

## 応力が変化するコンクリートのクリープについて

中 島 儀 八\*・中 島 泰 一\*  
山 本 隆 治\*・山 内 博 司\*

### 1. ま え が き

筆者らが、先に行なったPC片持ばりの塑性たわみ実験<sup>1)</sup>において、片持ばりにかかる静荷重モーメントとプレストレスによるモーメントを導入時において均衡させ、いかえれば、はり断面内の応力分布を等分布状態とさせ、その後のたわみ、すなわち鋼棒の偏心によるたわみを測定したところ、緊張力の減力より推算されるたわみ量より大きい値を示した。2倍以上に達するものもあった。これを説明するにはクリープに関するWhitneyの法則に示されるひずみより片持ばりの上縁では小さく、下縁では大きいひずみが生じているとしか思われな。こうした考えから富配合、早期導入コンクリートでは、回復クリープ（あるいは遅発弾性変形）が大きく影響するのではないかという疑問を持つにいたった。この一連の実験計画は配合を1種類とし、応力開放時期を変数とした。

### 2. クリープリカバリーに関する従来の研究

いままでの文献から、リカバリーのデータを二、三拾ったものを表-1に示す。くわしくは後記文献を参照されたい。

表-1のFreudenthal & Rollは、導入材令が若いほど、Ishaiは載荷時間が短いほどリカバリーは大きい。

Rollによれば配合がrichなほど、L'Hermitte, Mamillianによると、セメントペーストよりコンクリートにおいて大きく表われている。おそらく、水セメント比が影響するのであろう。

リカバリーが安定する（ほぼ終了する）までの時間はRollの実験では、相当長期間を要しているが、他の実験では数日あるいは数週間で安定していることを示している。Ishaiによれば、リカバリーはあまり湿度に対して敏感でない。これはリカバリーが弾性変形の一つであることからほぼ想像される。

D. McHenry<sup>2)</sup>は、ダムに応力測定において、筆者の片持ばりの実験と同様な疑問をもち、クリープリカバリーをふくめたクリープに関する重ね合せの法則について理論的・実験的考察を行なったものである。

S. Bäckströmは、D. McHenryの考え方について実験を行ない立証した。

彼等の考えを図で示すならば、図-1のようになる。時間 $t=0$ でそれぞれ $2\sigma$ ,  $\sigma$ ,  $0$ の応力を導入し、 $t=t_1$ で $2\sigma \rightarrow 2\sigma$ ,  $\sigma \rightarrow 2\sigma$  or  $0$ ,  $0 \rightarrow \sigma$ と変化させた場合、変化後の曲線群C~D'', C~D''', E~Fはそれぞれ時間軸

表-1 リカバリー クリープに関する従来の研究

実験者	配合	環境	導入材令(日)	応力 kg/cm <sup>2</sup>	開放材令(日)	リカバリー (%)	安定期間	備考
A.M. 2) Freudenthal & F. Roll	コンクリート C/A=1:6 w/c=52.5%	14日まで	28	109	56	(35)	Few days	1,3,5 & 2,4, 6の実験は同一の試験体
		21°C 100% rH	"	218	56	(19)		
		28日まで	84	109	112	(22)		
		21°C 60%	"	218	112	(15)		
		実験中 50%	140	109	168	(16)		
			"	218	168	(11)		
R. 3) L'Hermitte	セメントペースト コンクリート		28	320 120~160	28+21 28+1 200	18* 20~28*	6日 5~8日	
Mamillian 4)	セメントペースト w/c=25.6%	脱型まで	1	100 200	210 210	(13) (14)	Some dozen days	
	コンクリート C/A=1:4.8 w/c=49%	20°C 99% rH	7	50	144	(13)	6日	
		以後 20°C 50% rH		100 150	144 144	(27) (21)		

\* 住友建設株式会社

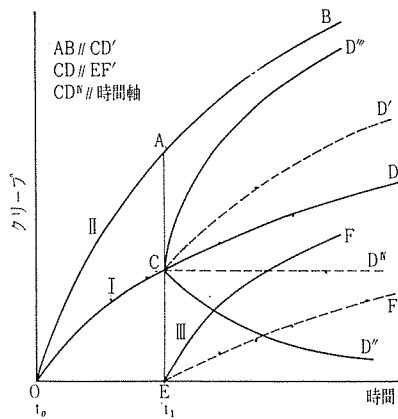
実 験 者	配 合	環 境	導 入 材令(日)	応 力 kg/cm <sup>2</sup>	開 放 材 令 (日)	リカバリー (%)	安定期間	備 考
5) F. Roll	$C/A=1:6$ $w/c=52.5\%$	14日間 21°C 100 % 28日まで 21°C 60 % 試験中 21°C 50 % rH	28	20	28+210	14	210 日	
				35	"	14		
				50	"	12		
				65	"	9		
	$C/A=1:4$ $w/c=48.7\%$			20	28+210	19	350 日	
				35	"	17		
	$C/A=1:2.5$ $w/c=44.3\%$			50	"	12	420 日	
				65	"	10		
	$C/A=1:1$ $w/c=30.6\%$			20	28+210	42	520 日	
				35	"	28		
				50	"	25		
				65	"	not complete		
6) Ori Ishai	モルタル $s:20\%$ $c+w:80\%$ 以上 by vol. $w/c=32\%$ S. Leighton Buzzard Type	20日間水中養生 21日以後 I : insulate H : 80% S : 水中	28	7	28+7	(62.5)	Few days	外力は Torsion したがって応 力はせん断応 力である。
				14	"	(68.3)		
				21	"	(43.9)		
				28	"	(41.4)		
					28+ 2 hr	—		
					" + 4 hr	—		
					" 8	—		
					" 1 d	(93.3)		
					" 3 d	(92.5)		
					" 1 W	(85.8)		
					" 4 W	(61.8)		
					" 8 W	(52.8)		
					" 16 W	(34.8)		
					" 24 W	(29.7)		
					28+ 2 hr	—		
					" 4 hr	—		
					" 8 hr	—		
					" 1 d	72.1		
					" 3 d	68.0		
					" 1 W	73.0		
	" 4 W	52.6						
	" 8 W	43.1						
	" 16 W	38.3						
	" 24 W	32.0						
	28+ 2 hr	95.0						
	" 4 hr	74.2						
	" 8 hr	82.3						
	" 1 d	77.0						
	" 3 d	64.2						
	" 1 W	63.1						
	" 4 W	50.8						
	" 8 W	41.4						
	" 16 W	34.5						
	" 24 W	28.3						
9) S. Bäckström	$C:640\text{ kg}$ $w/c:35$ $\alpha_{\max}=4\text{ mm}$	7日水中その後 導入まで空中 導入後は 20°C 60% H	7	22.5	7 + 7 d			
			"		" 21 d			
			"		" 84 d			
			28		28 + 3 W			
			"		" 7 W			
				"	" 12 W			

