

(57) 作用履歴に即した活荷重合成桁の負曲げ挙動 に関する解析的研究

柳沼大介¹・中島章典²・藤倉修一³・Nguyen Minh Hai⁴

¹正会員 東日本高速道路株式会社 新潟支社 上越管理事務所 (〒 943-0173 上越市大字富岡字引田 1717-1)

Email: d.yaginuma.aa@e-nexco.co.jp

²フェロー会員 株式会社 HRC 研究所 (〒 984-0805 仙台市若林区南材木町 3-301)

Email: akinorin@hrc-ri.co.jp

³正会員 宇都宮大学准教授 地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科 (〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

Email: shuichi.fujikura@cc.utsunomiya-u.ac.jp

⁴Lecturer, Faculty of Road and Bridge Engineering, The University of Danang - University of Science and Technology (54 Nguyen Luong Bang, Danang city, Viet Nam)

Email: nmhai@dut.udn.vn

合成桁の設計に際しては、一般には、死荷重、活荷重、乾燥収縮などの各作用によって生じる応答値を、抵抗断面を仮定した上でそれぞれ独立に算定し、それらの応答値を重ね合せて、設計限界値と比較して照査している。しかし、実際にはこれらの各作用は連続的に生じ、合成桁の抵抗断面も応答に応じて変化する。したがって、種々の作用の履歴に応じて、合成桁の抵抗断面を仮定することなく応答値を算定することが望ましい。そこで本研究では、2 径間連続合成桁モデルを対象として、各部材の非線形挙動を考慮できる剛体ばねモデル解析を行い、合成桁の抵抗断面を変更することなく、死荷重、活荷重、乾燥収縮などの作用の履歴を連続的に考慮した応答値と、それぞれの作用による応答値を個別に求めてこれを重ね合せた結果とを比較して考察した。

Key Words : *steel-concrete composite girder, action sequence, RBSM analysis, negative bending behavior*

1. はじめに

合成桁の設計に際しては、死荷重、活荷重、乾燥収縮、鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版と呼ぶ。）と鋼桁の温度差などの各作用によって生じる応答値を、抵抗断面を仮定した上でそれぞれ独立に算定し、それらの応答値を重ね合せて、設計限界値と比較して照査しているのが一般的である^{1),2)}。しかし、実際にはこれらの各作用は連続的に生じ、合成桁の抵抗断面も応答に応じて変化することになる。したがって、これらの作用による応答値を求める場合には、種々の作用の履歴を考慮し、合成桁の抵抗断面を仮定することなく応答値を算定することが望ましいと考えられる。

そこで本研究では、2 径間連続合成桁モデルを対象として、合成桁の抵抗断面を変更することなく、死荷重、活荷重、乾燥収縮、RC 床版と鋼桁の温度差などの作用の履歴を連続的に考慮して応答値を求めた。そして、この応答値と、それぞれの作用による応答値を個別に求めてこれを重ね合せた結果とを各作用の段階ご

とに比較して考察した。なお、作用の履歴を連続的に考慮する場合にはもちろん、それぞれの作用による応答値を個別に求める場合にも、ここでは、RC 床版、鋼桁およびずれ止めの非線形挙動を考慮できる剛体ばねモデルを用いた弾塑性解析によった。

2. 解析モデルと解析方法

(1) 解析対象モデル

本研究では、図-1 に示すような実際の 2 径間連続合成桁を解析対象とした。対象とした合成桁モデルは活荷重合成桁として設計されている。全長は 118m、各スパンは 59m の 2 主桁橋であり、RC 床版は橋軸方向に一樣な断面を有する。鋼桁の桁高は約 2900mm であり、全長に異なる 3 つの断面特性をもつ変断面構成となっている。ここでは、1 本の主桁と対応する RC 床版を対象とした。RC 床版および鋼桁の断面諸元を表-1 に示す。また、ずれ止めには頭付きスタッド（以下、ス

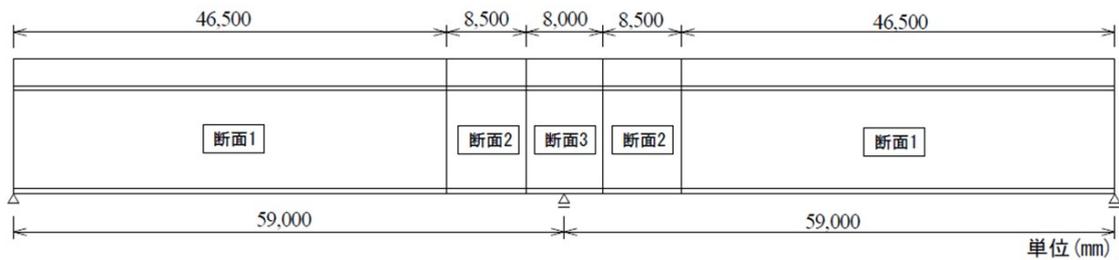


図-1 合成桁の解析モデル

表-1 解析モデルの断面諸元

断面種類		断面寸法 (mm)	
RC 床版		5200 × 310	
鋼桁	断面 1	上フランジ	700 × 30
		ウェブ	2820 × 16
		下フランジ	910 × 48
	断面 2	上フランジ	700 × 56
		ウェブ	2780 × 19
		下フランジ	910 × 57
	断面 3	上フランジ	700 × 76
		ウェブ	2750 × 24
		下フランジ	910 × 74

