

(43) PC斜版付箱桁橋のクリープ・乾燥収縮挙動について

(株)オリエンタルコンサルタンツ大阪支社	○森崎 静一
阪神高速道路公団 工務部	正会員 幸左 賢二
” 神戸建設部	岩永 功
(株)オリエンタルコンサルタンツ大阪支社	正会員 橋場 盛

1. はじめに

PC斜版付箱桁橋 (以下PC斜版橋と呼ぶ) は、従来の斜張橋のケーブルをコンクリートで被覆してPC部材とした構造であり、主桁と斜版の剛性がほぼ同等となる剛な構造である。この橋梁形式では、スイスのガンダー橋 (Ganter Bridge) が有名であるが、世界的に見ても施工実績は少なく、そのクリープ特性についてもいくつかの報告¹⁾ がなされているものの、明らかであるとは言えない。そこで、PC3径間連続斜版橋 $l = 67.0 + 120.0 + 73.0$ m (阪神高速道路公団北神戸線) を対象として、経時的変位に影響を及ぼすと考えられるいくつかの要因について、クリープ・乾燥収縮解析を行い、各要因による影響度を把握することによりクリープ挙動に対する基本的な特性を明らかにした。

2. 解析手法及び斜版部の構造モデル化

(1) 解析手法

解析手法は、道路橋示方書 I にも示されている逐次法 (step-by-step method) を用いた。同手法はクリープ曲線の重ね合わせの原理を適用し、クリープひずみを時間間隔毎に分割して求積する方法である。時間間隔毎の求積法には幾つかの方法があるが、時間間隔を細かくすれば方法による違いはないとされている。本解析法では、時間依存的変位に影響を及ぼす様々な要因のうち、特に次の点について考慮した。

- 1) コンクリートのクリープ及び乾燥収縮の進行度を考慮する。
- 2) PC鋼材のレラクセーションを時間関数 (PCI指針) として扱う。
- 3) コンクリートのヤング係数の経時変化を考慮する。
- 4) ヤング係数の経時変化に伴うクリープ係数の変化を考慮する。
- 5) 目的の時刻までに内部及び外部拘束により生じるコンクリート応力に対してもクリープを考慮する。
- 6) 施工ブロック (部材) ごとのコンクリートの材令差を考慮する。

図-1 に対象橋の解析モデル図を示す。

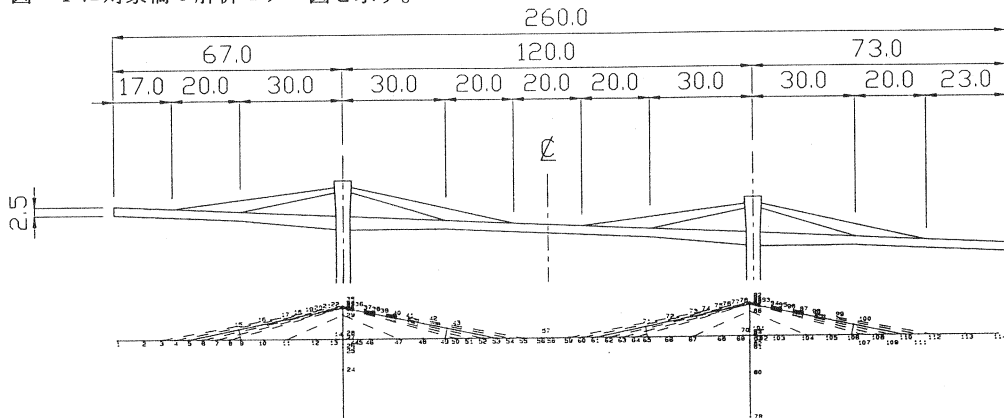


図-1 対象橋の解析モデル図

(2) 斜版部の構造モデル化

PC斜版橋の平面骨組構造へのモデル化においては、特に斜版のコンクリート打設前後における構造特性を変化させる必要がある。本解析ではこの点について図-2に示すモデル化を行った。

3. 検討ケース

時間依存的変位に影響を及ぼすと考えられる要因のうち、ここでは次の1)~7)に示す各要因をパラメータとし、表-1に示す11ケースについて検討を行った。なお、検討に際しては同表中のCASE-1を基本ケースとし、他のケースと比較することにより各要因の影響度合いを把握した。

