

報告

[2133] PC橋実橋測定調査に基づく安全係数、荷重係数の検討

正会員 ○池内武文 (首都高速道路公団)

高橋敏雄 (同上)

正会員 渡辺英夫 (オリエンタルコンサルタンツ)

古賀秀幸 (同上)

1. はじめに

昭和61年に土木学会コンクリート標準示方書が大幅に改訂され、限界状態設計法が採用された。この示方書はコンクリート構造物を設計する場合の一般的な設計の基本事項を示すものであるが、設計の基本となる荷重についての具体的な規定はなく特性値の定め方の原理が示されているにすぎない。また、設計体系の根幹をなす各種の安全係数についても、そのフィロソフィと標準的な値を示すにとどめられている。従って、コンクリート道路橋に対する限界状態設計法を確立するためには、コンクリート橋特有な材料・施工誤差および荷重のばらつきを考慮した安全係数を設定していく必要があり、このためには基礎的なデータの蓄積が重要である。

本研究はこの種の調査研究が少ない¹⁾²⁾ことを考慮して、首都高速道路公団において建設するプレストレストコンクリート橋(2橋)において各種測定調査を実施するとともに、既往の調査研究資料によりデータを補って、材料・施工誤差および荷重に関するデータの一般的な特性を調べ、安全係数や荷重係数の設定に関する考察を行ったものである。

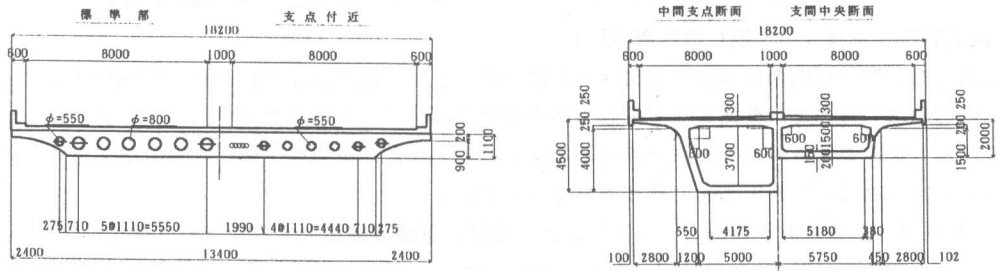
2. 実橋調査の概要

2.1 調査項目および調査方法

(1) 調査対象橋梁

調査対象とする橋梁(PC橋2橋)の概要は以下のとおりであり、断面図を図-1に示す。

- ① 橋 種 3径間連続PC中空床版橋(支間長20m+25m+25m+5m、有効幅員17.0m)
3径間連続PCラーメン橋(支間長39.45m+82.00m+39.45m、有効幅員17.0m)
- ② 設計基準強度 PC中空床版橋:350kgf/cm²、PCラーメン橋:400kgf/cm²
- ③ 架設方法 PC中空床版橋:移動支保工方式、PCラーメン橋:カンチレバー工法



(a) PC 3径間中空床版橋 (b) PC 3径間連続ラーメン橋
図-1 調査対象橋梁の標準断面図(単位: mm)

(2) 調査内容

調査項目と調査方法の概要を表-1に示す。調査項目は、断面耐力に関係する項目として:養生条件・材令とコンクリートの物性、部材寸法と鋼材の施工誤差、断面力に関係する項目として:死荷重、プレストレス、温度、乾燥収縮度およびクリープ係数とした。コンクリートの材料特

性はJISに示される試験方法

により求め、施工誤差はスケールにより直接測定し、プレストレス・温度・乾燥収縮ひずみは橋体内に計測機器を埋設して測定を行った。

2.2 調査結果

(1) コンクリートの材料特性

(養生条件と圧縮強度、ヤング係数、単位体積重量)

各種の養生条件と供試体

($\phi 10 \times 20\text{cm}$, $f'_{ok} = 400$

kgf/cm^2)の材令に対する圧縮強度とヤング係数の関係を図-2、3に示す。図-2では、養生条件によって圧縮強度に大きなばらつきが見られ、28日強度を比較すると標準養生に対して実橋養生・現場養生等は低めの傾向にある。材令と圧縮強度の関係では91日の強度は28日と比較して10~20%程度大きくなっている。また、図-3においてヤング係数の平均値は標準示方書の値($3.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)と同程度になっており、材令の影響は圧縮強度に比べて顕著ではない。単位体積重量については標準示方書の規格値($2.3 \sim 2.35 \text{ tf/m}^3$)に対して95~105%程度であった。