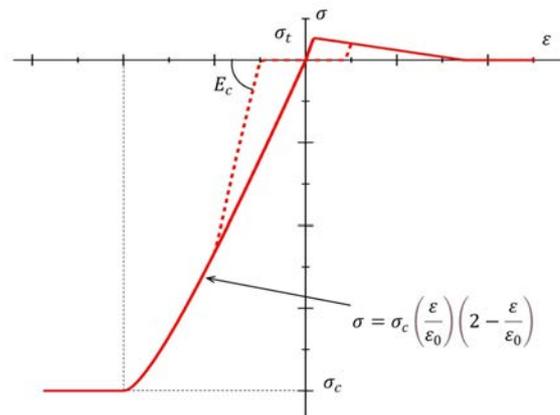


図-3 床版コンクリート応力-ひずみ関係

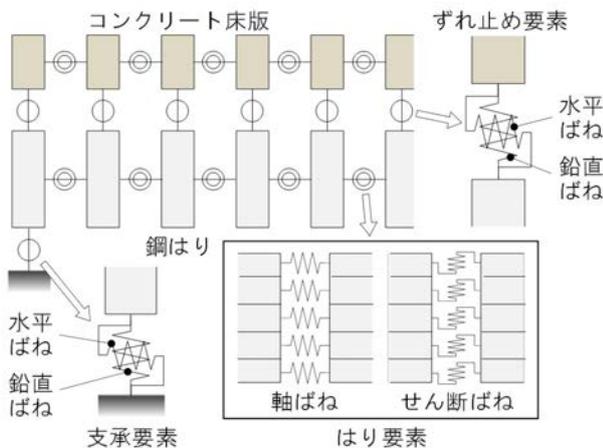


図-2 剛体ばねモデルによる合成桁のモデル化

タッドと呼ぶ。) が用いられている。このような解析モデルを対象として不完全合成桁の挙動を追跡するのに有効な剛体ばねモデルを用いた弾塑性解析により、平面骨組モデルとして解析を行った³⁾。

(2) 解析方法

剛体ばねモデル解析に際しては、図-2 のように合成桁の鋼桁および RC 床版を橋軸方向に分割し、その分割した剛体をさらに高さ方向の小断面に分割する。そして、橋軸方向の剛体間に梁要素としての変形を表すように複数の軸ばねとせん断ばねを設けた。また、RC

床版と鋼桁の剛体間には、ずれ止め要素として、水平方向の力に抵抗する水平ばねと鉛直方向の力に抵抗する鉛直ばねを設けた。

ここでは、鋼桁と RC 床版をそれぞれ橋軸方向に 236 分割し、1 つの剛体長さを 500mm とした。床版コンクリートを高さ方向に 10 分割とし、RC 床版内の上下の鉄筋も床版コンクリートと平面保持を仮定して配置している。鋼桁では、上下フランジをそれぞれ 1 分割断面、ウェブを 10 分割断面とした。鋼桁および鉄筋には完全弾塑性型の応力-ひずみ関係を仮定し、床版コンクリートには、図-3 に示すような応力-ひずみ関係を仮定した。圧縮側では圧縮強度 σ_c に達するまでは放物線の関係を、引張側では、引張強度 σ_t に達するまでは線形関係で、以降では直線的に応力が減少する関係とした。ずれ止めを表す RC 床版と鋼桁の剛体間の水平ばねには複合構造標準示方書²⁾ に規定されるせん断力-ずれ変位関係を適用した。各ばねの構成則などの詳細は文献³⁾ を参照していただきたい。なお、使用材料の特性値を表-2 に示す。

また、参考にした合成桁の実橋モデルでは、ずれ止めとして軸径 22mm、全高 200mm のスタッドをフランジ幅方向に 4 本ずつ配置している。そして、桁端部でスタッド配置間隔が狭く、支間中央部でスタッド配置間隔が広がっており、橋軸方向にスタッドの配置間隔が変化している。解析モデルのスタッド配置に際しては、図-4 に示すようにスタッドの配置状況を幾分簡

