

地震時のダメージコントロールを目的とした 鋼橋桁端部の挙動の評価

玉越隆史・青木康素・原田英明・藤本圭太郎

1. はじめに

平成28年4月の熊本地震では、極めて強い地震が短期間に複数回生じた。このような場合、道路橋では被災状況の詳細な把握や損傷に対する機能回復措置などを行う時間的猶予のない中で複数回の大きな地震による作用を受けることとなる。

一方、過去の地震による鋼橋の被害は、主桁や主構に顕著な耐荷力低下が危惧されるような部材の大規模な塑性化や破断などはほとんど例が報告されていない。しかし、下横構や対傾構といった耐荷力上は副次的な部材が塑性化する際に、それが接合されている主桁本体や支点部の垂直補剛材といった耐荷力上重要な部材や部位の損傷を誘発したと思われる事例が報告されている（写真-1）。

現在の道路橋設計基準は、特に大きな地震のような作用に対し、条件にもよるが多少の損傷は許容されるとしている。しかし、短期間に複数回の大きな作用を受けることを前提とすれば、損傷による耐荷力低下は可能な限り抑え、繰返作用にも被害が拡大しない安定した耐荷力を発揮でき、損傷した場合に外観の状況のみでも残存耐荷力や再度の作用に対する挙動を容易に判断できる構造であることが望ましい。さらに、道路橋は今回の示方書改定で設計供用期間の標準が100年と明記化された。このため、主部材の交換や主たる構造形式の変更を伴う大掛かりな復旧工事を必要とせず機能回復が行えるような損傷に設計段階で配慮して確実に誘導する、すなわちダメージコントロールを行うことも重要と考えられる（図-1）。

本文は鉸桁形式の鋼橋の支点部となる桁端部に着目し、これまでの大規模地震時の損傷形態から残存耐荷力の観点で現行設計法の課題を抽出した上で、実橋試験と解析によりその挙動等を確認し、耐荷性、復旧性等の面により信頼性の高い損傷形態に誘導するための方法を見出すことを目的とした基礎的な検討を行ったので報告する（図-2）。



(a) 支点上垂直補剛材の変形1 (b) 支点上垂直補剛材の変形2



(c) 主桁下フランジの変形 (d) ガセット板の変形

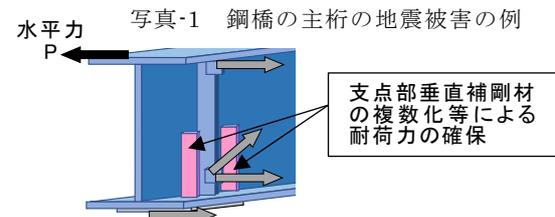


図-1 鋼橋桁端部のダメージコントロールのイメージ

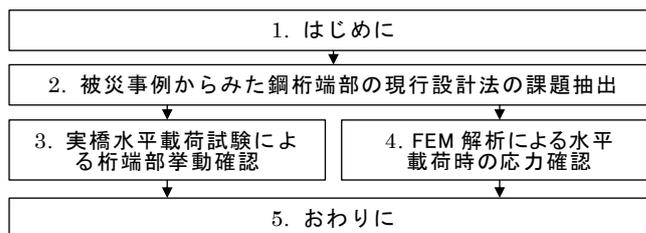


図-2 本報文の構成

2. 被災事例からみた鋼桁端部における現行設計法の課題

鉸桁形式の鋼橋の設計は、主桁と荷重分配横桁などの主たる構造部材のみを棒モデルで考慮した平面格子解析モデルでこれらの部材断面を決定し、主桁の支点部の構造や主桁同士が立体的に機能するための対傾構や横構は別途設計される。また、支点部は主桁が鉛直荷重に対して抵抗できるように十字断面の圧縮柱（以下「十字柱」という。）として必要な断面が確保されるよう垂直補剛材が設計される。

一方、横構や対傾構をトラス構造とする場合には、それらの主桁とその接合部は実際にはボルトや溶接で剛結されるものの設計上はピン接合に単純化したモデルで設計される。さらに端部対傾構は主桁ウェブや垂直補剛材に接合されることが一般的である。しかし、これら垂直補剛材が単純な十字柱として鉛直力のみ考慮されており、支点部の耐荷力に及ぼす影響については不明な点が多く、設計では考慮されていない。

写真-1に示した損傷事例は、いずれも支点部又はその近傍の主桁ウェブ、垂直補剛材、主桁に取付くガセット板に塑性変形が生じており、主に鉛直力でしか設計されていない補剛構造に対して大きな水平力や水平方向の強制変位が作用したことが影響している可能性が考えられる。

