

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

Effect of tension stiffening in the design of the Continuous composite girders for railways

谷口 望*, 池田 学**, 依田 照彦***

Nozomu Taniguchi, Manabu Ikeda, Teruhiko Yoda

* 工博 (財) 鉄道総合技術研究所 (東日本旅客鉄道に出向中) (〒151-8512 東京都渋谷区代々木 2-2-6)

** 工修 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼・複合構造 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

*** 工博 早稲田大学 理工学部 社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

The continuous composite girders are frequently used for railway bridges. The examination of the design technique is not mainly carried out, and so this technique has not been unified. In this study, when the tension stiffening analysis is used for the design calculation of continuous composite girders, the design technique are compared with the technique which dose not use this analysis. Models of the objects for design are 2 types in which the bending moment shape differs.

Key Words: Continuous composite girder, Tension stiffening, Design calculation

キーワード: 連続合成桁, テンションスティフニング, 設計計算

1. はじめに

連続合成桁は、鋼-コンクリート複合構造の中でも比較的多く用いられている橋梁の形式である¹⁾。日本における合成桁の橋梁は、連続桁形式でない単純桁として昭和 20 年代後半より道路橋や鉄道橋として建設されており、昭和 30 年代に入って連続桁としての合成桁が現れ始めている²⁾。合成桁の設計法の規準についても、道路橋としては昭和 32 年に「鋼道路橋の合成桁設計施工指針」(日本道路協会)が発刊され、鉄道橋としては昭和 38 年に「合成桁鉄道橋設計示方書案」(日本国有鉄道)が発刊されたが、これらの基準については、単純合成桁を適用範囲としていた。以降、連続合成桁を適用範囲とした基準としては、昭和 48 年制定の「道路橋示方書Ⅱ鋼橋編」(日本道路協会)があるが、道路橋を対象としたものであった²⁾。一方、鉄道橋の合成桁に対する基準としては、現在に至るまで、昭和 48 年「合成桁鉄道橋の設計標準に関する研究」(土木学会)、昭和 58 年「建造物設計標準解説 鋼鉄道橋 合成鉄道橋」(日本国有鉄道)、平成 4 年「鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物」³⁾(運輸省)が、それぞれ発刊されたが、いずれも単純合成桁が適用範囲となっており、連続合成桁は適用範囲となっていない。しかしながら、鉄道橋においても連続合成桁は建設されており、昭和 51 年の境川橋梁(3 径間連続合成桁)、昭和 62 年の武庫川橋梁(2 径間連続合成桁)につづき、平成に入ると長野新幹線や九州新幹線において数件が建設されているが⁴⁾、各橋梁

の設計方針は、発注者の内部規定や判断によっているのが現状である。

近年、ドイツにおいて検討されてきたテンションスティフニング理論を用いたひび割れ制御設計法が、日本でも検討されるようになった^{5,6,7)}。ほぼ同時に道路橋における基準類も整備され、連続合成桁の中間支点部にテンションスティフニング理論を用いたひび割れ制御設計法を取り入れたものが出てきており、平成 13 年には日本橋梁建設協会より「PC 床版を有するプレストレスしない連続合成 2 主桁橋の設計例と解説」⁸⁾が、平成 14 年には高速道路技術センターより「PC 床版鋼連続合成 2 主桁橋の設計・施工マニュアル」⁹⁾が出版されている。しかし、鉄道橋においては、模型実験¹⁰⁾や実橋測定¹¹⁾を通してこれらの検討が行われてきたが、設計手法の検討としてはあまり行われていないのが現状であり、設計法も未だに統一されていない。そこで、本研究では、連続合成桁の中間支点部の設計手法に着目し、現鉄道橋の基準を活用して設計した場合、テンションスティフニング等がどの程度影響するかを、試設計により検討する。また、近年の道路橋において提案されている設計手法に準じた手法¹²⁾についても試設計を行い、比較検討を行った。

なお、鉄道橋の設計において道路橋の場合とは異なっている点は、荷重の設定手法の他に、①鉄道橋では、スラブの床組としての応力度と主桁作用としての応力度の重ね合わせ照査を規定していないこと、②鋼とコンクリートの温度差の設定(主桁 5℃、ズレ止め 10℃)が「道路橋示方

書」(10℃)と異なっていること、③収縮時のコンクリートのクリープを考慮した、鋼とコンクリートのヤング係数比が異なっている、などである。

2. 試設計対象構造および設計手法

対象橋梁は、3径間連続合成桁橋(複線並列2主桁、直橋)とした。列車荷重においては、新幹線(終局時:H-22, 使用・疲労時:H-17, 最高速度:260km/h)を想定し、現鉄道橋設計基準³⁾を用いて断面を設定した。また、連続合成桁の中間支点部の挙動については、スパン割によって傾向が大きく変わること想定して、

A-model: 60+60+60 (m),

B-model: 30+60+30 (m),

の2種類を対象とした。A-modelはスパンがそろった一般的な橋梁を想定しており、B-modelはスパンが極端に異なった橋梁であり、中間支点部の負曲げ区間とそれ以外の正曲げ区間のバランスがA-modelと異なるモデルとなるようにした。なお、各橋梁モデルにおいては、試設計による応力度やひび割れ幅等の傾向を容易に調べるために、各スパンは変断面構造とはせずに、各スパンの正曲げ区間・負曲げ区間に1断面ずつの設定とした。図-1、表-1にA-modelの標準的な断面・断面2次モーメントを示す。なお、制振コンクリートは、非合成部材とし、死荷重のみを考慮することとした。

設計計算手法の検討にあたっては、上記のA-model, B-modelの対象橋梁において、同一の断面を用いて数種類の設計手法で計算を行い、計算結果がどの程度変化するかを検証することとした。

表-1 断面2次モーメントの仮定(A-model, 単位:m⁴)

		仮定断面		
		端支間部	中間支点部	中間支間部
鋼桁断面 : Is		0.206	0.441	0.093
合成 断面	鋼と鉄筋 : Is'	---	0.540	---
	鋼とコンクリート : Iv	0.510	0.902	0.334

(床版鉄筋比は、1.9%とした)

