

立命館大学 正員 尼崎 省二

1 まえがき

近年、高強度コンクリートに関心が高まり、コンクリートパイルをはじめとして工場製品には圧縮強度500 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 以上の高強度コンクリートがさかんに使用されるようになってきているが、主として衝撃荷重を受けるコンクリート構造物では静的圧縮強度がいかに増加しても衝撃強度あるいは衝撃疲労強度が増加しなくては、高強度コンクリートを使用する意義が薄れてしまう。しかしながら、コンクリートとくに高強度コンクリートの衝撃疲労強度に関する研究は内外ともあまりなされていないのが現状である。

高強度コンクリートは、従来、特殊養生をするなどの方法により製造されてきたが、最近開発された高強度コンクリート用減水剤を用いることにより標準養生だけで容易に高強度コンクリートを製造することができるようになった。本研究はこの高強度コンクリート用減水剤を用いて作った高強度コンクリートと普通コンクリートについて衝撃疲労試験を行ない、それぞれのコンクリートの衝撃疲労強度および疲労過程について比較検討したものである。なお、本研究に対して昭和49年度吉田研究奨励金を授与されたことに深く感謝の意を表します。

2 実験方法

実験は、試験時(表1)の圧縮強度が500 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 以上の高強度コンクリート5種類と300および400 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 前後の普通コンクリート2種類の計7シリーズのコンクリートについて、その静的圧縮強度の60, 70, 80および90%の繰返し衝撃応力を用いて行なった。これらのコンクリートの配合および物理特性を表-1

表-1

Specific Mix

Series	M.S. (mm)	SL (cm)	C ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	W ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	W/C (%)	S/a (%)	S ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	G ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	WRA ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	Note
A	13	7.5 $\pm$	284	192	67.5	58.0	1014	764	---	---
B	13	7.5 $\pm$	394	202	51.5	55.0	890	780	---	---
C	13	7.5 $\pm$	628	218	52.2	52.2	722	717	---	---
D	13	7.5 $\pm$	600	153	25.5	46.0	744	918	14.4	MT-150
E	13	7.5 $\pm$	600	153	25.5	46.0	744	918	15.0	NL-1400
F	13	10 $\pm$	628	218	34.7	52.2	722	717	3.8	A.L.C
G	13	10 $\pm$	628	218	34.7	52.2	714	701	7.6	Fiber

および2に示す。このうち、DおよびEシリーズのコンクリートは高強度コンクリート用減水剤MT-150およびNL-1400を用い、FおよびGシリーズは、後述するように高強度コンクリートの低衝撃強度性と補強する

表-2 Property of concrete

Series	Compressive Strength ($\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$)		Tensile Strength ($\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$)		Pulse Velocity (m/sec)	Dynamic Modulus of Elasticity ($\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$)
	28 days	at test	Split	Pure		
A	214	283	25.4	26.1	3.996	346 800
B	348	429	27.1	32.3	4.364	430 400
C	539	575	33.9	34.7	4.358	434 300
D	616	839	48.9	45.9	4.732	540 200
E	635	698	36.8	42.3	4.633	511 700
F	509	574	43.0	38.1	3.921	334 300
G	554	652	50.2	32.6	4.375	454 300

目的でCシリーズの配合をもとにして、オートクレープ養生および鋼繊維補強をしたものである。使用した鋼繊維は直径0.3mm、アスペクト比66.7のステンレス鋼で、その引張強度は78.5 $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$ で、使用量は1.25%(容積比)である。なお、FおよびGシリーズではワーカビリティをよくするためにMT-150を用いた。表-2の純引張強度は10 $\times$ 10 $\times$ 19cmの角柱供試体の両端に厚さ2cmの鉄板を貼りつけて引張試験をしたもので、動弾性係数はポアソン比を1/6と仮定して、超音波パルスの伝播速度から計算したものである。

