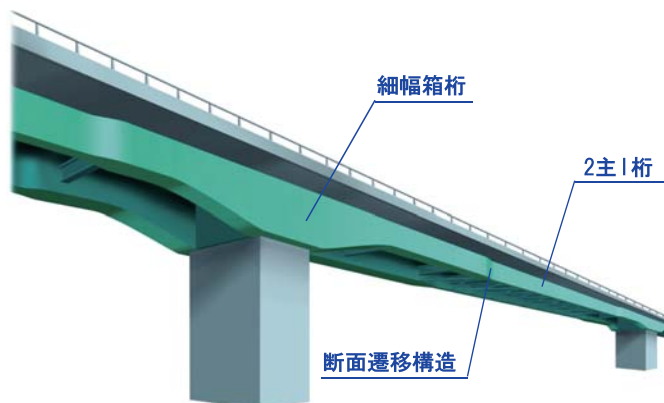


新形式合理化橋梁【コンボガーダー橋】の開発

Development of a New Type of Rationalized Bridge, the 'Combo-Girder Bridge'



比留間 堅 Tsuyoshi Hiruma ①
 美島 雄士 Yuji Mishima ②
 若林 保美 Yasumi Wakabayashi ①

あ ら ま し

鋼橋において今まで合理化の進展があまり見られない支間長 100 ～ 150m 程度の中規模橋梁に対して、従来橋に勝る経済性を有し、安全性および耐久性に優れた新形式橋梁であるコンボガーダー橋を開発した。本橋は、既存の合理化橋梁でありコスト削減に実績のある 2 主 1 桁橋と細幅箱桁橋とを組み合わせ、さらなる経済性を追求した橋梁形式である。本橋の開発では、特に 1 桁と箱桁との接続部について新しい断面遷移構造を考案し、解析の手法を用いてその安全性と耐久性を検証した。また、本橋の架設時に対する安全性についても、想定される架設条件に対して解析の手法により確認を行った。さらに、既存の合理化鋼橋のみならず PC 橋に対しても本橋の経済的メリットについて明らかにした。

本論文では、コンボガーダー橋の構造概要や特徴について述べるとともに、本橋の開発の概要および経済的効果について報告する。

Abstract

The rationalization of mid-scale steel bridges, from 100m to 150m in span length, has yet to progress. We developed a new type of bridge, the 'Combo-Girder Bridge', for such mid-scale bridges. It is more economical than conventional bridges and features high durability and safety. In order to achieve further efficiency in economy, this bridge combines a steel double I girders bridge with a steel narrow box girder bridge, both of which are existing types of rationalized bridges. The principal purpose of developing the Combo-Girder Bridge was to address and solve two technical issues. One was to design a new structure for the connection between the I girder and the box girder, and to verify the safety and durability of this design using an analytical method. The other was to verify the safety of the bridge when it is being constructed. Also, we have made sure that the Combo-Girder Bridge is more economical than not only conventional rationalized steel bridge but also pre-stressed concrete bridges. This paper describes the structural design and characteristics of the Combo-Girder Bridge and outlines its development. Lastly, the paper discusses the economic effects of the Combo-Girder Bridge.

1. 緒言

近年、建設コストの削減やライフサイクルコストの低減を目指して様々な合理化橋梁形式が提案されており、すでに多くの実績がある。鋼橋の場合、支間長が 100m 以下では少数 I 桁橋や細幅箱桁橋などの合理化鋼橋の採用によってコスト削減に大きな効果を挙げた。一方、支間長 100 ～ 150m 程度の中規模橋梁においては、通常鋼床版箱桁やアーチ橋などが最適形式にあげられるが、これらは合理化の進んでいない従来タ

イプであるため、発注者による橋梁形式選定では経済性で優位とされる PC 箱桁橋や波形ウェブ PC 橋などが多く採用されるようになってきている。

このような背景から、従来の合理化鋼橋のみならず PC 橋にも勝る経済性を有し、安全性と耐久性に優れた新形式橋梁であるコンボガーダー橋¹⁾を開発した。コンボガーダー橋は、既存の合理化鋼橋として実績のある 2 主 1 桁橋と細幅箱桁橋とを組み合わせることによってさらなる経済性を追求した橋梁形式である。コンボガーダー橋の開発では、主に二つの技術的課題に対して取り組んだ。一つは、本橋の最大の特徴として新たに開発した I 桁と箱桁との接続部に設ける断面遷移構造の確立である。この断面遷移構造は I 桁と箱桁

