

耐震補強した三径間連続 1 面吊り斜張橋の 複合非線形動的解析（鶴見つばさ橋）

Composite Nonlinear Dynamic Analysis of 3-Span Continuous Single-Plane Suspension Cable-Stayed Bridge after Aseismic Reinforcement (Tsurumi Tsubasa Bridge)

永谷 秀樹*¹ 栗田 繁実*² 小林 裕輔*³ 佐藤 昌義*⁴
Hideki NAGATANI Shigemi KURITA Yusuke KOBAYASHI Masayoshi SATO

Summary

After an extensive review of the aseismic design standard after the south Hyogo-Ken-Nanbu earthquake, an earthquake resistance evaluation and aseismic reinforcement plan for level 2 earthquake motion were applied to Tsurumi Tsubasa Bridge^{1,2)}. In conducting this aseismic reinforcement, we prepared an overall system analytical model for the bridge, reflecting the strength properties of the reinforced structural members, using a fiber element, in order to verify the effect of the aseismic reinforcement, and conducted composite nonlinear dynamic analysis. This paper reports the outline and analysis results.

キーワード：耐震補強 斜張橋 ファイバー要素 複合非線形動的解析

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震による橋梁構造物等への被害は、当初想定されたレベルをはるかに超えるものであった。これらの被害を受け、首都高速道路株式会社においては、供用期間中に発生する確率が低い当該地点において考えられる最大級の強度をもつ地震動（以後レベル2地震動と呼ぶ）に対して、損傷を受けても落橋や倒壊をしないことを目標に構造物の安全性強化が図られている。

首都高速道路の中で代表出来な吊り構造形式の長大橋である鶴見つばさ橋、レインボーブリッジ、横浜ベイブリッジの3橋については、レベル2地震動による損傷を、各構造要素における非線形動的解析による応答値と耐力、変形性能との比較より推定し、許容できる損傷と許容できない損傷に分類して、許容できない損傷に対して補強計画を策定している。

この計画を受け、当社では、鶴見つばさ橋の耐震補強を実施するにあたり、補強計画で事前に想定された耐震性能が、補強を実施した後も確保されていることを確認する必要がある。そこで、橋梁全体系に対してファイバー要素を用いた複合非線形動的解析を実施し、耐震補強効果の検証と補強後の耐震性能評価を行っている。本稿では、この複合非線形動的解析の概要および解析結果について報告する。

2. 解析概要

(1) 解析目的

鶴見つばさ橋は、その耐震性検討^{1), 2)}の中で、損傷シナリオの策定と補強検討が実施され、補強を実施する構造要素が表-1に示すように決定された。この補強された構造要素の中で、耐力特性が変化するのはSRC橋脚のみである。

表-1 補強された構造要素と耐力特性の変化

補強した構造要素	耐力特性の変化
弾性拘束ケーブル(定着部) 水平支承 ペンデル支承	変化しない
SRC橋脚	変化する

本耐震補強工事の実実施設計（以下、工事实実施設計と略す）における解析では、上記のSRC橋脚の補強後の耐力特性変化を解析に反映し、補強効果として以下の確認を行うことを目的とする。

- ① 補強する構造要素が耐震性能を満足していること（応答値が補強計画の想定値より小さい）。
- ② 補強しない構造要素に対して、応答値が想定以上に大きくなるような影響がないこと。
- ③ 橋梁全体として損傷シナリオに変化がないこと。

*1(株)宮地鐵工所 技術本部設計部技術開発グループ課長代理

*2(株)宮地鐵工所 技術本部保全部保全技術グループ

*3(株)宮地鐵工所 技術本部保全部課長

*4(株)宮地鐵工所 技術本部保全部保全技術グループ課長

(2) 解析の全体フローチャート

工事実施設計における複合非線形動的解析の解析手順としては、まず、適用可能な解析コードの選定を行う。次に、解析モデルの妥当性、解析コードの適用性の検証を目的として補強前の構造系に対して解析を行い、耐震性検討の解析結果との比較検討を実施する（キャリブレーション解析）。この比較検討により妥当性が確認された解析モデルに対して、補強後の部材特性をモデル化して解析を実施し、補強効果の確認を行う（補強後解析）。

