長期の復旧工事が予想される場合、暫定的に応急復旧を行い、運転規制を行いながら本復旧工事を実施、所定の性能を確認した後に正常運行を開始する場合が多い。しかしながら、支持状態の変化が鋼桁端部の圧縮耐力に及ぼす影響については、未だ十分に明らかになっていない。したがって、被災した鉄道鋼橋の供用可否の判断を含む応急復旧計画を策定するためには、被災後の支持状態が変化した鋼鉄道橋の圧縮耐力を適切に評価することが重要となる。

そこで本研究では、実物大試験体を用いた静的載荷試験を実施し、支点部の隙や支点移動を有している場合の鋼桁端部の座屈性状や最大荷重を把握し、鋼桁端部の圧縮耐力の評価法を検討した。さらに、支持状態が変化

* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

した鋼桁に対し、列車を走行させたことを想定した載荷ケースを実施し、支点部の隙や支点移動が生じた状態での列車の走行が桁端部に与える影響を検討した。

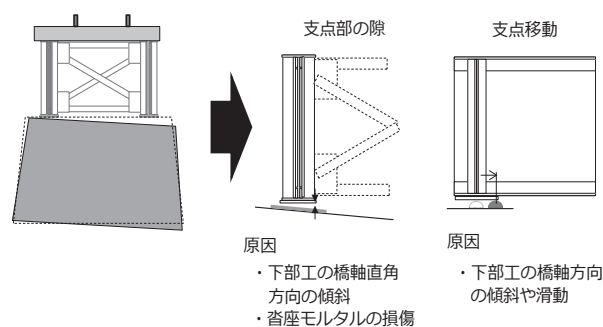


図1 支点部の隙および支点移動

2. 鋼桁端部の支持状態を変化させた載荷試験概要

2.1 試験体

本試験で用いる試験体は、支持状態が変化する事例が多く見られた線支承を有するリベット形式の上路プレートガーダー橋を対象とし、中でも特に事例が集中していた支間10～20mの内、支間12.9mの桁端部を模擬した。試験体の寸法は、鉄道橋の標準設計⁸⁾として用いられている実橋と同寸法とした。試験体形状および寸法を図2に示す。試験体の材質は対象としたリベット桁の材質と同程度の強度とするため、全てSS400で製作し、鋼材同士の接合には高力ボルトを用いた。

特集：構造物技術

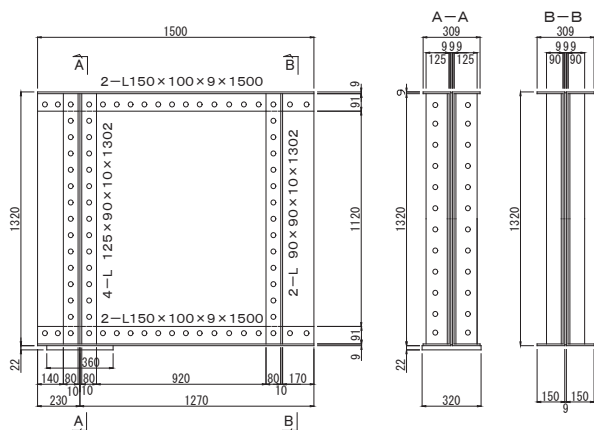


図2 試験体一般図 (単位：mm)

2.2 支点条件の設定

試験体の支点部には、上面をR加工した鋼材を支承として用い、線支承と同様の支持状態を模擬した。用いた支承は、前節と同様に鉄道橋の標準設計⁸⁾の実寸法を適用している。支持状態については、支点正常、支点部の隙、支点移動を模擬することとした。

(1) 支点部の隙

試験で模擬した支点部の隙について、図3に示す。支点部の隙は、支承上面のR加工部にテーパーを設けることで再現している。支点部の隙については、実際に発生している支点部の隙量の多くが数mm程度であることに留意し、本検討においては、隙量を10mmに設定することとした。なお、試験体据付後の隙量は、死荷重による沈下および据付精度に起因し、8.8mmとなった。

