

(1) 限界状態設計法による PRC 鉄道橋
最適設計の一考察

J R 東日本 東京工事事務所 大石辰雄
 J R 東日本 東京工事事務所 木村大介
 J R 東日本 東京工事事務所 ○ 有川貞久
 ジェイアール東日本コンサルツツ(株) 小林 薫

1. 研究の目的

限界状態設計法に基いて PRC 鉄道橋の試設計を行い、「曲げ」に着目しながら引張補強鋼材の疲労特性と補強鋼材量の関係、桁高と補強鋼材量の関係について検討する。また、限界状態設計法における使用限界状態、疲労限界状態、終局限界状態の各限界状態のどの状態で補強鋼材量が決定されるかについて検討を行うことを目的とする。

2. 研究の方法

当研究のフローを図-1に示す。最初に許容応力度法で PRC 桁の設計を行う。その中から6主複線桁(ケース1)を選び、これを限界状態設計法による PRC 桁の設計に変える。PRC 桁の設計は、これを基に、断面形状をI型からT型へ変えたもの、ウェブ幅や上フランジ幅を薄くしたりする等の変更を加え、補強鋼材量の変化や各限界状態における補強鋼材量、応力度を検討する。

3. 検討ケース

2. 研究の方法で示した通り、全部でPC1ケース、PRC7ケースの合計8ケースについて検討を行った。共通条件としては、スパン30m、列車荷重EA-17、衝撃係数0.23、複線、スラブ軌道である。その他の条件については各ケース毎に異なるので表-1に示す。

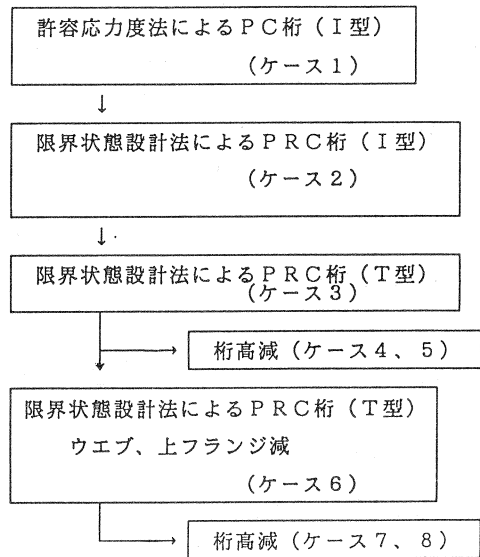


図-1 研究のフロー

単複	CASE	許容応力度法			単複	CASE	限界状態設計法											
		線路等級	主桁数	桁高(m)			桁高(m)	断面形状	ウェブ幅(mm)	ウェブ厚(mm)	上フランジ幅							
単線	参考	3	2	2.3	複線	2	1.6	I	250	400	300							
		3	3	1.6														
複線	1	1	4	2.3								3	1.6	T	450	400	300	
		1	6	1.6														

表-1 検討ケース

4. 検討条件

表-1に示した検討条件について、表-2、3に許容応力度法、限界状態設計法におけるコンクリート応力度、鉄筋、PC鋼材の制限値を示す。

許容応力度法のコンクリートの

許容応力度は部材の寸法に関係なく設定されているのに対し、限界状態設計法においては部材寸法によって制限値が設定されている。表-2には桁高1.6mの場合の各値を示す。

また、限界状態設計法においては、設計荷重作用時(列車荷重作用時)のコンクリート応力度が規定されておらず、設計の自由度が許容応力度法よりも広がるものと考えられる。

引張補強鋼材の強度と、引張ひずみの制限値は両設計法とも同じである(表-3)。

表-4に荷重に乗じる係数を示す。許容応力度法では荷重に対する割増し率がどの荷重に対しても一定なのに対し、限界状態法では自重、固定死荷重、付加死荷重、活荷重、衝撃荷重と各々の荷重の種類において割増し率が定められており、荷重の特性に応じた設計が可能となる。

図-2に、各ケースの桁断面、表-5に試設計結果による材料集計表を示す。

	コンクリート強度	許容応力度法		限界状態設計法	
		上縁	下縁	上縁	下縁
プレストレス導入直後	400	-15	180	-26.8	235
	500	-18	200	-30.4	294
全静荷重作用時	400	140	0	160	-26.8
	500	160	0	200	-30.4
設計荷重作用時	400	140	-10	-	-
	500	160	-12	-	-

表-2 コンクリート応力度の制限値(単位: kgf/cm²)

破壊荷重時 終局限界状態検討時	制限値
コンクリートの圧縮ひずみ	0.0035
コンクリートの圧縮耐力	0.85σ _{ck}
PC鋼材引張ひずみ	0.0015
PC鋼材引張耐力	0.93σ _{pu}
鉄筋引張ひずみ	無制限
鉄筋引張耐力	降伏点強度