3. 実橋水平載荷試験による桁端部挙動確認

3.1 実橋水平載荷試験の概要

本研究は、地震時の水平方向に変位する状況における鋼桁橋の支点部の各部の応答を把握することを目的に、国土技術政策総合研究所が所有する試験橋梁（図-3、4主桁の単純合成桁。昭和53年発刊土木構造物標準設計を参考に設計）を用いて実物大の載荷実験を行った。

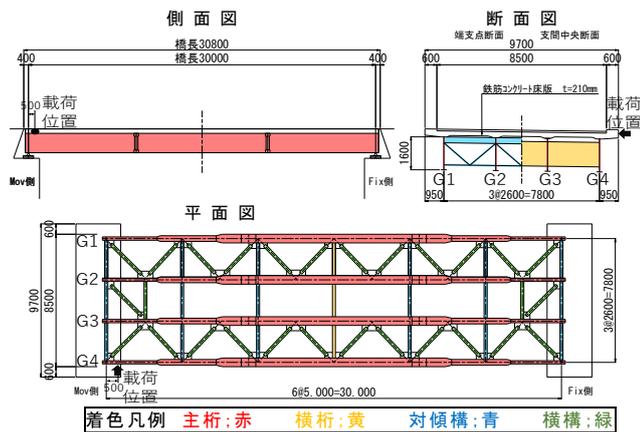


図-3 試験橋梁の一般図と水平載荷位置



写真-2 桁下状況



写真-3 水平載荷状況

地震時に上部構造に作用する慣性力の向きや大きさは様々である。ここでは、今回は現行の設計法である支点上補剛材による十字柱としての設計の想定に最も顕著な乖離が生じると考えられる条件として、床版位置で橋軸直角方向に水平荷重を載荷することとした。この場合、主桁端部の下フランジが支承により横方向変位が拘束されつつ、二次部材（対傾構）との接合部の存在によって支点上の垂直補剛材による十字柱には設計で考慮されない大きな曲げが導入されることが想定される。

実験では、床版への水平荷重は可動側支承から500mm位置の床版側面にジャッキをセットし、水平方向へ加圧することで、床版の水平方向移動が桁端部の変形挙動に及ぼす影響を把握した。

3.2 主桁ウェブの水平挙動と支点上の主桁下フランジの鉛直方向挙動

図-4は水平方向に載荷した際の主桁ウェブの水平方向変位を示している。主桁ウェブ高さ方向毎の各位置での水平移動量は、水平方向荷重が80kN付近で変位の傾きが緩やかになった。

図-5は主桁下フランジの鉛直方向変位を示している。水平方向変位（図-4）と同様に水平方向荷重が80kN付近で鉛直方向の主桁下フランジ2の変位が急変していることが確認できる。これらは支承のサイドブロックとソールプレートが接触したことが原因で生じた挙動である。

また、図-4によると上記接触後の主桁ウェブ高さ方向の各位置における最大荷重160kN時の水平移動量は、下フランジ付近（主桁ウェブ1）で最も小さく約5.9mm、主桁ウェブ中央（主桁ウェブ2）及び上フランジ付近（主桁ウェブ3）でほぼ同様の約6.6mmの変位を示した。このことは、床版に水平力が作用すると支承部を支点とする片側自由端の変形挙動ではなく、両端を固定とするせん断挙動に近くなっていることが考えられる。

一方、図-5によると水平方向載荷により主桁下フランジがガセット板側（主桁下フランジ2,3）で下方、載荷側（主桁下フランジ1,4）で上方に変位した。また、主桁下フランジ2の変位はその他の変位が上方へほとんど変化していないのに対し、40kNから100kN載荷までに0.6mm以上も変位が急増した。これは、支承のサイドブロックの接触による影響により、サイドブロックを支点と

した回転変形に伴う浮き上がりが生じていると考えられる。この現象は写真-1(c)に示す損傷事例の破壊モードと類似しており、水平力による移動が拘束されていない床版に横方向の変位が生じた場合、下端が固定された主桁端部では下フランジが回転変形し、損傷が生じる可能性があることを意味する。

このように、支点部の回転や浮き上がりに対する支承の遊間の構造・量によっても作用の条件が異なるなど、現在耐荷力設計上は考慮されていない構造細目の影響も無視できないことがわかった。また、水平方向の荷重に対して支点部を含む抵抗の構造が対称でないことに起因して、支点部の主桁ウェブや支点上の垂直補剛材を含む柱構造にはねじれの影響も生じることが確認できた。実際の地震作用において上部構造全体が均等に水平変位することは考えにくく、水平力に対する支点部の抵抗機構を考える場合、このような水平力の分布の影響も考慮する必要があると考えられる。

