

複合トラス橋の耐震性に関する検討

オリエンタル建設(株) 第二技術部 正会員 ○吉川 卓
 同上 正会員 正司 明夫
 新日本製鐵(株) 鉄構海洋事業部 野呂 直以
 同上 窪田 公二

1. はじめに

主桁自重の軽量化,あるいは構造の合理化を図った複合構造形式の橋梁は,主にフランスを中心として発展してきた。近年わが国においても,複合構造形式の橋梁として波形鋼板ウェブPC橋の施工実績が増えつつある。複合トラス橋は,従来のPC箱桁橋のウェブを鋼トラス材で置き換えた構造で,鋼とコンクリートのそれぞれの長を活かした構造形式であり,経済性,合理性に優れ,次世代の橋梁として注目されている。複合トラス橋の構造特性については,各種研究^{1,2)}が行われているものの,わが国においては施工実績がなく,適切な設計手法が未だ確立されていないのが現状である。また,大規模地震に対する応答性状についても未解明な点が多く存在する。

複合トラス橋の地震時応答に関する研究³⁾では,骨組み解析モデルを用いた非線形動的解析により上部構造の地震時応答性状を検討しているが,上下床版および鋼トラス材の非線形性は考慮されていない。そこで本検討では,複合トラス橋の地震時の詳細な応答性状および耐震性能を把握することを目的に,中央径間が99.0mとして試設計された橋梁を対象として,上部構造および橋脚に非線形性を考慮したFEMモデルによる動的解析を行い,複合トラス橋の地震時応答特性についての検討を行った。

2. 検討対象橋梁

図-1に本検討に用いた複合トラス橋の一般図を示す。検討対象橋梁は中央径間99.0mの3径間連続ラーメン橋とした。上部構造に配置されるPC鋼材は内外併用とし,設計荷重作用時のコンクリート床版の引張応力度が上床版で 0.0 N/mm^2 ,下床版で -1.0 N/mm^2 以下として試設計を行った。コンクリートの設計基準強度は上部構造を 40 N/mm^2 とし,橋脚を 24 N/mm^2 とした。鋼トラス材は材質をSM490とし $\phi 700$, $t=12\text{ mm}$ を用いた。鋼トラス材の径および板厚は,設計荷重作用時における格点部コンクリートの許容支圧

