

地震荷重を対象としたコンクリートの 動的圧縮変形ならびに破壊

正員 畑 野 正*
正員 堤 一**

DYNAMICAL COMPRESSIVE DEFORMATION AND FAILURE OF CONCRETE UNDER EARTHQUAKE LOAD

By Dr. Eng., Tadashi Hatano, C.E. Member and Hajime Tsutsumi, C.E. Member

Synopsis : One stroke of compressive load, at the same load-speed as that caused by earthquake was given onto the concrete and mortar specimen. The relationship between stress and strain, and failure conditions were looked into, and the findings were compared with ordinary statical compressive tests.

As a result, it was found that almost linear relations existed between the dynamical strength of failure and the logarithmic value of failure time (0.03 sec.-100 sec.); that the shorter the failure time, the larger the strength of failure; and that compressibility in the strength of failure was almost unchanged regardless of failure time. It was also noticed that the smaller the failure time was, the steeper the stress-strain curve became, a relationship which substantiates a high degree of viscosity.

The authors have attempted to explain the dynamical behaviors of concrete and mortar approximately by obtaining the coefficient of elasticity and coefficient of viscosity of the simple 3-element model which is composed of the Kelvin body and a spring connected directly to it.

要旨 地震荷重のごとき荷重速度をもつ一行程の圧縮荷重を、コンクリート・モルタル供試体に作用し、応力-ヒズミの関係、破壊の状況を調べて、通常の静的圧縮試験の結果と比較した。この結果、動的破壊強度と破壊時間(0.03~100 sec)の対数値との間にはほぼ直線の関係が存在し、破壊時間の小なるほど強度大となり、かつ破壊強度のときのヒズミすなわち縮み能力は、破壊時間に関係なくほぼ一定となつた。また応力-ヒズミ曲線は破壊時間小なるほど急勾配となり、粘性の大なることを示した。これから、Kelvin 模型にバネの直結した最も簡単な3要素模型としての弾性係数・粘性係数を求め、近似的にコンクリート・モルタルの動的挙動を説明しようと試みた。

1. 緒 言

コンクリート ダムの耐震研究は、剛体の力学から弾性体としての検討に進み、実物ダムの振動実験を通じて得られた振動減衰性を粘性減衰と想定し、単純な弾性振動に加味して、振動論的に取扱う方法にまでいたつている^{1) 2)}。これをさらに一歩前進するためには、構造体の材料力学的な動的特性を基礎的に追求することが、重要な面の一つであると思われる。

この意味における第一歩として、地震荷重のごとき荷重速度をもつ一行程の圧縮荷重が作用したときのコンクリートの応答を実験的に求めて、コンクリートの弾性や粘性さらに破壊の様相を知ろうと試みた。

この種の実験はすでに約 20 年前、東京工大 勝田教授³⁾ によつて試みられたことがあるが、著者は簡易な高速圧縮試験機を試作し、ストレン ゲージによる簡便なヒズミ計・圧力計を用いて、各種のコンクリート・モルタルにつき多数実験を行い、これからやや一般的な関係を求めようとした。

2. 実験の方法

写真-1 に高速圧縮試験機および測定器の一般配置を示す。フライホイールをモーターにより回転すれば最大 300 r/min の回転があり、モーターのスイッチを切断して、最小 15 r/min の回転にいたるまでの各種の速度で破壊試験を行うことができる。

* 工学博士、電力中央研究所 技術研究所 第2部構造研究室

** 電力中央研究所 技術研究所 第2部構造研究室

フライホイールにより駆動される油圧ポンプに円筒形油タンク中の油が流入し、レバーを引くとポンプ内の球状弁がはずれて、圧油管を通つた圧油はアムスラー 100 t 耐圧試験機のラム底部に入り、衝撃的なラムの上昇を起し、供試体が圧縮される。

一方油圧ポンプのピストンに連動するカムが作動して、はずれた球状弁をもとの位置にもどし、ラムへの送油がポンプの一行程の間のみ行われるように規正する。ラムの上昇は一行程 2 mm 程度で、フライホイールの回転 300 r/min~15 r/min にしたがつて、高さ 20 cm のコンクリート供試体が約 0.03~1 sec の時間で破壊する結果となつた。