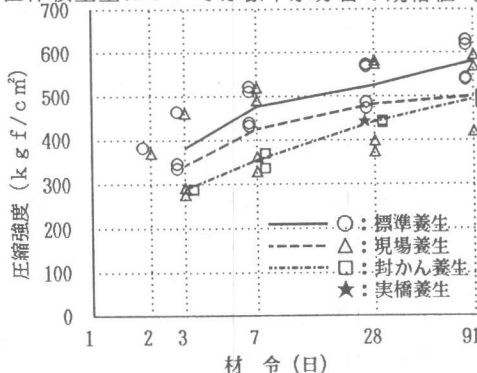


図-2 材令と圧縮強度の関係

表-1 調査項目と調査方法

調査項目		調査方法
コンクリート	①圧縮強度 ②ヤング係数 ③単位体積重量	現場養生、標準養生、封かん養生、実橋からのコア抜き4種の養生条件について、コンクリート供試体の圧縮強度、ヤング係数、単位体積重量を測定する。
施工誤差	断面寸法	①主げたの幅 ②床版厚(上・下) ③ウエブ厚、けた高
	鋼材配置	①鉄筋 ②PC鋼材 ③横締PC鋼材
コンクリート	①プレストレス ②温度分布 ③乾燥収縮度 ④クリープ係数	実橋施工時に各種の計器を橋体内に埋設し、自動計測によりデータ採取を行い、実測値と設計値の比較を行う。

注) 現場養生 : 屋外で養生する。
標準養生 : 標準水中養生を行う。
封かん養生 : ポリエチレンラップフィルムで包み屋外で養生する。
実橋養生 : 箱桁内にコンクリートブロックを打設し、コア抜きにより採取する。

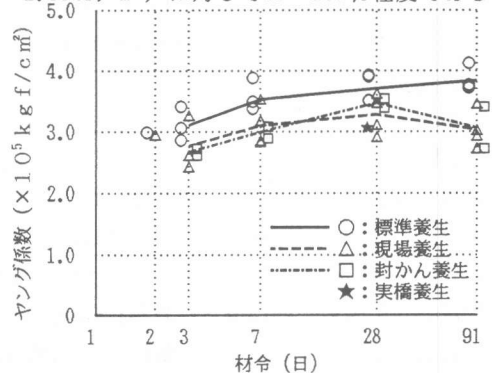


図-3 材令とヤング係数の関係

(2) 施工誤差 (断面寸法と鋼材の配置誤差)

断面寸法と鋼材配置の施工誤差を表-2と図-4に示す。施工誤差(実測値-設計値)の平均値は全体的にプラス側で、断面寸法や鉄筋のかぶり設計値に対して大きめの傾向にあるが、ほぼ道路橋示方書に規定される許容誤差以下となっている。なお、中空床版橋の版高の施工誤差は曲線部という特殊条件にあるため、やや大きくなっている。

(3) コンクリート橋特有な荷重 (プレストレス、温度、乾燥収縮度およびクリープ係数)

外気温、橋体内の温度、プレストレスの分布、コンクリートの全ひずみおよび鉄筋のひずみを測定するために、橋体の外部に温度計を、橋体の内部に测温機能を有するコンクリートひずみ計と鉄筋計を配置した。プレストレスの実測値は各緊張段階ごとに緊張前後のひずみ差を算出し、これを全段階について加算して求めた。表-3に橋軸方向プレストレスの実測値と設計値を示す。導入プレストレスは設計値に対して大きめの傾向となっている。外気温と橋体内の温度差の関係として、PCラーメン橋について測定データ中の最高・最低気温時における断面内の温度分布を

