

(S3) 土木分野におけるSRC構造の現状と課題

渡辺 健¹

¹正会員 (公財)鉄道総合技術研究所構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: watanabe.ken.08@rtri.or.jp

鉄骨鉄筋コンクリート部材 (SRC部材) は、研究の蓄積や技術基準の整備とともに、鋼構造やコンクリート構造と比較した長所短所が明確になってきており、土木分野においても橋りょうなど多岐にわたり使用されている。本稿では、これまでの土木分野における主に充腹形SRC構造の使用実績について、鉄道の例を中心にその構造事例や形式、諸元を整理した。そして、土木学会における取組や照査における現状と課題、これに対する最近の取組みについて纏めた。

Key Words : SRC, codes for bridges, shear-load capacity, performance-based design

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート部材 (SRC 部材) は、土木分野においても、橋りょうを中心に、戦前より使用された事例が報告されている。そして、現在までの研究の蓄積や技術基準の整備とともに、鋼構造やコンクリート構造と比較した SRC 部材の有する長所や短所が明確になってきたことで、土木分野においても多岐にわたり使用され続けている。

本稿では、土木分野における SRC 部材のこれまでの使用実績について、鉄道の例を中心にその構造事例や形式、諸元を整理するとともに、土木学会における取組みや照査における現状と課題、これに対する最近の取組みについて纏めた。なお、土木分野における SRC 構造の事例として、鉄骨コンクリート複合橋脚、鋼管コンクリート合成橋脚、合成鋼管巻き立て工法による架設アーチ橋、プレキャスト合成アーチ橋など様々な構造が報告されているが¹⁾、本稿では主に充腹形 SRC 構造に絞りとまとめている。

2. SRC 部材の適用と特徴

(1) 土木分野における適用と目的

橋りょうなどに使用される SRC 桁 (H 鋼埋込み桁) は、RC 桁と比較して断面積の割合に比べ耐力が大きく桁高を低減できること、鋼部材を活用した吊り型枠により支保工の建設が困難な場所でも施工が容易であること、鉄筋量が少なく配筋作業が軽減できることなどが、採用

理由の特徴として挙げられる。表-1 に、鉄道における SRC 構造の主な適用箇所 (桁、橋脚) とその目的の例を、キーワードごとに示す。これまでの実績をみると、SRC 構造の適用理由には、PC 構造、RC 構造では施工が困難な市街地の立体交差事業、線路近接工事および線路直上架設など建設用地の制約により架設困難などである。また、柱梁の断面高さを低減し、支間増大による桁下空間の確保や、鋼橋等と比較して騒音と保守の軽減、急速施工などの要求があったことなども、SRC 構造が採用されてきた経緯であった。

表-1 鉄道における SRC 構造の利用例²⁾

No.	キーワード	適用箇所	目的
1	SRC 構造の初期	有家川橋梁橋脚(S5)、総武線秋葉原付近高架橋(S7)、品鶴線沿い東海道新幹線橋脚(S39)	自重軽減、建設用地取得困難、急速施工、断面縮小
2	駅高架部(新幹線)	仙台駅(S52)、長岡駅(S54)、盛岡駅(S56)、赤羽高架(S60)	空間確保、営業線上施工、
3	縮小断面橋脚	第3穴内川橋梁(S55)、第1武庫川橋梁(S56)	河川部における橋脚梁高制限
4	下路 SRC 桁	根白石架道橋(S56)、勅使河原橋梁(S58)	部材高さ制限
5	急速施工	竹下高架橋、第4舟渡高架橋	用地取得遅延による急速施工、上部仮受橋脚の活用
6	H 鋼埋込み桁	高屋川橋梁(S29)、東海道新幹線標準桁 4-12.5m、第1武蔵野線線路橋(S60)、第4舟渡高架橋	自重低減、容易な打設、鋼材の捨て型枠使用

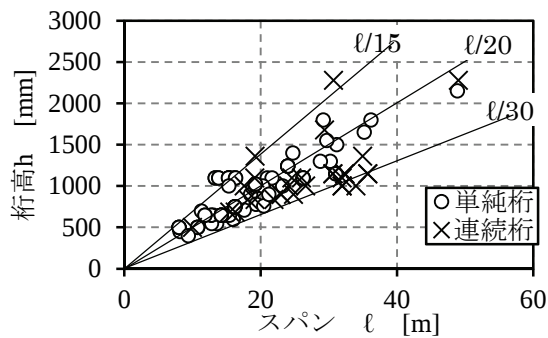


図-1 桁高とスパンの関係 (SRC 桁(H鋼埋込み桁))

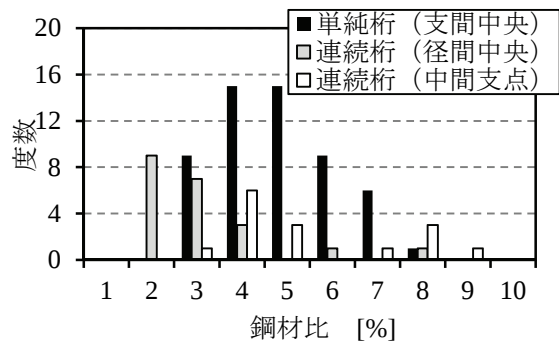


図-2 鋼材比 (SRC 桁(H鋼埋込み桁))

