

大阪環状線 PC 桁コンクリートの配合について

横 田 光 彦
堀 内 義 朗

1. まえがき

昭和 31 年以降工事を進めている大阪環状線の高架橋新設区間では、井筒基礎橋脚上に合成桁（支間 20 m 前後の活荷重合成）を架設する型式をその大部分に採用し、すでにその完成を見たものもあるがその後経済性、保守作業等の理由で上部構造の設計を変更し、原則として合成桁の代りに PC 桁を架設することにした。

これらの PC 桁は総数 89 連（単線分）で（表—1 参照）、その大部分がポストテンション方式である。34 年 11 月以来順次製作に着手し西九条、安治川関係を除いておおむね製作架設を完了したので、この機会に桁本体の製作に用いたコンクリートについて報告することにした。なお桁製作はオリエンタルコンクリート (O.K.K.)、ピー・エス・コンクリート (P.S.C.) の二社がほぼ半数ずつ行なった。

2. 材 料

(1) 骨 材

骨材は O.K.K. では吉井川産、吉野川産のものを、P.S.C. では那賀川産のものを使用し、その性質は図—1 のとおりである。一般に粗骨材の粒径 5~10 mm のものが若干不足している。骨材のふるい分けは、粗細いづれについても行なわなかった。

(2) セメント

セメントは O.K.K. では小野田セメント、P.S.C. ではアサノセメントを使用した。桁コンクリートには原則として、早強ポルトランドセメントを用いることにしたが、一部試験的に普通ポルトランドセメントを用いた桁もある。使用セメントの性質は表—2 のとおりである。

(3) 分散材

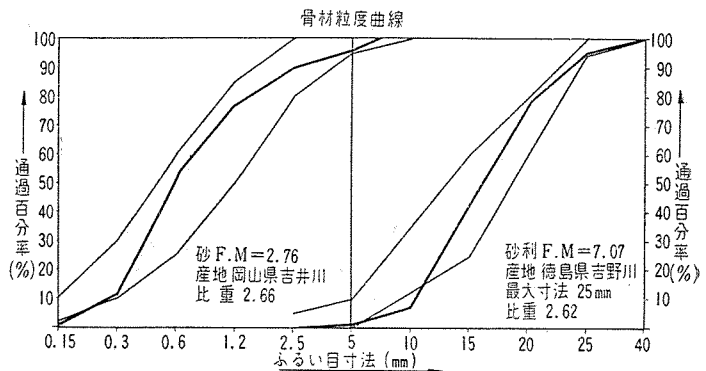
コンクリートのウォーカービリチーの増加、単位水量、単位セメント量の減少等の点から考えて、分散材の使用は非常に有利である。分散材として用いられているものにはポゾリス、プラスチック等があるが、 w/c の比較的小さい高強度のコンクリートにはポゾリスが最も有利であることから、

表—1

名 称	支間(m)	連数	型 式
西九条跨線橋	# 16.15	2	ポストテンション (未了)
西九条西二番高架橋	# 22.63 19.28	11 1	" (")
西九条西三番高架橋	# 26.10	4	" (")
北安治川高架橋	# 23.56	8	" (")
南安治川高架橋	21.60 20.40	2 10	" (")
弁天町高架橋	22.40	4	"
辰巳町架道橋	22.40	2	"
八雲町第一南架道橋	15.33	2	"
八雲町第一高架橋	19.00 18.70 17.60	1 6 1	"
八雲町第二架道橋	12.84	2	プレテンション 桁高制限
八雲町第二高架橋	19.00他	8	ポストテンション
八雲町第五架道橋	12.65	2	プレテンション 桁高制限
八雲町第六架道橋	17.50	2	ポストテンション 桁高制限
八雲町第七高架橋	23.50	4	ポストテンション
八雲町第八架道橋	径 11.60	2	プレテンション 桁高制限
	18.80	1	ポストテンション
市岡元町高架橋	18.10 17.80 15.90	7 5 1	" " "
岩崎町西橋梁	17.80	1	"
合 計		89	