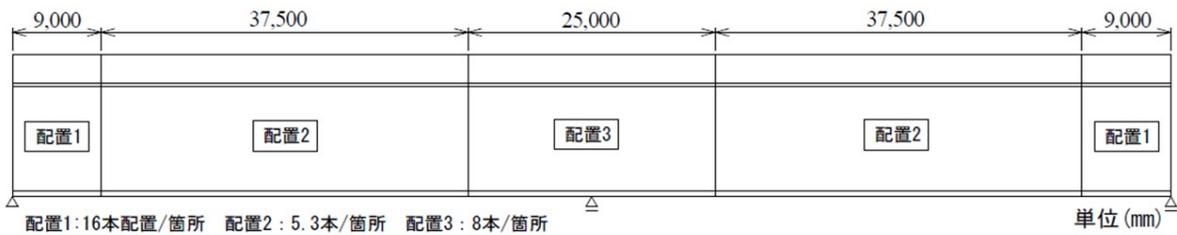


図-4 解析モデルのスタッド配置状況

表-2 使用材料の特性値

材料		特性値
コンクリート (図-3)	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	40
	引張強度 σ_t (N/mm ²)	3.0
	弾性係数 E_c (kN/mm ²)	31
軸方向鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	355
	弾性係数 (kN/mm ²)	200
	せん断弾性係数 (kN/mm ²)	77
鋼桁フランジ	降伏強度 (N/mm ²)	355
	弾性係数 (kN/mm ²)	200
鋼桁ウェブ	降伏強度 (N/mm ²)	355
	弾性係数 (kN/mm ²)	200
	せん断弾性係数 (kN/mm ²)	77
頭付きスタッド	1本当りのせん断耐力 (kN)	118

略化した。具体的には、スタッドの配置間隔を 125mm, 250mm, 375mm の 3 種類とした。

しかし、本研究の剛体ばねモデル解析では、鋼桁および RC 床版の分割数に対応させて、ずれ止めの配置間隔を 500mm としている。したがって、上記のスタッド配置間隔に対応させて解析モデルのずれ止め配置位置 1 箇所当たりのスタッド本数を、16 本、8 本、5.3 本としている。そして、1 箇所当たりのスタッド本数に応じてずれ止め位置のせん断耐力を設定した。例えば、スタッド配置間隔が 250mm のところでは、ずれ止め位置にスタッド 8 本をまとめて配置することになるため、その位置の水平ばねに与えるせん断耐力をスタッド 1 本分の 8 倍としている。

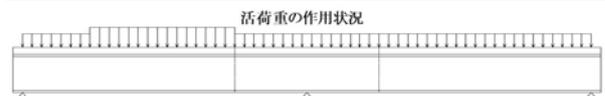
(3) 作用の取り扱い

本研究では、合成前死荷重、コンクリートの乾燥収縮、合成後死荷重、RC 床版と鋼桁の温度差および活荷重を作用として考慮した。

おもに RC 床版と鋼桁の自重からなる合成前死荷重は 47.9N/mm の等分布荷重として鋼桁断面で受け持たれるように作用させる。コンクリートの乾燥収縮としては、道路橋示方書・同解説 (II 鋼橋・鋼部材編)⁴⁾ に従って、乾燥収縮ひずみ 200×10^{-6} を仮定し、このひずみに対応する伸びを床版コンクリート部分の軸ばねに与えることにより考慮する。また、合成後死荷重と

表-3 作用の取り扱い時の抵抗断面と活荷重作用状況

作用の考慮方法	合成前死荷重	乾燥収縮	合成後死荷重	温度差	活荷重
重合せ	鋼桁	合成断面 (コンクリートの引張強度大)	合成断面 (コンクリートの引張強度無視)		
連続	鋼桁	合成断面 (コンクリートの引張強度考慮)			



しては、高欄と地覆、舗装などを想定して 22N/mm の等分布荷重として合成断面で受け持たれるように載荷する。一方、RC 床版と鋼桁の温度差は、温度差に対応する伸びを RC 床版を構成する床版コンクリートと鉄筋の軸ばねに与えることにより考慮する。おもに負曲げ挙動に着目しているため、RC 床版の引張軸力が増加するように、RC 床版が鋼桁よりも 10℃低温とし、RC 床版を構成するばね要素に 120×10^{-6} のひずみを与える⁴⁾。活荷重としては、B 荷重を用いて、合成断面で受け持たれるように載荷する。

これらの作用を連続して考慮する場合には、まず、鋼桁のみの解析モデルに合成前死荷重を作用させる。そして、合成前死荷重による鋼桁断面の応力を考慮した上で、合成断面を有する解析モデルに対して乾燥収縮を考慮し、続いて、合成後死荷重、RC 床版と鋼桁の温度差、活荷重の順番に作用させ、弾塑性解析を行う。

一方、各作用を独立に考慮する場合には、合成前死荷重は鋼桁のみの解析モデルに作用させる。また、乾燥収縮、合成後死荷重、RC 床版と鋼桁の温度差、活荷重は合成断面を有する解析モデルにそれぞれ作用させ、弾塑性解析を行っている。ただし、乾燥収縮を考慮する場合には、RC 床版が全断面有効となるように、床版コンクリートの引張強度を大きくして、ひび割れが生じないようにしている。その他の作用に対しては床版コンクリートの引張抵抗を無視するために、床版コンクリートの引張強度をゼロとして弾塑性解析を行っている。

