

(6) 国鉄の鉄骨鉄筋コンクリート構造物設計指針について

国鉄 ○稲葉紀昭 岡田安弘

1. まえがき

国鉄における鉄骨鉄筋コンクリート構造物（以下SRC構造物）の設計は、昭和51年11月に制定された「SRC構造物設計指針」に基づいて行われてきた。この設計指針は途中一部変更されたものの制定以来10年近くが経過しており、この間の各種SRC構造物の実績、部内・部外における各種実験研究と開発の成果等をふまえ、より合理的で経済性に優れた内容にすべく改訂が要望されるに至った。このため国鉄では昭和59年度から土木学会に研究委託を行い、「SRC構造物設計標準に関する委員会」（委員長：田島二郎埼玉大学教授）を設置して2年間にわたり調査研究を行い、昭和61年3月にその最終報告をまとめた。

今回改訂の基本方針について主なものを列挙すると次のとおりである。

(1) 国内、欧米諸国の最近の動向をふまえ、前指針で用いていた許容応力度法による設計手法を、より斬新的な終局・使用・疲労の各限界状態に対して安全性を検討する限界状態設計法に移行する。

(2) 断面耐力の算出に従来からの累加強度方式を採用すると、実変形や実応力が想定できないこと、ひびわれや疲労の検討では応力度を算出する必要があること、H形鋼埋込み桁の終局強度の算定では適合性に欠けること、などの理由により断面耐力の算出には、鉄骨と鉄筋コンクリートの合成方式を採用することとした。

(3) SRC構造物の構成材料が塑性状態となっても、合成方式が成り立つ前提としての鉄骨および鉄筋の配置等に関する構造細目を構造形式別に定めた。

(4) 安全度は断面力の算定に使用する各種荷重に、それぞれの係数を乗じて確保することとした。この荷重の組合せで用いる係数は、荷重および断面耐力のばらつきを確率論的に取扱い、これまでの方法で設計された実構造物とキャリブレーションし、安全性にあまり差が生じないように整合をとりながら求めている。

以下に国鉄で採用されているSRC構造物の簡単な紹介と新しいSRC設計指針の要点について概説する。

2. 国鉄におけるSRC構造物の現況

最近の鉄道建設では、市街地や河川などで断面制限や架設法の制約、施工期間の短縮化、振動や騒音の軽減などSRC構造物に適した条件が多くなり、その需要は増大する傾向にある。国鉄におけるSRC構造物の主なものには、橋桁・橋脚・駅部などのラーメン高架橋などがある。

橋桁では、主桁の鉄骨に圧延H形鋼または溶接プレートガーダーを使用し鉄筋コンクリートと合成させた図-1に示す上路式のH形鋼埋込み桁、図-2に示す下路式のSRC桁が主体で、スパンが比較的短く桁高制限の厳しい橋梁に使用される。H形鋼埋込み桁は鉄骨の下フランジを露出させ、その間に吊り型枠を設置して支保工なしで施工できる。最近では支間の長い割に桁高を小さくできる連続桁構造として使用する機会も多い。

橋脚では、場所が狭あいで比較的背の高い場合にSRC構造が採用される。図-3に示す東北新幹線舟渡高架

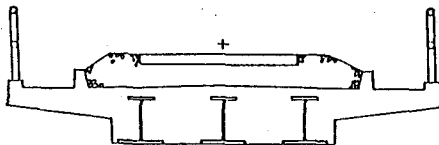


図-1 H形鋼埋込み桁

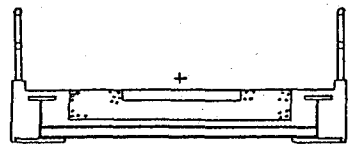


図-2 下路SRC桁

橋では、SRC柱脚の鉄骨のみで上部工を支えておき、後で柱脚のコンクリートを打設する工法を採用し工期を大幅に短縮した例もある。

仙台、盛岡、赤羽等の各駅部高架橋では、SRC構造として柱・はりの断面を小さくし、柱間隔を広げ駅の機能を向上させるケースも多い。図-4に赤羽駅の例を示す。

最近、連続H形鋼埋込み桁とSRCでできた橋脚を一体化してラーメン高架橋とした新しいタイプを開発したが、このタイプはシューを省略できストッパーを設けなくとも所要の耐震性が確保でき、施工性、美観的にも優れている。図-5にその例を示す。

