

(2) 合成構造関連示方書と合成橋梁の設計法に関する提案

川崎製鉄 正員 佐藤 政勝

1. まえがき

鋼材とコンクリートを組合せた合成構造物は、鋼材の強靱性とコンクリートの圧縮強度、剛度など材料特性をいかした合理的な構造物であり、従来から、合成桁や鉄骨鉄筋コンクリート（以下SRCと略称）が橋梁や建築物に用いられていたが、近年、騒音、振動対策上から、また防食および維持管理の容易さなどの利点が再認識され、地下構造の連続壁、基礎杭や海中および海洋構造物などに適用範囲が拡大している。

橋梁においても、新しい形式の合成床版や合成橋梁が研究、開発され、実用に供しているものが多くあるが、残念ながら、施工性に優れ、かつ廉価な合成床版・橋梁が少ない。この主因としては我が国の道路橋示方書¹⁾（以下、道示と略称）における守備範囲が合成桁に限定されていることや現行の規定が必ずしも合成構造の特徴をいかにせる形に整備されていないことなどが挙げられる。

合成構造の設計に関する諸外国のすう勢としては、限界状態設計法（Limit State Design Method, 以下LSDと略称）に移行している。我が国でも、土木学会においてLSDの導入が検討され、コンクリート構造物の設計に採用される予定であり²⁾、また鋼構造に関しても1987年3月を目処にLSDに基づく設計指針を策定中である³⁾。

本報告では、これら国内外における設計法の動向を見極めながら、合成桁・梁およびSRC構造を中心に合成構造関連規準をとりまとめ、コンクリートの許容応力度やたわみの許容値など道示・I編、II編、III編における問題を指摘し、その改善法および経済的な合成断面を可能ならしめる立場から、道路橋用合成橋梁の設計法について提案したものである。

2. 外国における合成構造関連の基準

1973年の第11版改訂においてAASHTO（The American Association of State Highway and Transportation Officials）が合成梁と桁の設計に、従来からの許容応力度設計法（Allowable Stress Design, 以下ASDと略称）と併せて、新たにLoad Factor Designを導入して以来、設計法の流れが荷重係数設計法（Load and Resistance Factor Design, LRFDまたは、LFDと略称）へと移行し、1977年に刊行された第12版において、Service Load Design Method = ASDとStrength Design Method = LFDの2つの方法を明確に定義し、その詳細な規定を設けた。13版（1983年）およびその暫定基準（1985年）においてもその設計法を踏襲している⁴⁾。

カナダではCISC（Canadian Institute of Steel Construction）が合成桁の設計を含む建築物に対するLSD（AASHTOのLFDと本質的には同じものである）を1974年に発表した。さらに、1979年にオンタリオ州が限界状態設計法によるOntario Bridge Design Codeを作成（1983年に第2版刊行）し、その基準に基づいて設計された連続合成台形桁橋Burlington橋が既に架設されている⁵⁾。

イギリスでは1967年に、LSDに基づいた合成梁の設計規準CP117: Part 2, Composite Construction in Structural Steel and Concrete（Beams for Bridges）が規定された。それに代わるものとして、BS5400: Part 5 Code of Practice for Design of Composite Bridgesが1980年に規定された⁶⁾。この基準では、合成I桁、箱桁、埋込みおよび充填桁など合成橋梁を包括している。

西ドイツでは、イギリスと同じ設計法を指向した合成桁の設計施工指針が D A S t (Deutscher Ausschusz für Stahlbau) により 1974 年に発表され、1980 年に D I N (Deutsche Industrie Norm) の指針として改訂された⁷⁾。さらに、ヨーロッパにおいて CEB-ECCS-FIP-IABSE の合成構造合同委員会が発足し、合成構造のモデル指針 (案)⁸⁾ が 1979 年に発表されたのに引き続き、EUROCODE 4 Composite Steel and Concrete Structure (原案) が、1984 年に出版された⁹⁾。これらの合成構造に関連する最近の規準について設計法、対象構造および特徴を取りまとめたものを表 1 に示す。