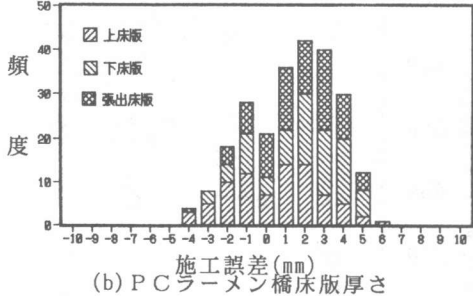
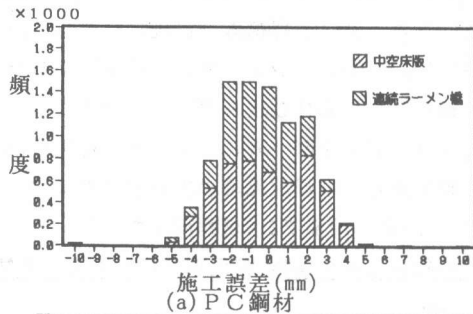


図-4 PC鋼材と床版厚さの施工誤差
図-5に示す。外気温の温度変化は4.1~

28.4℃、桁断面中心位置の温度変化の範囲は5.2~32.0℃であり、道路橋示方書に示される温度の昇降範囲±15℃以内となっている。また、上床版とけたの温度差は4~5℃程度であり、道路橋示方書で仮定されている範囲内(5~15℃)にある。

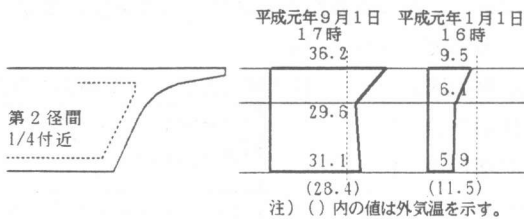


図-5 外気温とラーメン橋箱桁断面内の温度差(℃)

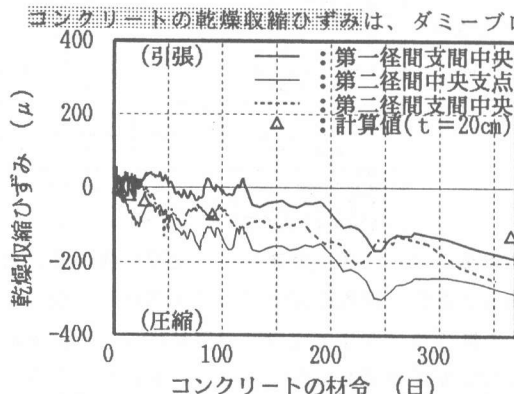


図-6 コンクリートの乾燥収縮ひずみ

表-2 断面寸法と鋼材配置の施工誤差

測定項目	設計値 (mm)	道示Ⅲ 許容誤差 (mm)	測定結果(mm)					
			N	μx	σx	δx		
PC3径間中空床版橋	全幅	18200	±30	31	36.1	4.92	0.14	
	底版幅	13400	±30	26	6.31	2.52	0.40	
	けた高	1100	±11	44	14.34	12.94	0.90	
	床版	上床版厚	260~390	+20 ~-10	44	10.86	7.85	0.72
		下床版厚	120~245		44	1.82	5.82	2.86
		張出床版厚	200	31	7.23	5.05	0.70	
		鉄筋かぶり	62~165	±10	28	4.94	15.22	3.08
	PC鋼材鉛直誤差	—	±5.0	3621	-0.548	3.98	7.263	
	PC3径間連続ラーメン橋	全幅	18000	±30	40	10.9	3.35	0.307
		底版幅	10000 ~11500	±30	40	3.20	2.81	0.878
けた高		2000 ~4500	±20 ~±30	80	3.163	3.28	1.037	
壁厚		380~550	±7.6 ~±11	120	1.97	1.88	0.954	
床版		上床版厚	300	+20 ~-10	80	0.50	2.30	4.60
		下床版厚	200~500		80	1.86	2.15	1.16
		張出床版厚	250	80	1.66	1.94	1.17	
		鉄筋かぶり	34	±10	120	4.37	4.86	1.11
床版横筋PC鋼材鉛直配置誤差		100~150	±5.0	1100	-0.28	2.11	7.54	
PC鋼材鉛直誤差		—	±5.0	9349	-0.133	2.24	16.8	

注) N:データ数、 μx :平均値、 σx :標準偏差、 δx :変動係数($\sigma x / \mu x$)

表-3 プレストレスの実測値と設計値

計測断面	実測値④ (kgf/cm ²)	設計値③ (kgf/cm ²)	比率 ④/③	
①	第2径間中央	79.3	53.3	1.49
	第2中間支点付近	57.1	42.5	1.34
	第3径間中央	86.5	63.9	1.35
②	第1中間橋脚柱頭部	57	51.5	1.11
	第2径間1/4付近	44.5	30	1.48