計算には中間支点部の取り扱いにおいて、パターン①～⑦を設定した(表-2)。

パターン①については、テンションスティフニング理論を考慮しない方法であり、ひび割れを想定した部分については、コンクリートの剛性は考慮しないものとする(図-3(a))。ひび割れ想定区間については、各スパンの15%とした。この手法は、今までの連続合成桁の設計手法に比較的多く見られる手法である^{2),12)}。

パターン②は、ひび割れが想定される部分においても、コンクリートの全断面積の剛性を仮定剛度に考慮するものであり、安全側の観点から負曲げ部の曲げモーメントを大きくなるように計算する手法である(図-3(b))。本手法は、鉄道橋の設計において使用されたケースがある。なお、このパターンについては、不静定力と内部応力の算出方法の違いにより、パターン②とパターン②'を分けるものとし、詳細の内容は以降に述べることとする。

パターン③、④は、断面力(応力度・ひび割れ幅)計算時にのみテンションスティフニング理論を考慮するものであり、多くの文献⁹⁾等で紹介されている手法である。テンションスティフニングの効果の大きさを表す係数 β_m においては、0.4とするものと0.2とするものの2種類があ

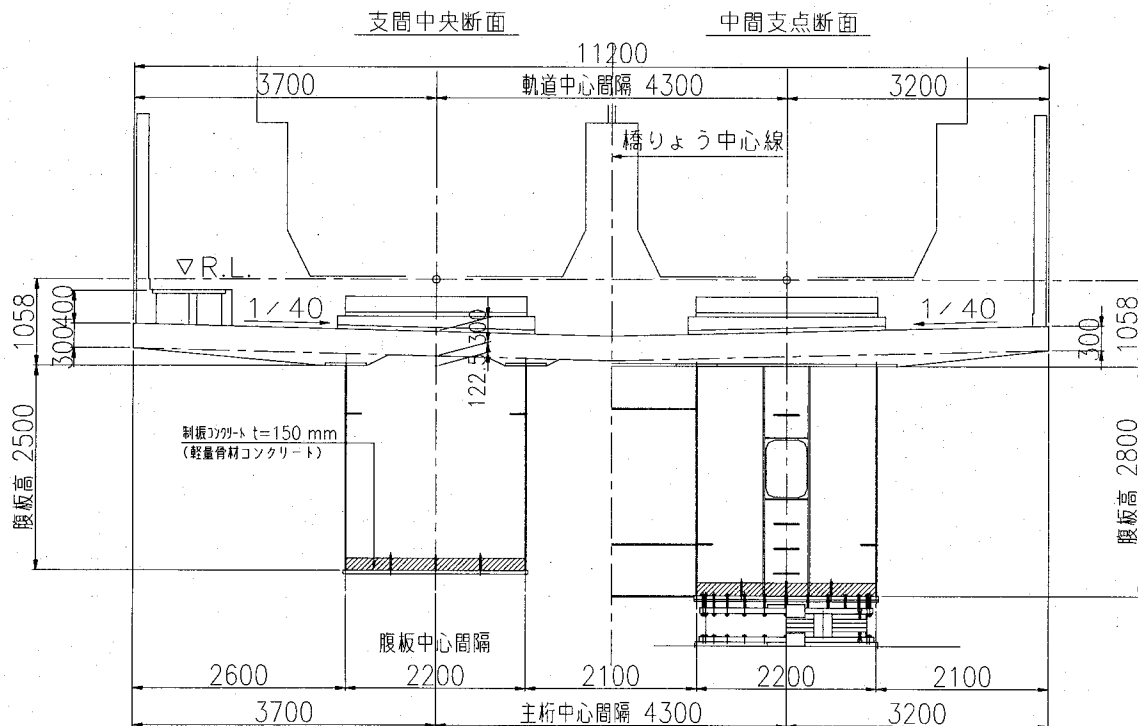


図-1 標準断面仮定図 (A-modelの場合)

表-2 計算パターン①～⑦の中間支点部の設定概要

パターン① 仮定剛度: スパンの15%の部分のコンクリートの剛性を無視する(鋼桁+鉄筋断面). 断面力: (鋼桁+鉄筋断面) とする.
パターン② 仮定剛度: ひび割れの有無にかかわらずコンクリートの剛性を考慮する(合成断面). 断面力: (鋼桁+鉄筋断面) とする.
パターン③ 仮定剛度: スパンの15%の部分のコンクリートの剛性を無視する(鋼桁+鉄筋断面). 断面力: $\beta_m=0.4$ としてテンションスティフニング理論を考慮する.
パターン④ 仮定剛度: スパンの15%の部分のコンクリートの剛性を無視する(鋼桁+鉄筋断面). 断面力: $\beta_m=0.2$ としてテンションスティフニング理論を考慮する.
パターン⑤ 仮定剛度: ひび割れの有無にかかわらずコンクリートの剛性を考慮する(合成断面). ただし、曲げモーメント算出後に10%低減する. 断面力: $\beta_m=0.2$ としてテンションスティフニング理論を考慮する.
パターン⑥ 仮定剛度: 再計算によりひび割れ区間を再設定し、ひび割れ区間のコンクリートの剛性を無視する(鋼桁+鉄筋断面). 断面力: $\beta_m=0.2$ としてテンションスティフニング理論を考慮する.
パターン⑦ 仮定剛度: Bode 式⁹⁾を用いて、テンションスティフニング理論を厳密に考慮する. 断面力: $\beta_m=0.2$ としてテンションスティフニング理論を考慮する.