注：支間のうち（#）は井筒中心間距離、（径）は径間

図—1



図—2

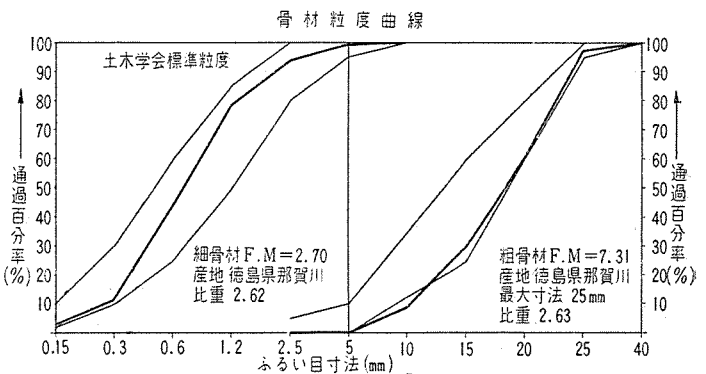


表-2 セメント試験結果

試 験 項 目		小野田早強セメント	小野田普通セメント	アサノ早強セメント	アサノ普通セメント
比 重		3.14	3.17		
粉末度	比表面積(ブレン方法)(cm ² /g)	4130	3350	4070	2940
	標準網フルイ 88μ 残分(網フルイ方法)(%)	0.2	1.8	1.2	4.4
凝 結	始 発 (h)	1.89	2.66	2.42	2.73
	終 発 (h)	2.85	3.68	3.85	4.63
安定性	浸 水 方 法	完全	完全	完全	完全
	煮 沸 方 法	"	"	完全	完全
強 さ (kg/cm ²)	曲 げ 強 さ	1 日 目	—	—	24.3
		3 日 目	52.5	34.6	50.5
		7 日 目	66.6	50.6	63.4
	圧 縮 強 さ	1 日 目	—	—	86
		3 日 目	238	131	222
		7 日 目	344	231	331
マ グ ネ シ ア (%)		1.45	1.61	1.17	1.43
無 水 硫 酸 (%)		2.12	1.60	2.04	1.93
強 熱 減 量 (%)		0.81	0.61	0.82	0.75

ポゾリス No. 10, No. 5 を使用した。両者の使いわけは冬期寒冷時には早強性を増進する No. 10 を、夏期高温時には No. 5 を使用することにした。

3. 配 合

配合決定の順序としては施工上必要なスランプをうるに適当な水量 W と細骨材率 s/a を求め、ついで w/c を変えて $c/w-\sigma$ 曲線を作り、所定の圧縮強度が得られる w/c を決定した。最初に施工したのは八雲町第二高架橋であったのでこれの決定配合を基準として、その後施工した各桁の配合を定めた。

(1) 単位水量

単位水量は、コンクリートの乾燥収縮およびクリープによるプレストレスの減少を極力避ける点からいって、できるだけ小さくすることが必要である。このことは必然的に硬練りのコンクリートを施工することになり、打設に強力な振動機を必要とし、打設作業の難易と単位水量の減少とは相反することになる。それで打設作業上最少 3 cm 程度のスランプは必要であると推定して単位水量 140~170 kg/m³ の範囲でスランプ試験をした結果、

図-3

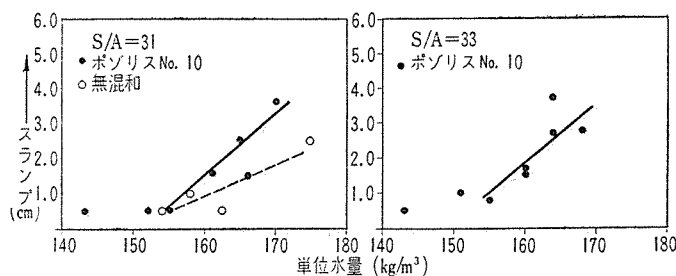
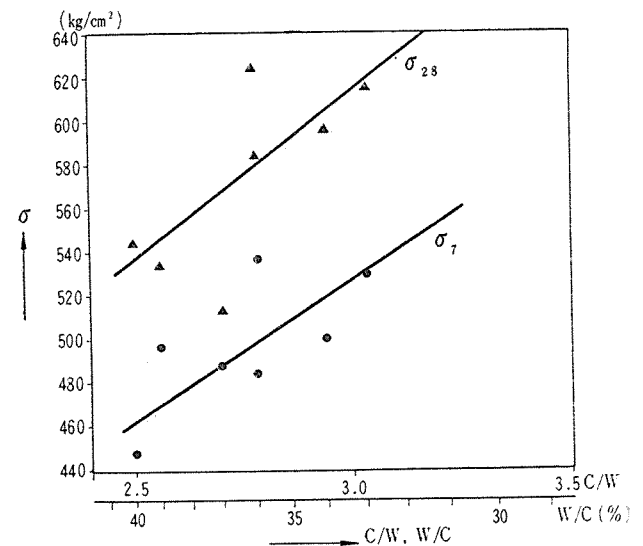


