

(1) 限界状態設計法に基づく鋼・コンクリート合成桁
の設計指針（草案）について

DRAFT CODE FOR DESIGN OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE GIRDER BRIDGES
BASED ON THE LIMIT STATE DESIGN METHOD

亀井正博*

祝 賢治**

平城弘一***

上田多門****

By Masahiro KAMEI, Yoshiharu IWAI, Hirokazu HIRAGI and Tamon UEDA

In many countries, the design method for various kinds of structures has already been totally revised in the form of the Limit State Design ("LSD") method. In Japan, the concrete standard specification of JSCE has adopted it in early times, and the design code of steel structures has prepared for changing for it. Although, with regard to composite structures, it grows the recognition that they are the third structural system, the investigation to change for it seems to be delayed. In this study, we propose the draft code for the design of steel-concrete composite girder bridges based on the "LSD" method referring latest study results. It is applied to simple composite girders, prestressed or non-prestressed continuous composite girders and composite girders with precasting or composite slabs. One of the features of it is that the resistance factor to check the safety of bridges is made clear with regard to limit states of ultimate, serviceability and fatigue for steel girders, composite girders, concrete slabs and shear connectors, respectively.

1. まえがき

鋼・コンクリート合成桁は、構成材料として鋼およびコンクリート（鉄筋を含む）を、また構造部材として床版と桁とを組み合わせたものであり、構造物の軽量化が図れるなど、橋梁を代表する構造形式である。ところが、わが国においては1970年ごろから、合成桁橋における鉄筋コンクリート床版のひびわれ損傷が全国的に目立ち始めたことから、合成桁橋の適用が地域性を残しつつも回避されているようである¹⁾。RC床版のひびわれ損傷は、従来の床版設計法に問題があったとの指摘もあるが、何よりも予想以上の通過交通量と大型トラックの過積載による輪荷重の増加に大きく起因している。この種の床版問題は、各方面での調査および研究成果に基づいて、配力鉄筋の増強、樹脂注入・鋼板接着・増桁・増厚などの補修・補強工法に関する設計施工の規準類が整備され、ほぼ解決のめどが立ったようである²⁾。今後とも、このような床版問題に関する知見の蓄積は、合成桁の復権に不可欠と言えよう。

近年、ヨーロッパでは、EC共同市場を意識して、PC橋梁との激しい競争のもとで、鋼とコンクリートを組み合わせることにより軽量化、施工性の向上を計り、より経済性に優れた橋梁を生み出して行こうと、

* 工修 大阪長堀開発㈱ 工務部工務課 ** 三井造船㈱ 鉄構建設事業部

*** 工博 摂南大学助教授 工学部土木工学科 **** 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科

種々の新形式の鋼合成橋梁が模索されている。現在、日本においても第2名神および第2東名の建設を契機に、工期短縮や、工費節減を図るため、橋梁の連続化と主桁小本数化およびプレキャスト床版の使用、ならびに外ケーブル工法の適用などに向けての合成桁橋梁の対応が検討されている。このような国の内外の状況を考慮して、土木学会・鋼構造委員会・鋼構造終局強度研究小委員会では、合成構造物の終局強度分科会を組織して、限界状態設計法のフォーマットに従った合成構造物の設計指針を提案すべく検討を重ね、それらの作業の一環として、合成桁に関する設計指針(草案)を作成するに至った。

本文は、まず日本の合成桁橋梁技術の発展を振り返り、次いでこの設計指針(草案)の概要を述べ、最後に抵抗係数について検討した結果を述べるものである。本指針案の適用範囲は、単純合成桁、プレストレスを導入する連続合成桁、プレストレスしない連続合成桁およびプレキャスト床版を含む合成床版を有する合成桁である。

2. わが国における合成橋梁技術の発展

まず、国の内外の研究成果を参考にし、本格的な単純合成桁橋として最初に大阪市の神崎橋(1952年)が建設された。その後、1957年に「鋼道路橋の合成桁設計施工指針」が制定された。また、ずれ止めにはブロックと輪形筋を併用したジベルに代わってスタッド(1961年)が主流となり、架設工法も鋼重軽減よりも施工性が重視され、死活荷重合成から活荷重合成へと移行した。1972年に建設省土木研究所が「活荷重合成プレートガーダー橋の標準設計」(4050種類)を作成し、コンピュータによる設計計算および自動製図が導入され、ごく小スパンのものを除いて、プレートガーダーのすべてが合成桁であると言ってよいほど使用実績を伸ばしていった。