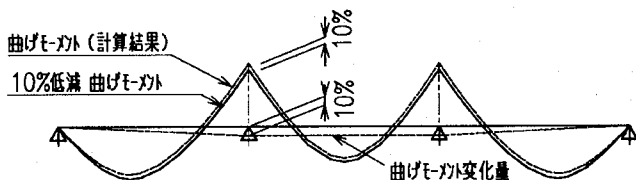
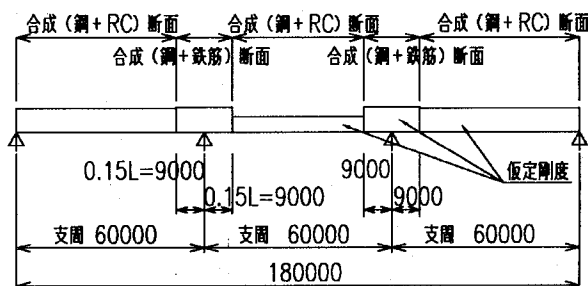


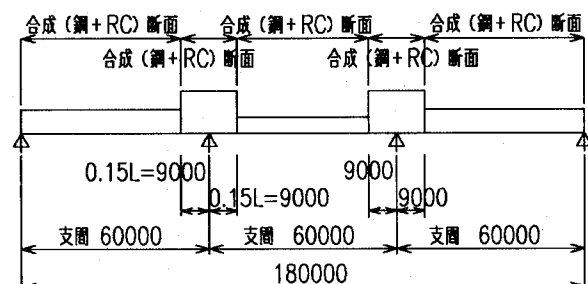
図-2 パターン⑤の曲げモーメント配分の考え方
(最大負曲げモーメントの10%を用いて
正曲げ区間も変化させる)

るため⁹⁾、それぞれパターン③、パターン④と区別するものとした。なお、この β_m の差については、0.4とするものは実験結果に基づく値であり、0.2とするのは疲労挙動によるテンションスティフニング効果の低下を考慮したものとしてされている。

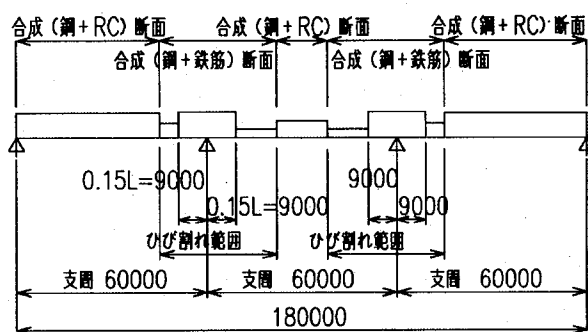
パターン⑤は、文献5)に示された手法を応用した手法であり、合成後死荷重、活荷重、および、衝撃荷重によって中間支点部に生じた最大負曲げモーメントにおいて、ひび割れを考慮して10%低減するものとし、その他の区間についてもその低減量に準じて、曲げモーメントの大きさを変



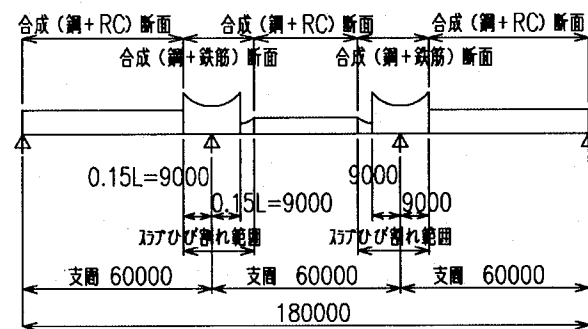
(a) パターン①・③・④



(b) パターン②・②'・⑤



(c) パターン⑥



(d) パターン⑦

図-3 各パターンの仮定剛度概要 (A-model)

表-3 クリープ係数, 収縮, 温度差の設定

クリープ係数、収縮度等	合成後死荷重	温度差時	収縮時
クリープ係数	$\phi 1=2$	考慮しない	$\Phi 2=3.0$
温度差及び収縮度		$\Delta t=5^{\circ}\text{C}$	$\varepsilon_s=20 \times 10^{-4}$

化させるものとした (図-2)。

パターン⑥においては、ひび割れ区間におけるコンクリートの剛性の取り扱いについては、パターン①と同様であるが、ひび割れ区間の想定に当たっては、スパンの15%を用いずに、パターン①の計算結果に基づいてひび割れ区間を再設定して、再度計算を行ったものである⁵⁾ (図-3(c))。

パターン⑦は、他の手法よりも厳密にテンションステイフニング理論を考慮する手法である。設計計算に当たっては文献5)に基づき、ひび割れ後のコンクリートの剛性をBodeの提案する式(1)を用いて表現した (図-3(d))。

$$A_{si} = \frac{A_s}{1 - \frac{0.5f_{td}}{\rho_s \cdot \sigma_{sm}}} \quad (1)$$

ここに、 A_{si} :テンションステイフニングを考慮した等価鉄筋断面積 (コンクリートの応力分担効果を含む)。

A_s :床版鉄筋断面積、

f_{td} :コンクリートの設計引張強度、

ρ_s :鉄筋比、

σ_{sm} :テンションステイフニングを考慮した鉄筋の平均応力。

コンクリートの設計引張強度 f_{td} は、下記式(2)を用いるものとした。

$$f_{td}=0.23 \times f_{ck}^{2/3}=2.07(\text{N/mm}^2) \quad (2)$$

表-4 不静定力算出時の弾性荷重の有無について

	ひび割れ区間			非ひび割れ区間		
	クリープ	収縮	温度差	クリープ	収縮	温度差
パターン①~⑦	載荷しない	載荷しない	載荷する	載荷する	載荷する	載荷する
パターン②'	載荷しない※	載荷する	載荷する	載荷する	載荷する	載荷する

※負曲げ区間のクリープについては、弾性荷重強度が逆符号となるため安全性の観点から考慮していない。

表-5 不静定力・内部応力の効果の考慮方法

	ひび割れ区間		非ひび割れ区間	
	不静定力	内部応力	不静定力	内部応力
パターン①~⑦	考慮する	考慮しない※1	考慮しない※2	考慮する
パターン②'	考慮する	考慮する	考慮しない※2	考慮する

※1 ひび割れ幅算出時の収縮・クリープひずみ (150 μ) を考慮¹³⁾

※2 安全性の観点から考慮しない (負曲げとなるため)

ここに、 f_{ck} :コンクリートの圧縮強度 (=27(N/mm²))。なお、このパターン⑦においては、仮定剛度と算出剛度がほぼ一致するまで、収束計算を行っており、設計計算量としては、他のどの手法よりも多くなっている。したがって、本手法の結果は、高精度となることが期待できるものの、実務設計上有効であるかどうかは、その煩雑さから考えて疑問があるとされている。

