

(87) 張出し架設に適した複合トラス橋の開発《設計検討》

オリエンタルコンサルタンツ 東京事業本部

○猪爪一良

〃

正会員 万名克実

〃

正会員 渡辺英夫

東海設計

安 同祥

1. はじめに

今後の橋梁建設は、高齢化、国際化、規制緩和、インフラ投資の縮減および環境適合等の厳しい条件下での推進が要求される。このため、徹底的なコスト縮減を追求した合理的な構造の開発、性能の明確化、ミニマムメンテナンス、建設時の環境への影響低減および景観創出がより重要な課題と言えよう。

近年、これらの課題の解決策の一つとして、鋼とコンクリートの長所を相乗発揮させる複合構造橋梁の開発が活発になってきている。標準適用支間が80~150m程度の複合構造橋梁形式として、P C箱桁のウェブに鋼トラス部材を用いた複合トラス橋(第二東名:巴川橋)の計画・設計が進められており<sup>1)</sup>、鋼トラス部材と床版の接合方法(点支持構造)、床版設計方法および架設時トラス部材の据付け方法が課題となっている。

本論文では、コンクリート床版と鋼合理化トラス桁の上下弦材とを合成し、山岳部での張出し架設も可能な複合トラス橋の開発を目的として、概略設計、地震応答解析、張出し架設方法および工費・工期等の検討を行い適用性を把握したので、主要な検討結果について報告するものである。なお、立体FEM解析による床版応力、プレストレス導入時の床版と格点の応力性状等については、文献2)で報告している。

2. 構造の概要

(1) 構造の特長

開発検討を進めている複合トラス橋(設計モデル)の概略構造図を図-1に示す。上部構造は3径間連続複合トラス、下部構造は二枚壁形式のRC橋脚であり、全体構造は橋脚柱頭部で上下部構造を剛結したラーメン構造である。主要寸法は橋長280m、中央支間128m、有効幅員10.5m(2車線)および橋脚高40mである。