図-3 のようになった。160 kg/m³ 以下ではコンクリートは分離の傾向があるので問題にならず、検討の結果 164~166 kg/m³ を適当な単位水量として選定した。もちろん水量の減少を計るために、分散材としてポゾリスを使用したのであるが、その結果、同一のスランプをうるために 5~7% の水量を減ずることができた。

(2) 水セメント比

$w/c=33\sim40\%$ の範囲の 7 種類 42 個の供試体により $c/w-\sigma$ の関係を求めた結果、図-4 のようになった。ミキシングプラントの設備状況より判断して、変動係数を 14~16% と推定し、危険率を 1/160 とし割増係数 1.3 を得た(丸安隆和著:コンクリートの品質管理, 土木学会発行 参照)。

図-4



この危険率は鉄筋コンクリート標準示方書によれば 1/20 以上であれば十分であるが、鉄道橋に PC 桁を大規模に使用する最初であるために安全をとって、舗装コンクリートの品質管理限界と同等である 1/160 を採用したのである。

従って設計に用いた所要強度 $\sigma_{28}=400$ kg/cm², 450 kg/cm² に対して w/c を次のように定めた。

$$\begin{aligned} \sigma_{28}=400 \text{ kg/m}^3 & 400 \times 1.3 = 520 \text{ kg/m}^3 & w/c = 39\% \\ \sigma_{28}=450 \text{ kg/m}^3 & 450 \times 1.3 = 585 \text{ kg/m}^3 & w/c = 36\% \end{aligned}$$

(3) セメント使用量

$w/c=39\%, 36\%, W=164$ kg/m³, 166 kg/m³ より $C=420$ kg/m³, 460 kg/m³ が得られた。

示 方 配 合

	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	分散材 (%)	設計所要強度 σ_{28} (kg/cm ²)
A	25	2~3	164	420	39	33	1	400
B	25	2~3	166	460	36	31	1	450