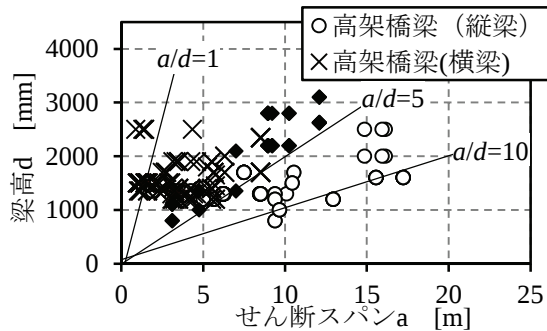


図-3 梁高とせん断スパンの関係 (SRC 梁)

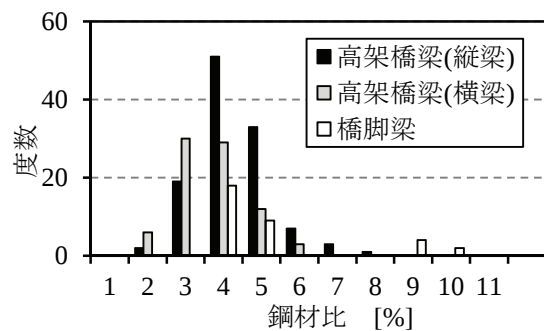


図-4 鋼材比 (SRC 梁)

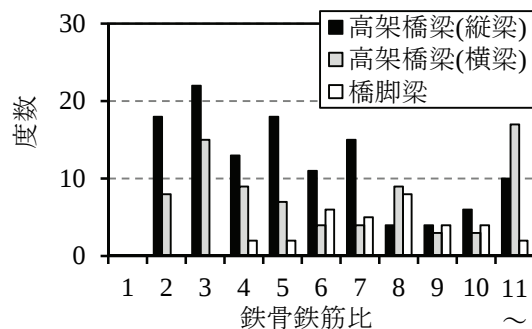


図-5 鉄骨鉄筋比 (SRC 梁)

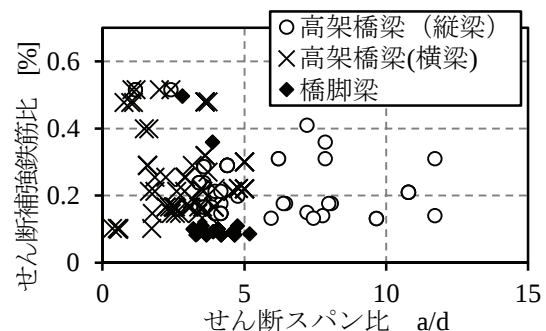


図-6 a/d とせん断補強鉄筋比の関係 (SRC 梁)

(2) SRC 部材の諸元の特徴 (鉄道構造物の例)

土木分野における SRC 部材の諸元の特徴として、鉄道構造物を例にまとめる。これは主な鉄道事業者を対象に行ったヒアリングに基づき、平成 10 年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)³⁾により照査、建設された SRC 構造物の構造、部材断面の特徴や細目を整理したものである。対象とした事例は SRC 桁 (単純桁: 48 件, 連続桁: 12 件), SRC ラーメン高架橋・橋脚 (梁: 26 件, 柱: 11 件) である。

(a) SRC 桁 (H鋼埋込み桁)

SRC 桁 (H鋼埋込み桁) について、図-1 に桁高とスパンの関係を示す。SRC 桁は、単純桁および連続桁において概ねスパンが 10m~50m の範囲で適用されている。桁高スパン比は概ね 1/15~1/30 の範囲で建設されており、連続桁の桁高スパン比がやや小さい傾向を示している。

図-2 に、鋼材比の度数分布を示す。SRC 桁の鋼材比

は約 2%~9%で建設されている実績があり、単純桁では約 3~6%の事例が多い。また、単純桁の支間中央に対し、連続桁の径間中央の鋼材比が小さい。ただし、連続桁でも、径間中央に対して中間支点部の鋼材比は大きくなる傾向がある。

(b) SRC 梁 (ラーメン高架橋, ラーメン橋脚)

ラーメン高架橋およびラーメン橋脚における SRC 梁について、図-3 に梁高とせん断スパンの関係を示す。ラーメン高架橋の縦梁のせん断スパンは、横梁と比較して大きい。梁高は概ね一致している。したがって、縦梁のせん断スパン比 ($a/d = 3 \sim 10$) は、横梁のせん断スパン比 ($a/d = 0.5 \sim 5$) より大きい。鉢形ラーメン高架橋の横梁のように、 a/d が約 0.5 となる事例もあった。

図-4、図-5 に鋼材比および鉄骨鉄筋比の度数分布を、図-6 にせん断スパン比 (a/d) とせん断補強鉄筋比の関係を示す。鋼材比は約 1~10%, 鉄骨鉄筋比は、地中梁な

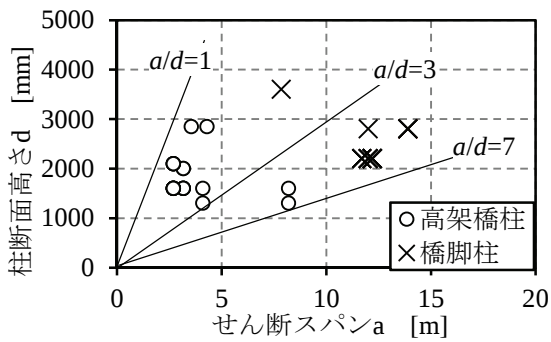


図-7 柱断面高さとせん断スパンの関係(SRC柱)