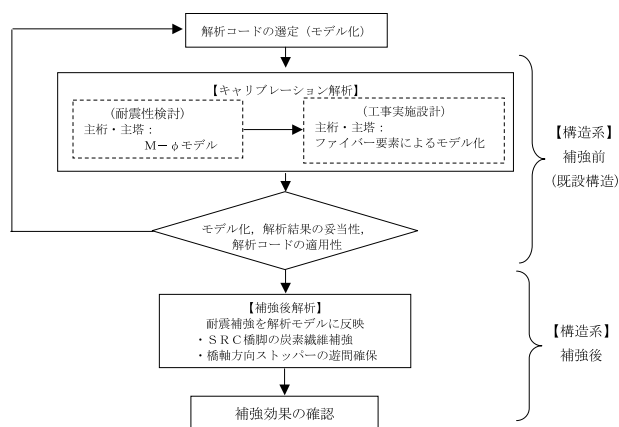


図-1 解析全体フローチャート

非線形解析を行う必要があった。そこで、ケーブルプレストレスを考慮してファイバー要素への初期応力を設定が可能であり、限られた設計期間に効率的に解析が実施可能との判断から、解析コードにはEPASS/USSSPを適用している。

耐震性検討と工事実施設計において実施したキャリブレーション解析および補強後解析における各構造要素のモデル化の比較を表-2に示す。また、図-2に解析モデルを示す。耐震性検討における解析モデルに対して、工事実施設計で変更した主な事項は以下の通りである。

- ① 主桁・主塔は、塑性化による剛性変化をより詳細にモデル化するため、ファイバー要素を用いてモデル化。
- ② SRC橋脚は、別途実施されたコンクリート構造を対象とした専用解析コード（WCOMD）によるFEM解析結果より、橋軸方向の破壊形態としてせん断破壊、曲げ破壊の両者が発生する可能性があるため、以下の2種類のモデル化を実施。
せん断破壊：エネルギー吸収を考慮しない線形部材としてモデル化
曲げ破壊：非線形特性をFEM解析結果の荷重-変位関係と等価な非線形バネとしてモデル化
- ③ 橋軸方向ストッパーは、最大移動量を確保するため撤去されることから、モデル化を行わないことを基本とする。ただし、ストッパー以外の箇所が衝突する事態も想定し、ストッパーをモデル化した解析も実施する。

3. 解析モデル

(1) 解析コードと解析モデル

耐震性検討ではTDAPⅢを解析コードとして適用しており、軸力変動の影響をうける主桁・主塔にM-φモデルを使用した複合非線形解析（幾何学非線形性は線形化有限変位による）を行っていた。一方、工事実施設計では解析精度の向上等からファイバー要素を使用した複合

(2) SRC橋脚の非線形特性評価

既設構造の耐震性の評価において、主塔部SRC橋脚は、

表-2 解析コードと解析モデルの比較

解析タイプ	①耐震性検討 (補強方針決定, 補強構造検討)		②工事実施設計 (補強効果確認, 補強構造詳細設計)	
	解析コード		解析コード	
	TDAPⅢ (線形化有限変位解析)		EPASS/USSP (有限変位解析)	
非線形特性モデル				
構造要素	キャリブレーション		補強後	
主塔	M-φモデル(トリニア型)		ファイバー要素	
主桁	M-φモデル(トリニア型)		ファイバー要素	
端橋脚	RC構造	M-φモデル(Takeda型)		
主塔橋脚	SRC構造	橋軸方向	せん断破壊先行とし線形部材	
		橋直方向	M-φモデル(Takeda型)	①せん断破壊先行:線形部材 ②曲げ破壊:P-δモデル (Takeda型) P-δモデル (原点指向型)
ケーブル		非抗圧部材		
弾性拘束ケーブル		圧縮に抵抗できない, スリップ型のハイリニヤモデル		
橋軸方向ストッパー		非線形弾性バネ		①モデル化しない ②非線形弾性バネ
ベーン型ダンパー		レベル2地震動では早期に機能が失われるため, ベーン型ダンパーを無視		
基礎構造-周辺地盤系		非線形バネ(S-Rモデル)		