(2) 支点移動

試験で模擬した支点移動について、図4に示す。支点移動については、支点位置を橋軸方向(支間側)に移動させることにより再現した。支点移動量は165mmとしたが、これは対象とした構造諸元の温度収縮量を算出し、端補剛材中心からソールプレート端までの距離から減じて、これを許容最大移動量と仮定したものである。

2.3 荷重方法

荷重試験では、支点部を前節の方法で支持し、支点より離れた側の下フランジ下面にローラーを用いて単純支持とした。荷重は、門型鋼製フレームに設置した耐荷重5000kNの油圧ジャッキを用い、試験体の支点上の上フランジを鉛直下向きに荷重した。

荷重ケースは、試験体を3体(No.1～No.3)製作し、支持状態(支点正常、支点部の隙、支点移動)をパラメータとして表1のとおり実施した。

2.4 計測

ひずみと変位の計測位置を図5に示す。なお、図には本稿での分析に用いた計測位置のみを示している。

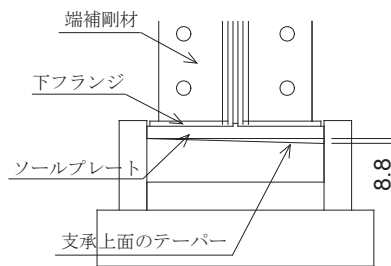


図3 支点条件 (支点部の隙) (単位：mm)

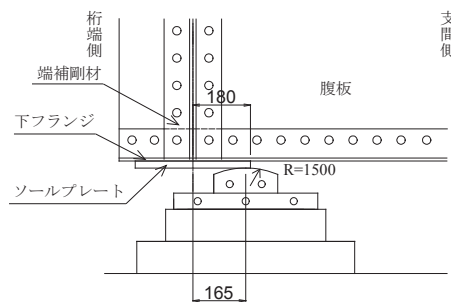


図4 支点条件 (支点移動) (単位：mm)

表1 荷重ケース一覧

荷重ケース	支点の支持状態	荷重方法	試験体
1	① 支点正常	最大荷重まで単調荷重	No.1
	② 支点部の隙		No.2
	③ 支点移動		No.3
2	Step1 支点正常 (災害前) Step2 支点部の隙 (災害後①) Step3 支点移動 (災害後②) Step4 支点正常 (支点部補修)	列車通過時の最大支点反力まで単調荷重	No.1

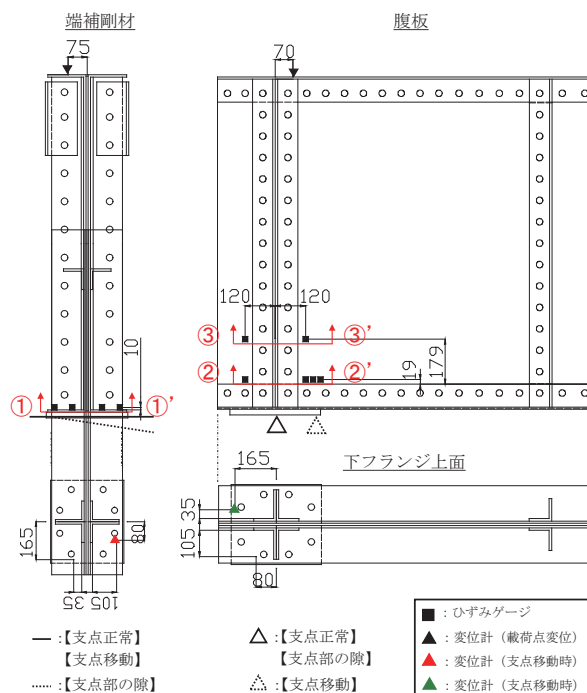


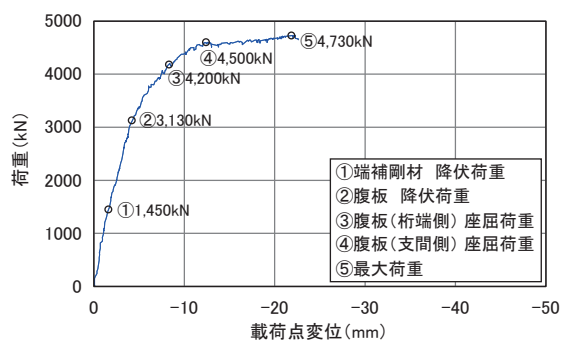
図5 計測位置図 (単位：mm)