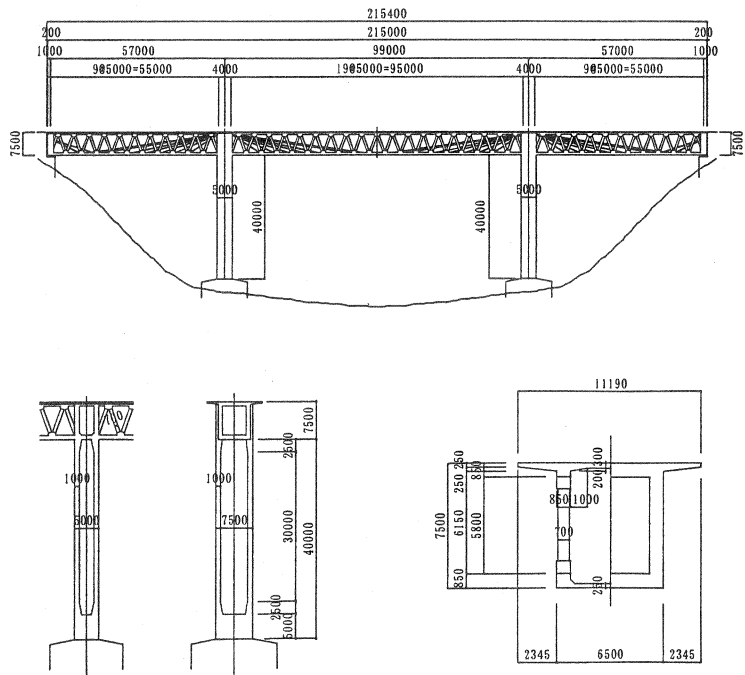


図-1 検討対象橋梁

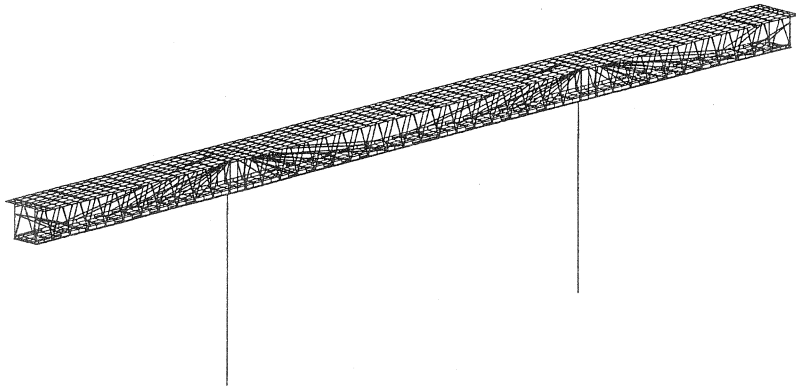


図-2 解析モデル

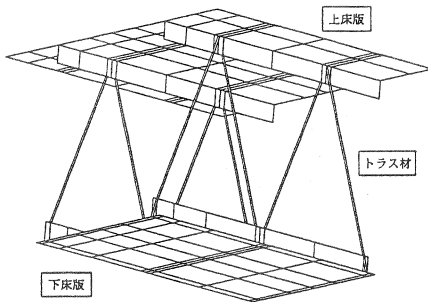


図-3 主桁のモデル化

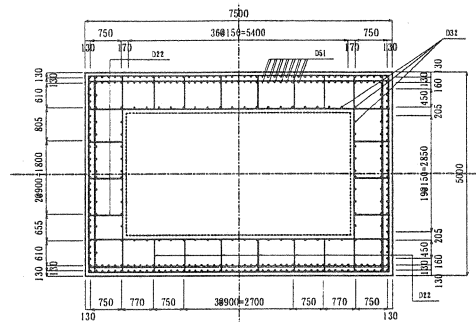


図-4 橋脚断面

応力度 $0.5f_{ck}$ ($=20 \text{ N/mm}^2$) から決定した。なお、柱頭部より左右2本の鋼トラス材については、コンクリート充填鋼管とした。本検討において耐震設計上の地盤種別はI種地盤を想定している。

3. 解析モデル

解析は DIANA を用いて行った。検討に用いた解析モデルを図-2に、使

用した要素の一覧を表-1に示す。本解析モデルにおける総節点数は6551節点、総要素数は8088要素である。上下床版コンクリート部材にはシェル要素を用い、鋼トラス材および橋脚部材には、はり要素を用いた。また、外ケーブルはトラス要素を用いて部材として評価し、デビエータおよび定着部によって支持した。なお、デビエータの摩擦は考慮しないこととした。床版コンクリートと鋼トラス部材の接合部のモデルは、図-3に示すように鋼トラス部材を床版コンクリートウェブ部に埋め込むモデルとした。

内ケーブルおよび軸方向鉄筋は、母要素(上下床版および橋脚要素)に埋め込んで使用し、それ自体に独立した自由度を持たない埋め込み鉄筋要素を用いてモデル化を行った。上下床版の鉄筋は上下縁側それぞれD16を125mmピッチの配筋量とし、橋脚の鉄筋は図-4に示す配筋図から橋脚方向鉄筋のみを考慮した。なお、上下床版および橋脚に使用した鉄筋はSD345である。

表-1 使用要素一覧

部材	要素種類	要素名	積点
上下床版	4節点シェル要素	Q20SH	面内：2×2点 板厚方向：2点
鋼トラス材	2節点はり要素	L13BE	面内：8点 部材軸方向：2点
外ケーブル	2節点トラス要素	L2TRU	1点
橋脚	2節点はり要素	L13BE	面内：16点 部材軸方向：2点
内ケーブル	埋め込み鉄筋要素		2点
鉄筋	埋め込み鉄筋要素		2点