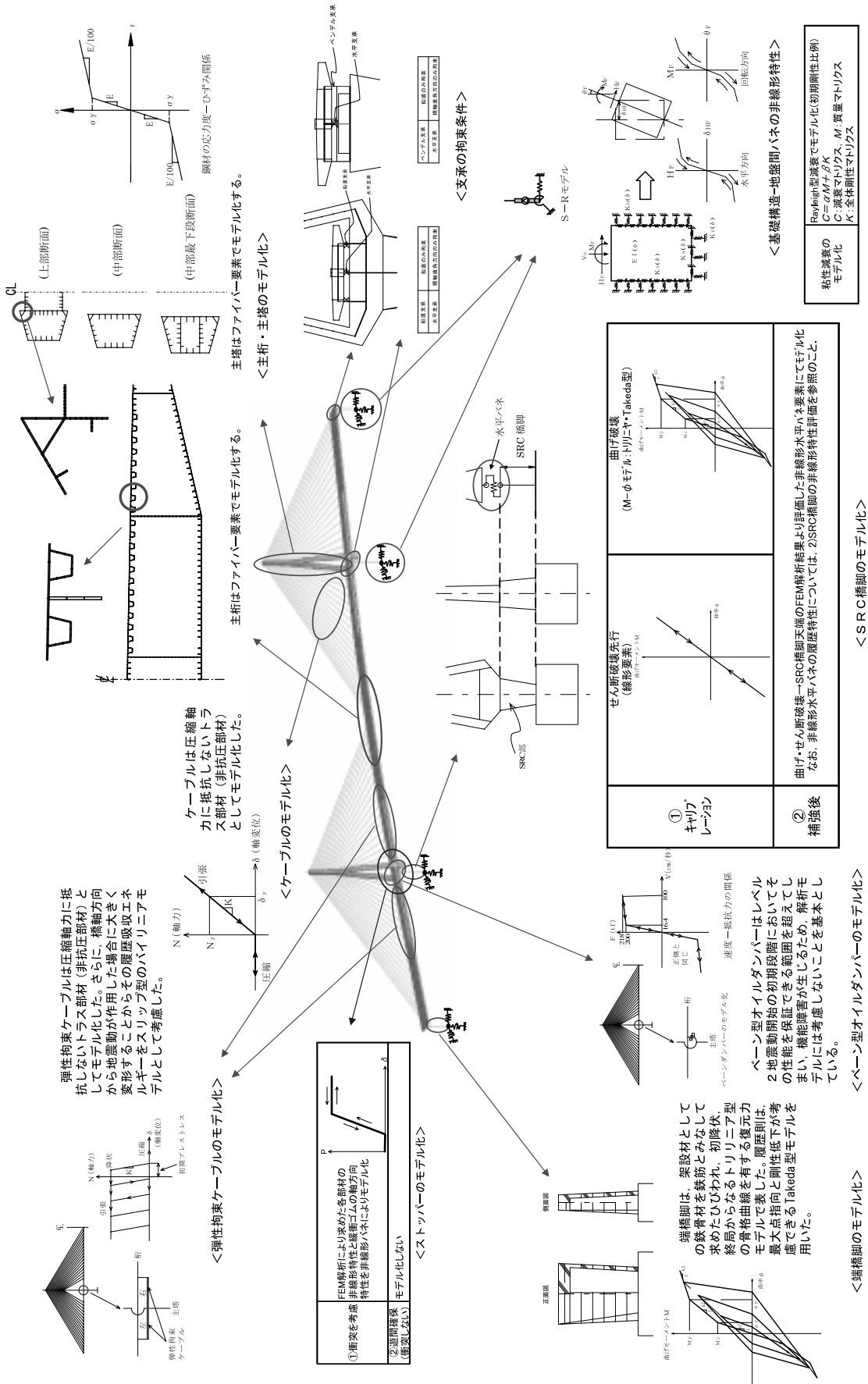


図-2 鶴見つばさ橋の全体系解析モデル

レベル2地震動により応答せん断力がせん断耐力を超え、せん断破壊が先行することが判っている。そのため、せん断耐力増加のために炭素繊維シート巻き立て工法による補強を行う。

このSRC橋脚は8角形2室中空断面SRC構造で構成されており、橋脚高さ方向に断面形状が変化する極めて複雑な構造である。そのため、せん断耐力評価の妥当性と炭素繊維シートの補強効果を確認するため、1/10模型を用いた正負交番載荷試験を実施している³⁾。さらに、WCOMDを用いたFEM解析を実施し、解析結果と実験結果との整合性が確認された解析モデルにより実構造物の耐力特性の評価解析を行っている。

補強後の構造での非線形動的解析においては、この解析結果の荷重-変位関係と等価となる非線形水平バネを用いて図-3に示すようにモデル化を行っている。また、図-4にこの非線形バネの履歴特性を示している。ここで、橋軸方向においては、一般的なRC橋脚の曲げ破壊に対して適用されるトリリニヤ型のTakedaモデルを適用し、除荷勾配 K_r は最大変形 δ_m の関数として次式により定義する。

$$K_r = \frac{P_c + P_y}{\delta_c + \delta_y} \left| \frac{\delta_m}{\delta_y} \right|^{-0.5}$$