注1)①はPC中空床版橋、②はPCラーメン橋を示す。
注2)実測値、計測値は断面中央の値である。
注3)計測位置はPC中空床版橋では主断面中央位置、PCラーメン橋では中間ウェブ位置である。

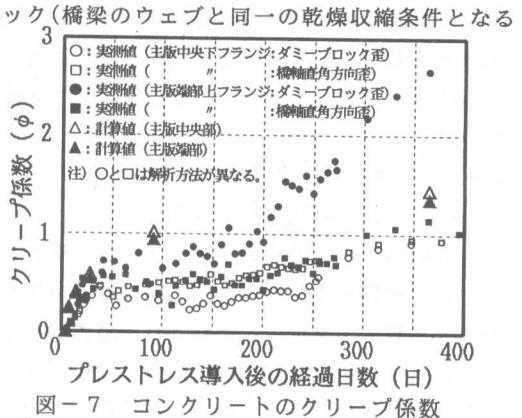


図-7 コンクリートのクリープ係数

ように端部をコーティングしたコンクリートブロックで外的な応力は作用しない)に埋め込んだコンクリートひずみ計の測定値を乾燥収縮ひずみとした。また、クリープ係数は温度補正を行った橋軸方向のコンクリートの全ひずみから、乾燥収縮ひずみ、プレストレス力および自重によるひずみを除去してクリープひずみを算出し、これを持続荷重による弾性ひずみで除して求めた。

PC3径間中空床版橋の乾燥収縮ひずみ(ダミーブロックの値)を図-6に、クリープ係数を図-7に示す。これらを道路橋示方書による計算値と比較すると、乾燥収縮度の実測値は計算値の1.5~2.0倍程度、クリープ係数の実測値は断面中央部で0.8倍、端部で2.0倍程度となった。

3. コンクリート橋特有な〔材料・施工誤差・荷重〕の特性と安全係数・荷重係数に関する一考察

3.1 検討方法

今回調査の対象とした橋梁は2橋でありデータが限定されるため、既往の調査・研究文献によるデータを加え一般的な特性を捉えた上で、安全係数・荷重係数に関する考察を行った。

3.2 養生条件とコンクリートの圧縮強度の関係 (材料係数への反映)

今回のデータに類似した既往の試験結果⁶⁾を加えた養生条件とコンクリートの圧縮強度の関係を図-8に示す。圧縮強度は標準養生が最も高く、次に封かん養生・実橋養生となり、現場養生が最も低い。標準養生による28日強度を設計強度としているが、実橋の強度は養生条件の影響による強度低下と材令による強度の増進があるため、今後、総合的な評価が必要となる。今回の結果では、養生条件の強度低下は大きくても20%程度であり、28日強度から91日強度への強度の増進は10~20%であるため、互いの影響が相殺されていることとなっている。

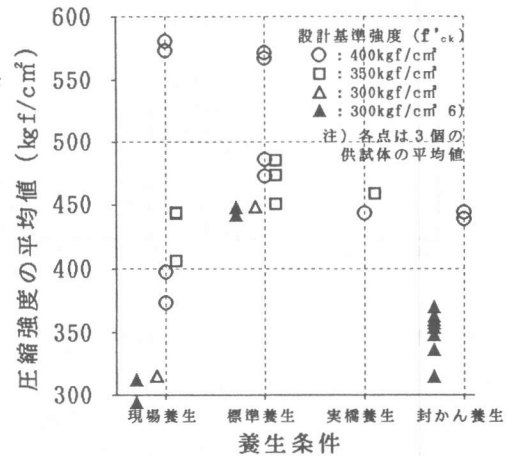


図-8 養生条件と圧縮強度の関係

3.3 鋼材の配置誤差が断面耐力に与える影響(部材係数) 表-4 鋼材施工誤差による耐力の変動

実橋2橋の測定調査で得た主げたPC鋼材と床版鉄筋の配置誤差を基に、2橋の主げたと一般的なRC床版の曲げ耐力への影響を調べた(表-4参照)。表-4より、PC鋼材の配置誤差による主げた耐力の変動は1%程度と小さいが、床版厚20cmのRC床版では8%程度の耐力の低下を生じた。従って、部材係数の設定にあたっては、床版のように薄い部材では鋼材配置誤差の影響が無視できないことを考慮する必要があると考えられる。

