

九州産業大学 ○正員 宮川 邦彦
九州工業大学 正員 渡辺 明

1. まえがき

コンクリートの変形解析に関する考え方には、コンクリートを均質等方性のマトリックス相とその中に分散する粒子相とからなる二相構造と考え、各構成相の弾性係数と容積係数との関係からコンクリート自体の弾性係数を求めようとする二相モデル解析法、あるいは弾性体としてのスプリングと粘性体としてのダッシュポット、更には塑性体としてのスライダとを組合せ、複合体の時間依存性を表示しようとする力学モデル解析、すなわち、レオロジー解析法などがある。しかしながら、前者の考え方は構成素材の特性値を考慮してはいるが、変形自体の時間依存性を無視しており、また、後者のそれは逆に時間依存性を示し得るが、そのモデル中の要素値は実際の複合体構成素材の特性と無関係で、単に材料の応力-ひずみ-時間関係を数学的に表示するための便宜的手法であるにすぎない。このような両解析法の特長を生かすため、筆者らは既報⁽¹⁾のような粒状複合体内部の粘弾性現象と表示し得る新力学モデル（応力平衡化回転モデル）を提案したが、ここに、その後の遅延弾性現象に対する経路実験の結果と、更に同モデルによる応力緩和現象の解析および実験結果とを報告する。

2. 応力平衡化回転モデルによる遅延弾性現象と応力緩和現象の解析

筆者らの提案した応力平衡化回転モデルは、図-1に示すように、弾性要素としてのスプリングと粘性要素としての回転ダッシュポットおよびそれら要素を繋ぐ腕の長さから構成されている。同モデルは、図示するようにその構成要素をコンクリート構成素材の特性値と結び付けることにより、構成素材の応力-ひずみ関係が載荷直後のひずみ一定状態（式-1）から終局時の応力一定状態（式-2）へと移行する間の応力平衡化現象を示し得る。

$$E_c = V_m \cdot E_m + V_a \cdot E_a \quad \text{--- (1)} \quad 1/E_c = V_m/E_m + V_a/E_a \quad \text{--- (2)}$$

ここに、 E ：弾性係数、 V ：容積係数、添字 c, m, a ：複合体、マトリックス相、粒子相を表わす。

なお、回転ダッシュポットの粘性係数 η の値は実測曲線との対応から定めねばならないが、マトリックス相の弾性係数と粒子相の形状寸法とに関連するものと考えられる。同モデルⅢに対する遅延弾性係数 ψ と応力緩和係数 ϕ との解析式を下記に示す。

$$\text{遅延弾性係数 } \psi = \Sigma G_i \left[A_i \{ (l_3 + l_6) l_6 / \eta_3 + \alpha_i / G_i \} (1 - e^{-\alpha_i t}) / \alpha_i \right. \\ \left. + A_2 \{ (l_3 + l_6) l_6 / \eta_3 + \alpha_2 / G_2 \} (1 - e^{-\alpha_2 t}) / \alpha_2 + A_3 \{ (l_3 + l_6) l_6 / \eta_3 + \alpha_3 / G_3 \} (1 - e^{-\alpha_3 t}) / \alpha_3 \right] \quad \text{--- (3)}$$

$$\text{応力緩和係数 } \phi = 1 - B_1 \{ (l_6 G_4 + \eta_3 \beta_1) (1 - e^{-\beta_1 t}) / l_6^2 \\ - B_2 \{ (l_6 G_4 + \eta_3 \beta_2) (1 - e^{-\beta_2 t}) / l_6^2 - B_3 \{ (l_6 G_4 + \eta_3 \beta_3) (1 - e^{-\beta_3 t}) / l_6^2 \} \quad \text{--- (4)}$$

ここに、 $A_i, B_i, \alpha_i, \beta_i$ ：境界条件から求まる定数、 t ：経過日数と表わす。

3. レジンコンクリートに関する実験的研究

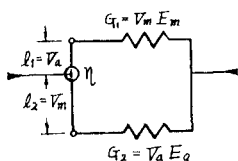
上記理論解析法の妥当性を検討するため、特に初期材令で高温養生（養生温度 70℃、養生時間 6時間）したレジンコンクリートを試験用材料（供試体寸法中 7.5 × 15 cm）として選定したが、これは材料特性値の安定性、測定用抵抗線ゲージの付着如果、測定ひずみの精度などを考慮したためである。