3. 国内における規準

3. 1 合成桁・梁の設計基準

表 1 外国における合成構造関連規準の概要

規準名 (国, 年)	設計法 *	対象構造 (付, 章または節番号)	特 徴
Standard Specifications for Highway Bridges by AASHTO (U.S.A) 13th ed. (1983年) 暫定規準 (1985年)	S L D M (A S D)	I 編 設計 (道路橋) 10.38 合成桁 (ずれ止め) 10.39 合成箱桁 10.40 ハイブリッド桁	1) 2種類の設計法を併用している 2) S D M においてコンパクト断面が成立するための条件が厳しい
	S D M (L F D)	10.50 合成梁と桁 10.51 合成箱桁 10.52 ずれ止め 10.53.2 合成ハイブリッド桁	3) 合成ハイブリッド桁の規定がある 4) 1985年暫定規準において修正無し
Ontario Highway Bridge Design Code by OMTC (Canada) 1983 年	L S D	道路橋用 10.10 合成梁と桁 (ずれ止め) 10.11 合成箱桁 10.12 ハイブリッド桁 11. 6 合成鋼桁の疲労	1) AASHTO 示方書の荷重係数設計法と本質的に同じものである 2) オンタリオ州における支間 125m 以下の道路橋に適用を限定している
BS 5400, Part 5 Code of Practice for Design of Composite Bridges (BSI, England) 1979 年	L S D	道路橋と鉄道橋用 6.3 縦方向せん断 (ずれ止め) 7. 合成箱桁 7.7 合成版 8. 埋込桁と充填桁 9.5.3 構造用永久型枠 11. 合成柱	1) 合成橋梁の総合、統一規準である 2) ずれ止めに対する標準試験法の実定がある 3) 永久 (埋殺し) 型枠の規定がある
Richtlinien für die Bemessung und Ausführung Von Stahlverbundträgern (DIN, W. Germany) 1980 年	L S D	道路橋, 鉄道橋および建築用合成桁	1) 合成桁の統一規準である 2) コンパクト断面が成立するための条件が比較的ゆかい
CEB - ECCS - FIP - IABSE Draft Model Code for Composite Structures 1979 年	L S D	道路橋, 鉄道橋および建築用 合成梁と桁 合成床版 合成柱	1) 合成構造に関する国際的な暫定指針である 2) ずれ止めに関する規定が詳細である
EUROCODE 4 Composite Steel and Concrete Structures (First draft) 1984 年	L S D	土木および建築全般の合成構造 6. ずれ止め 7. 合成床版 8. プレキャストコンクリート床版	1) 合成構造に関するヨーロッパ統一規準 (案) である 2) ずれ止めに対する標準試験法, 試験結果の評価法の規定がある
DIN 18806 Teil 1 Verbundstützen (W. Germany) 1983 年	L S D	土木および建築用合成柱	1) 合成柱の統一規準である 2) 設計用の N-M 相関図が示されている

* ここで、S L D M は使用荷重設計法、A S D は許容応力設計、S D M は強度設計法、L F D は荷重係数設計、L S D は (終局と使用) 限界状態設計の略称である。

我が国における合成桁・梁の設計基準の概要を表2に示す。道路橋の合成桁設計基準は、1959年に日本道路協会より「鋼道路橋の合成桁設計施工指針」として刊行された。その後幾度か改訂され1980年に道路橋示方書、Ⅱ鋼橋編、9章合成桁が規定された。現行の設計法は、原則としてASDによるが、1995年度を目処にLSDへの移行を図るべく調査研究が行われている¹⁰⁾。一方、土木学会・鋼構造委員会では、鋼構造物設計指針小委員会を設置し、鋼構造物の設計法見直し作業の過程で1986年4月に刊行された鋼構造物設計指針（第4次案）、第12章複合構造物に合成桁が組み入れられている。