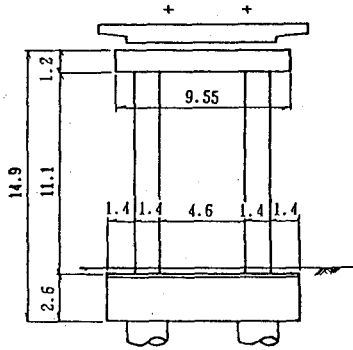


図-3 舟渡高架橋橋脚

3. 改訂されたSRC設計指針の要点

前述の基本方針に基づき改訂された指針の要点について概説する。

3.1 適用の範囲

新しい指針ではH形鋼埋込み桁、下路SRC桁等の桁についても適用することとした。最近使用頻度の多い鋼管の中にコンクリートを充填した構造については、コンクリートの充填度、

コンクリートと鋼管の付着、細長比の大きい場合の座屈耐力等確かめようとして柱材としてのみ本指針を準用してよいこととした。通常のSRC構造物では、鋼材量の過大あるいは過小によってコンクリートが完全に充填できないなどの施工性の問題、ひびわれの発生など耐久性の問題、靱性の低下など種々の不都合が生じるおそれがあるため、おのずから鋼材量を適正な範囲内にする必要があるが、本指針では実構造物の実績も踏まえて鋼材比率は1~8%、鉄骨鉄筋比は10以下とすることにした。

3.2 設計の基本

構造物の設計は、弾性理論に基づいた構造解析により求められた断面力を用いて応力度を計算し、荷重の組合せにより割増しされた許容応力度以下となるように設計する許容応力度法が従来から広く用いられてきた。しかし安全度の根拠に不明確さが存在しているなどの指摘があり、我国においても、既に限界状態設計法に移行している欧米各国に歩調を合わせて導入すべく検討が進められている。本指針が限界状態設計法に移行した理由は上記の動向に加え、前指針においても終局強度をもととした累加強度方式を採用し、比較的終局強度設計法に慣れていること、荷重係数や耐力の低減係数を決定するための理論やデータが整い、より合理的な係数が設定できる状況になったことなどのためである。

本指針の断面耐力の算出には鉄骨と鉄筋コンクリートの合成方式を採用することとしたが、ここでいう合成方式とは、終局限界状態においても鉄骨および鉄筋コンクリートが一体として働くことを前提として、1)コンクリートおよび鉄骨、鉄筋の応力-ひずみ曲線を理想的な状態として安全側に簡略化する、2)維ひずみは中立軸からの距離に比例する、3)コンクリートの引張応力は無視する、と仮定して鉄筋コンクリートと同様の方法で求めるものである。合成方式と従来の累加強度方式によってそれぞれ求めた断面耐力を比較した