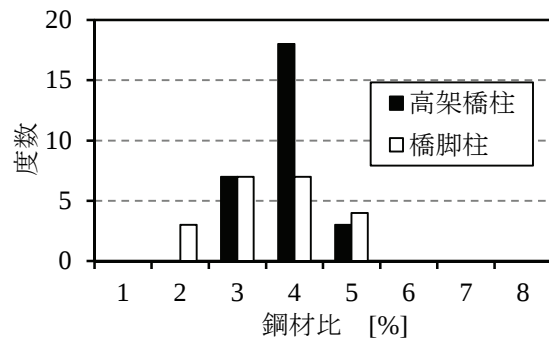


図-8 鋼材比(SRC柱)

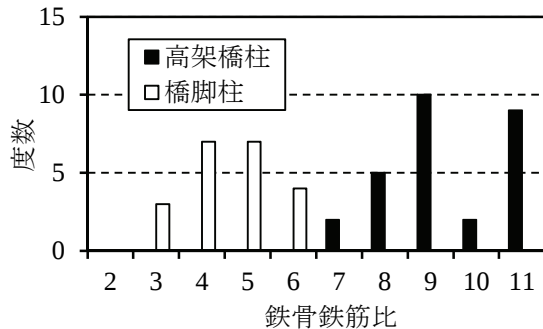


図-9 鉄骨鉄筋比(SRC柱)

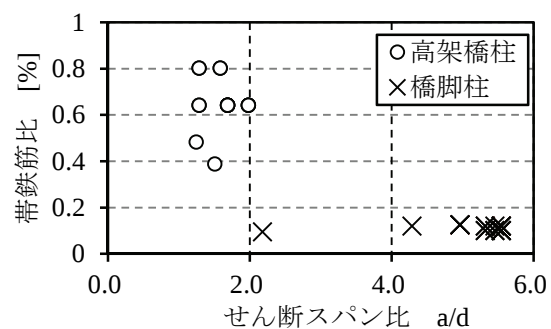


図-10 せん断スパン比と帯鉄筋比の関係(SRC柱)

どで 10 以上となる断面もあったが、概ね 1~10 の範囲で建設されていた。特に、ラーメン高架橋の横梁ではせん断スパン比(a/d)が小さく、せん断補強鉄筋比が大きい断面が多いことがわかる。

(c) SRC 柱（ラーメン高架橋およびラーメン橋脚）

ラーメン高架橋および橋脚における SRC 柱について、図-7 に柱断面高さとせん断スパンの関係を示す。SRC 柱はせん断スパンが約 3~14m、柱の断面高さが約 1000~3600mm の範囲で適用されており、橋脚の柱はラーメン高架橋の柱よりも断面寸法が大きくなる傾向にある。

図-8、図-9 に鋼材比、鉄骨鉄筋比の度数分布を示す。鋼材比は、概ね 2~6% である。一方、鉄骨鉄筋比は、調査対象としたラーメン高架橋の SRC 柱（高架橋）に、スパンが 30m 以上の単径間ラーメン高架橋が多く、鉄骨の比率が高い。

図-10 に、せん断スパン比に対する帯鉄筋比の関係を示す。橋脚の SRC 柱の帯鉄筋比は、ラーメン高架橋の SRC 柱より小さくなる傾向にある。一般に、橋脚の柱はラーメン高架橋の柱に対して断面寸法が大きくなることで、断面に対する帯鉄筋比が小さくなるのが理由である。

(3) 鉄道の技術基準の経緯と現状

(a) 鉄骨鉄筋コンクリート構造物設計指針（旧国鉄）

昭和 40 年代以降、SRC 構造物への需要も駅部を中心に増加してきた。それまで、SRC 構造物の設計に際して

は建築基準が準用されていたが、鉄道土木分野の課題を考慮して、鉄骨鉄筋コンクリート構造物設計指針(昭和 51 年)が定められた。ここでは、建築基準と同様の累加強度方式を取り入れ、RC ラーメン柱脚アンカー部の設計についてもその設計方法を明示した。なお、この指針は許容応力度法による設計手法であったが、土木学会に研究委託による最終報告書に基づき、昭和 62 年において限界状態設計法を採用した体系に改訂されている。

b) 鉄道構造物等設計標準（鋼とコンクリートの複合構造物）（平成 10 年）

「鉄骨鉄筋コンクリート構造物設計指針」（昭和 62 年）を基に、コンクリート構造物、鋼・合成構造物の設計標準等との整合を図りつつ整備された。限界状態設計法を適用しており、終局・使用・疲労限界状態に対する検討を行うこととしている。終局限界状態における SRC 部材の曲げ耐力については鉄骨を鉄筋とみなし、一般の鉄筋コンクリート部材と同様に平面保持の法則を仮定して算定する RC 方式を採用している。また、せん断耐力については、鉄筋コンクリート部分により受持たれる耐力と鉄骨部分により受持たれる耐力の累加として算定することとしている。

この、「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）平成 10 年」を適用した SRC 構造物について、図面および計算書による基礎データ収集を基に明らかになった照査結果の傾向を示す。なおここでは、SRC 構造を SRC 桁、SRC 梁・柱に区分し、部材ご