① Hitz日立造船㈱ 機械・インフラ本部 鉄構ビジネスユニット 技術士(建設)

② Hitz日立造船㈱ 機械・インフラ本部 鉄構ビジネスユニット 技術士(建設・総合技術監理)

間の力の伝達を円滑に行わなければならないことはもとより、構造に対する安全性と耐久性の検証が重要な課題となった。もう一つは、架設時の安全性に対する検証である。コンボガーダー橋では、橋脚高が比較的高い場合、耐震性向上やライフサイクルコストの低減を図るため中間橋脚上で主桁とRC橋脚とを剛結したラーメン形式を採用する。このような橋脚高の高いラーメン橋の架設には一般に剛結部からの張り出し工法が採用される場合が多い。しかし、本工法をコンボガーダー橋に採用した場合、本橋が目標とする最大支間長150mでは通常よりかなり大きな張り出しとなるため、架設時の安全性について検証する必要がある。コンボガーダー橋の開発では、これら技術的課題を解決するため、課題に対する条件が最も厳しくなる最大支間長150mを有する構造プロポーションを対象とし、解析的手法を用いて検討を実施した。さらに、開発の締めくくりとして、既存の橋梁形式に対する経済的メリットについて明らかにした。本論文では、まず、コンボガーダー橋の構造概要とその特徴について述べ、次に開発概要を説明し、最後に経済性に対する効果について報告する。

2. コンボガーダー橋の概要

2.1 構造概要 コンボガーダー橋は、図1に示すように中間橋脚付近には剛性の高い細幅箱桁、それ以外は経済性に優れた2主I桁を配置した構造である。これまでもI桁と箱桁とを組み合わせる事例はあったが、支点上で横梁などを介して支間毎に変化させる場合がほとんどであり、I桁と箱桁を支間途中で直接接続した構造はあまり見られない。それに対してコンボガーダー橋は、合理化した2主I桁と細幅箱桁を断面力の大きさに応じて組み合わせ配置している点が最大の特徴である。

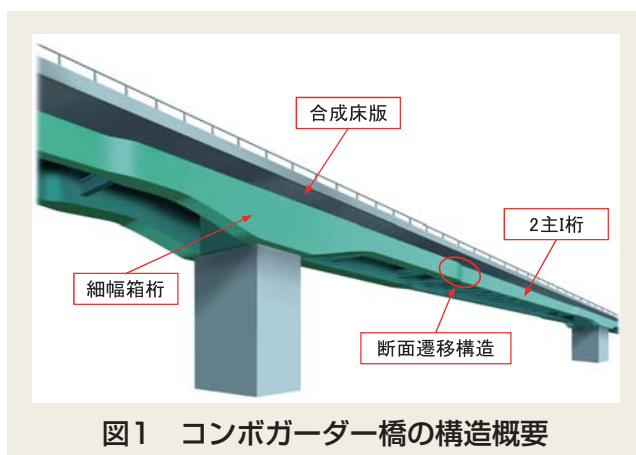


図1 コンボガーダー橋の構造概要

2.2 特徴 コンボガーダー橋の主な特徴をまとめると以下のとおりである。

①I桁と箱桁を作用断面力に応じて配置することにより、従来の合理化鋼橋に対してさらなる合理化を図っている。

- ②新たに開発した断面遷移構造は、I桁と箱桁の主桁中心線を一致させることによりウェブ間の応力伝達を円滑にし、さらに疲労耐久性を確保するため溶接施工性に配慮した構造としている。
- ③橋脚高が高い場合は、主桁とRC橋脚の剛構造を採用し、架設には張り出し工法を用いることで、ベントを設置しない経済的な架設が可能となる。
- ④剛構造を採用した場合には、耐震性の向上が図れるとともに、支承が削減できるため維持管理コストの低減が可能となる。
- ⑤合成床版を採用することにより、本形式の橋梁においてもRC床版に比べて高い耐久性と施工の合理化および安全性の確保を図ることができる。

