

高応力低サイクル繰返しを受けるコンクリートの力学的挙動

加納 昌男*, 平澤 征夫*, 杉田 朗*.**

Mechanical Behaviour of Concrete under Repeated Over-Load

Masao KANO*, Ikuo HIRASAWA* and Akira SUGITA*.**

(Received August 30, 1979)

The object of this study is to clarify the mechanical behaviour of plain concrete.

One hundred sixty-nine cylinder specimens were tested under repeated load conditions. Tests were carried out of up to 100 cycles under the constant cyclic load level of 30~95% of the compressive strength.

The specimens failed to obtain the full stress-strain curves after the repeated loading of 100 cycles by the rigid test.

The results of this test are summarized as follows;

- 1) All of the specimens with maximum repeated load limit greater than 0.8 of the compressive strength failed during the test.
- 2) A strain value of more than about 1000×10^{-6} at 1 cycle influenced the failure.
- 3) When upper load level is greater than 0.8 of the compressive strength, the loop chord modulus decreases.
- 4) The upper load levels of 0.6 and 0.7 of the compressive strength influence the full stress-strain curves.

1. まえがき

従来、鉄筋コンクリート、または、プレストレストコンクリート等の構造部材の終局時諸性状については、非常に詳細な研究が行なわれてきている。また一方では比較的小さな荷重が高速度で数百万回というオーダーで繰返される場合の疲労についても膨大な研究成果がある。しかし、これら二者の中間的ともいえる高応力低サイクル繰返し荷重を受ける場合のコンクリート素材、あるいは部内の力学的挙動を明らかにする研究は比較的少ない。その原因は構造物の耐震性に対する要請が今日程強くなかったことにもよるが、従来の試験装置ではこうし

た目的での研究を行なえなかったことにもよる。

そこで本研究は、剛性試験装置を用いてこのような高応力低サイクル繰返しを受けるコンクリート素材の力学的挙動を明らかにすることを目的として行なったものである。具体的には、載荷・除荷の平均速度を約 $225 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ 、繰返し回数を 100 回として、正弦波的な荷重で低サイクル繰返し荷重試験を行ない、剛性試験による応力度一ひずみ曲線、残存強度、弦弾性係数などの力学的諸性状を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

(1) 実験計画

実験のための供試体は、すべて円柱供試体とし、実験計画を表一に示す。その概要は次のとおりである。

* 土木工学科 (Department of Civil Engineering)

** 日本瀝青工業株式会社 (Japan Bitumen Industry Co. Ltd)

1. 载荷の種類（静的载荷，繰返し载荷）……2種類
2. 载荷レベル（30%，40%，…，95%）……9種類

表-1 実験計画

上限荷重 レベル (%)	供試体名称	試験の種類		
		静的圧縮試験	繰返し試験	剛性試験
30	CC-30	7	5	4
40	CC-40	11	5	4
50	CC-50	7	5	5
60	CC-60	12	5	5
70	CC-70	7	5	4
80	CC-80	11	5	5
85	CC-85	9	6	6
90	CC-90	10	6	5
95	CC-95	9	6	5

実験に用いた供試体は，静的载荷用に121本，繰返し载荷用に48本，総計169本である。

(2) 使用材料と配合

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。骨材として，細骨材には木曽川産の川砂，粗骨材には木曽川産の川砂利を用いた。これらの物理試験結果を表-2，表-3に示す。コンクリートの配合は目標圧縮強度（材令45±3日）を350kg/cm²とした。

表-2 細骨材の物理試験結果

比重	吸水量 (%)	洗い試 験(%)	粗粒率	ふるい残留百分率(%)							
				0.15	0.3	0.6	1.2	2.5	5	10	
2.58	1.68	2.80	2.91	97	88	60	32	15	0.3	0	

表-3 粗骨材の物理試験結果

比重	吸水量 (%)	洗い試 験(%)	粗粒率	ふるい残留百分率(%)							
				1.2	2.5	5	10	20	25	30	
2.62	0.78	0.72	6.99	100	98	95	77	29	8	0	

表-4 示方配合

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スラン プ (cm)	空気量 (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨材 率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
					水	セメ ント	細骨材	粗骨材
					W	C	S	G
25	7±1	1.5±1	47	40	176	374	716	1081

