

## 連続合成桁の設計における収縮・温度差・クリープの影響

Influence of Shrinkage, Temperature Difference and Creep for Design of Continuous Composite Girders

谷口望\*, 藤原良憲\*\*, 武居秀訓\*\*\*, 久保武明\*\*\*\*, 由井洋三\*\*\*\*\*  
Nozomu Taniguchi, Yoshinori Fujiwara, Hidenori Takei, Takeaki Kubo, Yozo Yui

\*前橋工科大学, 社会環境工学科 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥 460-1)  
n-tani@maebashi-it.ac.jp

\*\*鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 鉄道建設本部 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町 6-50-1)

\*\*\*パシフィックコンサルタンツ, 交通基盤事業本部 (〒163-6018 東京都新宿区西新宿 6-8-1)

\*\*\*\*トーニコンサルタント, 本社事業本部 (〒151-0071 東京都渋谷区本町 1-13-3)

\*\*\*\*\*由井技術士事務所 (〒182-0024 東京都調布市布田 5-21-4)

The continuous composite girders are frequently used for railway and roadway bridges. The examination of the design techniques for internal forces on the section is not mainly carried out, and so these techniques have not been unified. The internal forces include the shrinkage, difference of temperature and creep. In this study, the continuous composite girder is designed with several calculation techniques for internal forces. In addition, each design results are compared with FEM analysis.

*Key Words: Continuous Composite Girder, Shrinkage, Difference of Temperature, Creep*

キーワード: 連続合成桁, 収縮, 温度差, クリープ

### 1. はじめに

近年, 国内の橋梁では多くの鋼とコンクリートを組み合わせた複合・合成構造物が用いられているが, その中でも連続合成桁は最も多く用いられている形式の一つである. この形式が多く用いられる理由としては, 経済性, 安全性(耐震性)に有利な構造であり, 鉄道橋においては騒音も比較的小さい構造形式であるとされており, 今後も一般的な鉄道橋や道路橋として計画・設計されることが予想されている. プレストレスしない連続合成桁の設計における課題としては, 従来は中間支点部におけるひび割れ幅の制御が挙げられてきたが, 近年, 合成桁実験等<sup>1)</sup>の検討の進捗により, ひび割れ制御設計が指針類<sup>2)</sup>にも取り入れられる状況になってきている. このひび割れ制御設計を使用することにより, 連続合成桁の設計が合理的になるとの報告<sup>3)</sup>もあり, 連続合成桁のひび割れに関する検討はある程度の成果を得た状態にある.

著者らも, 合成桁実験供試体による検討<sup>1)</sup>, 実橋における活荷重応答の測定による検討<sup>4)</sup>, 試設計計算における検討<sup>5)</sup>を行なうことで, 連続合成桁に関する検討を行なってきており, ひび割れ制御設計の妥当性と合理性を確認している. また, ここ最近では, 合成桁の曲げ耐力

に対して, 鋼部材の塑性化を一部許容する, いわゆるコンパクト断面<sup>6), 7)</sup>を用いた検討が実施されており, さらなる競争力の向上が試みられている.

一方, 連続合成桁の設計にあたっては, 床版コンクリートの収縮, 温度差, クリープから生じる内部力を考慮している. 著者らの試設計検討<sup>5)</sup>では, 鉄道橋において設計応答値を外部からの作用(死荷重や活荷重, 衝撃荷重など)による値と内部力の作用(収縮, 温度差, クリープ)による値に分割した場合, 鋼桁では応答値の約2割, ひび割れ幅では応答値の3割以上を, 内部力の作用が占めていることが分かっている. 連続合成桁においては, 内部力による作用は, 断面内での釣合いから算出される静定力(内部応力)と連続桁が不静定構造であることから生じる不静定力の2種類をそれぞれ算出し, 設計上安全側になるように, 応答値が大きくなる側のみ足し合わせる手法<sup>5)</sup>が一部橋梁では用いられており, この点で設計手法が異なっている現状となっている. しかしながら, このように設計応答値への影響が少なくない内部力の作用については, 設計手法に関する検討や設計結果に与える影響を検討した事例は少ない.

そこで, 本研究では, 内部力の作用(収縮, 温度差, クリープ)に対しての設計手法の種類を整理し, 実際に

建設された鉄道橋<sup>8)</sup>を検討事例として、それぞれの設計手法による影響を試設計により検討する。また、あわせて汎用ソフトを用いた詳細な3次元有限要素解析も実施し、試設計結果と比較を行った。

## 2. 連続合成桁における収縮・温度差・クリープの設計法

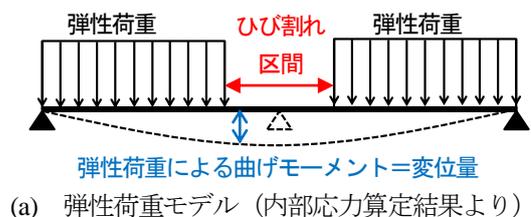
本章では、従来から連続合成桁で使用されてきた内部力の設計手法について整理する。なお、鉄道構造物<sup>9)</sup>と道路構造物<sup>10)</sup>では、クリープ係数や温度差の作用の設定に相違があり、断面内の内部力算定手法にも一部差が生じている。しかし、本検討では、係数や作用の設定による違いではなく、連続合成桁の収縮・温度差・クリープの影響に関する算出方法の差異を確認することを主眼とするため、この係数や作用の設定は極力統一して、それぞれを比較することとした。

### 2.1 収縮に関する設計法の概要

収縮に対する設計では、コンクリートの最終収縮量は一般に $200\mu$ と設定することが規定されている<sup>10)</sup>。連続合成桁の各断面において、この $200\mu$ 分の収縮力がコンクリートに作用することから、断面内に発生する曲げモーメントと軸力を内部力として算定する。単純合成桁であれば、特定の部位の内部力は、他の橋軸方向の部位の断面には影響しないため、そのまま合成桁の応答値として算出される。しかし、連続合成桁は不静定構造であるため、特定の部位の内部力は、他の橋軸方向の部位の断面に影響することとなるため、さらに設計計算を行う必要がある。なお、本算定時に用いる鋼とコンクリートの見かけ上のヤング係数比は、クリープの影響も考慮して $n=17.5$ を用いる<sup>9)</sup>。

