プッシュオーバー解析による鋼トラス橋の津波時挙動に関する一考察

A consideration on behavior of a steel truss bridge subjected to tsunami by pushover analysis

松本安弘*
Yasuhiro MATSUMOTO

*構造強度学研究室（研究指導教員：斉木 功　准教授）

橋梁の津波防災に関するこれまでの研究では橋梁全体の安定解析を主としており，下部工や支承等の破壊に焦点が向けられている．それゆえ津波のような非常に大きな橋軸直角方向の荷重を受ける際の橋梁上部工の挙動に関する検討はあまりみられない．本研究では下部工や支承等の健全性を前提として，鋼トラス橋の上部工が津波外力を受ける際の挙動を，非線形有限要素解析により検討した．その結果，腹材が津波の作用により降伏することで，橋軸直角方向に大きく変形することがわかり，適切な補強により橋軸直角方向の剛性を高められることを確認した．

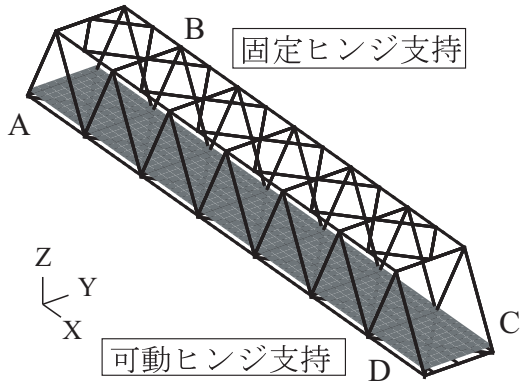
Key Words : *steel truss bridge, tsunami force, finite element analysis, pushover analysis, nonlinear behavior*

1.　はじめに

津波が衝突する恐れのある構造物は港湾施設以外にも，河口付近の河川橋が挙げられる．実際に，2004 年のスマトラ島沖地震の際にも，いくつかの橋桁が流失した事例が報告されている[1)]．これまでの橋梁の津波防災に関する研究では，橋梁全体をいわば一つの剛体とみなした安定解析を主としており，橋梁自体の剛性や強度は考慮されていない．これは，津波によって支承や落橋防止装置が破壊し，桁の流失にいたるためである．そこで本研究では，先に述べたような支承等のクリティカルな破壊への対策が十分に施されたと仮定した上で，鋼トラス橋の上部工が津波外力を受ける際の挙動を，非線形有限要素解析により検討した．津波時の鋼トラス橋の崩壊メカニズムから，鋼トラス橋の対津波設計に関する提言を行うことを目的とする．

2.　解析モデル

東南海地震による津波の被害の恐れがある，三重県の木曽川大橋と同規模の，橋長 70.63m，幅員 8.6m，桁高 10m，総重量 4.76MN の単径間下路式鋼ワーレントラス橋を道路橋示方書[2)]に準じて設計し，これを基本モデルとした．基本モデルの概形を**図–1** に示す．基本モデルは，3 本の縦桁と 8 本の床桁，下横構で構成された床組と床版，上弦材と下弦材，端柱，斜材で構成された主構，橋門構，ストラット，上横構により構成される．鋼部材のうち，上下弦材，端柱，自重により圧縮を受ける部材は箱型断面，上下横構は T 型断面，残りの部材は I 型断面とした．**図–1** に示すように，支持条件は支点 A，B を固定ヒンジ支持とし，支点 C，D を橋軸方向に可動なヒンジ支持とした．基本モデルは，鋼部材はすべて梁要素で作成し，床板のみ板要素を用いた．鋼部材は SM400 を仮定した弾塑性材料とし，von Mises の

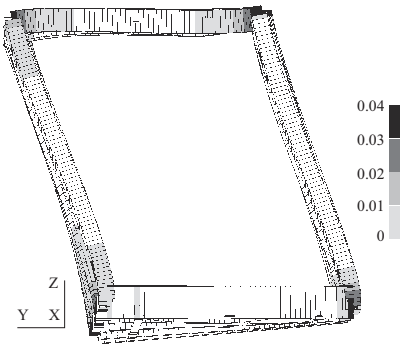


図–1　基本モデル

降伏条件を用い，初期降伏応力を 235MPa，ヤング率を 210GPa，硬化係数をヤング率の 100 分の 1 とした．床板は鉄筋コンクリートを仮定した弾性材料とした．なお，ガセットプレートや部材の接合部，床版の地覆，車両用防護柵，ハンチは省略し，格点部は剛結とした．

解析には汎用構造解析ソフトウェアの NX Nastran を用い，材料および幾何学的非線形性を考慮した有限要素解析を行った．載荷の順序は，まず死荷重を作用させ，その後津波荷重をゼロから漸増載荷することとした．津波荷重は道路橋示方書[2)]の風荷重の設定方法に準じ，部材長さあたりの橋軸直角方向分布荷重に単純化し，支点 A，D 側のトラス主構面に Y 軸正方向に向かって載荷した．なお，津波荷重はトラス主構のみに作用させ，床組には作用させていない．

津波流速として，幸左ら[1)]と同様に，2004 年のスマトラ島沖地震により発生した津波の映像分析から概算された 5.0m/s を仮定し，これによる分布荷重の大きさを荷重パラメータ $f = 1.0$ とした．津波荷重はトラス主構面に桁高の半分まで載荷する半載と，桁高すべてに載荷する全載の 2 つの荷重パターンを用いることとした．