各パターンの試設計計算にあたっては、実際の連続合成桁の設計で考慮するものと同様なクリープ・温度差・収縮

表-6 各計算の曲げモーメント算出結果 (A-modelの場合・パターン①の合計を基準値1とするときの比率)

A-model	第一径間正曲げ最大位置			中間支点部負曲げ最大位置			第二径間正曲げ最大位置		
	合成前死荷重	合成後死荷重 +活荷重	合計	合成前死荷重	合成後死荷重 +活荷重	合計	合成前死荷重	合成後死荷重 +活荷重	合計
パターン①	0.42	0.58	1.00	0.45	0.55	1.00	0.21	0.79	1.00
パターン②②'	0.42	0.56	0.98	0.45	0.60	1.05	0.21	0.68	0.89
パターン③	0.42	0.58	1.00	0.45	0.55	1.00	0.21	0.79	1.00
パターン④	0.42	0.58	1.00	0.45	0.55	1.00	0.21	0.79	1.00
パターン⑤	0.42	0.59	1.01	0.45	0.54	0.99	0.21	0.89	1.10
パターン⑥	0.42	0.59	1.01	0.45	0.53	0.98	0.21	0.81	1.02
パターン⑦	0.42	0.58	0.99	0.45	0.56	1.02	0.21	0.74	0.95

※ 活荷重には、衝撃荷重を含む

表-7 各計算の曲げモーメント算出結果 (B-modelの場合・パターン①の合計を基準値1とするときの比率)

B-model	第一径間正曲げ最大位置			中間支点部負曲げ最大位置			第二径間正曲げ最大位置		
	合成前死荷重	合成後死荷重 +活荷重	合計	合成前死荷重	合成後死荷重 +活荷重	合計	合成前死荷重	合成後死荷重 +活荷重	合計
パターン①	0.23	0.77	1.00	0.44	0.56	1.00	0.40	0.60	1.00
パターン②②'	0.23	0.72	0.95	0.44	0.61	1.06	0.40	0.56	0.96
パターン③	0.23	0.77	1.00	0.44	0.56	1.00	0.40	0.60	1.00
パターン④	0.23	0.77	1.00	0.44	0.56	1.00	0.40	0.60	1.00
パターン⑤	0.23	0.80	1.03	0.44	0.54	0.98	0.40	0.62	1.02
パターン⑥	0.23	0.78	1.01	0.44	0.52	0.96	0.40	0.65	1.05
パターン⑦	0.23	0.75	0.98	0.44	0.57	1.02	0.40	0.60	1.00

※ 活荷重には、衝撃荷重を含む

の影響を考慮するものとする(表-3)。これらの影響は、連続合成桁に生じる不静定力と、断面内に生じる内部応力とがあり、不静定力については同スパンの単純桁に弾性荷重を載荷することによりその影響を計算する手法⁸⁾があり、本計算でもその手法を準用することとした。不静定力の算出では、ひび割れの生じない部分についてはクリープ・温度差・収縮の影響を考慮して弾性荷重を載荷する。一方、ひび割れが生じる部分については、クリープ・収縮の影響はなくなるものとして考慮していないが、温度差(±5℃)⁸⁾の影響は、ひび割れ区間も考慮して弾性荷重を載荷するものとした(表-4)⁸⁾。なお、不静定力により算出された曲げモーメントについては、桁全区間で負曲げモーメントとなることから、負曲げ区間にのみ考慮するものとし、正曲げ区間については安全側の観点からこのモーメントを無視することとした(表-5)。なお、この不静定力を部分的に無視する設定方法は、文献8)の不静定力すべてを考慮する手法とは異なるが、鉄道橋の設計実績により、本手法のように設定するものとした。

内部応力においても、ひび割れ区間については、クリープ・温度差・収縮の影響は考慮しないものとしたが、ひび割れ幅の算出時のみ、収縮・クリープひずみの影響(150 μ)¹³⁾を考慮した。また、ひび割れの生じない区間においては、内部応力を考慮するものとした(表-5)。

仮定剛度においてひび割れ区間を設定しないパターン②・⑤は、不静定力の算出時のみ、パターン①と同様にスパンの15%の部分をひび割れ区間と想定して算出を行った。

また、②は断面力の算出において、ひび割れ区間でも鋼とコンクリートの合成を考慮していることから、この区間にも収縮による弾性荷重を載荷し、内部応力の影響を考慮したケースをパターン②'として示すこととした(表-4、表-5)。このパターン②'の設計としては、負曲げ区間の床版の設計において安全側になるように配慮したものと見え、鉄道橋での使用事例もある。

3. 試設計結果

3.1 曲げモーメント算出結果

表-6、表-7は、A-model、B-modelの計算結果のうち曲げモーメントについて示したものであり、曲げモーメントは合成前死荷重(鋼桁断面使用)のものと、合成後死荷重+活荷重のものに分けて表示し、各値はパターン①の合計値に対する比率で示した。合成前死荷重の各パターンの計算結果については、負曲げ部のコンクリートの考慮方法にかかわらず同じ値となっている。

表-6(A-model)における、第一径間正曲げ最大の位置の計算結果では、各パターンともに1~2%程度の差となっており、ほぼ同値といえる。しかし、中間支点部(負曲げ最大位置)では、パターン②の合成後死荷重+活荷重の