との照査結果の違いや照査値が 0.8 以上（耐震：0.7 以上）で最大となる指標を、断面決定に寄与した照査項目としている。

図-11 に、SRC 桁（単純桁、連続桁）に対する、終局限界状態（曲げモーメント、せん断力、ねじりモーメント）、使用限界状態（ひび割れ幅、たわみ）、および疲労限界状態（繰返し数の影響を考慮した鉄骨の疲労）について、断面を決定した項目を示す。SRC 桁は、曲げモーメントの照査により断面が決定する割合が最も高いが、単純桁ではひび割れ幅、桁のたわみ、ねじりモーメントの照査により断面が決定した事例があった。一方、連続桁では、繰返し数の影響を考慮した鉄骨の疲労の照査値が増加する傾向にあり、疲労により断面が決定している事例も多い。

図-12 に、SRC 梁の断面決定に寄与した照査項目の度数分布を示す。ラーメン高架橋の縦梁では主に曲げモーメントおよびひび割れ幅の照査が、一方、ラーメン高架橋横梁および橋脚の梁では、せん断力やひび割れ幅、耐震の照査が、断面決定の項目となっている事例が多い。

図-13 に、SRC 柱の断面決定となった各照査項目の度数分布を示す。SRC 柱では、主に曲げモーメント、ひび割れ幅、耐震の照査によって断面が決定されている。特に、長支間となる 1 径間ラーメン高架橋におけるせん断スパンが小さい柱、門型ラーメン橋脚の柱などでは、ひび割れ幅によって断面が決定されるケースが多かった。

(c) 次期改訂に向けて

鉄道構造物等設計標準（鋼とコンクリートの複合構造物）は、関連する他の設計標準との整合を図りながら、性能照査型設計体系への移行が進められている。構造物の要求性能は、安全性、使用性および復旧性を基本として、SRC 部材や接合部等の標準的な照査法が提示されている。また、高強度の鋼材やコンクリートの SRC 部材への適用性や低せん断スパン比を含む SRC 部材のせん断耐力について、載荷試験や数値解析結果に基づき、算定法の見直しが行われている。

3. SRC 部材の照査法の現状と課題

(1) 土木学会における取組み

土木学会では、SRC 部材に関する照査法について、複数の委員会において検討、整備が進められてきた経緯がある。鋼構造委員会では、1987 年に「鋼構造物設計指針 PART B 特定構造物」が発行され、1997 年には「鋼構造物設計指針 PART-B 合成構造物」において、限界状態設計法が導入されている。コンクリート委員会では、「1986 年制定コンクリート標準示方書」より限界状態設計法を採用した体系が導入され、また 1997 年に「複

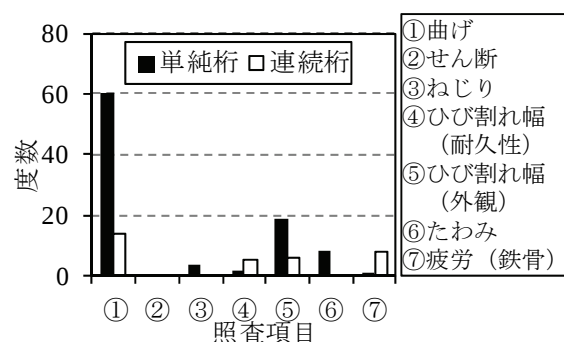


図-11 断面決定となる照査項目の度数分布(SRC 桁)

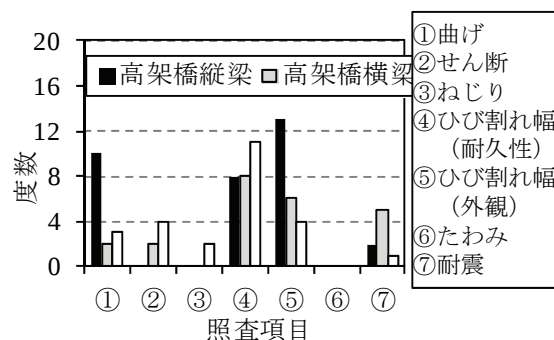


図-12 断面決定となる照査項目の度数分布(SRC 梁)

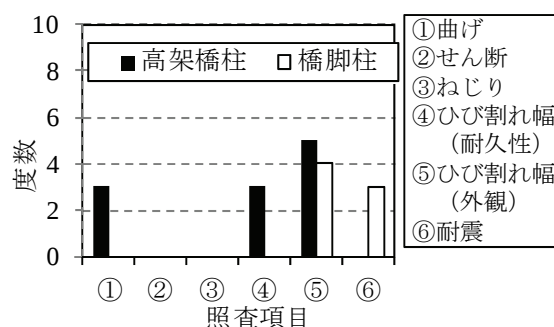


図-13 断面決定となる照査項目の度数分布(SRC 柱)

合構造物設計・施工指針（案）」が発刊されている。なお、2012 年制定コンクリート標準示方書では、複合構造標準示方書(2009 年制定)に拠るものとしている。

一方、構造工学委員会では、鋼・コンクリート合成構造小委員会が設立され、1989 年に「鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン」において、限界状態設計法の体系が整備された。さらには、コンクリート・構造工学・鋼構造委員会を母体とする鋼・コンクリート合成構造連合小委員会により、2002 年に「複合構造物の性能照査指針(案)」が発行されている。