注: 1) 上表中 °F, Psi はそれぞれ °C, kg/cm<sup>2</sup> に換算した。

2) リカバリーは開放前の全クリープひずみに対する割合で示してある。( ) を付したものは文献記載のグラフから推定した値である。

\* を付した数字は瞬間可逆ヒズミ (開放弾性変形) に対する割合で示されたものである。

図-1 クリープ機構



に平行な一定値, A~B に平行な C~D', C~D に平行な E~F' になるのではなくて, つぎの式にしたがう, それぞれ C~D', C~D'', E~F のようになるというのである。

$$C \sim D' = (I) - (E \sim F)$$

$$C \sim D'' = (I) + (E \sim F)$$

この考え方をおし進めると, 遅発弾性変形を無視できないコンクリートでは Whitney の法則でいうところの

$$\epsilon_s = \frac{\sigma}{E} \varphi_{t_1} + \frac{\sigma + \Delta\sigma}{E} (\varphi - \varphi_{t_1}) \dots \dots \dots (1)$$

は必ずしも成立しない。当然のことながら, 彼等の理論によると I あるいは II と III いかえれば導入材令の変化をもふくめて, クリープ曲線の数式を基本的曲線として, 実験で得なければならぬ。そしてクリープ曲線は, 2つの指数関数の和として正確にあらわすことができる。決定しなければならない係数は5個である。

T・H・Hannover の M・F・B Institute の Dr. Gaede<sup>1)</sup> は, さらに極端に 図-1 で  $t=t_1$  で  $\sigma \rightarrow 2\sigma$ ,  $0 \rightarrow 2\sigma$  と応力を変化させた場合, 変化後は I および III の曲線は次

第に II に近づく。すなわち, 変化後は転位する傾向があるとしている。しかしながら, この考え方を発展させると, クリープの量は導入材令に無関係なコンクリート固有のものとなる。確かにコンクリートのクリープは固有値問題的な一面を有するが, これまでの数多くの実験を考え合わせると全面的に認めるわけにはいかない。しかしながら, 片持ばりの実験においてクリープの量が導入材令別に定かでないところから, 早期導入コンクリートでは, これらの傾向を有しているとはいえないことはない。

3. 実験のあらまし

いままでのクリープ リカバリー実験においては,

- 1) 導入材令が若く, 載荷時間が短い実験はきわめて少ない。
- 2) 導入応力を開放した実験が大部分をしめ, 応力を増加したものは, 部分的に変化させたものは, ほとんど見当らない。

本実験においては, 材令4日でプレストレスを導入し, リカバリーと載荷期間との関係 (Group III), 初期導入応力を 0.5 倍だけ増減した場合の比較 (Group II), 初期応力を種々の割合に減少させた試験 (Group I), リカバリーと導入材令との関係 (Group IV) の4つに分けて試験した。それぞれ昭和 40 年 8 月 2 日, 8 月 17 日, 8 月 27 日, 昭和 41 年の 1 月 28 日に供試体のコンクリート打設を行なった。

供試体の形状・寸法は 図-2 (a) に, 供試体の種類は表-2 に示す。供試体は各グループごとに同一条件に製作し保持した。各グループとも供試体の数は 12 本とし, そのうち一本を control specimen とした。

ただし第四グループは, 一端にバネをはさみ応力低下

図-2 (a)

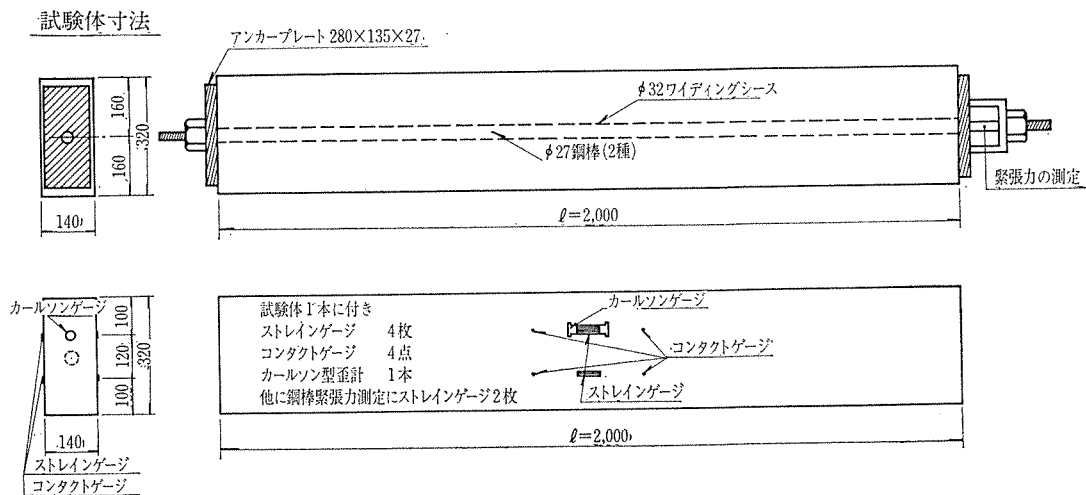


表-2 供 試 体 種 類

供試の内訳 I~III グループのプレストレスの導入は材令4日で行なう

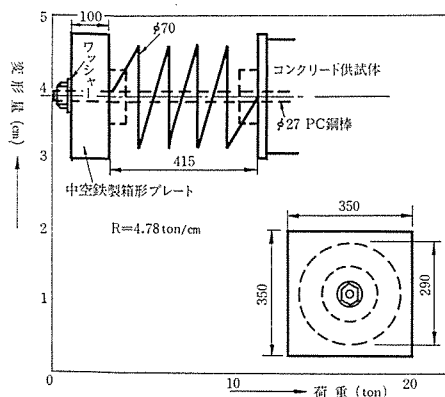
グループ	桁番号	本数	試験体の応力状態
I グ ル ー プ	1	1	導入応力 75 kg/cm <sup>2</sup> 以後放置
	2	2	" " 導入後3日後 60 kg/cm <sup>2</sup> にし 以後放置
	3		
	4	2	" " " " 45 "
	5		
	6	2	" " " " 30 "
	7		
	8	2	" " " " 15 "
	9		
	10	2	" " " " 0 "
	11		
	12	1	乾燥収縮用

グループ	桁番号	本数	試験体の応力状態
II グ ル ー プ	1	1	導入応力 75 kg/cm <sup>2</sup> 以後放置
	2	2	" 50
	3		
	4	2	" 25
	5		
	6	2	" 50 kg/cm <sup>2</sup> 導入後3日後 75 kg/cm <sup>2</sup> にし 以後放置
	7		
	8	2	" " " 25 "
	9		
	10	2	" " " 0 "
	11		
	12	1	乾燥収縮用

グループ	桁番号	本数	試験体の応力状態
III グ ル ー プ	1	1	導入応力 75 kg/cm <sup>2</sup> 導入後1時間後0にし以後放置
	2	1	" " " 3 " " "
	3	1	" " " 8 " " "
	4	1	" " " 24 " " "
	5	1	" " " 3日後" " "
	6	1	" " " 7 " " "
	7	1	" " " 2週間 " " "
	8	1	" " " 4 " " "
	9	1	" " " 12 " " "
	10	1	" " " 36 " " "
	11	1	以後放置
	12	1	乾燥収縮用

