

九州産業大学 正員 宮川 邦彦

1. まえがき

コンクリートは巨視的に見ても、性質の異なる数種の粒状物質を膠質物質で結合・一体化した、いわゆる粒状複合体であり、特にその変形特性を究明するにあたっては是非とも、各構成素材の特性を調べると同時に、その複合機構の影響についても考慮すべきであろう。変形特性にかかわる特に重要な課題としてはクリープの問題がある。この問題に関しては、これまでも多くの貴重な実験結果やその解析に対する考え方が報告されてきたが、未だ、その特性を完全に把握するまでには至っていない。確かにクリープ現象は、時間要素と複合特性とが複雑に絡み合い、単に一つの変形概念だけでその機構全体を説明することは無理であろう。このような観点から、近年、クリープを数種の変形成分に分離し、その機構を個々に究明しようとする動向が伺われる。

本研究は以上のような考えに基づき、クリープ現象の一要因である遅延弾性変形（回復クリープ）の発生原因を究明するため、粒状複合体内部の変形機構に関するモデル解析と経路変化に関するレオロジー解析とを組合せ、そのひずみ-時間曲線を理論的に求めるための新しい解析法を提案すると共に、同曲線が顕著に得られやすいレジコンクリートに関する若干の実験で本解析法の妥当性を検討した結果である。

2. 遅延弾性現象とその理論解析法

筆者はセメントコンクリートに関する多くのクリープ実験から、遅延弾性変形が複合素材内の弾性係数差に起因する応力平衡化現象で、その遅延効果はマトリックスの粘性特性に起因するものであろうと考えるに至った。既に報告したように、その変形量はコンクリート各構成素材が載荷直後のひずみ一定状態から、持続載荷後の応力一定状態へと移行する間の変形増大として求めることかてき、単位立方体に関するモデル解析から、その終局遅延弾性変形量 Δd 、あるいは終局遅延弾性係数 ψ_n （弾性変形に対する遅延弾性変形の割合）は、

$$\Delta d = 0 \cdot (\nu_p/E_p + \nu_s/E_s + \nu_g/E_g - \nu_c/E_c) \quad \text{式1} \quad \psi_n = (\nu_p/E_p + \nu_s/E_s + \nu_g/E_g) \cdot E_c - 1 \quad \text{式2}$$

として求めることができる。ここに、 ν , E は各構成素材の容積係数と弾性係数と、添字 p, s, g, c はそれぞれペースト、細骨材、粗骨材およびコンクリートを表わす。

ただし、上記の計算式では遅延弾性変形の終局値しか得られず、任意時間後のその変形量と求めることはできない。それゆえ、筆者はその量を算定するため、モデル解析に用いた構成要素を含み、その変形機構とも対応できるような新しいレオロジーモデル（応力平衡化回転モデル、便宜上、回転モデルと略称する。）を考案した。

図-1に示すように、基本系としての回転モデルⅠは弾性要素としてのスプリング、粘性要素としての回転ダッシュポットならびにそれら各要素を繋ぐ腕から成り立っている。

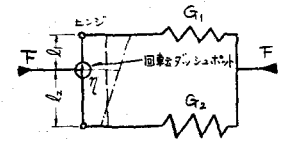


図-1 応力平衡化回転モデルⅠ

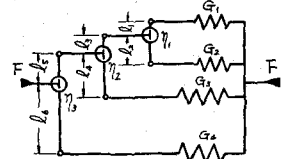


図-2 応力平衡化回転モデルⅢ

なお、本論文に対する解析としては、実験曲線との対応を考慮し、図-2に示す回転モデルⅢを用いた。同モデルに一定外力 F が作用した後の任意時間 t までに生じる遅延弾性変形量 δd は

$$\delta d = C_1 F \left\{ (l_1 + l_2) l_2 / \eta_2 + \alpha_1 / G_2 \right\} (1 - e^{-\alpha_1 t}) / \alpha_1 + C_2 F \left\{ (l_3 + l_4) l_4 / \eta_3 + \alpha_2 / G_3 \right\} (1 - e^{-\alpha_2 t}) / \alpha_2 + C_3 F \left\{ (l_5 + l_6) l_6 / \eta_3 + \alpha_3 / G_3 \right\} (1 - e^{-\alpha_3 t}) / \alpha_3 \quad \text{式-3}$$

となり、また遅延弾性変形 ψ は式-4 で求めることができる。

$$\psi = \sum G_i \left[C_i \left\{ (l_i + l_j) l_j / \eta_j + \alpha_j / G_j \right\} (1 - e^{-\alpha_j t}) / \alpha_j + C_j \left\{ (l_k + l_l) l_l / \eta_l + \alpha_l / G_l \right\} (1 - e^{-\alpha_l t}) / \alpha_l \right] \quad \text{式-4}$$

ここに、係数 C_i , α_i は境界条件から定まり、バネ定数 G_i は複合各素材の弾性係数 E とその容積係数 ν との積で、腕の長さ l_i は容積係数 ν に相当する。ただし、回転ダッシュポットの粘性係数 η_i は実験曲線との対応から求めなければならない。

3. レジンコンクリートに関する実験的研究

前記の理論解析の妥当性を検討するため、特に初期硬化で高温養生（温度70℃、養生時間6時間）することによってその特性をほぼ完全に安定させることができるレジンコンクリートを試験供試体（ 7.5×15 ）とした。また、実験内容としても、遅延弾性現象の特徴を捕えるため、持続載荷日数を表へて、そのひずみ-時間曲線と求めた。