4. 段階施工解析

一般に、ラーメン橋のような不静定構造物の耐震性能の検討を行う場合、初期断面力としてクリープ・収縮を含む静荷重用時の応力状態を考慮する。本検討では動的解析に先立ち、上部構造のクリープ断面力を考慮した段階施工解析を行い、初期断面力の再現を試みた。図-5に静荷重用時における上下床版の上下縁応力度および鋼トラス材の応力度分布を示す。上下床版ともに静荷重用時には全断面圧縮状態となっている。なお、柱頭部断面は検討断面から除いているため、応力度を0としている。

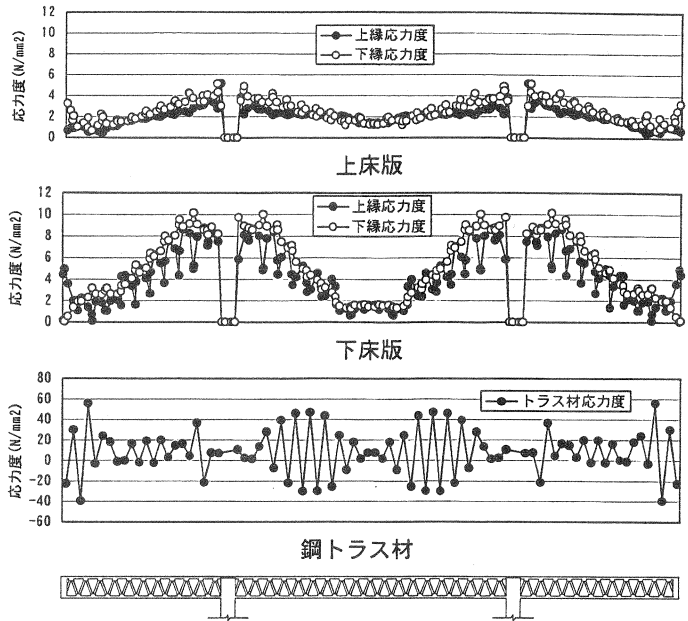


図-5 静荷重用時の応力状態

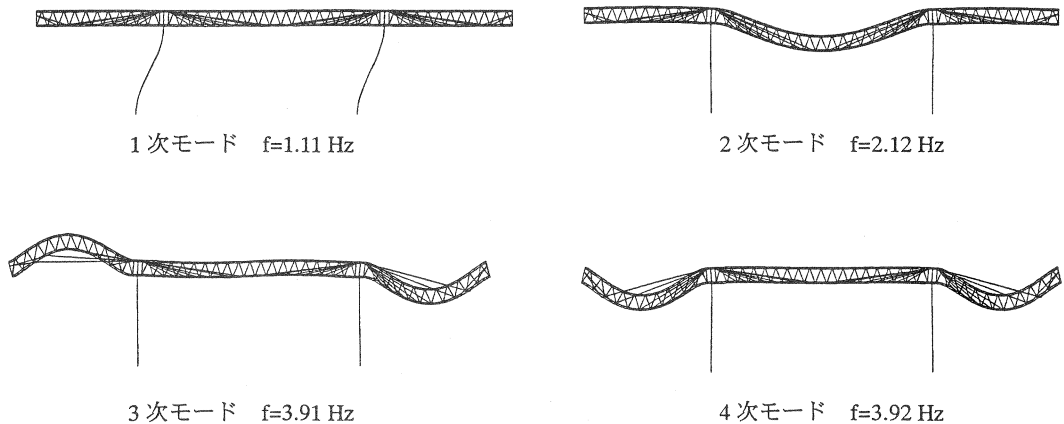


図-6 固有振動モード

5. 固有振動解析

橋脚の剛性に降伏剛性を用いた固有振動解析を行った。なお、固有振動解析においては内ケーブルおよび鉄筋は考慮していない。図-6に固有振動数および固有振動モードを示す。別途行った、骨組みモデルを用いた固有振動解析における1次モードの固有振動数は約0.9Hzであり、図-2に示した解析モデルの固有振動数が高い結果となった。これは、図-7に示すように床版として水平方向に配置したシェル要素と鉛直方向に配置したシェル要素の接続部では断面が重複し、この断面重複部の影響により床版の剛性が若干高く評価されたものと考えられる。