グループ	桁番号	本数	導入応力 50 kg/cm <sup>2</sup>
IV グ ル ー プ	1	1	材令4日で導入, 11日で開放
	2	1	" " " 18 "
	3	1	" " " 32 "
	4	1	" " " 60 "
	5	1	" " " 以後応力保持
	6	1	" 11 " 60 開放
	7	1	" 18 " " "
	8	1	32 " " "
	9	1	60 " 88 "
	10	1	11 " 39 "
	11	1	18 " 46 "
	12	1	乾燥収縮用

図-2 (b) 第4グループのバネの特性



を防止した(図-2 (b))。

a) 導入応力の管理 供試体には軸方向圧縮応力をPC鋼棒(φ27 第2種 住友電工製)を用いて導入した。導入は材令4日目に行ない,導入時の応力はダイナモメーターとストレインゲージを併用して測定し,それ以後の測定にはストレインゲージを用いた。ストレインゲージと緊張力の関係はあらかじめキャリブレーションを行なっておいた。導入応力の大きさは導入時圧縮強度の1/3以内に入るように定めた。

b) 配 合 コンクリートの圧縮強度を  $\sigma_{28}=400$  kg/cm<sup>2</sup> とし,セメントは早強セメントを用い,コンクリートの配合は,すべてセメント 400 kg, 砂 645 kg, 砂利 1 215 kg,  $w/c=41.3\%$  とした。骨材の最大粒径

は 25 mm である。

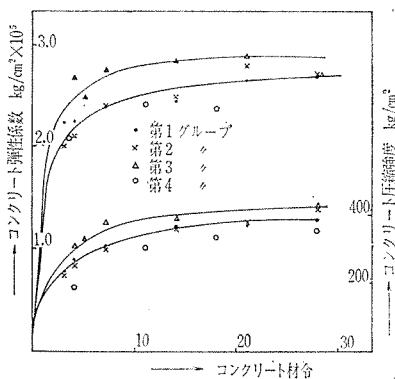
c) 外的条件 実験は当社相模原実験室内において行ない、養生は行なわずローラーで支承させたまま室内に放置した。室内の温度変化は試験が長期にわたるため比較的大きいが、湿度は 40~60% であった。

d) ひずみの測定 ひずみの測定にはカールソン型ひずみ計を用い、チェックの意味でストレインゲージおよびコンタクトゲージを併用した。ゲージの埋込み位置は 図-2 (a) に示されたとおりである。

e) パラメーター 載荷期間・応力・導入材令をとった。セメント骨材比・水セメント比・外的条件などを変化させても、実用上の目的には無意味と考えたからである。

以上の各図においては、クリープは乾燥収縮とは独立な現象と仮定し、とくに断わらないかぎり control specimen から得られた乾燥収縮量は差し引いて図示した。また、試験に用いた供試体と同一条件に製作・保持した円筒テストピースから圧縮強度および弾性係数を 図-3 に図示した。

図-3 弾性係数・圧縮強度時間曲線



#### 4. 実験結果

実験順序とは混乱するが論議を進める方法としてやむをえないのでご了承願いたい。

##### (1) グループ I の実験

供試体に 75 kg/cm<sup>2</sup> の圧縮応力を材令 4 日目に導入し、導入後 3 日目に作用応力を種々の値に変化させた場合のひずみ測定結果を 図-4 に示す。図-5 はリカバリーのひずみだけをとり出して、変化弾性ひずみ量との関係を図示したものである。これらの図からリカバリークリープは応力変化量に比例するものと思われる。

Mamillian<sup>4)</sup> および L' Hermitte<sup>3)</sup> は、応力を 0 まで開放した後の全塑性ひずみ (乾燥収縮をふくむ) は、前に載荷していた応力に比例するとしているし、Roll は、応力を 0 まで開放した時のリカバリーは前に受ていた応力に比例するとしている<sup>3)</sup> ので、リカバリーは弾性ひず

みの変化量、すなわち、ヤング係数が明確であるならば応力変化量に比例する、と考えてさしつかえないと思われる。すなわち、リカバリークリープに対してフックの法則が成立する。

したがって、コンクリートの時間依存のクリープ係数は、応力の絶対値 (作用応力の大きさ) に比例する  $\varphi_b$  と応力の変化量に比例するリカバリークリープ係数 (転位クリープ係数と呼ぶことにする)  $\varphi_r$  とよりなる。 $\varphi_b$  は Whitney の法則にしたがい、転位クリープ係数は応力導入時点あるいは応力変化時点にはじまり、急激に発生し短期間で安定する。したがって、応力変化後のクリープひずみ  $\varepsilon_\varphi$  は

$$\varepsilon_\varphi = \varphi_1 \frac{\sigma}{E} + (\varphi - \varphi_1) \frac{\sigma + \Delta\sigma}{E} + \varphi_{r1} \frac{\Delta\sigma}{E} \dots \dots (2)$$

ここに  $\varphi = \varphi_b + \varphi_r$  であり、 $\varphi_{r0}$ ,  $\varphi_{r1}$  は、それぞれ導入時、変化時の転位クリープ係数を示す。またここで用いている符号は、圧縮応力・圧縮ひずみを正とし、変化量に対しては圧縮応力の増加を正とし、圧縮応力の開放を負

図-4 第 1 グループひずみ変化測定結果

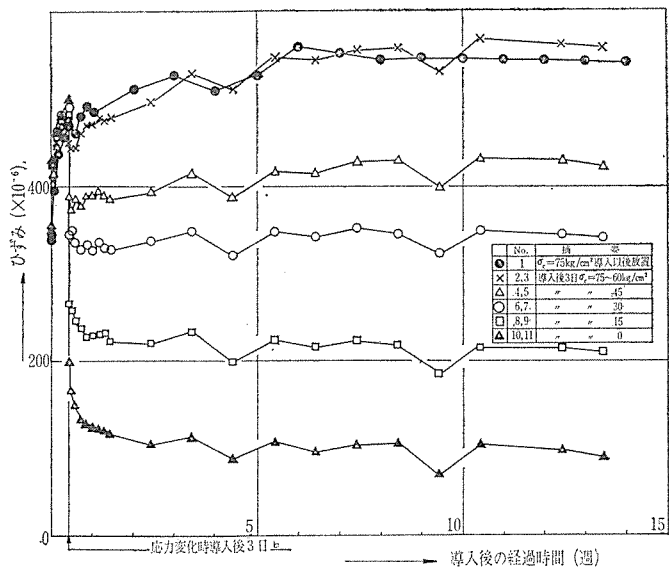
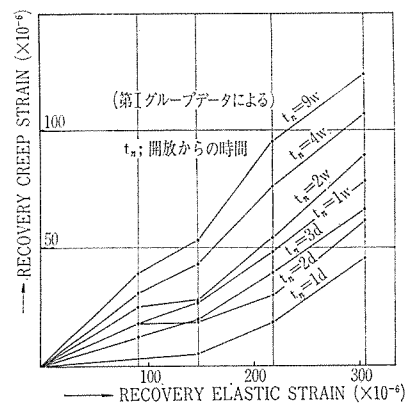


