

南海トラフ巨大地震動を用いた 鋼ローゼ橋の地震時応答解析

尾曾越 計¹・小野 潔²・片岡 正次郎³・馬越 一也⁴

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1）

²正会員 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1）

³正会員 国土技術政策総合研究所（〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地）

⁴正会員 （株）耐震解析研究所 解析技術センター（〒810-0003 福岡市中央区春吉 3-21-19）

1. はじめに

現在の道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編¹⁾(以下、「道示 V」という)では、地震に対して複雑な挙動を示す構造物に対して、動的解析を行うこととされている。鋼アーチ橋は複雑な挙動を示す構造物であり、ファイバーモデルを用いた動的解析を行う例が報告されている。

道示 V の設計地震動や地域別補正係数は大規模な地震を境に値等が変更されてきた。平成 7 年の兵庫県南部地震を受け平成 8 年に改定された道示 V²⁾では、新たな設計法の基本的な考え方として、橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動、「橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動」という考え方が用いられるようになった。また、平成 14 年の道示 V³⁾では、レベル 1、レベル 2 の 2 段階の地震動をもとにした設計法が規定され、レベル 2 地震動に対しては鋼部材に対しても塑性化を許容する耐震設計法が初めて導入された。主として兵庫県南部地震以降に実施された、非常に多くの鋼製橋脚の耐力および変形能に関する研究成果を基に、鋼製橋脚については $M-\phi$ 関係に基づく具体的な耐震設計法が明記されている。そして、平成 23 年の東北地方太平洋沖地震を受けて平成 24 年に改定された現行の道示 V では、レベル 2 タイプ I 地震動と地域別補正係数が見直されるとともに、鋼製橋脚の $M-\phi$ 関係の適用範囲の拡大が行われている。

この 20 年のうちに 3 回も道示が改定されるほど、日本における耐震規準は変化を続けている。特に直

近の地域別補正係数改定時に着目された南海トラフがこれからの耐震設計において非常に重要になると考えられる。この南海トラフで M8-9 クラスの地震が今後 30 年以内に起こる確率は 70%程度⁴⁾と言われており無視できないものとなりつつある。また、中央防災会議「南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ」では東日本大震災の教訓を踏まえ、M9 巨大地震による被害を想定した対策の方向性が検討されている。この地震は過去に発生した記録のない地震であり、発生頻度は極めて低いとされているが、内閣府「南海トラフの巨大地震モデル検討会」では一部地域で震度 7 など強い地震動が推定されていることから、橋の耐震性に及ぼす影響の検討を進める必要があると考えられる。

ここ数年の既往の研究^{5) 6)}では、改定された道示 V の地域別補正係数や設計地震動が鋼橋の地震時応答に与える影響について研究が幾つか行われている。そこで、本研究では現行の道示 V のレベル 2 設計地震動と南海トラフの巨大地震を想定した新たな地震動を入力地震動とした時刻歴応答解析を行い、各地震動がアーチ橋の地震時応答に与える影響の検討を行った。

2. 解析モデルおよび解析条件

本研究では、複合非線形骨組解析プログラムとして、汎用プログラム ScanFEM⁷⁾を用いて解析を行った。

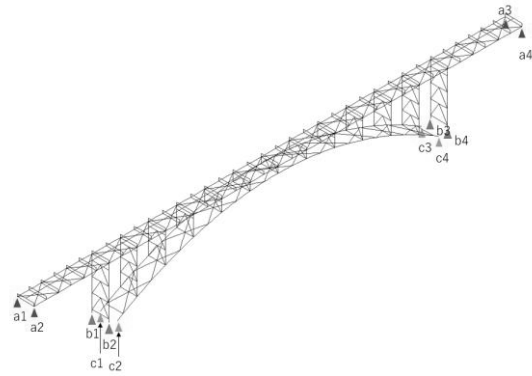


図-1 対象とした鋼ローゼ橋の解析モデル

表-1 鋼ローゼ橋の構造諸元

構造形式	上路式RC床版逆ローゼ鋼橋
橋長	173m
支間	26.5m + 120m + 26.5m (アーチ支間:114m)
総幅員	8.2m
有効幅員	7.0m
使用鋼材	SMA490W, SMA400W, SS400