実験に使用した材料の比重、配合および硬化後の諸特性を表-1から表-3に示す。実験方法は圧縮クリープ装置により、供試体に破壊強度の約 $\frac{1}{3}$ に相当する一定応力を載荷し、供試体中央対称面所に貼付したストレーンゲージを用い、静ひずみ計でそのひずみを求めた。

4. 実験結果ならびにレシオロジー解析との比較検討

実験曲線から得られた除荷後の遅延弾性係数 ψ （除荷時の弾性変形に対する遅延弾性変形の割合）を表-4に示す。なお、表中の値は二本の供試体の平均値である。

表-4に示すように、遅延弾性係数は載荷日数で異なり、その変形成分が載荷期間中に発達することを明示している。また、その成分は初期に急激な増大を示すが、その後も僅かづつではあるが、明らかに、載荷日数の増大に伴い、増大傾向にあることが認められる。

このようにレジンコンクリートの遅延弾性曲線は、単に一つの指数関数だけで近似し得ず、その安定状態を得るためには相当な日数を要するものと考えらるべきであろう。

つぎに式-4に実験から求めた各要素値を代入し、その遅延弾性係数 ψ を求めると、

$$\psi = 0.095(1 - e^{-0.30t}) + 0.112(1 - e^{-0.31t}) + 0.202(1 - e^{-0.106t})$$

となる。また、この解析値と実験値とを比較して、表-4に示す。

表-4に見られるように、解析値は実験値とほぼ一致し、同モデルが遅延弾性変形の時間依存性を明確に示めし得るといえる。

なお、解析にあたり、粗骨材を10mm寸法で区別し、それらの粘性係数が相違するとして計算したが、これは骨材寸法の相違でその応力平衡化に要する時間が異なるのではないかと考えたからである。

5. 寸すび

コンクリートの遅延弾性現象とその解析に関する力学モデルについて述べてきたが、以上の研究結果を要約して、下記に示す。

(i). 遅延弾性変形はコンクリート構成材料間の弾性係数差に起因して生じ、載荷期間中に発達する時間依存変形である。

(ii). 遅延弾性変形は筆者の提案する回転モデルⅢで表わし得る。

最後に本研究に際し、御助言戴きました九工大海田明教教授、協力戴きました九産大山崎竹博助手、亀井親隆副手に心から謝意を表します。

表-1 使用材料の比重

レジン		炭カル粉	細骨材(海砂)	粗骨材(角石)		
硬化前	硬化後	絶乾	表乾	絶乾	表乾	絶乾
1.11	1.21	2.70	2.55	2.52	2.74	2.92

注) レジン：不飽和ポリエステル樹脂

表-2 レジンコンクリートの配合(容積係数)

	レジン	炭カル粉	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) 硬化後の値は単位重量とレジンの硬化収縮を考慮して推定した。

表-3 レジンコンクリートの諸特性

	単位重量	圧縮強度	弾性係数($\times 10^3 \text{ kg/cm}^2$)	
	(t/m^3)	(kg/cm^2)	初期	割線
コンクリート	2.48	1,010	33.8	30.6
モルタル	2.11	1,220	23.9	22.8
ペースト	1.73	1,570	11.1	10.8

注) モルタルペーストの4次元試体は 5×10

表-4 遅延弾性係数 ψ の実測値と理論値との比較

除荷後の日数		1/4	1/2	1	2	5	7	10	20	30	∞	
実測値	載荷	2	0.092	0.110	0.120	0.126	0.134	0.135	0.138	0.141	0.142	—
		7	0.091	0.109	0.126	0.144	0.165	0.173	0.182	0.203	0.210	—
		14	0.090	0.109	0.123	0.149	0.179	0.197	0.204	0.216	0.223	—
		21	0.091	0.113	0.136	0.157	0.183	0.193	0.207	0.221	0.225	—
		35	0.090	0.110	0.136	0.163	0.191	0.199	0.215	0.230	0.231	—
		160	0.086	0.105	0.119	0.141	0.176	0.190	0.206	0.229	0.249	—
回転モデルⅢの理論値	日数	2	0.075	0.095	0.109	0.120	0.136	0.140	0.145	0.148	0.149	0.151
		7	0.078	0.102	0.122	0.143	0.173	0.183	0.191	0.196	0.198	0.208
		14	0.079	0.104	0.125	0.149	0.183	0.195	0.204	0.211	0.216	0.234
		21	0.079	0.105	0.126	0.150	0.185	0.198	0.207	0.219	0.222	0.246
		35	0.079	0.105	0.127	0.151	0.187	0.200	0.209	0.220	0.224	0.270
		160	0.079	0.105	0.127	0.151	0.191	0.205	0.218	0.232	0.252	0.372
∞	0.079	0.105	0.127	0.151	0.193	0.208	0.220	0.246	0.262	0.409		

注) 解析計算に用いた要素値

$$G_1 = V_p E_p = 0.270 \times 11.1 \times 10^4 = 3.00 \times 10^4 = 1.00 G$$

$$G_2 = V_s E_s = 0.250 \times 38.4 \times 10^4 = 9.60 \times 10^4 = 3.20 G$$

$$G_3 = V_{g1} E_{g1} = 0.190 \times 44.2 \times 10^4 = 8.40 \times 10^4 = 2.80 G$$

$$G_4 = V_{g2} E_{g2} = 0.270 \times 44.2 \times 10^4 = 12.82 \times 10^4 = 4.28 G$$

$$l_1 = V_s, l_2 = V_p, l_3 = V_{g1}, l_4 = V_s + V_p$$

$$l_5 = V_{g2}, l_6 = V_s + V_p + V_{g1}$$

$$\eta_1 = 0.050 G, \eta_2 = 2.50 G, \eta_3 = 200 G$$

ここに、 η の値は実験曲線の傾きから試算して求めた概略値。