示方配合を表-4に示す。

(3) 供試体作製と養生条件

供試体はφ10×20cmの円柱供試体を用いた。

供試体は5回に分けて打設した。また打設ごとにφ10×20cmの引張試験用の供試体3本，10×10×40cmの曲げ試験用の供試体3本を採取し，打設日ごとのそれぞれ

の強度を求めることとした。

円柱供試体および曲げ供試体はともに打設2日後に脱型し，試験時材令(45±3日)まで恒温恒湿室内（温度20±1℃，相対湿度80±5%）で養生した。

(4) 試験方法

試験時材令は45±3日とした。試験機は300Ton（圧縮）—100Ton（引張）構造物試験機（前川試験機製作所製）を用いた。

試験の種類はつぎの3種類である。一つは静的圧縮試験であり，この試験は繰返し試験に先だてて行ない，繰返し試験の上限荷重を定めるために行なったものである。もう一つは繰返し試験で，静的圧縮試験で求めた静的圧縮強度の30%，40%，50%，60%，70%，80%，85%，90%，95%を上限荷重とし，1Tonを下限荷重として，载荷・除荷の平均速度を約225kg/cm²/minで，100回の繰返し载荷を行なうものである。残りの一つは剛性試験であり，この試験は下降部を含めた応力度—ひずみ曲線を求めるために，载荷履歴を受けていない供試体と100回の繰返し载荷を受けた供試体に対して行なうものである。剛性試験の方法は図-1に示すように円柱供試体と並列にPC鋼棒（C種φ32cm）を3本配置して剛性を高める方法を用いた。

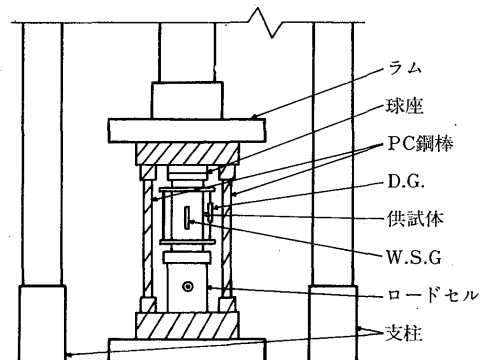


図-1

測定は，円柱供試体の側面对称位置に貼付した電気抵抗線ひずみゲージ（G.L.=68mm）により，動ひずみ計を通してX-Yレコーダーに記録させた。また，円柱供試体にコンプレッソメーターを装着してダイヤルゲージ型変位計（G.L.=150mm，1/100mm）により，比較的大きなひずみ部分を測定した。

3. 実験結果と考察

(1) コンクリート諸強度

コンクリートの打設は5回行なったが，試験時材令(45±3日)における圧縮，引張，曲げ強度，弾性係数

(圧縮強度の1/3点の割線弾性係数)および圧縮強度の変動係数を表-5に示す。打設および試験時の条件の変化により圧縮強度が334~370kg/cm²と多少ばらついた。しかし、各上限荷重レベルごとの変動係数からみる

表-5 コンクリート諸強度

	供試体名称	圧縮強度 (kg/cm ²)	変動係数 (%)	引張強度 (kg/cm ²)	曲げ強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁵ kg/cm ²)
1	CC—30	361	2.39	27.7	48.2	3.27
	CC—40	366	4.44	27.7	48.2	3.45
2	CC—50	349	6.47	30.4	54.4	3.10
	CC—60	370	2.37	30.4	54.4	3.52
3	CC—70	366	8.33	34.1	54.1	3.59
	CC—80	360	7.75	34.1	54.1	3.68
4	CC—85	334	5.19	29.7	53.1	3.42
5	CC—90	345	3.26	31.3	50.0	3.53
	CC—95	347	3.03	31.3	50.0	3.50