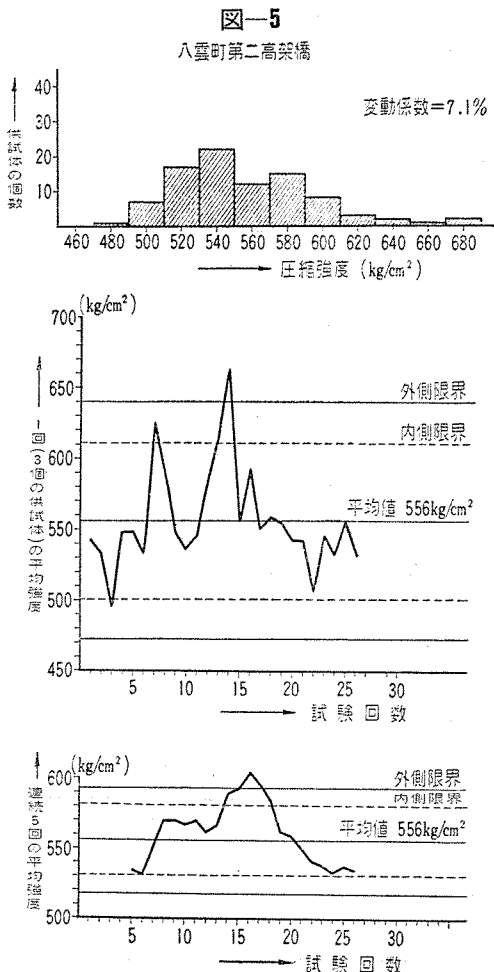
表-3 各高架橋の示方配合, 圧縮強度その他

名 称	型 式	施工者	施工期間	示 方 配 合							材設 令計 28強 日度	プ 入 時 所 要 強 度 導	材 令 最 小 28 日 所 要 強 度	桁 コ ン ク リ ー ト 圧 縮 強 度 平 均 値			σ_{28} の 変 動 係 数
				粗 骨 材 の 最 大 寸 法	ス ラ ン プ の 範 囲	単 位 水 量	単 位 セ メ ン ト 量	水 セ メ ン ト 比	絶 対 材 率	分 散 剤				σ_7	σ_{28}	$\sigma_{28 \text{ min}}$	
八雲町第二高架橋	ポスト テンション	O.K.K.	33-12~34-4	25	2~3 2~3	166 164	460 420	36 39	31 33	1 1	450 400	400 350	405 360	461 487	580 556	494 482	6.4 7.1
八雲町第一高架橋	〃	P.S.C.	34-3 ~34-8	25	3~4	164	420	39	33	1	400	350	360	488	603	449	10.3
八雲町第七高架橋	〃	O.K.K.	34-5 ~34-7	25	3~4	168	420	40	33	1	400	350	360	463 403	509 454	464 422	7.1 5.1
八雲町第六架道橋	〃	O.K.K.	34-5 ~34-7	25	3~4	170	460	37	31	1	450	400	405	461	499	450	6.4
八雲町第一南架道橋 辰巳町架道橋	〃	P.S.C.	34-5 ~34-8	25	3~4	164	420	39	33	1	400	350	360	490	576	504	6.9
弁天町高架橋	〃	P.S.C.	34-8~34-10	25	3~5	156	380	41	35	0.5	400	350	360	431	529	475	3.9
八雲町第八架道橋	プレ テンション	O.K.K.	34-4 ~34-6	15	2~3	168	480	35	33	1	500	425	450	508	555	509	2.9
八雲町第二架道橋	〃	P.S.C.	34-5 ~34-7	15	2~3	168	480	35	33	1	500	425	450	565	705	680	2.2

(4) 圧縮強度

八雲町第二高架橋の圧縮強度試験は図-5のとおりである。また変動係数は7.1%および6.4%であった。変動係数は実際より過大に見積っていたこととスランプは2~4 cmの範囲にあり、打設作業に多少困難を感じたので、同一プラントで次に施工する第七高架橋、第六架道橋については変動係数を最悪でも10~14%として割増係数1.16を用いた。

第七高架橋 $\sigma_{28} = 400 \text{ kg/cm}^2$
 $400 \times 1.16 = 460 \text{ kg/cm}^2$



第六架道橋 $\sigma_{28} = 450 \text{ kg/cm}^2$

$450 \times 1.16 = 520 \text{ kg/cm}^2$

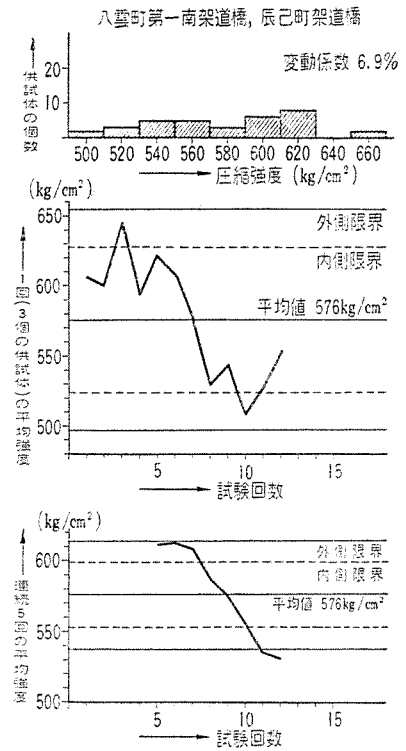
$w/c = 40\%$, 37% とし単位セメント量を増加せずに単位水量を増してスランプを1 cm程度増加した。その結果表-3に示すごとく材令28日の平均強度500 kg/cm^2 , 509 kg/cm^2 , 変動係数7.1%および6.4%を得た。

P.S.C.のプラン

トでは当初施工の八雲町第一高架橋、八雲町第一南架道橋、辰巳町架道橋については試験練りを行ない、八雲町第一高架橋と同じ配合を用いたが、その結果は図-6、表-3のとおりである。