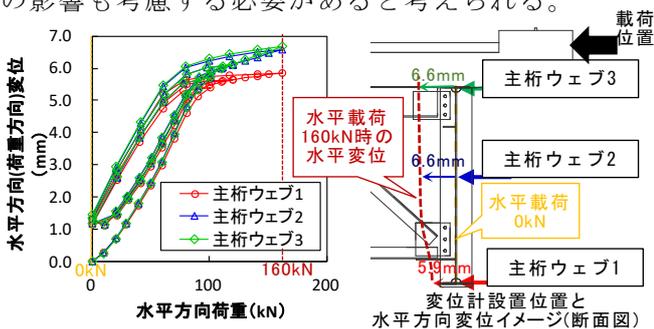


図-4 水平荷重載荷時の主桁ウェブの水平方向変位

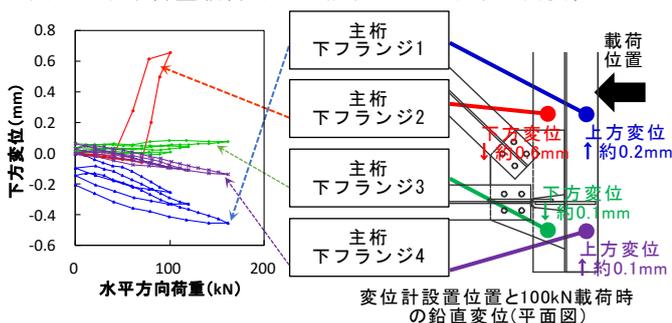


図-5 水平荷重載荷時の主桁下フランジの鉛直方向変位

3.3 端部対傾向及びガセット板の主ひずみ

端部の対傾構及びその取付構造が水平力に対してどのように応答し、設計でヒンジを仮定している格点が剛結されていることの影響や主桁ウェブにどのような作用を及ぼすのかを明らかにするため、3軸ゲージの計測結果より主ひずみとその角度を算出し、水平載荷時の変形挙動を確認した。図-6に結果の例を示す。

弦材、斜材の両端の主ひずみを比較すると、上

弦材では載荷側で圧縮、隣接桁側で引張の異なる主ひずみが生じており、上弦材が軸力のみを伝える部材として成立していないことがわかる(図-6①)。

また、両斜材は両端で同程度かつ他の部材よりも大きな主ひずみが生じており、床版の水平方向の移動に伴う桁の面外曲げ変形(図-4)と上弦材の水平移動は、斜材への影響が大きいモードであることが考えられる(図-6②)。下弦材の両端の主ひずみは、G3主桁(隣接桁側)での主ひずみが大きく、その角度も軸方向とは大きく異なっていることから、せん断作用が卓越した挙動となっている。

斜材の両端が取付けられているガセット板は、ガセット板内で正負の異なるひずみが確認されることから、弦材と斜材の挙動により回転変形が生じている(図-6③)。現行設計では取扱いの簡素化として剛結を回転自由のピン支持に置き換えている。しかし、対傾構の格点構造が剛結されていることで対傾構の斜材には大きな曲げが発生し、その結果、格点から主桁ウェブや垂直補剛材にも曲げ応力や強制変位が生じることが確認できた。剛結による影響の程度は主桁や対傾構、ガセット板の板厚や寸法などの構造諸元によって千差万別であると考えられる。特に支点構造部では、支点による拘束の影響もあり、他の部材よりも複雑な応力状態となり、少なくとも支点部構造には鉛直力のみが作用する両端固定の単純な十字柱とは乖離した応力状態になる可能性が高い。

また、地震時などで大きな水平力が作用する場合に、主桁ウェブが対傾構の接合部を支点として屈曲するような挙動となるために曲げによる垂直補剛材の局部座屈が生じ、鉛直力に対する柱としての耐荷力を喪失する危険性も考えられる。