次いで、1959年の「鋼道路橋の合成桁設計施工指針」の改訂に伴い、図-1に示すように、プレストレスを導入する連続合成桁(印：黒塗り)が全国で本格的に建設されるようになった。しかしながら、鋼重節減に比して、施工が面倒で維持修繕も困難であるとの理由で、1970年の大阪市のモス倫(モリソ)大橋(最大スパン：76.5m)を最後に、建設されていない。その後、1973年に改訂された「鋼道路橋設計示方書」にプレストレスしない連続合成桁が認められ、それを機に、図-1に示すように、プレストレスしない連続合成桁(印：白抜き)が全国的に数多く架設されていった。プレストレスしない連続合成桁の最大スパンは、神崎橋(1975年)の88mである。プレストレスしない連続合成桁も、RC床版のひび割れ問題が懸念され、1980年以降、その使用は著しく少なくなったようである。なお、図-1は橋・前田両教授が公表されたものを、年代別に最大スパンの変化を調べるために整理したものである^{3)・4)}。

3. 本指針(草案)の概要

本指針(草案)は9章より構成されており、目次を示すと、表-1のようになる。本指針(草案)における材料や荷重などについては、道路橋示方書⁵⁾や鋼構造設計指針⁶⁾などに準拠している。以下では、特徴のあるものについてのみ解説を加えることにする。

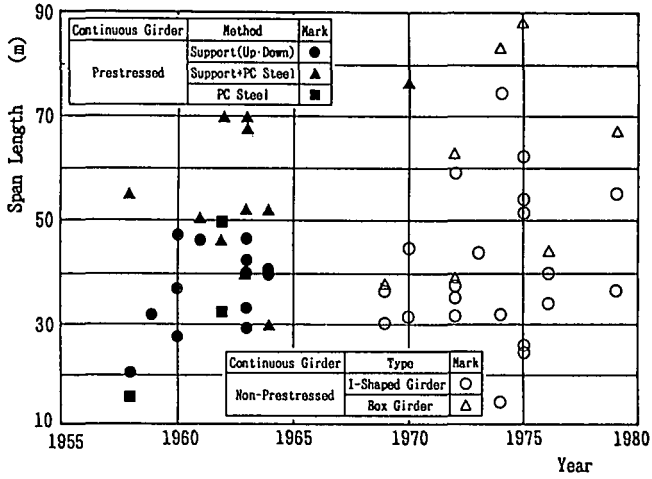


図-1 連続合成桁の支間の変遷

表-1 本指針の構成

1. 総則
2. 材料
3. 荷重
4. 構造解析
5. 材料および部材の強度
6. 限界状態の照査
7. 部材に関する一般事項
8. ずれ止め
9. 施工

3.1 総則

本章は、指針（草案）の適用範囲や用語の定義、ならびに記号などから構成されている。

本指針（草案）の適用の対象とする合成桁の形式としては、鋼とコンクリートとで構成される合成床板やプレキャストコンクリート板、ならびに現場打ちのコンクリート床版などと、縦方向のプレストレスの導入方法との組み合わせによって、

表-2に示すような各種の構造が考えられる。表中の○印は実績があるか、もしくは組み合わせが可能と思われるもの。△印は 利用するにあたって十分な検討が必要なもの。×印は利用が困難なものをそれぞれ示している。原則的には、○印を記した構造を採用すべきであろう。

3.2 材料

鋼材料については、鋼構造設計指針に準拠している。また、コンクリートや緊張材については、コンクリート標準示方書⁷⁾の規定に基づくものとした。なお、ずれ止めについてはスタッドの使用を原則とし、その他の形式については実績や実験の結果などを参考に、適宜技術者が判断して採用することにした。

3.3 荷重

荷重については、道路橋示方書を参考にして定めた。このうち、使用限界状態では、橋側歩道など、橋長に比して幅員が狭い構造に対して、風荷重による水平方向のたわみの検討を加えている。また、疲労限界状態についての照査を義務づけている。

3.4 構造解析

版の合成作用の取扱い、は、道路橋示方書に基づいた。

合成桁の断面をコンパクトとスレンダーの2つに分類している。ここで、コンパクトな断面とは、鋼桁のウェブおよび圧縮フランジが局部座屈による強度低下をきたさずに全塑性状態となり、かつ適当な回転能を発揮できるだけの十分な剛性を有している時を言う。具体的には、圧縮フランジの突出長ならびにウェブの圧縮域と板厚との比が次式を満足していることが条件となる。

$$b/t \leq 9 \varepsilon \quad (1)$$

$$d/w \leq 33 \varepsilon / \alpha \quad (2)$$

ここに、 b ；鋼桁フランジの突出幅、 t ；鋼桁フランジの有効厚、 d ；ウェブの純高さ、 w ；ウェブ厚、 α ；ウェブの圧縮域のウェブ高に対する比率、 $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ 、 f_y ；設計基準強度