表-2 解析モデルの支承条件

支点	x軸(橋軸)	y軸(橋軸直角)	z軸(鉛直)
a1,a2,a3,a4	自由	拘束	拘束
b1,b2,b3,b4	拘束	拘束	拘束
c1,c2,c3,c4	拘束	拘束	拘束

(1) 解析モデル

対象とした上路式鋼ローゼ橋の解析モデルを図-1に、構造諸元を表-1に、支承の境界条件を表-2に示す。

(2) 部材のモデル化

鋼部材と主桁を含む上部構造はファイバー要素でモデル化し、支承は線形バネでモデル化した。また、主部材の断面は道路橋示方書Ⅱ鋼橋編⁸⁾に従い、局部座屈強度が降伏強度以上となるようにするため限界幅厚比以下となるように上弦材、斜材、鉛直材の板厚を変更している。要素の断面分割は補剛板が板厚方向に2分割、板幅方向に10分割とし、補剛材が板厚方向、板幅方向ともに2分割としている。また、各部材の部材軸方向の要素分割は4分割以上とし、格点部の結合条件は剛結合とした。断面形状の例としてアーチリブに用いた断面の例を図-2に示す。

(3) 応力-ひずみ関係のモデル化

今回のモデルでは図-3に示す応力-ひずみ関係を

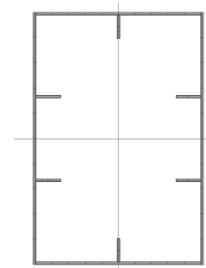


図-2 断面形状の例

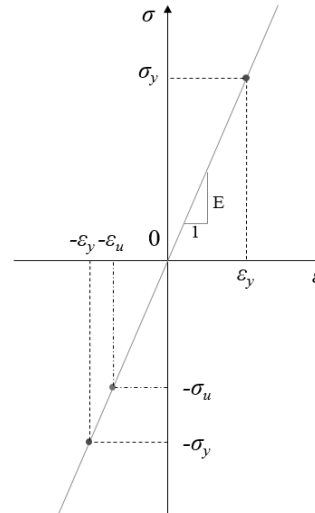


図-3 線形モデル

を用いて動的解析を行った。図-3は鋼部材を弾性体とした応力-ひずみ関係(以下「線形モデル」という)であり、図-3中の σ_y は降伏強度、 σ_u は道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編⁸⁾に記載されている溶接箱型断面鋼長柱の座屈応力度である。長柱の座屈応力度算出に用いる細長比パラメータの部材長は横桁間隔を取っている。なお、アーチリブや横構などに非線形モデルを用いることも考えられる。しかしながら、細長比パラメータが大きく、高圧縮軸力が作用する鋼部材の耐震性能は未だ十分に明らかにされていない。よって、その塑性履歴特性を表現する非線形モデルについても今後検討が必要であることから、今回の解析モデルでは全ての部材に図-3の弾性モデルを用いている。

(4) 動的解析条件

入力地震動はレベル2地震動タイプⅡの3波と南海トラフの巨大地震動を想定した3波の計6波とした。南海トラフ巨大地震を想定した地震動は、「陸側ケース」⁹⁾の強震断層モデルをもとに算出された工学的基盤における推定地震動の時系列波形から、SHAKEに準拠したプログラムDYNEQ¹⁰⁾による地盤(I種地盤の地盤モデル)の地震応答解析により地表面の地震動を推定したものである。今回使用した推定地震動と道示の設計地震動の加速度応答スペクトルを比較したものを図-4に示す。図中の2種類