図-5 リカバリークリープひずみと開放弾性ひずみ関係



と定める。

図-4 によれば、応力の変化量が小さい場合は、ひずみはある時間が経過したのちは増加の傾向を示し、応力が大きい場合はひずみは時間につれて減少の傾向を示す。

変化後の応力が変化前の応力の約半分位の値であると始めの1, 2日は減少し、その後ほぼ一定値にとどまっている。これを式(2)で説明するならば、応力変化量が小さい場合は第2項の影響が第3項より時間が経過するにつれて大きくあられ、応力変化量が大きい場合は第3項の影響が第2項より大きくあられて減少の傾向を示すことにより説明される。応力変化量が始めの応力の約半分くらいの場合は、式(2)において  $d\sigma = -0.5\sigma$  とおけば

$$\epsilon_p = \varphi_1 \frac{\sigma}{E} + (\varphi - \varphi_1 - \varphi_{r1}) \frac{0.5\sigma}{E} \dots\dots (2')$$

となる。

$\varphi_{r1}$  は、応力変化時点に始まる転位クリープ係数であって、その初期における時間的変化はきわめて大きい。したがって初期には  $\varphi_{r1}$  の影響が大きくあられ、ひずみは急激に減少し、短期間でこれが安定すると、ひずみの変化はとまり一定値を保持するようになる。

2. にのべた McHenry は、式(2)の型をつぎのように考えた。図-1 に示す曲線 C~D, C~D', E~F において、それぞれ  $f_1, f_2, f_3$  で表わせば、曲線の型をつぎのようにおいた。

$$f = \alpha(1 - e^{-rt}) + \beta e^{-PK}(1 - e^{-mt})$$

そして  $f_2 = f_1 - f_3$

が成立するとし Bäckström がそれを実験で立証した。

本質的には彼等はリカバリーをふくめた重ね合わせの法則を立証しただけであって、必ずしも Gaede のように応力の変化前のクリープ曲線に転位することをいっているのではないが、いずれにしてもクリープ曲線の型は一定不変であるという Whitney の法則と一致しないことは明白である。また Bäckström の実験が正しいものとするれば、プレストレス導入時および開放時の材令が同じであれば、両者の転位ひずみは等しいといえる。さらにこれを発展させて考えると、応力の変化が増加であろうと減少であろうと転位ひずみは存在し、かつ等しいと考えられる。

(2) グループ II の実験

図-1 において、 $t=t_0$  で  $2\sigma, \sigma, 0$  なる応力が作用した場合のクリープ曲線をそれぞれ II, I, III, とし、時点  $t=t_1$  において、応力  $\sigma$  を  $2\sigma$  あるいは  $0$  に、また  $0$  を  $\sigma$  に変化させた場合式(1)が成立するならば、I 曲線は  $t_1$  以後の曲線は、C 点より II に平行な C~

図-6 第2グループひずみ測定結果

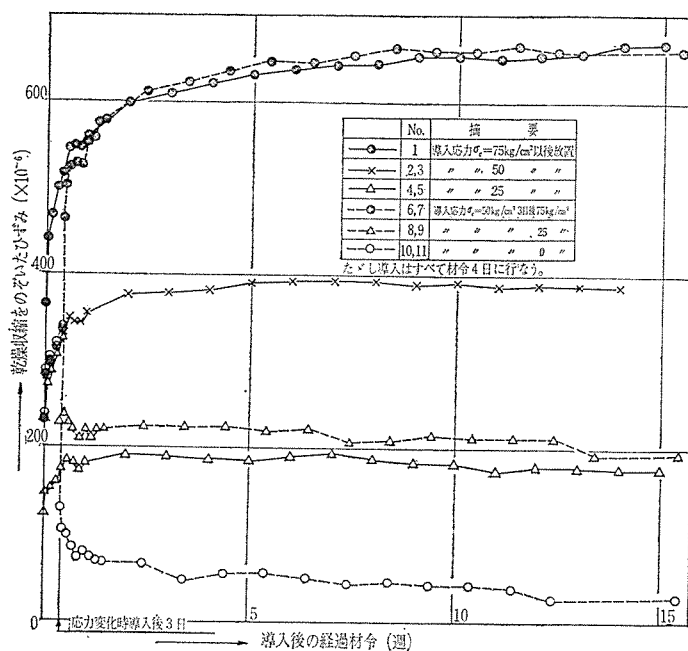


表-3 コンクリートの応力と弾性ひずみ

コンクリート応力 (kg/cm <sup>2</sup> )							
供番 試 体号	第1グループ			第2グループ			
	導入時	変 化 時		導入時	変 化 時		変化量
	前	後	変化量		前	後	
1	73.2	66.8		75.3	69.6		
2	52.7	48.9		68.5	64.5	59.3	7.3
3	47.2	43.2		75.0	68.9	59.5	
4	25.4	22.4		75.3	70.3	45.7	
5	26.1	21.6		73.5	68.4	45.2	23.9
6	52.3	46.1	73.5	71.5	62.5	28.9	36.3
7	50.8	46.1	75.5	75.9	69.5	30.4	
8	53.4	50.0	24.3	76.0	71.0	13.9	54.3
9	53.6	49.2	25.2	70.3	65.5	14.1	
10	49.5	45.2	0	74.3	68.0	0	69.0
11	51.3	47.2	0	75.3	70.0	0	

コンクリートひずみ (x10 <sup>-6</sup> )							
供番 試 体号	第1グループ			第2グループ			
	導入時	変 化 時		導入時	変 化 時		変化量
	前	後	変化量		前	後	
1	388	546		340	471		
2	237	330		344	468	449	26
3	234	332		345	484	451	
4	119	172		350	468	379	
5	132	180		358	486	394	90
6	232	339	464	345	476	338	146
7	233	340	466	349	594	350	
8	236	342	245	356	497	277	218
9	228	310	215	342	469	252	
10	239	338	131	355	500	186	305
11	237	334	128	349	495	199	

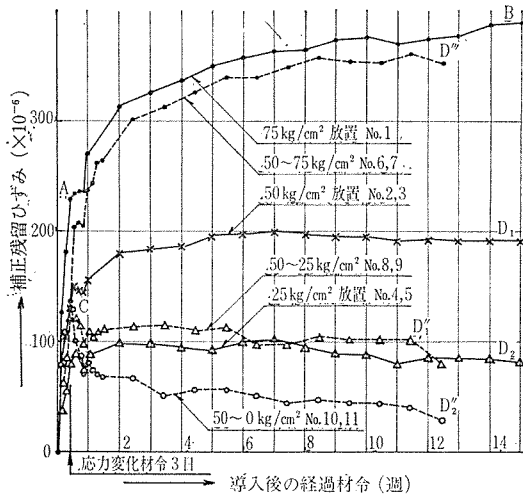
D' あるいは時間軸に平行な直線ならびに C~D に平行な E~F' にそってクリープするはずである。しかし実験の結果は C~D''' あるいは C~D'' のように Whitney

の法則にしたがう曲線よりも大きくくい違っている。

図-6 は実験の結果であるが、以上のことが判然としている。Gaede のように、C~D'''、C~D'' がそれぞれ A~B、時間軸に近づく。換言すれば、変化後の応力が始めから作用していたときのクリープ曲線にむかって転位するとは断定しがたいが、変化時点が導入後まもない時点であるとか、導入および応力変化がとくに早期である場合などは、転位すると考えても実際にはさしつかえないと思われる。