#### (1) 従来設計法① (計算①)

従来から行われてきた手法<sup>11), 12)</sup>では、図-1に示す通り、まず、連続合成桁の中間支点を取り除き、単純桁のモデルを想定する。次に、内部力のうち合成断面の中立軸周りに作用する曲げモーメントの作用を弾性荷重として与える、いわゆる弾性荷重法を用いて算出を行う。次に、この弾性荷重により算出された曲げモーメント(=変位量)の結果から、連続合成桁とするために、中間支点部に強制変位を作用させ、中間支点部の変位を0とするように調整を行う。これらの結果を足すことにより、連続合成桁内に作用する曲げモーメント荷重に対する結果を得ることができる。なお、軸力に関しては、連続合成桁では一般に水平方向を拘束するのは1支点に限られるか、水平力分散支承が用いられるケースが多いため、一般に不静定構造に関する計算は不要である。また、設計実務では、単純桁の静定力は「内部応力」と呼ばれ、強制変位により連続合成桁化する計算により算出される応答値は「不静定力」と呼ばれているため、以降はこの

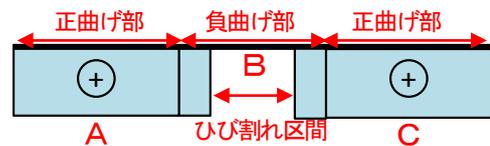


(a) 弾性荷重モデル (内部応力算定結果より)

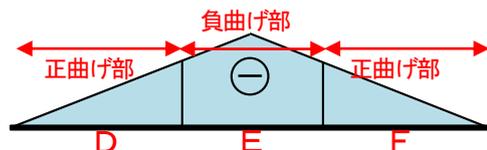


(b) 強制変位モデル (不静定力算定)

図-1 収縮に対する計算①計算②の計算モデル (2径間連続合成桁の場合)



(a) 内部応力 (静定力) の断面力 (曲げ) 算出結果



(b) 不静定力の断面力 (曲げ) 算出結果



(c) 軸力断面力の算出結果

図-2 収縮に対する計算①計算②の手法の違い概要 (2径間連続合成桁の場合)

表-1 組み合わせイメージ (図-2に対応)

		第一径間	中間支点部	第二径間
		正曲げ部	負曲げ部	正曲げ部
計算①	曲げ	A	E	C
	軸力	G	H	I
計算②	曲げ	A+D	B+E	C+F
	軸力	G	H	I

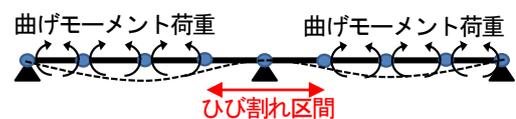


図-3 収縮に対する計算③の計算モデル (2径間連続合成桁の場合)

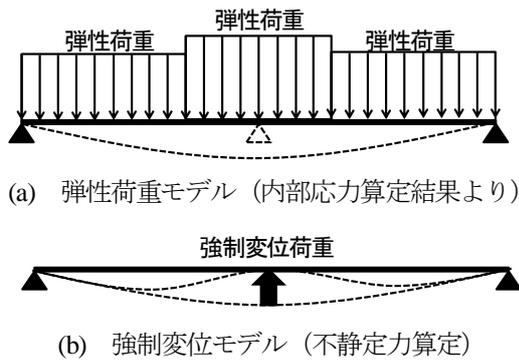


図-4 温度差に対する計算①計算②の計算モデル  
(2径間連続合成桁の場合)

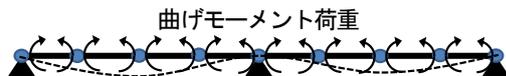


図-5 温度差に対する計算③の計算モデル  
(2径間連続合成桁の場合)

呼び方を用いるものとする。なお、連続合成桁の負曲げ部の中間支点部付近のコンクリートにはひび割れが生じることを想定しているため、この部分には収縮による内部力（弾性荷重）は作用させない。

また、上述までは共通の事項であるが、鉄道橋、特に新幹線構造物では、内部応力と不静定力のうち、曲げモーメントについて死・活荷重の応答と正負反転するものは、足し合わさないよう設計する手法が提案されている（図-2、表-1）<sup>5), 10)</sup>。このように弾性荷重法を用いて、内部応力と不静定力をそれぞれ算出し、さらに死・活荷重の応答と正負反転しているものを考慮しない設計方法を計算①とするものとする。なお、断面内における軸力と曲げモーメントの釣り合いによる計算は、各計算手法で共通であるため、ここでの表示は省略する。

## (2) 従来設計法②（計算②）

計算①と異なる手法として、計算②を以下に説明する。計算②では弾性荷重法を用いて、内部応力と不静定力をそれぞれ算出する計算手法は同様である。しかし、内部力を考慮する組み合わせでは、死・活荷重の応答と正負反転したものも足し合わせて考慮するものとする（図-2、表-1）。したがって、このような計算手法を、計算①とは異なる手法であるため、本論文では計算②とする。なお、計算②の手法は、以前著者らが行った収縮に関する実橋測定<sup>8)</sup>において、測定された応答値が、設計で想定している応答値よりも小さかったことから考案しており、道路橋において使用されている手法でもある。

なお、道路構造物では、鋼とコンクリートの見かけ上のヤング係数比は  $n=21$  が規定されている<sup>10)</sup>。つまり鉄道構造物 ( $n=17.5$ ) と異なる値を定義しているが、これは断面の内部力の算定手法が異なった釣り合い式を用い

ているため、注意を要する。両者の計算結果には大きな差異が生じないことは一般に知られているが、本検討では、この部分の差異には着目しないため、内部力の算定には  $n=17.5$  を用いる手法で統一して計算を行うこととする。

## (3) その他の設計法（計算③）

弾性荷重法を用いる手法がとられているのは、曲げモーメント荷重を再現するためであると考えられる。近年の設計実務では、連続合成桁の解析に、梁要素の1次元、または2次元の有限要素解析（通称、フレーム解析と呼ばれている）が使用される。したがって、要素の節点は、断面変化点を中心にある程度詳細に設定することが可能であり、不静定構造の解法も容易になってきている。すなわち、このフレーム解析を用いることにより、弾性荷重法を用いなくても、容易に連続合成桁の曲げモーメント荷重が作用する状態を計算できるといえる。よって、連続桁を単純桁化することなく、直接曲げモーメント荷重を作用させる手法も提案されている（図-3）<sup>12)</sup>。フレーム解析を用いる場合、計算①②では解析を2回実施する必要があるのに比べて、本手法では1回の実施で済むこととなる。本論文では、この計算手法を計算③とする。なお、計算③は、理論上は計算②と同様な結果を得ることになると考えられるが、計算①のように内部応力と不静定力が別になって算出されることはなく、常に足し合わせた結果となって算出されることから、計算値①の結果を再現することはできない。