これらの結果より、セメント量ができるだけ少なくしたいので再び水量-スランプ、 w/c の試験を行ない、桁のクリープ試験の関係も実験

図-6

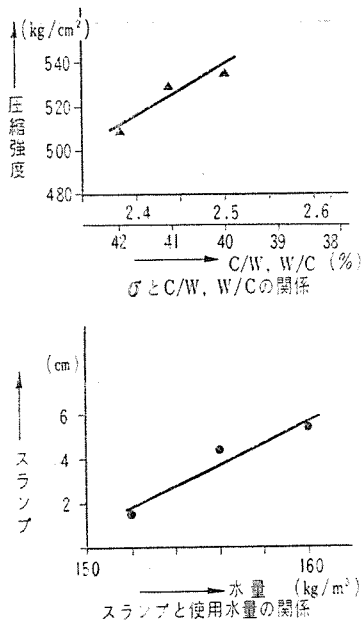


示 方 配 合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	単位水量 (kg/m^3)	単位セメント量 (kg/m^3)	水セメント比 (%)	細骨材 (%)	分散材 (%)	設計所要強度 σ_{28} (kg/cm^2)
25	3~4	156	380	41	35	0.5	400

的に弁天町高架橋については次の配合を使用した(図-7)。

図-7



圧縮強度試験の結果は図-8のとおりである。

(5) 施工に当たっての桁コンクリートの品質管理の条件

品質管理上の条件として追加示方書において次のように規定した。

第 27 条

(1) コンクリートのスラブ試験は次により行い、その結果を提出すること。

- (a) 午前、午後少なくとも1回づつ
- (b) 現場配合が変わったとき
- (c) 現場配合が変わったと思われるとき
- (d) そのほか監督員が指示したとき

(2) 圧縮強度試験は直径 15 cm、高さ 30 cm のテストピースを製作し、(i) σ_7 (ii) σ_{28} 、(iii) プレストレス導入時、の3種類とすること。

(3) テストピースの数は、桁1本ごとに (i) 3個、(ii) 3個、(iii) 12個とし、その結果を提出すること。

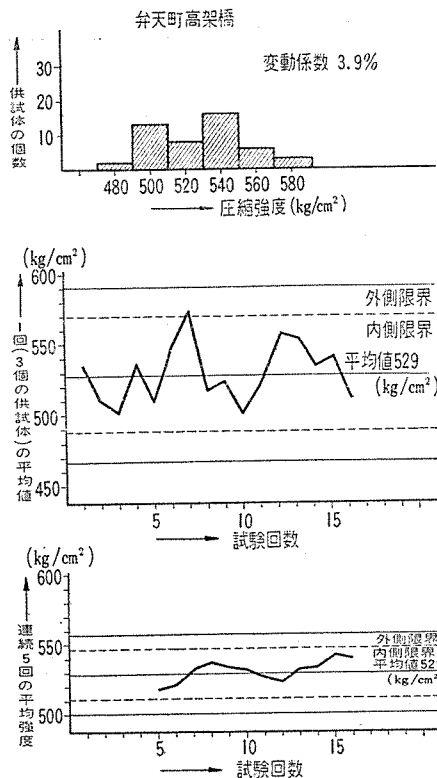
(4) テストピースはコンクリートを2層に分けて振動機で締め固めて製作すること。

(5) プレストレスを与えるときの圧縮強度試験用テストピースの養生は、半数を製作中の桁と同一とし、半数は標準養生とすること。

第 28 条

材令 28 日の圧縮強度試験の結果、3 個の平均値が所要の圧縮強度（設計において基準とした、材令 28 日の圧縮強度 σ_{28} ）に満たない場合 および最小値が所要の圧縮強度の 90% に満たない場合は、そのコンクリートを

図-8



用いた桁は不合格とする。

(6) プレストレス導入時の圧縮強度

プレストレスの導入は、所要強度がポストテンションで $350 \sim 400 \text{ kg/cm}^2$ 、プレテンションで 450 kg/cm^2 であり、その強度は材令 3~4 日で得られる。しかし早期材令でプレストレスを導入することは将来のクリープを増加し有効プレストレスの減少を見るから、できるだけ遅い時期（すなわち係数 k の値を小さくする）がよいわけであるが、製作ベースの数、工期等より考えて材令 6 日以上で導入した。プレストレス導入時の圧縮強度の平均、 k の値を示すと表-4 のようになる。