3. 断面遷移構造に対する安全性と耐久性の検討

3.1 検討概要 2主I桁と細幅箱桁との接続部には新たに開発した断面遷移構造を設置する。断面遷移構造はI桁と箱桁間の力の伝達が円滑であることが基本であるが、さらに作用荷重に対する部材の安全性および疲労耐久性をも有していなければならない。ここでは、断面遷移構造を構成する部材の安全性と疲労耐久性について行った検討の概要を述べる。なお、検討は3次元FEM解析を用いて行った。

3.2 断面遷移部の構造 断面遷移構造はI桁に作用する断面力を確実に箱桁へと伝達出来る構造でなければならない。このため、力の伝達性能や施工性について事前検討を行い、図2のように基本構造を決定した。

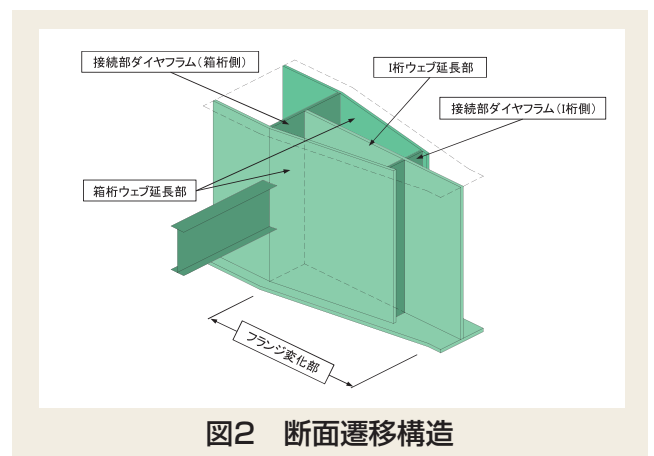
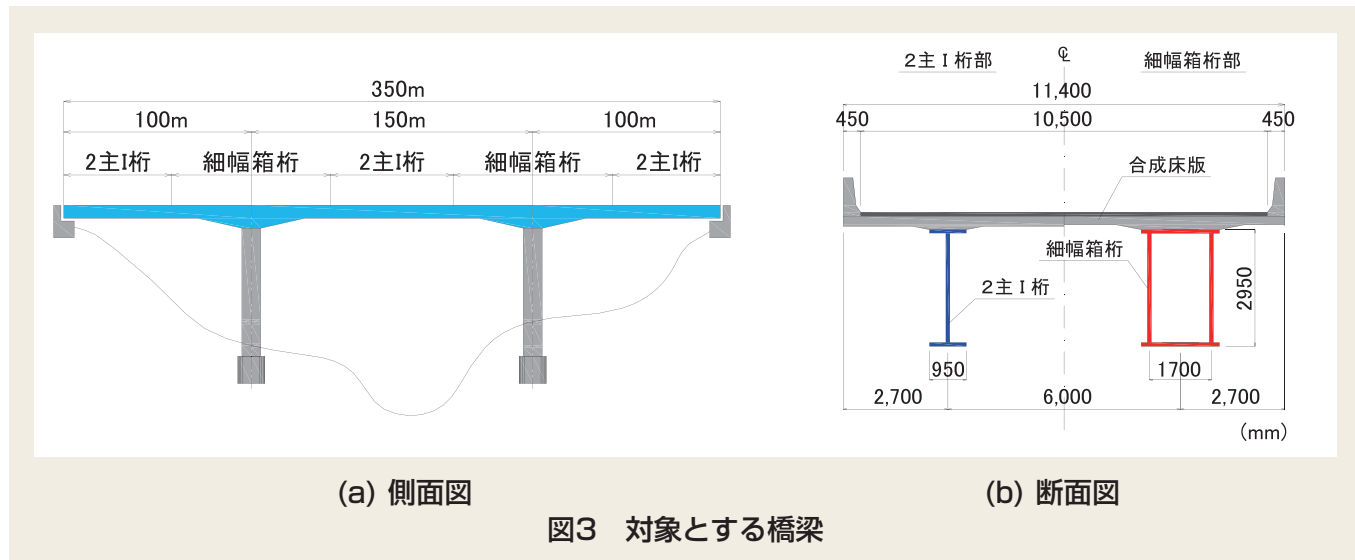