## 2.2 温度差に関する設計法の概要

温度差に対する設計では、鋼桁とコンクリート床版の温度差は  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  として反りによる影響を算出することとしている<sup>9)</sup>。連続合成桁の各断面において、この温度差により発生する曲げモーメントと軸力を内部力として算定する。内部応力と不静定力の算出方法は収縮による影響と同様であるが、コンクリートにひび割れが生じた場合にも鋼桁とコンクリート床版には温度差が生じることから、温度差の影響に関しては中間支点部にも内部力を考慮する。なお、本算定時に用いる鋼とコンクリートのヤング係数比は  $n=7$  を用いる。

### (1) 従来設計法①（計算①）

温度差による影響の計算手法は、収縮による影響の計算手法と同様に弾性荷重法を用いる方法である（図-4）。また、新幹線構造物では、内部応力と不静定力のうち、死・活荷重の応答と正負反転するものは非考慮（図-2、表-1と同様）とする事例があり、この計算方法を収縮の際と同様に計算①とする。

### (2) 従来設計法②（計算②）

計算②では、基本的には計算①と同様な計算手法であ

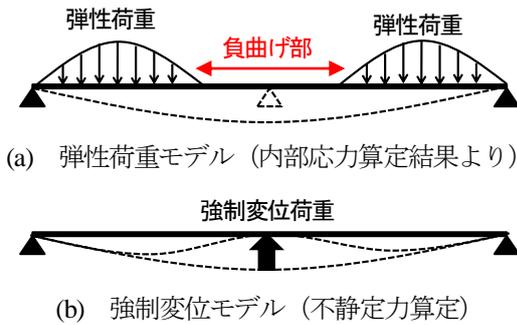


図-6 クリープに対する計算①計算②の計算モデル  
(2 径間連続合成桁の場合)

るものの、収縮による影響の算出時と同等な差異がある。つまり、死・活荷重の応答と正負反転した場合でも、内部応力と不静定力の両方を考慮する(図-2、表-1と同様)が、この計算手法を収縮による影響と同様に計算②とする。なお、道路構造物では、鋼桁とコンクリート床版の温度差は、 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ の条件で計算を行うこととしており<sup>10)</sup>、鉄道構造物( $\pm 5^{\circ}\text{C}$ )と異なる作用を設定している。本検討では、やはりこの作用設定部分の差異には着目しないため、鋼桁とコンクリート床版の温度差は鉄道構造物の基準により $\pm 5^{\circ}\text{C}$ として算出することとする。

### (3) その他の設計法 (計算③)

温度差の影響についても、フレーム計算を使用すれば、直接不静定構造である連続桁に曲げモーメント荷重を作用させることができる。本手法を計算③とするが、収縮の影響との違いは、先述の通り、ひび割れを想定する区間にも曲げモーメント荷重を作用させることである(図-5)。

## 2.3 クリープに関する設計法の概要

クリープの影響に対する設計では、死荷重による曲げモーメントの応答値から算出する。本算定時に用いる鋼とコンクリートのヤング係数比は、クリープの影響を再現するため $n=14$ を用いる<sup>9)</sup>。

### (1) 従来設計法① (計算①)

クリープによる影響の計算手法は、収縮による影響の計算手法と同様に弾性荷重法を用いる方法である。弾性荷重の形状は、死荷重に対する応答の曲げモーメント分布と等しくなるため、弾性荷重の形状は曲線分布となる(図-6)。また、負曲げとなる部分には、コンクリート床版に引張力が作用するため、弾性荷重は作用させない。新幹線構造物では、収縮の影響と同様に、内部応力と不静定力のうち、死・活荷重の応答と正負反転するものは非考慮としており、この計算方法を収縮、温度差の際と同様に計算①とする。

なお、鉄道構造物では、クリープに関する鋼とコンク

リートの見かけ上のヤング係数比は $n=21$ が規定されている<sup>10)</sup>。つまり道路構造物( $n=14$ )と異なる係数値を定義しているが、これは鉄道構造物では死荷重の応答値を算出する際にクリープの影響も足し合わされた状態で算出されるためである。道路構造物では、死荷重の応答値とは別にクリープの影響を算出しており、こちらについても両者の最終的な計算結果には大きな差異が生じない。本検討では、この部分の差異には着目しないこととするため、内部力の算定には $n=14$ を用いて死荷重とクリープを別々に計算する手法で検討を行うこととする。

### (2) 従来設計法② (計算②)

計算②では、計算①と同様な手法であるものの、収縮による影響の算出時と同等な差異がある。つまり、死・活荷重の応答と正負反転した場合でも、内部応力と不静定力の両方を考慮するが、この計算手法を収縮による影響と同様に計算②とする。

### (3) その他の設計法 (計算③)

クリープの影響についても、フレーム計算を使用すれば、直接計算することが可能である。本手法を計算③とする(図-3と同様)。

## 3. 試設計検討の概要

### 3.1 検討対象橋梁の概要

試設計を行う橋梁は、鉄道用2径間連続合成桁<sup>8)</sup>とする(図-7)。本橋梁は、径間中央部は複線2主I断面の合成桁であり、中間支点部は複線1BOX断面の合成桁となっている。また、騒音対策としてコンクリート被覆を取り付けているが、この被覆の合成効果は考慮せずに死荷重のみを考慮している。なお、本橋梁は、中間支点部を橋脚と剛結とした上下部一体構造である。実際の橋梁建設時の設計検討結果では、中間支点部の主桁に生じる応力度は、中間支点部を剛結とすることにより、剛結しない場合の約1/2となること、さらに、コンクリートを充填することにより、充填しない場合の約1/2となることが設計上確認されている。なお、本検討では、先述の通り、比較検討を行うために、鉄道構造物の設計手法としては係数や作用の設定で一部異なる値と計算手法を用いているため、以降に示す試設計結果の内容は、実際の設計計算とは異なる値となっている。

### 3.2 有限要素解析 (計算④) の概要

先述の計算①~③と比較するため、汎用ソフトによる3次元有限要素解析(以降、FEM解析とする)を実施する。FEM解析(図-8)は、「ANSYS Ver.14.5」(米国ANSYS社)を使用した。このFEM解析の結果を、計算④とする。モデル化では、下横構を除く鋼部材と鉄筋をシェル要素、下横構をビーム要素、床版コンクリートと中間支点部充

構造形式：プレストレスしない2径間連続完全合成桁  
 支承：端部：ゴム支承を有する地震時水平力分散構造  
           中間部：支承を用いない上下部一体構造  
 支間：41.6+51.1m R=8000m  
 軌道構造：スラブ軌道直結式  
 主桁：複線2主I断面桁（高耐候性鋼材）  
 設計列車荷重：P-16  
 設計列車速度：260km/h