橋軸直角方向に対しては、骨格曲線はトリリニヤ型とし、除荷時に原点指向の特性を有する履歴モデルとしている。

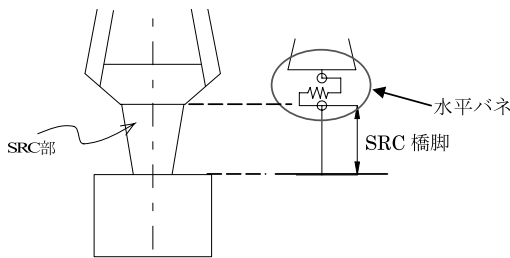


図-3 主塔SRC橋脚のモデル化

4. 入力地震波

鶴見つばさ橋の非線形動的解析において作用させるレベル2地震動の入力地震波は、耐震性検討において以下の11波が選定された。

- ・プレート境界における大規模な地震動
- 震源断層モデルから推定した長周期地震動：5波
- 長周期地震動に短期補正した地震動：5波
- ・陸域の浅いところで発生する地震動

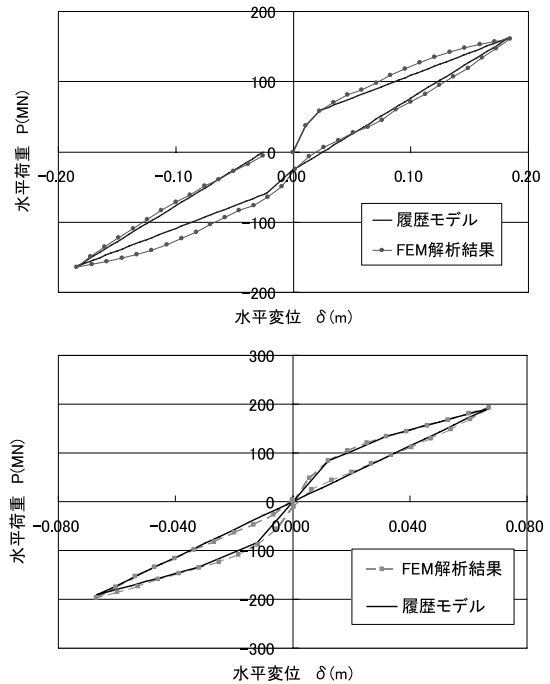


図-4 主塔SRC橋脚水平バネの履歴特性

道路橋示方書に対応する標準加速度波形

(II-III-2) : 1波

これに対して、工事実施設計においては、耐震性検討成果を踏まえ以下の理由により、入力地震波としてレベル2地震動・タイプII(III種地盤)の道路橋示方書に対応する標準波形であるII-III-2の1波のみを用いている。

- ① 平成14年度報告書では、各地震動に対する応答値の比較より、全ての補強対象の設計応答値が最大となる地震波は道路橋示方書に対応する標準波形のII-III-2である。
- ② 固有値解析結果より、補強後の固有周期は平成14年度報告書とほぼ一致しているため、橋梁全体としての振動特性も変化せず同様と考えられる。

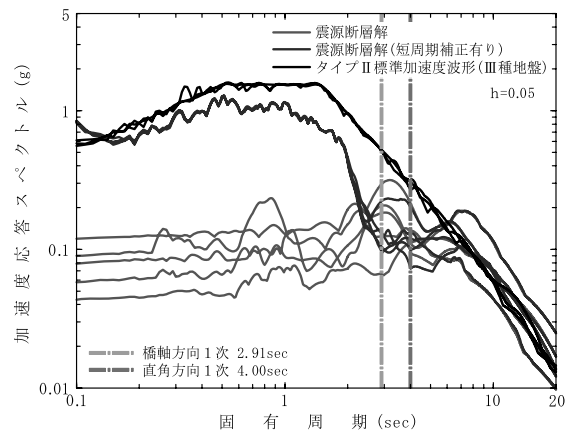


図-5 入力地震波の加速度応答スペクトル

図-5に上記の入力地震動に対する加速度応答スペクトルと、鶴見つばさ橋の橋軸、橋軸直角方向の主たる振動モードの固有周期を示す。この図に示すように、各振動モードの固有周期において道路橋示方書に対応する標準波形のⅡ-Ⅲ-2が最大応答となることが分かる。

