

報告

[2039] 限界状態設計法による高架橋の設計

正会員 ○竹内研一 (JR東日本 東北工事事務所)
 正会員 石橋忠良 (JR東日本 東北工事事務所)
 正会員 高木芳光 (JR東日本 東北工事事務所)
 正会員 大庭光商 (JR東日本 東北工事事務所)

1. はじめに

奥羽本線福島・山形間に新幹線からの直通列車を運行する計画が現在進行中である。これに伴い、福島駅新幹線ホームから奥羽在来線への取付部にビームスラブ式ラーメン高架橋を新設することになった。この高架橋の設計に当り、限界状態設計法を採用した。

鉄道橋における限界状態設計法を規定した図書としては、旧国鉄時代に作成された「限界状態設計法による建造物設計標準(案)」があるが、本設計もこれを基本として設計を行った。以下に本設計の概要及び結果について報告する。

2. 設計対象区間及び設計条件

設計の対象とした高架橋の概略図を図-1に示す。対象区間は、地表面からの高さ約1.6mの既設新幹線高架橋への取付部から地表面に下る約7.40mの区間である。この区間に新設される構造物として、ラーメン高架橋1橋の他に、ラーメン橋台6基、PRC桁3連、RCけた21連が計画されている。設計における一般条件は、表-1に示す通りである。

3. 設計の基本方針

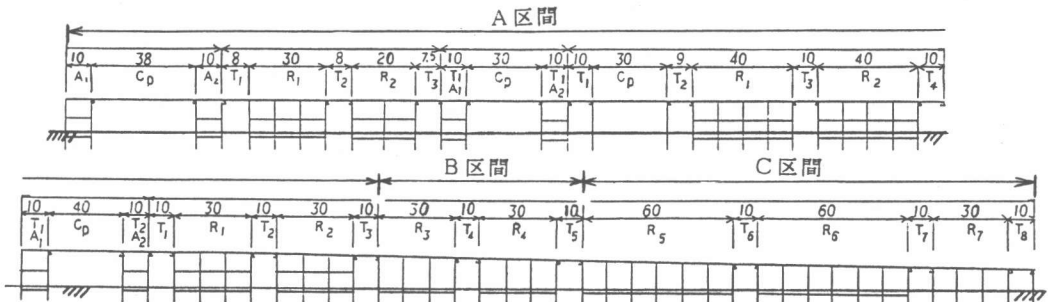
本設計では、上記構造物の設計に当り終局限界状態検討時の係数を変えた3種類の設計法(A法、B法及びC法と呼ぶ)を構造物別に適用した。A法～C法の相違は以下の通りである。

・荷重に乗ずる係数について

A法は、終局限界状態検討時の荷重に乗ずる係数が結果的に現行設計標準による設計法とほぼ対応した値となるように設定したもので、RC桁、ラーメン橋台及びA区間(図-1参照)のラーメン高架橋(H≥1.5m)に

表-1 一般条件

線路本数	単線
軌道形式	スラブ軌道
最小 曲線半径	300m
勾配	最大 33/1000 (平均 14/1000)
列車荷重	P-17標準活荷重
基礎の 種類	1柱1基礎 (場所打杭)



Ti : RC桁……限界状態設計法(A法)
 Ai : RC橋脚……限界状態設計法(A法)
 Cp : PRC桁……PRC構造物設計仕様

図-1 福島駅取付部高架橋

適用した。B法及びC法は、終局限界状態検討時の荷重に乗ずる係数をA法より小さくしたケースで、それぞれB区間（図-1参照）のラーメン高架橋（ $H=12\sim 15\text{m}$ ）、C区間（図-1参照）のラーメン高架橋（ $H<12\text{m}$ ）に適用した。