写真-1

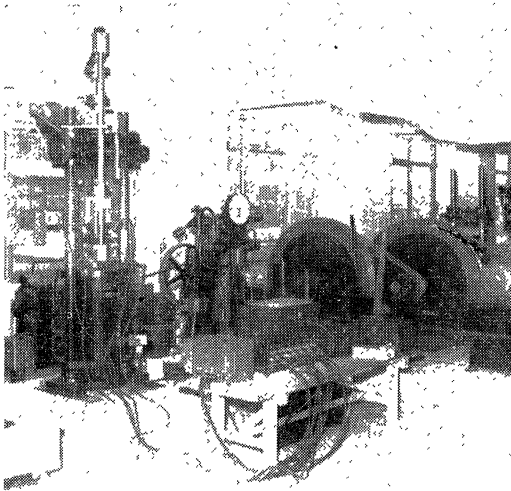


写真-2

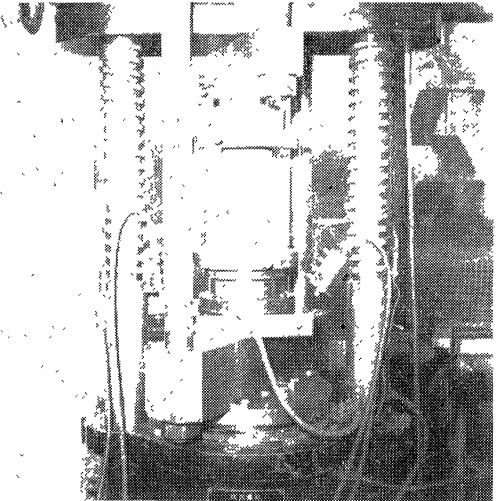


写真-2 に供試体に対する圧力計・ヒズミ計の配置を示す。圧力計は特殊鋼の短円筒内部に、非接着型ストレンゲージを固定したもので、これにより円筒の縮みを測定した。その容量は 100 t で、28 μ /t の感度をもつ。ヒズミ計としては燐青銅板の「 Γ 」型をしたものに、接着型ストレンゲージをはつた π ゲージを用いた。これを供試体の上下の加圧板に鉛直方向に固定し、供試体の全体の高さ 20 cm の間のヒズミを圧力と同時に記録した。なお加圧板の上下の面が完全に平行に移動することを期待することは困難であるので、 π ゲージを供試体の直径 2 方向に計 4 個使用してヒズミを測定し、その平均をとることとした。 π ゲージは 3 mm 程度の圧縮変形に耐え、その感度はそれぞれ多少の差はあるが、約 1 600 μ /mm である。これら測定器は各シリーズの実験の前後に、圧力計はアムスラー試験機により、ヒズミ計は 1/1 000 mm ダイヤルゲージにより検定した。

表-1 Properties of the Cement.

(1)	Ig.loss	Ins. R	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	C ₃ S	C ₂ S	C ₄ A	C ₄ AF
	0.75	0.27	23.21	4.03	4.13	63.76	0.93	1.98	44.4	33.1	3.7	12.6
(2)	sp. gr.	fineness										
	3.20	3 250 g/cm ²										
(3)	Strength of Standard mortar											
	flow	3 days	7 days	28 days								
	256 mm	127 kg/cm ²	170 kg/cm ²	405 kg/cm ²								

表-2 Properties of the aggregates.

Sagami River natural Agg.	sp.gr.	max.size	gradation			
			gravel		sand	
			mm mm		mm mm	
			25~20	25%	5 ~2.5	15%
			20~15	25%	2.5~1.2	15%
15~10	25%	1.2~0.6	25%			
10~ 5	25%	0.6~0.3	25%			
			0.3~0.15	15%		
			0.5~	5%		

使用したセメントおよび骨材の性質はそれぞれ、表-1, 2 に示すとおりである。

これらを用いて表-3 に示す配合・材令の Test: No. 1~No. 10 のコンクリート, Test No. 11~No. 14 のモルタルの合計 14 回の実験を行つた。供試体製作直後のまだ固まらないコンクリートおよびモルタルの性質を付記してある。

供試体は直径 10 cm, 高さ 20 cm の円筒型で、実験直前まで 20°C の水中養生を行つた。

表-3 Table of Tested Concrete and Mortar.

Text No.	Age in Weeks	Mix proportion					Slump and air		
		Cement (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	W/C (%)	Slump (cm)	Air (%)	Cement void ratio C/V
1	4	380	140	698	1 296	37	0.6	1.69	0.757
2	4	380	160	658	1 222	42	10.0	0.98	0.700
3	4	300	150	710	1 264	50	10.3	1.18	0.580
4	4	220	125	800	1 300	57	0.5	2.20	0.467
5	4	220	143	781	1 276	65	3.5	1.64	0.431
6	13	380	160	658	1 222	42	10.0	1.25	0.685
7	13	300	135	724	1 288	45	1.5	1.68	0.618
8	13	300	150	710	1 264	50	4.3	1.34	0.574
9	13	220	130	800	1 300	57	0.5	2.80	0.435
10	13	220	143	781	1 276	65	3.4	2.03	0.421
11	4	511	256	1 533	—	50	flow	4.41	0.528
12	4	410	246	1 640	—	60	17.0	5.81	0.421
13	13	511	256	1 533	—	50	17.1	4.11	0.538
14	13	410	246	1 640	—	60	15.3	5.79	0.422

3. 実験の結果

写真-3

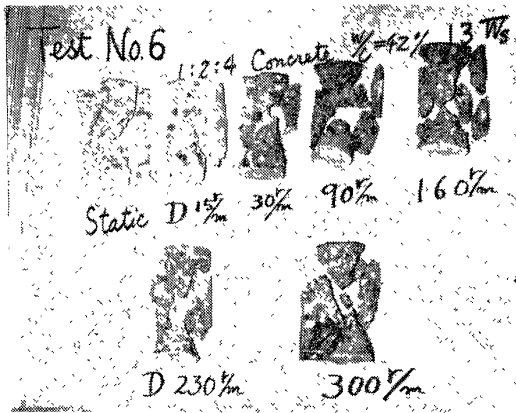


図-1 (1)

