

地震等の水平荷重に対する損傷制御に向けた 鋼上部構造の全体挙動の評価

小野健太・澤田 守

1. はじめに

道路橋において車両等の荷重を直接支持する上部構造は供用性や地震後の復旧性の観点より、塑性化させないように設計することが標準とされている。しかし、平成28年の熊本地震における橋梁被害の中で、鋼I桁構造の主桁支点部の局所的な変形や横構、対傾構等の座屈変形が生じた事例等が報告されている（写真-1）。

このような水平荷重に対する上部構造の損傷は設計上の想定と実挙動との乖離が原因となって生じている可能性がある。鋼I桁の水平荷重に対する設計において、例えば主桁を相互に連結させる対傾構や横構は簡便な設計計算により照査が行われている（図-1）。しかし、上部構造の水平荷重に対する抵抗特性に関して設計と実態の関係を実験的に確認した事例はほとんどなく、設計上仮定している部材ごとの荷重分担は必ずしも明確ではない。

近年では数値解析ツールの進歩により、解析の計算時間や手間の課題が解消されつつある。これまで一般に用いられてきた簡易な設計計算にとどまらず、鋼上部構造の立体挙動を考慮した解析を行うことで、先述した上部構造の損傷を回避できる可能性がある。また、設計で想定する以上の作用により塑性化が生じても橋の供用性に及ぼす影響が限定的な状態に留めることで、地震等による被害を小さくできる可能性がある。

そこで本報文では鋼桁形式の鋼上部構造を対象として、その全体挙動と上部構造を構成する部材の損傷が橋の耐荷性能に与える影響を把握することを目的として、横構の有無をパラメータとした水平方向の載荷試験を行った。また、これに対応する3次元FEM解析を実施し、終局に至るまでの応答や破壊性状の評価を行った。本報文はその結果を報告するものである。

2. 実橋水平載荷試験による全体挙動の確認

2.1 実橋水平載荷試験の概要

地震時の水平方向に荷重を受ける鋼桁橋の全体挙動を把握することを目的に、国立研究開発法人土木研究所が所有する試験橋梁を対象として水平方向の載荷試験を実施した。対象とする試験橋梁は図-2に示す4主桁単純活荷重合成桁橋であり、昭和53年発刊土木構造物標準設計を参考に設計されている。支点は固定側が鋼製支承、可動側がゴム支承である。

図-2に示す通り支間中央位置の床版側面に設置した油圧ジャッキにより、水平方向へ載荷した



(a)横構の座屈

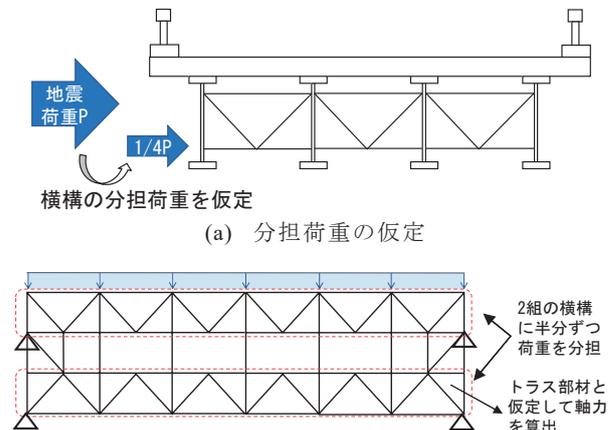
(b)対傾構の座屈



(c)支点上垂直補剛材の変形

(d)主桁腹板の変形

写真-1 鋼I桁の損傷事例



(a) 分担荷重の仮定

(b) 部材断面力の算定

図-1 現行設計法のイメージ（横構の例）

(写真-2)。試験ケースは横構の有無が鋼上部構造の全体挙動に与える影響を把握するため図-3に示す3ケースの構造系を選定した。CASE1は現行の通常構造系であり、CASE2は現行の構造系から水平抵抗への寄与が大きいと推定される桁端部の横構を残し、他の中間部の横構を省略した構造系である。また、CASE3は全横構を省略した構造系である。