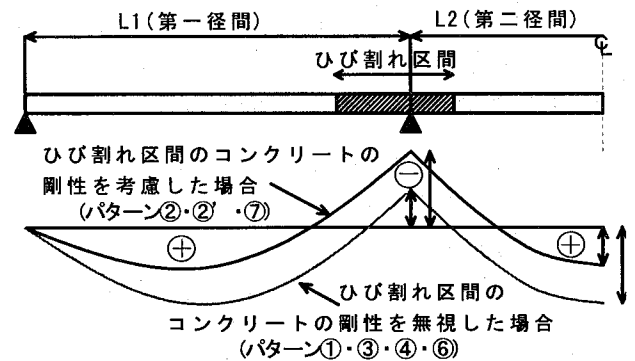


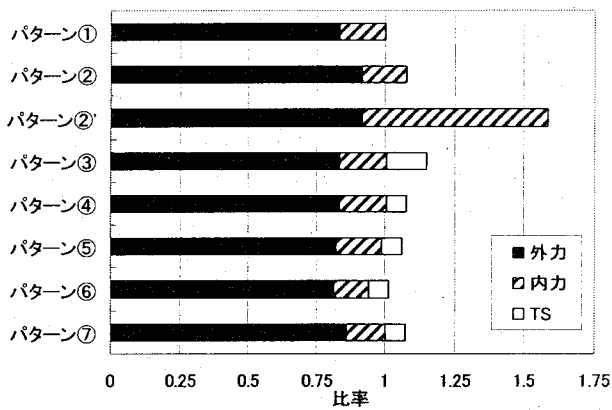
図-4 中間支点部のコンクリート剛性の考慮方法と曲げモーメント算出結果の概要(イメージ図)

曲げモーメントが、10%程度大きな値となっており、これは、中間支点部のコンクリート剛性の考慮の有無によって生じている。しかし、合成前死荷重との合計値ではこの影響が小さくなり、5%程度の差となった。中間支点部合計値におけるそのほかの計算パターンでは、ほぼパターン①と同様になっているが、パターン⑥はパターン①に対してやや小さめに、パターン⑦は大きになっている。これは、パターン⑥では、ひび割れ想定区間がパターン①よりも長くなっている影響(表-10、以降説明)と考えられ、パターン⑦では、ひび割れ想定区間のひび割れ後のコンクリートの剛性を考慮した影響と考えられる。第二径間正曲げ最大の位置の比較では、中間支点部と逆の傾向となっている。したがって、パターン①に対してパターン②・⑦は小さく、パターン⑥は大きになっている。これも、図-4に示すような、ひび割れ想定区間のコンクリートの剛性の考慮方法の差と考えられる。また、パターン⑤については、第一径間・中間支点部においてはパターン①と差は生じなかったが、この第二径間においては、10%程度大きくなる結果となった。

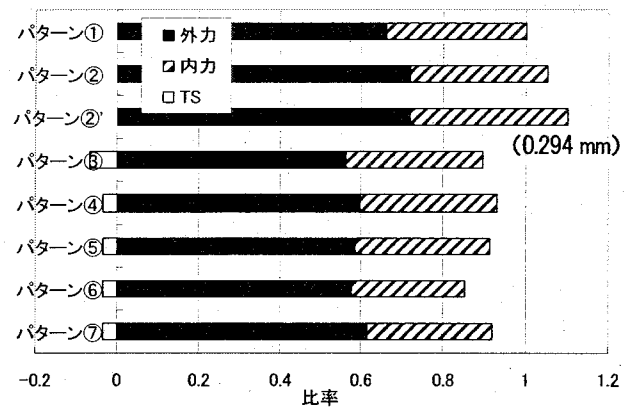
表-7(B-model)においても、表-6とほぼ同様な傾向となっているものの、パターン①との比の大きさについては、多少の変化がある。つまり、中間支点部ではA-modelとB-modelでほぼ同値となっているが、第一径間正曲げ最大の位置では、A-modelよりもB-modelのほうが各パターンの差が大きく、逆に第二径間正曲げ最大の位置では、A-modelよりもB-modelのほうが各パターンの差が小さくなる傾向となっている。これは、表-6、表-7によると、合成前死荷重と合成後死荷重+活荷重の比率の変化が大きいといえる。

3.2 応力度・ひび割れ幅算出結果

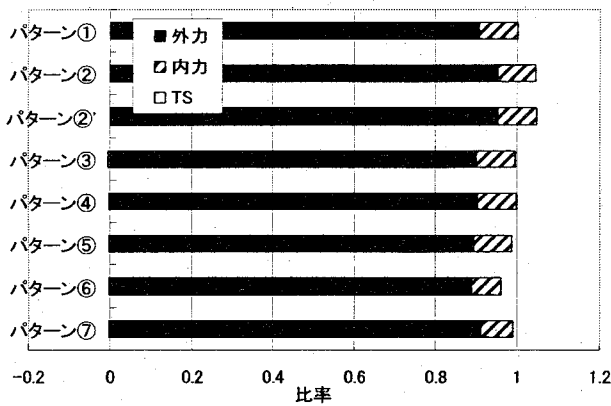
図-5、表-8は、A-modelにおける各計算パターンの応力度・ひび割れ幅の算出結果である。表-8にはパターン①を基準とした各値の比較、図-5はパターン①の合計値を基準とした外力・内力・テンションスティフニングの影響の割合を示している。



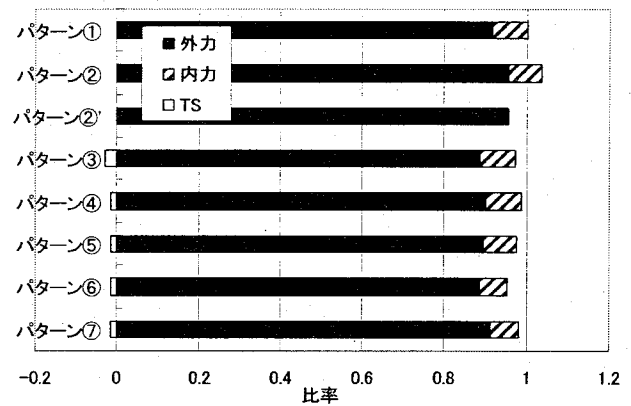
(a) 中間支点部の床版鉄筋の応力度 (最大応力度)