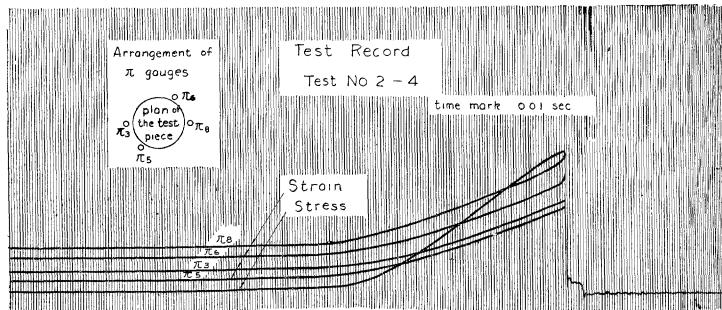
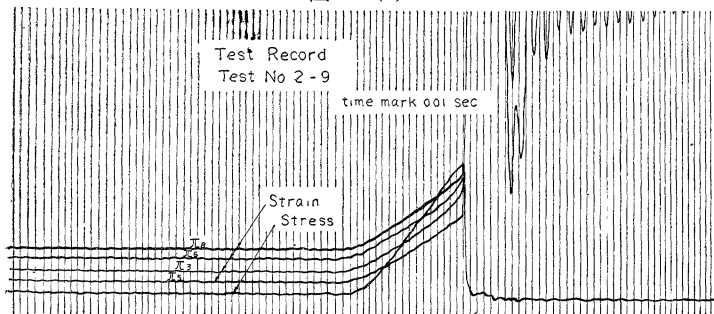


図-1 (2)



実験は各 Test ごとに約 20 個あて行つた。まず最初の 3 個については通常の静的試験を行い、約 100 sec で破壊することを目標にしたが、手で荷重速度を調節することは困難であつた。動的試験の場合、時に二行程の衝撃荷重がかかつて破壊したり、またヒズミ計の記録が振動してヒズミを正しく読むことのできない場合を生じた。前者の場合は記録を捨てて用いず、後者の場合は圧力計の読みのみを採用した。

破壊の状況は写真-3 に示すように、上下に円錐形を残す典型的な圧縮破壊の様相をていし、特に破壊時間の長短による差は認められなかつた。ただし貧配合のもの静的破壊は破壊後も供試体が分離しなかつた。動的破壊の場合は、小材令・貧配合から、大材令・富配合にいたるにつれて大きな音響を発生し、円錐形周囲の部分の小破片となつて飛散した。また強度大なるほど粗骨材の破砕が多くみられ、後述のように強度のバラツキが大きくなつた。

図-1 に試験記録の二、三の例を示す。既述のように、荷重装置はフライホイールの回転を利用しているので、荷重の大きさと時間との関係は $(1 - \cos at)$ の形に近く、破壊に近くなつて荷重速度は小となりヒズミ速度は大となる。また静的破壊の場合は全部、動的破壊の場合も貧配合で破壊時間大なるものは、荷重が最大となつてからのちある程度、最大荷重より小なる荷重に耐えてから破断するのがみられた。この傾向はモルタルの場合、コンクリートに比べ

てはるかに顕著であつた。圧力記録は破壊瞬間にしてもとに復し、ヒズミ記録は破壊と同時にラムの急激な上昇のため大きく上に振れ、その後約 60 cycle/sec で振動しているのがみられた。

これらの試験記録を精細に読んで応力-ヒズミの関係曲線をかき、その代表的な数曲線を各 Test No. ごとに記したものが図-2(1)~2(14)である。

前述のようにヒズミ速度は一定でないので、荷重がかかり始めてから最大荷重に達するまでの時間を破壊時間 (failure time) と表現し、この破壊時間別による曲線を示してある。最大応力に達したのちも荷重に耐え、圧力記録の明瞭にみられる部分の応力-ヒズミ曲線を点線で示してある。これから破壊時間の小なるほど、応力-ヒズミ曲線の勾配は急となり、貧配合となるほど上向きに凸に彎曲することがわかる。またモルタルの場合彎曲

