

合成箱桁を主桁とする斜張橋の 力学特性と適用スパンに関する検討

Mechanical characteristics and applicability of cable-stayed composite box girder bridges

長井正嗣* 奥井義昭** 山口宏樹*** 谷 榮**** 富本 信****

Masatsugu NAGAI, Yoshiaki OKUI, Hiroki YAMAGUCHI, Rong GU and Makoto TOMIMOTO

* 工博 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 (〒940-21 長岡市上富岡町 1603-1)

** 工博 埼玉大学助教授 工学部建設工学科 (〒338 浦和市下大久保 255)

*** 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338 浦和市下大久保 255)

**** (株) 春本鐵工本社設計部 (〒104 東京都中央区新川 2-26-3)

This paper presents mechanical characteristics and an applicability of cable-stayed composite box girder bridges. In foreign countries, the number of the construction of cable-stayed composite 2 I-girder bridges have been increasing because of their economy. However, in Japan, they have not been constructed so far. One of main reasons is poor aerodynamic stability. To cope with this problem, instead of 2 I-girder systems, cable-stayed composite box girder bridges are dealt with. Based on the design of cable-stayed composite 2 I-girder, composite box and steel girder bridges with spans of 200, 400 and 600 meters, in which creep and shrinkage effects are taken into account, comparison of dead load and steel volume is made, and the applicable span of the composite box girder is presented.

Keywords : 合成斜張橋, 合成箱桁, クリープ, 乾燥収縮

cable-stayed composite girder bridges, composite box girders, creep, shrinkage

1. まえがき

合成 2 主 I 桁または合成 2 箱桁を主桁とする合成構造斜張橋^{1)~3)}は, 1986 年に完成した Alex-Fraser 橋 (カナダ: 465m) 以来, 海外において経済的な鋼橋案として建設例が増加しつつある. とくに, ここ 5 年間では, 世界の代表的な斜張橋の 50% を本タイプが占めるに至っている^{4), 5)}. また, 多くがスパン 300 ~ 600m と長大橋であることが目を引く. このように, 海外では競争力のある形式として, PC 斜張橋の代案として建設数が増加する傾向にあるにもかかわらず, 我が国では, 小スパンの 1 例⁶⁾を除いて建設例がみられない. この理由として, 1) ねじれ剛性の小さい π 断面の主桁を用いるため耐風安定性に劣る, 2) 長大橋にもかかわらず主桁本数を最少 2 本としたシンプルな形式のため耐久性に劣る, といった懸念が挙げられる. このうち, 2) は技術者の長年の経験に基づく感覚的な懸念と考えられ, 1) の問題を含め, 以上の問題が定量的に十分に検討されているわけではない.

著者らは, 上記 1) の対策として主桁に合成箱桁

(オープンボックスタイプでコンクリート床版と合成させて箱桁とする) を用いる形式に着目した⁷⁾. これは, 箱閉断面を主桁に用いることにより高いねじれ剛性が得られ, 結果的にフラッター不安定の問題が解消できるためである⁸⁾. しかしながら, 本タイプは 2 主 I 桁に比べて相対的に重量増となる. また, コンクリート床版の乾燥収縮, クリープに起因する応力移行が相対的に大きくなり, とくにコンクリート床版の圧縮応力の低減が大きく, 上記 2) の耐久性に問題が生じることが予想された. そこで, スパン 200, 400m 斜張橋を対象に, クリープ, 乾燥収縮による応力を考慮した概略設計を行い, 合成 2 主 I 桁および合成箱桁の応力性状や鋼桁重量に関する比較検討を行った. その結果, スパン 200m では, 両者の鋼桁重量には大きな差異が生じ, 耐風安定性確保が決定的な要因にならない限り, 合成箱桁を用いるメリットが少ないことを明らかにした. 一方, スパンが 400m になると, 合成箱桁の鋼重量は合成 2 主 I 桁より大きいものの, その比率の差異は 200m スパンの場合に比べて小さくなることを明らかにした.

またこのスパンで2主I桁を選べばフラッター風速を確保するための付属物が欠かせないと考えられ³⁾、上記の差異はさらに小さくなることが予想される。したがって、付属物重量次第で、また2主I桁で高いフラッター風速が得られない場合、本タイプは2主I桁タイプに対する代案となり得る可能性を明らかにした。

本研究では、文献7)で行った検討に加え、より長大なスパンと鋼箱桁橋案を新たなパラメータとして応力性状やケーブルを含めた鋼重量の比較検討を行い、合成箱桁の力学特性を明らかにするとともに、適用スパンについて考察を加える。具体的には、スパン200, 400, 600mを対象とし、文献7)と同様、クリープ、乾燥収縮応力を考慮した概略設計を行う。クリープ、乾燥収縮を考慮するのは、先に説明した通り、本タイプではそれらによる応力移行、とくに床版の圧縮応力の低減が大きく、したがって床版の耐久性に影響を及ぼすことが考えられるためである。さらに、鋼箱桁橋案との重量比較を通し、本タイプの適用スパンについてより詳細な考察を加える。なお、重量比較にあたっては、鋼桁とケーブル重量のみを対象としている。塔については、合成構造ではコンクリート製塔が、鋼橋では鋼製塔が多く採用されており、両者の単価を考慮した経済比較が困難であることから、それらを概略設計する上での資料を与えることとする。また、下部工についても、現地の地盤条件が経済性に大きな影響を与えるため一般論としての経済比較が困難となる。そこで、この場合も下部工を概略設計するための資料提供にとどまることになる。

2. 計算モデルと構造パラメータ

橋モデルの基本諸元として、幅員19.2m(4車線想定)、床版厚25cm、横桁間隔3.3mを設定した。本モデルの床版は、橋スパン方向に3.3m間隔で配置された横桁(またはダイアフラム)で支持されているため、橋スパン方向(車両進行方向)が主鉄筋方向となる。床版厚の選定は横桁間隔と関係するが、道路橋示方書⁹⁾(以後、道示という)に準じて決定した。横桁間隔は経済性に影響を与え、4m程度の配置間隔が経済的であるとの見解³⁾が示されているが、3~5m間隔での差異があまり大きくないことから(例えば、文献3)によれば、横桁間隔3.3mの場合の鋼横桁と床版合計工費は、4mの場合の工費約22億円に対して1%程度増加する。因みに上部工の総工費は132億円)、本計算ではケーブルの桁定着間隔10mの3分割点に横桁を配置した。なお、スパン600mモデルでは、影響線解析プログラムの制約でケーブルの桁定着間隔を20mとして計算している。また、このモデルでは床版厚25, 30, 35cmとした3ケースの