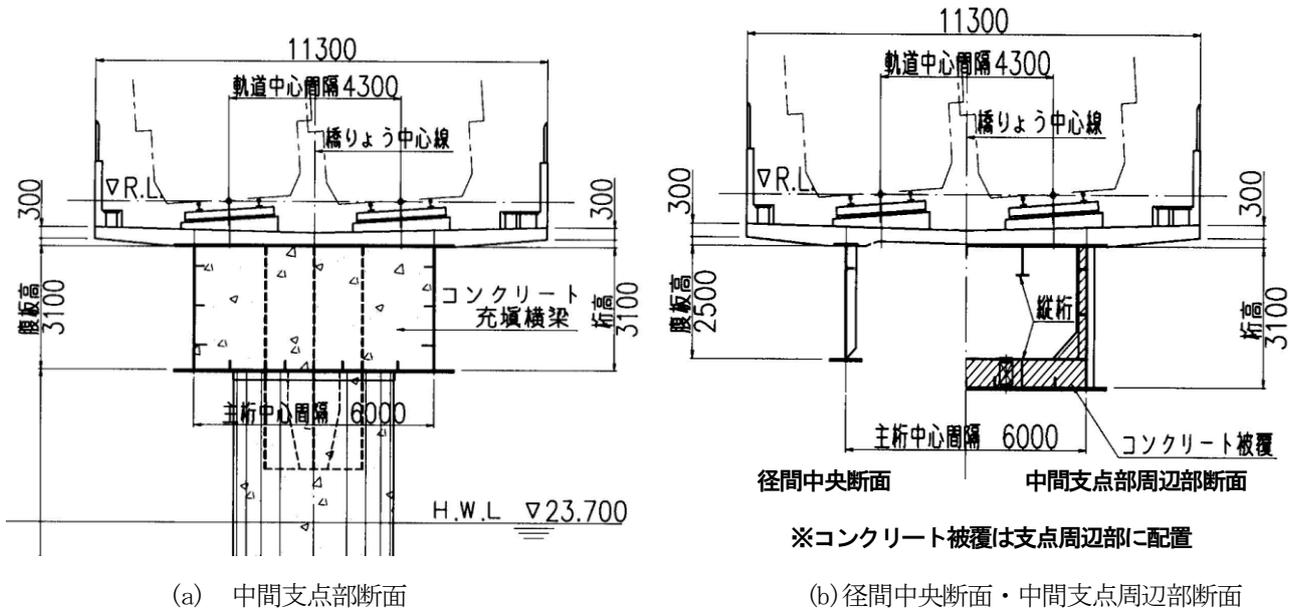


図-7 計測対象橋梁の概要

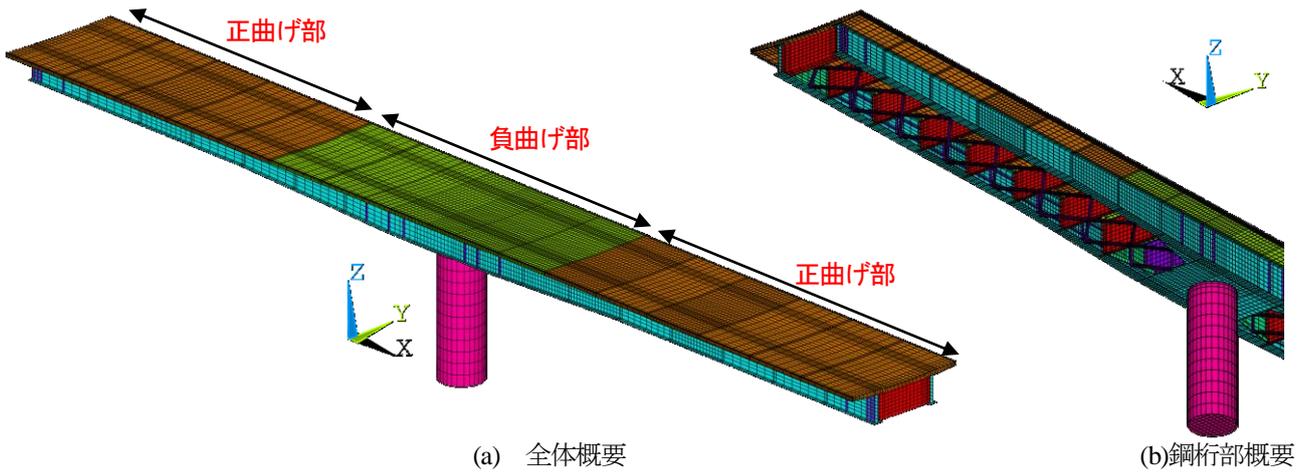
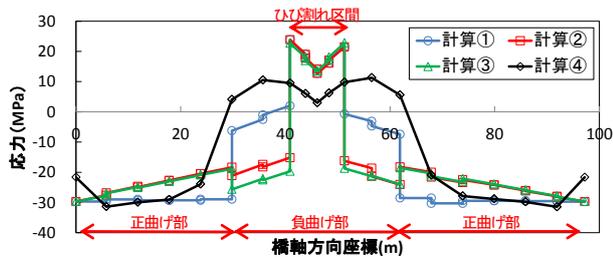
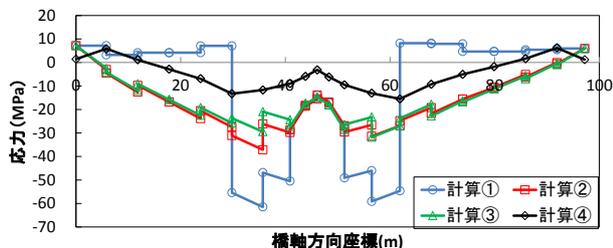


図-8 FEM解析メッシュ概要図  
(計算④)

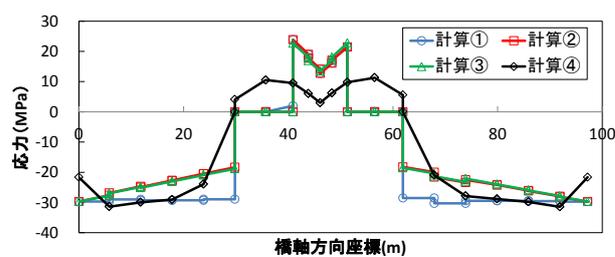


(a) 上フランジ上面の応力

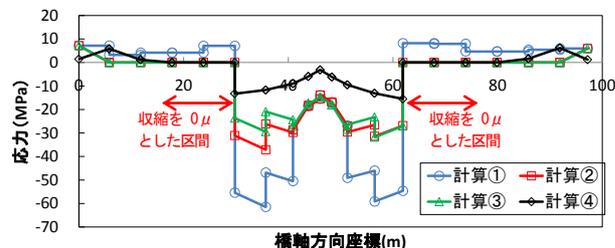


(b) 下フランジ下面の応力

図9 収縮作用 (200 $\mu$ ) における各計算結果の比較



(a) 上フランジ上面の応力



(b) 下フランジ下面の応力

図10 収縮作用 (0, 200 $\mu$ ) における各計算結果の比較 (設計で使用する値)