5. 解析手順

解析手順は図-6に示す通りである。Rayleigh型減衰については、耐震性検討と同様に、ひずみエネルギー比例減衰法によりモード減衰定数を求め、Rayleigh型減衰でモデル化される減衰効果が、ひずみエネルギー比例減衰法より求められるモード減衰定数と等価となるように、係数 α 、 β を最小二乗法により求めた⁴⁾。

6. キャリブレーション解析

(1) 固有値解析

固有値解析結果より、橋軸、橋軸直角方向およびねじりに対する主要な振動モードを選定し、各振動モードに対する固有周期、有効質量比、振動モード図に対する耐震性検討と工事実施設計の比較を図-7に示す。

ここで、固有周期は、耐震性検討と工事実施設計の差

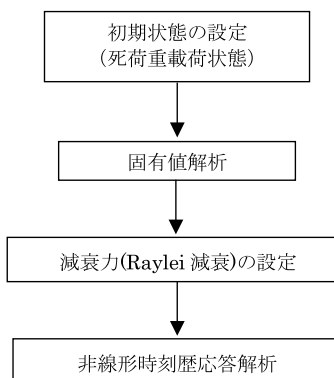


図-6 解析手順

が最大で2%以下（主桁曲げ対称1次モード）であり、良く一致している。また、有効質量比においても両者の差は非常に小さく良く一致している。

(2) 時刻歴応答解析結果

耐震性検討と工事実施設計について、主要構造要素における最大応答値の比較を表-3に示す。両者の解析結果は、その差が±3%以下と良く一致している。また、図-8に示す主要構造要素の時刻歴応答においても両者はよく一致している。

ただし、工事実施設計では、ファイバー要素を用いて主桁、主塔を詳細にモデル化するため、M- ϕ モデルに

振動モード	方向	耐震性検討	工事実施設計
主桁 水平 曲げ 対称 1次 モード	橋軸 直角	側面図 固有周期3.97sec	側面図 固有周期3.89sec < 固有周期3.90sec
		平面図	平面図
主桁 遊動 円木 モード	橋軸	側面図 固有周期2.90sec	側面図 固有周期2.91sec < 固有周期2.93sec
		平面図	平面図
主桁 中央径間 ねじり 対称 1次 モード	ねじり	側面図 固有周期2.00sec	側面図 固有周期2.03sec < 固有周期2.04sec
		平面図	平面図

< >内は補強後の値を示す

図-7 主要な振動モードにおける固有周期と有効質量比の比較

対して剛性が高く評価される傾向があり、初期剛性においても平均で4%程度剛性が高くなっている。しかし、今回の解析においては、主塔は弾性範囲に留まり、主桁の塑性化も部分的で小さいことから、両解析結果の差は非常に小さい。