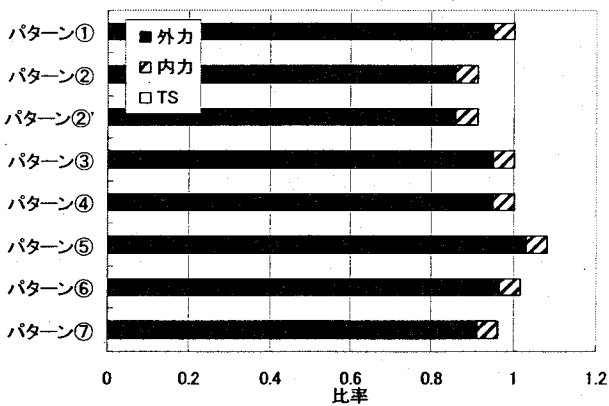
(b) 中間支点部のひび割れ幅



(c) 中間支点部の下フランジの応力度



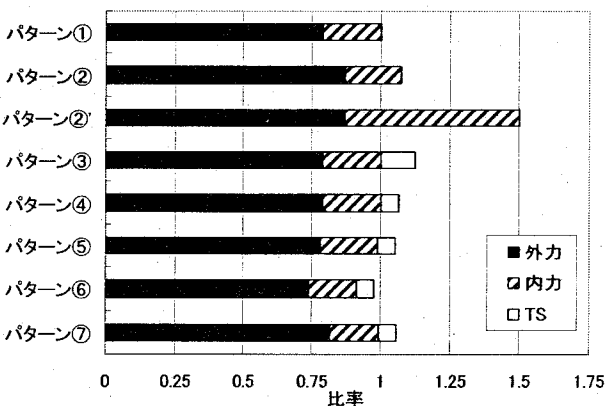
(d) 中間支点部の上フランジの応力度



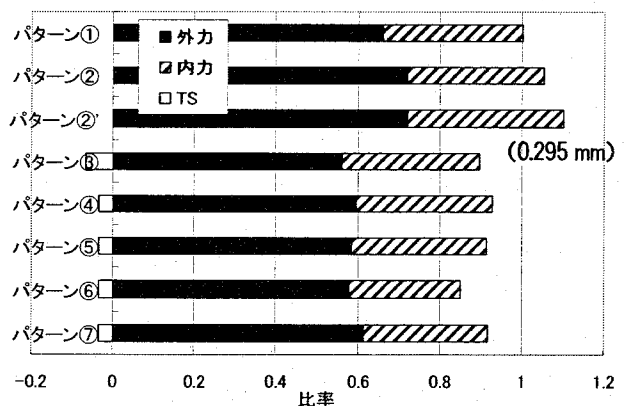
(e) 第二径間正曲げ最大位置における下フランジの応力度

※図-5, 図-6においては,
 外力: 合成前死荷重, 合成後死荷重, 活荷重, 衝撃荷重
 内力: 不静定力, 内部応力
 TS: テンションスティフニングの影響
 を示すものとした。

図-5 各計算の応力度・ひび割れ幅算出結果の比較 (A-model)



(a) 中間支点部の床版鉄筋の応力度 (最大応力度)



(b) 中間支点部のひび割れ幅

図-6 各計算の応力度・ひび割れ幅算出結果の比較 (B-model)

表-8 応力度・ひび割れ幅算出結果の比較 (A-model)

A-model	中間支点部				径間中央
	鉄筋	ひび割れ幅	下フランジ	上フランジ	下フランジ
パターン①	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
パターン②	1.08	1.05	1.04	1.04	0.91
パターン②'	1.59	1.10	1.05	0.95	0.91
パターン③	1.15	0.90	1.00	0.97	1.00
パターン④	1.07	0.93	1.00	0.99	1.00
パターン⑤	1.06	0.91	0.99	0.98	1.08
パターン⑥	1.01	0.85	0.96	0.95	1.02
パターン⑦	1.07	0.92	0.99	0.98	0.96

表-9 応力度・ひび割れ幅算出結果の比較 (B-model)

B-model	中間支点部				径間中央
	鉄筋	ひび割れ幅	下フランジ	上フランジ	下フランジ
パターン①	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
パターン②	1.07	1.05	1.04	1.04	0.96
パターン②'	1.50	1.11	1.06	0.95	0.96
パターン③	1.12	0.87	1.00	0.96	1.00
パターン④	1.06	0.91	1.00	0.98	1.00
パターン⑤	1.05	0.84	0.99	0.98	1.02
パターン⑥	0.97	0.83	0.95	0.94	1.05
パターン⑦	1.06	0.90	0.99	0.98	1.00

図-5 (a) (中間支点部の鉄筋の応力度) によると、パターン②はひび割れ想定区間のコンクリートの剛性を考慮した影響で、パターン①より8%大きな応力度となっている。また、ひび割れ想定区間の不静定力・内部応力を考慮したパターン②'は、パターン②よりも59%も大きな応力度となっており、この影響は内力(不静定力・内部応力)の増加の影響である。パターン③においては、外力・内力はパターン①とほぼ同等であるが、テンションスティフニングの影響によってパターン①よりも15%大きな値となった。なお、ここで示した鉄筋の応力度は、ひび割れ算出に用いる平均応力度ではなく、ひび割れ部に生じる最大応力度を用いたため、テンションスティフニングの影響は、鉄筋の応力度を大きくする方向に作用している。パターン④~⑦においては、テンションスティフニングの影響をパターン③の半分($\beta_m=0.4$ から $\beta_m=0.2$ に変更)としたため、図中の「TS」の量が半分となっている。結果として、パターン④・⑤・⑦は、パターン①よりも6~7%程度大きくなっており、パターン②と同程度の結果となった。パターン⑥においては、テンションスティフニング理論を考慮した他の計算パターンよりも小さな結果となったが、これは、外力・内力とも小さく計算されているため、結果としては①と同程度となっている。

図-5 (b)は中間支点部に生じる床版コンクリートのひび割れ幅の計算結果を比較したものである。パターン②は、パターン①に比べて5%程度大きくなっているが、パターン①・②において内力(不静定力と内部応力)がほぼ等しいことから、外力の差がそのまま現れている状態である。この外力の差は、図-4に示すような、ひび割れ想定区間のコンクリートの剛性の考慮方法の差である。一方、パターン②'においては、パターン②よりもさらに大きくなっているが、図-5 (a)の増加量ほどではない。これは、ひび割れ幅の内部応力分の算出方法が、鉄筋の応力度の算出