- 1) 基本施工日数を構造設計の690日とし、この日数を2/3(490日)に短縮(ステップ数は変更無し)させた。
- 2) クリーブ係数・乾燥収縮度の基本値に関して、湿度を70%RH(温度は20°C)から65%RH(温度は20°C)に変化させた。
- 3) コンクリートのヤング係数を基本値($\sigma_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$, $E_c(28)=3.1 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$)に対して85%($2.635 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$)に変化させた場合の影響について比較した。
- 4) 断面内の非クリーブ部材(鉄筋、PC鋼材)による拘束の有無に対する影響について比較した。
- 5) EP9橋脚と主桁の結合は、施工時に仮固定され、完成時で支承(ゴム沓)が設置される。ゴム沓の剛性をバネ値($9.6 \times 10^3\text{tf/m}$)に換算し、その影響について比較した。
- 6) 施工ステップ数を増加させることにより、両橋脚間において中央径間閉合までの材令差(90, 180, 360日)を生じさせ、これによる影響(分割発注あるいはワーゲン転用による影響)について比較した。
- 7) 乾燥収縮ひずみの基本値を基本ケースに対して2倍(-500 μ)、3倍(-750 μ)に変化させた場合の影響を比較した。

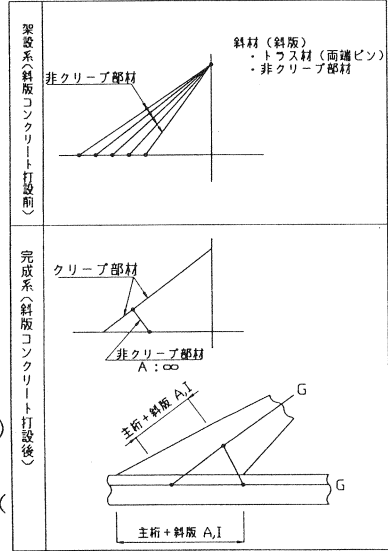


図-2 斜版の構造モデル化

表-1 検討ケースの一覧

		検査 ケー ス										
		CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6	CASE-7	CASE-8	CASE-9	CASE-10	CASE-11
施工日数 (日)	690	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○
	460		○									
湿度 条件	70%RH	○	○								○	○
	65%RH			○								
コンクリートヤ ング係数 (kgf/cm ²)	3.1×10 ⁵	○	○	○							○	○
	上記の85%				○							
断面内 鉄筋拘束	無視	○	○	○	○						○	○
	考慮					○						
支承条件 (ゴム)	無視	○	○	○	○	○			○	○	○	○
	考慮						○					
中央径間閉合 までの時間差 (日)	0	○	○	○	○	○					○	○
	90							○				
	180								○			
	360									○		
乾燥収縮ひずみ の基本値 ε _{sh0}	-500 μ										○	○
	-750 μ											○

[基本検討条件]

- ① 構造系の変化は、構造設計で考慮された施工順序による(図-3参照)。
- ② セメントの種類は早強セメントとする。
- ③ 主塔及び橋脚は、非クリーブ部材(クリーブを考慮しない)として扱う。
- ④ 最終材令は施工開始から20000日とし、時間分割数は対数軸上で15等分とする。

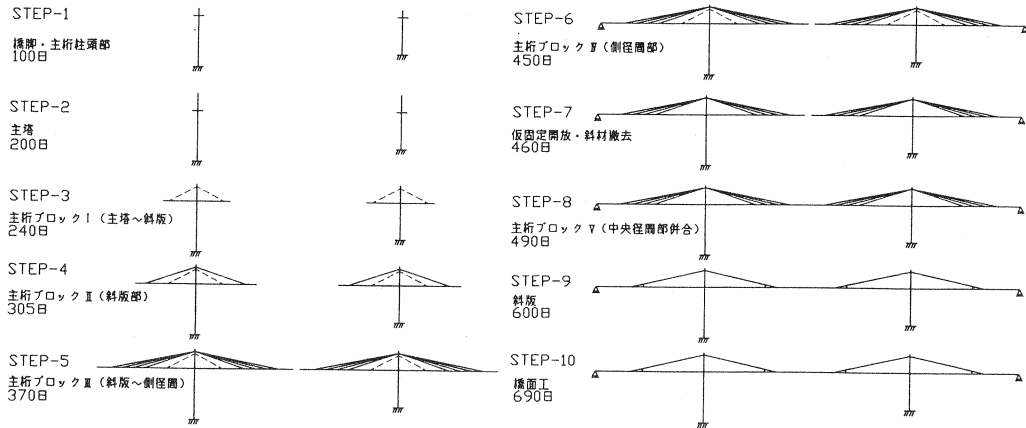


図-3 構造系の変化及び施工ステップ (基本ケース)