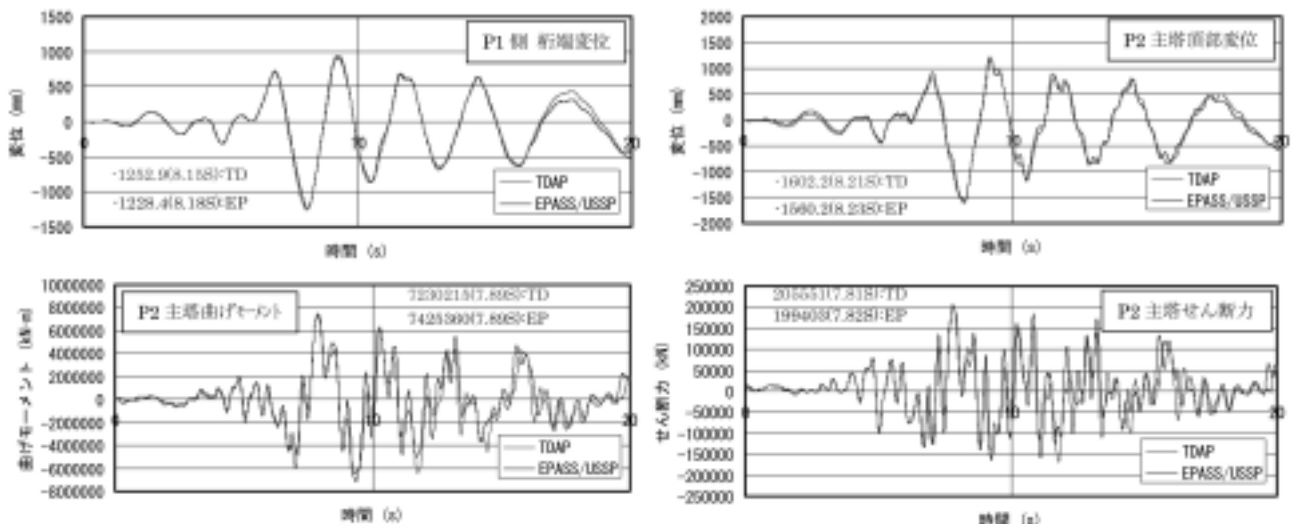
(3) 考察

両者の固有周期が一致することから、解析モデルの初期剛性、質量の設定は妥当であると判断される。

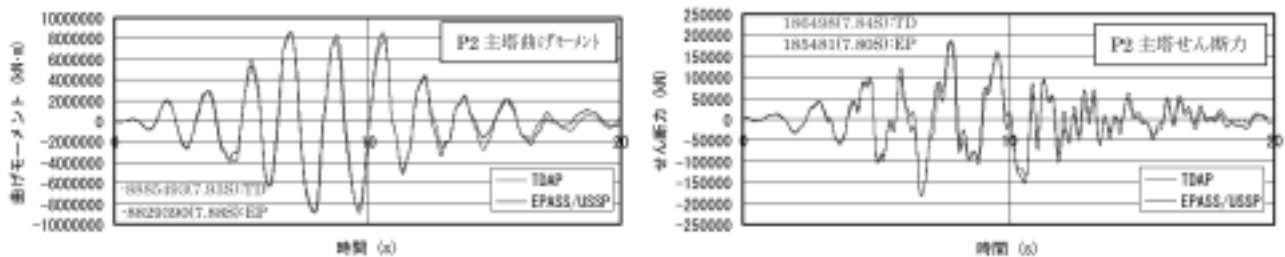
また、解析モデル、解析コードの異なる両者の非線形動的解析結果において、固有値解析も含め両者の解析結果はよく一致していることから、耐震性検討および工事実施設計に対して、解析モデルおよび解析結果（解析コードの適用性）についての妥当性が確認された。

表一 3 時刻歴応答解析における最大応答値の比較

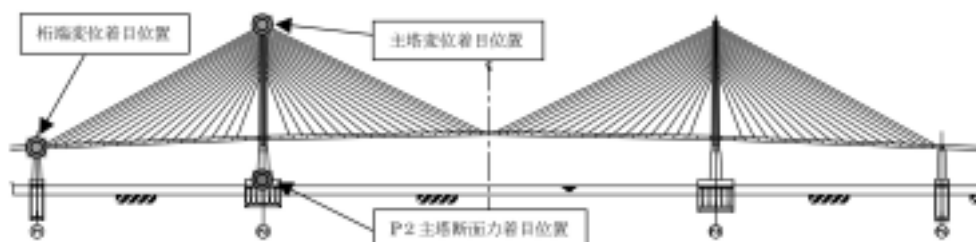
構造要素	方向	単位	最大応答値			
			①平成14年度報告書	②工事実施設計	②/①	
桁端変位	橋軸	mm	1253	1228	0.98	
水平支承作用水平力	端橋脚	橋直	kN	43071	43786	1.02
	主塔橋脚	橋直	kN	79674	79223	0.99
主塔橋脚せん断力	橋軸	kN	205937	199401	0.97	
ケーブル軸力	橋軸	N/mm ²	595	606	1.02	



(a) 橋軸方向の時刻歴応答



(b) 橋軸直角方向の時刻歴応答



図一 8 時刻歴応答結果の比較

7. 補強後解析

補強後の部材特性を考慮して実施した、複合非線形動的解析の結果を以下に示す。

まず、補強後の構造要素の補強法と応答結果について図-9に示す。また、補強後の構造要素であるSRC橋脚について、解析モデルの水平バネの履歴応答を図-10に示す。

補強後解析結果より、主塔SRC橋脚の炭素繊維シート

巻き立て補強やストッパーの撤去などを含む各構造要素の補強により、既設構造において予測された損傷部位が変化せず、想定した損傷シナリオにも変化がないことが確認された。このことから、橋梁全体として耐震補強が適切であること判断される。さらに、解析応答値と補強後の各部の耐力を比較すると、その応答値は概ね降伏耐力以下となり、過大な塑性化等の橋梁全体系へ影響を及ぼすような損傷は確認されない。