2005 年に新たに土木学会に複合構造委員会が設立され、複合構造標準示方書委員会により「2009 年制定複合構造標準示方書」⁴⁾、「2014 年制定複合構造標準示方書[設計編][施工編][維持管理編]」が発行されている⁵⁾。

(2) 2014 年制定複合構造標準示方書[設計編]⁵⁾

2014 年制定複合構造標準示方書[設計編]は、[標準編][仕様編]で構成されている。[標準編]では、鋼とコンクリートで構成される複合構造物および FRP を用いた複合構造物に関する設計および性能照査に関する共通事項が纏められている。一方[仕様編]では、SRC 部材、CFT 部材、合成はり、有限要素解析による性能照査など 8 編で構成され、現時点での標準的な照査法が具体的に記載されている。

[仕様編] IV. 鉄骨鉄筋コンクリート部材編の構成は、「1.総則」「2.構造解析および応答値の算定」、細目・施工・耐久性に関する検討など性能照査を行う際の前提を一括した「3.性能照査における前提」「4.安全性に関する照査」「5.使用性に関する照査」「6.復旧性に関する照査」で構成されている。

性能照査型設計において、例えば地震時の構造部材の設計では、部材の損傷程度と耐力力、修復に要する費用やダウンタイムを考慮した安全性や復旧性の照査が求められる。これを実現するためには、SRC 部材の損傷過程の評価とこれに基づく限界状態の設定が必須となる。このような理由から、土木学会の複合構造標準示方書では、SRC 部材の損傷過程と耐荷メカニズムを考慮した

構造性能評価手法が導入されている。2014 年制定において検討された主な項目について、以下に紹介する。

(a) SRC 棒部材のモデル化

SRC 棒部材は、一般にひび割れ、鋼材の降伏、かぶりの剥落、鉄筋の破断、鉄筋・鉄骨の座屈、コンクリートの圧壊などが順次発生して終局に至る挙動を示す。したがって、これら材料の非線形特性を考慮に入れる必要がある。これらの現象をマクロ的に考慮に入れた線材モデルでは、図-14 に示すように、曲げモーメントと部材角の関係で表されている。モデルでは、M 点（最大曲げモーメント）および N 点（終局）が、それぞれ軸方向鉄筋と鉄骨の局部座屈に対応している。これらを算出するために、帯鉄筋やかぶり等部材諸元や荷重条件によって鉄筋と鉄骨の座屈モデルが選択できるようになっており、特に、例示された座屈モデルから導出される具体的な算定式と精度の検討結果が、改訂資料⁹⁾に示されている。

M 点について、帯鉄筋とかぶりコンクリートに拘束された鉄筋の座屈モデルを仮定することで算出している。RC 部材および SRC 部材の交番載荷実験結果に対して適用性を確認しており、せん断スパン比 3.0~7.0, 鋼材比 0.6~5.0%, 鉄骨鉄筋比 1.3~10, 帯鉄筋比 0.042~1.66%,

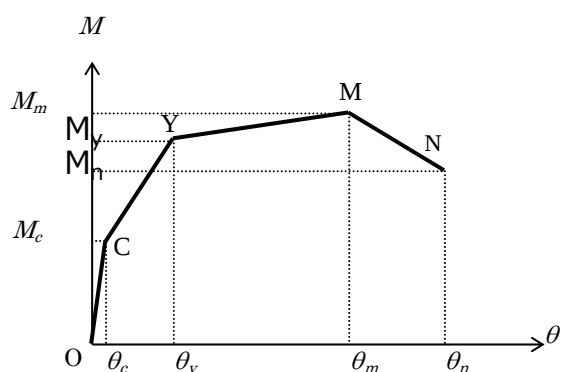
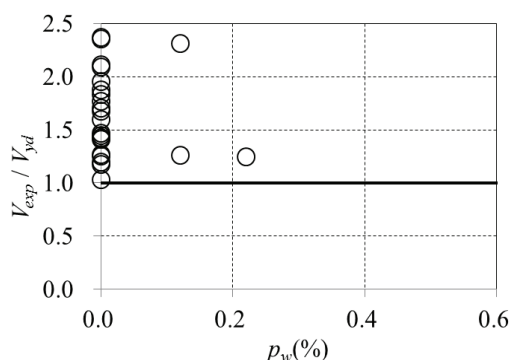
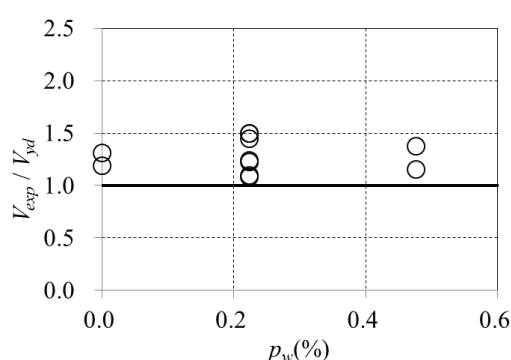


図-14 鉄骨鉄筋コンクリート部材のモデル化(曲げモーメントと部材角の関係)⁵⁾

M_c : 曲げひび割れ発生時の曲げモーメント
 M_y : 降伏時の曲げモーメント
 M_m : 最大曲げモーメント
 M_n : 終局曲げモーメント
 θ_c : 曲げひび割れ発生時の部材角
 θ_y : 降伏時の部材角
 θ_m : かぶりコンクリートはく落点（最大曲げ耐力時に相当）
 θ_n : 鉄骨の局部座屈点（終局耐力時に相当）