		PC中空床版橋		PC3径間7-2橋		
		誤差値 (cm)	耐力比	誤差値 (cm)	耐力比	
主 支 主 術	支点	+側	0.60	1.01	0.36	1.00
		-側	-0.71	1.01	-0.38	0.99
	支間	+側	0.60	0.99	0.36	0.99
		-側	-0.71	1.01	-0.38	1.00
床 版	+側特性値	-	-	1.23	0.92	
	平均値	-	-	0.44	0.97	
	-側特性値	-	-	-0.36	1.02	

注1)床版の条件: t=20cm, $\sigma_{ck}=350\text{kgf/cm}^2$, D19ctc125
 注2)配置誤差95%非超過の特性値である。
 注3)耐力値は配置誤差が無いものとの比である。

3.4 コンクリート橋特有な荷重

(1)死荷重(死荷重係数への反映)

部材断面の施工誤差とコンクリートの単位体積重量のばらつきを考慮して、橋梁本体の死荷重について考察する。表-5の上欄に今回の実橋調査と既往の調査結果²⁾に基づく主げた断面積と設計断面積の比を示す。これより、施工誤差による断面積は全体的に設計値より増加する傾向にある。RCおよびPCの単位体積重量については測定が困難であるため、竣工した72橋のコンクリートの総体積と鋼材重量により算出した結果⁴⁾、90%の信頼区間の上・下限値は 2.50tf/m^3 に対

して、RCで+4~+1%、PCで+3~-2%の範囲にあった。

部材断面の施工誤差とRC、PCの単位体積重量の変動を考慮して算出した死荷重の90%非超過の比(実構造物/設計値)を表-5の最下欄に示す。従って、橋梁本体の終局限界状態での死荷重係数(修正係数を含む)はこの値を参考とすると上限側で1.1、不静定構造で軽量の場合に不利となるケースでは下限側で1.0程度となる。

(2)プレストレス力

既往の調査研究データを含めたプレストレス導入直後におけるけた断面内のプレストレスの実測値と設計値を表-6に示す。全体的に実測値は設計値を上まわり、実測値/設計値の平均値は1.20、標準偏差は0.163となっている。実測値/設計値の分布形状を正規分布と仮定すると90%非超過の比は0.99となり、設計値を下回る確率は小さい。

従って、データが限定されるため、定量的な評価は難しいが、断面の引張縁の引張応力度を照査する際の荷重係数は1.0程度でよいと考えられる。

3.5 コンクリートの乾燥収縮度・クリープ係数^{12)~18)}

実橋の乾燥収縮度とクリープ係数の一般的な傾向を見るため、既往の調査結果と本調査結果を合わせ図-9と図-10に示す。図-9に示すように乾燥収縮度の実測値には大きなばらつきが見られる。乾燥収縮度はコンクリートの配合、養生条件、環境条件、鋼材の拘束等多くの要因に左右されることに注意しなければならない。

図-10に示すクリープ係数は、乾燥収縮度と同様に不確定な要因は多いが、実測値は大部分が道路橋示方書に示される標準値(仮想厚40cm、相対湿度70%、コンクリート温度20℃)を下回っており、計算値の70%程度となっている。設計で設定した乾燥収縮度とクリープ係数の変動が断面応力度に及ぼす影響についてPC合成げたとPC連続ラーメン橋を対象に係数を±50%変化させて調べた。乾燥収縮度およびクリープ係数の影響とも断面応力度の変動は10%以下であり、設計断面力への影響は比較的小さい。従って、これらの荷重に関しては関連する要因が多く、実測

表-5 設計寸法断面積と実測寸法断面積

		実橋測定結果		既往の調査結果 ²⁾		
		PC中空床版橋	PCラーメン橋	ボステンげた橋	ブレテンげた橋	
実測値/設計値	データ数	23	40	462	647	
	鉛直方向寸法	μx	1.0122	1.0012	1.0031	1.0034
		σx	0.0110	0.0013	0.0026	0.0022
	水平方向寸法	μx	1.0013	1.0004	1.0013	1.0017
		σx	0.0008	0.0003	0.0025	0.0029
	断面積	μx	1.0191	1.0089	1.0043	1.0051
		σx	0.0089	0.0064	0.0036	0.0036
	PC単位体積重量(文献調査)	μx	1.0016		—	—
		σx	0.0200		—	—
	死荷重の上下限値		1.05(0.99)	1.04(0.98)	1.03(1.01)	1.03(1.01)