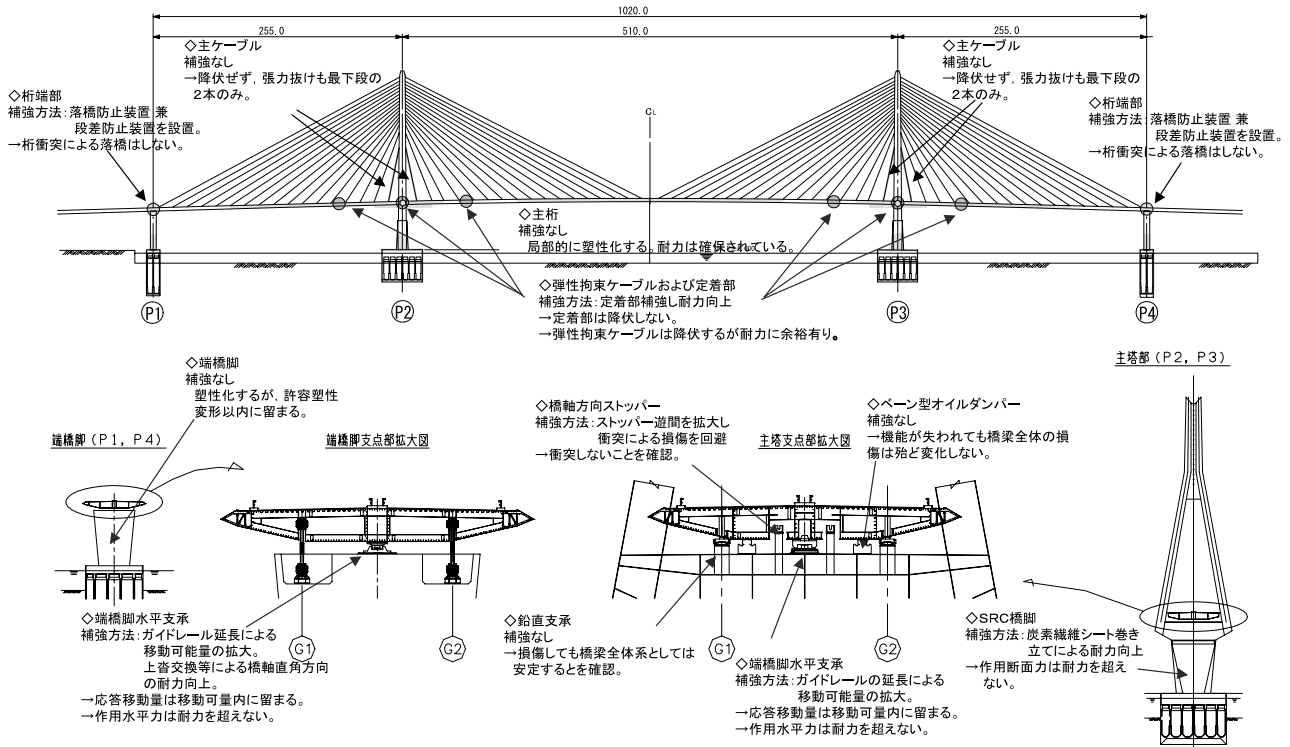


図-9 鶴見つばさ橋の損傷状況と補強方法および補強後の解析結果

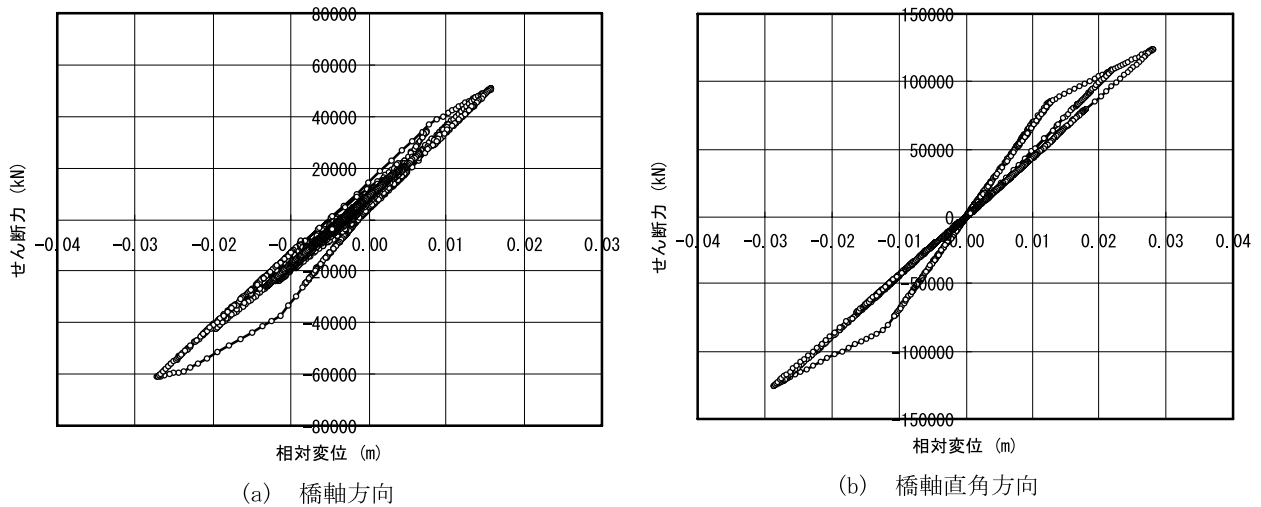


図-10 SRC橋脚水平バネの履歴応答

8. まとめ

今回実施したファイバー要素を用いた複合非線形動的解析より以下の結論が得られた。

キャリブレーション解析結果より、既設構造の補強構造決定のため実施された非線形動的解析の妥当性について確認できた。また、使用した解析コードの妥当性についても検証された。

さらに、補強効果を確認する補強後解析では、当初想定した損傷のシナリオは補強後にも変化することなく、計画した補強が有効であることが検証された。

最後に、鶴見つばさ橋は、補強により、レベル2地震動に対して橋梁全体系としての機能に問題がない損傷レベルに留まり、橋梁としての地震に対する安全性は確保されていることが確認された。

本工事において実施した耐震補強の詳細については別途報告を行っているの、そちらを参照して頂きたい。

最後に、鶴見つばさ橋の耐震性評価を行うにあたり、首都高速道路株式会社神奈川管理局をはじめ多くの関係者の方にご指導を賜りました。また、解析においてはJIPテクノサイエンス(株)にご協力頂きました。誌面を借りてこれらの関係各位に厚く御礼を申し上げます。

<参考文献>

- 1) 小森和男, 吉川博, 小田桐直幸, 木下琢雄, 溝口孝夫, 藤野陽三, 矢部正明: 首都高速道路における長大橋耐震補強の基本方針と入力地震動, 土木学会論文集No.794/I-72, pp.1-19, 2005.7.
- 2) 小森和男, 吉川博, 小田桐直幸, 木下琢雄, 溝口孝夫, 藤野陽三, 矢部正明: 首都高速道路における長大橋耐震補強検討, 土木学会論文集No.801/I-73, pp.1-20, 2005.10.