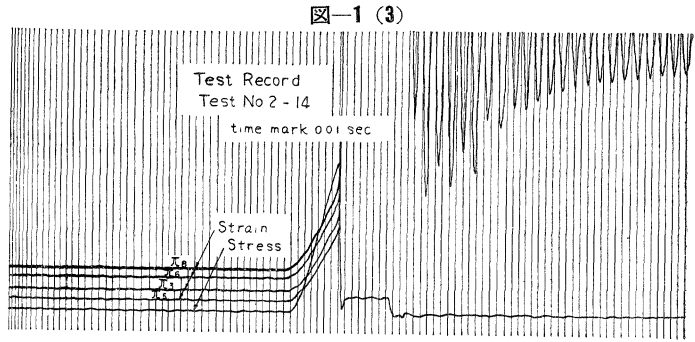


表-4 Strength and Compressibility

Test No.	Age in Weeks	Mix proportion	Water Cement ratio (%)	Relation between Strength(kg/cm ²) & failure time (sec.)	Standard deviation S _y (kg/cm ²)	Strength (kg/cm ²)			Strength ratio $\sigma_{u100} : \sigma_{u1} : \sigma_{u0.03}$	Compressibility $\times 10^{-4}$	Standard deviation S _y $\times 10^{-4}$
						σ_{u100}	σ_{u1}	$\sigma_{u0.03}$			
1	4	1:2:4	37	$\sigma_u = -22.11 \ln t + 707.8$	22.7	605.8	707.8	785.3	1:1.17:1.30	28.1	1.12
2	4	1:2:4	42	$\sigma_u = -25.23 \ln t + 621.8$	29.0	505.5	621.8	710.3	1:1.23:1.41	23.8	1.27
3	4	1:3:5	50	$\sigma_u = -20.75 \ln t + 539.6$	21.3	444.1	539.8	612.2	1:1.21:1.38	24.3	1.09
4	4	1:4:7	57	$\sigma_u = -17.98 \ln t + 405.8$	14.4	325.8	405.8	468.8	1:1.25:1.44	21.2	0.99
5	4	1:4:7	65	$\sigma_u = -13.88 \ln t + 339.5$	11.2	275.5	339.5	388.1	1:1.23:1.41	19.1	1.20
6	13	1:2:4	42	$\sigma_u = -29.63 \ln t + 728.3$	27.4	591.7	728.3	832.8	1:1.23:1.40	26.7	1.74
7	13	1:3:5	45	$\sigma_u = -31.06 \ln t + 638.8$	24.1	495.7	638.8	747.8	1:1.29:1.51	26.4	1.11
8	13	1:3:5	50	$\sigma_u = -28.62 \ln t + 604.1$	27.1	472.1	604.1	704.5	1:1.28:1.49	26.9	1.13
9	13	1:4:7	57	$\sigma_u = -20.96 \ln t + 420.3$	16.3	323.8	420.3	503.7	1:1.30:1.56	21.7	1.20
10	13	1:4:7	65	$\sigma_u = -15.31 \ln t + 353.1$	11.6	282.5	353.1	406.8	1:1.25:1.44	19.8	1.34
11	4	1:3	50	$\sigma_u = -22.07 \ln t + 559.1$	10.7	457.3	559.1	636.5	1:1.22:1.39	34.5	1.34
12	4	1:4	60	$\sigma_u = -13.43 \ln t + 309.4$	7.6	247.5	309.4	356.5	1:1.25:1.44	26.2	0.89
13	13	1:3	50	$\sigma_u = -30.54 \ln t + 744.9$	13.4	604.2	744.9	851.9	1:1.23:1.41	38.2	1.01
14	13	1:4	60	$\sigma_u = -21.78 \ln t + 498.1$	10.2	397.9	498.1	574.4	1:1.25:1.44	32.5	1.08

図-2 (1)

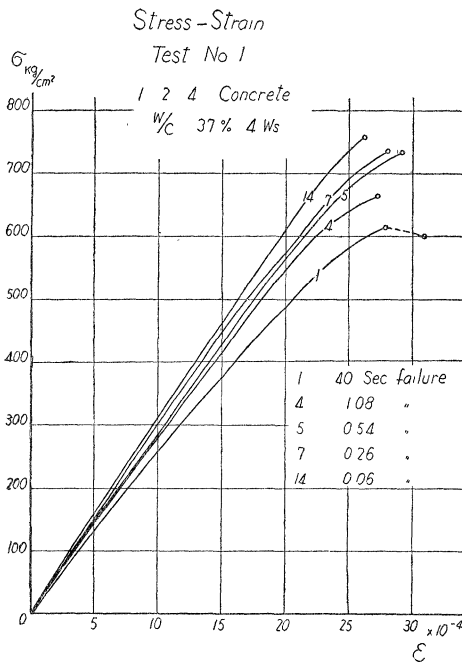


図-2 (3)

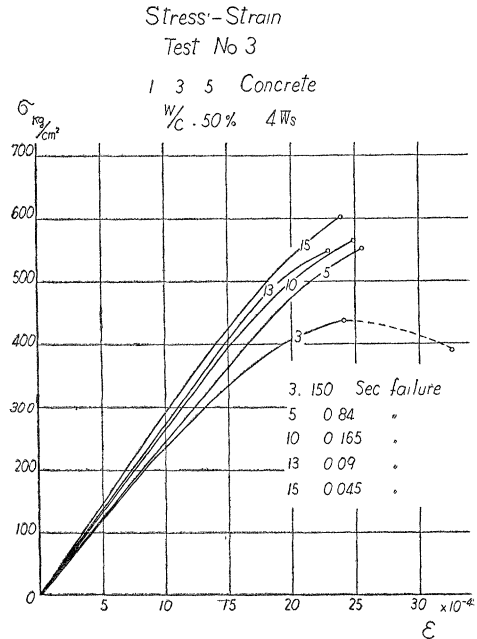


図-2 (5)

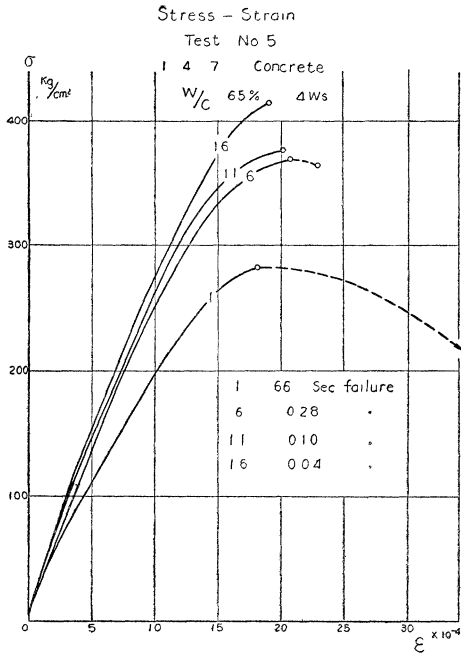


図-3 (1)