この規定は、Eurocode 4⁸⁾のクラス2、ならびにBS5400⁹⁾の基準を参考に定めており、圧縮フランジの横ねじり座屈が適当な方法により防止されていることが前提となる。Eurocode 4によると、図-2に示す曲げモーメント M と曲率 ϕ との関係から、4つの断面に分類・整理し、図中のクラス1および2をコンパクト断面としている。

3.5 材料および部材の強度

本章の鋼材に関する規定は鋼構造設計指針に基づいて定めた。床版コンクリートは、合成桁の圧縮フラ

表-2 合成桁の鋼桁と床版との組み合わせ表

形式	横軸方向のプリストレス導入		コンクリート床版		
	なし	現場打ち	プレキャスト板(部分的な現場施工を含む)		
単純桁			PC	RC	合成(S+C)
		○	○	○	○
連続桁	有	PC鋼材	△ ¹⁾	○	× ²⁾
		外ケーブル	○	○	× ³⁾
		支点上昇降下	○	○	
	無	—	○ ⁴⁾	△ ⁵⁾	○

1) スライスと鉄筋が幅狭する。2) 橋軸直角方向に引張応力が生じる。
3) 溶接などで桁と接合されていることが多いので、プリストレスが導入できないことがある。
4) いわゆるプリストレスしない連続合成桁のことである。5) 床版間の継ぎ目に工夫がある。

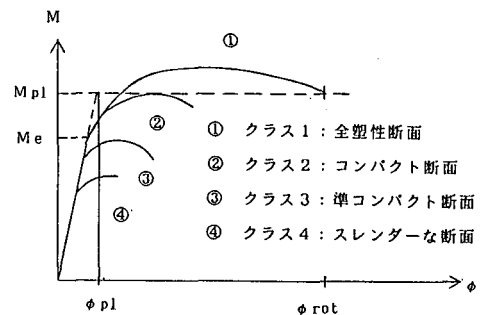


図-2 曲げモーメントと曲率の関係

ンジと床組作用としての床版の2つのケースに対して照査しなければならない。このうち、合成桁の圧縮フランジとして考えた場合、軸方向圧縮力の他に曲げモーメントが作用し、さらに橋軸直角方向には引張応力が生じる。このように複雑な応力状態になるため、圧縮強度の特性値を $f_{c,k}$ として、合成桁の圧縮フランジとしての照査の時には0.85を乗じることとした。なお、床版として照査する時には1.0を乗じることとした。

ずれ止めの静的強度や疲労強度については、現在までの研究成果¹⁰⁾をもとに定めたものである。

3.6 限界状態の照査

限界状態の照査は、文献¹¹⁾を参考にして、基本的に次式に基づいて行うものとした。

$$R_d / S_d \leq 1.0 \quad (3)$$

$$R_d = \phi R (f_d) \quad (4)$$

$$S_d = S (\gamma F_d) \quad (5)$$

ここで、 S_d :荷重効果の設計値、 R_d :抵抗値の設計値、 ϕ :抵抗係数で、1.0より小さい値、 R :抵抗値(平均曲線を用いてもよい)、 f_d :設計材料強度、 γ :安全率、 S :荷重効果(断面力)、 F_d :設計荷重(荷重係数は用いない)

各抵抗強度と限界状態に対して定められた ϕ の値を、表-3に示しておいた。

表-3 抵抗係数(ϕ)の値

対象		限界状態		
		終局	使用	疲労
鋼桁	曲げ	1.0	1.0	1.0
合成桁	曲げ	0.9	1.0	1.0
RC床版	押抜きせん断	0.85	1.0	1.0
ずれ止め	水平せん断	0.5	0.5	1.0

コンパクトな断面の終局抵抗モーメントは、定められた条件を満足する場合には、単純塑性理論によって求めることができる。また、スレンダーな断面においても、正の曲げモーメント域もしくは単純桁の場合には、コンクリート床版が完全塑性応力分布状態であるものとして求めてもよい。その場合、中立軸はコンクリート床版内もしくは鋼桁上フランジ内にあるものとする。終局限界状態における断面力については、基本的に弾性解析で求めるが、連続桁における中間支点部曲げモーメントは、中間支点から支間に向かって再配分してもよいことにした。これは、中間支点部に塑性ヒンジを想定して解析する、いわゆるオートストレス法に基づいており、Euro-code、AASHTO¹²⁾ならびにBS5400などの基準で採用されている方法である。