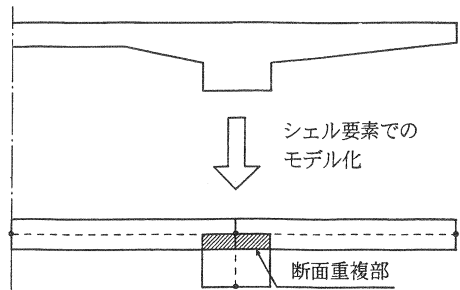


図-7 床版のモデル

6. 動的解析

6. 1 解析方法および材料非線形特性

動的解析における解析条件の一覧を表-2に示す。直接積分法には Newmark β 法を用い、積分時間間隔は 0.01 秒とした。また、各ステップ毎に Newton Regular 法による収束計算を行った。減衰は Rayleigh 減衰を用いることとし、前述の固有振動解析において各部材に表-3に示す減衰定数を設定し、卓越する振動モード（1次と3次モード）における振動数および、ひずみエネルギー比例減衰からパラメータ α , β を決定した。

コンクリート部材の非線形特性は、ひびわれのみを考慮することとし圧縮側は線形とした。なお、コンクリート部材の引張強度は道路橋示方書耐震設計編⁴⁾に規定されている曲げ引張強度の算出式から求めた。なお、柱頭部コンクリートは検討断面から除いているため、ひびわれを考慮しない線形部材とした。鋼トラス材および鉄筋の非線形特性は、応力-ひずみ曲線を完全弾塑性型とした。外ケーブルおよび床版内に配置されている内ケーブルについては地震時の応答が降伏応力以下であると予想されるため線形部材とした。なお、解析に使用した地震波形はタイプII-I-3であり、橋軸方向を対象に解析を行った。

表-2 解析条件

解析仕様		直接積分法	Newmark β 法 ($\beta=1/4$)
		積分時間間隔	0.01 秒
		質量マトリクス	整合質量マトリクス
		減衰マトリクス	Rayleigh 減衰
		求解法	Newton Regular 法
		収束判定法	残差力
材料非線形	コンクリート	ひびわれモデル	分散型
		引張軟化	線形軟化
		テンションカットオフ	一定値 上下床版：2.7N/mm ² 橋脚：1.9N/mm ²
		せん断伝達	一定値
	鋼トラス材 鉄筋	応力-ひずみ曲線	完全弾塑性型
		降伏基準	Von Mises 型 鋼トラス材：490 N/mm ² 鉄筋：345 N/mm ²
入力地震動		加速度波形：タイプII-I-3	