鉄道橋においては、1963年「合成桁鉄道橋設計示方書（案）」が作成された。建造物設計標準の制定に伴って様式を設計標準形式に改め、1973年に現在の「鋼とコンクリートとの合成鉄道橋」が制定された。また、H形鋼埋込み単純桁の設計は鉄筋コンクリート構造物および無筋コンクリート構造物3編に規定されている¹¹⁾。建築における合成梁の設計基準としては、1975年に日本建築学会により「合成梁構造設計施工指針」が規定された。1985年に「各種合成構造の設計施工指針」第1編に改定された¹²⁾。

3. 2 土木におけるSRC設計基準

SRC設計基準の概要を表3に示す¹³⁾。道路橋下部構造に対するSRC基準は1967年首都高速道路公団で制定された「SRC設計基準」が最初である。その後、1972年に改訂されたが、現行の基準は1970年に制定された阪神高速道路公団のものと基本的に同じである。1974年に土木学会は本州四国連絡橋公団からSRC基準作成の委託を受け、その時点におけるSRC基準の経緯を踏まえて累加強度方式を主体としたSRC指針を制定した。その後、同公団は、大型SRC橋脚を対象としたSRC設計指針を作成し、さらに日本道路公団は1980年に、鉄骨の断面を鉄筋に換算したいわゆるRC方式によるSRC設計指針を制定した。国鉄においても累加強度方式とRC方式による設計を認めたSRC設計指針が1976年に制定されたが、1986年にRC方式に基づく終局強度設計法に設計標準を全面改訂した¹⁴⁾。

現在、土木学会のコンクリート委員会ではコンクリート標準示方書の全面的改訂作業を進めており、その中でSRCに関しても条項を新たに規定することとしているが、その第1次原案として、1983年に発表した「コンクリート構造の限界状態設計法指針（案）」の第16章SRCが採用される予定である。また、鋼構造委員会においても、1987年3月を目処に鋼構造設計指針を作成しており、その第4次案、第12章複合構造物においてSRCの設計指針が検討されている。

表 2 国内における合成桁・梁関連規準の概要

規準名（制定機関，年）	設計法*	編または章	摘 要
道路橋示方書 日本道路協会 昭和55年 2月	ASD	Ⅱ. 鋼橋編 9. 合成桁	1) ASDが原則であるが、降伏に対する安全度の照査をする。 2) 昭和70年度を目処に LSDへの移行を検討中
建築物設計標準 国鉄（土木学会） 昭和58年 4月	ASD	鋼とコンクリートとの合成 鉄道橋 鉄筋コンクリート構造物および 無筋コンクリート構造物 Ⅲ.1.7 H形鋼埋込単純桁	1) 活荷重合成の単純桁に適用を限定する 2) 斜角70°以上とし、H形鋼をコンクリートで包まない合成桁は含まない
鋼構造物設計指針 （4次案） 土木学会 昭和61年 4月	LSDを 指向	Part B（特定構造物） 12.2 合成桁	1) LSDへの移行を前提とした標準的なモデル指針の作成 2) 第一版刊行は昭和62年 3月の予定
各種合成構造設計指針 日本建築学会 昭和60年 2月	ASDと LSDの 併用	第1編 合成梁 第2編 合成床版	1) 断面設計は原則として ASDによる 2) ずれ止めは頭付きスタッドとし、終局強度で設計する