3. 支持状態の変化が鋼桁端部の圧縮耐力に与える影響

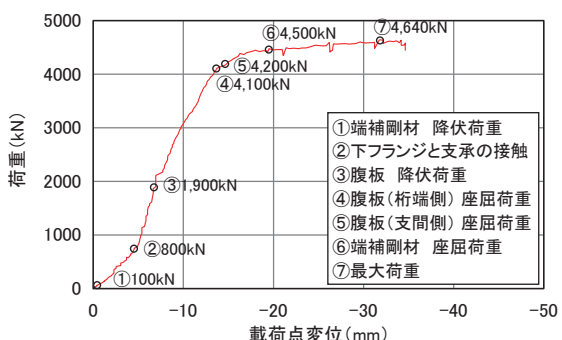
3.1 各試験体における最大荷重に至る挙動

各試験体を最大荷重まで載荷した荷重ケース1について、試験より得られた荷重と荷重点位置における鉛直変位の関係を図6に示す。なお、図には各試験体における各部材の降伏荷重、座屈荷重および最大荷重を併せて示している。また本試験における部材の座屈は、載荷時の動画より目視にて面外変形を確認することで判定した。

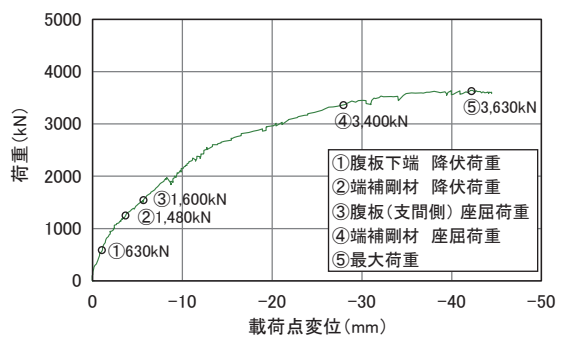
いずれの試験体においても、腹板が先行座屈した。各試験体の先行座屈した位置を図7に示す。先行座屈は、支点部が正常な試験体（以下：【支点正常】）と支点部に隙がある試験体（以下：【支点部の隙】）では、桁端側の腹板で下フランジアングル材上端より平均170mm程度上方で発生しており、座屈性状は両者とも同様であった。



(a) 【支点正常】



(b) 【支点部の隙】

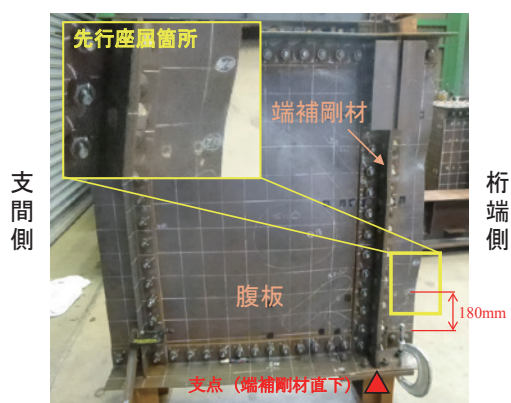


(c) 【支点移動】

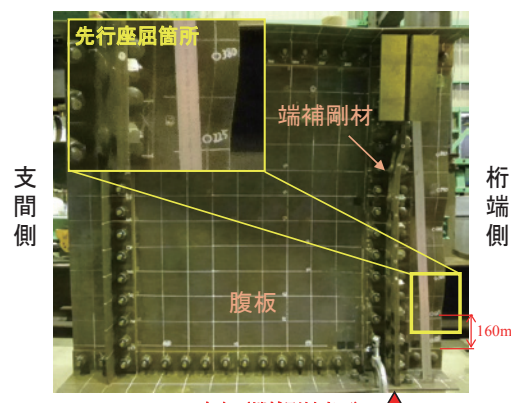
図6 荷重—荷重点変位の関係（荷重ケース1）

さらに腹板の座屈荷重は【支点正常】では、4,200kNで座屈が発生したのに対し、【支点部の隙】では4,100kNで座屈し、最大荷重を含め、【支点部正常】と有意な違いは見られなかった。