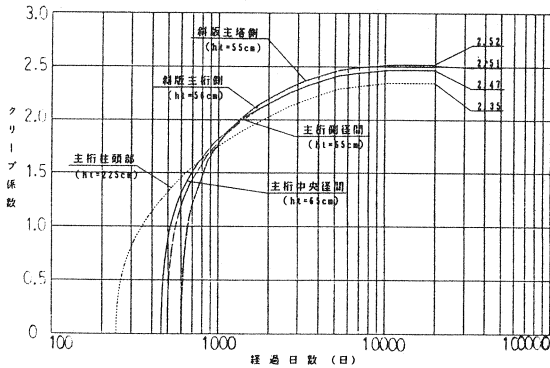
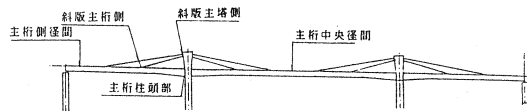
4. 検討結果及び考察

前述の基本検討条件より構造解析を行い、本橋の各要因に対するクリープ特性について傾向を把握した。

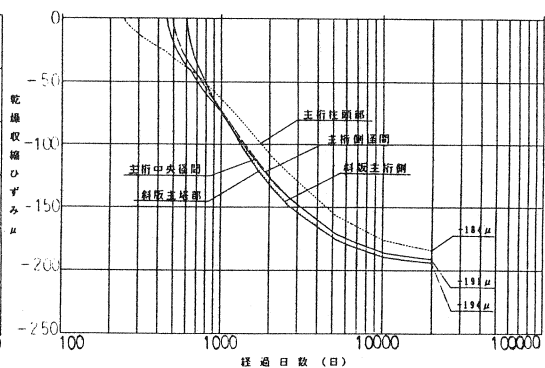
(1) クリープ・乾燥収縮進行曲線

基本ケース (CASE-1) の各主要部位 (主桁側径間、同柱頭部、斜版主塔側、同主桁側、主桁中央径間) におけるクリープ係数及び乾燥収縮度の進行曲線を図-4 に示す。同図より各断面について進行度合いを比較すると、次のような傾向が見られる。

- 1) 主桁の側径間、中央径間と斜版の主桁側、主塔側は、最終値にほとんど差が生じていない。しかし、仮想部材厚が大きい主桁柱頭部は、他の断面に比べ最終値で5~6%程度小さくなっている。
- 2) クリープと乾燥収縮の進行度を比較すると、クリープの方が速く進行している。



a) クリープ係数



b) 乾燥収縮度

図-4 クリープ・乾燥収縮の進行曲線

(2) 変位

各ケースの最終日 (20000日) における全体変位図 (弾性+クリープ変位) を図-5 に示す。また、表-2 に主要な部位について変位量の一覧を示す。なお、表中では合計値 (弾性+クリープ) と各施工段階毎のクリープ (乾燥収縮を含む) 変位の累計を示している。上記図表より比較結果をまとめると次のようである。