道路橋示方書では、鉄筋コンクリート床版を曲げ部材とみなして強度の照査をしているが、その後の研究から、押抜きせん断破壊の方が実態をよく表していることが判明してきた。そこで、鉄筋コンクリート床版の終局限界状態としては、押抜きせん断破壊を対象とすることにした。

本章では、終局や、使用以外に第3の限界状態として、疲労限界状態を導入した。基本的には、マイナーの疲労被害則に基づき、不規則な変動荷重の場合には等価応力範囲を用いる。なお、各部材やディテールの疲労強度については、文献¹³⁾に規定されている応力範囲を用いるものとする。

3.7 部材に関する一般事項

現場打ちコンクリートの床版では、一般に、ハンチを付けている。ところが、プレキャスト床版などでは、ハンチの無いことが多い。そのような場合には、浮き上がり防止のためにスラブ止めなどを用いて鋼桁と十分に結合されるような処置を施すものとした。また、有効幅入としては、安全側を考慮腹板中心から取るものとした。

3.8 ずれ止め

ずれ止めは、スタッドの使用を原則とした。現場打ちコンクリート床版の場合のせん断力の分布は、道路橋示方書の規定に従えばよいが、プレキャスト床版の場合には、ずれ止めがブロック配置になるので適当な基準に準拠するか、あるいは関連する研究成果に基づいて定めるものとした。

3.9 施工

施工については、道路橋示方書やコンクリート標準示方書・施工編ならびに文献14)などに基づいて定めた。

4. 抵抗係数の試算例

標準的な合成桁橋を対象とし、数値シミュレーションによって抵抗係数 ϕ を試算した。

4.1 対象橋梁

対象橋梁は、建設省制定の単純活荷重合成プレートガーダ¹⁶⁾より選定した。横断面構成は、図-3に示すとおりで、直橋である。また、着目部位は、支間中央の外主桁の下フランジである。試算ケースを、表-4に示す。ここで、主桁の支間長および床版厚をパラメータとした。

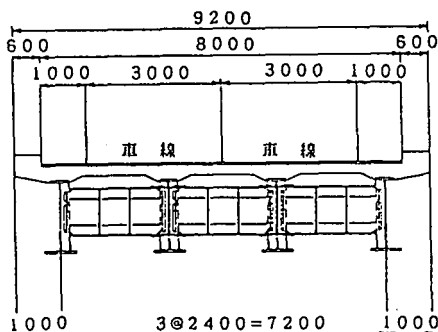


図-3 対象橋梁の横断面構成

4.2 抵抗係数の算定式

抵抗係数 ϕ は、式(6)より求めるものとする¹⁶⁾。

$$\phi = \phi_1 \times (R_m / R_n) \quad (6)$$

ここに、

ϕ_1 : 設計・施工時の2次的要因あるいは重要度等を考慮する係数(校正係数)

$\times$: 部材強度の信頼度およびその変動性を表す係数(下界係数)

R_m : 実測強度またはそれらの平均値

R_n : 公称抵抗強度

また、下界係数 $\times$ は式(7)で表される。

$$\times = 1 - k_R V_R \quad (7)$$

ここに、

k_R : 信頼度を表す定数

V_R : 比 (R_m / R_n) の変動係数

4.3 試算に用いた諸数値

試算に用いた断面寸法および材料の統計的な特性値は、表-5のとおりとした¹⁰⁾。また、公称抵抗強度の算出には、文献15)に記載された設計値を用いた。これらの諸数値を用いて、モンテカルロシミュレーション

表-4 試算ケース

着目 パラメータ	床版厚 (mm)	支間長 (m)
支間長	210	25, 30, 35, 40, 44
床版厚	200 210 220	44

(単位: mm) 表-5 断面寸法および材料の統計的な特性値

項目	μ	δ
床版厚	1.02	4.29
床版幅	1.0	0.06
ハンチ高	1.06	7.14
コンクリートの設計基準強度	1.2	20.0
コンクリートの弾性係数	1.0	10.0
クリープ係数	1.0	20.0
鋼板厚	1.006	1.75
鋼板幅	1.0	0.14
鋼材の降伏点強度	1.163	7.50
鋼材の弾性係数	0.997	4.58