表-3 部材の減衰定数

部材	減衰定数
上床版	5.0%
下床版	5.0%
鋼トラス材	3.0%
外ケーブル	3.0%
橋脚	2.0%

6. 2 解析結果

(1) 応答加速度および応答変位

図-8に動的解析における応答波形として、上床版位置における加速度波形および変位波形を示す。最大

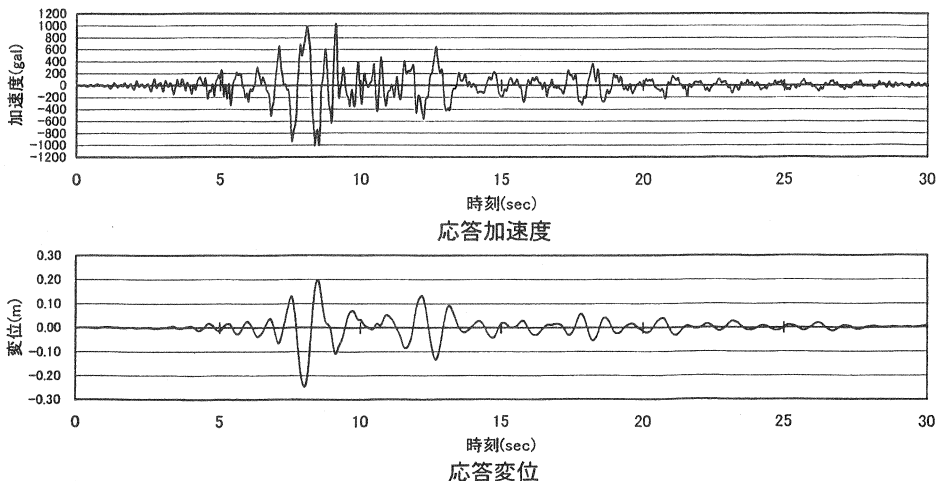


図-8 動的解析による応答波形

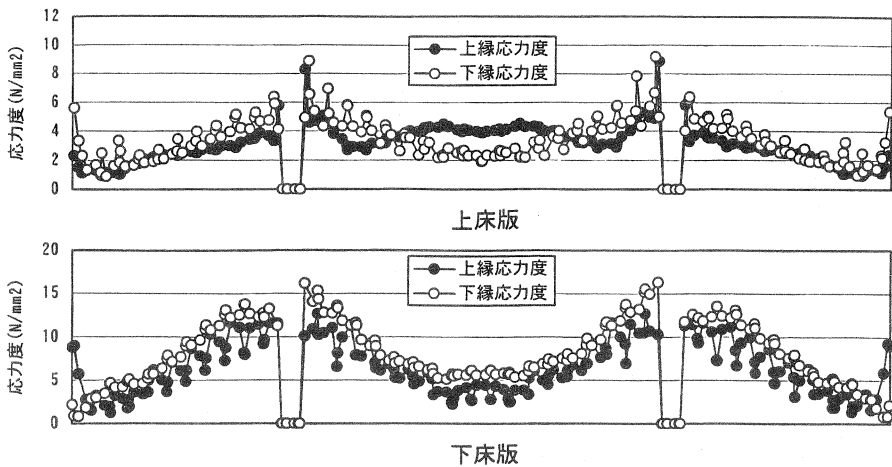


図-9 床版コンクリートの最大圧縮応力度

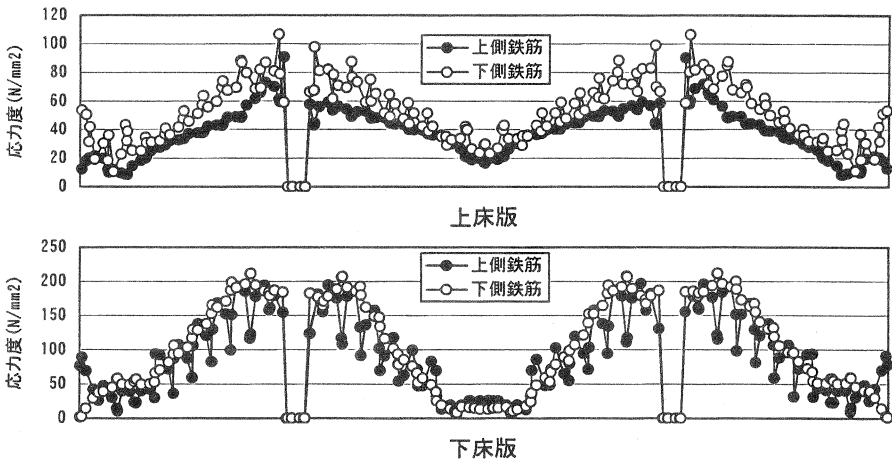


図-10 床版鉄筋の最小応力度

応答加速度は 1037 gal (9.11 sec), 最大応答変位は -0.246 m (8.00 sec) であった。

(2) 床版の応答

床版コンクリート上下縁における最大圧縮応力度分布を図-9に示す。圧縮応力度は上下床版とも柱頭部付近で最大値を示し、上床版では 10 N/mm²程度、下床版では 16 N/mm²程度となっている。静荷重作用時からの増加応力度は上床版で 4 N/mm²程度、下床版で 6 N/mm²程度であり、骨組みモデルによる動的解析による結果³⁾と比較して増加応力度が小さな結果となっている。これは、本解析モデルにおいて床版に配置した埋め込み鉄筋要素の剛性が床版の剛性に含まれて評価されているためと考えられる。この結果から、地震時に発生する床版コンクリートの最大圧縮応力度は設計基準強度 (40 N/mm²) に対して十分に余裕があるものと判断される。