検討を行っている。これは、床版厚を25cmとした場合、側径間内において70MPaの高強度コンクリートが必要となったためである。床版厚として30, 35cmを採用すると、床版曲げ応力が小さくできて強度55~60MPa程度のコンクリートが使用できる。但し、床版厚を増厚すると当然全体重量も増加する。本検討では、高強度コンクリートの使用を前提とし、スパン200, 400mと同様、床版厚25cmとして検討を行うこととした。

今回の計算パラメータとして、

- 1) スパン: 200, 400, 600m
- 2) 主桁形式: 合成2主I桁, 合成箱桁, 鋼床版箱桁を選び検討を行うこととした。但し、スパン600mにおいて、合成2主I桁の設計を行うと、鋼桁のサイズがかなり大きくなり、設計が困難となった。そのため、比較検討の中で、この組み合わせは除外することとした。なお、スパン600mでは合成2主I桁に代わって合成2箱桁¹⁰⁾が主桁として採用されているが、耐風安定性について不明確な部分もあり検討の対象外とした。あわせて、鋼橋案でも鋼床版2箱桁が検討対象となるが、同様の理由により対象外とした。

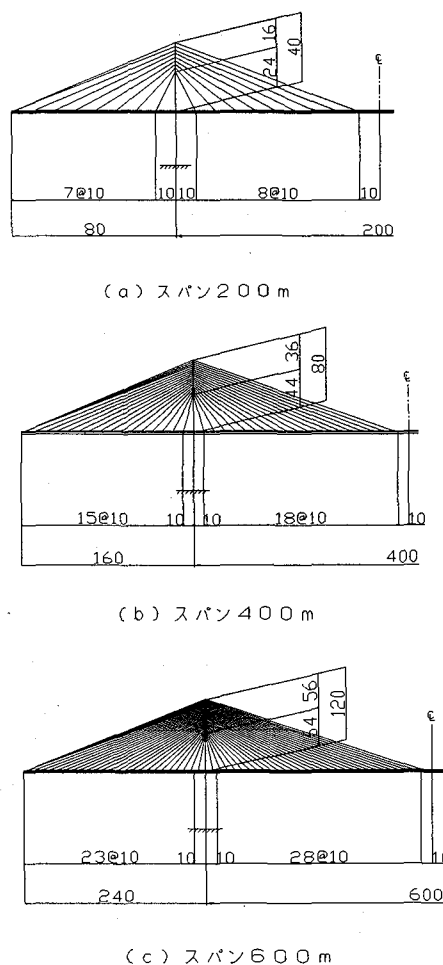


図-1 橋モデルの側面形状

図 - 1 にスパン 200, 400, 600m モデルの側面形状、また、図 - 2 にそれぞれの断面、表 - 1 に断面諸量と荷重の大きさを示す。主桁の桁高さはスパン 200, 400, 600m で、それぞれ 1.5, 2.0, 3.0m を仮定している。また、主桁は塔位置において鉛直ケーブルで支持（弾性支持）されている。合成桁の主桁断面は死、活荷重及びクリープ、乾燥収縮による応力を計算して決定している。詳細は 4. 解析結果と考察で説明する。また、具体的な数値を省略しているが、ケーブル断面積も影響線解析による設計を行い決定している。

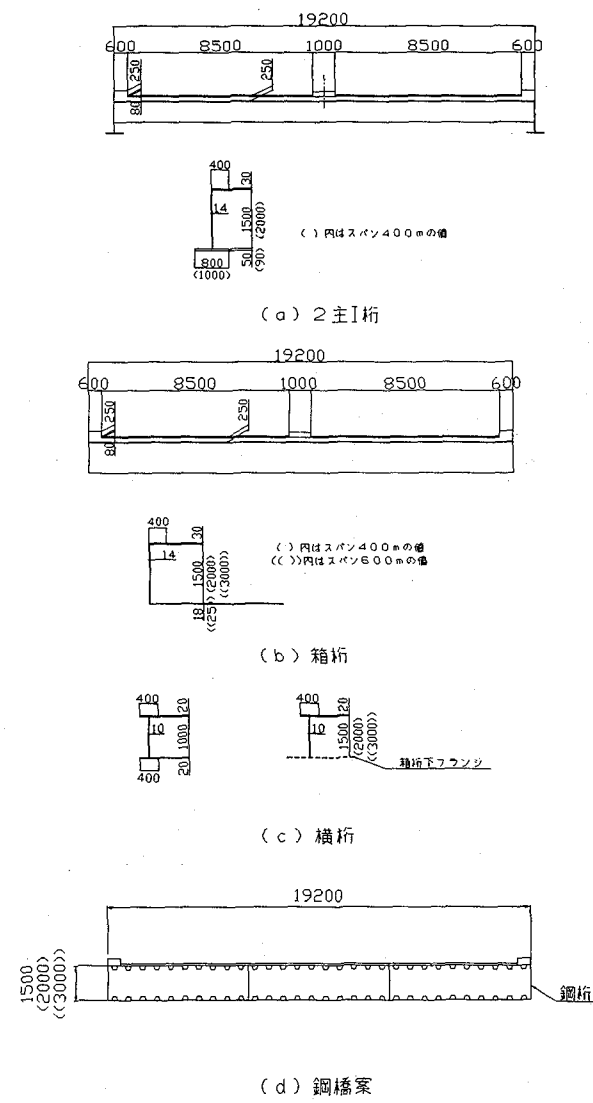


図 - 2 断面形状

表 - 1 主桁断面諸量と荷重の大きさ

	2 主 1 桁		箱 桁	
断面積 (m ²)	0.832(0.946)		1.097(1.111)(1.298)	
断面 2 次 モーメント (m ⁴)	0.235(0.741)		0.657(1.117)(2.963)	
死荷重 (kN/m)	200.3(211.7)		222.2(226.5)(251.0)	
活荷重 (kN/m)	110.3(110.3)		110.3(110.3)(110.3)	
ヤング係数比 = 7. () 内はスパン 400m の値、(()) 内はスパン 600m の値	D1 中央径間 側径間		中央径間 側径間	
	33.1(33.1)38.6(33.1)		33.1(33.1)(33.1)38.6(33.1)(33.1)	