μ : 実測値/公称値の平均

δ : 実測値/公称値の変動係数(%)

表-6 試算結果

支間長 (m)	床版厚 (mm)	抵抗係数 ϕ	
		$k_v=1.65$	$k_v=2.00$
25	210	0.964	0.892
30	210	0.964	0.891
35	210	0.963	0.890
40	210	0.964	0.889
44	210	0.964	0.888
44	200	0.963	0.889
44	220	0.964	0.888

により、10,000回の試行を繰り返し、式(6)、(7)の(R_m/R_n)、 V_R を求めた。一方、式(6)の校正係数 ϕ_1 は、各要因の標準の状態を考えるものとして $\phi_1=1.0$ とした。また、式(7)の定数 k_R としては、 $k_R=1.65$ (片側信頼度 95%)、および $k_R=2.00$ (片側信頼度 97.7%)の2ケースを考えた。

4.4 試算結果と考察

試算結果を、表-6に示す。同表によれば、試算の対象とした範囲では、支間長、および床版厚の変化による抵抗係数の変動は無視できるほど小さいことがわかる。そして、試算による抵抗係数 ϕ は、 $k_R=1.65$ に対して $\phi=0.96$ 、また $k_R=2.00$ に対して $\phi=0.89$ であり、本指針(草案)の提案値 $\phi=0.90$ は妥当なものとといえる。ただし、試算では、断面寸法および材料の統計的な特性値は各試算ケースで定数としている。これらの特性値は、過去に蓄積されたデータに基づいているが、必ずしも十分なデータ量とはいえず、今後のデータにより精度を高めていく必要がある。また、特性値のうち、その変動が抵抗係数に与える影響が異なるため¹⁰⁾、その定性的な傾向を調べるとともに、実構造との対応を調べることが、今後の課題であろう。

5. あとがき

異種の材料の長所を組合わせた合成桁形式は、今後も橋梁を含む構造物の主流をなすものと思われるが、そのさらなる発展のためには適用すべき基準の早期の制定が是非とも必要となる。また、許容応力度設計法から限界状態設計法への移行は、社会資本の合理的な整備の主旨に沿うもので、しかも世界の趨勢とも合致するところである。

本分科会の成果が今後の合成桁の設計標準作成の際に参考となれば、筆者らの幸いとするところである。

[謝辞]

最後に、抵抗係数の試算にあたって、計算のためのプログラム修正などで日本橋梁(株)の池田秀夫氏のご協力を得た。また、本分科会の主査である、大阪市立大学 中井 博教授には、終始適切なご指導を賜ったことを記し、併せて感謝の意を表します。

参考文献

- 1)伊藤 鉦一：ドイツにおける最近の鋼合成桁橋梁、橋梁と基礎、Vol.27, No.5, pp.28-37, 1993.5.
- 2)松井 繁之：コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策(過大荷重による劣化と劣化診断)、コンクリート工学、Vol.33, No.6, pp.59-67, 1995.6.
- 3)橋 善雄：連続合成桁橋、理工図書、p.256, 1966.
- 4)前田 幸雄：橋梁界の今日の問題(鋼とコンクリートの合成構造)、季刊カラム、No.73, pp.11-33, 1979.
- 5)日本道路協会：道路橋示方書、1980.
- 6)土木学会：鋼構造物設計指針：PartA, PartB、鋼構造シリーズ③、1987.
- 7)土木学会：コンクリート標準示方書(平成3年版)設計・施工編、1991.
- 8)Eurocode 4: Composite Steel and Concrete Structures, Print Draft, 1984.
- 9)BSI: BS5400, Part 5, Codes of Practice for Design of Composite Bridges, 1979.
- 10)土木学会関西支部共同研究グループ：限界状態設計法による合成桁橋の設計法に関する研究、1988.1.
- 11)土木学会、鋼・コンクリート共通構造設計基準小委員会：鋼構造とコンクリート構造の限界状態設計法に関する共通の原則、土木学会論文集、No.450/1-20, pp.13~pp.20, 1992.7.
- 12)AASHTO: Standard Specification for Highway Bridges, 13th, 1983.
- 13)(社)日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技法堂出版、1993.4.
- 14)中井 博編：プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工、森北出版、1988.5.
- 15)全日本建設技術協会：建設省制定・土木構造物標準設計・活荷重合成プレートガーダ、1979.3.
- 16)東海鋼構造研究グループ：鋼構造部材の抵抗強度の評価と信頼性設計への適用(上)、pp.33-41、橋梁と基礎、1980.11.