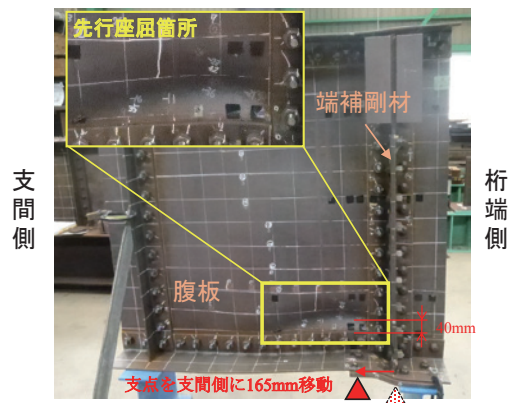
支点移動した試験体（以下：【支点移動】）では移動した支点直上の腹板で先行座屈し、その座屈荷重は1,500kNとなり、支点部が正常な試験体と比較して1/3程度で、最大荷重も大きく低下し、支点部に隙が生じた状態に比べ、耐力に与える影響が大きい結果となった。



(a) 【支点正常】



(b) 【支点部の隙】



(c) 【支点移動】

図7 各試験体 先行座屈箇所

特集：構造物技術

3.2 支点部の隙による影響

【支点部の隙】では、【支点正常】と比較して、端補剛材および腹板の降伏荷重が低下するものの、先行座屈の性状や最大荷重は同等であった。そこで支点部の隙が及ぼす影響を明らかにするため、各部材に発生するひずみ・応力を分析した。

3.2.1 端補剛材のひずみ

【支点部の隙】の端補剛材下端におけるひずみ分布の推移を図8に示す。100kNで端補剛材下端が局所的に圧縮降伏したが、これは支点部の隙に対して、下フランジが傾斜する過程で端補剛材が不均等に支持されていることにより、局所的に応力が集中したことに起因している。隙がなくなった800kNでは、端補剛材下端で圧縮降伏した範囲が幅方向に広がっているが、これは下フランジの傾斜に伴い、端補剛材下端の支承との接地範囲が拡大したことに起因すると考えられる。また腹板の先行座屈が生じた4100kNでは圧縮降伏した範囲がほぼ全幅に広がっており、隙がなくなった以降は、端補剛材下端全体で圧縮力を支持していることがわかる。

3.2.2 腹板の応力

座屈発生高さ位置付近（下フランジアングル材上端から179mmで図5における③-③'）における面内応力分布を、腹板の腹板降伏荷重時（1900kN）と腹板の先行座屈が生じた直前の荷重時（4000kN）について図9に示す。座屈発生高さの腹板位置では、【支点部の隙】を【支点正常】と比べると、いずれの荷重載荷時でも有意な応力分布の差は見られなかった。

以上より、支点部に隙がある場合、接地している側の端補剛材下端が局所的に降伏し、腹板の荷重分担が増加するものの、腹板座屈が生じる高さでは支点が正常な場合と同様な応力状態であるため、【支点部の隙】と【支点正常】での先行座屈の性状や最大荷重が同等の結果になったものと考えられる。

3.3 支点移動による影響

【支点移動】では、【支点正常】と比較して、腹板降伏荷重が低下するとともに、先行座屈の性状が異なり、座屈荷重および最大荷重が低下した。そこで支点移動が及ぼす影響を明らかにするため、各部材に発生するひずみ・応力を分析した。

3.3.1 腹板のひずみ

【支点移動】における腹板（支間側）座屈前の荷重（1500kN）での【支点移動】と【支点正常】の面内ひずみ分布の比較を図10に示す。【支点移動】の腹板下端において、支点が移動したことで、支点直上の腹板において、局所的に圧縮力に対する負担が増加し、非常に大きなひずみが発生した。