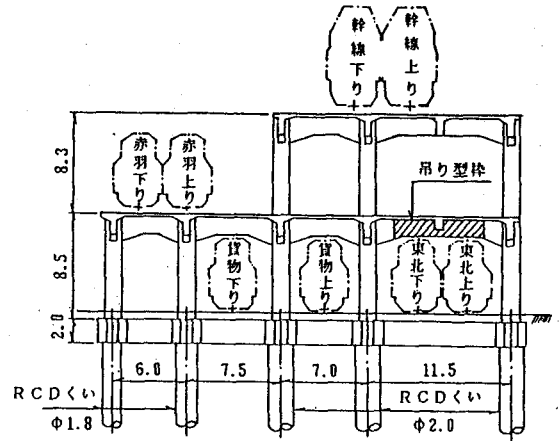


図-4 赤羽駅高架橋立体交差部

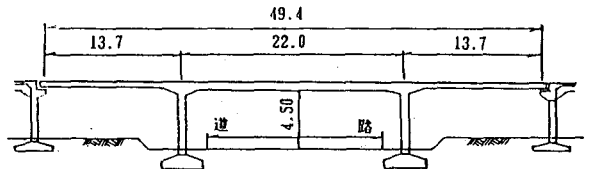


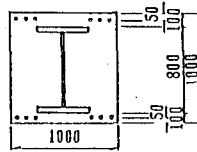
図-5 石塚架道橋

一例を図-6に示す。前者はMの影響がNより大きい範囲で後者より、より大きな耐力を示している。

3.3 荷重の種類および材料とその品質

設計に考慮する荷重の種類はRC標準¹⁾によるが、温度変化や乾燥収縮のように構造系として内的に釣合うものは終局耐力にあまり影響を与えないと考えられるため、通常のSRC構造物では今までと同様考慮しない。死荷重を求めるのに必要なSRC構造物の単位重量は、これまでの施工実績から構造形式別に規定し

計算の条件



鉄筋
I-F 500 × 20
I-W 750 × 9
I-F 500 × 30
鉄筋
 $A_{s1} = 30 \text{ cm}^2$
 $A_{s2} = 30 \text{ cm}^2$

$\sigma_{ck} = 270 \text{ kg/cm}^2$
($\times 0.85$)
 $\sigma_{17} = 3200 \text{ kg/cm}^2$
(SM 50)
 $\sigma_{17} = 3500 \text{ kg/cm}^2$
(SD 35)

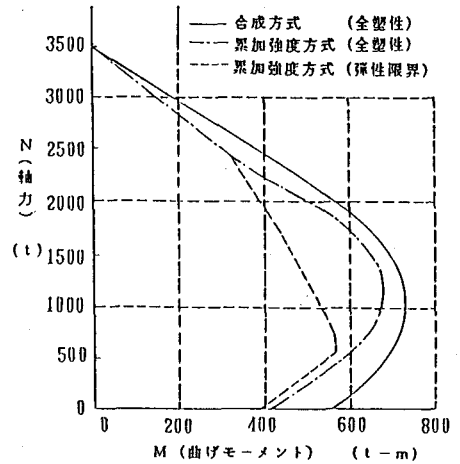


図-6 合成方式と累加強度方式のM-N線図の比較

た。コンクリートの設計基準強度は、鋼材強度との釣合い、ひびわれや疲労の影響を考慮し、これまでの使用実績も含めて240~400 kg/cmの範囲を標準としている。鉄筋は、昨年末改訂された新しいJIS G 3112(1985.11.1)によっている。

3.4 終局限界状態の検討

曲げモーメント、軸方向力などの各断面力が作用する部材の終局限界状態に対する安全性の照査は、部材の着目する位置の断面耐力がその位置の各種荷重に係数を乗じて求めた断面力より大きいことで確かめる。断面力の算出は、終局限界状態を対象としていることから塑性理論による解析もありうるが設計理論として一般化するにはまだ問題があり、すべての構造物について実用化されていないため、豊富な実績をもち信頼性が確立されている弾性理論によることとした。

(A) 断面力の算出

断面力は荷重に表-1に示す荷重の組合せで用いる係数を乗じて求めることにした。この係数は構造物に作用する荷重および断面耐力を確率、統計的に取扱い二次モーメント法²⁾によって求めた。係数の計算は、各荷重の組合せごとに式-(1)を設定して行った。

$$\phi R_n = \sum r_i \cdot X_{ni} \quad \dots (1)$$

ここに ϕ : 耐力の低減係数

R_n : 耐力の公称値

r_i : 荷重係数

X_{ni} : 荷重の公称値

表-1の値は、この荷重係数と断面耐力の低減係数を取り扱いやすいようにひとつにまとめて求めた係数である。係数を求めるにあたっての荷重および耐力の統計量は表-2のように仮定している。同表の仮定のもとで二次モーメント法における安全性指標 β の値を荷重の組合せに応じて4, 3.5, または3と設定し、荷重係数および耐力の低減係数を算出した。表-2に