注: 許容応力度法、限界状態設計法共に同じ

表-3 破壊荷重作用時および終局限界状態での制限値

PC (許容応力度)			PRC (限界状態)			
設計荷重時	$1.0 \times (Md_0 + Md_1 + M(L+i))$	複線	使用限界状態	ひびわれ(耐久性)	$1.0 \times (Md_0 + Md_1 + M(L+i))$	載荷
			疲労限界状態	ひびわれ(外観)	$1.0 \times (Md_0 + Md_1 + M(L+i))$	単線
				たわみ	$0.5 \times M(L+i)$	単線
				PC鋼材	$0.5 \times M(L+i)$	単線
				鉄筋	$0.5 \times M(L+i)$	単線
破壊荷重時	$1.7 \times$ 設計荷重時 モーメント	複線	終局限界状態	コンクリート	$0.5 \times M(L+i)$	単線
					$1.1 \times Md_0 + 1.1 \times Md_1 + 1.1 \times Md_2 + 1.1 \times M(L+i)$	複線

表-4 複線橋設計の場合に荷重に乗じる係数

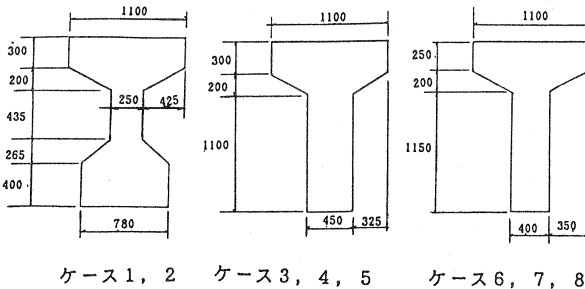


図-2 桁断面図

CASE	種別	断面積	PC鋼材	鉄筋
1	PC	1.0222	12T15.2 5本	-
2	PRC	1.0222	12T15.2 3本	D25 7本
3	PRC	0.98	12T15.2 3本	D25 4本
4	PRC	0.9575	12T15.2 3本	D29 5本
5	PRC	0.935	12T15.2 3本	D29 5本
6	PRC	0.885	12T15.2 3本	D25 4本
7	PRC	0.865	12T15.2 3本	D25 5本
8	PRC	0.845	12T15.2 3本	D25 5本

表-5 材料集計表

5. スパン中央断面の検討

5-1. 検討用疲労荷重、及び補強鋼材の疲労特性
 今回の検討では複線、1級線、スパン30mで行った。
 この場合、列車による等価繰り返し回数の式は次の通りとなる。

○鉄筋の場合

機関車牽引式列車荷重： $N=120I^{-1.5}$

電車・気動車列車荷重： $N=5000I^{-2.5}$

○PC鋼材の場合

機関車牽引式列車荷重： $N=240I^{-1.5}$

電車・気動車列車荷重： $N=6000I^{-2.5}$

これらの式によって等価繰り返し回数を求め、引張補強鋼材の疲労強度を示したのが図-3である。列車荷重作用時の応力と引張強度の比が大きくなれば疲労強度は小さくなる。また、鉄筋よりPC鋼材の方が疲労に対する強度は大きい。

5-2. 断面形状の検討

表-1の検討ケースにしたがって、7ケースのP R C桁のスパン中央における曲げに対する検討を行った。桁高と引張補強鋼材量の関係を図-4に、PC鋼材の最小応力度と補強鋼材量の関係を図-5に示す。

桁高と補強鋼材量の関係は、PC鋼材量が7ケースとも12T-15.2ケーブルを3本用いているため、鉄筋量と桁高の関係で比較されることになる。桁高のタイプが1.6m、1.55m、1.5mと3種類である。明確な違いは現れなかったが、同一断面形状で桁高を低くすれば鋼材量が多くなる傾向がある。

図-5について、PC鋼材の影響と補強鋼材量の関係を見るために設計荷重作用時のPC鋼材応力度とPC鋼材の引っ張り強度の比(σ_{min}/σ_{pu})と補強鋼材量の関係を示す。

σ_{min}/σ_{pu} の比が上がれば補強鋼材量は上がる関係が見いだされる。また、桁高を1.6mに設定したケースに比べて、桁高を低くするケースが、PC鋼材の応力度レベルが上がり、かつ補強鋼材量も増加する(図-4で確認済み)傾向にある。