4. 桁コンクリートの温度上昇および乾燥収縮

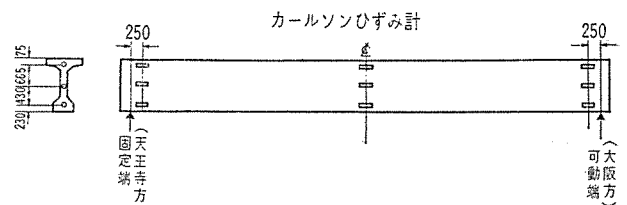
本環状線 PC 桁施工に当たって構造

表-4

名 称	σ_{28} (kg/cm ²)	σ (kg/cm ²)	σ_{∞} (kg/cm ²)	σ/σ_{28}	k
八雲町第二高架橋	556	439	640	0.69	1.30
八雲町第一高架橋	603	503	695	0.72	1.15
八雲町第七高架橋	509	465	586	0.79	0.90
八雲町第六架道橋	454	398	590	0.77	0.95
八雲町第一南架道橋	499	469	574	0.82	0.82
辰巳町架道橋	576	469	663	0.71	1.20
弁天町高架橋	529	419	608	0.69	1.30
八雲町第八架道橋	555	488	638	0.77	0.95
八雲町第二架道橋	705	552	811	0.68	1.35

物設計事務所の指導のもとに実際の桁について各種の試験器具 ① 鋼棒式ひずみ計、② カールソン式ひずみ計、③ 技研式ひずみ測定器) を用いてクリープおよび乾燥収縮の合計の長期測定を行なっている。このうちカール

図-9



ソン式ひずみ計（図-9 のように配置）は、ひずみ量のほかにコンクリートの温度も測定できるようになっているので、これを用いて硬化時のコンクリートの温度上昇およびコンクリート打設後プレストレス導入までの乾燥

報 告

収縮を測定してみた。なお桁はコンクリート打設後、麻袋を上面にかけ約3日間散水養生を行なった。また型わくは打設の翌日脱却した。

(1) コンクリートの温度上昇

a) セメントの種類 八雲第七高架橋において配合を変えずにセメントの種類を変えてコンクリートの温度上昇を測定した結果 図-10, 11 のようになった。

硬化時のコンクリートの温度上昇は普通セメント, 早

図-10

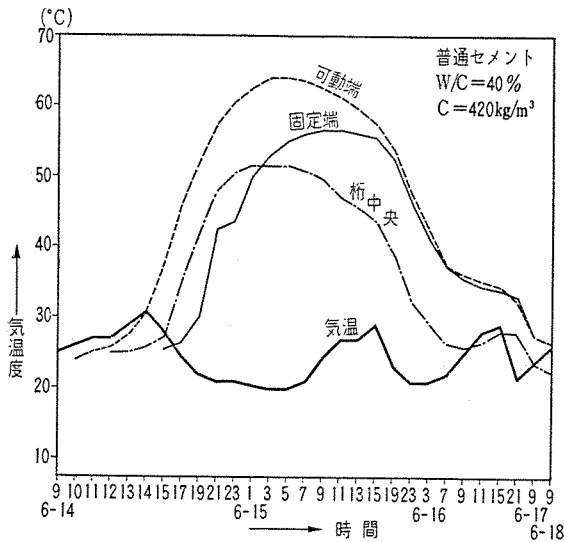
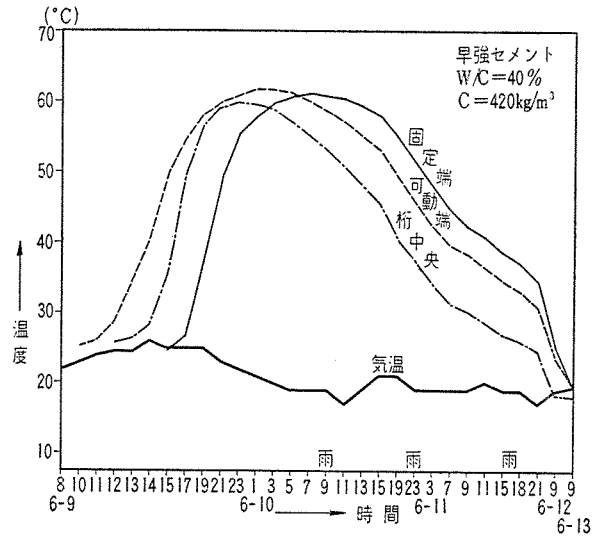