表-1 荷重の組合せで用いる係数

荷重の種類 構造物の種類	死荷重	列車荷重	衝撃	遠心荷重	車両積荷重	制動荷重 または 制動荷重 または 制動荷重	風荷重	ローディング 荷重	地震の影響
山形埋込み	1.7	1.7	1.7						
上陸SRC桁	1.55	1.55	1.55	1.55	1.50				
下陸SRC桁	1.25						1.55		
高らん	1.0								1.35
ラーメン橋	1.7	1.7	1.7						
	1.25	1.25	1.25			1.35		1.35	
	1.25	1.25	1.25	1.25	1.35		1.55		
	1.0	1.0	1.0						1.35
ビームスラブ式 ラーメン橋	1.7	1.7	1.7						
	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5				
スラブ式 ラーメン橋	1.25	1.25	1.25			1.35		1.35	
	1.0	1.0	1.0						1.35

注1) 表中の荷重の横方向の組合せで考える。

注2) *印の荷重は組合せる方が危険な場合に用いる。

注3) **印の荷重は片持スラブに対して用いる。

おける統計量のうち、1)耐力については、曲げ耐力の算定式を用い、その算定式に含まれる変数の統計量を各種文献や計測データを参考にして求め定めている。2)死荷重については、構造物本体の比較的バラツキの小さい固定死荷重とバラツキが大きいバラスト等の付加荷重に分けて検討した後ひとつにまとめて表示した。3)列車荷重、衝撃については、走行列車の軸重の実測値から定めている。

表-2 荷重および耐力の統計量

種 別	平均値/公称値	変動係数	確率分布型
耐 力	1.2	0.13	正 規
死荷重	1.0	0.10	正 規
列車荷重、衝撃	1.0	0.08	対数正規
追心荷重	1.0	0.08	対数正規
車両軌荷重	1.0	0.05	正 規
制動荷重又は始動荷重	1.0	0.05	正 規
ロングレール縦荷重	1.0	0.05	正 規
風荷重	1.0	0.13	極値Ⅰ型

地震の影響の係数1.35はSRCのじん性率が5程度確保されることを前提にして、大地震に対しても十分安全であるように定めたものである。なお、中地震〔地表面加速度100gal、応答加速度250gal-震度階Ⅳ（中震）〕のやや強い程度で建造物の寿命中に数回程度遭遇する地震〕の場合、1.35の係数を用いて算出した断面で試算すると、コンクリート、鉄筋、鉄骨の各応力度は弾性範囲内にある。本指針では各種実験データ³⁾を参考に、じん性率5程度となるように構造細目を定めている。

連続桁などの場合には、図-7のように当該スパンと同じ死荷重が載荷されると着目する位置の曲げモーメントが過小に評価されるおそれがあるため、図-7に示す係数を用い他径間の死荷重を割引くものとした。

(B) 材料の設計強度

終局限界状態の検討に用いる設計強度は、コンクリートは材令28日における設計強度、鉄筋はJIS G 3112に定められた降伏点強度および鉄骨は「鋼標準⁴⁾ 4.2」に定められた降伏点強度をそれぞれ用いることにしている。摩擦接合用高力ボルトについては「鋼標準 4.3」のすべりに対する安全率を1.0として定めている。

(C) 曲げモーメントと軸方向力が作用する部材の断面耐力の算出

終局限界状態における断面の応力度分布は、塑性中立軸が腹板にある場合、図-8のようになると考えられる。すなわち鉄骨に対しては塑性域に達していない部分は三角形分布、コンクリートは放物線分布となる。しかし、このような分布形をもとに耐力を算出するのは計算が繁雑となるので、図-9のようにそれぞれの応力分布を長方形と仮定した。実構造物で両者の曲げ耐力を比べてもほとんど差がなく計算誤差は2%以内である。曲げ耐力 M_u は塑性中立軸の位置を力の釣合い条件から求め、次に塑性中立軸まわりの曲げモーメントを算出することにより求めることができる。