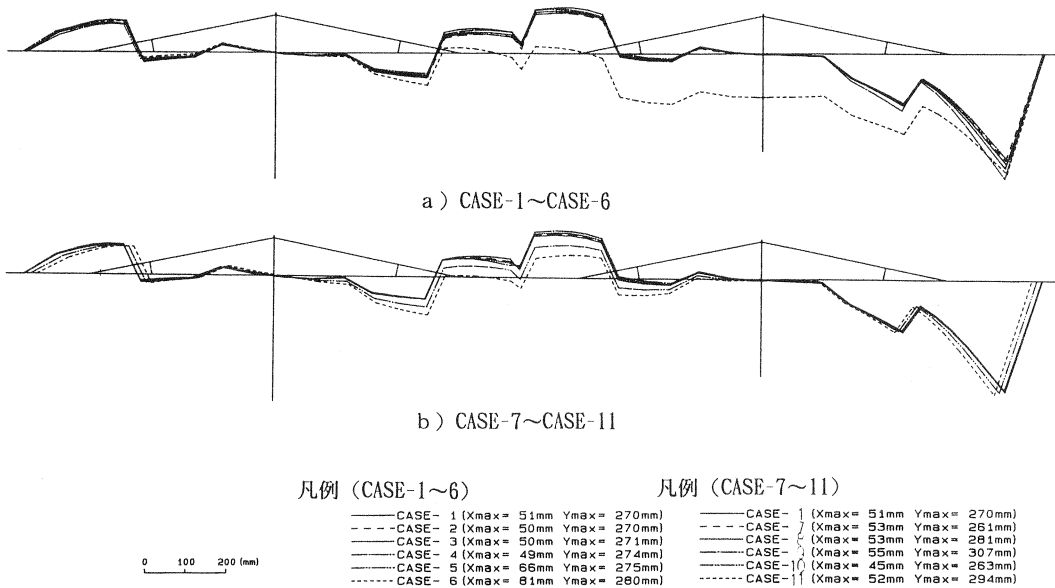
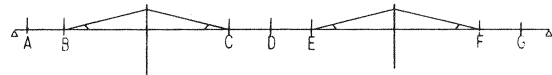


図-5 各検討ケースの全体変位図(最終20000日)

表-2 主桁の主要部位における変位量の集計(CASE-1~CASE-6)

		CASE-1 (基本)				CASE-2				CASE-3				CASE-4				CASE-5				CASE-6			
		δ	δcr	δ	δcr	$\Delta \delta cr$	δ	δcr	$\Delta \delta cr$	δ	δcr	$\Delta \delta cr$	δ	δcr	$\Delta \delta cr$	δ	δcr	$\Delta \delta cr$	δ	δcr	$\Delta \delta cr$				
水平変位	A	50.7	36.6	52.7	38.2	-1.6	53.0	38.6	-2.0	54.8	38.1	-1.5	45.1	31.2	5.4	51.7	36.9	-0.3							
	B	46.0	32.8	48.1	34.8	-2.0	48.0	34.8	-2.0	49.8	34.6	-1.8	41.1	28.3	4.5	47.0	33.4	-0.6							
	C	-0.7	0.3	0.0	1.0	-0.7	-1.0	0.1	0.2	-1.6	-0.2	0.5	-0.4	0.5	-0.2	-1.0	1.1	-0.8							
	D	3.8	2.9	4.0	3.1	-0.2	3.9	3.0	-0.1	4.0	3.0	-0.1	3.4	2.5	0.4	3.4	3.7	-0.8							
	E	19.9	5.3	19.6	5.0	0.3	20.4	5.8	-0.5	21.2	6.0	-0.7	19.0	4.6	0.7	19.9	6.1	-0.8							
	F	-27.6	-27.8	-29.4	-29.5	1.7	-29.3	-29.5	1.7	-31.0	-29.4	1.6	-23.6	-24.1	-3.7	-26.2	-27.6	-0.2							
	G	-33.5	-32.2	-35.1	-33.7	1.5	-35.5	-34.2	2.0	-37.2	-33.9	1.7	-28.5	-27.6	-4.6	-32.0	-31.9	-0.3							
鉛直変位	A	47.0	-32.7	52.2	-28.0	-4.7	41.7	-38.2	5.5	49.7	-40.7	8.0	49.3	-29.8	-2.9	49.2	-33.2	0.5							
	B	71.6	-3.6	73.1	-2.5	-1.1	69.6	-5.8	2.2	78.9	-7.6	4.0	71.5	-2.9	-0.7	75.9	-4.4	0.8							
	C	49.3	-44.4	43.5	-50.4	6.0	46.0	-48.0	3.6	57.7	-50.0	5.6	52.3	-38.9	-5.5	52.9	-49.2	4.8							
	D	19.2	-33.0	10.7	-41.6	8.6	18.2	-34.0	1.0	26.0	-35.3	2.3	20.2	-29.6	-3.4	-39.9	-46.1	13.1							
	E	98.2	-42.6	92.4	-48.5	5.9	95.0	-46.1	3.5	106.8	-47.9	5.3	100.6	-37.7	-4.9	0.3	-58.2	15.6							
	F	-87.6	-24.0	-86.2	-21.9	-2.1	-90.2	-26.8	2.8	-97.0	-29.6	5.6	-87.4	-23.4	-0.6	-147.4	-12.8	-11.2							
	G	-270.2	-97.7	-260.6	-86.9	-10.8	-280.6	-108.4	10.7	-306.8	-113.6	15.9	-263.1	-91.7	-6.0	-294.5	-91.8	-5.9							

