

九州産業大学 ○正員 宮川 邦彦
同 亀井 頼隆

1. まえがき

持続荷重を受けていたコンクリート供試体は、除荷時に瞬間弾性変形と時間に伴う回復変形とを生じる。この回復変形は回復クリープとか遅延弾性変形とか呼ばれている。だが、この変形が温度や湿度、また、以前の荷重履歴などにあまり影響されないことを考えると、時間に伴って生じる弾性変形、すなわち、遅延弾性変形と呼ぶのが妥当だと考える。

筆者等はこの遅延弾性変形の原因がコンクリート、すなわち、複合材料内部の応力拡散現象に起因するものと考え、この変形に関する二、三の実験を行なった。以下、遅延弾性変形に関する実験結果、ならびにこの変形量を算定する簡単な計算法について報告する。

2. 実験概要

実験は中15×30cm円柱供試体をクリープ試験装置にセットし、ヒズミ測定には骨材の最大寸法などを考慮し、ゲージ長70mmのセルコンゲージを供試体中央ニヶ所に貼付し、静ヒズミ計で実測した。静ヒズミ計での長期測定の問題に対し、本実験前に無応力状態の鉄筋に同じゲージを貼付し、零点移動測定を行なったが、ニヶ月程度の測定期間ではその移動量が $\pm 10 \times 10^{-6}$ 程度であり、本実験への影響は少ないものと考えた。

実験目的は大別すると下記の二点である。

[I] 同一配合コンクリートにより、載荷時の供試体枚数と遅延弾性変形量との関係、載荷日数と遅延弾性変形量との関係。

[II] コンクリートの配合変化と遅延弾性変形量との関係。

表-1 材料の物理的性質

ポルトランドセメント		細骨材				粗骨材(最大寸法20mm)			
普通	早強	志賀島(海砂)				久山(砕石(角内岩))			
比重	比重	比重	吸水量	粗粒率	比重	吸水量	粗粒率	弾性係数	
3.14	3.11	2.57	1.23	2.84	2.94	0.67	6.61	5.65	$\times 10^4$

* 粗骨材の弾性係数は4×4×10cm角柱供試体を用いて実測した初期弾性係数

実験に用いた材料の物理的性質を表-1にコンクリートの配合、強度なども表-2に示す。表-2の()内の数値は応力-ヒズミ図から求めた初期弾性係数値である。

表-2 コンクリート配合、圧縮強度、弾性係数

配合種類	単位水量 kg/m ³	w/c %	S/a %	コンクリートの圧縮強度 kg/cm ²			モルタルの圧縮強度 kg/cm ²		セメントペーストの圧縮強度 kg/cm ²		弾性係数 $\times 10^4$ kg/cm ²		
				σ_5	σ_{28}	σ_{91}	σ_5	σ_{28}	σ_5	σ_{28}	コンクリート E_{28}	モルタル E_{28}	セメントペースト E_{28}
I	180	45	37	376	410	—	414	490	403	591	(3.38) 3.16	(2.72) 2.62	(1.31)
II	192	68.6	42	157	207	233	159	235	114	142	(2.62) 2.26	(2.09) 1.87	(0.72)
III	177	59	39	215	274	311	195	303	180	197	(3.15) 2.43	(2.24) 2.01	(0.89)
IV	202	47	40	360	422	429	399	461	365	499	(3.33) 2.99	(2.29) 2.26	(1.20)

II, III 配合…普通ポルトランドセメント I, IV 配合…早強ポルトランドセメント

() 内の値…初期弾性係数

3. 実験結果

前記したように遅延弾性変形はその性状から弾性変形の一部であると見なし、この変形量を簡単に表示する方法として式-1を用いる。

$$\text{回復率 (C)} = \frac{\text{遅延弾性変形量}}{\text{除荷時の瞬間弾性変形量}} \times 100 (\%) \dots\dots 1$$

実験内容と回復率を表るに示す。

本実験から遅延弾性変形の性状に關し、以下の結論を得た。

(i) 遅延弾性変形の安定期間は二、三週間程度である。

安定期間は従来の研究結果と大差ないが、コンクリートの配合、載荷日数、載荷時の供試体枚数などの変化により多少差がある。すなわち、高配合コンクリートの安定期間は高配合コンクリートのそれに較べ多少長くなる。載荷日数が長くなる程、また、載荷日数が同じでも載荷時の供試体が若枚数である程、安定期間は長くなる。(図-1,2,3 参照)

(ii) 同一配合コンクリートの回復率は、載荷日数に伴ない増大する傾向にあるが、長期載荷では減ケし、その後一定値に近づくものと推測できる。

この現象は遅延弾性変形が下記の二要素に關係することを示している。つまり、遅延弾性変形の要因は載荷期間中に発達し、しかもコンクリート内部物質の弾性係数差に起因する現象であるものと考えられる。すなわち、コンクリートはセメント・ペースト部分だけが硬化現象により弾性係数を増大する。硬化の進行に伴ないペースト部分と骨材部分との弾性係数差は減ケし、その差は徐々に一定値に近づく。この現象と回復率との間には密接な關係があるものとする。