表-3 に作用を連続的に考慮した場合とそれぞれの作用を独立に考慮する場合の抵抗断面の取り扱いおよび B 活荷重の作用状況のイメージを示している。

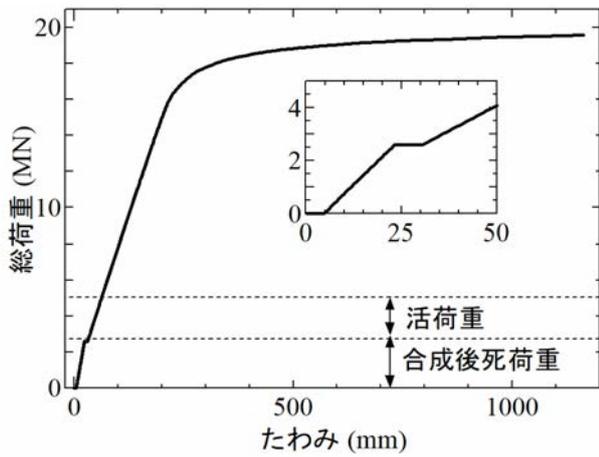


図-5 総荷重-左支間中央たわみ関係

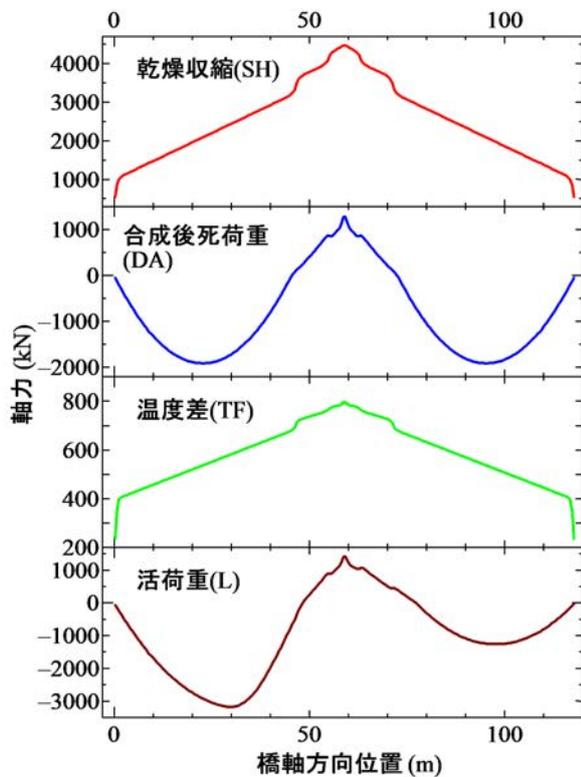


図-6 各作用による RC 床版の軸力分布

3. 解析結果

ここでは、図-1、表-1 に示す 2 径間連続合成桁モデルに合成前死荷重、コンクリートの乾燥収縮、合成後死荷重、RC 床版と鋼桁の温度差、活荷重の各作用が順番に連続で生じた場合について、設計荷重時までの各部材の挙動を確認する。また、その応答値を、各作用を独立に考慮して重ね合せた結果と比較している。

(1) 荷重-左支間中央たわみ関係

まず、対象とした 2 径間連続合成桁モデルに、合成前死荷重、乾燥収縮、合成後死荷重、RC 床版と鋼桁の

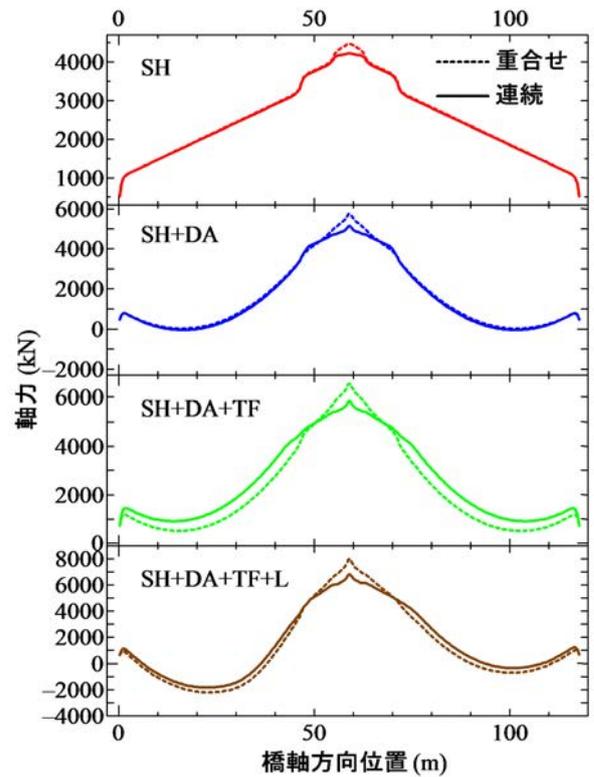


図-7 重合せと連続による RC 床版軸力分布の比較

温度差、活荷重を順番に作用させた場合の総荷重と左支間中央のたわみの関係を図-5 に示す。縦軸は総荷重、横軸は左支間中央たわみである。ただし、総荷重には合成前死荷重分を含めていない。それぞれの作用の合計値が設計値に達した時、つまり、活荷重が設計荷重（総荷重 5.264MN）に達した時点以降、最大荷重に達するまで活荷重分布に比例させた荷重のみを増加させている。また、横の点線は合成後死荷重と活荷重がそれぞれ設計値に達したときを示す。図中の小窓部分には、総荷重が約 4MN までの範囲を拡大して示している。