（死荷重+列車荷重+衝撃+遠心荷重）の組合せについて各法の終局限界状態検討時の荷重に乗ずる係数を、土木学会示方書の安全係数と対応させて比較したものを表-2に示す。B法及びC法は、構造物係数 γ_i をA法より小さく設定した場合に相当するものであり、本設計ではこれらをA法と併せて比較することにより、構造物の重要度の設定値の相違が結果に及ぼす影響を調べることにした。なお、学会示方書では、せん断耐力検討時に部材係数 γ_b を割増しているが、本設計ではこの割増しに相当する分をせん断耐力算定式中の係数（ $1/1.15$ ）で考慮している。これは、学会示方書の考え方によれば $\gamma_b=1.3$ とした場合に相当するものである。

・地震の影響について

構造物の設計において、地震の影響は一般に震度法により静荷重におきかえて検討している。「限界状態設計法による建造物設計標準（案）」では終局限界状態の耐力検討用の震度として、地震波に対する構造物の弾性応答加速度を構造物の変形性能に応じて低減した値を使用することとしている。しかし、変形性能をどの程度に設定すべきかは一概に判断できないため、本設計ではA法～C法で構造物の変形性能の設定を変えて設計を行い、結果に及ぼす影響を調べた。具体的には、終局限界状態検討時に地震の影響（水平震度0.25を想定）に乗ずる係数をA法～C法で、1.50,1.42及び1.35と変えて設計を行った。これらは、構造物の変形性能をじん性率で各々4.0,4.5及び5.0に設定した場合に相当させたものである。

表-2 土木学会の安全係数との対応
（死荷重+列車荷重+衝撃+遠心荷重）

	荷重係数 γ_f	構造解析 係数 γ_m	部材係数 γ_b	構造物係数 γ_i	荷重組合 せ係数 ψ	$\gamma_f \gamma_m$ $\gamma_b \gamma_i \psi$	荷重に乗 じる係数
A法	1.20	1.00	1.15	1.20	1.00	1.656	1.65
B法	1.20	1.00	1.15	1.10	1.00	1.518	1.50
C法	1.20	1.00	1.15	1.00	1.00	1.38	1.40

A法～C法の終局限界状態における荷重の組合せ毎の係数をまとめて比較したものを表-3に示す。

表-3 終局限界状態において荷重に乗ずる係数

設計法 構造物の種類 荷重の種類	限界状態設計法（A法）										限界状態設計法（B法）				限界状態設計法（C法）			
	桁			橋脚			ラーメン高架橋				ラーメン高架橋							
死荷重	1.65	1.35	1.65	1.25	1.25	1.00	1.65	1.35	1.25	1.00	1.50	1.25	1.15	1.00	1.40	1.15	1.05	1.00
列車荷重	1.65	1.35	1.65	1.25	1.25	1.00	1.65	1.35	1.25	1.00	1.50	1.25	1.15	1.00	1.40	1.15	1.05	1.00
衝撃	1.65	1.35	1.65	1.25	1.25		1.65	1.35	1.25		1.50	1.25	1.15		1.40	1.15	1.05	
遠心荷重	1.65	1.35	1.65		1.25		1.65	1.35			1.50	1.25			1.40	1.15		
車両横荷重		1.45			1.30			1.45				1.35				1.25		
制動/始動荷重					1.30			1.30				1.20				1.10		
ロングレール縦荷重					1.30			1.30				1.20				1.10		
風荷重					1.50													
地震の影響					1.50			1.50					1.42				1.35	
水圧					1.25	1.00												

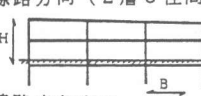
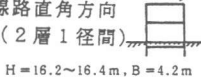

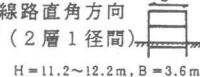
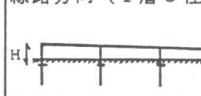
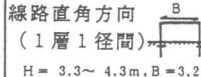
※荷重の種類毎に各列の係数を乗じ、縦に合計したものが各検討ケースとなる。

4. 設計結果の概要

限界状態設計法による設計結果を評価するに当たり、A法～C法の3種の限界状態設計法により設計したラーメン高架橋の中からそれぞれ1橋づつを選び、同一断面形状で現行設計標準による設計も併せて行い、その差異について検討を試みた。限界状態設計法各法と従来設計法の結果を比較すると、以下のことがわかる（表-4参照）。