ヤング係数比 = 7. () 内はスパン 400m の値、(()) 内はスパン 600m の値

その際、許容応力度は 570MPa 程度（衝撃係数、支点沈下や温度変化による応力を考慮していないため許容応力度 628MPa の約 90% を設定）とした。また、完成時（全死荷重載荷時）のケーブル張力は、塔はもとより桁が極力軸力部材となるよう決定した。因みに文献 7) では、ケーブル張力の決定に当たり、完成時の桁の正、負曲げモーメントの絶対値がほぼ等しくなる条件を選んだ。そのため、スパン 200m 斜張橋の主桁には、中央径間中央部を除いて比較的大きな負のモーメントが生じていた。そこで、スパン 200m モデルについては再計算を行うこととした。なお、スパン 400m モデルでは、曲げ応力が軸力による応力に比べて相対的に小さかったため、文献 7) と同じ結果を転用した。

3. クリープ、乾燥収縮解析とパラメータ

クリープ、乾燥収縮解析は骨組モデルを用いた変位法により行っている^{6), 11)}。

これまで建設された合成斜張橋の床版を調査¹²⁾したところ、場所打ちタイプとプレキャストタイプが用いられている。本検討ではそれぞれのタイプを想定して以下の係数を用いた、

1) 場所打ちタイプ¹³⁾：クリープ係数 2.0, 乾燥収縮度 200×10^{-6} （この場合のクリープ係数は 4.0）。計算では、クリープ解析と乾燥収縮解析を個別に行い両者を重ね合わせる。以後、場所打ちタイプを【タイプ 1】とする。

2) プレキャストタイプ：クリープ係数 1.4, 乾燥収縮度 0（乾燥収縮は養生期間を設けて終了しているものとして仮定）。このタイプを以後【タイプ 2】とする。クリープ係数については、コンクリート標準示方書¹⁴⁾に従い、載荷材令 150 日を想定したが（その場合の係数は 1.0）、若干の安全をみて 1.4 としている。

なお、クリープ、乾燥収縮は完成後に発生すると仮定する。

4. 応力性状

以下に、死荷重による応力、それにクリープ、乾燥収縮による応力を加えた応力、さらに活荷重応力を加えた応力を示す。活荷重による応力は影響線解析により算出した応力である。床版応力は床版上面の応力、鋼桁は下フランジ下面の応力である。

4. 1 クリープ、乾燥収縮を考慮した床版応力

図 - 3~5 にスパン 200, 400, 600m の床版応力を示す。図中、□, +印は、それぞれ死荷重時（クリープ、乾燥収縮前）の応力、クリープ、乾燥収縮終了後の応力で、両者の差異が応力移行量となる。また、△, ◇印はクリープ、乾燥収縮後の応力に活荷

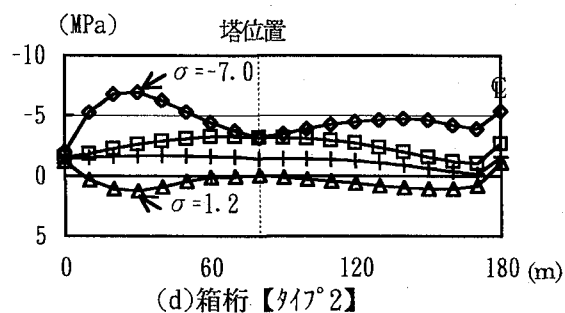
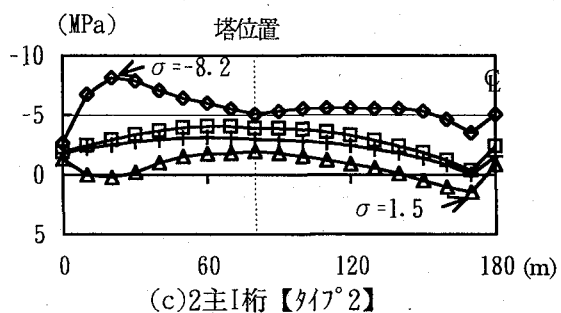
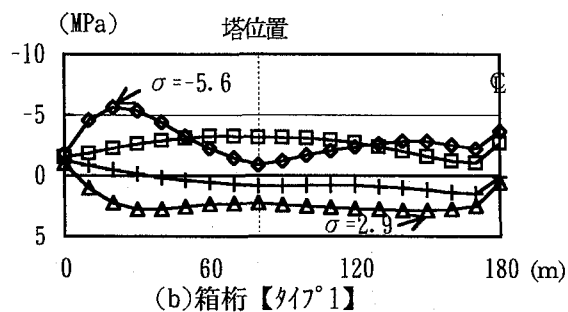
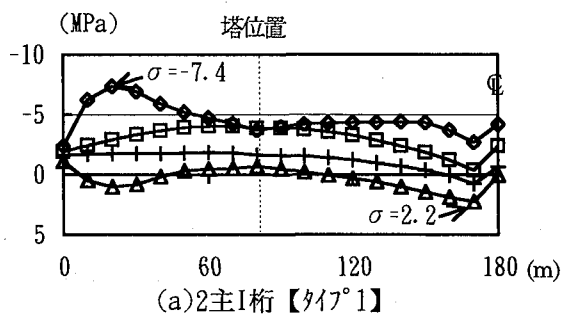


図-3 床版応力 (スパン200m)