表-6 各上限荷重レベルごとの残存強度比

供試体名称	材令(日)	静的圧縮強度 (kg/cm ²)	残存強度 (kg/cm ²)	残存強度比	平均値
CC-30	42	360.3	345.2	0.96	0.94
	42	360.3	361.8	1.00	
	43	362.3	347.8	0.96	
	43	362.3	333.8	0.92	
	45	374.0	324.8	0.87	
CC-40	45	374.0	386.0	1.03	0.98
	46	367.1	359.2	0.98	
	46	367.1	346.5	0.94	
	47	349.4	327.4	0.94	
	47	349.4	356.7	1.02	
CC-50	43	336.9	352.9	1.07	0.96
	43	336.9	305.0	0.90	
	44	363.1	352.9	0.97	
	44	363.1	305.7	0.84	
	45	359.7	360.5	1.00	
CC-60	45	359.7	360.5	1.00	0.98
	47	369.2	363.1	0.98	
	47	369.2	365.6	0.99	
	48	370.2	372.0	1.01	
	48	370.2	341.4	0.92	
CC-70	43	363.6	373.2	1.03	0.95
	43	363.6	352.9	0.97	
	44	367.9	333.8	0.91	
	44	367.9	327.4	0.89	
	44	367.9	67サイクル	—	

と上限荷重レベルが50%, 70%, 80%の3シリーズ以外はばらつきは比較的少ないことがわかる。

(2) 残存強度

静的圧縮強度と繰返し試験後の静的圧縮強度(以下残存強度という)との比を残存強度比と呼ぶことにする。

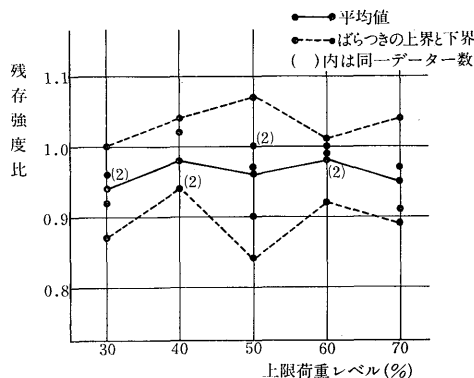
表-6, 表-7に各上限荷重レベルごとの残存強度比(繰返し試験途中で破壊に至ったものは破壊時の繰返し回数を示す。)を示す。これらの表より、繰返し載荷が残存強度にどのような影響をおよぼすかをみることができる。上限荷重レベルが80%以上のシリーズの供試体は繰返し載荷中にほとんど破壊していることがわかる。これは明らかに圧縮強度の低下と考えられる。また、上限荷重レベルが70%以下のシリーズでは100回の繰返しに耐えた供試体は、平均値にして2~6%とわずかながら残存強度の低下が認められる。

図-2に各上限荷重レベルと残存強度比との関係を示す。この図より、上限荷重レベルが70%以下のシリーズにおいて上限荷重レベルと残存強度比との間には明確な関連性は認められない。このことは上限荷重レベルが

表-7 各上限荷重レベルごとの残存強度比

供試体名称	材令(日)	静的圧縮強度 (kg/cm ²)	残存強度 (kg/cm ²)	残存強度比	平均値
CC-80	45	372.2	69サイクル	—	—
	46	359.6	86サイクル	—	
	46	359.6	365.2	1.02	
	47	343.7	27サイクル	—	
	47	343.7	17サイクル	—	
CC-85	43	338.9	341.4	1.01	—
	43	338.9	27サイクル	—	
	44	347.5	21サイクル	—	
	44	347.5	3サイクル	—	
	45	321.3	1サイクル	—	
CC-90	45	321.3	326.1	1.01	—
	42	340.1	47サイクル	—	
	42	340.1	43サイクル	—	
	43	351.0	55サイクル	—	
	43	351.0	8サイクル	—	
CC-95	45	344.5	44サイクル	—	—
	45	344.5	384.7	1.12	
	47	350.7	42サイクル	—	
	47	350.7	1サイクル	—	
	47	350.7	1サイクル	—	
CC-95	48	343.7	17サイクル	—	—
	48	343.7	36サイクル	—	
	48	343.7	5サイクル	—	
	48	343.7	5サイクル	—	
	48	343.7	5サイクル	—	

70%以下の場合, 上限荷重レベルが残存強度の低下におよぼす影響は少ないと考えられる。

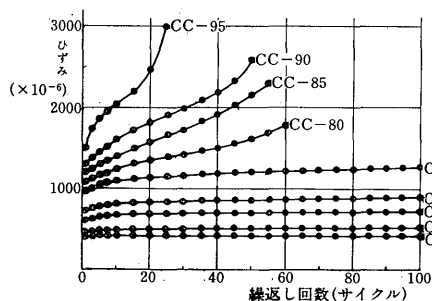


図一 2 残存強度比と上限荷重レベルの関係

以上のことより, 高応力低サイクル繰返し载荷が残存強度の低下に影響をおよぼすのは, 上限荷重レベルが80%以上の場合に大きく, また, 100回の繰返しに耐えられる限界の荷重レベルは, 下限をほぼ零とした場合, その上限荷重レベルで70~80%の間に存在すると考えられる。