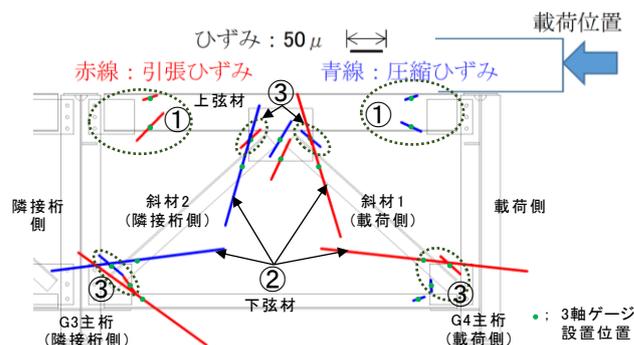


図-6 最大荷重160kN載荷時の端部対傾構及びガセット板の主ひずみ

4. FEM解析による水平載荷時の応力確認

試験橋梁では実際の支承部特有の複雑な遊間や対傾構や主桁をはじめとした部材がそれぞれに初期不整を有しているなど様々な不確定要因がある。このため、実験で確認された桁端部の挙動の検証に加えて、支承部の遊間や初期不整などの影響を除いた単純な構造で水平力に対する各部の応答を確認するために試験橋梁の構造を単純化した部分モデルによる弾塑性FEM解析を実施した。

死荷重のみを載荷した応力状況を図-7 (a)、死荷重と水平力を漸増載荷させた解析結果のうちの3,300gal時点の応力状況を図-7 (b) に示す。応力コンターは部材内の降伏前後を視覚的に判別できると考え、ミーゼス応力^{*}分布とした。

死荷重のみでは主桁とその垂直補剛材に発生する応力は低く、横部材の応力はほとんど発生しなかった (図-7 (a))。

水平力を漸増載荷させると最初に支点上の垂直補剛材の支点付近が局所的に降伏し、3,300galの加速度を与えた時点 (図-7 (b)) で、追って横部材の取付部でも降伏 (図中の赤色部分) が顕著となった。また、水平力除荷後は写真-1 (a)、(b)、(c) と類似した主桁フランジや垂直補剛材の支点付近に残留変位が確認された (図-8)。

以上より、主桁ウェブは比較的高い応力が集中した下横構等の横部材取付部付近に変形が生じていることから残存耐荷力の低下が懸念される。このことは、実橋より不確定要素の少ない解析でも、横部材の取付け方法やその位置、補剛材、ガセット板の形状等の影響により桁端部は複雑に挙動しており、課題に示した現行の支点上主桁断面の設計の前提条件である鉛直荷重に対する十字柱の単純な挙動とはなっていないと考えられる。

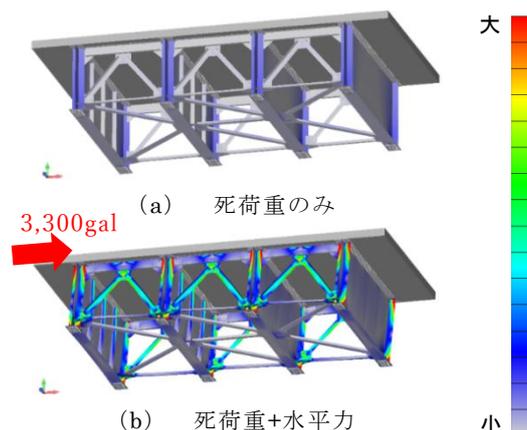


図-7 FEM解析による上部構造変位とミーゼス応力

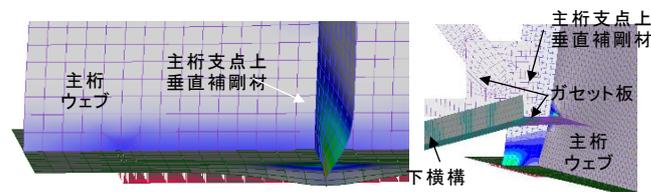


図-8 FEM解析による支点上の垂直補剛材の残留変位

5. おわりに

実橋水平載荷試験では、支承特有の複雑な遊間等の影響を受けるため、柱耐力を評価した設計法に加え、構造細目についても設定する必要があることなどがわかった。一方、実橋よりも不確定要素が少ない単純モデルのFEM解析でも、実橋水平載荷試験と同様に鉛直荷重に対する十字柱の単純な挙動とはなっていないことがわかった。

本報文は、一方向のみの水平載荷を対象としたが、地震動は予め予期できない方向から作用する。このため、今後は十字柱に対傾構等の横部材が取付けられた状態であらゆる方向の水平力を考慮した耐荷性能の評価法を解析ベースで検討し、実橋モデルの解析や実験などを重ね、ダメージコントロールの考え方を取り入れた仕様を構築する予定である。

玉越隆史



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員、博士 (工学)
Dr. Takashi TAMAKOSHI

青木康素



研究当時 土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ研究員、現 阪神高速道路(株)
Yasumoto AOKI

原田英明



研究当時 土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ専門研究員、現 (株)JPビジネスサービス、博士 (工学)
Dr. Hideaki HARADA

藤本圭太郎



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 交流研究員
Keitaro FUJIMOTO

*土木用語解説：ミーゼス応力