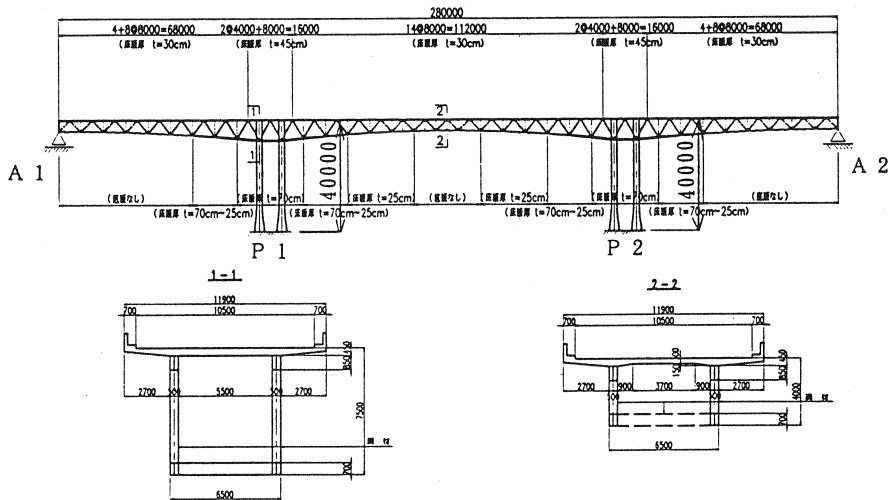


図-1 複合トラス橋の構造図

複合トラス橋の主な特長は、以下のとおりである。

- 1) 鋼合理化トラスとコンクリート床版との合成化：張出し架設時に上床版(PC)を上弦材で線支持し合成化することにより、上弦材断面の縮小化、橋軸方向プレストレスの導入効率の向上、床組構造や横構の省力化および軽量化を図る。また、圧縮領域の下弦材についても下床版(合成床版)との合成化を行う。
  - 2) 内・外ケーブルの併用：上床版の橋軸方向には、張出し架設時の死荷重に対して内ケーブルにより、架設閉合後の後荷重に対しては外ケーブルによりプレストレスを導入することで、架設工期の短縮を図る。
  - 3) 合理的な下床版の配置：中間橋脚付近では下弦材は高圧縮応力を受けるため、下床版(RC合成床版)を配置し下弦材との合成化により、下弦材断面の縮小化と主構高の低減を図る。
  - 4) 二枚壁式RC橋脚構造の採用：橋軸方向の柱頭部に作用する水平力ならびに曲げモーメントを橋脚の軸方向力に変換することで断面の合理化を図る。また、温度変化及び床版コンクリートの乾燥収縮等による拘束力の低減化を図る。
  - 5) 複合トラスと中間橋脚との一体化：双方を一体化しラーメン構造とすることにより、張出し架設の施工性、耐震性および支承レスによる維持管理性の向上を図る。
  - 6) 張出し架設工法の採用：山岳部の張出し架設にも対応できるように支間割りとし死荷重バランスを図る。
- (2) 開発の達成点と導入技術

表-1に、開発にあたって追求するキーワード、開発の達成点およびそのための導入技術を示す。

表-1 開発の達成点と導入技術

開発キーワード		複合トラス橋の達成点	導入技術
◆耐久性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・健全な床版</li> <li>・健全なPCガラウト</li> <li>・疲労に強い鋼構造</li> <li>・長持ちする塗装</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ひびわれのないPC床版</li> <li>・ガラウト不要床版横締め採用</li> <li>・二次力の低減</li> <li>・疲労に強い詳細構造の採用</li> <li>・塗装面積減少, 高耐久性塗装採用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・P R C設計の導入</li> <li>・プレガラウト仕様鋼材の採用</li> <li>・応力性状の確認</li> <li>・主構と床組取付け構造の検討</li> <li>・溶接性改善, 高耐候性鋼材</li> </ul>
◆省力化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・PC横締め工の省力化</li> <li>・PC縦締め工の省力化</li> <li>・サイクル化</li> <li>・鋼部材加工工数削減</li> <li>・現場塗装作業の軽減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・横締め作業の簡便化</li> <li>・縦締め作業の簡便化</li> <li>・架設の機械化施工</li> <li>・合理化設計の推進</li> <li>・塗装面積の減少</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガラウト不要のプレガラウトPC鋼材</li> <li>・後荷重に対して外ケーブルの採用</li> <li>・移動型枠, プレキャスト鉄筋の採用</li> <li>・合理化トラス構造の採用</li> <li>・耐候性裸仕様</li> </ul>
◆耐震性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・耐震性の向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上部構造の軽量化</li> <li>・長周期化</li> <li>・ラーメン構造化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鋼合理化トラス構造の採用</li> <li>・鋼トラスとコンクリート床版の合成化</li> <li>・二枚壁形式のRC橋脚の採用</li> <li>・複合トラスとRC橋脚の一体化</li> </ul>
◆維持管理 ミニマムメンテナ ンス	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塗り換え塗装の削減</li> <li>・支承の削減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塗り換え塗装面積の減少</li> <li>・支承箇所減少</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・耐候性鋼材の使用により塗り換え不要</li> <li>・複合トラスとRC橋脚の一体化</li> </ul>
◆経済性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鋼重の削減</li> <li>・製作コストの削減</li> <li>・付属物費用の削減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上下弦材断面の縮小, 床組材減少</li> <li>・加工工数の削減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鋼トラスとコンクリート床版の合成化</li> <li>・材片数, 溶接延長の削減</li> <li>・上下部一体化による支承数削減</li> </ul>
◆工期短縮	<ul style="list-style-type: none"> <li>・架設作業の軽減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・架設の機械化施工</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・サイクル化, 外ケーブル併用</li> </ul>
◆景観性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・景観性の向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造の合理性追求</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・トラス主構高さの変化</li> </ul>