図中の小窓部分からわかるように、乾燥収縮が作用する 0kN 時と RC 床版と鋼桁の温度差が作用する 2596kN 時において、たわみのみが増加している。これは乾燥収縮および温度差のそれぞれの作用によって RC 床版に軸力が生じ、それに伴って曲げが発生したためである。また、図中に示す合成後死荷重載荷段階と活荷重載荷段階で荷重-たわみ関係の傾きが異なっている。これは、合成後死荷重と活荷重で荷重の分布形状が異なるためである。活荷重が設計荷重に達するまではもちろん弾性的な挙動を示しており、最大荷重は 19.5MN 程度になっている。

(2) 断面力応答の比較

ここでは、各作用を連続的に考慮した場合と各作用を独立に考慮した場合について、RC 床版および鋼桁の軸力と曲げモーメントの断面力応答を比較する。また、

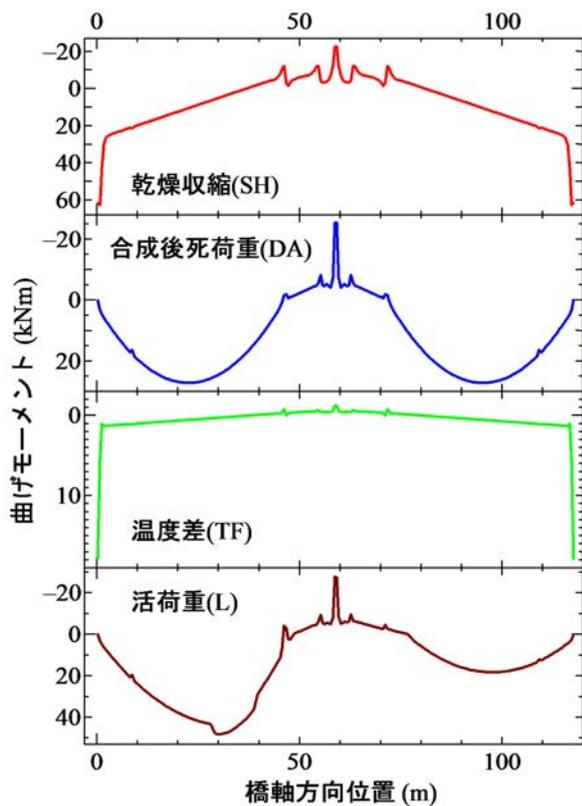


図-8 RC床版の曲げモーメント分布

スタッドのせん断力応答も比較する。なお、各作用を独立に考慮する場合には、それぞれの作用が設計値となるときに断面力応答などを求めている。

a) 各作用による軸力分布と重ね合せおよび連続の比較

各作用を独立に考慮した場合のRC床版の橋軸方向軸力分布を図-6を示す。縦軸が軸力を、横軸が橋軸方向位置を表しており、上から順番に、乾燥収縮(SH)、合成後死荷重(DA)、RC床版と鋼桁の温度差(TF)、活荷重(L)の設計作用による軸力分布である。乾燥収縮およびRC床版と鋼桁の温度差による軸力は中間支点部で大きく、特に、RC床版を全断面有効としていることによって、乾燥収縮による中間支点部付近の引張軸力が大きい。これに対して、合成後死荷重および活荷重による軸力は支間部で圧縮、中間支点部付近で引張となっており連続桁としての応答を示している。

これらの結果を踏まえて、それぞれの作用を連続的に考慮して、各作用が設計値に達した段階と各作用を独立に考慮して重ね合せた場合のRC床版軸力の橋軸方向分布の比較を図-7に示す。縦軸が軸力を、横軸が橋軸方向位置を表し、上から順番に乾燥収縮作用後(赤線)、合成前死荷重作用後(青線)、RC床版と鋼桁の温度差作用後(緑線)、活荷重作用後(茶線)であり、連続的に作用させた場合の結果を実線で、重ね合せの結果を点線で示している。いずれの段階でも中間支点付近の負曲げ領域では、重ね合せた場合に引張軸力が幾分大きい。一方、温度差の作用後の段階(緑線)では