図-6 は、表-3 に示すように応力変化時点における応力がふぞろいであったので、応力の補正を実測値に施し、さらに弾性ひずみおよび、乾燥収縮を消去すると、図-6 は 図-7 のようになった。図-7 の記号は 図-1

図-7 第2グループの残留ひずみ



の記号に対応するものである。応力変化時点  $t=t_1$  におけるII曲線とI曲線との実測縦距の差をII曲線より差し引いて C~D' を求め、時点  $t=t_1$  におけるI曲線とIII曲線との実測縦距の差をIII曲線に加えて C~D'' を求める。こうして求めた曲線が Whitney の法則にしたがう曲線群を示す。

つぎに実測曲線 C~D''' から C~D' をおよび実測曲線 C~D'' から C~D'' を差し引いたものを比較すると

図-8

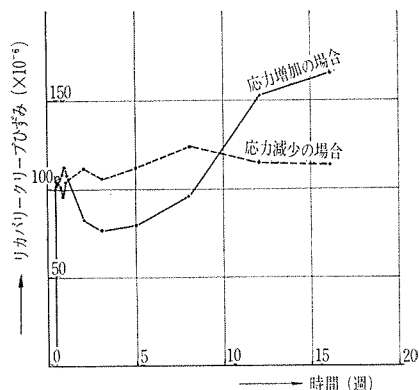


図-8 のとおりとなった。

数値はあまりそろっていないが、応力増加の場合と減少の場合とでとくに変わった傾向はみられない。ただ、転位はきわめて短期間に起り、1日以内にその大半を終了し、以後はきわめて徐々に増加がいずれの場合にもみられる。すなわちリカバリーは応力を0にした場合にのみ生ずる特殊の現象ではなく、一般的に応力変化の場合に生ずるものである。

したがって、応力を変化させた場合のクリープひずみは、式(1)によるとひずみの外に回復クリープを代数的に加算されたものとしてあらわれてくる。すなわちリカバリーは McHenry もいっているように、負の応力を導入することである。

(3) グループ III の実験について

応力を全部開放する場合は  $\Delta\sigma$  のかわりに  $-\sigma$  とおくと式(1)はつぎのようになる。

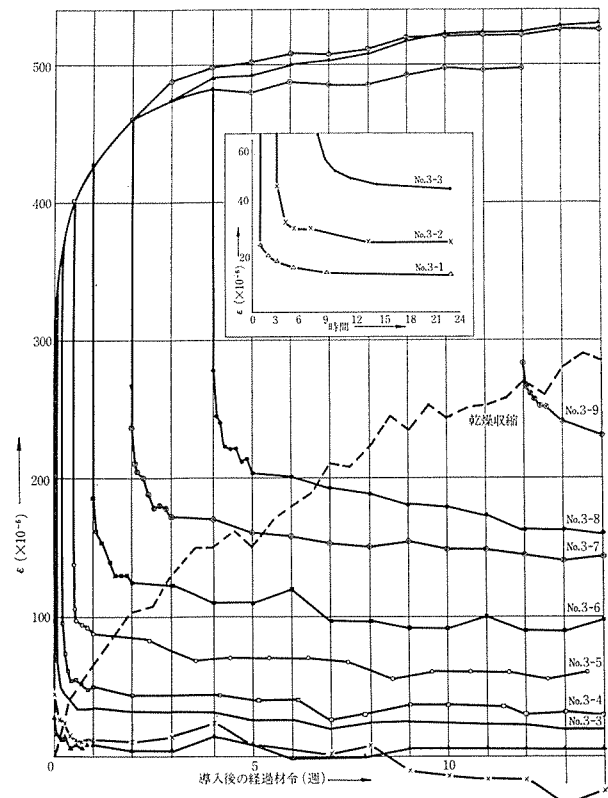
$$\varepsilon_{\phi} = \frac{\sigma}{E} \varphi_1 - \frac{\sigma}{E} \varphi_{r1} = \varepsilon_{res,1} - \varepsilon_{r\phi} \dots\dots\dots (3)$$

したがって、応力を開放したときのリカバリーから  $\varphi_{r1}$  を求めることができる。

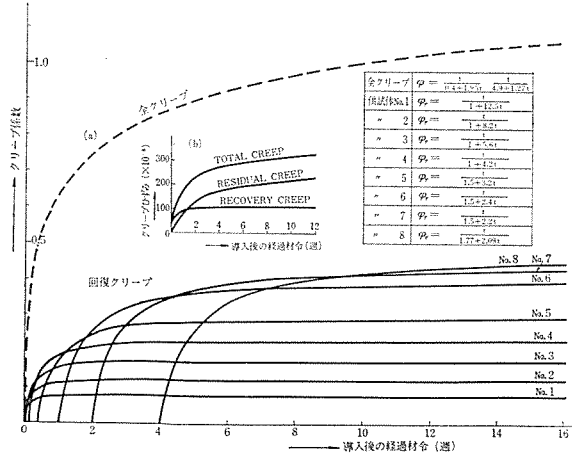
図-9 は  $\varphi_r$  の性質をしらべるため、応力導入後、開放までの時間を種々に変えて全開放した実験結果を示している。図-10 はこの測定結果より算出したクリープ係数および転位クリープ係数の時間的变化を示す。

以下の本文に用いる記号はつぎのとおりとする(図-

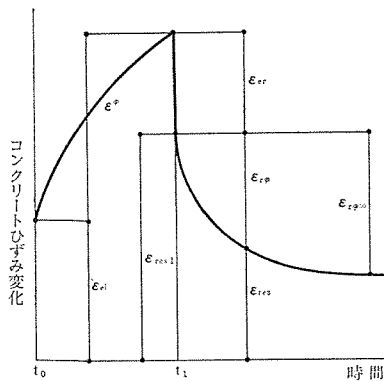
図-9 第3グループひずみ測定結果



図—10



図—11



11)。

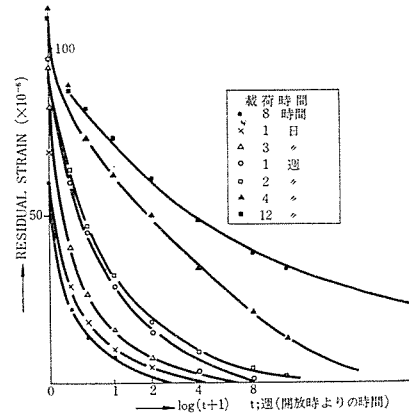
- $t_0, t_1$  : それぞれ応力導入・変化時点を示す。
- $\epsilon_{ei}$  : 導入時瞬間弾性ひずみ
- $\epsilon_p$  : クリープひずみ
- $\epsilon_{er}$  : 応力変化時の瞬間可逆弾性ひずみ
- $\epsilon_{rp}, \varphi_r$  : リカバリー クリープひずみおよび係数
- $\epsilon_{rp\infty}$  :  $\epsilon_{rp}$  の最終値
- $\epsilon_{res}$  :  $= \epsilon_{ei} + \epsilon_p - \epsilon_{er} - \epsilon_{rp}$  残留ひずみ
- $\epsilon_{res,1}$  :  $\epsilon_{res}$  の応力変化直後の値