*ここで、ASDは許容応力設計、LSDは限界状態設計の略称である。

表 3 土木におけるSRC設計標準の概要

規準名(制定機関, 年)	対象構造	設計法の基本, 断面力の算定法
SRC設計基準 首都高速道路公団(昭和47年) 阪神高速道路公団(昭和45年)	下部構造物	1)両基準とも基本的な設計法の相違はない 2)曲げモーメントと軸力を受ける部材の許容断面力は, 累加強度方式による
SRC構造設計指針 本州四国連絡橋公団 昭和52年 8月		部材の許容断面力は, 累加強度方式とRC方式のうちいずれかによるが, 断面が著しく非対称でない場合は, 累加強度方式による
大型SRC橋脚設計要領(案) 本州四国連絡橋公団 (昭和54年11月)	橋 脚	1)設計法は「SRC構造設計指針」に準ずるが, 鋼材配置が対象の場合, 累加強度方式による 2)埋込部の鉄骨には, その全強に対してスタッドを打ち, 定着させる
設計要領 3-3-4 SRCの設計 日本道路公団(昭和55年 4月)		1)RC方式に基づく許容応力度設計法 2)終局強度を増大させるため, 鉄骨の縦方向部材相互の横つなぎをトラス状に組む
SRC構造の設計標準 国鉄(土木学会) (昭和61年 2月)	9. 床版 10. 梁 11. 柱	1)RC方式に基づく, 限界状態設計法 2)使用(たわみ, ひび割れ)限界状態と疲労に対する検討
鋼構造物設計指針(第4次案) 土木学会 (昭和61年 4月)	Part B 12.2 SRC 構造物	1)限界状態設計への移行を前提とした標準的なモデル指針の作成 2)限界状態の照査を行う
コンクリート構造の限界状態設計法指針(案), 土木学会 (昭和58年11月)	16. SRC	1)鉄筋鉄骨併用構造の断面耐力は, RC方式に基づいて算定する 2)使用状態において平面保持の仮定が満足されること

表 4 道路橋示方書の変遷と土木学会・委員会の活動

建設省 (*内務省土木局)		土木学会	
* 明 19	国県道の築造保存方法 454 kgf/m ²	鋼構造委員会	
* 大 15	道路構造に関する細則案 12 ^{トン} , 8 ^{トン} , 6 ^{トン}	設計指針複合構造検討グループ	
* 昭 14	鋼道路橋設計示方書案 13 ^{トン} , 9 ^{トン}	構造工学委員会	
昭 27	道路法の改正(橋梁を道路構造物と見做す)	鋼・コンクリート合成構造小委員会	
昭 31	鋼道路橋設計示方書 (日本道路協会刊行) 20 ^{トン} , 14 ^{トン}		
昭 34	鋼道路橋の合成桁設計施工指針の制定		
昭 40	同上設計施工指針の改訂	コンクリート委員会	
昭 39	RC 道路橋設計示方書	コンクリート標準示方書(昭 6)	
昭 43	PC " "	PC " (昭30)	
昭 47	道路橋示方書 I 共通 II 鋼橋	示方書改訂(第21分科会)	
昭 52	III コンクリート橋(たわみの規定無し)	SRC研究小委員会	
昭 55	IV 下部構造, V 耐震設計, TT-43		

表 5 コンクリートの許容曲げ圧縮応力度 (kgf/cm²)

コンクリートの設計基準強度 : σ_k		270	300	400	500
RC部材 (Ⅲ.3.2.1)		90	100	—	—
PC部材 (Ⅲ.3.3.1)	プレストレッシング	長方形断面	150	190	210
		箱形断面	140	180	200
	直後	長方形断面	120	150	170
		箱形断面	110	140	160
合成桁	Ⅱ.9.2.1	$\sigma_k > 270$, プレストレスを与える場合 $\sigma_k > 300$			
	Ⅱ.9.3.1 の1.) 主荷重	主荷重 $\sigma_k / 3.5$, かつ 100以下			
	1.4) プレストレッシング直後	1) 主荷重 の項の 25%増し			

4. 道路橋示方書における問題点とその対策

4. 1 道路橋示方書の変遷

表4に示すように、建設省が日本道路協会を介して制定した示方書と土木学会委員会の設計指針は密接な関係にある。1952年における道路法の改正に伴い1956年に「鋼道路橋設計示方書および製作示方書」が作成され、その3年後に、「鋼道路橋の合成桁設計施工指針」が作成された。1965年の改訂において、連続合成桁が適用範囲に加えられると同時にスタッドの規定が設けられ、ほぼ現行規定の形に整えられた。その後、1980年に体系的に一本化された道示・Ⅱ編9章合成桁に改訂され、今日に至る。

鉄筋コンクリート（以下、RCと略称）標準示方書が1931年に土木学会により制定されたがRC橋の設計は1940年代に内務省土木試験所が作成したRC橋の標準設計をよりどころに実施されていた。