図-11



強セメントと普通セメントでは前者が若干高い程度で大差がないこと, 最高温度に達する時間では早強セメントが数時間早いと推定される。

b) 単位水量および単位セメント量 単位水量, 単位セメント量を変えた場合のコンクリートの温度上昇を比較したものが 図-12, 13 である。この結果を見ると最高温度はむしろ単位水量, セメント量の少ない弁天町高架橋の方が 6~7°C 高くなっている。これは外気温度の

強セメントいづれの場合でも中央部よりも端部において高い。これは腹部厚が端部において中央部の2倍以上あるためである。最高温度の平均値は普通セメントで 57.5°C, 早強セメントで 60.5°C で若干後者が高いが, 最高温度は逆に普通セメントが高くなっている。また最高温度に達する時間は 2~3 時間早強セメントが早い。しかしこの両者では天候気温等の外的条件が若干異なり特に早強セメントの場合にコンクリート打設の翌日に降雨があったこと等を考慮すると, 最高温度については早強セ

図-12

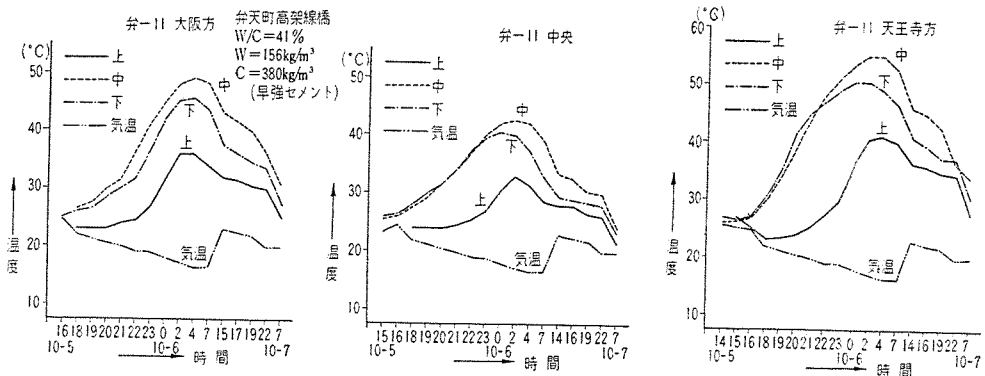
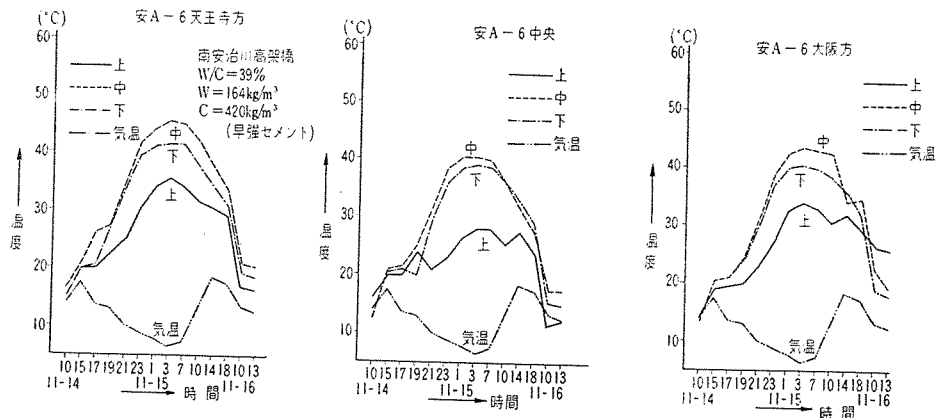


図-13



差が最低温度で 10°C も異なるためと思われる。すなわち、この程度の水量 (5%)、セメント量(10%)の差ではコンクリートの温度上昇は配合よりも、むしろ外気温に左右される方が多いと考えるべきである。