図2 断面遷移構造

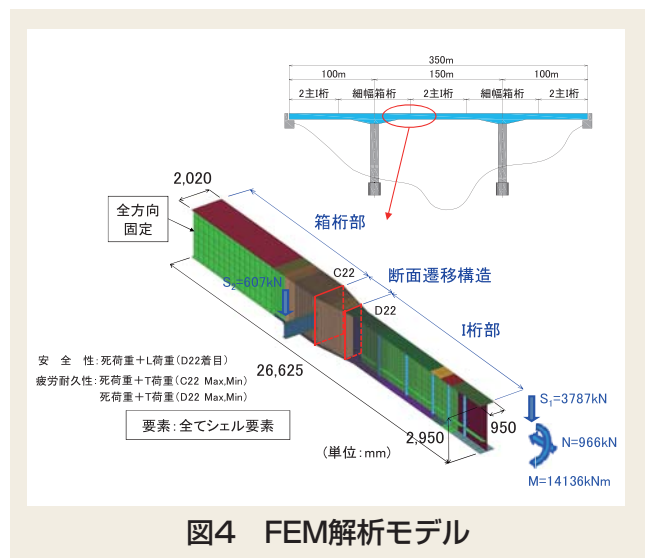
3.3 部材の安全性

3.3.1 検討方法 対象とした橋梁は、図3に概略図を示した支間長100m+150m+100mを有する3径間連続複合ラーメン橋である。対象橋梁における最適なI桁と箱桁の接続位置は、上部工の全体工費に着目して経済比較により決定し、その条件において、別途立体骨組み解析を実施して断面遷移構造の詳細を決定した。断面遷移構造の断面はI桁および箱桁断面としてそれぞれ決定した板厚を用いて構成した。その構

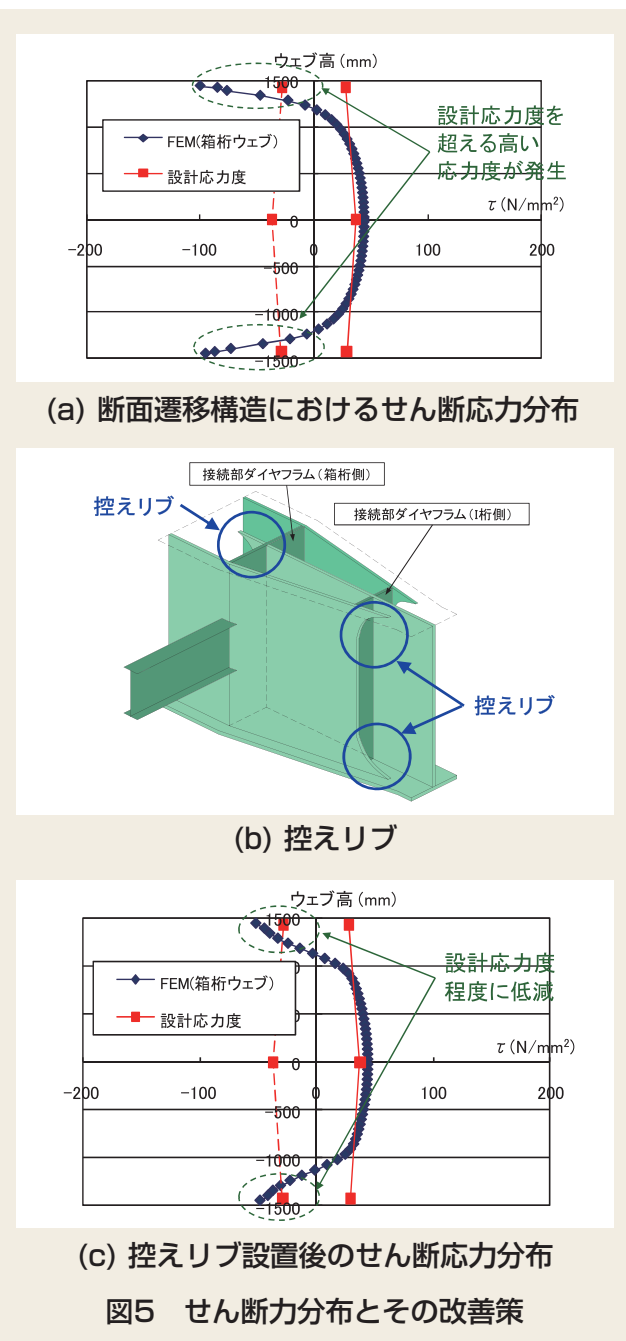


造に対してFEM解析を行い、構成部材の安全性を検証した。なお、断面遷移構造に対する設計法は文献2)に詳細を示している。

3.3.2 解析モデルおよび载荷荷重 FEM解析に用いた解析モデルを図4に示す。モデルは断面遷移構造を取り出した部分モデルであり、要素はすべてシェル要素とし、境界条件はモデルの箱桁側端部を全方向固定とした。また、载荷する荷重は別途実施した立体骨組み解析によって当該部位に対して最も不利となる荷重の組み合わせを求め、モデル部分への直接载荷と部材端への境界断面力として作用させた。