注1)鉛直方向誤差はけた高、水平方向誤差は上床版(上フランジ)と下床版(下フランジ)の幅
 注2)死荷重の上・下限値は90%非超過を前提とし、データの分布を正規分布とみなして算出した。なお、()内は下限側の値である。
 注3)μxは平均値、σxは標準偏差である。

表-6 導入プレストレスの設計値と実測値の比較

橋梁名 (橋種)	測定位置	けた上縁 (kgf/cm ²)		けた下縁 (kgf/cm ²)		けた中心 (kgf/cm ²)		比		
		実測値	設計値	実測値	設計値	実測値	設計値			
		中戸橋(試験桁) ⁷⁾	①	29.5	24.4	112.5	115.8		71.0	70.1
〔3径間連続PCTげた橋〕	②	28.5	34.5	151.0	113.9	90.0	74.2	1.21		
	鬼怒川鉄道橋 ⁸⁾	①	28.0	33.5	73.0	70.7	50.5	52.1	0.97	
〔3径間連続PC箱げた橋〕	②	25.0	18.7	130.0	119.2	77.5	69.0	1.12		
	首公232工区 ⁹⁾	①	44.0	50.0	83.0	50.0	63.5	50.0	1.27	
〔3径間連続PC箱げた橋〕	②	39.0	45.0	75.0	47.0	57.0	46.0	1.24		
	小畑川橋 ¹⁰⁾	①	16.0	12.5	120.0	111.7	68.0	62.1	1.10	
〔3径間連続PC2主Tげた橋〕	②	20.0	14.3	50.0	45.5	35.0	29.9	1.17		
	首公573工区 ¹¹⁾	②	28.0	29.0	99.0	92.0	63.5	60.5	1.05	
本調査結果	〔5径間連続PC2げた桁版橋〕	3径間連続PC中空床版橋	①	57.5	13.6	101.1	92.8	79.3	53.4	1.49
			②	66.6	31.8	106.3	96.0	86.5	63.9	1.35
		3径間連続PCラーメン橋	②	83.0	64.0	6.0	-4.0	44.5	30.0	1.48

注1)測定位置は①:中央径間スパン中央②:側径間スパン中央を示す。

データはばらつきが大きいので、荷重係数を求めるには今後更にデータの蓄積と影響等の研究が必要であると考えられる。

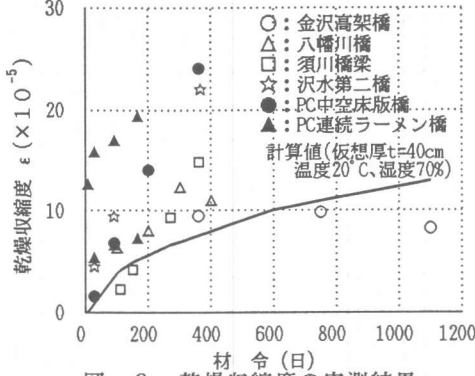


図-9 乾燥収縮度の実測結果

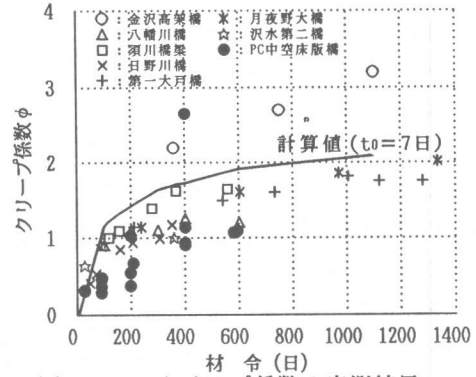


図-10 クリープ係数の実測結果

3.6 主げたの温度差

外気温による主げた内の温度差を表-7に示す。これより床版とけたの温度差は10℃以内であり、道路橋示方書で設定されている値(5~15℃)と同程度となっている。従って、温度に対する荷重係数は1.0程度としても橋の安全性に大きく影響することはないと考えられる。