実験内容としては、実験Ⅰ：持続載荷日数の変化と除荷後の遅延弾性ひずみの形状相違について、（一部既報⁽¹⁾）実験Ⅱ：使用粗骨材の表化と遅延弾性ひずみの形状相違について、実験Ⅲ：応力緩和現象について、の

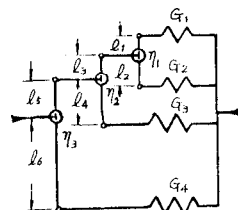
三題である。実験に使用した材料の比重を表-1に、コンクリート配合、硬化後の諸性質を表-2、-3に示す。

表-1 使用材料の比重（レジン：不飽和ポリエステル樹脂）

レジン	炭カル粉	軽骨材	角閃岩	安山岩	蛇紋岩	石灰岩	川砂利
硬化前	乾燥	乾燥	乾燥	乾燥	乾燥	乾燥	乾燥
1.11	1.21	2.70	2.52	2.92	2.72	2.64	2.69



(a) 回転モデルⅠ



(b) 回転モデルⅢ

図-1 応力平衡化回転モデル

4. 実験結果ならびに理論解析値との比較検討

実験Ⅰについて、実験遅延弾性ひずみは載荷日数と共に増加しており、同じひずみが載荷期間中に発達する成分であり、その安定には相当な日数も要するものと考えられる。表-4に遅延弾性係数 η の実測値と理論値とを示す。なお、理論値は式-3を用い、粘性係数 $\eta_1 = 0.05 G_1$, $\eta_2 = 2.50 G_1$, $\eta_3 = 200 G_1$ としたときの値であり、その解析式は

$$\epsilon_p = 0.095(1 - e^{-5.30t}) + 0.112(1 - e^{-0.311t}) + 0.202(1 - e^{-0.016t}) \quad \text{--- (5)}$$

となる。表-4のように理論値と実測値とはほぼ一致し、同現象が粒状複合体内部での応力平衡化に伴う時間依存ひずみで、その解析には回転モデルⅢを用いることができると確信する。また、高温養生したレジンコンクリートの載荷期間中に生じる非回復性ひずみ($\epsilon_c - \epsilon_d$)の除荷時ひずみ(ϵ_r)に対する比率は、表-5に示すように載荷日数に伴って指数的大きく増大を示す。なお、載荷時のひずみ(ϵ_c)は除荷時のそれ(ϵ_r)より1割程度大きく得られるが、これは載荷時に高応力を受ける粗骨材粒子内部の微細ひびわれ、あるいは骨材-マトリックス界面の付着ひびわれによるものであろう。

実験Ⅱについて、4種類の砕石と1種類の川砂利(最大寸法 20mm)とを用いた35日間載荷後の遅延弾性ひずみの曲線形状には明瞭な差異を認め得ないが、表-4に示すように、骨材の弾性係数、粒度分布および表面形状の違いにより僅かながら影響を受けるようである。理論解析には上記 η 値を用いたが、この場合にも表-4に見られるようにほぼ実測値と理論値とは一致する。また、載荷期間中に生じる非回復性ひずみの比率は表-5のようになり粗骨材で多少相違するが、その相違は載荷時と除荷時とのひずみの比率にも同様な関係が認められ、このことは載荷期間中の非回復性ひずみが単にマトリックス相の粘性流動だけによるものでなく、粗骨材内部、あるいはマトリックス相との界面に生じる遅延ひびわれも含まれるものと考えらるべきであらう。

実験Ⅲについて、実験方法としては供試体に貼付した抵抗線ゲージの値を万能試験機で一定になるように調整しながら、その荷重低下を測定した。図-2に実測曲線および式-4から求めた理論曲線とを示す。図示するようにその理論値はほぼ一項の指数関数だけで示され、応力緩和の安定性が上記遅延弾性ひずみのそれより急激になることを明示している。

なお、実測値と理論値とは相当な差異が見られるが、これは理論計算に用いた η の推定値が過大であったためと、理論値が載荷時間中に生じる応力平衡化を無視したための誤差と考えられる。

5. むすび

筆者らの考案した応力平衡化回転モデルは、その要素値を実際の材料特性値と関連付けできるため、今後、更に多くの解析計算に応用できよう。 注) (1)新力学的モデルの提案とそれによるコンクリートの遅延弾性現象の解析: コンクリート