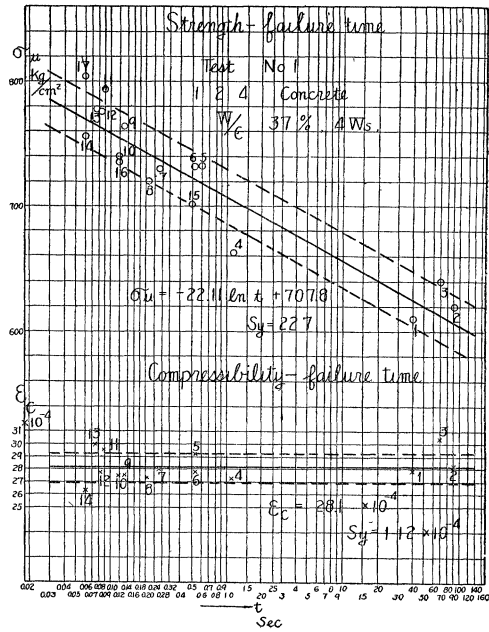


図-3 (3)

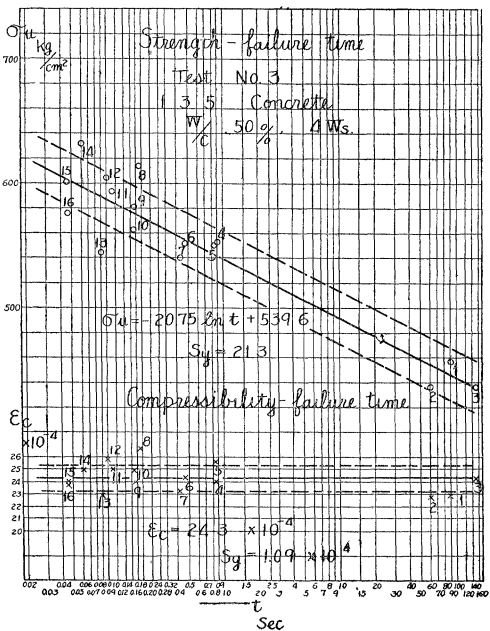
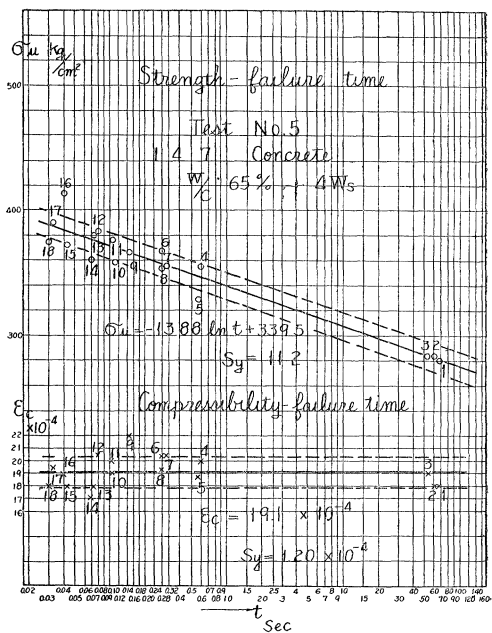


図-3 (5)



の度合はコンクリートよりはるかにいちじるしい。

以上から破壊強度 σ_u と破壊時間 t 、ならびに最大応力すなわち破壊強度の時のヒズミ ϵ_c (この値を縮み能力 Compressibility と定義する) と破壊時間との関係を図にしたものが 図-3(1)~3(14) である。ここに破壊時間はその自然対数値を用いて表わしてある。

これから、 σ_u と $\ln t$ の間にはほぼ直線の関係があり、 ϵ_c は t に関せずほぼ一定であることが察せられる。 σ_u と ϵ_c をこの関係で整理した場合の回帰線の値と標準偏差を表-4 に示す。

σ_u の偏差係数は $t=1.0$ sec の場合を基準にとると、コンクリートについては、4.7~3.0% モルタルについては、2.1~1.8% となり、貧配合ほど小なる傾向がみられる。

表-5(1) Secant Modulus (1)