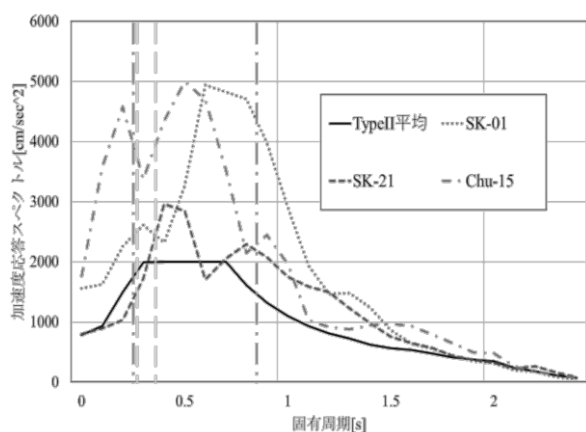


図-4 加速度応答スペクトル

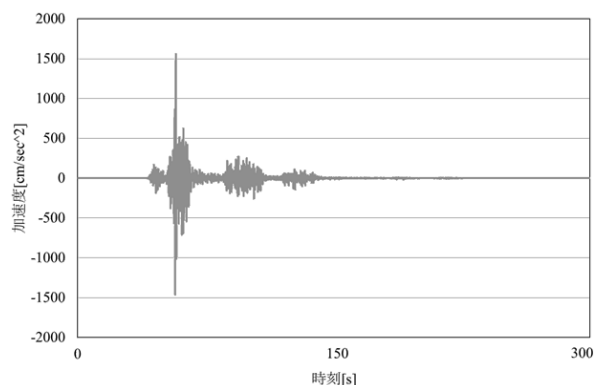


図-5 加速度波形 (SK-01)

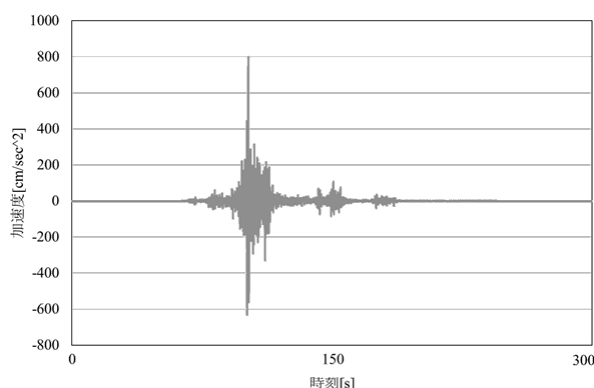


図-6 加速度波形 (SK-21)

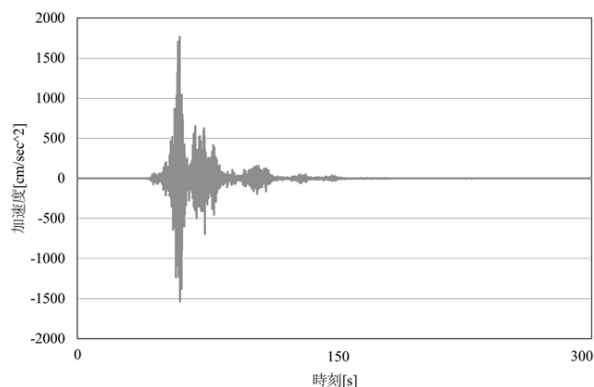


図-7 加速度波形 (Chu-15)

の点線は後述する固有値解析の周期をプロットしたものであり、一点鎖線が橋軸直角方向の固有周期で、破線が橋軸方向の固有周期となっている。

本研究は、現行の道示 V の設計地震動と南海トラフの強い地震動による鋼アーチ橋の地震時応答の比較を行うことが目的であるため、地域別補正係数を 1.0 とした。そしてこれらの地震動を橋軸方向と橋軸直角方向それぞれに作用させた。また、対象橋梁に対して死荷重が作用したときの静的解析を行ってこれを初期状態とし、幾何学的非線形性を考慮して固有値解析、そして時刻歴応答解析を行った。積分法としては、ニューマークの β 法を用い、 $\beta=1/4$ とした。ステップの刻みは 0.001 秒とし、減衰についてはレーリー減衰を使用した。今回の解析に用いた 6 つの地震動のうち南海トラフの推定地震動の加速度波形を図-5～7 に示した。

レーリー減衰の固有モードは固有値解析結果より、橋軸方向では 6 次(固有周期 0.35 秒)と 7 次(固有周期 0.27 秒)、橋軸直角方向では 2 次(固有周期 0.86 秒)と 8 次(固有周期 0.25 秒)とした。

3. 解析結果及び考察

図-8、図-9 にそれぞれ地震動を橋軸方向、橋軸直角方向にそれぞれ入力した時のアーチリブ部材の最大応答ひずみの分布を示している。なお、道示の設計地震動については 3 波の応答ひずみの平均を示している。縦軸は最大応答ひずみの値を降伏ひずみで除した値を示している。