填コンクリート、被覆コンクリートをソリッド要素でモデル化した。なお、鉄筋は、モデルの簡易化のために全長にわたりシェル要素とした。各部材の材料定数は「鉄道構造物等設計標準・同解説 (鋼・合成構造物)」<sup>9)</sup>により設定するものとした。また、鋼部材とコンクリート部材は剛結され、ずれは生じないものとしている。

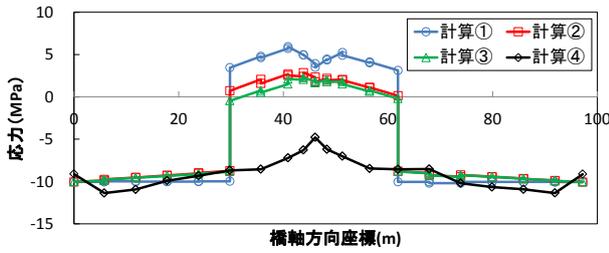
FEM解析のモデルでは、収縮、クリープの影響は、温度荷重を与えることにより再現することとし、コンクリートの熱膨張係数と収縮量より与えられる温度変化量を計算した。温度差による影響は、鋼桁とコンクリートにそのまま温度差を与えることで再現している。中間支点部のコンクリートの設定では、死・活荷重の設計計算の結果、交番区間も含めて負曲げが生じている部分を負曲げ部とし、クリープの影響の算定時にはこの部分のコンクリートの橋軸方向のみの剛性をほぼ0とすることにより、計算①～③で実施している計算の状態 (=「鋼桁+鉄筋断面」の仮定) を再現した。また、温度差の影響算定においては、計算①～③の状態では負曲げ部は収縮の影響と同様にコンクリートの剛性を無視した「鋼桁+鉄筋断面」の仮定で算出されるが、FEM解析では温度荷重を与える設定上、負曲げ部のコンクリートの剛性を有効として扱っている。このように、将来的に設計でFEM解析を用いることを検討する場合は、温度差の影響に関しては、従来設計の解析モデルを厳密に再現できないことに注意を要すると言える。さらに、収縮の影響の算定時では、負曲げ部はひび割れ区間よりも橋軸方向に広く設定されるため、内部応力を設定する範囲と負曲げ部に差異が生じている (図-2(a))。FEM解析では温度差の影響を再現する場合と同様に、この状態を厳密に再現することはできないため、本FEM解析では、負曲げ部を除いた正曲げ区間のみ温度荷重を与えることとした。

#### 4. 試設計結果

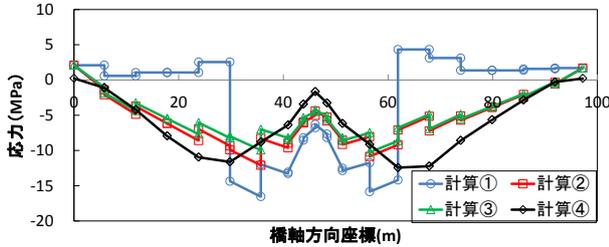
##### 4.1 収縮の影響に関する試設計結果

収縮の影響における計算①～③では、ひび割れ区間は中間支点からスパンの15%の範囲と仮定して計算を行った。コンクリートの最終収縮量を200 $\mu$ と仮定したときの鋼桁上フランジ上面・下フランジ下面の応力の橋軸方向分布を図-9に示す。図-9では、計算①は計算②とは、中間支点部を除いて異なる値を示している。この差は、図-2、表-1に示した通りの差異から生じていると考えられる。また、計算③の結果は、多少の差は生じているものの計算②とほぼ同じ値を示している。次にFEM解析 (計算④) は、傾向は計算①～③と同様であるように見えるが、値としては異なる結果となっている。特に、下フランジ側では、計算①～③よりも計算④の方が全体的に小さな値となっていることから、この差は、計算②、③では負曲げ部とひび割れ区間の設定を分けているのに対して、計算④ではこれら区間を同じとして計算しなければならないというモデル化の違いから生じていると考えられる。

収縮作用が200 $\mu$ 以下であることを仮定した場合、つまりはコンクリートの膨潤等の効果により収縮を生じないとしたことを想定した方が、結果として最終的な応答値を大きくする場合 (=安全側の設計となる場合) が考えられる。この影響を考慮した場合を図-10に示す。具体的な例を示すと、図-10(b)の正曲げ区間は、図-9(b)では圧縮応力を生じているが、死・活荷重応答は引張応力であることから考えれば、収縮を生じなかった方が、設計で使用する応答値は大きくなることとなり、安全側の設定となる。したがって、収縮の影響を検討する場合は、図-9でなく図-10のように、収縮量200 $\mu$ と0 $\mu$ の両者を比較