3. 概略設計

(1) 設計目的と方法

橋軸方向主構造の所要断面を把握するため、施工順序を追って概略設計を行った。構造解析は、各部材を全断面有効とした平面骨組構造解析とし、橋脚下端の支持条件は建設地点(山岳地)の地盤種別をⅠ種地盤と設定して完全固定とした。床版と上下弦材とは合成構造とするため、弦材と床版とのヤング係数比を用いて床版を弦材に換算した。張出し施工時は、施工ステップに応じて自重、架設荷重および後死荷重を考慮した。架設時と完成時の構造系の変化を考慮したコンクリート床版のクリープによる不静定力は、道路橋示方書Ⅰによる近似計算法に従った。安全性の照査は、道路橋示方書Ⅱ鋼橋編とⅢコンクリート橋編に従った。

(2) 設計条件

①一般条件

形式：3径間連続PC複合トラス橋  
 支間：76.0+128.0+76.0  
 有効幅員：10.500m  
 架設工法：片持ち式張出し工法

②使用材料

コンクリート：主桁 $\sigma_{ck}=50N/mm^2$ 、橋脚 $\sigma_{ck}=24N/mm^2$   
 鉄筋：SD345  
 PC鋼材：橋軸方向内ヶ<sup>ル</sup> SWPR7B 12S15.2  
 橋軸方向外ヶ<sup>ル</sup> SWPR7B 19S15.2  
 鋼材：SM490

③基本荷重

活荷重：B活荷重  
 衝撃係数： $i=20/(50+L)$   
 架設荷重：トラック(25t吊り) 27tf  
 吊り型枠 25tf  
 運搬トラック 20tf

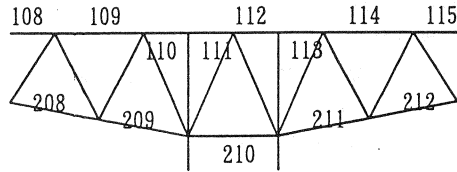


図-2 P1 柱頭部付近のモデルと部材番号

(3) 計算結果

1) 断面力

最大張出し架設時と完成時の柱頭部付近の断面力を表-2に示す。架設時の常時換算断面力(許容応力度の割増し率1.25)は完成時より小さく、部材断面は完成時で決定される。また、架設完了時に端支点でジャッキアップを行うことにより、柱頭部断面力を低減することができる。

表-2 架設時および完成時の断面力

部 材 番 号	109		110		111		112		209		210		211	
	M(tf·m)	N(tf)	M(tf·m)	N(tf)	M(tf·m)	N(tf)	M(tf·m)	N(tf)	M(tf·m)	N(tf)	M(tf·m)	N(tf)	M(tf·m)	N(tf)
前死荷重														
閉合直前の躯体自重	-128.7	-3184.8	-655.4	-3775.2	-259.8	-3814.5	-151.2	-3757.9	-394.5	3527.2	-151.8	3774.7	-554.0	3408.7
閉合時の荷重	-12.9	-378.7	-24.9	-401.8	338.7	-531.4	-380.5	-822.8	13.3	393.6	148.7	700.1	-63.0	1005.3
閉合後作業荷重除去	1.5	44.1	3.5	45.4	-57.2	70.3	63.6	118.8	-5.0	-45.1	-20.3	-99.5	18.4	-150.2
後死荷重	-29.8	-464.1	-148.1	-596.2	59.7	-657.7	-151.8	-737.5	-51.1	538.8	26.9	707.7	-105.3	743.1
閉合直前端支点ジャッキアップ $\tau=120t$	42.3	1129.5	25.8	1138.2	702.9	870.4	-667.5	317.9	77.5	-1139.7	292.5	-541.2	-59.9	49.5
計(ジャッキアップあり)	-127.5	-2833.9	-799.1	-3589.6	784.4	-4062.9	-1287.4	-4883.6	-359.8	3274.8	296.2	451.9	-785.8	5054.5
計(ジャッキアップなし)	-169.8	-3963.5	-824.8	-4727.9	81.5	-4933.4	-819.9	-5401.5	-437.3	4414.5	3.7	5083.0	-703.9	5004.9
施工時(最大張出し状態)	-151.1	-3743.4	-706.7	-4395.3	-349.9	-4412.7	-104.0	-4298.1	-424.4	4132.2	-191.8	4339.8	-581.2	3904.7