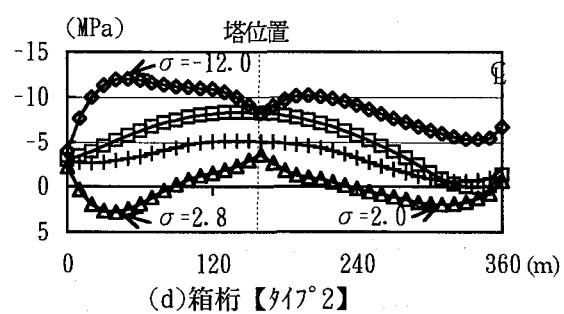
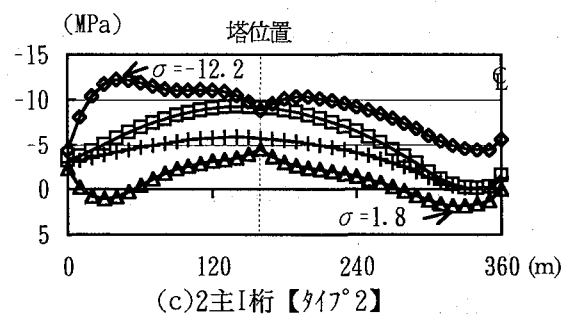
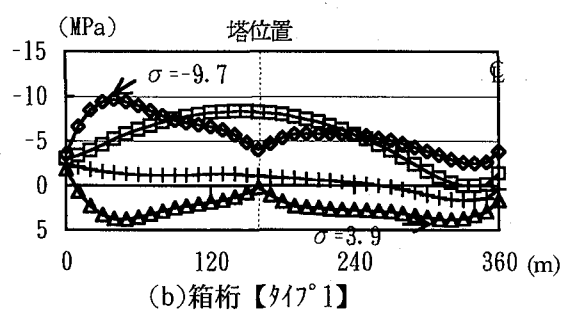
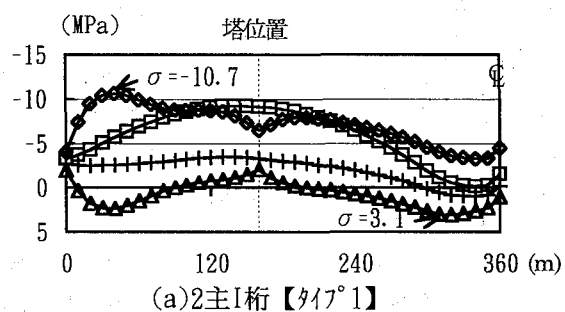


図-4 床版応力 (スパン400m)

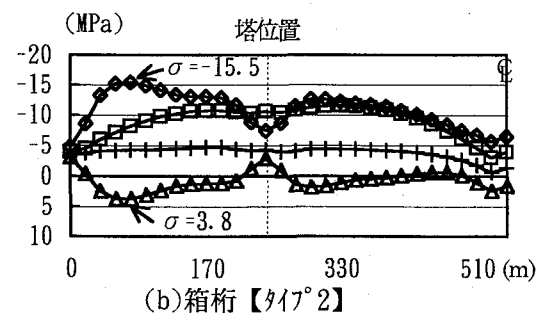
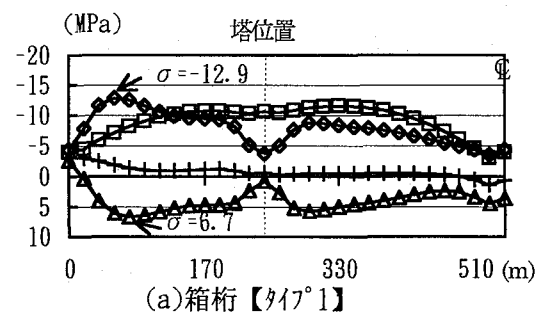


図-5 床版応力 (スパン600m)

重応力を加えた合計応力である。

スパン 200m の場合、箱桁を用いると、クリープ、乾燥収縮後（【タイプ 1】）、死荷重状態での応力は桁端部を除いて引張となる。また、死、活荷重状態では、最大 2.9MPa 程度の引張応力が生じる。これに対して、2 主 I 桁では、死荷重状態でスパン中央のごく一部が引張応力となる。また、死、活荷重による最大引張応力度は 2.2MPa 程度となる。【タイプ 2】の場合、2 主 I 桁の場合の応力移行はかなり小さくなる。箱桁でも、死荷重状態では橋長にわたり圧縮応力となる。ただし、死、活荷重による応力は桁全長にわたり引張となるが、その最大値は 1.2MPa 程度である。以上より、【タイプ 1】を想定した場合、合成箱桁では死荷重時に引張応力が生じ、採用には困難が予想される。【タイプ 2】の場合、合成箱桁の場合でも死荷重時の応力を圧縮とできる。活荷重時に引張応力が生じるが、最大 1.2MPa 程度で、コンクリートに引張応力が生じることを許容すれば設計可能（許容値 2.45MPa¹⁵⁾）である。

スパン 400m の場合、【タイプ 1】の床版を用いると、箱桁の死荷重時応力は、中央径間中央部の 200m 区間（全長 720m）のみが引張応力となる。また、死、活荷重状態では最大引張応力は 4MPa 弱と大きい。2 主 I 桁は、スパン 200m の場合と同様の傾向にあるが、死、活荷重時の最大引張応力は 3MPa 程度となる。【タイプ 2】の場合、箱桁でも死荷重時の応力は橋長にわたり圧縮となる。また、死、活荷重による引張応力は、活荷重曲げモーメントが大きい橋端部と、圧縮軸力の小さいスパン中央において生じ、最大で 3MPa 弱である。

スパン 600m の場合、【タイプ 1】では、死荷重時の圧縮応力が、引張にならないにしてもほぼ 0 に近くなる。活荷重による応力を加算すると最大 6.7MPa の引張応力が生じる。一方、【タイプ 2】では、【タイプ 1】と同様に圧縮応力の低減が大きい、5MPa 程度の圧縮応力となる。活荷重応力を加算すると、最大 3.8MPa 程度の引張応力が生じる。