橋軸方向の結果については、図-8 に示すように橋軸方向に地震動を入力した時のアーチリブの応答ひずみの分布形状は道示 V の設計地震動と推定地震動で概ね同じであったが、応答値は設計地震動の方が大きくなっていることが分かる。図-9 に示す橋軸直角方向に地震動を入力した時の結果についても、道示 V の設計地震動と推定地震動では応答ひずみの分布形状に大きな違いは見られない。だが、発生ひずみの値が大きく異なり、アーチリブ基部では南海トラフの応答ひずみが設計地震動のものに比べ約 3 倍近く大きい値となっている。以上のように、本研究で実施した動的解析の結果によれば、道示 V の設計地震動と南海トラフ近傍での巨大地震を推定した地震動で、アーチリブに発生する応答ひずみの分布形状に大きな違いは見られない。しかし、橋軸方向、橋軸直角方向の両方向において、応答ひずみの値に有意な差が生じており、差が出来た理由について今後検討を重ねていく予定である。

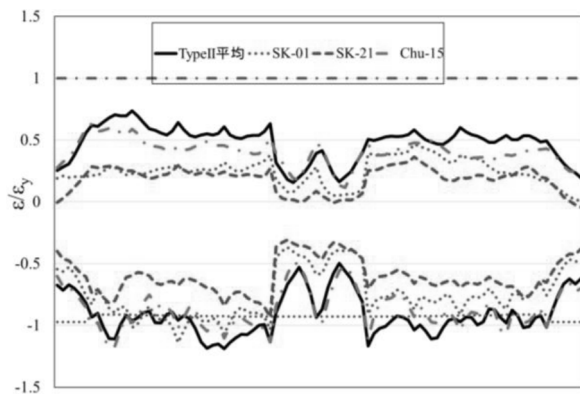


図-8 解析結果（橋軸方向入力）

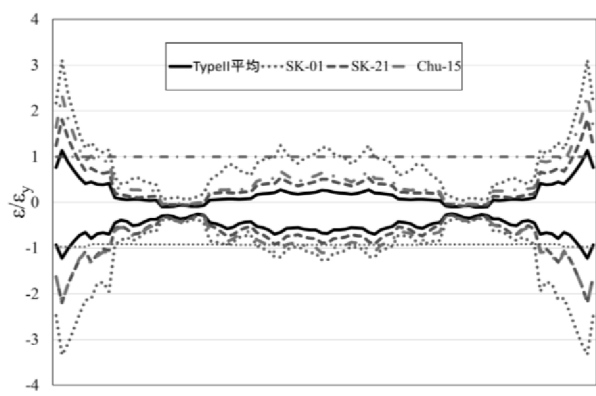


図-9 解析結果（橋軸直角方向入力）

4. まとめ

本研究では鋼ローゼ橋を対象に、発生の可能性が示唆されている南海トラフ近傍での巨大地震を推定した地震動を用いて動的解析を行い、道示に記載されている設計地震動を用いた動的解析の挙動と比較し、入力地震動が動的解析の結果に及ぼす影響について検討した。

本研究の条件で行った動的解析の結果によれば、道示Vの設計地震動と南海トラフ近傍での巨大地震を推定した地震動で、アーチリブに発生する応答ひずみの分布形状に大きな違いは見られないが、応答値には有意の差が生じる結果となった。その理由については今後、詳細に検討する予定である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002.
- 4) 地震調査研究推進本部：南海トラフの地震活動長期評価(第2版)，2013.
- 5) 道谷梓，小野潔：改定されたタイプ I 地震動が鋼トラス橋の地震時応答に与える影響，第 16 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講演論文集，pp.153～158，2013.
- 6) 北市さゆり，小野潔，岡田誠司：地域別補正係数を考慮した改定設計地震動がコンクリートを充てんしない矩形断面鋼製橋脚の耐震性能評価に及ぼす影響，第 16 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講演論文集，pp.227～230，2013.
- 7) 株式会社耐震解析研究所:SeanFEM ver.1.22 理論マニュアルと検証，2007.
- 8) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，2012.
- 9) 中央防災会議 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフ巨大地震モデル検討会（第二次報告）強震断層モデル編 -強震断層モデルと震度分布について-，2013.
- 10) 吉田望：地盤の地震応答解析入門，2005