(3) ひずみと繰返し回数

図一3に上限荷重時ひずみと繰返し回数の関係を示す。なお, 上限荷重レベル80%以上のシリーズの曲線は, 70%以下のシリーズに比べてばらつきが大きかったので4ないし6個の平均的な曲線を示したものである。上限荷重レベルが70%以下のシリーズにおいて, 10サイクル以後の上限荷重時ひずみの増加はほとんどない。ところが, 上限荷重レベルが80%以上のシリーズにおいては, 繰返し回数の増加にともない上限荷重時ひずみの増加の割合が大きくなり, 100回の繰返しに耐えられないで破壊した。また, 上限荷重時ひずみ-繰返し回数曲線に反曲点が現われ, その位置は上限荷重レベルが高くなるにつれて少ない繰返し回数で現われている。



図一 3 上限荷重時ひずみと繰返し回数の関係

ところで, 1回目载荷時の上限荷重時ひずみについてみると, 100回の繰返しに耐えられないで破壊した上限荷重レベルが80%以上のシリーズのものはいずれもその値が 1000×10^{-6} を越えているが, 100回の繰返しに耐え得た上限荷重レベルが70%以下のシリーズのものでは, 1000×10^{-6} を越えていないことがわかる。このことから, 1回目载荷時の上限荷重時ひずみが 1000×10^{-6} を越えるような繰返し荷重が载荷される場合, 上限荷重時のひずみの増加が著しく, 100回の繰返し载荷に耐えられずに破壊することが明らかである。

上述のことは, 坂, 六車両博士が行なった研究¹⁾とは供試体寸法, 载荷速度, 繰返し回数, コンクリートの静的圧縮強度など, 細かな点で条件は相違しているがその結論, すなわち「初回上界応力時の圧縮ひずみが1% ($=1000 \times 10^{-6}$) を越えるような repeated over-load が载荷される場合, 上界応力時の incremental total strain の増加, および荷重除去時の incremental permanent strain の増加が著しく, 30回以内の繰返し载荷によって破壊する」において, 破壊時の繰返し回数以外は「 1000×10^{-6} を越えるような繰返し荷重が载荷された場合, 供試体は破壊する」という点で一致していることが確認されたことは興味深く, また重要であろう。

(4) 弦弾性係数と繰返し回数

一般に, 外力を受けても小さい変形しか生じない材料を剛性が大きい材料といい, 弾性係数は剛度の一つの尺度となっている。ここでは, コンクリートが高応力低サイクル繰返し荷重を受けることによりその剛性すなわち弾性係数(本研究ではとくに弦弾性係数)がどのように変化するのかを調べてみた。

図一4と図一5に本実験で求めた弦弾性係数と繰返し回数の関係を示す。

ここで, 弦弾性係数は次式によって定義する。

$$\text{弦弾性係数} = (\sigma_U - \sigma_L) / (\epsilon_U - \epsilon_L) \quad (\text{kg/cm}^2)$$

ただし,

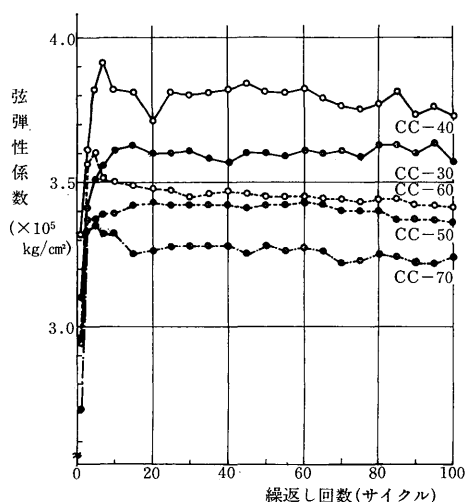
σ_U : 上限荷重時の応力 (kg/cm^2)

σ_L : 下限荷重時の応力 (kg/cm^2)