2) 部材断面の合成応力度

柱頭部付近主要点の合成応力度(ジャッキアップなしの場合)を表-3に示す。下床版は圧縮部材となるため、プレストレスは導入していない。

表-3 合成応力度(kgf/cm<sup>2</sup>)

部材番号	109	110	111	112	209	210	211
必要PC鋼材本数	36	50	56	56	0	0	0
コンクリート							
上縁	2.1	4.9	68.8	6.7	28.2	44.3	11.4
下縁	35.0	51.8	48.7	68.7	146.2	117.9	159.2
鋼材	-350.2	-189.4	-1244.2	-385.5	-	-	-

(4) ケーブル配置

柱頭部付近の上床版のPC鋼材配置は、以下のとおりである(図-3参照)。

- ◇床版横締め : SWPR19 1S21.8 (プレグラウトPC鋼材), ctc500
- ◇縦締め(内ケーブル) : SWPR7B 12S15.2、(外ケーブル) : SWPR7B 19S15.2

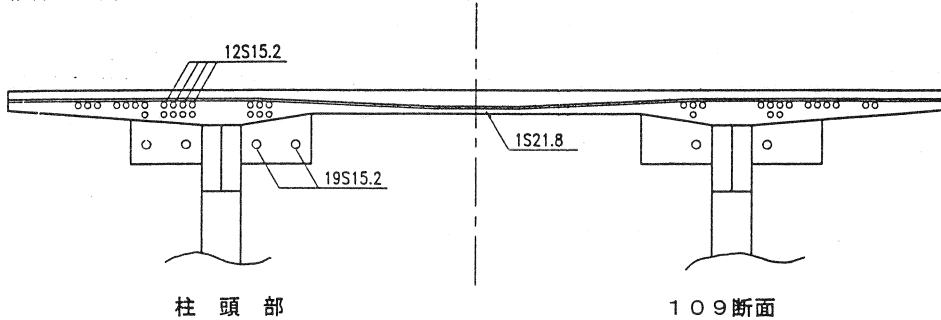


図-3 PCケーブルの配置

4. 地震応答解析

(1) 解析目的

複合トラス橋の地震時の応答特性の把握と耐震安全性の確認を行うことを目的として、橋軸方向について非線形動的解析を行った。

(2) 解析モデル及び解析方法

1) 解析モデル

解析モデルは、床版と橋脚を梁要素、斜材を棒要素とする平面骨組構造解析モデルとした(図-4参照)。支点条件は、側径間端支点を可動、中間橋脚下端をバネ支持とした。バネ定数は、直接基礎(Ⅰ種地盤)を想定して算出した。

2) 部材剛性および減衰定数

上下床版および斜材は全断面を有効とみなした線形弾性部材、RC橋脚はひび割れ剛性・初降伏剛性を有する非線形部材(武田モデル)とした。減衰定数は上下床版に対して0.02、斜材に対して0.01、RC橋脚に対して0.02、基礎に対して0.10とした。

3) 解析方法

時刻歴応答解析を行い、直接積分法(Newmark- $\beta$ 法、 $\beta=0.25$ )を用いた。積分間隔は0.005秒とした。

4) 入力地震動

道路橋示方書V・耐震設計編に示される標準加速度波形を橋軸方向に作用させた。図-4に入力地震波形(タイプⅡ)を示す。

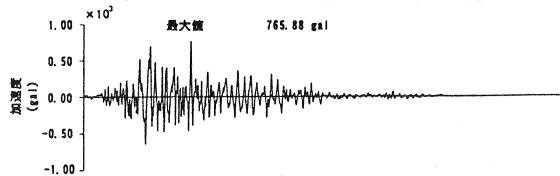


図-4 入力地震波形

(3) 解析結果

1) 固有値解析

表-4に固有周期、刺激係数、有効質量およびひずみエネルギー比例減衰定数、図-5に固有振動モードを示す。卓越する振動モードは上部構造が水平変位する1次モードで、固有周期は1.73秒である。