(iii) 回復率は載荷応力が破壊荷重の1/2以下であれば、載荷応力に關係なく一定である。

このことは、遅延弾性変形がコンクリートの弾性的性状に起因する現象であることを示している。

(iv) セメント・ペーストの弾性係数が増大するほど回復率は一般的に減ケする。(図-4 参照)

以上の結果から、遅延弾性変形の発生原因がコンクリート内部の細、粗骨材、セメントペーストの弾性係数差に起因するものと確信し、回復率を求める簡単な理論計算法を提案する。

表-3 実験内容と回復率

面記 合 番号	載荷 応力	供試体 枚数	載荷 日数	実験回復率 %	理論値 %
I 1	100 Kg/cm ²	5	1	14.8	14.8
I 2			3	27.3	29.3
I 3			5	26.5	28.6
I 4			7	29.5	29.2
I 5			14	28.3	—
I 6			28	20.1	—
I 7			32	20.1	32.9
I 8	28	28	3	11.1	13.1
I 9			7	14.1	16.0
I 10			14	22.3	—
I 11			28	22.3	—
II 1	25	5	23	51.8	50.6
II 2	50			49.6	50.8
II 3	50	28	14	34.1	35.9
II 4	75			35.4	36.2
II 5	50	91	14	27.3	28.3
II 6	75			26.9	26.5
III 1	50	5	23	42.3	44.0
III 2	75			36.6	37.9
III 3	50	28	14	35.0	31.8
III 4	75			31.6	32.0
III 5	50	91	14	25.6	25.4
III 6	100			26.0	26.6
IV 1	50	5	23	39.2	41.0
IV 2	100			42.2	42.7
IV 3	50	28	14	23.4	22.7
IV 4	100			22.7	23.3
IV 5	50	91	14	20.8	19.2
IV 6	100			20.8	20.8

4. 理論計算法

コンクリートは巨視的に見て、弾性係数の全く異なる細骨材、およびセメントペーストからなる複合体である。この複合体に弾性範囲内の荷重が作用した瞬間の状態は一部の塑性変形を除けば、各物質のヒズミ(ε_i)は等しいものと考えられる。このことから載荷荷重(P)は式-2となる

$$P = (E_c A_c + E_s A_s + E_g A_g) \cdot \varepsilon_i \quad \dots\dots\dots 2$$

ここに、 A_c , A_s , A_g ; コンクリートのある断面におけるセメントペースト、細骨材、粗骨材の断面積。

E_c , E_s , E_g ; セメントペースト、細骨材、粗骨材の初期弾性係数、ただし、細骨材の弾性係数は式-3から逆算した値を用いる。(表-4 参照)

$$E_H A_H = E_c A_c + E_s A_s \quad \dots\dots\dots 3$$

$$E_c A_c = E_H A_H + E_g A_g \quad \dots\dots\dots 3'$$

ここに、 E_H , A_H ; モルタルの動弾性係数、断面積。

E_c , A_c ; コンクリートの動弾性係数、断面積。

この載荷時の状態では、複合体内部の応力は一定でなく、構造的には不安定状態である。だが、時間の経過に伴ない応力拡散が進行し、最終的には内部応力一定の安定状態になるものと考えられる。応力一定の状態では物質間にヒズミの差を生じることになるが、これはセメントペースト硬化体がゲル状構造であり、粘性物質であることと考慮すれば理解可能である。一定応力(σ)は式-4となる。

$$\sigma = \frac{P}{A} = (E_c A_c + E_s A_s + E_g A_g) \cdot \frac{\varepsilon_i}{A} \quad \dots\dots\dots 4$$

ここに、 $A = A_c + A_s + A_g$

この状態での供試体のヒズミ(ε_2)は式-5となる。

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma}{V} \left(\frac{V_c}{E_c} + \frac{V_s}{E_s} + \frac{V_g}{E_g} \right) \quad \dots\dots\dots 5$$

ここに、 V_c ; V_s ; V_g ; セメントペースト、細骨材、粗骨材の容積。

$$V = V_c + V_s + V_g$$

骨材を球形と見なし、骨材がセメントペースト中に方向性を

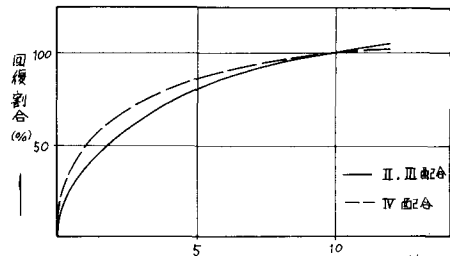


図-1 配合変化と回復割合 (10日と100%回復とした時の回復割合)