実験結果よりつぎのことがいえる。

a) 弾性ひずみ  $\epsilon_{ei}$  は可逆弾性ひずみ  $\epsilon_{er}$  より大きく、したがって最大残留ひずみ  $\epsilon_{res,1}$  はクリープひずみ  $\epsilon_p$  より大きくなる。リカバリーを  $\epsilon_{rp\infty}/\epsilon_p$  と定義すれば、この値は 100% 以上になり得る。荷重時間が 8 時間より短い場合にそれが見られる。これは 1) 可逆弾性ひずみも時間につれて回復する。したがって、残留ひずみは弾性ひずみの差とクリープひずみの差からなるとも考えられる。2) また、これは導入時および開放時の弾性係数の増性係数の増大によるものであるとも考えられる。

b) リカバリーの進行状況と時間の関係を開放時点を実原点として図示すると 図—12 のようになる。この図と 図—10 (b) とから明らかに、リカバリーは最初急激に起り短期間で安定すること、ならびにその程度は荷重期間

図—12 残留ひずみ減少曲線



が長いほど大きくなるがよくわかる。概略つぎのようになる。

荷重時間	安定までの時間
1 時間	1 週間
3~8 時間	2 "
1~3 日	4 "
1~2 週	8 "
4 週以上	12 " 以上

c) Ishai の実験<sup>6)</sup>によれば、荷重時間が 4 週と 12 週の間にはリカバリー クリープ 最大値が存在している。彼は温度状態を 3 つに変えて実験した結果、それほど差は生じなかった。わずかながら乾燥収縮の供試体では最大値をとったのち漸少する結果を示した。L' Hermite は荷重時間を減少すると回復量は 100% を越えるとしており、Glanville, Le Camus は stress level が低ければ残留ひずみは 0 となることを報告している。

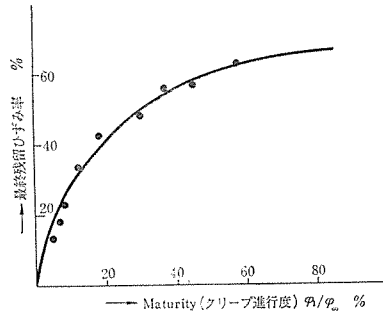
図—12 からリカバリーの進行は概略 exponential に起こり、開放後時間が経過するにつれて指数関数からはずれ、また開放時点の材令が大きいほど曲線の傾斜がゆるやかになることから、これらの現象は粘弾性的なコンクリートの Maturity の進行にともなう Viscosity の増加の影響に他ならないと思われる。

Gaede のいうように完全に転位しきらないで、残留ひずみが起る原因としては Maturity の進行にともないコンクリート内部における結晶ボンドの生成、弾性係数の増加とともに、荷重により内部骨材およびセメント粒子間の相対変位が起こり、その約果 Viscosity の増加となり非可逆の粗面摩擦を起こすと考えられる。

このように考えてくると、残留ひずみはコンクリートの Maturity に関係し、Maturity はクリープの進行度の関数であると考えるのは当然であろう。この関係を図示すれば 図—13 のようになる。この結果からみると、残留ひずみ率は Maturity  $\varphi_1/\varphi_{\infty}$  を変数とする円関数に近いが、この程度の実験から正確な式を導くことは困難



図-13



である。

われわれの実験目的は、普通一般に用いられる配合のコンクリートに対し、3~7日でプレストレスを導入し、それ以後の任意の材令において応力を変化させたときのクリープひずみの計算をつくることであり、この目的に対しては多少の誤差を認めても計算の容易さを必要とする。そういう意味で計算式を導けば、応力変化後のクリープひずみは、次式で概略あらわすことができよう。

$$\epsilon_{\phi} = \phi_1 \frac{\sigma}{E} + (\phi - \phi_1) \frac{\sigma + \Delta\sigma}{E} + \phi_1 \left\{ 1 - \frac{\phi_1 + \phi \frac{b}{\phi_{\infty}}}{\phi \left( 1 + \frac{b}{\phi_{\infty}} \right)} \right\} \frac{\Delta\sigma}{E} \dots (4)$$

上式は残留ひずみ量の最終値に対してはかなり正確な値を与えるが、変化速度に対してはあまり一致しない。しかし今回の目的に対しては残留ひずみが問題であり、途中の変化はあまり重要でない。今後重ねて改善する必要はあろう。

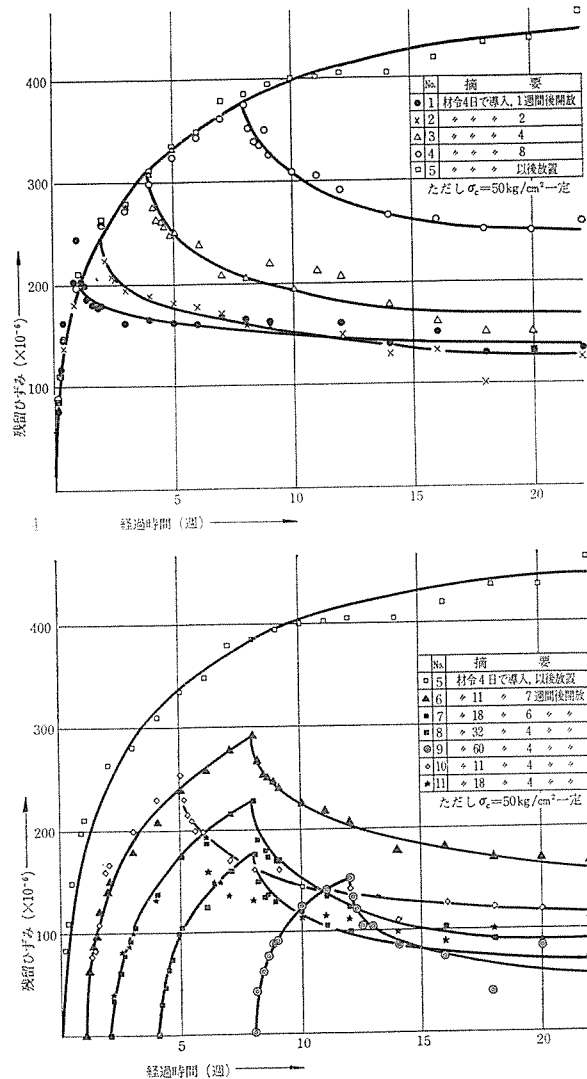
前に最終リカバリーの量は、ある時点で開放した場合最大値をとることを述べたが、上式において、 $\phi = \phi_{\infty}$  として、 $\frac{\partial \phi_r}{\partial \phi_1} = 0$  とおいてみると  $\phi_1 = \phi_{\infty}/2$  において、すなわち6週付近で開放した場合、最大となることがわかる。

(4) グループ IV の実験について

図-2 (b) のように供試体の一端にバネをとりつけ緊張力の低下を防止してコンクリート応力をほぼ 50 kg/cm<sup>2</sup> に保持した。そして導入材令を変化させて Bäckström の実験を確認した。実験結果を図示すると 図-14 のようになった。