使用材料は、セメントが普通ポルトランドセメント、細粗骨材はそれぞれ桂川産川砂および高純度の硬質砂岩碎石を用いたが、DおよびEシリーズでは700 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 以上の圧縮強度を期待して桂川産よりも比重の大きい徳知川産川砂を用いた。衝撃試験用供試体は ϕ 75 $\times$ 15cmの内柱供試体の上下部に5mmの面取りを施し、さらに厚さ0.8mm、幅20mmの鋼製バンドを取りつけたものを用い、その上面はコンクリート地肌のまま仕上げた。養生は表令28日までの標準養生後、試験時表令まで20 $\pm$ 3 $^{\circ}\text{C}$ 、50 $\pm$ 5%RHの空中養生とした。なお、Fシリーズのコンクリートは前養生3日のうちYコンクリート工業においてオートクレープ養生を行ない、以後は空中養生とした。

衝撃試験は、エンドレスチェーンで重錘(W=40kg)を2m以下の任意の高さまで引上げて自然落下させる方法を用いたが、供試体下部にのみ厚さ2cm、弾性係数6000 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ のクッション材(合成樹脂)を配置し、上部にはクッション材は配置せず重錘による直接打撃とした。

繰返し衝撃応力によるコンクリートの疲労の進行状態測定は、適当な衝撃回数毎に供試体の長さ方向の超音波

パルス速度の速度変化を調べる方法を用いた。また、コンクリート内部の微小ひびわれの発達状況は、AおよびBシリーズの応力比70%について、超音波パルス速度が大きく変化する衝撃回数で供試体を切断し、染色剤としてNL-1400を用いて微小ひびわれを観察することにより調べた。なお、ポイントひびわれおよび貫状ひびわれの観察の対象とした貫状ひびわれは12mm以上の貫状で、直径3mmの被測定円を5倍にして観察を行なった。

3 実験結果および考察

(1) 衝撃疲労強度について 衝撃疲労試験は最大繰返し回数を2000回としたが、Aシリーズの応力比60%を除いて、全ての応力比で2000回打撃までに供試体は破壊した。各応力比の平均繰返し回数 $\bar{N}$ は、(計算方法の詳細は土木学会論文報告集第277号に発表しております)、2000回打撃までに全供試体が破壊した応力比については、順序統計量の理論を用い、Aシリーズの応力比60%については最良線形推定量に関する理論を用いて計算した。各供試体の生存確率 P と繰返し回数 N との関係を対数正規分布率紙上にプロットした一例を図-1に、また各シリーズの応力比 S と平均繰返し回数 $\bar{N}$ との関係を図-2および表-3に示す。図-1および S の関係はいずれも最小自乗法により直線近似したものであるが、図-1から、高強度コンクリートの衝撃疲労強度は普通コンクリートの場合と同様対数正規分布にしたがうことが認められる。

図-2および表-3から、圧縮強度に対する衝撃応力の比を一定にした場合の高強度コンクリート(C, DおよびEシリーズ)の衝撃疲労強度は普通コンクリート(A, Bシリーズ)の場合に比べて非常に低く、またA~Eシリーズに於いて、シリーズ毎の比較をすると、圧縮強度が増大するにしたがい順次衝撃疲労強度が小さくなっていることがわかる。一方、FおよびGシリーズでは、両者の衝撃疲労強度はほぼ

同じであるが、Fシリーズの方がわずかに大きく、配合および圧縮強度のあまりかわらないCシリーズと比較すると約5倍の大きさにもなっており、オートクレープ養生および鋼繊維補強が衝撃疲労強度の改善に非常に有効であることがわかる。衝撃疲労強度と脆度係数 α_c/σ_t (表-4)との関係をみると、

衝撃疲労強度はほぼ脆度係数の小さいほど大きくなっており、引張強度とくに引張強さ係数が増加しなければ、圧縮強度が非常に大きくなってでも衝撃疲労強度は増加しないことがわかる。一方、衝撃応力の圧縮強度に対する比を一定にせずに、一定の衝撃応力、たとえば500kg/cm²の衝撃応力で衝撃疲労試験を行なった場合の平均繰返し回数を図-2から得られる S - $\bar{N}$ 関係の内挿により求めると、表-5のようになる。この場合、A, B両シリーズのコンクリートは一回の打撃で破壊してしまい、また高強度コンクリート