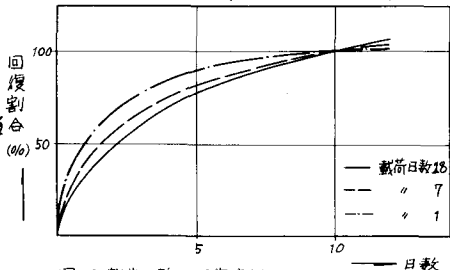


図-2 載荷日数と回復割合

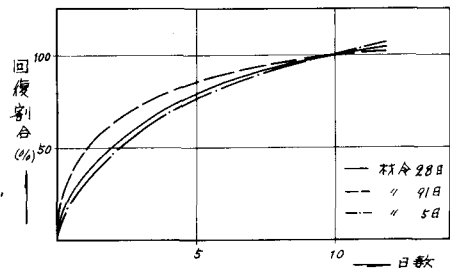


図-3 供試体配合と回復割合

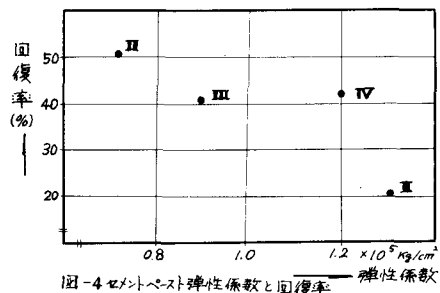


図-4 セメントペースト弾性係数と回復率

表-4 理論弾性係数

配合	理論弾性係数 $\times 10^5 \text{ kg/cm}^2$		実測動弾性係数 $\times 10^5 \text{ kg/cm}^2$		
	細骨材	粗骨材	コンクリート	モルタル	セメントペースト
II	3.91	4.57	3.21	2.26	0.72
III	4.25	5.62	3.87	2.50	0.89
IV	4.51	5.65	3.83	2.64	1.20

理論弾性係数は本文中式-3, 式-3'により計算
粗骨材の弾性係数は理論配合の4.38 $\times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とする。

持たず、全くランダムに含まれていると考えるならば、各物質の面積比は容積比に等しくなる。

遅延弾性変形がこのような内部応力拡散により生じる現象と考えるならば回復率 (C)は

$$C = \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1} \times 100 \quad (\%) \quad \dots\dots\dots 6$$

として求めることができる。

上記の計算法は載荷時の状態について求めたが、除荷時の場合も載荷状態を基準として考えるならば同様の計算が可能である。

この理論計算法は載荷に要する時間を無視して考えただけ、実際載荷には多少の時間を要し、その間にも一部の遅延弾性変形は進行しているものとする。(図-5 参照) さらに、応力拡散の場合、セメントペーストや骨材などの塑性変形も一部寄与するものと考え、理論値と実測値との比較の場合、式-5に係数(α)を掛けて比較すべきである。

理論計算値を表-3に示す。ただし、係数α=0.7 と仮定し、またブリージング量の多い配合(Ⅱ配合、ブリージング率 27.1% Ⅲ配合 16.9%)に対してはブリージング量だけセメントペースト容積を差し引き回復率の計算を行なった。

なお、モルタルに関しても同様の実験を行なったが、その実験結果、理論値(28日材令で除荷した場合の値)を表-5に示す。モルタルの回復率はコンクリートのそれに較べ、一般に大きな値となる。実測値と理論値とには配合により多少の差があるが、これは骨材が連続分布するコンクリートの場合に較べ、セメントペースト量が多く、細骨材がペースト中に不連続分布するモルタルの場合、前記理論計算の仮定に無理があるものとする。

5. ちすび

本実験から遅延弾性変形は弾性係数の異なる数種物質間での応力拡散現象がその主要原因であり、理論計算法はその仮定に多くの疑問点はあるが、回復率の推定には十分役立つものとする。なお、本実験は一種類の細、粗骨材を用い、配合も一般的なものであり、弾性係数の極端に異なる物質の複合体にこの理論が成立するかどうかは問題である。また、前記した細、粗骨材の弾性係数推定法にも疑問があり、今後、十分研究の余地があるものとする。

表-5 モルタルの回復率

配合番号	載荷応力	供試体材令	載荷日数	実測回復率 %	理論値 %
Ⅰ'1	100 kg/cm ²	5日	1日	29.8	—
Ⅰ'2			3	37.7	—
Ⅰ'3			5	38.6	37.8
Ⅰ'4			7	40.6	39.3
Ⅰ'5			14	42.6	41.6
Ⅰ'6			28	47.3	45.4
Ⅱ'1	75	28	14	37.9	39.3
Ⅱ'2	50			38.0	39.5
Ⅲ'1	75	28	14	33.2	32.6
Ⅲ'2	50			34.3	34.2
Ⅳ'1	100	28	14	32.3	33.8
					26.6

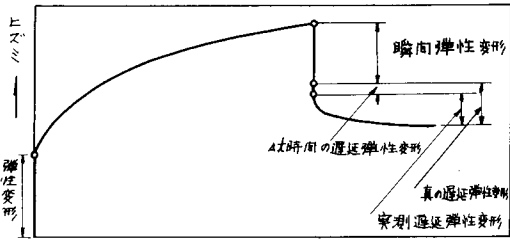


図-5 理論値と実測値