2.2 実橋水平載荷試験の結果

図-4に水平方向に載荷した際の載荷荷重と載荷点水平変位の関係を示す。いずれのケースにおいても載荷荷重130kN付近で荷重変位関係の勾配が大きく変化した。この荷重点付近で支承のサイドブロックと上沓が接触していることが確認されており、接触後はゴム支承の変形をサイドブロックが拘束することで固定支承に近い挙動となり、荷重変位関係の勾配が変化したと考えられる。また、図-4から横構の有無による荷重変位関係の差は小さく、水平剛性への影響はあまり無いと言える。

図-5に横荷重120kN載荷時（サイドブロック接触前）の横構の軸力分布を示す。CASE1の結果より横荷重に対して外側主桁間に設置された2組の横構がほぼ均等に抵抗しており、従来から用い

られている2組の横構が均等に荷重分担するとした実際の設計の考え方との乖離は見られない。また、CASE2とCASE1の結果を比較すると桁端部の横構軸力はほぼ同等となっている。CASE1の中間部の横構軸力は桁端部より小さく、中間部の横構については横荷重に対する抵抗寄与度は小さいと言える。

表-1は桁端部における横構の軸力から橋軸直角方向の成分を抽出し、横構を介して支承に伝達される横荷重の分担割合を示したものである。横構の設計においては横荷重の25%を考慮し、設計する事例もある。今回の試験ではこのような荷重分担の考え方が限られた載荷・構造条件の中ではあるが、安全側となっていることが確認できた。

図-6に横荷重120kN載荷時の端対傾の構軸力分布を示す。全横荷重に対して、3組の端対傾構で

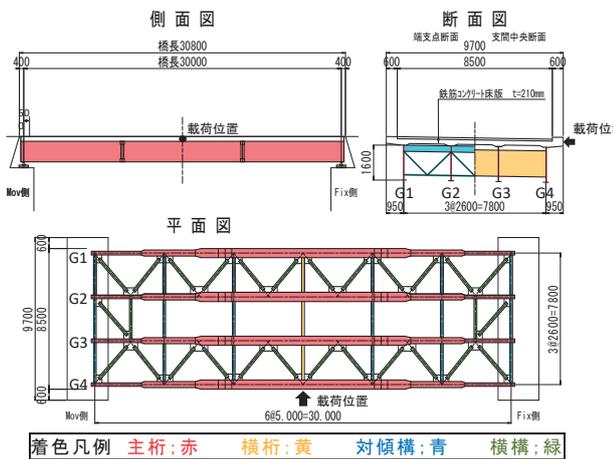
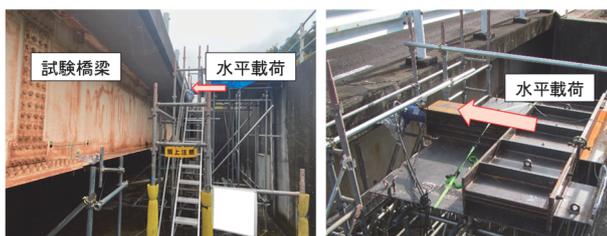