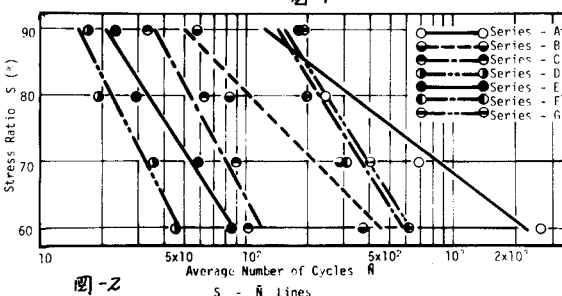
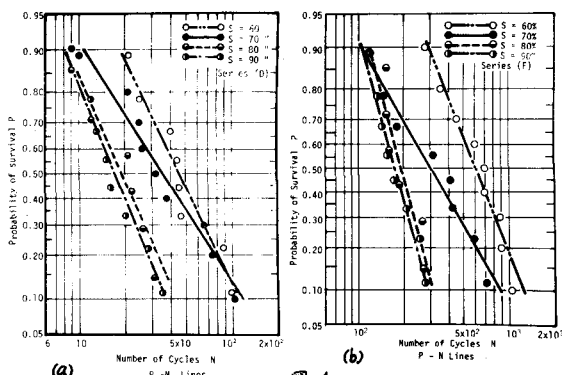


表-5 Number of Cycles $\bar{N}$ at Impact Stress $\sigma = 500 \text{ kg/cm}^2$

Series	Comp. Strength (kg/cm ²)	Stress Level (%)	Number of Cycles $\bar{N}$
A	283	-	-
B	429	-	-
C	575	87.0	41
D	839	59.6	48
E	698	71.6	50
F	575	87.0	163
G	652	76.7	286

表-4 σ_c / σ_t 表-3 Static Strength and Average Number of Cycles (N) to Failure

Series	Split test	Pure test
A	11.1	10.8
B	15.8	13.3
C	16.9	16.6
D	17.2	18.3
E	19.0	16.5
F	13.4	15.1
G	13.0	20.0

Series	Comp. Strength (kg/cm ²)	Stress Level (%)			
		60	70	80	90
A	283	2628	680	241	190
B	429	369	281	82	57
C	575	102	88	62	34
D	839	45	35	19	17
E	698	84	58	29	24
F	574	611	305	194	178
G	652	608	394	194	189

表-6 Property of concrete

Series	Comp. Strength (kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)	Young's Modulus (kg/cm ²)	Dynamic Modulus of Elasticity (kg/cm ²)
PL	764	40.3	338 000	406 500
NL	829	55.6	383 000	434 200
MT	970	56.3	428 000	488 100

表-6 Static Strength and Average Number of Cycles to Failure

Series	Comp. Strength (kg/cm ²)	Stress Ratio (%)	Average Number $\bar{N}$
PL	764	70	250
		80	95
		90	61
NL	829	70	112
		80	101
		90	38
MT	970	70	125
		80	65
		90	56

表-7

も平均繰返回数はあまり小さくならないことがわかる。

本実験では、表-6に示す強度のコンクリートについて、供試体上部に下部クッションと同材料で厚さ4cmのクッションを配置した場合についても実験を行なったが、その結果を表-7に示す。表-7の結果とD、Eシリーズの結果とを比較すると、DおよびEシリーズの圧縮強度よりも大きな圧縮強度であるにもかかわらず、平均繰返回数は3~4倍になっており、クッション材の使用が非常に有効であることがわかる。

衝撃疲労試験における破壊には種々の形態があり、的確に定義することは困難であったが、その代表的破壊例を写真-1に示し、各シリーズ毎の分類を表-8に示す。表-8から、 σ/σ_c および σ/σ_{c0} を除き、圧縮強度が大きくなるほど、軸方向引張応力によるとみられる縦割れおよび縦横割れ破壊の割合が大きくなる傾向にあることがわかる。

表-8

Classification of Mode of Failure (?)