Test No.	Age in Weeks	mix proportion	Water Cement ratio (%)	Relation between Secant modulus (kg/cm ²) for 0.25 ϵ_c and failure timer (sec) $\times 10^4$	Standard deviation $\times 10^4$ (kg/cm ²)	Relation between Secant Modulus (kg/cm ²) for 0.5 ϵ_c and failure time (sec)	Standard deviation $\times 10^4$ (kg/cm ²)
1	4	1 : 2 : 4	37	$E_{s,0.25\epsilon_c}=28.9 e^{-0.0321nt}$	1.25	$E_{s,0.5\epsilon_c}=28.4 e^{-0.0311nt}$	0.85
2	4	1 : 2 : 4	42	$E_{s,0.25\epsilon_c}=35.0 e^{-0.0271nt}$	2.01	$E_{s,0.5\epsilon_c}=31.4 e^{-0.0301nt}$	1.28
3	4	1 : 3 : 5	50	$E_{s,0.25\epsilon_c}=27.2 e^{-0.0181nt}$	1.04	$E_{s,0.5\epsilon_c}=26.3 e^{-0.0241nt}$	0.82
4	4	1 : 4 : 7	57	$E_{s,0.25\epsilon_c}=26.2 e^{-0.0251nt}$	1.71	$E_{s,0.5\epsilon_c}=24.7 e^{-0.0301nt}$	1.40
5	4	1 : 4 : 7	65	$E_{s,0.25\epsilon_c}=26.1 e^{-0.0181nt}$	1.34	$E_{s,0.5\epsilon_c}=23.3 e^{-0.0311nt}$	1.08
6	13	1 : 2 : 4	42	$E_{s,0.25\epsilon_c}=30.5 e^{-0.0381nt}$	2.27	$E_{s,0.5\epsilon_c}=30.1 e^{-0.0391nt}$	1.98
7	13	1 : 3 : 5	45	$E_{s,0.25\epsilon_c}=29.7 e^{-0.0381nt}$	1.26	$E_{s,0.5\epsilon_c}=27.9 e^{-0.0391nt}$	0.90
8	13	1 : 3 : 5	50	$E_{s,0.25\epsilon_c}=26.6 e^{-0.0461nt}$	1.40	$E_{s,0.5\epsilon_c}=25.5 e^{-0.0451nt}$	1.20
9	13	1 : 4 : 7	57	$E_{s,0.25\epsilon_c}=29.4 e^{-0.0301nt}$	1.17	$E_{s,0.5\epsilon_c}=25.4 e^{-0.0341nt}$	0.89
10	13	1 : 4 : 7	65	$E_{s,0.25\epsilon_c}=26.8 e^{-0.0351nt}$	1.39	$E_{s,0.5\epsilon_c}=23.1 e^{-0.0441nt}$	1.03
11	4	1 : 3	50	$E_{s,0.25\epsilon_c}=25.3 e^{-0.0231nt}$	0.95	$E_{s,0.5\epsilon_c}=21.9 e^{-0.0331nt}$	0.67
12	4	1 : 4	60	$E_{s,0.25\epsilon_c}=22.5 e^{-0.0271nt}$	1.11	$E_{s,0.5\epsilon_c}=17.9 e^{-0.0311nt}$	0.59
13	13	1 : 3	50	$E_{s,0.25\epsilon_c}=28.4 e^{-0.0391nt}$	1.27	$E_{s,0.5\epsilon_c}=25.4 e^{-0.0391nt}$	0.88
14	13	1 : 4	60	$E_{s,0.25\epsilon_c}=25.7 e^{-0.0231nt}$	0.62	$E_{s,0.5\epsilon_c}=21.3 e^{-0.0291nt}$	0.50

表-5(2) Secant Modulus (2)

Test No.	Relation between Secant Modulus (kg/cm ²) for 0.75 ϵ_c and failure time (sec.) $\times 10^4$	Standard deviation (kg/cm ²) $\times 10^4$	Relation between Secant Modulus (kg/cm ²) for ϵ_c and failure time (sec) $\times 10^4$	Standard deviation $\times 10^4$ (kg/cm ²)
1	$E_{s,0.75\epsilon_c}=27.2 e^{-0.0331nt}$	0.62	$E_{s,\epsilon_c}=24.9 e^{-0.0351nt}$	0.65
2	$E_{s,0.75\epsilon_c}=29.1 e^{-0.0371nt}$	1.25	$E_{s,\epsilon_c}=25.9 e^{-0.0391nt}$	1.13
3	$E_{s,0.75\epsilon_c}=24.8 e^{-0.0301nt}$	0.77	$E_{s,\epsilon_c}=22.1 e^{-0.0331nt}$	0.67
4	$E_{s,0.75\epsilon_c}=22.3 e^{-0.0391nt}$	1.06	$E_{s,\epsilon_c}=18.7 e^{-0.0541nt}$	1.04
5	$E_{s,0.75\epsilon_c}=20.9 e^{-0.0371nt}$	0.88	$E_{s,\epsilon_c}=17.5 e^{-0.0391nt}$	0.99
6	$E_{s,0.75\epsilon_c}=29.7 e^{-0.0401nt}$	1.89	$E_{s,\epsilon_c}=27.1 e^{-0.0411nt}$	1.79
7	$E_{s,0.75\epsilon_c}=26.7 e^{-0.0391nt}$	0.86	$E_{s,\epsilon_c}=24.1 e^{-0.0441nt}$	1.01
8	$E_{s,0.75\epsilon_c}=24.8 e^{-0.0451nt}$	1.06	$E_{s,\epsilon_c}=22.3 e^{-0.0461nt}$	1.00
9	$E_{s,0.75\epsilon_c}=22.5 e^{-0.0431nt}$	1.04	$E_{s,\epsilon_c}=19.0 e^{-0.0521nt}$	1.03
10	$E_{s,0.75\epsilon_c}=20.7 e^{-0.0401nt}$	0.72	$E_{s,\epsilon_c}=17.7 e^{-0.0441nt}$	0.85
11	$E_{s,0.75\epsilon_c}=19.1 e^{-0.0361nt}$	0.55	$E_{s,\epsilon_c}=16.0 e^{-0.0381nt}$	0.46
12	$E_{s,0.75\epsilon_c}=14.7 e^{-0.0351nt}$	0.44	$E_{s,\epsilon_c}=11.7 e^{-0.0381nt}$	0.35
13	$E_{s,0.75\epsilon_c}=22.4 e^{-0.0401nt}$	0.81	$E_{s,\epsilon_c}=19.4 e^{-0.0401nt}$	0.63
14	$E_{s,0.75\epsilon_c}=18.2 e^{-0.0341nt}$	0.44	$E_{s,\epsilon_c}=15.1 e^{-0.0411nt}$	0.48

ϵ_c の偏差係数はコンクリートの場合 6.8~4.0%, モルタルの場合 3.9~3.3% である。

次に応力-ヒズミ曲線において ϵ_c の 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 倍の各点における Secant Modulus E_s を t との関連で示したものが 図-4(1)~4(14) である。これらの図から t の増大とともに E_s の減少の割合がやや減少するとみられるので、 $E_s = be^{-\alpha nt}$ なる関係を想定して求めた回帰線の値と標準偏差を 表-5(1), 5(2) に示す。