4. まとめ

本研究は、コンクリート道路橋の限界状態設計法を確立するための一端として、断面耐力に

関係する項目の内：養生条件とコンクリート強度の関係、部材寸法の施工誤差について、また、断面力に關係する項目の内：死荷重、プレストレス、クリープ係数・乾燥収縮度、温度についてデータの特性をまとめ、関連する安全係数や荷重係数を設定する際の留意点の整理と値を概略検討することができた。なお、実橋のクリープ係数・乾燥収縮度については実態が明かでないため、今後の精力的な研究が望まれる。最後に、本検討は(財)高速道路調査会「コンクリート道路橋の限界状態設計法に関する調査研究委員会」の指導を受けて行ったものであり謝意を表します。

参考文献

- (社)土木学会：鉄筋コンクリート設計法の最近の動向、昭和50年11月
- (社)日本道路協会：限界状態設計法分科会荷重検討班第一次報告書、昭和62年11月
- (財)高速道路調査会：コンクリート道路橋の限界状態設計法に関する調査研究(その1)報告書、昭和63年2月
- (財)高速道路調査会：コンクリート道路橋の限界状態設計法に関する調査研究(その2)報告書、平成元年2月
- (財)高速道路調査会：コンクリート道路橋の限界状態設計法に関する調査研究(その3)報告書、平成元年3月
- 寺田米男：密封養生したコンクリートの強度、セメント技術年報No.33、昭和54年、P238~240
- 水野、渡辺 他：中戸橋の模型試験に関する報告、プレストレストコンクリートVol.3、No.4、Aug.1961 P38~P44
- 野口、大野 他：鬼怒川鉄道橋の設計および測定について、プレストレストコンクリートVol.4、No.1、Feb.1962 P28~P45
- 津野、金光：首都高速232工区区間の施工について(II)、プレストレストコンクリートVol.9、No.4、Oct.1967 P36~P42
- 林、細川：3径間PC連続桁(小畑川橋)の試験について、プレストレストコンクリートVol.6、No.1、Feb.1964 P44~P52
- 肥沼利夫：PC3径間連続立体ラーメン箱桁橋-各種測定試験について、プレストレストコンクリートVol.19、No.2、Feb.1977、P18~P27
- 菅原、石橋、西山、夏川：30年経過したPC鉄道橋の経年特性について、プレストレストコンクリート Vol.29、No.4、Jul.1987、P9~P15
- 建部、高瀬：カールソンひずみ計によるPCけたのクリープおよび乾燥収縮、プレストレストコンクリートVol.5、No.6、Dec.1963、P18~P22
- 今村 他：主として日野川橋の試験について、プレストレストコンクリートVol.6、No.5、Oct.1964、P20~P25
- 小林、船本：10径間連続RC中空床版の温度変化と乾燥収縮、コンクリート工学 Vol.18、No.5、1980、P19~P28
- 広岡 他：月夜野大橋上部工の挙動の計測、プレストレストコンクリートVol.27、No.1、Jan.1985、P39~P47
- (財)高速道路技術センター：八幡川橋応力測定及び解析業務(その2)報告書 昭和63年3月
- 明石、福留：PCラーメン橋における乾燥収縮、クリープ、温度の実測と一考察、第18回日本道路学会論文集、平成元年10月、P854~P855
- 岩代、中山：デイビダージェ式PC橋に及ぼす日照の影響について、鹿島建設技術研究所年報18号、P1~P8
- 20) 岡谷高架橋(PC上部工) 工事共同企業体：岡谷高架橋工事施工計測結果 報告書、昭和61年2月

表-7 温度の測定結果

橋名	所在地	断面形状	上温(℃)	緑度(℃)	下温(℃)	けた内温度差(℃)
北陸自動車道 ¹⁵⁾	山口県	中空床版	38		28	10
金沢高架橋						
中央高速道路 ¹⁹⁾	長野県	中空床版	40.2		34.0	6.2
中田切川橋	上伊那郡	床版				
山陽自動車道 ¹⁷⁾	広島県	箱形断面	—	—		10
八幡川橋	佐伯郡	箱形断面				
中央自動車道 ²⁰⁾	長野県	箱形断面	—	—		8
岡谷高架橋	岡谷市	床版				
本調査	PC中空床版橋	東京都板橋区	30.7		28.4	2.3
	PC連続ラーメン橋	東京都板橋区	36.2		31.1	5.1