- 3) 溝口孝夫, 中野博文, 山野辺慎一, 曾我部直樹: 炭素繊維シートによる鶴見つばさ橋主塔橋脚SRC構造部の耐震補強効果確認実験, 構造工学論文集Vol.53A, 2007.3.
- 4) 臺原, 大月, 矢部: 非線形動的解析に用いるRayleigh減衰のモデル化に関する提案, 地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集Vol.2, pp.371-378, 1998

2008.2.1 受付

グラビア写真説明

新皆野橋ランプ橋

(仮称)新皆野橋ランプ橋は、全長 489 m 鋼4径間連続非合成鈹桁橋2連と、鋼3径間連続非合成鈹桁橋1連にて構成されています。また、ライフサイクルコストを考慮し耐候性鋼材を使用しています。本工事は、その内の荒川河川内橋梁198.5 m鋼4径間連続非合成鈹桁橋1連の製作・架設を行っており、架設工法は、工程及びヤードの制約から全断面手延べ送り出し工法を採用しました。供用開始後は、秩父市内の交通渋滞緩和や秩父地域へのアクセス強化がされることを期待されています。(清水 康史)

県道高速名古屋朝日線清洲料金所工区上部工事

本橋は、東名阪自動車道、名古屋高速16号一宮線、名古屋高速6号清須線の接続部となる清洲JCTにおいて、名古屋高速6号清須線の導入部となる清須料金所を含む橋梁である。

本工事を含む、名古屋高速6号清須線7.0kmの完成により、愛知県北西部や岐阜県方面と名古屋都心部、および中部国際空港などの拠点とのアクセスが一層向上し、利便性が高まることとなる。

鈹桁部には、Uリブ合成床版を採用し、交通量の非常に多い国道22号線上の架設の際には、全面通行止めを行なって、横取り架設を実施した。また、箱桁部は、鋼床版であり、壁高欄のPCF型枠を設置した後に、国道22号線の夜間交通規制を行ないながら、横取り架設を実施した。(興地 正浩)