2) 時刻歴応答解析

表-5に主な解析結果、図-6に最大応答断面力分布、図-7に応答波形、図-8にM- $\phi$ 履歴を示す。

表-4 固有周期

モード	固有周期 (Sec)	刺激係数	有効質量率	比例減衰定数
1*	1.726	32.2	43.6	0.03020
2	0.864	7.5	2.4	0.01656
3	0.535	3.7	0.6	0.01488
4	0.472	19.3	15.7	0.01198
5	0.377	1.3	0.1	0.01130
6	0.239	8.0	2.7	0.01176
7	0.227	-3.4	0.5	0.02017
8	0.216	2.7	0.3	0.01371
9	0.211	-6.3	1.7	0.01243
10	0.188	-3.0	0.4	0.03661
11*	0.183	6.1	1.6	0.03370

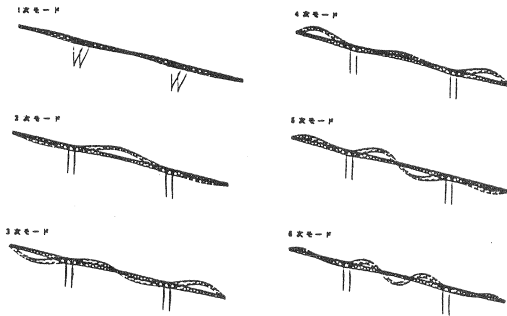
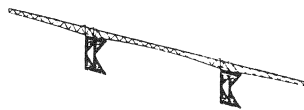


図-5 固有モード

表-5 解析結果

入力加速度		786 (gal)
主構	加速度	294 (gal)
	最大応答変位	366 (mm)
	残留変位	63 (mm)
橋脚	最大応答曲率	0.0043(1/m)
	許容曲率	0.0198(1/m)
基部	応答せん断力	680 (tf)
	せん断耐力	1455 (tf)

曲げモーメント

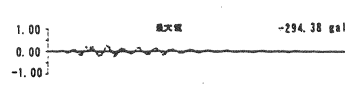


軸力

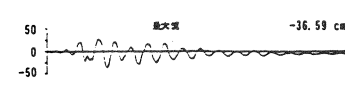


図-6 最大応答断面力分布

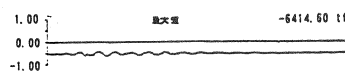
加速度 (主構) ( $\times 10^2$  gal)



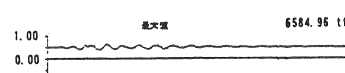
変位 (主構) (cm)



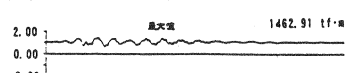
軸力 (上床版) ( $\times 10^4$  tf)



軸力 (下床版) ( $\times 10^4$  tf)



曲げモーメント (上床版) ( $\times 10^3$  tf-m)



曲げモーメント (下床版) ( $\times 10^3$  tf-m)

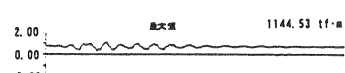
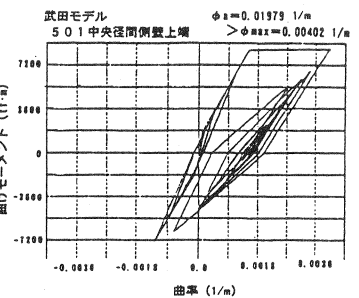


図-7 応答波形

橋脚上端



橋脚下端

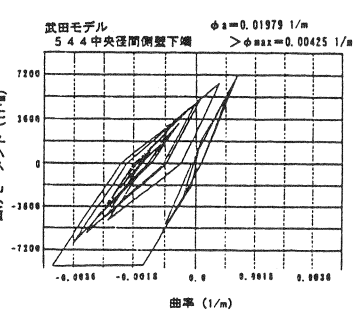


図-8 M-phi履歴

3) 地震時応答特性および耐震性

橋軸方向の地震動に対して、以下の応答特性を把握し、耐震性に優れていることが確認できた。

- ・卓越する1次振動モードの固有周期は、1.73秒であり、長周期構造となっている。
- ・上部構造の地震応答は、二枚壁構造のRC橋脚(柔構造)に支持され、橋脚の履歴減衰によりエネルギー吸収されているため、最大応答加速度は入力加速度の4割まで低減される。
- ・上部構造の応答断面力は、その変動幅が小さく、部材断面は常時で決定される。