図–2 固定支点側から見た基本モデルの相当塑性ひずみ分布，全載，f=1.0，変形 10 倍

3. 基本モデルの崩壊過程と補強案

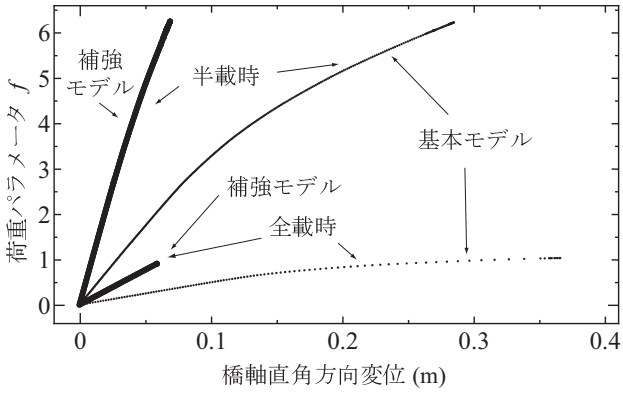
半載，全載の荷重パターンそれぞれの f=1.0 における，津波荷重の合力の大きさを，水平震度 1.0 と仮定したレベル 2 地震動による慣性力の大きさと比較すると，前者は慣性力の 59%，後者は 113% となり，考えている津波荷重は f=1.0 ではレベル 2 地震動と同程度の大きさである．

半載の荷重パターンでは f=1.0 の段階で，3 本の床桁において塑性化が生じた．その原因は設計では考慮されることのない床組面内の曲げであった．降伏時にそれぞれの床桁に作用していた曲げモーメントの大きさは，それ単独で床桁を降伏させる曲げモーメントの 79% から 97% に達していた．しかし，f=1.0 における床桁の相当塑性ひずみは 0.11% 以下に抑えられており，また曲げによる降伏であることから，f=1.0 の段階で橋梁が崩壊する恐れは小さいと考えられる．

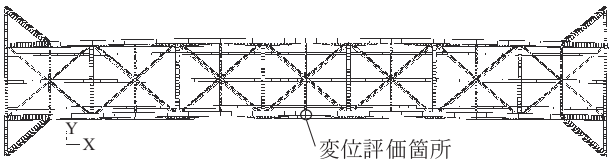
一方，全載の荷重パターンでは f=0.4 から f=0.6 にかけて，主に橋軸方向まわりのねじりによって端柱や橋門構が格点部から次々に降伏した．**図–2** に示したように，f=1.0 の段階では端柱や橋門構の広い範囲が塑性化し，その相当塑性ひずみは最大で 4% に達した．このときすでに全ての斜材の下部も同様に曲げ降伏している．

全載の荷重パターンにおいて橋門構や端柱の降伏の主な原因は橋軸方向まわりのねじりであったことから，橋軸直角面内にトラスを構成するように新たな部材を取り付けることで，橋軸方向まわりのねじりを軸力に変換して受け持たせることを考えた．端床桁の延長線上の点から，端柱の上部と下端に接続される新たな部材をアウトリガーと呼ぶことにする．このアウトリガーによる補強モデルに先と同条件で解析を行った．

基本モデルと補強モデルとの橋軸直角方向の荷重に対する橋梁全体の剛性の比較をするために，載荷面側の上弦材中央部の橋軸直角方向への荷重変位関係を**図–3** に示した．基本モデルでは橋梁全体が橋軸直角方向にせん断変形しているが，補強モデルでは**図–4** に示すようにそのせん断変形が抑制された．また塑性化した部材は端床桁と上横構のみであり，発生した最大の相当塑性ひずみは 0.07% 以下であった．このように，補強モデルでは基本モデルに比べて塑性化の範囲と進行の程度において共に改善が見られた．加えて，**図–3** より半載，全載の荷重パターンの双方において提案する補強により橋梁の全体剛性が 3~4 倍に向上したことがわかる．



図–3 上弦材中央部の荷重変位関係



図–4 鉛直軸方向真上から見た補強モデルの変形図，全載，f=0.90，変形 10 倍

4. おわりに

本研究では，有限要素解析を行い，その結果に基づいて津波荷重を受ける下路式鋼トラス橋上部工の非線形挙動について考察した．得られた知見を列挙すると次の通りである．

- 鋼トラス橋の桁高の半分程度までへの津波による作用は，レベル 2 地震動と同程度である．
- 鋼トラス橋の全桁高に津波が作用する場合，腹材や橋門構などの上部工主要部材が橋軸方向まわりのねじりにより降伏し，橋梁が崩壊する恐れがある．
- 津波の作用に抵抗するため，新たな部材による補強を行なったところ，橋軸直角方向への橋梁全体のせん断変形を減少させることができ，橋軸直角方向の荷重に対する橋梁全体剛性を向上させることに関して一定の効果があることを確認した．

参考文献

1) 幸左賢二，宮島昌克，藤間功司，庄司学，小野祐輔，重枝未玲，廣岡明彦，木村吉郎： 津波による道路構造物の被害予測とその軽減策に関する研究， 道路政策の質の向上に関する技術研究開発成果報告レポート， No.19-2，新道路技術会議， 2010.
2) 日本道路協会： 道路橋示方書・同解説 共通編 鋼橋編，2002.

(2012 年 2 月 14 日 提出)