(a) 単純支持された SRC 梁⁷⁾



(b) 両端固定支持された SRC 梁^{8),9)}

図-15 実験値と式(1)による比較

作用軸力 $0 \sim 6.3 \text{ N/mm}^2$ ，軸方向鉄筋の直径 $10 \sim 35 \text{ mm}$ が適用範囲とされている。

一方，N 点については，コアコンクリートに拘束された鉄骨フランジの支持条件，座屈形状を仮定して算出する．SRC 部材の交番載荷実験と FEM 解析の結果に対して適用性を確認しており，普通強度材料の使用を前提として，せん断スパン比 $3.0 \sim 6.0$ ，鉄骨のフランジ幅厚比 $6.0 \sim 12.5$ ，作用軸力 $0 \sim 3.0 \text{ N/mm}^2$ を適用範囲としている。

(b) せん断耐力の算定式

土木学会複合構造標準指方書では，SRC部材のせん断耐力について，鉄骨の貢献度⁹⁾に，修正トラス理論に基づくRC棒部材としての貢献度⁹⁾を累加した算定式が示されている．すなわち，鉄骨およびスターラップは降伏後も負担せん断力を維持し，また鉄骨とコンクリートの付着は小さいと想定して，RC棒部材と鉄骨が負担するせん断耐力を個々に算定し，それらを累加する方式としている。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{ygd} \quad (1)$$

ここに， V_{yd} ：棒部材の設計せん断耐力， V_{cd} ：せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力， V_{sd} ：せん断補強鉄筋により受け持たれる設計せん断耐力， V_{ygd} ：鉄骨部分により受け持たれる設計せん断耐力，である．すなわち，充腹形鉄骨を用いる場合は，RC 棒部材に対する設計せん断耐力式⁹⁾に，鋼材ウェブの鋼材の設計せん断降伏強度を用いて算出される V_{ygd} を加算する．なお，鋼管被覆構造あるいは充填鋼管被覆構造の場合は，これを無視することとなっている。

図-15(a)に単純支持 SRC 梁の実験⁷⁾から得られたせん断耐力 V_{exp} ，および図-15(b)に両端固定支持 SRC 梁の実験から得られたせん断耐力 $V_{exp}^{8),9)}$ ，との比較に示す．いずれの固定条件においても，式(1)による算定値は，安全係数を考慮することで V_{exp} の下限値を包含していることが確認されている．このことから，せん断力に対する照査に記載する棒部材の設計せん断耐力（式(1)）は，部材，支持条件等に依存せず，全ての SRC 棒部材に適用できることを想定している。

一方， a/d や支持条件が明確な場合には，より合理的に設計せん断耐力を算定できるように式(2)(3)を適用してもよいこととしている．これは，単純支持 SRC はりにおいて，鉄骨部分により受け持たれる設計せん断耐力は，算定される V_{ygd} と α の積であらわされる．この，鉄骨によるせん断力に対する補強効果を示す係数 α について，鉄骨比およびせん断スパン比による効果を明確にした形式となっている。

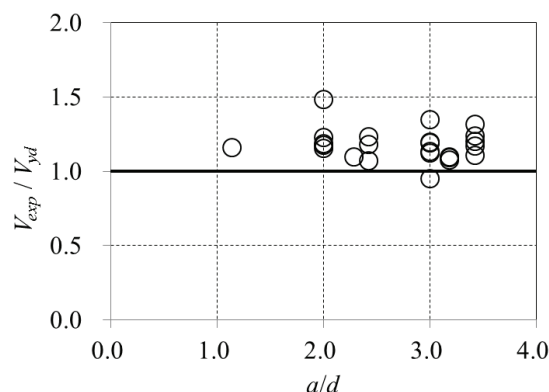


図-16 単純支持 SRC 梁の実験値⁷⁾と式(2)(3)の比較

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} + \alpha \cdot V_{ygd} \quad a/d \geq 2.0 \quad (2)$$

$$= V_{cd} + \alpha \cdot V_{ygd} \quad 0.5 \leq a/d < 2.0 \quad (3)$$

ここに， V_{cd} ：せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力， V_{ygd} ：鉄骨部分により受け持たれる設計せん断耐力， $\alpha = (0.4k + 2.3) / a/d \leq 2.5$ ($2.0 \leq k \leq 7.0$ かつ $1.0 \leq a/d \leq 3.5$)， k ：鉄骨比（部材の断面積に対する鉄骨の断面積の比）， V_{cd} ：鉄骨を用いない棒部材の設計せん断圧縮破壊耐力，である。

図-16 は，単純支持 SRC 梁の実験⁷⁾から得られたせん断耐力 V_{exp} と，式(2)(3)の算定値を比較したものである．式(2)(3)は，安全係数を考慮することで概ね V_{exp} の下限値を概ね包含している。

(3) 今後の課題

土木構造物への適用を想定した SRC 構造の研究は少なく，現状では RC 構造を参考にして構造細目を定められている．したがって，最小鉄筋量や最小配置間隔などは，構造特性の観点から見直す余地が残されている。

線材モデルでは，部材の変形性能を算定する際に，接合部からの鋼材の伸び出しの影響が十分に検討されていない．実験データが少ないため，現状では安全側の実験回帰式が用いられている．例えば，フーチングと接合される鉄骨鉄筋コンクリート柱では，フーチング内部の鋼材にも柱基部と同程度の大きな塑性化が生じているため，変形性能に及ぼす影響は少なくない。