1964年に初めてRC道路橋設計示方書が規定された。一方、プレストレストコンクリート（以下、PCと略称）設計施工指針が1955年に土木学会で制定されたが、PC道路橋示方書が日本道路協会より刊行されたのは1968年であった。これらのRC道路橋とPC道路橋が体系的にまとめられ、1977年に道示・Ⅲコンクリート橋編が制定された。

4. 2 たわみの許容量

1973年版道示では、Ⅰ共通編1.9で活荷重によるたわみの許容量： δa が規定されていたが、Ⅲコンクリート橋編が制定された1978年以後、 δa の規定は鋼橋編Ⅱ1.4に移っており、コンクリート道路橋に対するたわみの照査を原則的に必要としない。但し、建設省が制定したPC単純T桁橋、PC単純床版橋および中空床版橋の標準設計において、 δa は $L/600$ （ここで、 L は支間長）以下としており、この規定が一応の目安になっている。

1959年に制定された合成桁設計施工指針では、 $\delta a < L/500$ を規定したが、道示Ⅲ1.4においては、鋼桁のたわみがRC床版に及ぼす影響はきわめて大きいとし、たわみ差によってRC床版に付加される曲げ応力度が許容値を越えないように必要なたわみ制限量を算出して規定したためRC床版を持つプレートガーダーの δa が厳しく制限されている。但し、支間長が40m以上のものや鋼床版などRC床版でないプレートガーダーに対する δa は $L/500$ 以下であって、その他の橋梁形式に対する $\delta a < L/600$ より大きな許容値になっている。第一の問題は合成床版を持つプレートガーダーに対して、どちらの規定を適用すべきかであり、第二の問題はプレートガーダーと床版を一体にした合成床版橋に対して、その他の形式の規定とその他の床版をもつプレートガーダーの規定のどちらを適用すべきかである。合成床版橋の構造特性はRC床版橋のそれと類似していることから推察し、 δa に対する規定が不要とも考えられるが、鋼床版に対する規定（ $L/500$ 以下）が現実的な値であろう。

4. 3 コンクリートの許容応力度

コンクリートの許容応力度には、曲げ圧縮、軸圧縮、せん断に対するものがあるが、ここでは合成橋梁に対して最も重要な曲げ圧縮応力度を取りあげ、RC部材、PC部材および合成桁における許容応力度を表5に示す。RC部材と合成桁における最大許容応力度は 100kgf/cm^2 であって、RC部材では、コンクリート設計基準強度： σ_k の1/3に対して、合成桁では1/3.5である。またPC長方形断面では300、400、500 kgf/cm^2 の σ_k に対応して120、150、170 kgf/cm^2 であり、安全係数は2.5、2.7、2.9となる。これらの許容値の設定に際してはそれ相応の理由があるろうが、同一示方書ではできる限り整合させるべきである。安全係数が小さいほど、使用コンクリートの σ_k が高いほど経済性の高い合成橋梁の設計が可能になることを考慮すれば、合成橋梁に対する許容応力度はPC部材の規定を準用し、安全係数を2.5とし、かつ σ_k を400 kgf/cm^2 まで高くし、250、300、400 kgf/cm^2 の σ_k に対応する許容曲げ圧縮応力度を100、120、160 kgf/cm^2 とする。

5. 道路橋単純合成橋梁の設計法に関する提案

橋梁の設計法はすでにLSDの時代に移行しているか、あるいは移行しつつある段階である。材料特性の異なる部材から成る合成橋梁にLSDを導入することによる経済的なメリットが期待できるので、遠からずLSDに移行するであろうが、道路橋示方書として一般に普及するまでには今後10年程の歳月を要する¹⁰⁾。合成橋梁に対するLSDについては、コンクリート標準示方書や国鉄のSRC規準および鋼構造物設計指針における複合構造規準を踏まえて、鋼・コンクリート合成構造小委員会が検討する予定である。ここでは、LSDへの移行を前提に、かつ道示の規定を越えない範囲で、単純合成橋梁の設計について提案する。