表-2 レジンコンクリートの配合(容積係数)

	レジン	炭酸カルシウム	細骨材	粗骨材
打設時	0.221	0.109	0.241	0.429
硬化後	0.180	0.090	0.250	0.480

注) 硬化後の値はレジンの硬化収縮と単位重量を考慮して求めた相対値。

表-3 コンクリートの諸特性

		単位重量 t/m ³	圧縮強度 kg/cm ²	弾性係数(×10 ⁴) 初 期 値	割 断 値
コン ク リ ー ト	角閃岩	2.48	1,010	33.8	30.6
		2.47	983	32.2	29.5
	安山岩	2.37	1,065	31.0	30.1
	蛇紋岩	2.35	912	29.5	27.8
	石灰岩	2.36	1,013	33.1	31.9
	川砂利	2.24	880	24.2	22.9
モルタル		2.11	1,220	23.9	22.8
		2.11	1,210	23.4	23.0
ペースト		1.73	1,570	11.1	10.8
		1.73	1,481	10.9	10.6

注) 上段の数値…実験値 I 下段の数値…実験値 II, モルタルペースト供試体 $\phi 5 \times 10$ cm

表-4 実験Ⅰ,Ⅱの遅延弾性係数 η

除荷後日数	1/4	1	5	10	30	∞		
実験Ⅰ	載荷	0.086	0.119	0.176	0.206	0.249	—	
	除荷	0.082	0.108	0.179	0.211	0.273	—	
	理論	160	0.079	0.127	0.191	0.218	0.252	0.372
	364	0.079	0.127	0.193	0.220	0.262	0.405	
実験Ⅱ	角閃岩	0.085	0.128	0.175	0.200	0.233	—	
	安山岩	0.070	0.109	0.150	0.169	0.202	—	
	蛇紋岩	0.069	0.120	0.171	0.198	0.220	—	
	石灰岩	0.073	0.112	0.154	0.174	0.206	—	
理論	川砂利	0.075	0.074	0.134	0.164	0.188	—	
	角閃岩	0.090	0.140	0.204	0.216	0.240	0.280	
	安山岩	0.099	0.138	0.178	0.203	0.220	0.258	
	蛇紋岩	0.089	0.131	0.163	0.181	0.191	0.225	
	石灰岩	0.078	0.116	0.158	0.179	0.202	0.256	
	川砂利	0.042	0.084	0.133	0.161	0.180	0.193	

表-5 実験Ⅰ,Ⅱの変形状況

		ϵ_c	ϵ_r	ϵ_d	ϵ_c/ϵ_r	$(\epsilon_c - \epsilon_d)/\epsilon_r$	
実験Ⅰ(角閃岩)	2日	1,017	175	933	1.41	1.09	0.036
	7日	933	226	870	181	1.10	0.052
	14	1,029	273	929	217	1.11	0.060
	21	1,041	293	942	233	1.11	0.064
	35	974	311	896	239	1.10	0.081
	160	1,087	476	980	365	1.11	0.113
	364	1,114	510	965	390	1.15	0.124
角閃岩	1,073	357	934	262	1.15	0.102	
安山岩	956	263	897	231	1.07	0.036	
蛇紋岩	1,058	362	962	216	1.10	0.152	
石灰岩	918	260	850	218	1.08	0.049	
川砂利	804	190	737	142	1.09	0.065	

注) ϵ_c : 載荷時ひずみ $\times 10^{-6}$
 ϵ_r : 載荷期間中のクリープひずみ $\times 10^{-6}$
 ϵ_d : 除荷時ひずみ $\times 10^{-6}$
 ϵ_c/ϵ_r : 載荷期間中に生じる理論遅延弾性ひずみ $\times 10^{-6}$

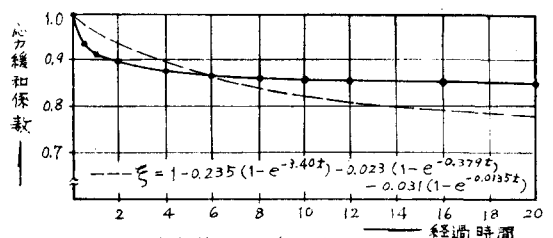


図-2 応力緩和曲線