せん断耐力の算定では，RC 部材を対象とした複数の算定式を基に開発された経緯がある．それぞれ異なる精度で評価されている現状や，接合部からの抜け出し，鉄骨，鉄筋，コンクリートなど構成する材料による補強効果は相互に関連しており，RC，SRC 部材の破壊現象を忠実に再現できるメカニズムに即した評価式の構築が求められる。

4. SRC 部材に関する最近の取り組み

SRC 部材の損傷過程と耐荷メカニズムに関する、土木分野における最近の取り組みとして、図-17 に示す通り、作用する曲げモーメント分布が支間中央で反極点を有する荷重条件における SRC 部材の事例を紹介する^{8,9)}。なおこの場合、図-18 に示す通り、軸方向鉄筋のひずみが降伏に達しないまま、せん断力-層間変位関係において変位の増加に対する荷重増加の割合が鈍化する折れ曲がり点に達する。この折れ曲がり点の荷重でとしているせん断耐力 V_{ep} に達した以降も、高い荷重を保持したまま変位の増加する特徴を有する。

図-17 では、有限要素解析によるコンクリートの最小主応力分布に対するフランジ幅の影響を示している。フランジ幅を小さくすることで、すべての層で最小主応力の大きさおよび試験区間両端の圧縮縁を結ぶ最小主応力の流れる方向と垂直な方向の幅が大きくなることわがかる。一方、図-18 に載荷試験において計測された、鉄骨

フランジ幅が異なる SRC5(フランジ幅が大きい)と SRC6(フランジ幅が小さい)のせん断力-層間変位関係を示す。また、図-19 に、SRC5(フランジ幅が大きい)の載荷試験において試験区間中央において計測された、せん断力増加に伴う最小主ひずみの発生を示す。最小主ひずみはアクリル板に貼付した 3 軸ゲージによる計測値より算出したが、アクリル板は鉄骨の上下フランジの内側、外側のコンクリートに設置している。図-19 をみると、試験区間端部の斜めひび割れが発生するせん断力 (293kN) 付近以降、同一のせん断力において、外側コンクリートで計測した最小主ひずみの絶対値が大きい。すなわち、端部の斜めひび割れ発生以降、同一の断面においても内部と側面で発生している最小主ひずみが異なっている。これは、鉄骨フランジより側面のコンクリートの荷重負担が、鉄骨フランジより内側に有するコンクリートによる荷重負担よりも大きいことを示唆しているものであり、フランジ幅の小さいケースの V_{ep} (せん断力-層間変位関係の折れ曲がり点のせん断力)が増加した

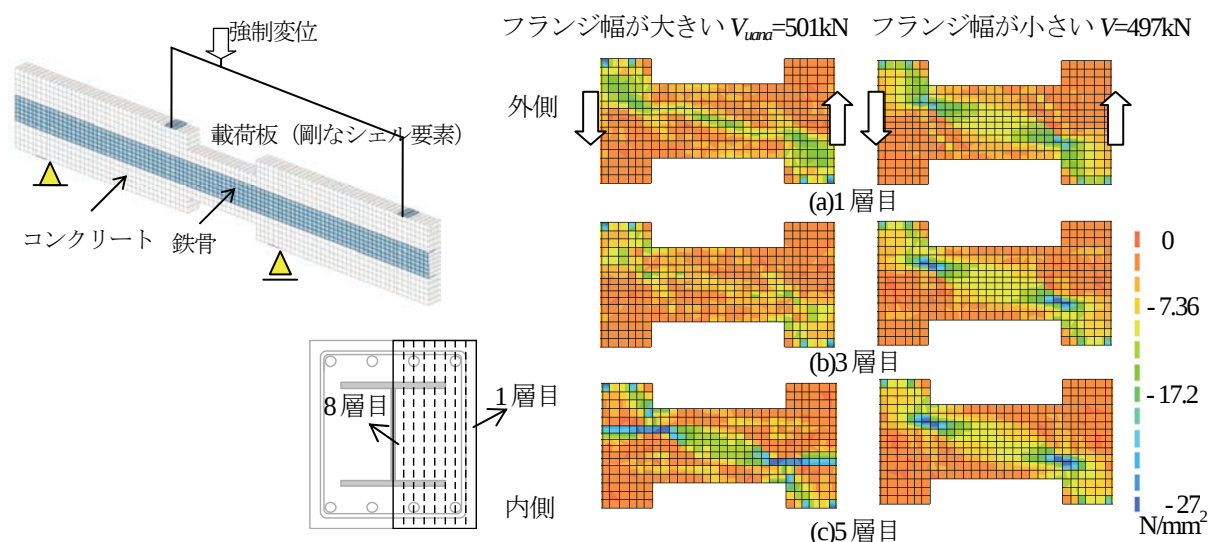


図-17 有限要素解析によるコンクリートの最小主応力分布に対するフランジ幅の影響 ($a/d=1.0$, $p_w=0.05\%$, $t_w=6\text{mm}$)