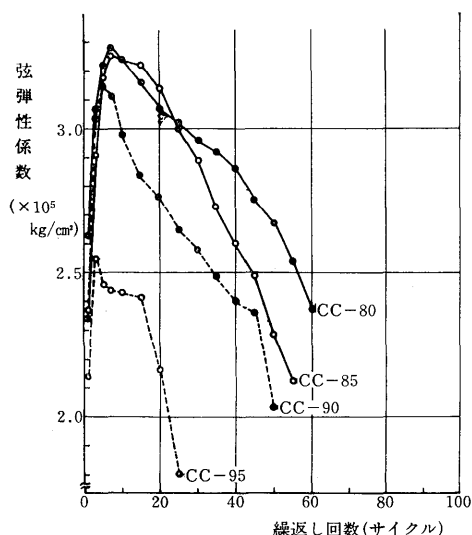
ϵ_U : 上限荷重時のひずみ

ϵ_L : 下限荷重時のひずみ

これらの図より, 上限荷重レベルが70%以下のシリーズにおいては, 弦弾性係数は繰返し回数10回以後ほとんど一定となり, 1回目载荷時の弦弾性係数の値を下回ることではない。ところが, 上限荷重レベルが80%以上のシリーズにおいては, 弦弾性係数は繰返し回数5~10以後減少し続け, 1回目载荷時の弦弾性係数の値を下回り, その後, 繰返し回数10回以内で破壊に至っていることが



図一四 縦弾性係数と繰返し回数の関係



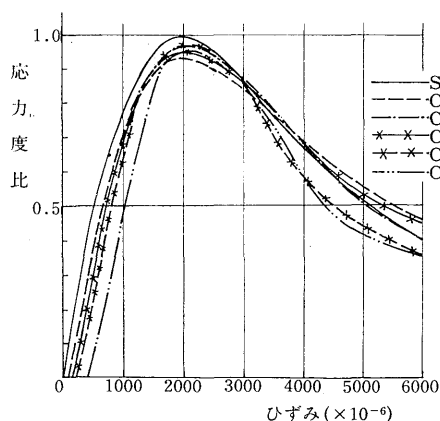
図一五 縦弾性係数と繰返し回数の関係

わかる。このことから、繰返し回数 100 回以内で破壊する場合の 1 つの目安として、縦弾性係数が 1 回目載荷時の縦弾性係数を下回った後に破壊に至るのではないかと考えられる。また、縦弾性係数が 1 回目載荷時の縦弾性係数を下回った後、破壊に至るまでの繰返し回数と上限荷重レベルとの関係を調べてみると、上限荷重レベルが 80% の時 8 回、85% の時 6 回、90% の時 5 回、95% の時 3 回となっている。すなわち、上限荷重レベルが高くなると縦弾性係数の値が 1 回目載荷時の縦弾性係数の値より下回った後、破壊に至るまでの繰返し回数が減少する傾向が認められる。

以上のことから、縦弾性係数—繰返し回数曲線から破壊に至るまでの繰返し回数を比較的正確に推定できるのではないかと考えられる。また、1 回目載荷時の縦弾性係数に関する資料を蓄積することによりすでにいくらかの繰返し履歴をうけたコンクリートのその後の破壊までの繰返し回数を推定することが可能であることを示唆している。

(5) 応力度比—ひずみ曲線

図一六に処女応力度比—ひずみ曲線（以下 Static σ_r - ϵ 曲線という）と、上限荷重レベルが 70% 以下のシリーズのもので 100 回の繰返し載荷に耐え 101 回目に行なった剛性試験によって得られた応力度比—ひずみ曲線（以下 101 cycle σ_r - ϵ 曲線という）を示す。この図より繰返し載荷が応力度比—ひずみ曲線に与える影響を調べると、その影響は、まず、上限荷重レベルによって大いに異なったものとなっていることがわかる。とくに、上昇域においては、上限荷重レベルの高さが大きくなると右への移動の度合いが大きく、また、残留ひずみも大きくなる。一方、下降域においては、上限荷重レベルが 60%, 70% の時の 101 cycle σ_r - ϵ 曲線では、ひずみの増加にともなう応力の減少が Static σ_r - ϵ 曲線より急であるが、上限荷重レベルが 30%, 50% のものはわずかではあるが Static σ_r - ϵ 曲線より緩やかである。



図一六 応力度比—ひずみ曲線

以上のことから、上限荷重レベルが 60%, 70% の場合で、100 回の繰返し載荷に耐えたものが、その応力度比—ひずみ曲線に与える繰返し載荷の影響が大きいことがわかる。