4. 2 クリープ、乾燥収縮を考慮しない床版応力

クリープ、乾燥収縮を考慮しない場合の死、活荷重による床版の最大応力と、T 荷重 (98kN) による床版応力を重ね合わせた結果を表 - 2 に示す。なお、床版応力は道示¹³⁾ に準じて算出した。密に配置した横桁で床版を支持する本タイプの場合、床版断面力の算出にあたり、道示の評価式が適用できないことが指摘されている。文献 3)、15) の検討結果によれば、横桁間隔をスパンとした連続版（横桁を剛支点とみなす）の断面力分布ではなく、むしろケーブル定着点を支点とした連続版の挙動を示すことが報告されている。そのため、負のモーメントはかな

り小さくなり、逆に正のモーメントが大きくなる。しかし、得られた正のモーメントは道示による評価値に対して若干大きい程度である¹⁵⁾。今後詳細な検討を要するものの、ここでは、道示の床版断面力を用いて考察を加えることとした。

表中、() 内数値は以下のようにして求めた。b)、c) 合計の応力の欄では、合計応力度を 3.5 倍している。これは、合成桁の安全率¹³⁾ を乗じたものである。また、a)、b)、c) 合計の応力の欄では、合計応力度を 2.5 倍している。これは、床版応力との重ね合わせを行う場合に用いる割り増し係数 1.4¹³⁾ を考慮したものである。

表 - 2 クリープ、乾燥収縮を考慮しない床版応力

(MPa)				
	スパン 200m; 2主 I 桁		スパン 200m; 箱桁	
	側径間	主塔位置	側径間	主塔位置
a) 床版作用	±7.0	±7.0	±7.0	±7.0
b) 曲げモーメント	-3.3	1.7	-3.4	1.1
c) 軸力	-4.2	-6.3	-3.9	-5.1
a)+b)+c)	14.5(37)	11.6(29)	14.3(36)	11.0(28)
b)+c)	7.5(27)	4.6(17)	7.3(26)	4.0(14)

(MPa)				
	スパン 400m; 2主 I 桁		スパン 400m; 箱桁	
	側径間	主塔位置	側径間	主塔位置
a) 床版作用	±7.0	±7.0	±7.0	±7.0
b) 曲げモーメント	-3.1	-0.6	-6.0	-0.6
c) 軸力	-11.2	-11.8	-7.9	-10.6
a)+b)+c)	21.3(54)	19.4(49)	20.9(53)	18.2(46)
b)+c)	14.3(50)	12.4(44)	13.9(49)	11.2(40)

(MPa)		
	スパン 600m; 箱桁	
	側径間	主塔位置
a) 床版作用	±7.0	±7.0
b) 曲げモーメント	-8.3	1.1
c) 軸力	-11.4	-14.9
a)+b)+c)	26.7(67)	20.8(52)
b)+c)	19.7(69)	13.8(49)

表 - 2 より、スパン 200、400、600m について、それぞれ 37、54、70MPa 程度の圧縮強度をもつコンクリートが必要となることがわかる。本タイプを長スパンに適用する場合、高強度コンクリート床版が欠かせないことが指摘されている^{2)、3)}。事実、前述の Alex-Fraser 橋（スパン 465m）では、強度 55MPa のコンクリート床版が使用されている。本検討からも同様のことが言えるが、スパンが 600m になると 70MPa 程度の高強度コンクリートが必要となる。

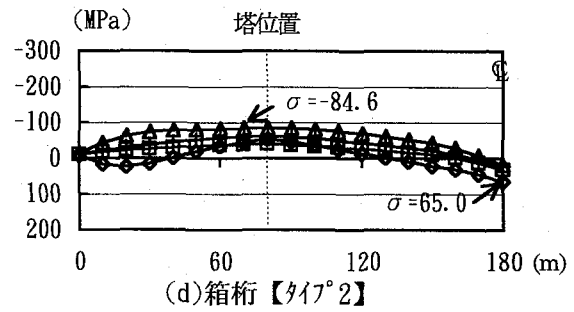
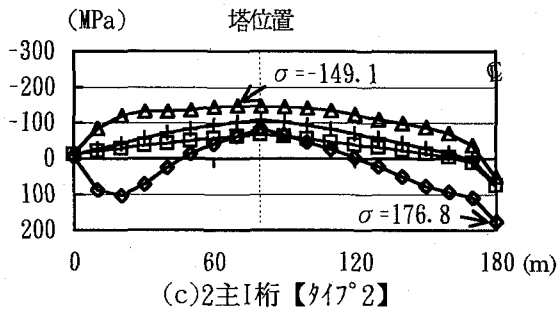
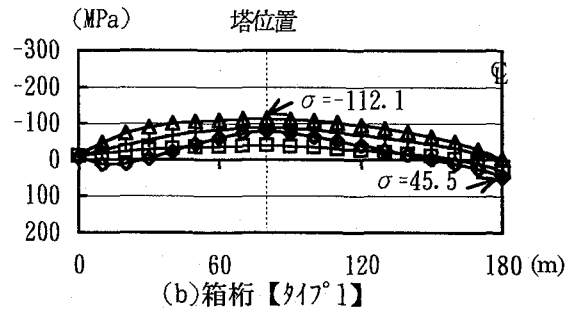
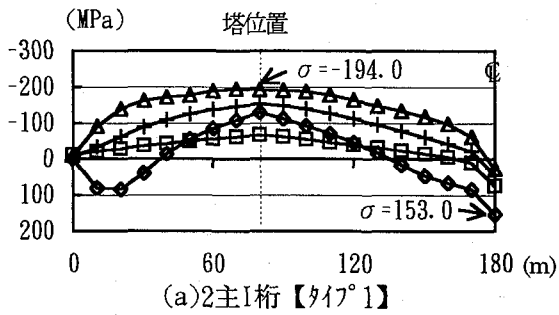


図 - 6 鋼桁応力 (スパン 200 m)