注1) 表中 δ : 合計(クランプ+弾性), δcr : クランプ分,
 $\Delta \delta cr$: クランプ分の基本ケースとの変位差を示す。
 注2) 符号は、水平方向右向きを正、鉛直方向上向きを正とする。



- 1) 図表より、水平変位は主として両側径間部(表中のA, B, F, G部位)で生じており、各ケースともに全体変位量(δ)に占めるクリープ変位(δcr)の比率は $\delta cr/\delta=0.84$ (平均)と高くなっている。したがってクリープ・乾燥収縮による影響(δcr)が支配的となっていることが明らかである。
- 2) 最大変位量による比較より、水平変位に対して影響度の高い要因はCASE-10, 11の乾燥収縮度である。同ケースでは15~30mm(30~60%)程度の顕著な増加変位が生じている。一方、影響度の低い要因としてCASE-5の鉄筋による内部拘束が挙げられる。増加傾向にある他ケースとは異なり、同ケースでは5mm(10%)程度変位量が減少している。これらの傾向は、基本ケースに対するクリープ変位の相対的な変位差($\Delta \delta cr$)に着目しても同様に明らかである。
- 3) 鉛直変位については、各ケースともに比較的顕著な変位差が生じている。最も影響を与える要因としてはCASE-6のゴム支承考慮(変位差98mm, 99%)であり、次いでCASE-11(乾燥収縮度-750 μ)、CASE-4(コンクリートのヤング係数)の順となっている。
- 4) 鉛直変位に関してもCASE-5(鉄筋による拘束)は最小値を示しており、側径間部で7mm(3%)程度の減少が認められる。

(3) 主桁応力度

発生断面力より、応力的にクリティカルとなる主桁柱頭部の断面構成要素(コンクリート・鉄筋及びP C鋼材)について最終日での応力度集計結果を表-3に示す。また、図-6に代表的例としてCASE-1~6の各応力度に対する経時変化図を示す。上記図表より、次のことが言える。

- 1) 各断面要素ともCASE-5(断面内の鉄筋を拘束)の場合が最小となる。基本ケースに比してコンクリートでは圧縮応力が 5kgf/cm^2 (8%)程度、P C鋼材では 1kgf/mm^2 (13%)、鉄筋応力では 1600kgf/cm^2 程度の応力変化が認められる。
- 2) コンクリート応力が最大となるのは、CASE-6(ゴム支承考慮)及びCASE-9(閉合差360日)である。基本ケースに比べ、上下縁側とも 2kgf/cm^2 程度圧縮応力が增加する。
- 3) P C鋼材応力度は、CASE-10, 11(乾燥収縮 -500μ 、 -750μ)で減少量が最大となっており、基本ケースに比して $3\sim 5\text{kgf/mm}^2$ (40~60%)程度、さらに応力減少が進行する。

表-3 主桁応力度集計表(主桁柱頭部)

	コンクリート		P C鋼材		鉄筋	
	上縁側	下縁側	上縁側	下縁側	上縁側	下縁側
1 応力度①	-919	0	-355	0	0	-606
変化応力②	255	0	-7575	0	0	-73
①+② 計	-664	0	-7930	0	0	-679
2 応力度①	-914	0	-308	0	0	-609
変化応力②	262	0	-7424	0	0	-76
①+② 計	-651	0	-7732	0	0	-685
3 応力度①	-924	0	-379	0	0	-603
変化応力②	266	0	-8250	0	0	-74
①+② 計	-659	0	-8629	0	0	-677
4 応力度①	-915	0	-465	0	0	-609
変化応力②	261	0	-8029	0	0	-71
①+② 計	-653	0	-8494	0	0	-680
5 応力度①	-880	-8472	-219	0	-5328	-593
変化応力②	264	-7616	-6689	0	-10486	-46
①+② 計	-616	-16088	-6908	0	-15814	-639
6 応力度①	-950	0	-544	0	0	-626
変化応力②	265	0	-7483	0	0	-70
①+② 計	-685	0	-8027	0	0	-695
7 応力度①	-929	0	-803	0	0	-601
変化応力②	254	0	-7811	0	0	-73
①+② 計	-675	0	-8614	0	0	-674
8 応力度①	-936	0	-841	0	0	-598
変化応力②	255	0	-7971	0	0	-74
①+② 計	-681	0	-8022	0	0	-672
9 応力度①	-944	0	-888	0	0	-594
変化応力②	255	0	-8218	0	0	-73
①+② 計	-689	0	-9106	0	0	-667
10 応力度①	-921	0	-764	0	0	-605
変化応力②	294	0	-9816	0	0	-78
①+② 計	-627	0	-10580	0	0	-683
11 応力度①	-925	0	-777	0	0	-604
変化応力②	334	0	-12063	0	0	-83
①+② 計	-591	0	-12840	0	0	-687