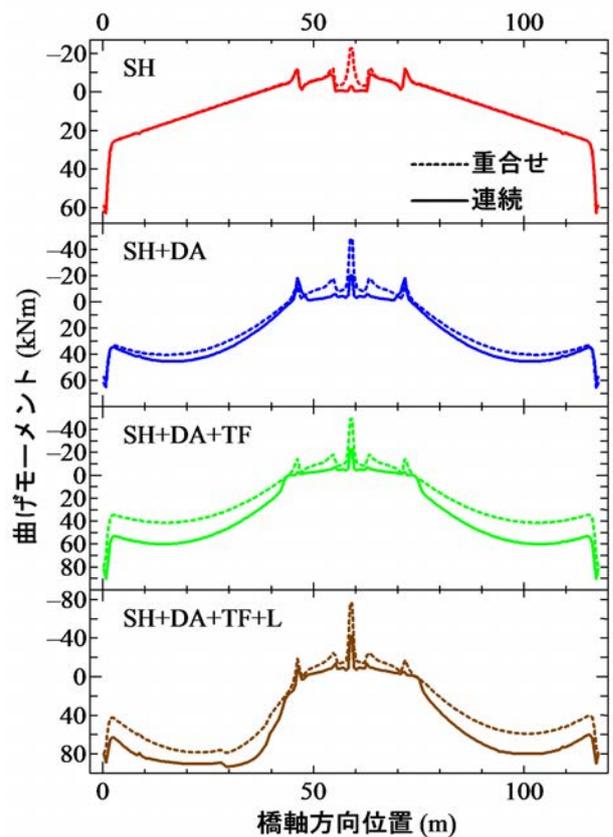


図-9 重ねせと連続によるRC床版曲げモーメント分布の比較

支間部において重ね合せた場合のほうが圧縮軸力が大きい。これは引張側の床版コンクリートの抵抗断面の違いによるものと考えられる。ただし、全体的には作用を連続的に考慮した場合と各作用を独立に考慮して重ね合せた場合の軸力分布に大きい差異は見られない。

b) 各作用による曲げモーメント分布と重ね合せおよび連続の比較

各作用を独立に考慮した場合のRC床版の橋軸方向曲げモーメント分布を図-8を示す。縦軸が曲げモーメントを、横軸が橋軸方向位置を表しており、上から順番に、乾燥収縮(SH)、合成後死荷重(DA)、RC床版と鋼桁の温度差(TF)、活荷重(L)の設計作用による曲げモーメント分布である。温度差以外の作用によって中間支点付近では、顕著に負曲げモーメントが生じており、その付近で曲げモーメント分布が脈動している。曲げモーメント分布が脈動するおもな理由は、中間支点付近で鋼桁断面の大きさが変わるからである。特に、中間支点部近傍で負曲げモーメントが大きくなっているのは、剛体ばねモデル解析において中間支点部近傍で剛体が局所的に折れ曲がるからであると思われる。ただし、その変動幅は以下に示す鋼桁の曲げモーメントに比較して非常に小さい。

それぞれの作用を連続的に考慮して、各作用が設計値に達した段階と各作用を独立に考慮して重ね合せた

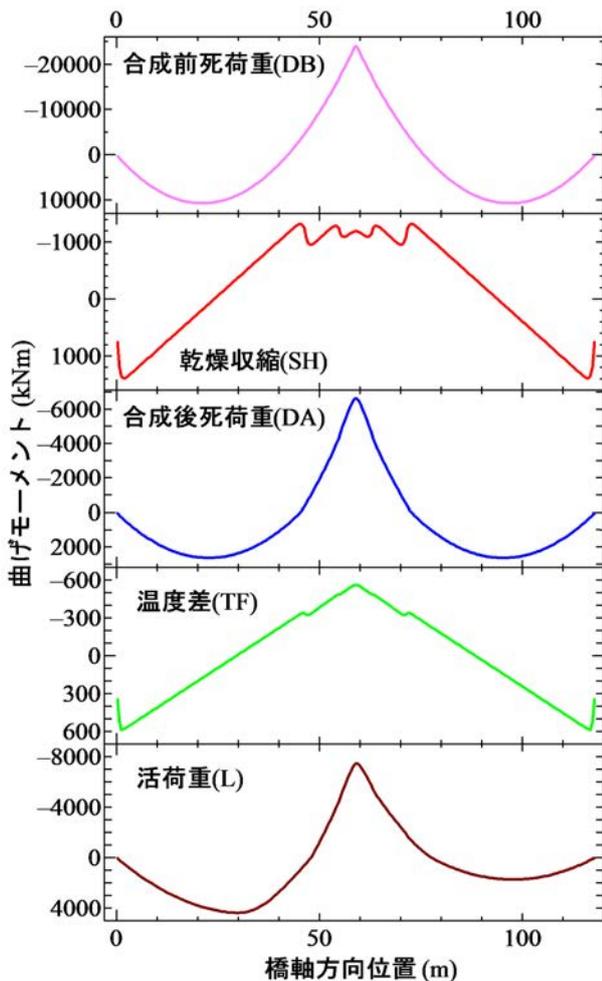


図-10 鋼桁の曲げモーメント分布

場合の RC 床版の橋軸方向曲げモーメント分布の比較を図-9 に示す。各線の色および種類は軸力分布の場合と同じである。合成後死荷重作用後以降では、支間部において作用を連続的に考慮した場合のほうが正曲げモーメントが大きく、中間支点付近では負曲げモーメントが小さい。