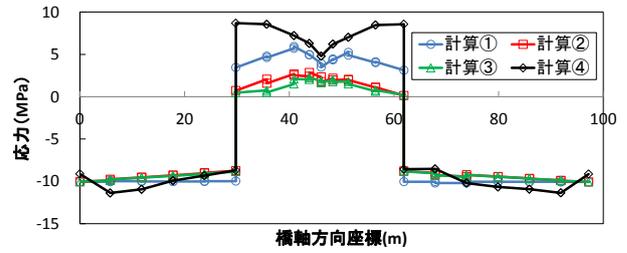


(a) 上フランジ上面の応力

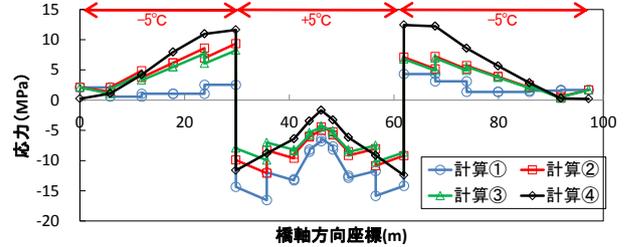


(b) 下フランジ下面の応力

図-11 温度差（鋼桁+5°C）における各計算結果の比較（FEM解析以外は鋼桁+鉄筋断面）

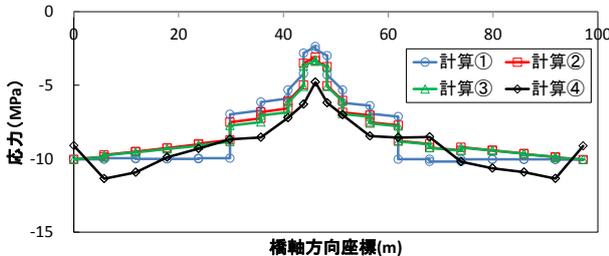


(a) 上フランジ上面の応力

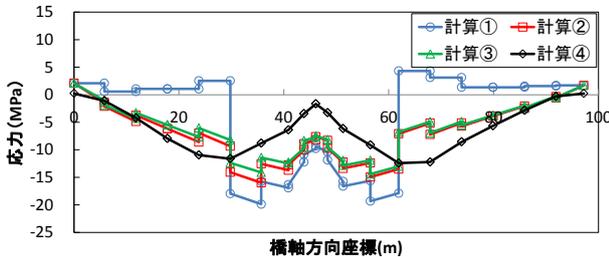


(b) 下フランジ下面の応力

図-13 温度差（鋼桁±5°C）における各計算結果の比較（設計で使用する値，計算④は参考）



(a) 上フランジ上面の応力



(b) 下フランジ下面の応力

図-12 温度差（鋼桁+5°C）における各計算結果の比較（すべての計算値が合成断面）

して、死・活荷重等を含めた全体の応答値を大きくする方向に、収縮の影響を設定すべきであると考えられる。図-10より、収縮の影響に関しては、ほぼすべての点で計算①と計算②、③とは同等な応力値か、もしくは計算②、③よりも大きな応力値を生じており、結果として計算①の方が安全側の値を与えていることがわかる。しかし、もう一方の見方では、実際には生じえない計算①の状態を考慮することで、収縮の影響を多少過剰に考慮してしまっているとも言える。

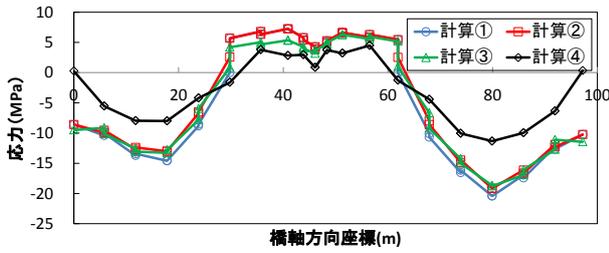
#### 4.2 温度差の影響に関する試設計結果

コンクリート床版よりも鋼桁の方が5°C高い温度とな

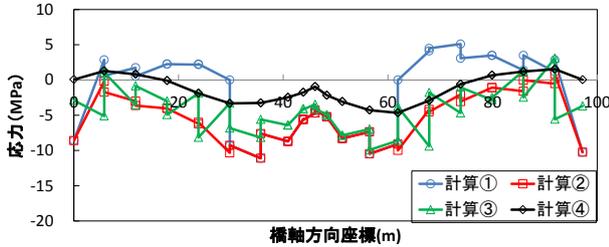
っていることを仮定し、計算を行った結果を図-11に示す。図-11(a)では、正曲げ部では各計算結果はほぼ一致しているものの、負曲げ部では計算①～③と計算④で差が大きく異なる結果となっている。これは、FEM解析では、負曲げ部のコンクリートの剛性も有効として計算を行っている影響であると考えられる。また、図-11(a)の正曲げ部では、計算①～③はほぼ一致しているが、これは本計算断面においては、中立軸が上フランジに近い位置にあり、曲げによる影響が小さく、軸力作用による影響が大きくなっていることから生じていると考えられる。一方、図-11(b)では、計算②、③と計算①は大きく差が生じているが、この部分については曲げモーメントの影響が大きいと考えられる。なお、計算②と計算③は、収縮の影響と同様に、多少の差は生じるものの、ほぼ同じ値となっている。

図-11ではFEM解析（計算④）は負曲げ区間のコンクリートの剛性設定が異なっており、その他の計算結果と大きな差が生じたため、計算①～③においても、負曲げ部のコンクリートの剛性を有効として計算を行い、比較を行った（図-12）。図-12では、下フランジ（図-12(b)）においてはあまり傾向の変化はないものの、上フランジ（図-12(a)）では、計算①～③の結果と計算④の結果がほぼ一致するように変化することがわかる。なお、図-12(a)では、正曲げ・負曲げ区間ともに圧縮の値を示しているが、これは軸力の影響が卓越したためである。

鋼桁とコンクリート床版の温度差の設定としては、±5°C時の両方での影響を確認する必要があるため、図-11の結果の一部を正負反転させ、死・活荷重による応答の正負と合わせたものを図-13に示す。ここで、注意を要するのは、図-13(b)の計算①である。図-11(b)（鋼桁+5°C時）



(a) 上フランジの応力



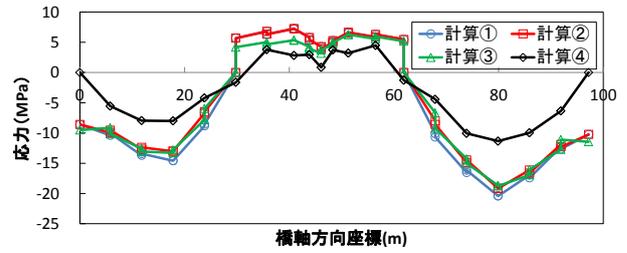
(b) 下フランジの応力

図-14 クリープ作用における各計算結果の比較

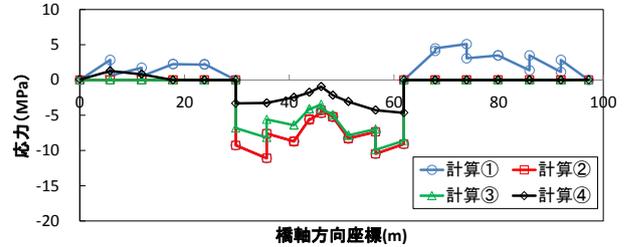
の計算①で、正曲げ部において引張側の応力となるように組み合わせて計算を行った場合、計算②、③の圧縮側の応力を無視してしまっているため、結果として鋼桁-5°C時で生じる最大引張応力を見逃す可能性があることを示している。したがって、この点に配慮を行わない場合は、計算①は必ずしも安全側の結果とはならないことを示している。ここで、図-13 においては、計算④は先述の通り、厳密には断面設定において計算モデルとは異なり、比較することが難しいため、参考として示している。