(1) 道示Ⅰ共通編における諸規定のうちで、鋼橋とRC橋とに分けられている場合、合成橋梁に対する規定はRC橋に準ずる。例えば、Ⅰ表2.1.7 衝撃係数*i*については、 $i = 7/20 + L$ (*L*荷重に対して) とする。

(2) たわみの許容量：活荷重によるたわみの許容量は、 $L/500$ 以下とする。(前章参照)

(3) コンクリートの許容曲げ圧縮許容応力度：安全係数を2.5とし、かつ σ_k は400kgf/cm²まで認めるすなわち、250, 300, 350, 400kgf/cm²の σ_k に対して、許容曲げ圧縮応力度はそれぞれ100, 120, 140 および 160kgf/cm² とする。(前章参照)

(4) 鋼材の最小板厚の緩和：コンクリート中に埋込まれた鋼材、あるいはずれ止めによりコンクリートと一体化された引張鋼材の最小板厚に対しては、道示Ⅱ, 3.1.6 鋼材の最小板厚の範囲外と考えて、溶接などの施工の立場から最小板厚を決めるとよい。構造用永久型枠として用いる鋼板の板厚は4.5mm以上とする。

(5) 断面応力の算定：普通コンクリートを用いた合成橋梁に対する断面応力の算定は、道示Ⅱ9章によるが、コンクリートの乾燥収縮を防止する目的で膨張材を添加した膨張コンクリートを用いた合成橋梁の断面応力の算定は次の手順による。合成前死荷重は鋼桁が負担し、合成後活荷重は、*n*を7と仮定した合成断面で負担し、さらに合成後死荷重は、クリープを考慮して、*n*₁を14とした合成断面が負担するものとして断面応力を算定する。したがって、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮による応力度の変化を改めて考慮する必要がない。

6. あとがき

合成橋梁に作用する外力は曲げが支配的であって、コンクリートの許容応力度がボトムネックなることが多く、これを改善することが経済性を達成する近道である。その意味において、LSDに基づく合成橋梁の設計施工指針の早期完成が望まれるが、その繋ぎとして、道示に整合する範囲(多少の拡大解釈は免じて)で、かつ経済的にメリットを受容できるような立場から、合成橋梁の設計に対する提案を試みた。これらの提案が道示における合成橋梁設計指針の改訂の発端になればと考え、また読者諸兄の合成橋梁の開発に際して、設計計算の手助けになれば幸いである。

文 献

- 1) 日本道路協会；道路橋示方書・同解説(1978年)，Ⅰ共通編，Ⅱ鋼橋編，Ⅲコンクリート橋編
- 2) 土木学会コンクリート委員会；「コンクリート標準示方書」の改訂の要点，土木学会論文集第366号/V-2 (1986)
- 3) 土木学会・鋼構造委員会；鋼構造物設計指針(第4次案)，Part B 第12章複合構造物(1986)
- 4) AASHTO；Standard Specifications for Highway Bridges, 13th edition (1983)
- 5) 前田；北米における鋼構造の限界状態設計の現状，JSSC, Vol.21 (1985), No.229, p44~49
- 6) BSI；BS5400, Part 5 Code of Practice for Design of Composite Bridges (1979)
- 7) DIN；Richtlinien für die Bemessung und Ausführung von Stahlverbundträgern (1980)
- 8) CEB - ECCS - FIP - IABSE Joint Committee on Composite Structures；Draft Model Code for Composite Structures (1979)
- 9) EUROCODE 4；Composite Steel and Concrete Structures, First Draft (1984)
- 10) 多田；土木研究所における橋梁に関する研究活動，土木技術資料28-5 (1986)
- 11) 土木学会；国鉄建造物設計標準解説(1983年)，鉄筋コンクリートおよび無筋コンクリート構造物，3編7章
- 12) 日本建築学会；各種合成構造設計指針同解説(1985)
- 13) 鋼・コンクリート合成構造小委員会；鋼・コンクリート合成構造の現状，土木学会誌9月号(1981)，p.48
- 14) 橋梁，岡田；国鉄のSRC構造物設計標準について，土木学会主催合成構造の活用に関するシンポジウム，No.6 (1986)