注1) 表中の符号は-: 圧縮, +: 引張を示す(単位: tf/m^2)
 2) 鋼材応力度は変化量を示す。

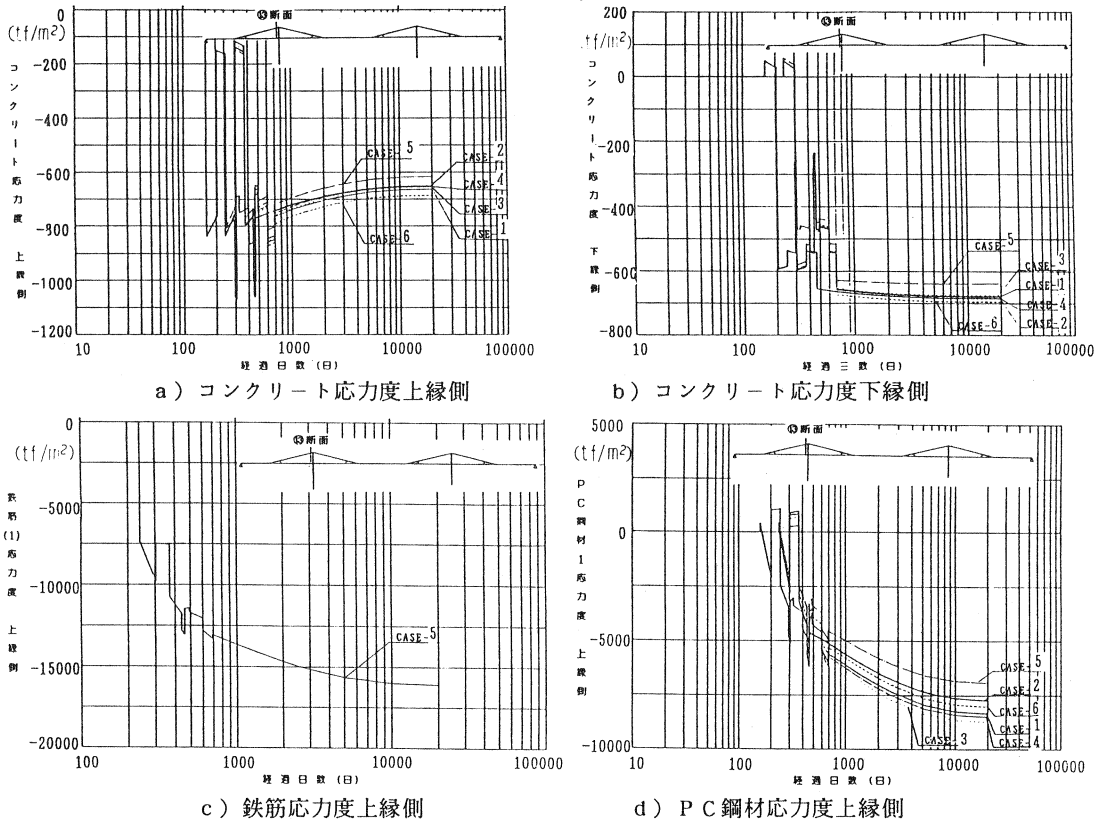


図-6 各断面構成要素の応力度経時変化図(CASE-1~6)

(4) 斜版応力度

斜版主桁側取付部及び主塔側取付部におけるコンクリートの上下縁側の応力度を表-4に示す。また、図-7に上縁側コンクリート応力の経時変化図(斜版主桁側取付部)を示す。上記図表から次のことが言える。