(2) 乾燥収縮

a) セメントの種類 単位水量, 単位セメント量を等しくした場合のセメントの種類による乾燥収縮度を比較したものが表-5で, 気象条件は 図-14 のとおりで

表-5

		端部	中央	端部	平均	註
八雲町第七高架橋	早強セメント w/c=40% C=420 kg/cm ³	×10 ⁻⁶ - 94	×10 ⁻⁶ -107	×10 ⁻⁶ -128	×10 ⁻⁶ -110	コンクリート打設後プレストレス導入までの9日間
	普通セメント w/c=40% C=420 kg/m ³	- 47	- 35	- 54	- 45	"

図-14

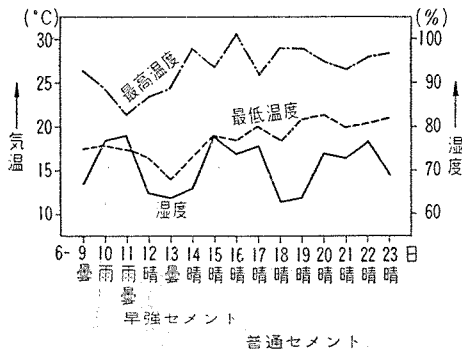
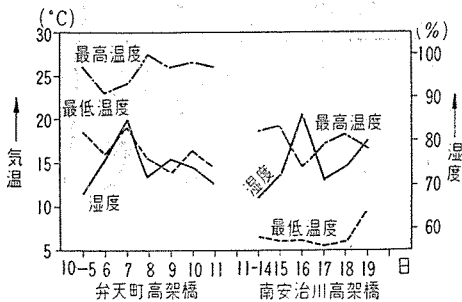


図-15



ある。現在のところでは早強ポルトランドセメントに対しては普通ポルトランドセメントの乾燥収縮度の1.5倍とするのがよいといわれているが、この結果から見ると材令の初期にはさらに比率が大となり約2.5倍になっている。ただし数カ月後においてはこの比はもっと小さくなるであろうと思われる。それは普通ポルトランドセメントは水和作用の程度がまだ早強セメントより少なく

表-6

		端部	中央	端部	平均	備考
早強セメント w/c=39% C=420 kg/m ³ W=164 kg/m ³	南安治川高架橋	×10 ⁻⁶ 94	×10 ⁻⁶ 107	×10 ⁻⁶ 115	×10 ⁻⁶ 105	コンクリート打設後プレストレス導入までの5日間 部材最小寸法 18 cm
	上	179	93	114	129	
	中	101	17	36	51	
早強セメント w/c=41% C=380 kg/m ³ W=156 kg/m ³	弁天町高架橋	65	115	113	98	コンクリート打設後プレストレス導入までの6日間 部材最小寸法 20 cm
	上	102	120	91	104	
	中	104	110	113	109	

なく、硬化したゲルの水分の蒸発により収縮を起す余裕がなく、まだ多く残っているものと考えられるからである。

b) 単位水量, 単位セメント量 単位水量, セメント量を変えた場合の乾燥収縮度の比較をしたものが、表-6である。

単位水量, 単位セメント量が大きであるほど、乾燥収縮量は大きくなるが、この結果より見ると、期間、部材最小寸法、気象条件に多少の差があるので明確にはいえないが、単位水量で5%, 単位セメント量で10%程度の差は乾燥収縮に注目すべきほど大きな影響は無いようである。

5. 結 言

本大阪環状線のPC桁は先にも述べたように鉄道橋に大規模にPC桁を採用した最初であるので、配合についても特に強度等の点で必要以上に安全をとりすぎた点もあるような気がする。従ってセメント使用量も1m³当たり420~480kgで、このことはコンクリート中のセメントペースト量を増し、必然的にクリープ、乾燥収縮、工費の増加を見ることになった。今後の施工に当たってはセメント量は最大400kg/m³程度におさえたいと思う。これは骨材のふるい分け、プラントの管理に注意すれば十分達成できると思う。諸外国の例でも400kg/m³以上のセメントを使用する例はあまりないようである。また施工上コンクリートのスランブは4~5cm程度にしたい。これは当初考えていた3cmのスランブでは、特に木製型わくでは振動機の効果が減殺されて、表面の気泡を完全に除去することが困難であったことと、配筋が複雑な桁では締固めに多少困難を感じたためである。

以上まことにまとまりのない内容であるが、諸者諸賢の参考になれば幸いである。

(横田: 国鉄大阪工務局環状線課長)
(堀内: 同 弁天町工事区長)