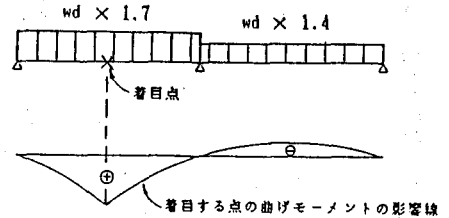


図-7

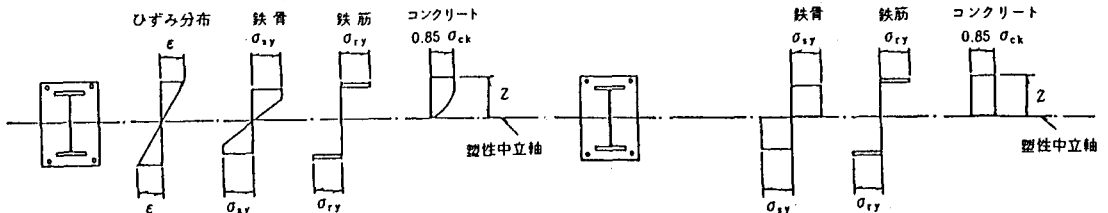


図-8

図-9

なお、軸方向力が作用する柱部材で細長比が大きい場合には座屈による低下を考えなければならないが、本指針では低下させなくてもよい細長比の限界値を35と与えている。

(D) セン断力が作用する部材の算定

部材の着目する断面のせん断耐力は、鉄骨部分と鉄筋コンクリート部分のそれぞれについて、せん断耐力がせん断力よりも大きくなるように算定することとした。前指針では鉄骨部分と鉄筋コンクリート部分のせん断力の分担は、両者の曲げ剛性の比（断面係数比）で求めていたが、今回の改訂では曲げ耐力比によることとした。この場合、水平せん断力によって鉄骨と鉄筋コンクリートの付着がきれてせん断耐力が低下しないよう構造細目で鉄骨、鉄筋の配置等について規定している。

曲げモーメントとせん断力が同時に作用する部材は、両者の力の相互作用により全体の終局耐力が低下するおそれがあるので検算することとした。鉄骨腹部の形状は、SRCのじん性を考えてタイプレート形式は使用しないこととし、ひびわれ発生後も大きな耐力が期待できる充腹形を使用するのを基本とした。

(E) ねじりモーメントが作用する部材の検算

ねじりモーメントの作用が小さい部材は、前指針と同様にコンクリートによりねじりに抵抗するものとしている。ねじりモーメントの作用が大きい部材は、従来コンクリートにスターラップ、軸方向鉄筋によるねじり補強鉄筋を加えて抵抗させることにしていたが、今回の改訂では鉄筋がI形断面と閉合形断面について国鉄部内の実験結果^{5)~8)}をもとに、鉄骨自体のねじりに対する効果もとり入れてねじり耐力式を評価した。また、曲げモーメントとねじりモーメントが同時に作用する部材、せん断力とねじりモーメントが同時に作用する部材の検算式を示した。

3. 5 使用限界状態に対する検討

使用限界状態では桁のたわみ、構造物の変位およびひびわれについて検討を行うことにしている。使用限界状態では弾性挙動が問題となるので、従来と同様弾性理論によって断面力、たわみおよび変位を算出している。この場合荷重の組合せて用いる係数は1.0とした。

ひびわれの検討は前指針と同様に、鉄筋または鉄骨の引張応力度を制限することにより間接的にひびわれ幅を規制することとした。ひびわれを考慮する部材の環境条件は、常時湿潤状態および乾湿が繰返される場合のみ行ってきたが、本指針が限界状態設計法をとり入れることによって部材の曲げ引張応力度が従来より大きくなるため、乾燥状態にある場合（スラブの下側、はりの下側など）についても検討を行うものとした。

3. 6 疲労限界状態に対する検討

SRC桁の曲げ疲労試験⁹⁾によれば、通常のSRC構造物にかかる荷重範囲では、鋼構造物、RC構造物と特別異なる疲労性状は認められないため、それぞれ多くの実験結果をもとに定められている鋼標準、RC標準によりその安全性を検討することとした。コンクリートの疲労強度は設計基準強度の50%程度確保でき、通常のSRC構造物がこれを超えることはほとんどないため、コンクリートの疲労は考慮しなくてよいこととした。