### 4.3 クリープの影響に関する試設計結果

クリープの影響を考慮した場合の各計算結果の比較を図-14に示す。図-14(a)では、計算①～③の各結果の傾向は一致している。この傾向は温度差の影響の図(図-11(a))と同様であり、軸力作用による影響が大きいことがわかる。図-14(b)では、計算③は計算②とほぼ同等な値となっているものの、計算③の分布状況がかなり乱れている。これは、応力値が小さいことも影響しているが、計算③ではフレーム解析の節点に直接、曲げモーメント荷重を作用させており、かつ、曲げモーメント荷重が各節点で一定値でないことから生じていると考えられる。収縮や温度差の影響(図-1, 図-4)では弾性荷重が一定の値であり、計算③で使用する曲げモーメント荷重は、多くの節点で時計回り・反時計回りで打ち消すことになるが、クリープの影響(図-6)では弾性荷重が曲線分布となるため、正曲げ部のほぼすべての節点で曲げモーメント荷重を作用させることになるためである。一方、計算②では弾性荷重法を用いているため、この計算値の乱れは生じていない。したがって、クリープの影響を計算する際、フレーム解析の節点を粗くとした場合では、弾性荷重法を用いた方が良好な結果が得られると考えられる。計算

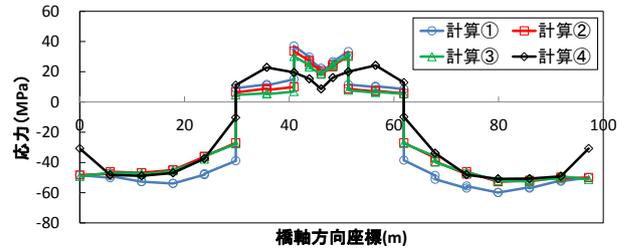


(a) 上フランジの応力

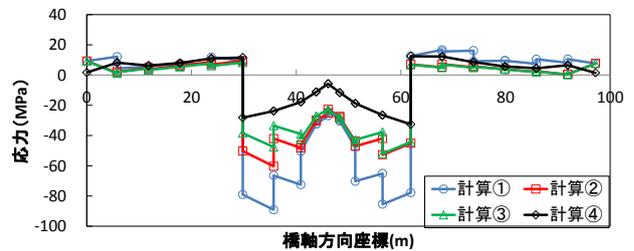


(b) 下フランジの応力

図-15 クリープ作用(またはクリープ作用なし)における各計算結果の比較(設計で使用する値)



(a) 上フランジの応力



(b) 下フランジの応力

図-16 全内部力における各計算結果の比較(設計で使用する値の合計, 計算④は参考)

④は、計算②、③に比べて小さな応答値となっている。この原因としては、収縮や温度差の算出ではコンクリート床版に直接的に内部応力を与えるのに対し、クリープ算出時は事前に荷重により床版に生じる圧縮応力を算定し、内部応力を設定することになる。この死荷重による圧縮応力が、計算②、③よりも小さいことが原因であり、この圧縮応力が小さくなった原因としては、床版有効幅の設定が設計と FEM 解析で異なっていることが考えられる。なお、この効果は、死荷重だけでなく、活荷重に対する応答でも同様な結果となると言える。

クリープの影響についても、設計としては収縮の影響と同様に、クリープ量が想定よりも小さい、または、生

表-2 断面力（曲げモーメント）の外力と内部力の割合の比較

断面力 (曲げモーメントM)	D+L+I	計算①			計算②			計算③		
		SH	T	Cr	SH	T	Cr	SH	T	Cr
		SH+T+Cr			SH+T+Cr			SH+T+Cr		
第一径間 正曲げ最大位置	100%	14%	6%	7%	2%	2%	4%	3%	2%	3%
		27%			8%			8%		
中間支点部 負曲げ最大位置	100%	8%	3%	2%	8%	2%	2%	7%	2%	2%
		13%			12%			11%		
第二径間 正曲げ最大位置	100%	11%	5%	8%	4%	2%	6%	4%	2%	6%
		24%			13%			12%		

表-3 上フランジ応力の外力と内部力の割合の比較

上フランジ 応力 $\sigma$	D+L+I	計算①			計算②			計算③			計算④参考		
		SH	T	Cr	SH	T	Cr	SH	T	Cr	SH	T	Cr
		SH+T+Cr			SH+T+Cr			SH+T+Cr			SH+T+Cr		
第一径間 正曲げ最大位置	100%	19%	6%	9%	14%	6%	8%	15%	6%	8%	14%	6%	5%
		34%			28%			29%			25%		
中間支点部 負曲げ最大位置	100%	6%	2%	2%	6%	1%	2%	6%	1%	1%	2%	2%	0%
		10%			9%			8%			4%		
第二径間 正曲げ最大位置	100%	14%	5%	10%	12%	5%	9%	12%	5%	9%	13%	5%	5%
		29%			26%			25%			23%		

表-4 下フランジ応力の外力と内部力の割合の比較

下フランジ 応力 $\sigma$	D+L+I	計算①			計算②			計算③			計算④参考		
		SH	T	Cr	SH	T	Cr	SH	T	Cr	SH	T	Cr
		SH+T+Cr			SH+T+Cr			SH+T+Cr			SH+T+Cr		
第一径間 正曲げ最大位置	100%	2%	1%	1%	0%	12%	0%	0%	12%	0%	0%	4%	0%
		4%			12%			12%			4%		
中間支点部 負曲げ最大位置	100%	7%	3%	2%	7%	2%	2%	7%	2%	2%	2%	1%	0%
		13%			12%			11%			4%		
第二径間 正曲げ最大位置	100%	2%	1%	1%	0%	9%	0%	0%	9%	0%	0%	2%	0%
		4%			9%			9%			2%		

じないケースも想定すべきである。そこで、収縮の影響の結果と同様に、死・活荷重等による曲げモーメントの正負より、クリープが生じる場合（図-14）と生じない場合（クリープ作用0）を選択して表したものを図-15に示す。上フランジ（図-15(a)）では図-14と大きく変化しないものの、下フランジ（図-15(b)）では正曲げ部の結果が大きく変化し、結果として計算①は計算②、③よりも大きな応力値（＝安全側の値）を示している。

#### 4.4 収縮・温度差・クリープの影響の合計

先述の内部力の結果のうち、設計で使用する値（図-10、図-13、図-15）と設定し合計したものを図-16に示す。図-16では、計算モデルの設定が異なる計算④を除いて、断面構成の設定で重要となる径間中央（正曲げ最大部）および中間支点（負曲げ最大部）においては、それぞれの結果に大きな差は生じていないことがわかる。この結果は、計算①～③においてはどの計算手法を用いてもほぼ同様であることを示しているが、収縮・温度差・クリープのそれぞれの影響の計算で生じた差が打ち消しあっていると考えられ、本検討事例で用いた橋梁以外への適用には注意が必要であると言える。ここで、図-16に