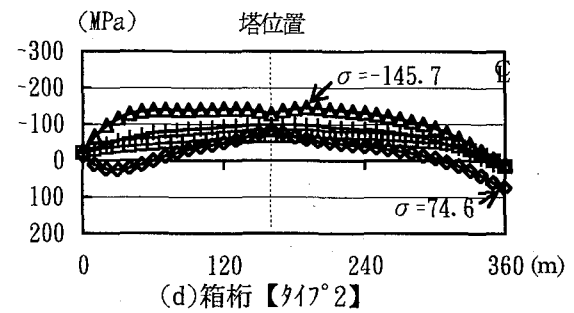
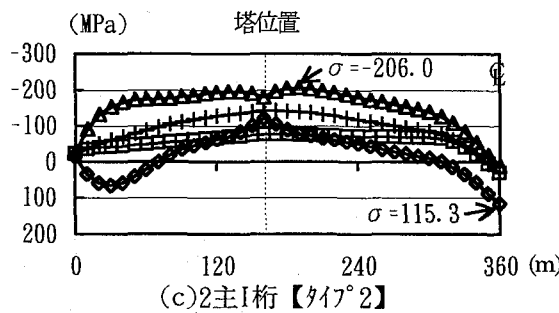
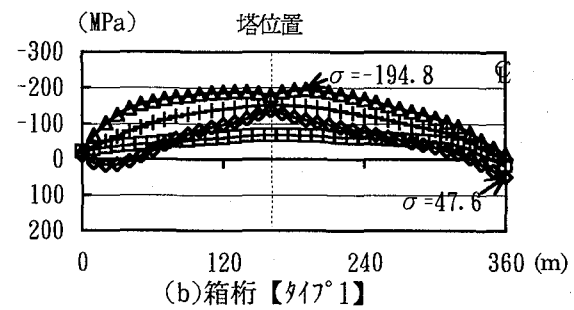
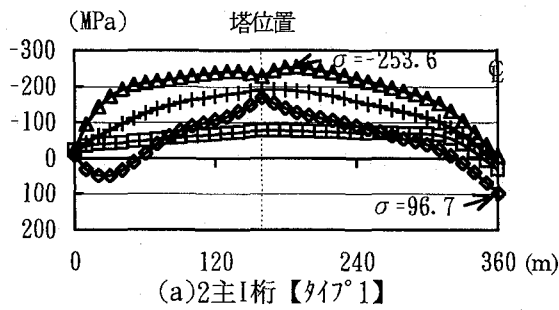


図 - 7 鋼桁応力 (スパン 400 m)

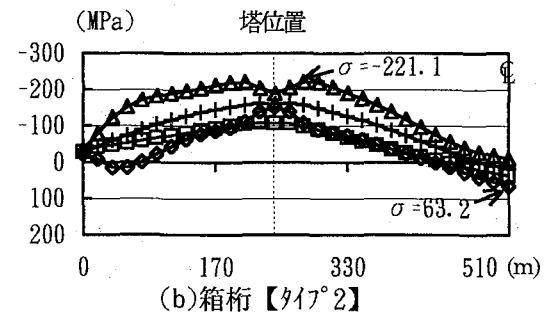
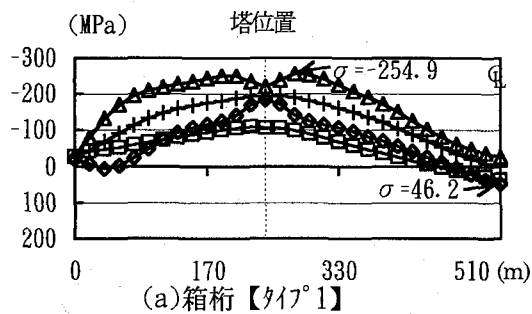


図 - 8 鋼桁応力 (スパン 600 m)

4. 3 鋼桁応力

図-6~8にスパン200, 400, 600mの鋼桁応力(下フランジ位置)を示す。図中の記号の見方は4.2床版応力と同じである。図より、箱桁の応力はI桁に比べてかなり小さいことがわかる。

スパン200mの2主I桁の場合、【タイプ1】、【タイプ2】ともSM490Y材を使用する必要がある。箱桁の場合、【タイプ1, 2】ともにSM400材が使用できる。また、【タイプ1】の床版を用いても、最大応力は110MPa程度で、許容応力度の上限値に比べて十分余裕がある。

スパン400mの2主I桁の場合、【タイプ1】ではSM570材、【タイプ2】ではSM490Y材を使用する必要がある。これに対して、箱桁を用いると、【タイプ1】でSM490Y材、【タイプ2】の場合もSM490材が必要であるが、許容応力度の超過はわずかなため、SM400材が使用できると考える。以上より、箱桁断面を主桁断面に用いると、2主I桁に比べて1ランク低い強度の鋼(SM490Y→SM400, SM570→SM490Y)を使用することができる。

スパン600mの場合(合成箱桁)、【タイプ1】では、最大90MPa程度の応力移行が生じ、橋長の約半分の区間でSM570材を使用する必要がある。また、【タイプ2】でも60MPa程度の応力移行が生じ、塔近傍でSM570材を使用する必要があるが、その他の領域でSM490Y材が使用できる。

一方、鋼橋案では、橋スパン方向の応力分布図はこれまでの鋼斜張橋と同じで多くの報告例があるため省略するが、スパン200, 400mともにSM400材が使用でき、スパン400mの場合でも最大応力は100MPa程度である。スパンが600mになると、塔の近傍200m程度の区間でSM490Y材(最大応力は160MPa程度)を使用する必要があるが、その他の領域ではSM400材が使用できる。

5. 鋼桁重量、ケーブル重量及び死荷重の比較と考察

合成2主I桁、合成箱桁の鋼重量の算出にあたっては、次のような仮定を設けた。a) 図-2に示した主桁断面積に単位体積重量を乗じ、さらに係数1.3を乗じる。係数1.3は添接部の高力ボルトや添接板の重量また横補剛材の重量を考慮するために仮定した値である。なお、箱桁の下フランジの板厚は縦リブ断面積を考慮して18mmと仮定した。b) 横桁または箱桁ダイヤフラム重量も断面積に単位体積重量を乗じ、かつ係数1.3を乗じて算出した。橋スパン方向の単位長さ当たりの重量は、3.3(横桁間隔3.3m)で割って算出している。鋼橋案の桁重量の算出では、鋼断面積に単位体積重量を乗じ、さらに係数1.4を乗じた。鋼橋案の場合、係数1.4としたのは、鋼床