上下床版内に配置した埋め込み鉄筋要素の応力度分布を図-10に示す。図は縦軸に鉄筋の圧縮応力度をとり、地震時における鉄筋の最小応力度をプロットしたものである。図より、床版に配置した鉄筋は全部材において圧縮状態にあることが分かる。今回の検討モデルでは、床版シェル要素の層方向の積分点を2点と粗く設定したことから、ひびわれ発生による鉄筋への引張応力度の伝達が行われず、床版がほぼ弾性状態であったものと考えられる。また、通常のM-φモデルを用いた骨組み解析では、M-φ関係の初期状態としてクリープ・収縮による鉄筋の圧縮応力は無視しているが、FEMモデルによる段階施工解析では、クリープ・

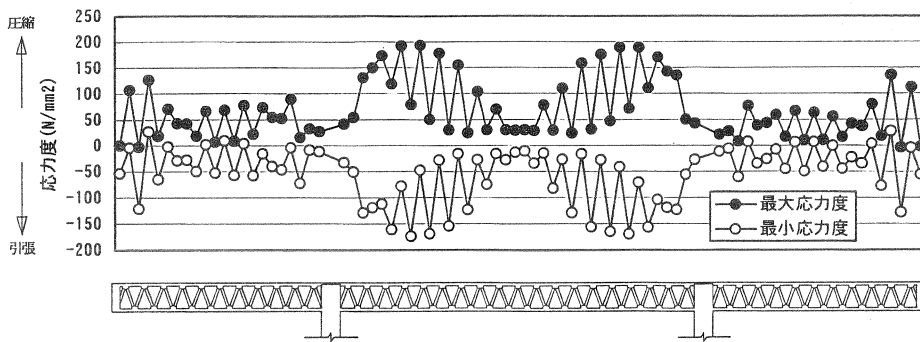


図-11 鋼トラス材の最大・最小応力度

収縮により鉄筋に作用する圧縮応力も考慮される。このことから、FEM解析により耐震設計を行った場合には、骨組みモデルを用いて耐震設計を行った場合と比較して床版に配置される鉄筋量を減少させることが可能であるものと考えられる。

(3) 鋼トラス材の応答

図-11に鋼トラス材の最大・最小応力度分布を示す。図は圧縮応力度を正、引張応力度を負として結果をプロットしたものである。最大・最小応力度は中央径間の支間1/4点付近で発生し、 $+200 \text{ N/mm}^2$ 、 -170 N/mm^2 程度となっている。また、地震動による応力振幅が最大となる部材も中央径間の支間1/4点付近となり、振幅は 280 N/mm^2 となった。本検討で鋼トラス材として用いた鋼管はSM490であるため、鋼トラス材は地震時に発生する応力度に対して十分に余裕がある結果となった。

7. まとめ

本検討において得られた結果をまとめると次のとおりである。

- ① 固有振動解析の結果は、骨組みモデルを用いた場合と比較して固有振動数が高い結果となった。これは、床版にシェル要素を用いたことによる断面の重複により剛性が高く評価されたためと考えられる。
 - ② 上下床版コンクリートの最大圧縮応力度は上床版で 10 N/mm^2 程度、下床版で 16 N/mm^2 程度であり設計基準強度に対して十分に余裕がある。
 - ③ 床版に配置した鉄筋の応力度は、全部材圧縮状態であった。
 - ④ 鋼トラス材に発生する応力度は最大 200 N/mm^2 程度であり、降伏に対して十分に安全性を有している。
- 以上、複合トラス橋の橋軸方向の地震時応答性状に関して検討を行った。今回の検討では、橋軸方向に対して着目したが、今後は橋軸直角方向の検討や、床版のモデル化手法についても詳細に検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 二井谷教治, 正司明夫, 二階堂輝幸, 渡瀬博: 鋼トラスウェブPC模型桁の荷重試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.931-936, 1998.7.
- 2) 野呂直以, 室井進次, 二井谷教治, 江口信三: 複合トラス橋梁の格点部の実験的研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1485-1490, 2001.3.
- 3) 二階堂輝幸, 角本周, 正司明夫: 鋼トラスウェブPC橋の地震時応答性状に関する検討, 第9回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.53-58, 1999.10.
- 4) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V 耐震設計編, 1996.12