

コンクリートの衝撃疲労強度に関する研究

A STUDY ON IMPACT FATIGUE STRENGTH OF CONCRETE

尼崎 省二*・明石外世樹**・竹内 正喜***・桂木 正雄****
By Syoji Amasaki, Toyoki Akashi, Masaki Takeuchi and Masao Katsuragi

1. ま え が き

コンクリート杭、矢板などを打撃力によって打込むとき、杭本体内に打撃力による衝撃応力波が発生し、打撃の繰返しによる疲労のために、杭コンクリートの静的圧縮強度以下の応力でコンクリートは破壊する。しかしながら、コンクリートの衝撃疲労強度、および連続衝撃がコンクリートの性状におよぼす影響については不明な点が数多く残されており、内外ともあまり研究されていないのが現状である。

本研究は衝撃応力波の波高値を一定にして波形を変えたとき、すなわち弾性係数の異なったクッションを介してコンクリートを打撃したとき、コンクリートの衝撃疲労強度がいかに変化するか、また衝撃による疲労過程がいかに進展するかを調べるとともに、衝撃時のコンクリートの乾湿状態によってコンクリートの衝撃疲労強度および疲労過程がいかに進展するかを調べたものである。

2. コンクリートの衝撃疲労に関する従来の研究

(1) 衝撃疲労強度に関する研究

衝撃疲労強度については、オーストラリアの P C 杭打込み作業標準¹⁾によれば、杭頭部の許容圧縮応力 σ とし

$$\sigma = \frac{K \cdot \sigma_c}{S} - P = \frac{0.75 \cdot \sigma_c}{1.25} - P \dots\dots\dots (1)$$

を与えている。ここに、 σ_c : コンクリートの円柱供試体 ($\phi 15$ cm) の最小強度、 S : 安全率、 P : 杭打込み時の有効プレストレス、 K はコンクリートの衝撃疲労強度と

σ_c との比で、特に利用できる資料がないときは 0.75 としている。しかし、この値は粗骨材の形状や表面組織、コンクリートの乾湿などによって異なることは、すでに二、三の研究者が指摘しているところである^{2), 3), 4)}。

Glanville ら⁵⁾ は、 $10 \times 10 \times 40$ cm の角柱供試体について実験し、衝撃疲労強度は静的立方体強度の 50~80 % であると発表している。

Sandhu²⁾ は粗骨材、材令および配合比などを変化させて合計で 23 種類のコンクリートについて、6 in 立方供試体を用いて実験し、静的圧縮強度が約 525 kg/cm² 以上になると衝撃疲労強度は急激に増加し、また材令 90 日のものは 28 日のものに比べて約 2 倍の衝撃疲労強度を有すると発表している。また、Green³⁾ は振子式の衝撃試験機を考案して、4 in 立方供試体について実験し、コンクリートの衝撃疲労強度は圧縮強度の増加により増大するが、衝撃疲労強度と圧縮強度との関係は粗骨材の種類および養生方法によって異なり、また水中養生供試体は空中養生供試体に比較して衝撃疲労強度は小さいが、ひびわれが発生してから破壊にいたるまでの衝撃回数も少ないとしている。

しかしながら、Sandhu および Green らの実験はいずれも局部的衝撃を加えている点および衝撃回数が少ないという点でコンクリートの衝撃疲労特性を考える上で問題が多い。

コンクリートポールパイル協会では、コンクリートの衝撃疲労強度、および衝撃試験後の残存強度について、 $\phi 7.5 \times 15$ cm の円柱供試体を用いて供試体全断面に衝撃荷重を加える実験を行ない、次のような結論を得ている⁶⁾。衝撃応力が大きくなると、材令が影響し長期材令ほど衝撃破壊回数は大きくなる。水中養生 21 日後 7 日間乾燥させた供試体と 28 日間水中養生を行ない湿潤状態のまままで衝撃試験をした供試体では、後者は約 1/5 の衝撃疲労強度しか有しない。またセメント量が多く高強度コンクリートの衝撃疲労強度は衝撃応力を静的強度に対す

* 正会員 工修 立命館大学助手 理工学部土木工学科
** 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科
*** 正会員 工修 ビーシー橋梁株式会社
**** 正会員 工修 アサノポール株式会社