- ① 線路方向ラーメンの上層梁スパン中央及びスラブのスパン中央は、各法とも鉄筋の疲労で決定された。本設計法で用いた疲労限界状態の検討法は、従来設計法の許容疲労応力度による制限と同じであるため、この場合の必要主鉄筋量は従来設計法と同じとなった。
- ② 線路方向ラーメンの上層梁支点部は、曲げひびわれ検討時の鉄筋応力度の制限により決定された。本設計で用いた使用限界状態（曲げひびわれ）の検討方法では、鉄筋の曲げ引張応力度の制限値が、従来設計法における“ひびわれを考慮する場合の鉄筋の許容引張応力度”より緩和されているため、全般に従来設計法による場合より必要主鉄筋量が減少している。
- ③ その他の部材（柱、線路直角方向ラーメンの各部材、線路方向ラーメンの中層梁、地中梁等）は、地震時の終局耐力で決定された。この場合、地震の影響に乗ずる係数が従来設計法の破壊の検討の場合と同じA法については結果が変わらず、係数が小さくなったB法、C法については必要主鉄筋量が減少した。
- ④ スラブにはせん断補強鉄筋を配置せず、せん断耐力はコンクリートの受け持つせん断力でもたせている。この場合、せん断耐力算定式から逆算して求まるコンクリートの許容せん断応力度に相当する値が、従来設計法の許容せん断応力度より小さくなるため、限界状態設計法各法とも従来設計法より厳しくなった。しかし、本設計の範囲では部材断面を変更するまでには至らなかった。なお、本設計においてスラブのせん断力の算定は、図-2に示すモデルにより行っている。ラーメン高架橋のスラブは、図に示すように四辺が梁によって支持されているが、モデル上は橋軸方向、橋軸直角方向にそれぞれ梁の理論を適用して計算している（但し、本設計の対象としたラーメン高架橋では、いずれもスラブが橋軸方向に長い橋軸直角方向の梁としてのみ検討を行っている）。このモデル化が最適であるとは言えないが、他に適当なものがないため今回は従来と同じこのモデル化で計算を行った。

表-4 限界状態設計法と従来設計法の比較

適用した限界状態設計法		A 法		B 法		C 法		
検討対象ラーメン高架橋の形状		線路方向（2層3径間）  線路直角方向（2層1径間）  H=16.2~16.4m, B=4.2m		線路方向（1層3径間）  線路直角方向（2層1径間）  H=11.2~12.2m, B=3.6m		線路方向（1層3径間）  線路直角方向（1層1径間）  H=3.3~4.3m, B=3.2m		
部材・部位		限界状態設計法	従来設計法	限界状態設計法	従来設計法	限界状態設計法	従来設計法	
設計結果の概要	線路直角方向ラーメン上層梁（支点部上側）	決定要因	終局（地震時）	破壊（地震時）	終局（地震時）	破壊（地震時）	終局（地震時）	破壊（地震時）
		設計曲げモーメントの比較(tm)	108.4	108.4	88.7	94.8	37.9	43.5
	線路方向ラーメン上層梁（支点部）	決定要因	使用（ひびわれ）	ひびわれ	使用（ひびわれ）	ひびわれ	使用（ひびわれ）	ひびわれ
		必要主鉄筋量 (cm ²)	35.2	42.7	31.9	38.5	46.3	56.2
	スラブ（支点部）	決定要因	終局（死列衝）	列車荷重時	終局（死列衝）	列車荷重時	終局（死列衝）	列車荷重時
		せん断力の検討	せん断応力度の許容値(kg/cm ²)	4.8	6.1	4.4	6.1	5.1
柱	決定要因	終局（地震時）	破壊（地震時）	終局（地震時）	破壊（地震時）	終局（地震時）	破壊（地震時）	
	必要主鉄筋量 (cm ²)	36.8	36.8	58.2	61.1	18.6	22.1	