3.3.3 検討結果 断面遷移構造の安全性は、FEM解析より得られた応力をそれぞれ許容応力度と比較することにより検証した。解析結果の例として、応力度分布の中でも断面遷移構造で最も特徴的であったせん断応力度分布を図5に示す。図5(a)では、ウェブ本数の変化する接続部ダイヤフラム(I桁側)部断面において、箱桁ウェブの上下端で、設計応力度を超える大きなせん断応力度が生じている。この現象は接続部ダイヤフラム(箱桁側)部断面のI桁ウェブにお



いても確認された。FEM解析における応力度分布が設計応力度分布と異なった原因について検討した結果、この応力集中は断面遷移構造においてウェブ断面が不連続となる断面の急変によって生じるものであることがわかり、これに対する対策が必要となった。そこで、断面の急変を緩和してウェブの応力を円滑にフランジへと伝達する目的で図5 (b) に示すようにウェブに控えリブを設置し、その効果を確認するため再度FEM解析を行った。控えリブ設置後のせん断応力度分布を図5 (c) に示す。控えリブの設置によりせん断応力度を設計応力度程度に低減可能となることを確認した。また、部材に作用するすべての応力については図6に示す断面遷移構造に作用するミーゼス応力度コンターなどにより許容応力度以下であることを確認した。以上より、本構造は十分な安全性を有していることが確認された。

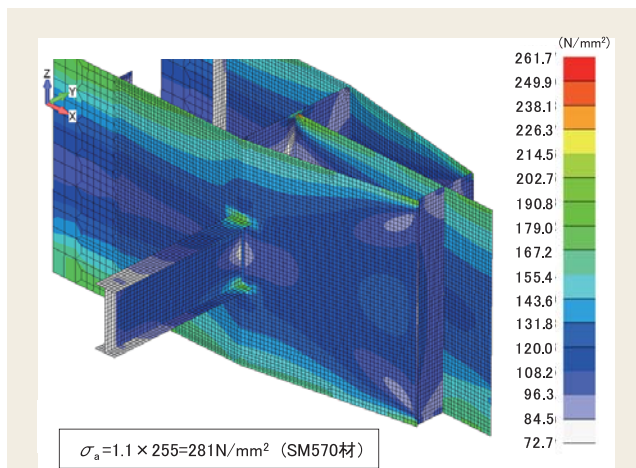


図6 断面遷移構造の応力度コンター図

3.4 疲労耐久性

3.4.1 検討方法

断面遷移構造に対して、FEM解析を用いることにより疲労耐久性の照査を行った。具体的な照査方法は、FEM解析から得られた着目部位の応力振幅に対して「鋼道路橋の疲労設計指針」³⁾に従うことにより行った。なお、断面遷移構造の溶接継手には、全て文献3)で規定された溶接継手を採用している。

3.4.2 FEM解析モデルと荷重載荷状態

検討対象としたのは、3.3で対象とした断面遷移構造の

部分解析モデルと同一である。載荷する荷重は、別途立体骨組み解析を実施し、解析モデルに疲労照査用のT活荷重を載荷して着目箇所に作用する荷重変動が最大となるケースを用いた。