(6) 靱性

靱性を破壊に要するエネルギーの総和と定義する場合でも、どの状態を破壊と見なすかによって靱性の値は異なる。本研究では、応力度比—ひずみ曲線において、ひ

ずみが 6000×10^{-6} となった時を破壊と見なした。そして応力度比一ひずみ曲線と 6000×10^{-6} のひずみの点を通る縦軸と平行な直線と横軸とで囲まれる面積で靱性を評価することとした。

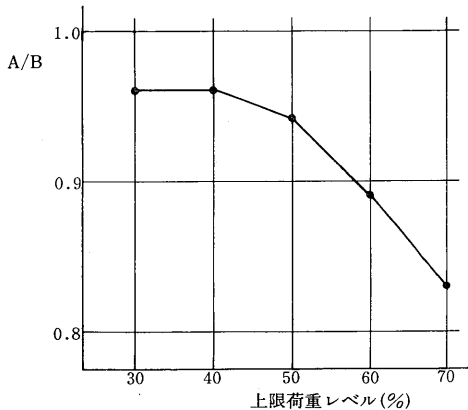


図-7 靱性と上限荷重レベルの関係

表-8 靱性と上限荷重レベルの関係

供試体名称	A : Static の 靱 性	B : 繰返し試験 後の靱性	B/A
CC-30	4.17×10^{-8}	4.02×10^{-8}	0.964
CC-40	4.17×10^{-8}	4.02×10^{-8}	0.964
CC-50	4.17×10^{-8}	3.95×10^{-8}	0.947
CC-60	4.17×10^{-8}	3.70×10^{-8}	0.887
CC-70	4.17×10^{-8}	3.45×10^{-8}	0.827

表-8と図-7に靱性と上限荷重レベルの関係を示す。これらの表と図より、上限荷重レベルが70%以下のシリーズのもので100回の繰返し載荷に耐えたものにおいては、上限荷重レベルが高くなるにつれて靱性が低下することが明確に表われている。とくに、上限荷重レベルが60%と70%のシリーズにおいては、10%以上もの靱性の低下が認められる。

4. むすび

本研究は、複合材料としてのコンクリートの力学的挙動に関する基礎的研究の一つとして、高応力低サイクル

繰返しを受けるコンクリートの力学的挙動を実験により調べたものである。

本研究の範囲内で得られた結果を要約すると次のようである。

(1) コンクリートが繰返し載荷を受ける場合に、繰返し回数100回以内の破壊に影響をおよぼす上限荷重レベルは、1回目載荷時の上限荷重時ひずみが 1000×10^{-6} に相当する応力（静的圧縮強の70~80%）を目安とすることができる。

(2) 上限荷重レベルが70%以下では、10サイクル以後の上限荷重時ひずみの増加はほとんどない。また、上限荷重レベルが80%以上では、繰返し回数の増加につれて上限荷重時ひずみの増加の割合が大きくなり、100回の繰返しに耐えられずに破壊する。

(3) 上限荷重レベルが80%以上では、弦弾性係数は減少する傾向が認められ、破壊は1回目載荷時の弦弾性係数を下回った後10回以内の繰返しで生ずる。

(4) 繰返し載荷が応力度比一ひずみ曲線に与える影響は上限荷重レベルが60%と70%の時に大きい。

(5) 靱性は、上限荷重レベルが高くなるにつれて減少する。

5. 謝辞

本研究は昭和52年度中部工業大学特別研究費によって行なったものである。昭和52年度卒研生として本研究に協力していただいた、加藤貞雄、川口洋紀、川尻好明、川原林哲也の各氏に対して心から感謝したい。また最後になったが、本実験の遂行に当っては、材料構造実験施設の技術員林克己氏の献身的協力なくしては成し得なかった。ここに特記して、深謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 六車熊, 富永 恵: Repeated Over-loadをうけるコンクリートの力学的性質の遷移現象について「材料」第19巻, 第200号, 昭和45年5月
- 2) 小柳 治, 六郷恵哲, 鄭 貴斗: 土木学会第28回学術講演概要集V-83
- 3) 木山英郎, 西林新蔵: コンクリートの破壊前後の応力一ひずみ挙動, 土木学会論文報告集, 第240号・1975年8月