一方、各作用を独立に考慮した場合の鋼桁の橋軸方向曲げモーメント分布を図-10 に示す。一番上に合成前死荷重による曲げモーメント分布を示している。合成前死荷重、合成後死荷重および活荷重によって中間支点付近では負曲げモーメントが、支間中央部付近では正曲げモーメントが生じており連続桁の挙動を示しており、正曲げモーメントおよび負曲げモーメントとも合成前死荷重による値が最も大きい。一方、乾燥収縮および温度差によって中間支点付近では負曲げモーメントが、桁端付近では正曲げモーメントが生じている。そして、乾燥収縮による負曲げモーメントは中間支点付近で平坦のようになっているが、これは乾燥収縮による応答値の算定においては床版コンクリートを全断面有効としており、図-6 の一番上に示すように中間支点付近で床版コンクリートの軸力大きいことによる

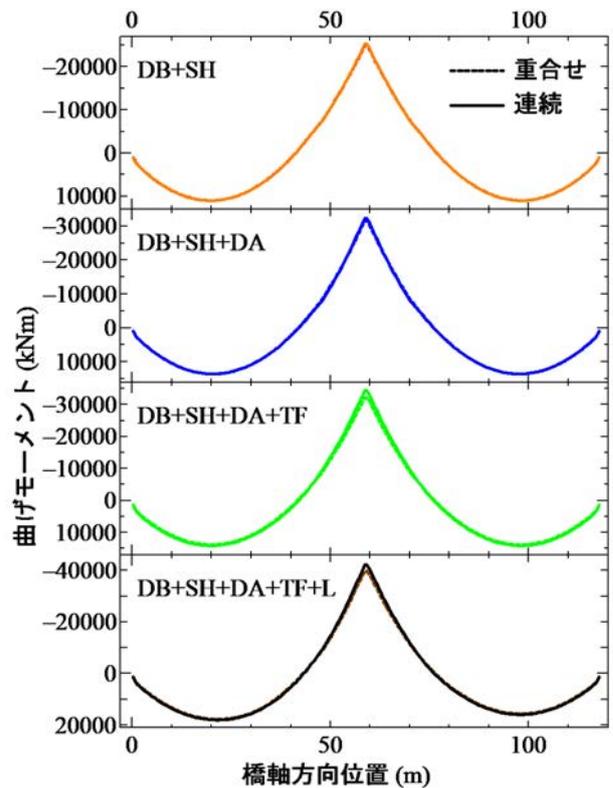


図-11 重合せと連続による鋼桁曲げモーメント分布の比較

と考えられる。

それぞれの作用を連続的に考慮して、各作用が設計値に達した段階と各作用を独立に考慮して重ね合せた場合の鋼桁の橋軸方向曲げモーメント分布の比較を図-11 に示す。各線の色および種類は軸力分布の場合と同じである。作用の段階が進んで、特に、活荷重作用後において中間支点付近で作用を連続的に考慮した場合のほうが負曲げモーメントが幾分大きい、両者の曲げモーメント分布に大きな差異は認められない。

c) 各作用による水平せん断力分布と重合せおよび連続の比較

各作用を独立に考慮した場合のスタッド 1 本当りの橋軸方向せん断力分布を図-12 に示す。縦軸がスタッド 1 本当りのせん断力であり、この場合も上から順番に、乾燥収縮 (SH)、合成後死荷重 (DA)、RC 床版と鋼桁の温度差 (TF)、活荷重 (L) の設計作用によるせん断力分布である。乾燥収縮、RC 床版と鋼桁の温度差の作用によるせん断力は桁端で大きいのに対して、合成後死荷重および活荷重によるせん断力は中間支点部の左右で脈動して、大きくなっている。しかし、スタッド 1 本のせん断耐力は 118kN であり、その値よりはかなり小さい。

それぞれの作用を連続的に考慮して、各作用が設計値に達した段階と各作用を独立に考慮して重ね合せた場合のスタッド 1 本当りのせん断力の橋軸方向分布の比較を図-13 に示す。各線の色および種類は軸力分布の