※1) 限界状態設計法の許容せん断応力度は、コンクリートが受け持つせん断力を荷重係数で除した値である。

※2) 死列衝=死荷重+列車荷重+衝撃

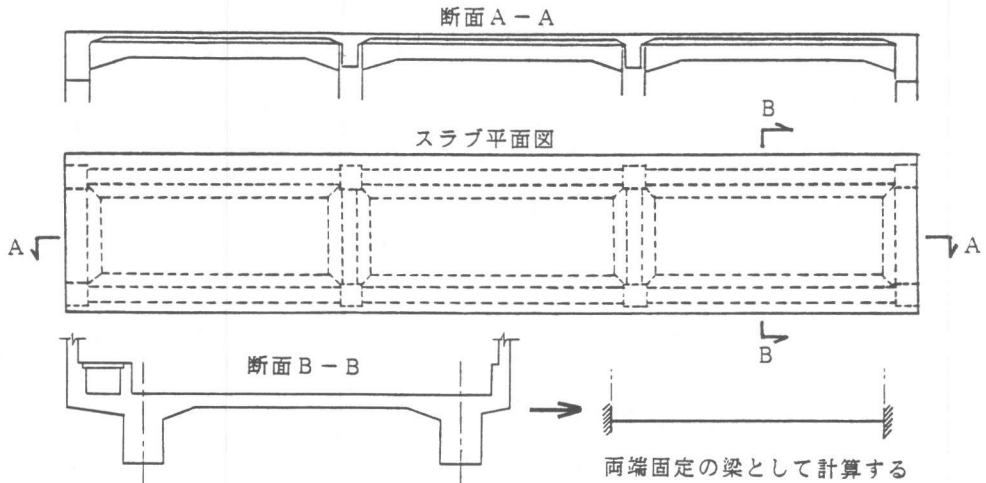


図-2 スラブの断面力算定モデル

5. まとめ

本設計の結果より、ラーメン高架橋の設計における限界状態設計法と従来設計法の相違について以下のことがわかる。

- ラーメン上層の縦梁については、条件によりクリティカルな要因（疲労、ひびわれ、破壊等）が異なることが予想されるので、限界状態設計法を導入した場合の一般的な傾向はない。断面が疲労限界状態で決まる場合には、従来設計法と基本的に変わらない。使用限界状態（ひびわれの検討）で決まる場合には、必要主鉄筋量が減少する。また、終局限界状態（地震時）で決まる場合には、構造物の変形性能を大きく設定すれば必要主鉄筋量が減少する。なお、本設計では支点部は各法とも使用限界状態で決まったが、主鉄筋量は断面寸法に影響するほど大幅には減少しなかった。
- スラブのせん断耐力は、一般に従来設計法より厳しくなることが予想される。
- その他の部材については、概ね終局限界状態（地震時）で決まることが予想されるので、構造物の変形性能の設定により必要主鉄筋量が変わる。但し、本設計の範囲では、変形性能を最も大きく設定したC法においても、必要主鉄筋量は断面寸法に影響するほど大幅には減少しなかった。

地震の影響を含む終局限界状態で決定される部材は、基本的には耐震設計の考え方に支配されるため、限界状態設計法によるラーメン高架橋の設計において実質的に問題となるのは上層梁及びスラブの設計であると考えられる。特に、スラブのせん断耐力については、従来設計法により設計された構造物に特に問題が生じていないことを考えれば、本設計で設定した“荷重に乗ずる係数”に再考の余地があるか、あるいはスラブのせん断力を算出する際に仮定したモデル（図-2）が、せん断力分布の実態を反映していない可能性も考えられる。この点については、今後設計モデルも含めた検討をしていくことが必要であると考えられる。

6. おわりに

本設計ではラーメン高架橋に限った検討しかしていないが、限界状態設計法による設計基準を整備していくためには、より多くの構造物について試設計を重ね、問題点を明らかとし解決していく必要があると考えている。