図-2 試験橋梁の一般図と水平載荷位置



(a) 全体図 (b) 載荷ジャッキ

写真-2 載荷試験の状況

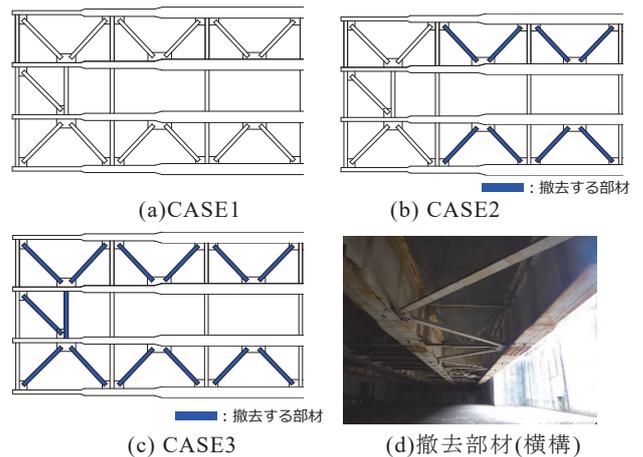


図-3 試験ケース

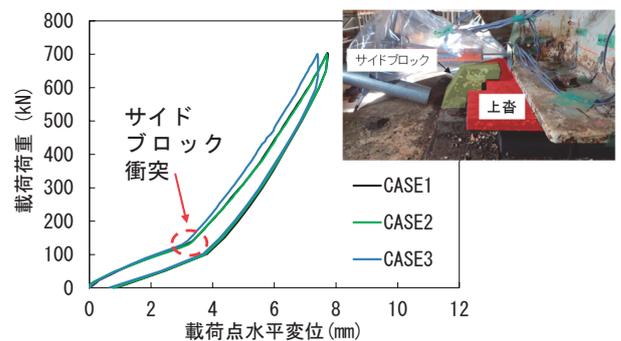


図-4 荷重変位関係

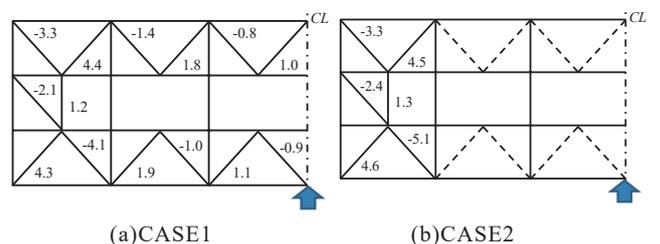


図-5 120kN載荷時の横構軸力分布 (単位: kN)

同等の軸力が発生している。また、各ケースで端対傾構の軸力を比較すると、全横構を省略したCASE3ではCASE1と比べ端対傾構の軸力がわずかに増加する傾向が見られる。これは、横構の荷重分担がなくなったことにより、横荷重が床版から端対傾構を介して支承へと伝達されるためと考えられる。

3. FEMによるプッシュオーバー解析

3.1 解析概要

試験橋梁では荷重条件の制約から弾性範囲内の応答挙動しか評価し得ず、終局に至るまでの挙動を把握できない。そこで、試験橋梁の水平荷重試験により得られた試験値との比較を行うことにより、3次元FEM解析の妥当性を検証した上で、地震動を想定した水平荷重解析を行い、終局に至るまでの応答挙動や破壊性状の評価を行った。

3.2 再現解析

解析モデルの概要を図-7に示す。床版はソリッド要素、主桁や横桁、対傾構、横構はシェル要素で、鉄筋は埋め込み鉄筋要素としてそれぞれモデル化した。要素サイズは桁端部で辺長30mm程度、それ以外の箇所では200mm程度である。主桁と床版コンクリートはスタッドで結合された合成桁であるため、剛結としてモデル化した。なお、端対傾構上弦材と床版はスラブアンカーにより接合されているものの、ここでは水平荷重は主桁上のスタッドを介して床版から主桁へ伝達されるものと解釈し鉛直方向の変位のみを共有させた。また、

表-1 横構の横荷重分担割合

ケース	全横荷重 (kN)	分担横荷重 (kN)	分担割合(%)
CASE1	120	13.9	11.6
CASE2	120	14.9	12.4
CASE3	120	0	0

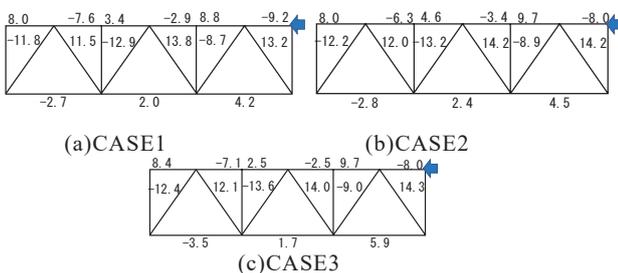


図-6 120kN荷重時の端対傾構の軸力分布 (単位: kN)