Mode of Failure	Series						
	A	B	C	D	E	F	G
軸割れ破壊	33	52	65	64	40	20	8
縦割れ破壊	19	31	21	14	24	47	68
縦横割れ破壊	4	13	7	5	18	17	5
斜割れ破壊	4	0	0	0	0	0	0
バット破壊	7	0	7	17	18	8	11
剪断破壊	11	0	0	0	0	8	8
剥離破壊	7	0	0	0	0	0	0
その他	15	0	0	0	0	0	0
Total	100	100	100	100	100	100	100

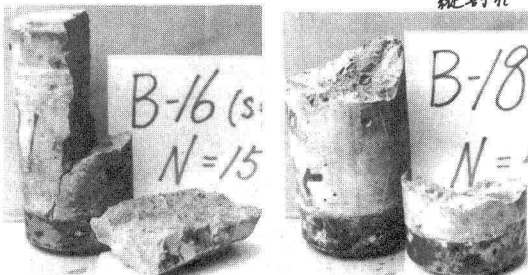


クッション材使用供試体の破壊

縦割れ

(2) 衝撃回数と超音波パルスの伝播速度について

適当な衝撃回数での超音波パルス伝播速度 V と衝撃前の伝播速度 V_0 との比 V/V_0 の繰返し衝撃による変化の状況を一例を図-3および表-4に示す。これらの結果から、伝播速度比 V/V_0 は初期の衝撃で低下し、いったんほぼ一定あるいはゆるやかな低下を保った後、急激な低下を生じて供試体は破壊に至っていることがわかる。この場合、A~Eシリーズでは初期衝撃による低下後もゆるやかな低下と続けて破壊に至るものが多いが、FおよびGシリーズと上部にクッション材を配置したものは初期の低下後はほぼ一定になるものが多くみられた。一方、応力比による伝播速度比の変化をみると、応力比が大きいかほど初期の低下およびその後の低下の割合も大きくなる傾向がみられた。



縦横割れ

写真-1

縦割れ

(3) 内部ひびわれについて 超音波パルスの伝播速度比の変化と内部微小ひびわれの発達との関係を見るために、AおよびBシリーズの応力比70%について伝播速度比が大きく変化する衝撃回数で内部微小ひびわれの観察を行なったが、破壊回数と100として伝播速度比の変化をみると、A、B両シリーズとも繰返し回数20および60~80のところに大きな変化が生じており、これらの繰返し回数のところと疲労度 R_1 および R_2 と定義し、また無衝撃時および破壊直前と疲労度 R_0 および R_3 と定義した。そして縦軸に疲労度 R_1 、 R_2 および R_3 ととり、縦軸に図-5に示す式で算出したラック係数の平均値を示すと図-5のようになる。内部ひびわれの検査をした供試体数は少ないが、図-3あるいは4と図-5の相似性から、衝撃による疲労過程は内部ひびわれの発達過程であると考えられることのできる。

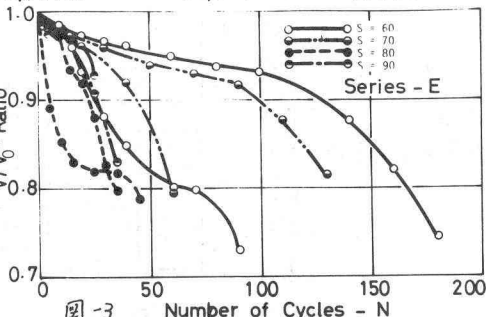


図-3 Number of Cycles - N

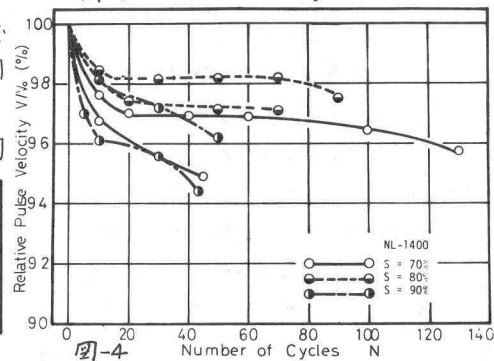


図-4

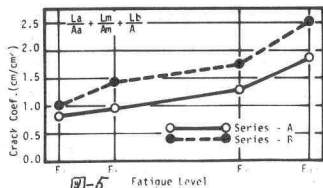


図-5