### 5. 張出し架設の方法

RC橋脚の施工後、張出し架設を進め、側径間を先に到達させた後、中央径間を閉合させる。張出し架設は、油圧クレーンによる張出し架設と移動型枠・プレファブ鉄筋による床版打設を並行して進め工期の短縮を図る(図-9参照)。なお、張出し架設時には、バント及び特殊な架設機材は使用しない計画とした。

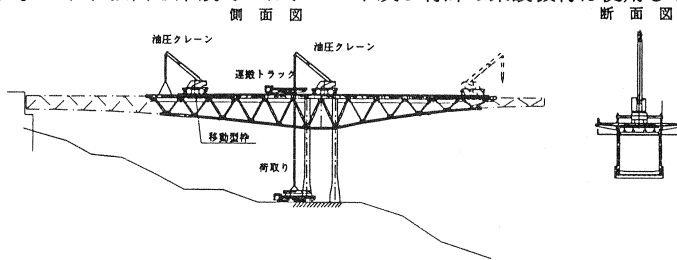


図-9 張出し架設の要領図

### 6. 工費および工期の比較

複合トラス橋、PCラーメン橋(ワーゲンによる張出し架設)および鋼合理化トラス橋(トラベラークレーンによる張出し架設、移動型枠による床版打設)について、上下部構造全体の工事費の比較結果を図-10に示す。なお、下部構造の設計はI種地盤を想定して行ったものである。

複合トラス橋は、コンクリート床版との合成化により鋼合理化トラス橋に比べて鋼材量を25%低減でき、上弦材を張出し架設時の床版支保工に利用でき、かつ場所打ちコンクリート床版を減少できることから、最も経済的となった。上下部構造の工事費は、PCラーメン橋に対して、6%程度の低減となった。

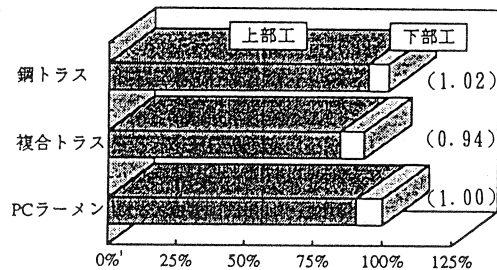


図-10 工事費の比較

現場工期については、鋼合理化トラス橋では鋼部材の架設工と床版工が別工事となるため、工期の短縮は困難である。PCラーメン橋ではワーゲンの能力から、1回の打設長さが4m程度となり架設サイクル数が多くなる。これに対して、複合トラス橋では鋼部材の架設と床版工事を並列に進めるなど、架設サイクルを工夫することにより、工期の短縮が可能となった。

### 7. おわりに

開発検討した複合トラス橋について、概略設計、地震応答解析、架設方法および工費・工期等の検討を行った。その結果、側径間の仮設バント無しで張出し架設を行うことが可能であること、二枚壁形式のRC橋脚の採用並びに合成トラスとのラーメン構造化により耐震性に優れていること、およびコスト縮減の可能性があることが確認できた。

今後実用化に向けて、さらに、①床版と格点構造の応力伝達機構、②上下弦材と床版との結合構造の詳細、③構造、部材断面およびPC鋼材の配置の最適化等について検討を継続していく予定である。

#### 【参考文献】

- 1)小川・寺田：JH日本道路公団における複合構造橋梁、橋梁と基礎、1997.8
- 2)岡田・中西・川畑・高尾：張出し架設に適した複合トラス橋の開発《解析検討》、第8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、平成10年10月
- 3)高尾・川端・万名・渡辺・猪爪：張出し架設に適したPC床版複合トラス橋の開発、土木学会年次学術講演会、平成10年10月