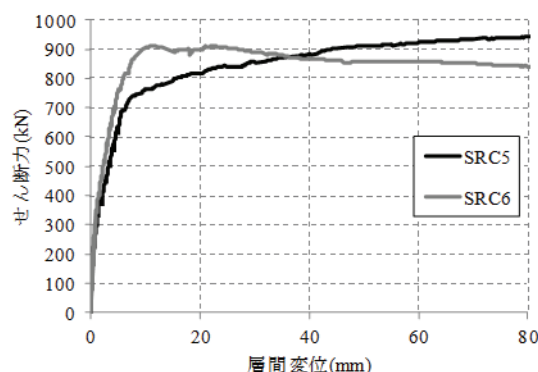


図-18 フランジ幅の違い (実験結果)

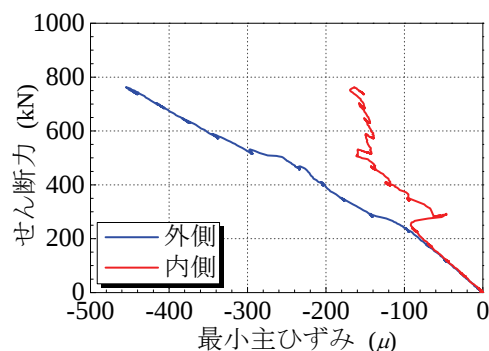


図-19 断面における最小主ひずみの位置による違い (フランジ幅が大きい)

ことが伺える。

ところで、SRC5 は鉄骨腹板のせん断降伏 (668kN) 後に剛性が大きく変化し、層間変位が大きくなるにつれ、せん断力が増加し続けたのに対し、SRC6 は鉄骨腹板のせん断降伏 (844kN) 後に剛性が大きく変化し、せん断力がやや低下しながら推移した。層間変位が 30mm 程度以内では、鋼材量 (フランジ断面積) の少ない SRC5 の方が、同一の層間変位におけるせん断力が大きい。

フランジ外側で高い荷重を保持する耐荷機構が形成される場合、 V_{ep} (折れ曲がり点の荷重) は高いがその後の荷重は徐々に低下する。一方で、フランジ内部のコンクリートにおいて、高い荷重を保持する耐荷機構が形成される場合、 V_{ep} (折れ曲がり点の荷重) 以降の荷重は徐々に増加したことが分かる。すなわち、鉄骨フランジ内部に高い応力を負担する機構が形成される場合と、鉄骨フランジ外で高い応力を負担する機構が形成される場合で、剛性の観点で折れ曲がり点、およびその後の挙動への効果が異なった。SRC 部材の有する性能をより活用するためには、鉄筋・鉄骨の座屈による終局状態の推定など、それぞれの負担分に対する鉄骨とコンクリート、スターラップの耐荷力および変形に対する貢献度について、破壊現象を忠実に再現できるメカニズムに即した評価式の構築が求められる。

5. まとめ

鉄骨鉄筋コンクリート構造は、鉄筋と鉄骨の組み合わせによって様々な断面と力学的特性を有することができる。このことから、力学的観点に基づく限界状態を設定し、力学モデルに立脚した評価手法によって性能照査を行うことが合理的であり、これによって鉄骨鉄筋コンクリート構造の多様性と構造上の利点を活かした設計が期待される。とりわけ、「せん断」の取り扱いでは、一般の RC 部材と異なり、耐荷力に達した以降の塑性変形領域においても鉄骨により耐荷力が保持されることがわか

っている。SRC 部材の冗長性を活用していくためにも、鉄筋、コンクリート、鉄骨という材料それぞれにおけるひび割れ、降伏、座屈といった損傷イベントの組み合わせに基づく SRC 部材の損傷評価の標準化、およびこれに基づく限界値の設定について議論する時期にきていると考える。

謝辞：本稿の一部は「複合構造物設計標準に関する委員会」にて情報提供頂き、また、「土木学会複合構造物の耐荷メカニズム研究小委員会(H212)」において議論頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会：鋼・コンクリート複合橋梁の最近の進歩，土木学会，2001.11
- 2) 構設史編集研究会編：鉄道構造物を支えた技術集団，(社)日本鉄道施設協会，2009.9
- 3) 鉄道総合技術研究所編：SI 単位版 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，2002.12.
- 4) 土木学会複合構造委員会:2009 年制定複合構造標準示方書，2009.12
- 5) 土木学会複合構造委員会:2015 年制定複合構造標準示方書，2015.5
- 6) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書[設計編]，2013.3.
- 7) 村田清満，池田学，渡邊忠朋，戸塚信弥：鉄骨鉄筋コンクリート部材のせん断耐力，土木学会論文集，No.626/I-48，pp.207-218，1999.7.
- 8) 中田裕喜，渡辺健，谷村幸裕，岡本大，池田学：逆対称曲げを受ける鉄骨鉄筋コンクリートのせん断耐力に関する検討，第9回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，pp.347-354，2011.
- 9) 中田裕喜，渡辺健，田所敏弥，池田学，岡本大：逆対称曲げを受ける鉄骨鉄筋コンクリートはりの応力状態と鋼材によるせん断補強効果について，第10回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，pp.10-1-10-8，2013.

RESCENT DEVELOPMENTS AND CHALLENGES OF SRC STRUCTURES IN CIVIL ENGINEERING

Ken WATANABE

The development of design-codes and accumulation of study results has been strong and weak points compared with steel or reinforced concrete (RC) structures, and it enable engineers to apply steel-reinforced concrete (SRC) members in to bridges structures. This paper summarized the detail of SRC members used as railway structures. In addition, the paper introduces rescent developments and challenges of design codes and researchs in civil engineering.