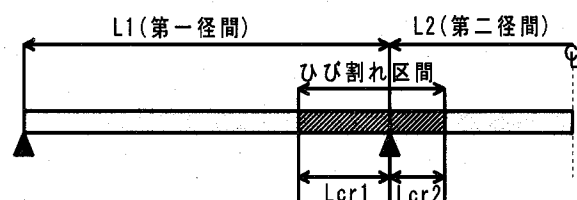


図-7 ひび割れ区間の長さ定義 (表-10に使用)

表-10 各計算のひび割れ区間の比較

		パターン①④⑤		パターン⑥		パターン⑦	
		長さ(m)	Lcr1/Li	長さ(m)	Lcr1/Li	長さ(m)	Lcr1/Li
A-model L1=60m L2=60m	Lcr1	9.0	0.15	11.7	0.20	16.5	0.28
	Lcr2	9.0	0.15	15.5	0.26	28.8	0.48
B-model L1=30m L2=60m	Lcr1	4.5	0.15	12.5	0.42	18.0	0.60
	Lcr2	9.0	0.15	5.2	0.09	9.3	0.16

※Lcr1, Lcr2は図-7の定義による

方法と異なっているためであり、つまり、ひび割れ算出時においては、収縮・クリープひずみ(150 μ)を考慮したためである。パターン③~⑦は、テンションスティフニングの影響を考慮したものであるが、この効果は負の値であり、ひび割れ幅を小さくする方向に作用している。これは、ひび割れ算出時においては、鉄筋の平均ひずみを用いているためであり、結果として各パターンの計算結果はパターン①よりも7~15%小さくなっている。特に、パターン⑥については、図-5 (a)と同様に、最も小さく計算されている。なお、ひび割れ幅が最も大きく算出されたパターン②'では、ひび割れ幅は0.294(mm)であった(図-5 (b))。

図-5 (c), (d)は、中間支点部鋼桁(主桁)の下フランジと上フランジの計算結果比較である。各計算結果ともに、図-5 (a), (b)に比べて大きな差は生じていない。しかし、全体的に、パターン①に比べてパターン②が大きくなり、パターン⑥が小さくなる傾向は同じである。ただし、図-5 (d)のパターン②'においては内部応力を考慮したこと、不静定力により生じる応力度を打ち消す方向に作用したため、パターン①よりも小さくなっている。また、鋼桁におけるテンションスティフニングの影響は、上フランジ(図-5 (d))では、鉄筋よりも小さくなっており、下フランジ(図-5 (c))では微小となっている。

図-5 (e)は、第二径間正曲げ最大位置における下フランジの応力度を示している。正曲げ区間においては、各パターンの断面力は同等であることから、下フランジの応力度のみ表示することとした。図-5 (e)では、パターン②・②'はパターン①よりも9%程度小さくなっており、図-4に示すような傾向と一致している。コンクリートのひび割れが生じない正曲げ区間においては、テンションスティフニングの影響はないため、パターン③・④はパターン①と同じ結果となっている。パターン⑤においては、パターン①よりも8%程度大きくなっている。

表-11 各計算の中間支点部の曲げモーメント最大値（外力）算出結果の収束の状況（比以外の単位：kN・m）

		1回目算出結果		2回目算出結果			3回目算出結果			4回目算出結果	
				2回目値	1回目/2回目		3回目値	2回目/3回目		4回目値	3回目/4回目
A-model	パターン⑥	-42900	→	-38700	1.11	→	-38100	1.02	→	-38100	1.00
	パターン⑦	-38700	→	-39700	0.97	→	-40400	0.98	→	-40600	1.00
B-model	パターン⑥	-26300	→	-22300	1.18	→	-22200	1.00	→	-22200	1.00
	パターン⑦	-22600	→	-23700	0.95	→	-24200	0.98	→	-24400	0.99

図-6、表-9は、B-modelにおける各計算パターンの応力度・ひび割れ幅の算出結果である。図-6、表-9によると基本的な傾向はA-modelと同様であるといえる。したがって、A-modelとB-modelのスパン割りの差程度であれば、各パターンの計算結果はさほど影響されないという結果である。

3.3 各計算のひび割れ区間の比較

表-10は、中間支点部のひび割れ区間を想定した計算パターンのうち、その長さを比較したものである。表中のLcr1, Lcr2は、図-7に示したひび割れ区間を示している。パターン①・④・⑤は、スパンの15%を仮定したため同じ値であるが、A-modelでは、収束計算によりひび割れ区間を設定したパターン⑥・⑦は、スパンの15%よりも長めに計算されていることが分かる。これは、今回のコンクリートの設計引張強度（2.07(N/mm²））の設定にも影響されていると考えられるが、ひび割れ区間としてのスパンの15%の設定はやや短く考えられる。したがって、ひび割れ区間のコンクリートの剛性を無視したパターン⑥は、中間支点部の曲げモーメントが小さめに計算され、中間支点部の応力度・ひび割れ幅が小さく計算される（表-8）。また、パターン⑦は、ひび割れ区間はさらに長くなるものの、その区間のひび割れ後コンクリートの剛性を考慮しているため、中間支点部では、応力度・ひび割れ幅はパターン⑥よりも大きく計算されている。よって、パターン⑦においては、ひび割れ区間はパターン①よりも長くなり、負曲げモーメントは小さくなる方向となるものの、ひび割れ後のコンクリートの剛性を考慮することが負曲げモーメントを大きくする方向となり、結果として両者の傾向が相殺されて、結果としてパターン①とパターン②の中間的な挙動になったといえる（表-6）。

B-modelでは、パターン⑥、⑦は第一径間（L1）のひび割れ区間の割合が15%よりも大きく、第二径間（L2）のひび割れ区間の割合が短めになることが分かる。しかし、ひび割れ区間が大きく変化したとしても、A-modelと比較して、曲げモーメントの最大値の各パターンの傾向には大きな変化はない結果となった（表-6、表-7）。