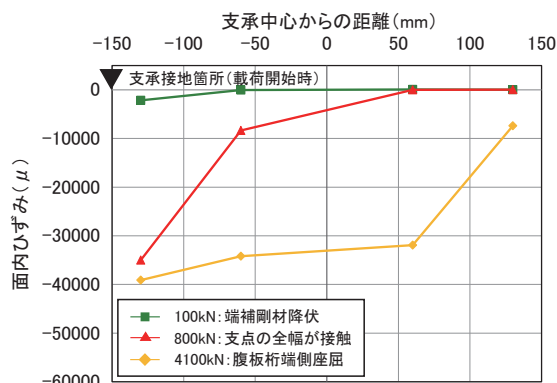


図8 端補剛材（①-①'）ひずみ分布

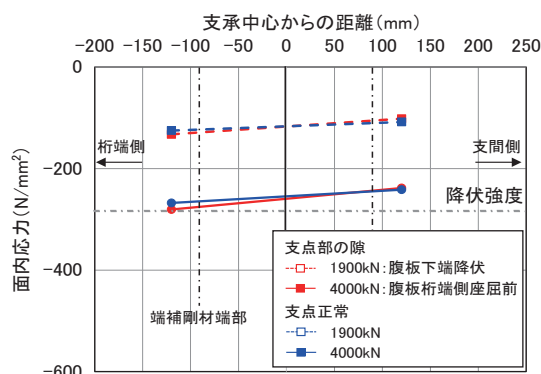


図9 腹板（③-③'）応力分布

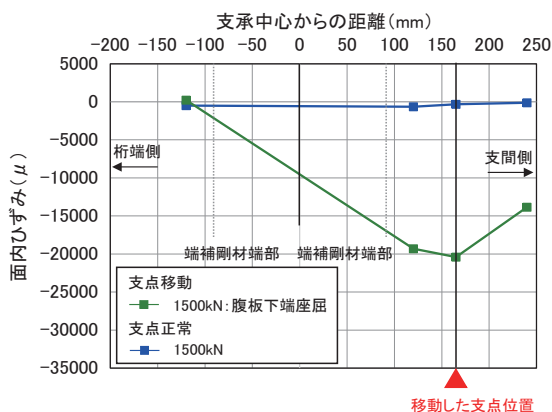


図10 腹板（②-②'）ひずみ分布

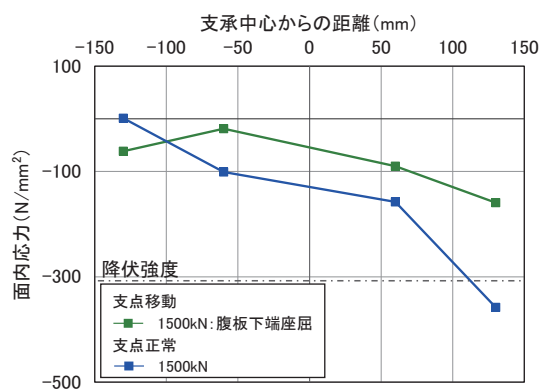


図11 端補剛材（①-①'）応力分布

3.3.2 端補剛材の応力

端補剛材下端の面内応力の分布について、【支点移動】における腹板座屈前の荷重時（1500kN）での【支点正常】と【支点移動】の比較を図11に示す。

端補剛材においては、【支点正常】と比較して、端補剛材に発生する面内応力が小さい結果となった。これは支点移動に伴い、局所的に腹板に圧縮力が集中し、端補剛材の荷重分担が減少したものと考えられ、端補剛材の柱部材としての圧縮耐力の寄与度が低下することで、最大荷重の低下につながったものと考えられる。

以上より、支点移動に伴い、腹板に圧縮力が集中し、端補剛材の荷重分担が減少することで、腹板の座屈荷重および最大荷重を低下させる結果になったものと考えられる。

4. 支持状態が変化した鋼桁端部の圧縮耐力の評価法

4.1 支持状態が変化した鋼桁端部の圧縮耐力の評価

支持状態が変化した鋼桁端部の圧縮耐力として、試験より得られた腹板の座屈耐力に着目し、計算から求まる座屈耐力（以降、計算座屈耐力とする）と比較した。

計算座屈耐力は、対象としたリベット桁の設計で用いられている鋼鉄道橋設計示方書（昭和31年）⁹⁾に基づき、圧縮許容応力度（柱の座屈応力度）に桁端部の有効断面積を乗じて求めた設計座屈耐力に、安全率1.77（基準降伏強度/許容応力度）を乗じることで算出した。計算座屈耐力と試験より得られた腹板座屈耐力との比較を表2に示す。