3.4.3 着目箇所 図7に着目箇所、表1に該当する疲労強度等級それぞれ示す。

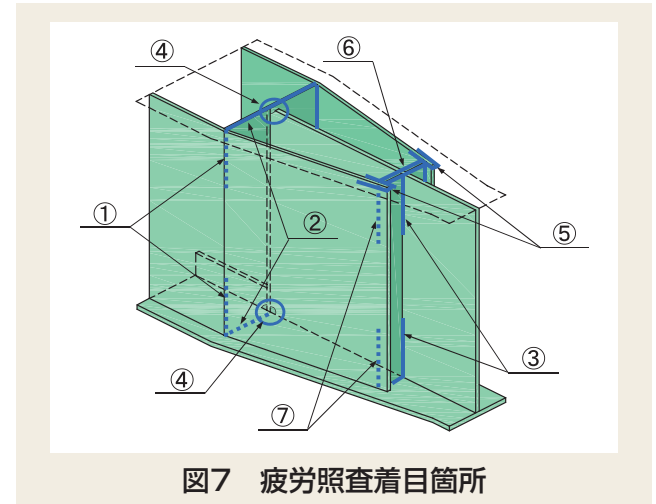


図7 疲労照査着目箇所

3.4.4 照査結果

表1に照査結果を示す。結果表から、着目箇所の応力範囲は全て打ち切り限界以下となり、断面遷移構造は十分な疲労耐久性を有していることが確認された。

4. 架設時安全性の検討

4.1 検討目的

先述したように、本橋の中間橋脚に剛構造を採用した場合は中間橋脚からの張り出し架設が経済的な架設工法となる。しかし、本形式が対象とする中央径間の最大支間長150mの場合においては、側径間の張り出し長が90m程度になることが想定される。この場合、大部分がねじり剛性の小さい2主I桁の張り出しとなることから、桁全体の横ねじれ座屈の発生が懸念された。ここでは、想定した条件における張り出し架設時の横ねじり座屈に対する安全率を確認することにより、架設時安全性確保のための留意点について示す。

4.2 検討方法

安全性の検証は初期たわみを考慮した弾塑性有限変位解析により行った。検討は3.3で対象とした橋梁に対して張り出し長の大きな側

表1 疲労強度等級と照査結果

NO.	着目部位	継手の種類	等級 $\Delta \sigma_f$	(N/mm ²)		判定
				応力範囲 $\Delta \sigma$	応力範囲 $\Delta \sigma_{ce}$	
①	接続部ダイヤフラム(箱桁側)と箱桁ウェブ延長部の溶接部	荷重非伝達型十字溶接継手:非仕上げのすみ肉溶接継手	E (80)	26.7	62	OK
②	接続部ダイヤフラム(箱桁側)と箱桁フランジの溶接部	荷重非伝達型十字溶接継手:非仕上げのすみ肉溶接継手	E (80)	30.6	62	OK
③	接続部ダイヤフラム(I桁側)と桁ウェブ延長部	荷重非伝達型十字溶接継手:非仕上げのすみ肉溶接継手	E (80)	25.4	62	OK
④	フランジと縦リブおよび桁ウェブ延長部のスカーラップ回し溶接部	縦方向継手:スカーラップを含む回し溶接部	G (50)	25.7	32	OK
⑤	箱桁ウェブ延長部端部の回し溶接部	ガセット継手:ガセットをすみ肉溶接した継手	G (50)	20.7	32	OK
⑥	フランジと接続部ダイヤフラム(I桁側)の溶接部	荷重非伝達型十字溶接継手:非仕上げのすみ肉溶接継手	E (80)	36.0	62	OK
⑦	箱桁ウェブ延長部と接続部ダイヤフラム(I桁側)	荷重非伝達型十字溶接継手:非仕上げのすみ肉溶接継手	E (80)	14.7	62	OK

※着目応力はすべて橋軸方向応力である。

径間側に着目した。検討は載荷荷重を増加させて桁全体の横ねじれ座屈に対する安全率を確認する方法により行った。

4.3 解析モデル 解析モデルには側径間を取り出した部分モデルを用いた。事前の解析により、架設時の横荷重による面外変形の抑制とフランジの応力低減から架設時補強材としてI桁全範囲の下フランジ側に横構を設置した。

部材要素は、主桁および横桁はシェル要素、架設時補強材はビーム要素とし、境界条件は支点側の一端を全方向固定とした。解析モデルを図8に示す。

4.4 載荷荷重 架設工法はケーブルエレクションを想定した。このため、トラベラークレーン等の荷重は考慮しておらず、架設材荷重はジョイント足場荷重のみを対象とした。載荷荷重は、鋼重、架設材荷重および地震時荷重を基本荷重とし、鋼重と架設材荷重を漸増させることとした。すなわち、 $k(Ds+Er)+Eq$ (k : 荷重係数、 Ds : 鋼重、 Er : 架設材荷重、 Eq : 地震時荷重)である。 k を増加させていき、部材が降伏して荷重係数 k と桁先端の水平変位 δ_y の関係が線形から非線形へと移行するときに横ねじれ座屈の発生と定義し、このときの k の値を横ねじれ座屈に対する安全率とした。