3. 7 座屈に対する検討

合成後は鉄筋コンクリートによる補剛効果が十分期待できるので、一般的に座屈の検討は不必要であるが合成前の鉄骨については鋼標準により座屈の検討を行っている。本指針の設計法によると、本来座屈の検討についても限界状態設計法で行うべきであるが、鋼標準の関連する条項を根本的に見直す必要があるため、従来と同じ許容応力度法により検討するものとしている。

3. 8 一般構造細目

SRC構造物は、鉄骨と鉄筋が密実なコンクリートで充填されていることを前提として成り立っているため、閉そく率¹⁰⁾および鉄骨と鉄筋のあきや鉄筋間のあきの確保などの規準を示している。また、主要部材の鉄骨の添接は、鉄骨の設計強度に部材の断面力と断面耐力の比を乗じた値を用いて設計するのを原則とした。ただし、断面耐力が設計強度の75%以下であっても鉄骨の設計強度の75%の強度をもつように設計するものとしている。鉄骨部材のフランジおよび腹板の添接における高力ボルト本数を、各種の断面力の組合せに応じて算出式を規定している。

3. 9 部材の設計

SRCスラブ、はりおよび柱部材の具体的な設計法について規定している。はり、柱については地震の影響が小さい部材、地震の影響が大きい部材に分け、ラーメン高架橋のはり、柱のように地震の影響を強く受ける部材では、大地震において大きなせん断力が働いても十分なじん性を確保できるように、スターラップ帯鉄筋量を規定している。

ラーメン隅角部の鉄骨腹板は、国鉄部内の実験結果¹¹⁾から鉄骨を被覆する鉄筋コンクリートの補強効果を考慮し、前指針より薄く設計できるよう改訂している。

柱脚アンカー部の基礎構造物への定着については、アンカーフレーム方式以外に、より経済的で施工性に優れていると思われる埋込み方式についても追加して定めている。

3. 10 構造物の設計

H形鋼埋込み桁は、腹板に孔をあけ配力鉄筋を配置した横桁のない桁と、H形鋼の相互を横桁で連結した横桁のある桁に分けて、H形鋼および鉄筋の配置などについて構造細目を規定している。

下路SRC桁の主桁の鉄骨はI形断面を用いることを原則とし、実験結果および既設計をもとに横桁の配置および床スラブの鉄筋配置などの構造細目を規定している。

4. あとがき

限界状態設計法を採用した新指針に基づき、H形鋼埋込み桁、下路SRC桁およびラーメン橋脚の既設計例と比較したところ平均10%程度の工事費が節減できた。しかし、荷重や耐力に関する係数の決定、塑性理論の設計への適用、各種断面力が同時に作用した場合の部材の耐力、鉄骨と鉄筋コンクリートの付着の確保など不明な点も多く、今後の研究に待つところが大きい。今後さらに内容の充実した指針にすべく努力を重ねていきたい。

〔参考文献〕

- 1) 国鉄建造物設計標準解説 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・プレストレストコンクリート鉄道橋 昭和58年 2月
- 2) 佐藤，林：二次モーメント法による安全係数の検討に関する一考察，構造物設計資料 N0.85，1986年 3月
- 3) 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 建築学会 昭和50年11月 第3版
- 4) 国鉄建造物設計標準解説 鋼鉄道橋・鋼とコンクリートとの合成鉄道橋 昭和58年 4月
- 5) 松岡：SRC部材の純ねじり試験，構造物設計資料 N0.57，1979年 3月
- 6) 松岡：SRC部材の曲げねじり試験，構造物設計資料 N0.58，1979年 6月
- 7) 松岡：ねじりを受けるSRC部材の設計，構造物設計資料 N0.60，1979年12月
- 8) 吉岡，小林，松本：ねじりを受けるI形鉄骨SRC部材の設計，構造物設計資料 N0.73，1983年3月
- 9) 宮田：単純梁の曲げに関する設計方法の研究－鉄道土木における鉄骨鉄筋コンクリート構造物－土木技術26巻12号，27巻 1号 昭和46年12月，昭和47年 1月
- 10) 横山：コンクリートの充てん性について，コンクリートジャーナル VOL.5，N0.10，1967年10月
- 11) 中野，吉岡，杉山，宮脇：SRCラーメン隅角部の試験，構造物設計資料 N0.74，1983年 6月