表に示すとおり、【支点正常】、【支点部の隙】では、試験で確認した座屈耐力と計算座屈耐力の比が、2.42と2.36とそれぞれ大きく上回る結果となった。これらの要因として、鋼鉄道橋設計示方書（昭和31年）⁹⁾では、設計座屈耐力を算出するときの有効断面積に、腹板、腹板と端補剛材との間のフィラープレート等を考慮しないこととしており、設計計算では有効断面積を過小に見積もっていることが大きな要因として考えられる。

【支点移動】では、試験における腹板の座屈耐力が計算座屈耐力を若干下回るものの、概ね同様の値となった。【支点移動】においては、【支点部の隙】と比べ、座屈荷重が大きく低下したが、これは3.3.2項で示した通り端補剛材での荷重分担が小さかったことによる要因が大きいものと考えられる。

以上より、鋼桁端部の圧縮耐力は、リベット桁の設計⁹⁾で用いられる設計座屈耐力を安全率で割り戻した値により、支点部に隙が生じた状態では十分に安全側に評価される。また座屈耐力が大きく低下した支点移動した状態についても同程度に評価可能である。これは当時の設計では設計座屈耐力を算定するうえでの有効断面積を過小に見積もっていることが大きな要因となっている。

4.2 支持状態が変化した列車荷重の載荷履歴がその後の桁剛性に与える影響

前節において、桁端部は支持状態が変化した場合でも設計座屈耐力を有していることを確認した。つまり列車荷重が作用したとしても桁端部は座屈しないことがわかった。しかし、図6に示すとおり、支点部の隙および支点移動させた各支持状態において、設計荷重相当の載荷荷重で局所的な部材の降伏が確認された。そこで局所的な部材降伏が桁剛性に与える影響を確認するため、列車荷重の載荷を行った載荷ケース2のStep1～Step4における桁剛性を分析した。なお、表1に示す載荷ケース2における載荷stepの考え方の詳細を以下に示す。

Step1は災害前の状態を想定したものである。Step2とStep3については、災害により支持状態が変化した状態で、列車を走行させたことを想定している。なお、実際はどちらかのみが生じることが多く、Step2とStep3の状態の両方を経験することはないと考えられるが、本検討では安全側の評価として両方の状態を経験させた。Step4については、その後に支点部を補修した上で列車を走行させたことを想定したものである。このようなStep1～4の支持状態で設計荷重相当の載荷を行うことで、支点部の隙や支点移動を生じた状態で列車を走行させたことの影響を検討した。

表2 設計計算で求まる座屈耐力と試験結果との比較

設計圧縮耐力				試験結果 (kN) (【】は試験結果 / 計算座屈耐力)		
許容圧縮 応力度 σ_a (N/mm ²)	有効 断面積 (mm ²)	設計 座屈耐力 (kN)	計算座屈耐力 設計座屈耐力×1.77 (kN)	【支点正常】	【支点部の隙】	【支点移動】
119.5	8200	980	1735	4200 【2.42】	4100 【2.36】	1600 【0.92】

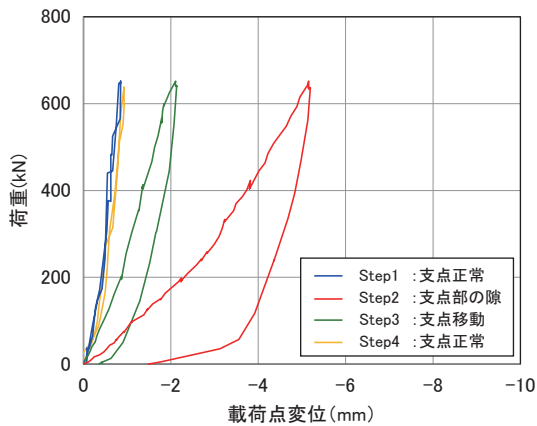


図 12 荷重－載荷点変位関係（載荷ケース 2）

試験より得られた荷重と載荷点位置における鉛直変位の関係を図 12 に示す。Step2(災害後①)および Step3(災害後②)では、支点部の隙および移動の影響で載荷点変位が増加する結果となったものの、Step2 および Step3 の載荷履歴を経験した Step4 (支点補修後)と Step1 (災害前)の桁剛性に有意な違いは見られず、どちらも載荷点変位に残留変位はほとんど発生せず、鋼桁端部は弾性に近い挙動を示す結果となった。