この図は弾性ひずみおよび乾燥収縮は、差し引いて示してある。弾性ひずみの導入時一開放時の変化は直線的とした。さらに導入時と開放時の弾性ひずみの比(実測値)とテストピースの資料から計算した弾性係数の比の逆数(計算値)とを比較すると、後者の方がすべて大きかった。その差は導入材令の早いものほど (No. 1~4) 大きく、おそいもの (No. 6~11) ほど小さかった。そ

図-14 第4グループ残留ひずみ曲線



の値は最大値のものが No. 4 で  $0.812 - 0.643 = 0.169$  であり、最小のものは No. 10 で  $0.985 - 0.950 = 0.035$  であった。この原因としては、応力のゆるみ、供試体のばらつき、供試体とテストピースとの差などが考えられるが、決定的な理由はわからなかった。このことは先月号の片持ばりの実験の関連実験およびグループ III の (a) においても疑問になったが、ここではこれ以上深く追求しなかった。

この実験グラフからつぎのことがいえる。

1) Bäckström の実験結果、すなわち  $t=t_0$  で導入したクリープ曲線から、 $t=t_1$  で導入したクリープ曲線を差し引いた曲線は  $t=t_1$  で開放した曲線とほぼ一致するという法則は正しいと考える。ただわずかに導入時クリープの方が開放時リカバリーより大きい傾向がある。またこの重ね合わせの法則は時間が経過するにつれて合わなくなる傾向がある。これはおそらく外的条件の不安定によるものであろう。

2) 導入材令が異なり、開放材令が同じグラフを比較し、その回復クリープ量を比較するとたいした差はなほほぼ同じ量であることがわかる。

5. む す び

1) リカバリーのクリープは早期導入コンクリートでは相当量存在し、その量は弾性ひずみの変化量に比例すると考えてよい。

2) 応力が変化する場合のクリープひずみをWhitneyの法則で計算すると、とくに早期導入コンクリートでは応力の増加のときでは小さ過ぎ、応力が減少するときは大き過ぎる結果となる。

3) リカバリー クリープは、短期間でほぼ終了する。

4) リカバリー クリープは、応力の開放のときだけ存在するものでなく、一般的に応力が変化するときは必ず存在するものである。

5) 以上の実験ならびに考察の結果 コンクリートに導入された応力が、 $\Delta\sigma$  だけ増減すると、クリープひずみは Whitney の法則で与えられる値より、つぎに示す値だけ増減する。

$$\Delta\epsilon_{\varphi} = \varphi_1 \left\{ 1 - \frac{\varphi_1 + \varphi \frac{b}{\varphi_{\infty}}}{\varphi \left( 1 + \frac{b}{\varphi_{\infty}} \right)} \right\} \frac{\Delta\sigma}{E}$$

したがって、片持ばりのように、一般にPC鋼材が上縁に集中している場合には、クリープによりPC鋼材の応力が低下すると、上縁の応力は減少し、下縁の応力は増加する。そのため、上縁のひずみは計算よりも小さくなり下縁のひずみは計算より大きくなる。

6. PC片持ばりのクリープたわみ計算に関する一考察

PC片持ばりのクリープによるたわみについて付加的要素としてリカバリーひずみを考察して考えてみたい。

鋼棒応力の減少量は、鋼棒位置における鋼棒とコンクリートの変位の連続条件式によって基礎微分方程式を導き、それを解くことによって求めることができる。条件式の要素として考えられるものは、コンクリートのクリープ、および乾燥収縮による塑性収縮、鋼棒応力の減少による鋼棒のちぢみ、鋼棒のリラクゼーションをクリープと同じ現象と考えたときの鋼棒の伸び、および鋼棒応力の減少によるコンクリートの弾性ひずみの変化などがある。

さらに弾性ひずみが増加したことによって、これまでに実験および考察によって詳述してきたように、リカバリーによって凝弾性ひずみが生じる。しかし明らかに一般の場合は応力の減少が連続的であるから凝弾性ひずみ

も時間依存の持続的な性質をもつ現象とからみあって、数式上の表現が複雑となり、簡単には解くことができない。實際上厳密に数式をたてて解く意味は全然ない。したがって、ここでは応力の変化があれば、その応力の変化によるリカバリーは瞬間にその時点で起こると考える。

そして、つぎの仮定

- 1) 乾燥収縮はクリープに比例する。
- 2) リラクゼーションをクリープと同じように考え、クリープに比例するとする。

を行なって、式を導くと、結局

$$\alpha = \frac{A_p E_p}{AE} \left( 1 + \frac{Ae^2}{J} \right), \beta = 1 + \psi_{\text{mean}} \geq 1 \dots (5)$$

とおけば、

$$\sigma_{pt} = \frac{\sigma_{c0} n_0 \varphi + \epsilon_s E_p + K \sigma_{p0}}{1 + \alpha \beta} \dots (6)$$

ただし、

- $E_p, E$  : それぞれ鋼棒およびコンクリートの弾性係数
- $\sigma_p, \sigma_c$  : " " " " の応力
- $A_p, A$  : " " " " の断面積
- $\sigma_{pt}$  : 時間  $t$  における鋼棒応力減少量
- $J$  : 断面2次モーメント
- $\varphi, \psi$  : コンクリートのクリープ係数とリカバリー係数
- $M_d, p_0$  : 自重によるモーメントならびに導入緊張力
- $\epsilon_s$  : 乾燥収縮
- $K$  : 鋼棒のリラクゼーション
- $n$  : 鋼棒とコンクリートの弾性係数比

施工後のたわみを起こす原因となる全モーメントは、

$$M_{\varphi} = M_0 \varphi + \frac{(\sigma_{c0} n_0 \varphi + \epsilon_s E_p + K \sigma_{p0}) A_p e \left( + \frac{2}{3} \varphi \right)}{1 + \alpha \beta} \dots (7)$$

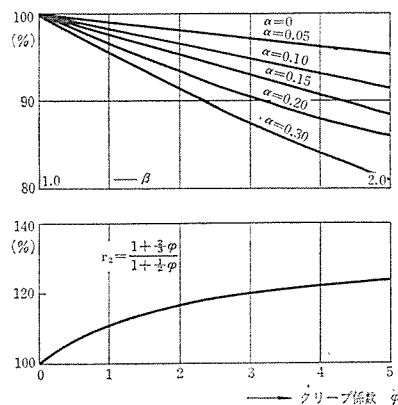
ただし  $b=0$  とおいて最大限を考える。

リカバリークリープがないときは

$$M_{\varphi} = M_0 \varphi + \frac{(\sigma_{c0} n_0 \varphi + \epsilon_s E_p + K \sigma_{p0}) A_p e \cdot \left( 1 + \frac{1}{2} \varphi \right)}{1 + \alpha} \dots (8)$$