版の横リブが比較的密に配置されることを考慮するものである。なお、下フランジのトラフリブを板厚換算(リブ総断面積/下フランジ幅)すると6.2mm程度となり、12mmを加えると合成箱桁で仮定した18mmにほぼ対応する。なお、スパン600mの合成箱桁では、鋼桁の最大応力をSM570材の上限値255MPa以下(図-8(a)参照)とするために等価板厚で25mmに増厚している。

表-3に、上述の条件下で計算した概略重量と死荷重の比較結果を示す。

スパン200mでは、合成箱桁の鋼桁重量は合成2主I桁に比べて約1.7倍となる。また死荷重も10%程度大きい。なお、合成2主I桁の総幅員で割った1m²あたりの重量は1.70kNとスパン40m程度の単純合成I桁の鋼重量¹⁶⁾に近い。鋼橋案の桁重量(4.45kN/m²)は、合成2主I桁の2.6倍、合成箱桁の1.6倍で、かなり大きくなる。鋼橋案ではケーブル重量が小さいことから、仮にケーブルの単価を鋼桁の単価の3倍として換算鋼重(鋼桁重量+3.0xケーブル重量)を比較しても、合成2主I桁の2倍となり大きな差異と言える。したがって、コンクリート床版の費用を考慮しても鋼桁とケーブルの費用は合成2主I桁案の方が少ないと考えられる。

表-3 概略重量比較

スパン(m)	タイプ	死荷重(kN/m)	鋼桁重量(kN/m)	ケーブル重量(MN)
200 (80)	2	200.3	32.7	1.91
	B	222.2	54.6	2.00
	S	135.4	85.4	1.35
400 (160)	2	211.7	44.0	7.97
	B	226.5	58.9	8.44
	S	138.6	88.6	5.79
600 (240)	B	251.0	83.4	21.16
	S	145.0	95.1	13.39

()内は側径間長

2:合成2主I桁 B:合成箱桁 S:鋼箱桁

スパン400mでは、合成2主I桁と合成箱桁の鋼重量の比率の差異が小さくなる。前者の1m²あたりの重量は2.29kNで後者は3.07kNである。合成箱桁の鋼重量が、スパン200, 400mで大きく変化しないのは、I桁の板厚が応力で決定されるのに対して、箱桁は最小板厚で断面構成が可能なためである。箱桁で生じる差異は仮定した桁高さの差(1.5→2.0m)に起因している。このスパンで2主I桁を選べば架橋地点の気象条件にもよるが、耐風安定性確保のための付属物が欠かせなくなり、したがってさらに鋼重量が増加して差異は更に小さくなるものと考えられる。因みに、文献3)のスパン410mを対象とした検討からは、付属物重量の増加量は明らかにされていないものの、前述の上部工の総工費132億円に対して10%程度の費用を必要とする結果が得られている。

さて、鋼橋案の桁重量は、合成箱桁の場合と同様の理由で、スパン 200m の場合と大差なく 4.61kN/m² で、合成箱桁案に比べて大きい。しかし、ケーブルと鋼桁の単価を 3:1 として換算重量で比較すると約 20% (2 主 I 桁では約 45%) の差異となる。そのため、コンクリート床版の費用を考慮すると、その単価によっては、鋼桁とケーブルの費用の差異は小さくなると考えられる。このスパン領域では、ケーブル単価の設定が形式選定に影響を与える可能性が大きい。

以上より、2 主 I 桁案との比較では、付属物重量次第で、また高いフラッター風速が得られない場合に本タイプが有力な案となる。鋼橋案との比較においては、ケーブルやコンクリート床版の鋼桁に対する単価の設定次第で両者の費用が接近する可能性が高い。また、鋼橋案の死荷重は合成箱桁に対して 60% 程度でかなり小さい。そのため、鋼橋案との比較においては塔や下部構造を考慮する必要がある。

スパン 600m では、合成箱桁と鋼橋案の鋼重量差は前者が 4.34kN/m² に対して、後者は 4.95 kN/m² でさらに小さくなる。両者の値が接近した理由は、先に説明した通り、発生応力を SM570 材の上限値 255MPa 以下とするために合成箱桁の下フランジ厚を増厚したためである。ケーブル、鋼桁の単価を 3:1 とした換算鋼重では、死荷重の大きい合成箱桁の方が 7% 程度大きくなる。1:1 とすると逆に 4% 小さくなるものの、コンクリート床版の費用を考慮すると逆転する可能性がある。これより、合成箱桁の死荷重が鋼橋案の 1.7 倍となることを考慮すると、このスパンにおいて合成箱桁の優位性はなくなるものと考えられる。

6. 合成斜張橋の応力性状と合成箱桁の適用性に関する考察

合成箱桁、2 主 I 桁を主桁とする合成構造斜張橋のクリープ、乾燥収縮応力を含む応力性状の比較と鋼橋を含めた鋼重量に着目した比較を行い得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) 床版

1) 死荷重時は圧縮とし、活荷重時に引張応力を許容 (2.45MPa 以下¹³⁾) すること、また本文で設定したクリープ係数と乾燥収縮度を前提条件とした場合、場所打ちタイプはスパン 200m の 2 主 I 桁の床版としてが使用できるが、その他の検討ケース (スパン、主桁形式) ではプレキャスト床版を用いる必要がある。

2) スパン 200, 400, 600m で、それぞれ 37, 54, 70MPa 程度の圧縮強度をもつ床版が必要となる。

3) 本タイプでは、クリープ、乾燥収縮に起因する応力移行が大きいため、この応力を考慮した検討が欠

かせない。また、コンクリートの上記係数が小さくなる配慮が設計、施工上の重要な課題となる。

(2) 鋼桁

箱桁の応力は 2 主 I 桁に比べて小さく、同一スパンの比較において、文中に示したように 1 ランク低い強度の鋼材料を使用できる。合成箱桁では、スパンに応じて高強度の材料を使用すれば、最小の板厚 (下フランジ厚として 10mm 程度) で設計可能となる。