支承による拘束条件は支承中心に配置したバネ要素によりモデル化を行った。

図-8は変位計測箇所について荷重荷重120kN時の解析値と試験値の比較をまとめたものである。変位の誤差は大きい箇所でも5%程度に収まっており、鋼桁の全体挙動を概ね再現できていると判断できる。

3.3 プッシュオーバー解析

図-9(a)に水平力を漸増荷重させた解析結果のうち、端対傾構全体に塑性化が見られる水平震度 $k=1.5$ 時の応力分布を示す。主桁腹板の下横構の取り付け部付近で応力集中が生じており、主部材に局部変形が生じていることから供用性の低下や復旧性が懸念される破壊性状となっている。一方、図-9(b)には主桁の半分の高さを有する追加補剛材を設けたケースの結果を示す。この場合、下横構取り付け部付近での主桁腹板の局部的な変形は生じず、端対傾構の塑性化が先行することを確認した。対傾構は部材取替えが可能であり、主桁が変形するよりも復旧性に優れるものと考えられる。

次に、主桁端部に追加補剛材を設けたケースについて横つなぎ材の抵抗特性等の詳細を確認することを目的に、端対傾構斜材、横構、中間対傾構斜材の軸力履歴を図-10、図-11、図-12に示す。

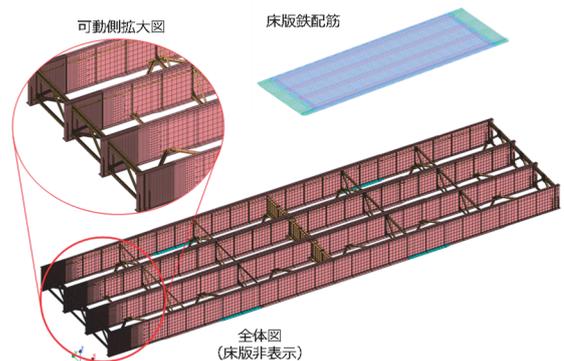


図-7 解析モデルの概要

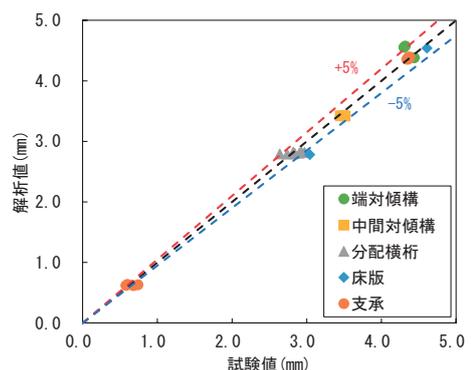


図-8 試験と解析の水平変位計測値 (荷重120kN時)

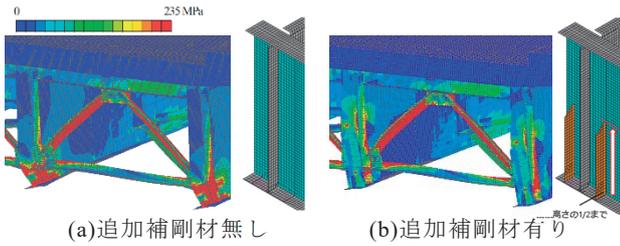


図-9 変形図およびミーゼス応力 (水平震度k=1.5)