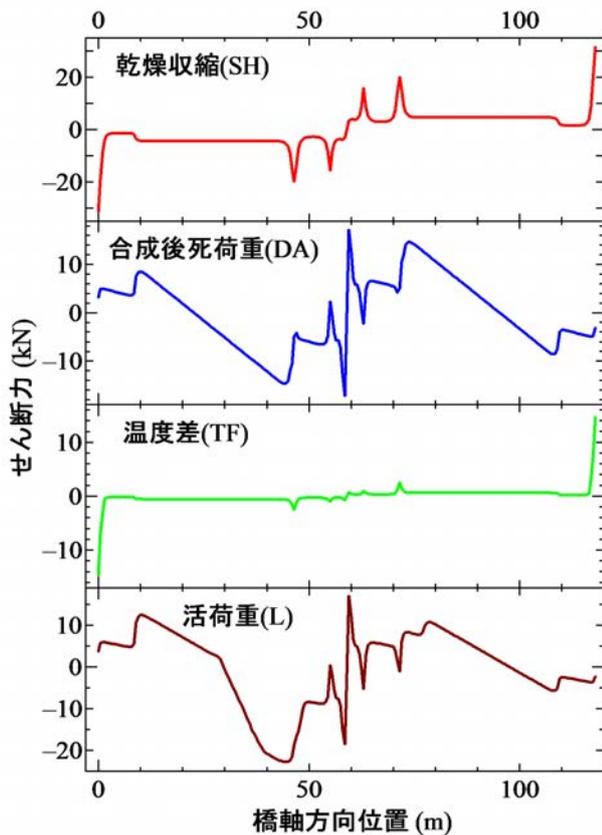


図-12 スタッドのせん断力分布

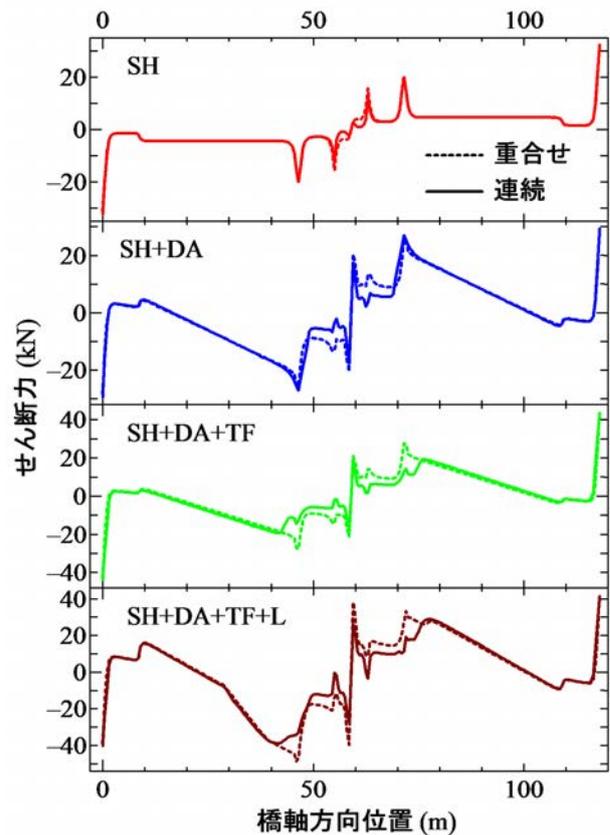


図-13 スタッドのせん断力分布の比較

場合と同じである。この図から、それぞれの作用を連続的に考慮して、各作用が設計値に達した段階と各作用を独立に考慮して重ね合せた場合のせん断力分布では、中間支点付近に幾分の差異があるが、全体的には両者に大きい差異はない。

4. おわりに

本研究では、2径間連続合成桁モデルを対象として、各部材の非線形挙動を考慮できる剛体ばねモデル解析を行い、合成桁の抵抗断面を変更することなく、死荷重、活荷重、乾燥収縮、RC床版と鋼桁の温度差などの作用の履歴を連続的に考慮した応答値と、それぞれの作用による応答値を個別に求めてこれを重ね合せた結果とを比較して考察した。

その結果、作用を連続的に考慮した場合とそれぞれの作用による応答値を個別に求めてこれを重ね合わせた場合には、RC床版および鋼桁の断面力応答値に大きい差異は見られない結果となった。これに対して、ずれ止めのせん断力応答では中間支点部付近の負曲げ領域で両者に若干の差異が認められた。

本研究では、各作用による応答値を個別に求める場

合においても、剛体ばねモデル解析によって応答値を求めている。その際、乾燥収縮による応答値を求める場合には、負曲げ領域のコンクリートの引張抵抗を考慮している。その他の作用による応答値を算定する場合には、コンクリートの引張強度を無視しているが、負曲げ領域においても圧縮応力を受ける断面は抵抗断面として考慮している。そのため、作用の差異による応答値の差異が小さかったものと思われる。

参考文献

- 1) 土木学会複合構造委員会：複合構造物の性能照査例-複合構造物の性能照査指針（案）に基づく-、複合構造シリーズ 01, 2006.
- 2) 土木学会複合構造委員会：複合構造標準示方書（2014年制定）、2015.5.
- 3) 中島章典, 柳沼大介, 乾真之介, NGUYEN Minh Hai, 藤倉修一：プレキャスト床版を有する非合成桁のずれ止め配置に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.77, No.2, pp.81-99, 2021.8.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, II 鋼橋・鋼部材編, 2017.11.

(Received September 10, 2021)

ANALYTICAL STUDY ON NEGATIVE BENDING BEHAVIOR OF COMPOSITE GIRDER FOR LIVE LOAD ACCORDING TO ACTION SEQUENCE

Daisuke YAGINUMA, Akinori NAKAJIMA, Shuichi FUJIKURA, Minh Hai NGUYEN

In designing the steel-concrete composite girder, first, responses due to actions such as the dead load, live load and the shrinkage of slab concrete are separately estimated based on the assumed composite girder section for resistance. Secondly the responses are superposed and checked against the design critical values. But, these actions are sequentially applied to the composite girder and the section for resistance are varied with the responses. Therefore, it is desirable that the responses are obtained without assuming the composite girder section for resistance. Here, the responses of the continuous composite girder model are obtained by RBSM analysis according to the action sequences, and compared with the ones by the ordinal method.