(3) 鋼橋を含めた重量の比較

1) スパン 200m の場合、合成箱桁と 2 主 I 桁での鋼桁重量の差異は大きく、耐風安定性の確保が設計上の支配パラメータとならない限り、合成箱桁を使用するメリットは少ないと言える。また、鋼橋案の鋼重量はさらに大きい。

2) スパンが 400m になると、箱桁、2 主 I 桁の鋼重量差は小さくなる。このスパンでは、一般に耐風安定性の確保が重要な課題となると考えられる。そのため、耐風安定性確保のための付属物を含んだ重量比較を行う必要がある。合成 2 主 I 桁のフラッター風速が少ない付属物重量で確保できる場合、合成 2 主 I 桁が有利と言え、したがって、高い風速が得られない場合に合成箱桁が有力な案となる。鋼橋案との比較では、合成箱桁の鋼重量が小さい結果が得られた。しかし、鋼橋案は軽量なため、ケーブル他の単価の設定次第で両者の費用は接近する可能性が高く、塔や下部工を含む総合的な検討が必要となる。

3) スパン 600m では、合成箱桁、鋼橋案の桁鋼重に大きな差異が見られず、ケーブルの単価を鋼桁より高く設定すると経済性が生じない。さらに、鋼橋案の総死荷重は合成箱桁の 60% 程度と小さいため、合成箱桁の鋼橋案に対する競争力は薄れると考えられる。

7. まとめ

本文では、合成箱桁を主桁とする斜張橋のクリープ、乾燥収縮応力を考慮した力学特性を明らかにするとともに適用スパンについて検討を行った。これまで実績の多い合成 2 主 I 桁に対して、応力性状や重量の比較を通して本タイプの適用性について考察した。あわせ、鋼橋案との比較を試みた。

その結果、鋼桁重量、ケーブル重量、死荷重の比較から、スパン 200m では合成 2 主 I 桁に対する優位性がみられず、スパンが 400m 前後の領域において合成 2 主 I 桁の代案となり得る可能性を明らかにした。スパン 400m 程度での鋼橋案との比較では、ケーブル単価を高く設定すると両者の費用が接近する。その場合、より軽量の鋼橋案が有利となる。また、スパンが 600m を対象として鋼橋案との比較を行ったが、鋼桁、ケーブル重量の比較の範囲においても、鋼橋案に対する優位性が得られなかった。ただし、この

スパンにおいて、合成箱桁の鋼桁を対象にきめの細かい設計（下フランジ板厚をスパン方向に変化）を行えば、両者の差異は大きくなると考えられるが、本文では検討を行っていない。また、このスパンでは、先に説明したように合成 2 箱桁を主桁とする斜張橋¹⁰⁾が既に建設されており、鋼橋案との経済性を比較する上で、今後検討を要する。

長スパンの橋梁においても、より経済的でしかも耐久性の高い構造システムの開発が強く望まれている。本検討では、海外では競争力のある形式として実績が多いものの我が国では実績のない合成斜張橋に着目し、その力学特性や設計上の注意事項を明らかにした。あわせ、鋼橋案も含めた比較を通して、適用性に関する考察を行った。本文が今後の長スパン橋梁の設計に役立てば幸いと考える。

【参考文献】

- 1) R.Saul, H.Svensson, H.P.Andrea und H.J.Selchow : Die SunshineSkyway Brücke in Florida, USA-Entwurf einer Schraegkablebrücke mit Verbundüberbau, Bautechnik, Heft 7 und 9, pp.230-238, pp.305-309, 1984
- 2) 佐野信一郎, 長井正嗣, 井澤衛, 奥井義昭 : 合成構造斜張橋の適用支間に関する一検討および構造詳細の紹介, 橋梁と基礎, Vol. 23, No. 2, pp. 35-40, 1989
- 3) 横山功一, 日下部毅明, 若狭忠雄, 大場誠道 ; 2 主桁合成床版を有する斜張橋の総合的検討, 土木学会構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 1153-1160, 1992
- 4) M.Virkouge (Editor) : Proc. of Int. Conf. on Cable-stayed and Suspension Bridges, IABSE & FTP, Deaville, France, 1994
- 5) H.Svensson : The development of composite cable-stayed bridges, Proc. of Bridges into the 21st Century, The Hongkong Institution of Engineers, Hongkong, pp.45-54, 1995
- 6) 川田忠樹監修 : 複合構造橋梁, 技報堂出版, 1994
- 7) 長井正嗣, 奥井義昭, 山口宏樹, 谷栄, 富本信 : 合成箱桁を主桁とする斜張橋のクリープ, 乾燥収縮に着目した力学特性に関する検討, 鋼構造年次論文報告集, 第 4 巻, pp. 309-316, 1996 年
- 8) 長井正嗣, 石田知久, 謝旭, 山口宏樹, 藤野陽三 : 長大斜張橋の静的, 動的耐風安定性を確保できる最小桁幅に関する検討, 土木学会構造工学論文集, Vol. 44A, 1998 (登載予定)
- 9) (社) 日本道路協会 : 鋼道路橋示方書・同解説, III コンクリート橋編, 1994
- 10) 林元培 (著) 謝旭, 中崎俊三 (訳) : 中国の長大合成斜張橋の設計と施工—南浦大橋と揚浦大橋—, 橋梁と基礎, Vol. 30, No. 6, PP. 25-34, 1996
- 11) 下田晃伸 : 断面変形を考慮した合成桁橋のクリープ, 乾燥収縮解析, 埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程学位論文, 1996
- 12) 鋼橋技術研究会 : 合理化・省力化研究部会報告書, 1996
- 13) (社) 日本道路協会 : 鋼道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, 1994
- 14) 土木学会 : コンクリート標準示方書, 設計編
- 15) 富本信, 谷栄, 長井正嗣, 奥井義昭 : T 荷重載荷による 2 主桁合成斜張橋の床版応力に関する検討, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, pp. 598-599, 1996
- 16) (社) 日本橋梁建設協会 : JASBC manual デザインデータブック, 1981

(1997 年 9 月 26 日受付)