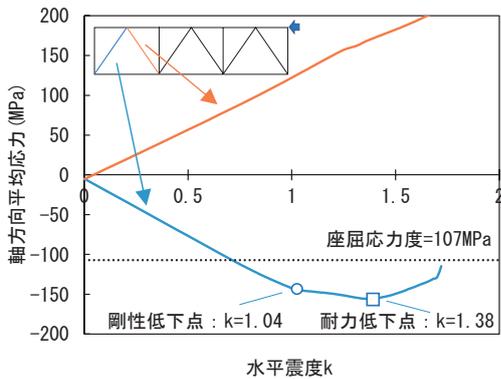


図-10 G1-G2桁間の端対傾斜材の軸力

端対傾構は水平震度 $k=1.04$ に到達すると圧縮側斜材の剛性が大きく低下し、桁端部の横構ならびに桁端付近の中間対傾構の荷重分担が大きくなる傾向がある。このことから、端対傾構の塑性化が先行する場合には、支点付近の横構や中間対傾構での荷重分担が大きくなり、その結果、端対傾構以外の部材の破壊も生じる可能性があるため、その点に配慮した設計法の検討が必要と考えられる。

4. まとめ

実橋の水平荷重試験では、横荷重に対する各部材の荷重分担程度を明らかにし、横構の水平荷重に対する荷重分担の割合は一般的な設計で考慮されている割合よりも低いこと等を確認した。また、試験橋梁の水平荷重試験により得られた結果と3次元FEM解析の結果の比較から、変位量の誤差は5%程度に留まっており、FEM解析により鋼桁の全体挙動を概ね再現できることが分かった。

プッシュオーバー解析の結果からは、主桁端部に桁高の半分の高さを有する追加補剛材を設けることで主桁よりも端対傾構の変形が先行し、仮に上部構造に塑性化が生じても復旧性や供用性に影響が大きい主桁の塑性化の程度を抑えられる可能

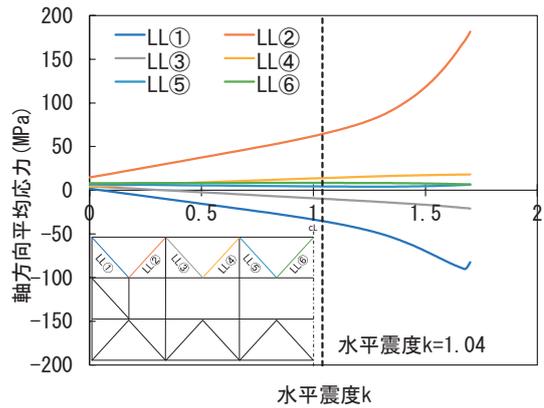


図-11 G1-G2桁間の横構の軸力

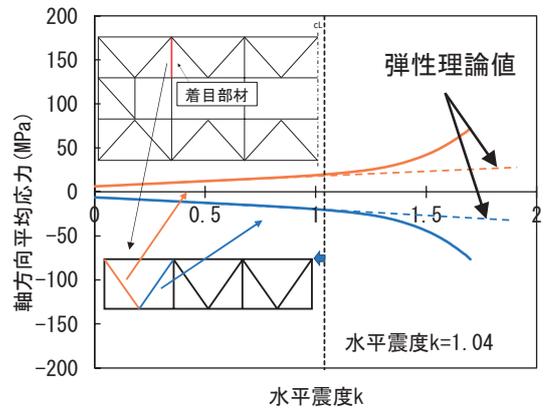


図-12 G1-G2桁間の中間対傾構の軸力

性を確認した。しかし、端対傾構の塑性化が生じた後、横構や中間対傾構の荷重分担が増加し変形を誘発する可能性がある等設計上の留意点が明らかとなったため、その点に対する配慮が必要である。

本報文は、限られた構造諸元を対象とし、一方向のみの水平荷重を想定して検討した結果を示している。しかし、実際の鋼桁の諸元は様々であり、地震動も予期できない方向から作用する。そのため、今後は合理的な鋼上部構造の性能評価に向けて、他の条件も含め検討を進める予定である。

小野健太



土木研究所 橋梁構造研究グループ 研究員
ONO Kenta

澤田 守



土木研究所 橋梁構造研究グループ 上席研究員
SAWADA Mamoru