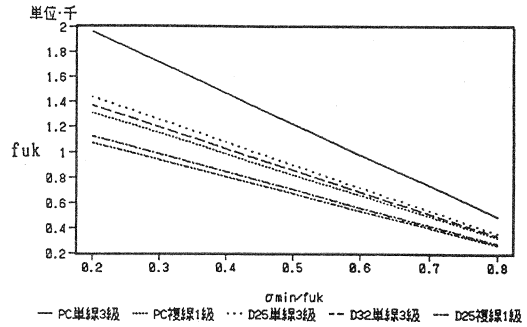


図-3 引張補強鋼材の設計疲労強度の例

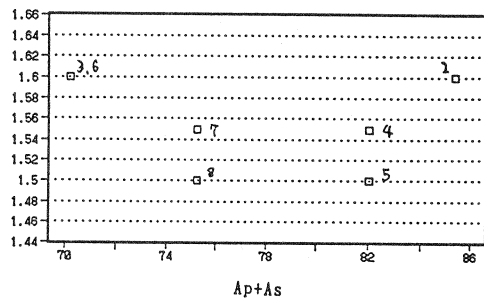


図-4 桁高と引張補強鋼材の関係

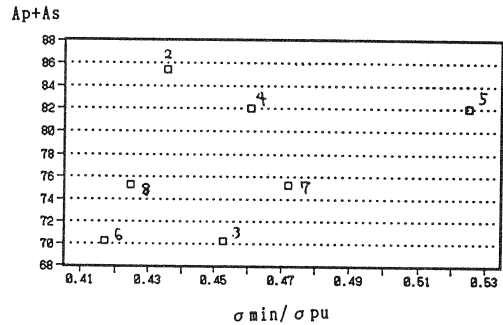


図-5 PC鋼材の応力度レベルと引張補強鋼材量の関係

6. 補強鋼材量と限界状態の関係

6-1. 使用限界状態

使用限界状態は鋼材の腐食に対するひびわれ、外観に対するひびわれ、列車荷重が載荷した時の桁のたわみの3つの状態について検討する。図-4はそれぞれの桁の計算値と制限値の比率を示す。

今回の検討では、7つのケースとも使用限界状態で補強鋼材が決定しなかった。ただ、コンクリート設計基準強度が500kgf/cm²のT型桁(ケース3から7)の場合、400kgf/cm²にするとたわみが制限値(3.75cm)を超える。

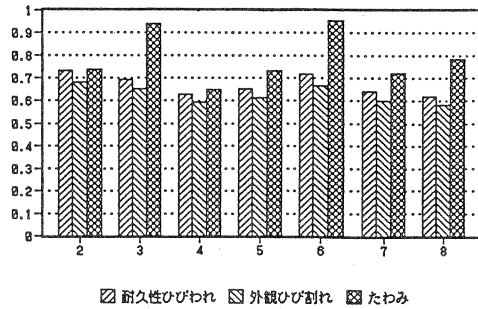


図-4 使用限界状態

6-2. 疲労限界状態

疲労限界状態はPC鋼材、鉄筋、コンクリートの疲労に対する検討を行うものである。設計条件は1級線対応の設計耐用年数100年でおこなった。これも計算値と制限値の比率を図-5に示す。

今回の検討においては、全ケースともにPC鋼材の計算値が制限値に対して0.9以上を示しており、PC鋼材の疲労によって補強鋼材量が決定された。

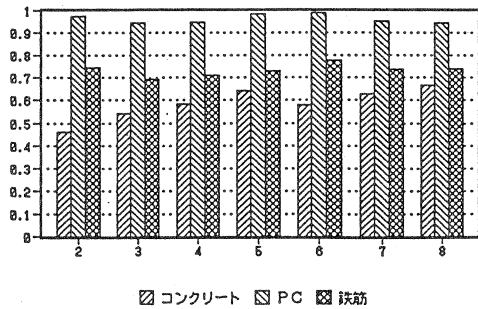


図-5 疲労限界状態

6-3. 終局限界状態

終局限界状態の検討は最大耐荷能力が終局断面力を上回ることを確かめることにより行う。計算値と制限値の比率を図-6に示す。

今回の検討においてはI型及びT型のうちでも断面積の大きいケース2、3、4、5がPC鋼材の疲労限界状態で決定されているものの終局限界状態も0.9以上の高い値を示している。コンクリート設計基準強度を400kgf/cm²に下げた場合、終局限界状態の各値が1に近づき、PC鋼材の疲労限界状態よりも大きい値を示しており、設計条件の違いによってはこれらのケースは終局限界状態によって鋼材量が決まることがありうる。

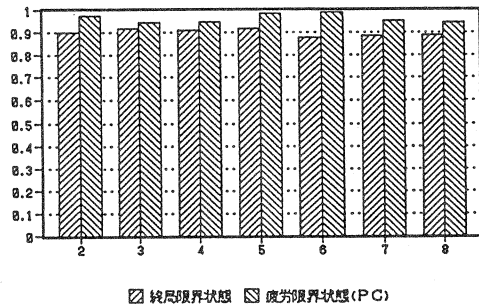


図-6 終局限界状態とPC鋼材の疲労限界状態

7. 結果のまとめ

- ① σ_{min}/σ_{pu} が大きくなれば補強鋼材量は多くなる。
- ② PRC桁の補強鋼材量は主にPC鋼材の疲労強度または終局限界状態によって決定される。
- ③ 補強鋼材の決定においてコンクリートの強度が、使用限界状態におけるたわみ、終局限界状態の値の決定に大きな影響を及ぼす。
- ④ 桁断面はI型から経済的なT型へ変更の可能性もある。