- 1) 主桁側取付部(図中C)のコンクリート上縁側応力度は、CASE-6(ゴム支承考慮)及びCASE-10, 11(乾燥収縮度 -500μ , -750μ)において変動が見られる。他のケースでは $2\sim 3\text{kgf/cm}^2$ 程度の応力変化であるのに対し、同3ケースでは $5\sim 10\text{kgf/cm}^2$ ($26\sim 52\%$)程度引張応力が増加している。
- 2) 上記の内容はコンクリート下縁側で圧縮応力度の減少として現れている。すなわち、他ケースがそれ程変動していないことに対し、CASE-6, 12, 13では $3\sim 9\text{kgf/cm}^2$ ($8\sim 23\%$)程度減少している。
- 3) 主塔側取付部についても上記1)、2)と同様な傾向が見られる。CASE-6, 12, 13の上縁側における引張応力度の増加は $7\sim 14\text{kgf/cm}^2$ ($46\sim 92\%$)程度、下縁側圧縮応力の減少は $5\sim 10\text{kgf/cm}^2$ ($12\sim 25\%$)程度となっている。
- 4) CASE-5(鉄筋拘束考慮)ではいずれの部位においても基本ケースに比して $10\sim 20\%$ 程度応力度の減少が見られ、斜版においてもその影響度合いは低いことが明らかである。

5. まとめ

本検討によって得られた結果を要約すると以下のようである。

- (1) 時間依存的変位に顕著な影響を及ぼすのは、主として①支承条件、②乾燥収縮ひずみ、③鉄筋による内部拘束であることが明らかとなった。
- (2) コンクリートのヤング係数は鉛直変位に対して影響を生じさせるものの、部材応力にはそれ程顕著な影響は与えない。
- (3) ワーゲン転用等により両橋脚間の部材に1年以上の材令差を生じさせる場合は、PC鋼材応力度(主桁)の減少量に留意する必要がある。
- (4) 上記(1)～(3)の結果から、本橋のクリープ・乾燥収縮による挙動は基本的に主桁部が支配的となっており、斜版部には単に部材間の結合による副次的な影響が生じたものと考えられる。したがって、構造設計においては、PC桁橋と同様な考え方を適用することも可能であると考えられる。

最後に、本検討は対象橋の橋梁計画において実施したものである。したがって、上述までの内容は今後、実施設計において反映させる予定である。

参考文献；

1)幸左、北沢、郡、若狭：PC斜版付箱桁橋の構造特性について PC技術協会第3回シンポジウム論文集1992. 11

表-4 斜版部応力度集計表

(単位: tf/m^2)

	主桁側取付部		主塔側取付部	
	コンクリート上縁側	コンクリート下縁側	コンクリート上縁側	コンクリート下縁側
CASE-1	192.8	-388.1	152.6	-401.1
CASE-2	181.2	-395.4	145.9	-418.0
CASE-3	202.3	-378.3	165.0	-388.9
CASE-4	193.2	-382.6	-157.0	-398.5
CASE-5	173.7	-309.4	147.7	-353.9
CASE-6	310.9	-362.2	253.8	-309.4
CASE-7	204.1	-383.5	157.1	-386.8
CASE-8	212.2	-381.3	159.3	-376.8
CASE-9	223.7	-377.0	163.1	-362.0
CASE-10	247.8	-341.0	223.2	-351.4
CASE-11	302.9	-293.8	293.8	-301.6

注) 表中の符号は-: 圧縮、+: 引張を示す。

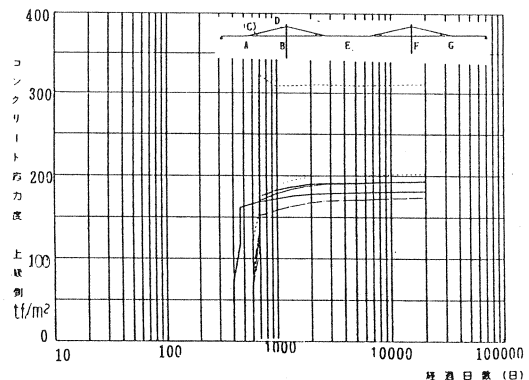


図-7 斜版部コンクリート応力度の経時変化図(主桁側取付部)