$\alpha$  の種々の値についてリカバリーのない場合 ( $\beta=1$ ) を 100% として、リカバリーの平均値の種々の値に

図-15 緊張力減少緩和係数



化させた場合の鋼棒応力の減少の緩和の程度を示したのが 図-15(a) である。

たわみの原因となるモーメントのうち、鋼棒の偏心に係るモーメントは式(7)、(8)の第2項にて与えられるからリカバリーがない場合と、リカバリーがあるときの比は、

$$r = r_1 \cdot r_2 = \text{鋼棒応力の減少比} \cdot \frac{1 + \frac{2}{3}\varphi}{1 + \frac{1}{2}\varphi}$$

$$= \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha\beta} \cdot \frac{1 + \frac{2}{3}\varphi}{1 + \frac{1}{2}\varphi}$$

$r_2$  の関係を図示したのが 図-15(b) である。

これらの図からつぎのことがいえる。

1) 普通一般に用いられるコンクリート (Dywidag) では、おおよそ  $\alpha=0.1$ ,  $\beta=1.2\sim 1.6$  付近と考えられるから鋼棒応力の減少率はリカバリーの無いものくらべて 96% となり、たわみの増加率は  $\varphi=3\sim 3.5$  とすると

$$r = 0.96 \times 1.21 = 1.16$$

すなわち 16% の増加となる。

おそらく一般の場合たわみ増加率は 15~20% 程度である。

2)  $\alpha$  が大となるほど (鋼棒とコンクリートの剛比が大きいほど)、またリカバリーが大きいほど鋼棒応力の減少の緩和の程度は大きい、たわみは全然リカバリーの影響がない場合もありうる。

たとえば、

$$\varphi=1, \alpha=0.15, \beta=1.76 \text{ の場合}$$

また、逆にたわみが減少することもありうることを示している。

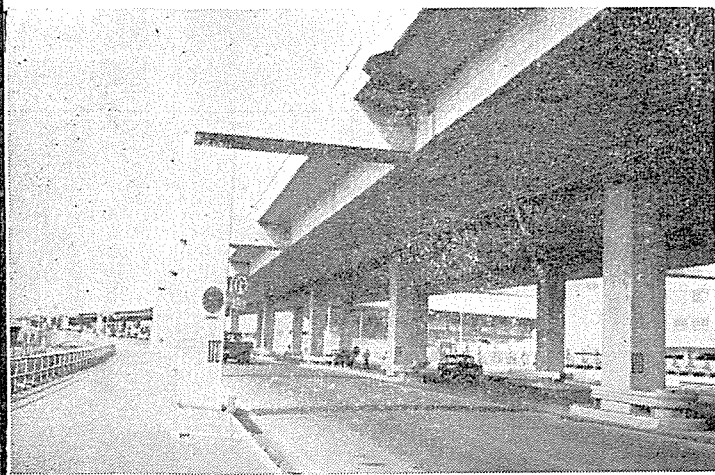
参 考 文 献

- 1) 中島(儀)・中島(泰)・山本・山内：PC片持梁の塑性変形に関する実験的研究，プレストレストコンクリート Vol. 8, No. 4, PC技術協会
- 2) Freudenthal, A.M. & Frederic Roll : "Creep and Creep Recovery of Concrete under High Compressive Stress" ACI. pp. 1111~1142, June, (1958)
- 3) Hermite, R.L. : "What do we know about the Plastic Deformation and Creep of Concrete?" RILEM, Bulletin No. 1, pp. 21~51, March, (1959)
- 4) Mamillian : "A Study of the Creep of Concrete" RILEM, Bulletin No. 3, pp. 15~21, July, (1959)
- 5) Frederic Roll : "Long Time Creep-Recovery of Highly Stressed Concrete Cylinder", Symposium on Creep of Concrete, ACI Special Publication, No. 9, (1964)
- 6) Ori Ishai : "Elastic and Inelastic Behavior of Hordened Mortar in Torsion", Symposium....., etc.
- 7) Walloschke : "Beitrag zum Kriechen des Betons bei Zeitlich veränderter Spannung" Beton und Stahlbetonbau, 52 Jahrgang Heft 12, Dezember, (1957)
- 8) D. McHenry : "A New Aspect of Creep in Concrete and its Application to Design", Proceeding, ASTM V. 43, pp. 1069~1084.
- 9) Bäckström : "Creep and Creep Recovery of Cement Mortar", 5 th Congress on Bridge and Structural Engineerings, Public, Prelim., p. 76 (1956)
- 10) Igbal Ali and Clyde E. Kesler : "Mechanisms of Creep in Concrete" Sympo.

1966.11.22・受付

1967年開催国際会議

月 日	会 議 名	開 催 地
2/ 5~10	ASTM 委員会	デトロイト (アメリカ)
3/13~17	PC 圧力容器に関する会議	ロンドン (イギリス)
4/ 1~ 7	ACI 年次大会	トロント (カナダ)
5/ ~	圧縮空気を用いる施工に関する IASS シンポジウム	シュトゥットガルト (ドイツ)
5/ ~	建築部材工業生産品の設計、生産および使用 UNEC セミナー	パ リ (フランス)
5/ 1~ 6	プレキャストに関する IVBH シンポジウム	(オランダ)
5/22~24	プレキャストコンクリート国際シンポジウム	ロンドン (イギリス)
5/16~20	IABSE の常置委員会	デリフル (オランダ)
6/25~30	ASTM 第 70 回年次大会	ボストン (アメリカ)
10/ 8~12	PCI 年次大会	モントリオール (カナダ)
10/31~11/3	ACI 秋季大会	Des Moines (アメリカ)
11/ 5~12	第 13 回国際道路会議	東京



**首都高速 高架橋新設工事**

第106工区(その1) 高架橋上部新設工事

発註先 首都高速道路公団

橋 長 526.00m

有効巾員 16.40m

桁 長 56.60~94.40m

桁 高 1.40m

P.C2室箱型連続桁

3径間連続5連, 2径間連続2連,  
単桁1連

プレストレスト コンクリート B.B.R.V.工法、フレシネー工法 M.D.C.工法 橋梁、タンク等の設計施工



# 東亜コンクリート株式会社

取締役社長 巽 榮 吉

本 社	東京都渋谷区栄通り1丁目5番地(長谷川スカイラインビル)	TEL 東 京 (463) 7231
大宮工場	埼玉県大宮市大字高木字天神1469	TEL 大 宮 (42) 1385~6
大阪営業所	大阪市北区山崎町47番地(海星ビル)	TEL 大 阪 (341) 9081
名古屋営業所	名古屋市昭和区高辻通り3の15(三富ビル)	TEL 名 古 屋 (871) 7311~5
福岡営業所	福岡市天神3丁目10番地30号(東亜ビル)	TEL 福 岡 (75) 5436~9
札幌出張所	札幌市北2条西4丁目1番地(北海道ビル) 東京産業(株)気付	TEL 札 幌 (22) 7146

# 豊田コンクリート株式会社

(旧) エフカズコン株式会社

プレストレスト・コンクリート  
プレキャスト・コンクリート

PC矢板施行状況



**本社・工場**

豊田市トヨタ町6  
TEL 798

**東京営業所・工場**

東京都大田区古市町18  
TEL (731) 4047

**名古屋営業所**

名古屋市中村区笹島町 豊田ビル517号  
TEL (54) 9369・8842