3.4 収束計算における収束状況

表-11は、収束計算を行ったパターン⑥・⑦の収束状況を示している。この収束計算の1回目の計算における仮

定剛度は、パターン⑥のひび割れ区間にはパターン①と同等に設定したが、パターン⑦のひび割れ区間には、計算の繰り返しが多くなるケースを選んで、パターン⑥の設計結果と同等に設定した。収束状況によると、仮に算出前（仮定剛度設定前）の曲げモーメントと算出後（仮定剛度設定後）の曲げモーメントの差を厳密に小さくすることを考えると、両ケースの場合、3～4回の繰り返し計算が必要であることがわかる。今回は、初期設定断面を変化させていないため、ここで設計計算終了となるが、断面を再設定した場合は、この収束計算を再度行うこととなり、この収束計算が設計計算量を大きく増加させ、設計作業を煩雑なものにするといえる。

4. まとめ

本論文では、近年検討されている連続合成桁の設計手法について、2種類の橋梁のケースを対象に試設計計算を行い、各設計法の傾向を調査・検討した。検討結果を以下に示す。

- (1)テンションスティフニング効果の影響は、鉄筋の応力度やひび割れ幅算出時には5～15%程度の影響があり、鉄筋の応力度に対しては大きくなる方向に、ひび割れ幅に対しては小さくなる方向に作用する。ただし、鋼桁（主桁）の応力度については、ほとんど影響しない。
- (2)ひび割れ区間の設計に、コンクリートの剛性をすべて考慮する（合成断面を用いる）手法では、中間支点部では応力度・ひび割れ幅を4～8%程度大きめに算出した。一方で、正曲げ最大部の応力度は4～9%程度小さめに算出した。しかし、上記の合成断面を用いる手法においても、内部応力・不静定力を考慮するかどうかによって、結果は変化する。特に、鉄筋の応力度は、これらを考慮しないものに対して50%程度大きく算出される。
- (3)中間支点部のひび割れ発生を想定して、曲げモーメントを10%低減する手法は、負曲げ区間においては、ひび割れ幅区間の設定および、ひび割れ後のコンクリートの剛性を収束計算を用いて厳密に考慮する手法とほぼ同じ計算結果となった。しかし、正曲げ部においては、設定方法に検討を要する。
- (4)収束計算を用いて厳密にひび割れ区間を設定する手法は、ひび割れ区間の設定の精度が上がる反面、その区間のひび割れ後のコンクリートの剛性を考慮しないと、負曲げ部の応力度・ひび割れ幅を3～9%程度小さく評価する。

- (5) ひび割れ幅区間の設定および、ひび割れ後のコンクリートの剛性を収束計算を用いて厳密に考慮する手法は、ひび割れ区間をスパンの15%と仮定し、ひび割れ部のコンクリートの剛性を無視する手法に対して、最大10%程度の差を生じる。しかし、計算の煩雑さから考えて、本手法が有効かどうかは検討が必要である。
- (6) 本結果からすると、テンションスティフニング効果を設計に取り入れた場合、ひび割れ幅により設計が決定されるケースでは、ひび割れ幅が小さめに計算され、設計結果の合理化を図ることができる可能性がある。しかし、主桁（鋼桁）に対する設計ではあまり影響を及ぼさず、床版鉄筋においては応力度が大きくなり、設計が厳しくなる方向に影響することが分かった。

現在、テンションスティフニング効果について多く検討が行われているが、本検討では既存の検討結果^{9),14)}に示されたほどの影響が見られていない結果となった。これは、本検討断面が、ドイツ等の事例に比べて床版厚が薄く、収縮・クリープの設定方法もヨーロッパの規準とは異なっているなど、現状の鉄道橋における標準断面・設計条件を用いたことが理由のひとつであると考えられる。したがって、今後、道路橋に対する検討に加え、テンションスティフニング効果が取り入れられている海外での設計事例の調査・検討も期待される。

なお、本モデルで仮定した以外の特種なスパン割のモデルの場合や、本モデルよりも長スパンの場合は、死荷重と活荷重の比率が変化することも考えられるため、本計算結果と異なる結果となる可能性があり、その場合は検討を要する。

謝辞

本試設計にあたっては、(独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構鉄道建設本部設計技術室 鈴木喜弥氏および藤原良憲氏に、鉄道用連続合成桁設計法の現状について、有益な助言をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (社) 日本鋼構造協会：ハイブリッド構造における接合部の技術開発に関する調査研究報告書（土木編），JSSCテクニカルレポート No.63，2004.
- 2) 川田忠樹（監修），野村勝國，梶川靖治（編著）：複合構造橋梁，技報堂出版，1994.
- 3) 運輸省（監修），(財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼合成構造物，丸善，2000.
- 4) 鋼・コンクリート複合橋梁の最近の進歩，土木学会，鋼構造委員会，p.151，2001.
- 5) 栗田章光，大山理，マーカス ルートナー：二重合成連続桁橋の現状と課題，第4回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，土木学会，pp.45-58，2001.
- 6) 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，鉄筋応力度算定法の一提案，土木学会論文集 No.759/ I -67，pp.283-292，2004.
- 7) 谷口望，依田照彦：負曲げを受ける合成桁のひび割れ挙動に関する研究，土木学会論文集 No.668/ I -54，pp.243-257，2001.
- 8) (社) 日本橋梁建設協会：PC床版を有するプレストレスしない連続合成2主桁橋の設計例と解説，2001.
- 9) (財) 高速道路技術センター：PC床版鋼連続合成2主桁橋の設計・施工マニュアル，2002.
- 10) 谷口望，池田学，碓山晴久，入部孝夫，小野沢直，依田照彦：負曲げを受ける鉄道用合成桁のひび割れに関する実験的研究，構造工学論文集 Vol.51A，土木学会，pp.1459-1469，2005.
- 11) 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.
- 12) 伊藤鉦一，平城弘一：合成桁におけるひび割れ幅の制限，橋梁と基礎 93-2，pp.33-40，1993.
- 13) 運輸省（監修），(財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの複合構造物，丸善，p.147，2002.
- 14) 岡篤司，大山理，Marcus Rutner，栗田章光：二重合成連続桁におけるコンクリートのテンションスティフニングの影響，第57回年次学術講演会 I -345，土木学会，pp.689-690，2002.

(2005年9月10日受付)