したがって、列車荷重の範囲であれば、支持状態が変化した載荷履歴により部材が局所的に降伏した場合においても、支点を正常に戻した後の桁剛性に及ぼす影響は小さいといえる。なお、実際の列車運行に際しては、腐食による断面欠損等の影響や、支持状態が変化した状態において長期に供用した場合は疲労き裂を誘発する可能性にも留意する必要がある。また、図 12 に示すように列車荷重の載荷でも桁上で数 mm の鉛直変位を生じるため、列車の走行安全性にも別途留意する必要がある。

5. 結論

本研究では、鋼桁支点部の隙や移動を模擬した静的載荷試験を実施し、各々の支持状態に応じた鋼桁端部の座屈性状、最大荷重を把握し、鋼桁端部の圧縮耐力の評価法を検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 支点部に隙がある状態では、端補剛材の片側に局所的に応力が集中し、載荷の初期段階で端補剛材が降伏したものの、座屈荷重および最大荷重は、支持状態が正常な場合と比べて、有意な違いは見られず、鋼桁端部の耐力に及ぼす影響は小さい結果となった。また先行座屈位置も支持状態が正常な状態と同様であった。
- (2) 支点移動した支持状態においては、移動した支点直上の腹板に応力が集中したことで、支点直上の腹板

で先行座屈した。さらに支持状態が正常な場合と比べて、座屈荷重・最大荷重が低下し、鋼桁端部の耐力に及ぼす影響は大きい結果となった。

- (3) 鋼桁端部の圧縮耐力は、リベット桁の設計で用いられる設計座屈耐力を安全率で割り戻した値により、支点部に隙が生じた状態では十分に安全側に評価される。また座屈耐力が大きく低下した支点移動した状態についても同程度に評価可能である。
- (4) 列車荷重の範囲であれば、支持状態が変化した載荷履歴により部材が局所的に降伏した場合においても、支点を正常に戻した後の桁剛性に及ぼす影響は小さい。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

謝 辞

本試験の計画・実施にあたっては、東京鉄骨橋梁(株) (現：日本ファブテック(株))の金尾光志氏、細見直史氏に多大なご協力を頂きました。ここに記して心より謝意を表します。

文 献

- 1) 東日本大震災鋼構造物調査特別委員会 報告書，土木学会鋼構造委員会，2012.1
- 2) 安原真人，市川篤司，村田清満，杉本一朗，河合治：鋼鉄道橋支承部の損傷と復旧，橋梁と基礎，第 30 巻，第 8 号，pp.65-68，1996
- 3) 名取暢，西川和廣，村越潤，大野崇：鋼橋の腐食事例調査とその分析，土木学会論文集，No.668/I-54，pp.299-311，2001.1
- 4) Vo Thanh Hung，永澤洋，佐々木栄一，市川篤司，名取暢：腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷実験および解析，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.141-151，2002.7
- 5) 西田寿生，金裕哲：鉄道上路プレートガーダー下フランジ山形鋼に生じた疲労き裂発生要因に関する検討，土木学会年次学術講演会概要集，I-518，pp.1035-1036，2011.9
- 6) 鎌田渚，木村元哉，山口善彰，矢野恵美子：鋼鉄道橋支承部下フランジのき裂発生機構，土木学会年次学術講演会概要集，I-68，pp.135-136，2008.9
- 7) 西田寿生，木村元哉，山内彰，公門和樹：上路プレートガーダー（リベット構造）の支承部における下フランジ山形鋼のき裂発生メカニズム，構造技術資料（JR 西日本），Vol.4，pp.31-40，2015.10
- 8) 小野田滋：鉄道構造物探見，JTB，2003.1
- 9) 日本国有鉄道：鋼鉄道橋設計示方書，1956