E_s の値のバラツキは σ_u , ϵ_c に比しやや大きい方が $t=1.0$ sec の場合を基準にとると、偏差係数はコンクリートの場合 7.4~2.3%, モルタルの場合 4.9~2.4% 程度となる。これらのうち一般的に大きなヒズミ量に対する E_s の値のバラツキの方が、小さなヒズミ量に対する E_s の値のバラツキより小さい傾向を示している。

4. 考 察

コンクリート構造物が地震により内部に応力を発生するときは、そのヒズミ速度ないし荷重速度は一定とならず、ほぼ三角関数的な変化となると考えてよいであろう。本実験はこの意味においてまず最初の段階として一行程の三角関数的荷重速度を生ずる場合を取扱つたわけである。したがって強度や弾性率を地震周期との関連において簡便に表現するのが便利である。この場合破壊時間を地震周期の二分の一に相当するものと簡単に想定し、

図-4 (1)

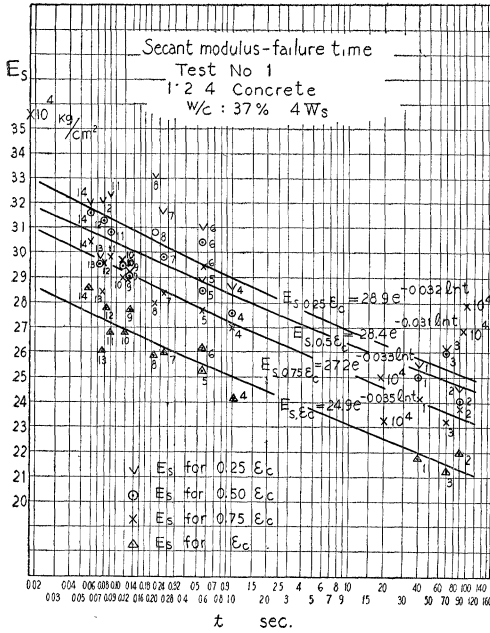


図-4 (3)

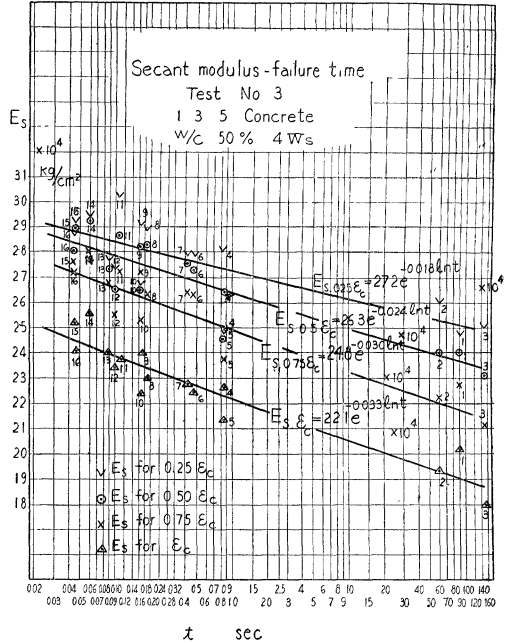
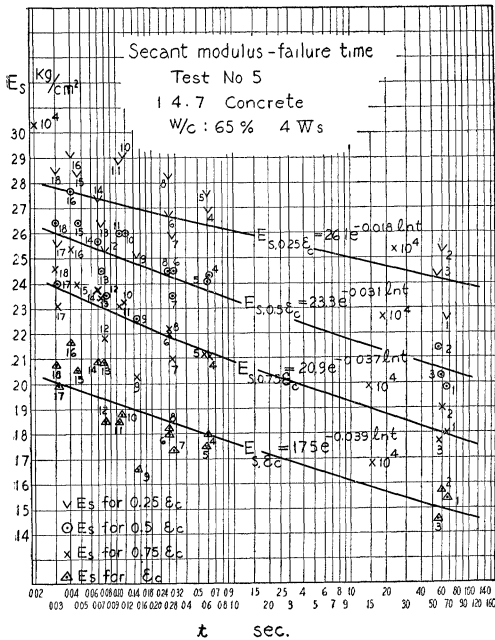


図-4 (5)



上述、 $t=0.03\sim 1\text{sec}$ の各動的実験を地震周期 $=0.06\sim 2\text{sec}$ の状態に相応するものとして考えることができるであろう。

図-3および表-4から、 t の小なるほど σ_u は増大し

$$\sigma_u = -d + f \ln t \dots\dots\dots (1)$$

$$0.03 \text{ sec} < t < 100 \text{ sec}$$

のごとき関係が一般に成立することが、コンクリート・モルタルの静的試験における圧縮強度と同程度の精度をもつていうのであろう。

本実験では、100 sec 破壊の強度を1とすれば、1 sec 破壊においては1.17~1.30に増大し、0.03 sec 破壊においてはさらに1.30~1.56に増大している。その増加率は貧配合ほど大きい傾向にあり、また材令4週と13週では後者の方がやや大きい。

縮み能力 ϵ_c はコンクリート・モルタルの種類と材令によつてほぼ一定値となり、破壊時間に関係なく次のように表現されると考えられる。

$$\epsilon_c = \text{Constant} \dots\dots\dots (2)$$

$$0.03 \text{ sec} < t < 100 \text{ sec}$$

その大きさは、本実験ではコンクリートで $19.1\sim 28.1 \times 10^{-4}$ モルタルで $26.2\sim 38.2 \times 10^{-4}$ であった。これらの値は富配合になるほど大きく、かつ材令の増加とともにやや増大している。