おいても、計算④は先述の通り、厳密には断面設定において計算モデルとは異なるため、参考として示している。次に、収縮、温度差、クリープの影響による応答値が、外力による応答値に対してどの程度の大きさであるかを、表-2～表-4に示す。これらの表では、D：死荷重、L：活荷重、I：衝撃荷重、SH：収縮による影響、T：温度差による影響、Cr：クリープによる影響とし、「D+L+I（外力）」を100%とした場合のそれぞれの内部力の割合と、「SH+T+Cr（内部力合計）」の割合を示している。また、示している断面は、外力に対する正・負曲げが最大値となる断面について示している。

表-2は曲げモーメントによる断面力の大きさについて示しているが、内部力の影響は、外力に対して1～3割程度であることがわかる。また、正曲げ部については計算①ではその影響が大きい、正曲げ部の計算②、③や負曲げ部ではその影響はあまり大きくない。

表-3は軸力による影響も含めた、上フランジの応力による結果について示している。内部力の影響は、外力に対して5～30%程度であることがわかる。正曲げ部では、計算①に対して計算②、③は3～6%影響が小さくなっているが、負曲げ部ではほとんど変化がない。また、計算

④は先述の通り、温度差における解析モデルが異なっているため参考ではあるが、この温度差の影響が計算②、③とほぼ同じであることから比較可能であると考え、FEM解析によれば計算値①よりも5~10%内部力の影響が小さく算出されることがわかる。またこの効果は主としてクリープの影響による計算結果から生じていることがわかる。これはすなわち、FEM解析を用いることにより、ある程度設計断面の合理化が可能であることが示されている。

表4は、下フランジの応力による結果について示している。下フランジでは、外力に対する内部力の影響は、最大で13%程度であり、上フランジに比べるとその影響は小さいといえる。正曲げ部において計算①は、計算②、③よりも小さな影響となっているが、これは図-12に示した通り、温度差の設定において最大応答を見逃しているためである。計算④では計算②、③よりも小さな影響となっているが、これは温度差が大きく影響していることがわかるが、先述の通り温度差については解析モデルが異なっていることが原因であり、現状では合理化が可能であるとは言い難い。

## 5. まとめ

本研究では、連続合成桁の内部力に着目し、実際に建設された鉄道橋に対して試設計検討を行うことにより、それぞれの設計手法について影響を確認した。本検討より下記の結論が得られた。

- (1)従来の鉄道構造物で使用されたことのある内部力設計手法（本論文の計算①）は、実挙動を考慮した手法（計算②③）に対しては安全側の結果を与える。ただし、温度差による影響算定時には、場合によっては最大応答を見逃す可能性があり、注意を要する。
- (2)弾性荷重法を使用せずに曲げモーメント荷重を作用させる手法（計算③）は、結果として弾性荷重法による手法（計算②）と同じ結果となることがわかった。ただし、クリープのように曲げモーメント荷重の値が一定でなく曲線的に変化する場合は、解析上の節点の配置などに配慮が必要である。
- (3)内部力の設計にあたっては、3次元の有限要素解析において温度応力を作用として考慮することにより計算を実施することができる。3次元の有限要素解析を用いた場合、クリープの影響に関しては従来法による計算結果よりも小さな応答値となり、設計断面を合理化できる可能性がある。
- (4)ただし、3次元の有限要素解析を収縮や温度差の影響の設計に用いる場合、ひび割れ時のコンクリート床版の設定に対しては、従来からの設計法と有限要素法のモデルを同一にすることが現状では困難であり、従来から行われてきた設計計算の結果とは、比較することは難しく、検討の余地が残されている。

(5)内部力の設計値の合計が、外力の合計値に対する影響を考えたとき、検討橋梁ではその大きさは最大で3割程度となり、特にその効果が大きいのは正曲げ区間の上フランジである。よって、連続合成桁の設計において内部力の影響は比較的大きいと言え、内部力の設計精度向上により、連続合成桁の断面合理化が期待できる。

本検討過程で示したように、鉄道構造物として扱うか、道路構造物として扱うかにより、設計手法が異なっているのが現状である。両者の連続合成桁としての構造はほぼ同等であることから考えて、また、設計者の混乱を防止するためにも、何らかの統一的な設計手法を示す必要があると考えられる。特に、クリープ係数の設定や温度差の設定は、より実際に近い挙動に対応した設定について調査や試設計検討が期待される。

## 参考文献

- 1) 神谷崇, 谷口望, 碓山晴久, 依田照彦: 繰り返し荷重を受ける連続合成桁中間支点部のひび割れ挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集A, Vol.63 No.1, 土木学会, pp.25-34, 2007.
- 2) 鋼・合成構造標準示方書(総則編・構造計画編・設計編), 土木学会, 2007.
- 3) 長井正嗣, 奥井義昭, 岩崎英治: 連続合成桁の初期ひび割れ状態を考慮したひび割れ幅, 鉄筋応力算定法の一提案, 土木学会論文集No.759/I-67, 土木学会, pp.283-292, 2004.
- 4) 谷口望, 相原修司, 池田学, 八巻康博, 藤原良憲, 鈴木喜弥, 木下哲龍: 連続合成桁における中間支点部の活荷重応答に関する実橋測定, 構造工学論文集Vol.51A, 土木学会, pp.1449-1457, 2005.
- 5) 谷口望, 池田学, 依田照彦: 鉄道用連続合成桁の設計におけるテンションスティフニングの影響評価, 構造工学論文集Vol.52A, 土木学会, pp.1047-1055, 2006.
- 6) AASHTO:LRFD Bridge Design Specifications, SI Units, Third Edition,2004.
- 7) 土木学会鋼構造委員会: 鋼・合成構造標準示方書に基づく新たな設計, 鋼構造委員会, 合成桁の限界状態に関する調査検討小委員会報告書, 2009.
- 8) 藤原良憲, 谷口望, 池田学, 福岡寛記: 連続合成桁における床版コンクリート施工時の桁挙動の測定, 構造工学論文集Vol.54A, pp.860-870, 2008.
- 9) 国土交通省監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼・合成構造物), 丸善, 2009.
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書鋼橋編, 2013.
- 11) 日本橋梁建設協会: 連続合成2主桁橋の設計例と解説, 2005.
- 12) 新しい鋼橋の設計編集委員会編: 新しい鋼橋の設計, 山海堂, 2002.

(2013年9月25日受付)