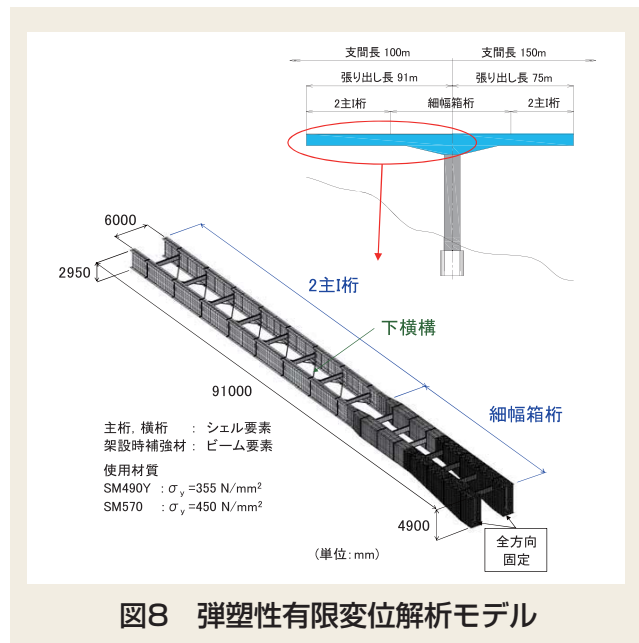


図8 弾塑性有限変位解析モデル

4.5 検討結果 架設時に必要となる安全率は、道路橋示方書⁴⁾に準拠して全体横ねじれ座屈のような不安定現象に対する安全率を2.0とし、その値に架設時の許容応力度の割り増し25%を考慮することにより1.6を採用した。載荷荷重を漸増させた時の荷重係数 k の値と桁先端の水平変位 δ_y との関係を図9に示す。図9より、荷重係数 k が2.5～3.0の範囲で水平変位 δ_y が急激に線形から非線形へと移行しているのがわかる。具体的には、 $k=2.4$ を超えると部材の作用応力度が降伏応力度を超過することがわかった。この結果から、対象とした条件において、本橋架設時の横ねじ