これら破壊強度ならびに縮み能力に関する実験結果は、コンクリート・モルタルの破壊論に大きな示唆を与えるものと思われる。時間的要素を考慮した広い立場での破壊論を考えると、応力説はもちろんエネルギー説の立場も疑わしいといわねばならない。この問題に関して、より正しい結論を導くためにはさらに広範な実験と考察が必要であろう。

応力-ヒズミ曲線の勾配が破壊時間の減少とともに増大する度合を Secant-Modulus E_s を用いて

$$E_s = be^{-cmt} \dots\dots\dots (3)$$

$$0.03 \text{ sec} < t < 100 \text{ sec}$$

の形で表現し得るであろうことはすでに述べたが、本実験では 100 sec 破壊の場合の E_s を 1 とすれば、1 sec 破壊のときの E_s の値は 1.15~1.25 と増大し 0.03 sec 破壊の場合はさらに 1.20~1.50 と増大した。増加の割合は貧配合ほど大きく、かつ $0.25 \epsilon_c$ に対する E_s より ϵ_c に対する E_s にいたるほど大きい傾向にある。

以上の資料からコンクリート素材としてのレオロジー的解析を進めることができる。しかしコンクリートやモルタルが本実験において示した応答をきわめてよく説明するに足る模型を求めることは相当な時日を要することであるので、本文では取りあえず、在来考えられている単純な模型を想定した場合、その定数がいかなる値となるかを二、三の例につき求めるに止めることとする。

破壊にいたるまでの挙動を全部考えることは非線型性の導入を必要とするであろうから、まず応力—ヒズミ曲線のうち $0.25 \epsilon_c$ における応力—ヒズミまで考える。模型としては最も単純に、Kelvin 模型にバネ一個を直結した3要素模型とする。

$$\text{いま, } \sigma = Kt \dots\dots\dots (4)$$

なる応力をこの模型に作用すれば、生ずるヒズミ ϵ は次のように与えられる。

$$\epsilon = K \left(\frac{t}{E_1} - \frac{\eta_1}{E_1^2} + \frac{\eta_1}{E_1^2} e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} \right) + K \frac{t}{E} \dots\dots\dots (5)$$

ここに

σ : 応力 (kg/cm²), K : 定数 (kg/cm²·1/sec), t : 時間(sec), E_1 : Kelvin body の弾性係数 (kg/cm²), η_1 : Kelvin body の粘性係数 (kg/cm²·sec), E : 直結バネの弾性係数 (kg/cm²)

前述各図の $\epsilon_c, \sigma_u, E_s, \dots, \epsilon_c$ の回帰線から、 $t=0.03 \text{ sec} \cdot 0.2 \text{ sec} \cdot 1 \text{ sec} \cdot 100 \text{ sec}$ の4点に相当する値をそれぞれ求め、破壊時間に対する破壊強度から K の値を求めて、さらに E_s, \dots, ϵ_c から $0.25 \epsilon_c$ に対する応力 σ を求め(4)式より $0.25 \epsilon_c$ を生ずる時間 t を得る。これらの値を(5)式に適用して曲線のあてはめを行つて得られた値は表-6のごとくである。

これらの数値は静的試験における挙動をまで説明することはとうていできないが、本実験に述べたような動的試験の範囲内における小応力内の挙動はある程度説明し得るであろう。すなわちこれらを用いて静的弾性率・動的弾性率、特に周期的応力を受ける場合の周波数による動的弾性率の変化、粘性の絶対値等コンクリートの動的挙動を説明する数値が得られる。

表-6

Test No.	1	5	11
mix proportion W/C	1:2.4, W/C=37%	1:4:7, W/C=65%	1:3, W/C=50%
Age	4 W _s	4 W _s	4 W _s
E kg/cm ²	32.1×10 ⁴	27.2×10 ⁴	27.5×10 ⁴
E ₁ kg/cm ²	3.1×10 ⁴	7.8×10 ⁴	4.4×10 ⁴
η_1 kg/cm ² ·sec	31.0×10 ⁴	110.7×10 ⁴	64.0×10 ⁴
Retardation time η_1/E_1 sec	10	14.2	14.5

5. 結 論

以上によつて地震荷重のごと

き荷重速度をもつ一行程の一軸圧縮荷重によるコンクリート・モルタルの動的挙動の一部が明らかにされた。

破壊強度は破壊時間の小なるほど増大し、その間には(1)式のごとき関係が成立する。

縮み能力は材質・材令によつてほぼ一定し、破壊時間には関係なく(2)式のごとき関係が成立する。

弾性率は破壊時間小なるほど大となり、その値は(3)式のごとき関係で表現される。

これから、単純なる要素模型としての弾性係数・粘性係数を求め、小応力内の動的挙動をある程度説明することができる。

参 考 文 献

- 1) 著者：地震に対するアーチ ダムの安定性，電力技術研究所々報，Vol. 5 No. 5
- 2) 著者：塚原重力ダムの振動実験結果とその考察，電力技術研究所々報，Vol. 7 No. 6
- 3) 勝田千里：高速荷重による鉄筋コンクリート材の耐力に関する研究，建築学会論文集，昭和15年3月，昭和19年4月