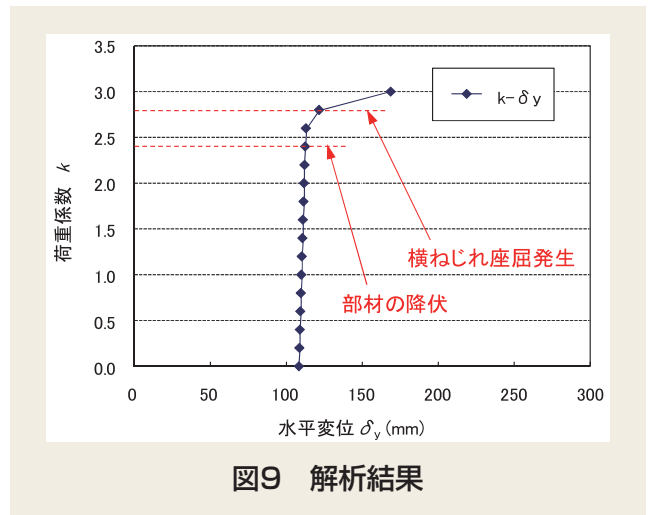


図9 解析結果

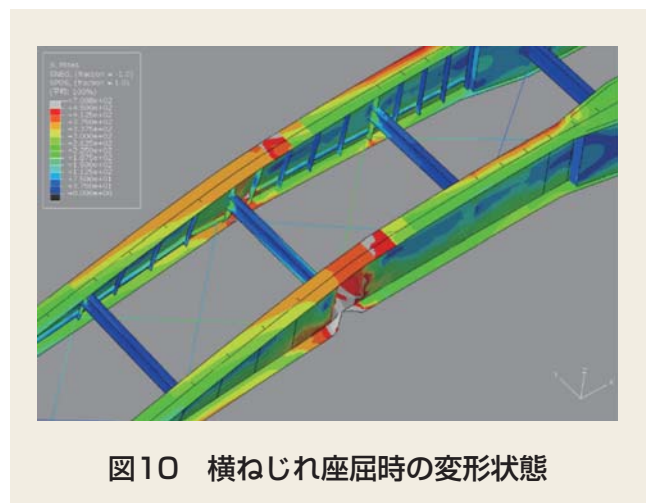


図10 横ねじれ座屈時の変形状態

れ座屈に対する安全率は2.4であり、所要の安全率1.6を十分確保できることが確認された。図10に横ねじれ座屈発生時の変形状態を示す。以上より、本橋における張り出し架設時の安全性が検証されたが、安全性を確保するには、少なくともI桁範囲には架設時補強材を設置し、横ねじれ座屈に対する剛性を向上させるのが良い。

5. 経済性の検証

5.1 検証方針 コンボガーダー橋の経済的メリットを明らかにするため、まず、従来タイプの合理化橋梁である細幅箱桁橋を比較対象とし、上部工建設費において比較を行った。次に、鋼橋だけではなくPC橋に対する効果を調べるため、同規模のPC橋を想定し、上部工から下部工までを含めた建設費について比較を行った。

5.2 対象橋梁 検証対象としたコンボガーダー橋、細幅箱桁橋および波形ウェブPC橋の諸元を表2に示す。なお、比較条件とした支間割は、細幅箱桁橋については実績における最大支間長程度である100mに設定した。一方、PC橋では本橋の適用最大支間長程度となる140mを条件とした。

表2 比較対象の構造諸元

	細幅箱桁橋	PC橋
橋長	260m	320m
支間割	80m+100m+80m	90m+140m+90m
有効幅員	10.5m	11.6m

5.3 検証結果 検証結果を表3および表4に示す。表3より、本橋は細幅箱桁橋に対して上部工建設費で13%削減できることが明らかとなった。また、表4より、PC橋に対しては、上下部工建設費が10%以上削減できることがわかった。この結果より、特にPC橋に対しては、本形式の上部工が軽量であるため橋脚と基礎を含めた工費の削減効果があり、一般に経済性において鋼橋より優位であるとされるPC橋に対しても本橋の経済的メリットが発揮されたものといえる。

表3 経済性の検証結果(鋼橋との比較)

	コンボガーダー橋	細幅箱桁橋
概算鋼重	935 t	1,035 t
比率	0.90	1.00
大型材片数	369	401
比率	0.92	1.00
小型材片数	600	964
比率	0.62	1.00
上部工建設費比率	0.87	1.00

表4 経済性の検証結果(PC橋との比較)

	コンボガーダー橋	波形ウェブPC橋
上部工建設費	0.92	1.00
下部工建設費	0.73	1.00
基礎工建設費	0.81	1.00
概算建設費比率	0.89	1.00

以上より、コンボガーダー橋は従来タイプの合理化鋼橋はもとより、PC橋に対しても十分経済性に優れた橋梁形式であることが確認出来た。

6. 結 言

コンボガーダー橋の開発において、本橋の根幹技術である断面遷移構造の安全性ならびに耐久性に関して解析的手法を用いて検証を行うことにより、構造を確立した。また、張り出し架設時の安全性について同様の手法を用いて検証した。さらに、経済性に関する検証により、従来タイプの合理化鋼橋はもとよりPC橋に対しても経済性に勝ることを明らかにした。

このように、コンボガーダー橋は公共事業において求められるさらなるコスト削減の要請に対して十分に対応でき、公共の利益に資する橋梁形式であると考えられる。

参考文献

- (1) 比留間ほか：鋼I桁と鋼箱桁を組み合わせた合理化橋梁の提案,土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, 2009.9.
- (2) コンボガーダー橋設計マニュアル,日立造船株式会社, 2010.8.
- (3) 鋼道路橋の疲労設計指針, (社) 日本道路協会, 2002.3.
- (4) 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, (社) 日本道路協会, 2002.3.

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 機械・インフラ本部
鉄構ビジネスユニット 鉄構ソリューション室
比留間 堅
Tel : 06-6569-7052 Fax : 06-6569-7033
e-mail : hiruma@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Machinery & Infrastructure Headquarters
Steel Structure Business Unit
Tsuyoshi Hiruma
Tel : +81-6-6569-7052 Fax : +81-6-6569-7033
e-mail : hiruma@hitachizosen.co.jp



比留間 堅



美島雄士



若林保美