る一定比率にとれば低強度コンクリートよりも小さい。

以上が内外で行なわれた衝撃疲労強度に関するおもな研究例である。

(2) コンクリートの衝撃疲労過程に関する研究

衝撃疲労によるコンクリート供試体の内部組織の変化、さらには破壊の機構についてはその研究例は少なく、Sandhu²⁾ および Green³⁾ などがわずかに外観的破壊過程について述べているにすぎない。

衝撃疲労破壊の機構については、いまだに明確ではないが、コンクリートの破壊機構については古くから研究がなされており、Hsu らは破壊機構をコンクリート内部に発生するひびわれの発達と直接関連された研究を行っている⁷⁾。

コンクリート内部のひびわれには、粗骨材とモルタルとの境界面に無載荷状態ですでに存在しているポンドクラック、モルタル部分に発生するモルタルクラックおよび粗骨材中に発生する骨材クラックなどがあげられる。また、これらのひびわれは巨視的ひびわれ、準巨視的ひびわれおよび微視的ひびわれに分類され、コンクリートの破壊に大きな影響をもつのは準巨視的ひびわれであると考えられている⁸⁾。この準巨視的ひびわれを本報告では微小ひびわれと呼ぶことにする。

微小ひびわれの観察結果を表現する方法は研究者によって異なり、被測定面積内の全ひびわれ長さであらわしたものや⁹⁾、全骨材周長 (l_0) とポンドクラック全長 (l) との比であらわしたものなどがある^{7), 8)}。また、Krishnaswamy¹⁰⁾ は微小ひびわれ長さを単位面積当りの値であらわしており、長さのほかに最大ひびわれ幅も測定している。

一方、同一条件のもとで一定応力振幅を受けて疲労破壊するまでの繰返し回数が大ききばらつくことは古くから知られており、この性質が疲労破壊の本質的、基本的性質であることは金属材料の疲労特性に関する研究から明らかになっており、この統計的現象はコンクリートについてもあてはまるといわれている¹¹⁾。

阪田らは¹²⁾、コンクリートの圧縮疲労特性に関する研究に統計的手法をとり入れて、一定応力比におけるコンクリートの疲労寿命は対数正規分布にしたがい、コンクリートの疲労破壊現象は金属材料と岩石のその中間的様相を示すと述べている。

3. 実験の概要

(1) 使用材料

実験に用いたコンクリートは、材令 28 日の圧縮強度

Table 1 Specific Mix

Mixing	M.S. (mm)	SL (cm)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	W/C (%)	S/a (%)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)
A	10	5±1	376	179	47.6	54	993	847
B	10	5±1	450	178	39.6	53	944	839
C	10	5±1	500	177	35.4	53	922	821

が 350, 450 および 550 kg/cm² を目標としたもので、その配合を Table 1 に示す。セメントは小野田社製普通ポルトランドセメントで、骨材は細粗骨材とも徳島県那賀川産で細骨材は比重: 2.61, 吸水量: 1.56%, 粗骨材は最大寸法 10 mm で比重: 2.61, 吸水量: 1.58% である。なお、細骨材は 0.6, 1.2 および 5 mm ふるいでふるいわけ、0~0.6 mm を 50%, 0.6~1.2 mm を 20%, 1.2~5 mm を 30% と粒度調整を行ない、F.M. = 2.73 とした。粗骨材は 5 mm ふるいでふるいわけをして使用した。

(2) 供試体

供試体は直径 7.5 cm, 高さ 15 cm の円柱供試体の上下部に 5 mm の面取りをし、さらに頭部破損を防止するために厚さ 0.8 mm, 幅 20 mm の鋼製バンドを取付けてあり、供試体上面はコンクリート打込み後約 5 時間でコンクリート地肌のまま仕上げた。なお、製作にあたっては骨材はすべて表乾状態とし、打込み温度は 20~23°C であった。

(3) 養生方法

異なったクッション材によるコンクリートの衝撃疲労強度の変化を調べる実験(以下これを実験①と呼ぶ)に用いた供試体は Table 1 の配合 A, B, C により作製し、養生は各配合について、水中養生(20±3°C)を 7 日および 28 日とし、以後試験日までの 22 日間は空中養生(20±3°C, 50±5% R.H.)とした。

コンクリートの乾湿状態が衝撃疲労強度に与える影響を調べる実験(以下これを実験②と呼ぶ)に用いた供試体の配合は配合 B を用い、衝撃試験開始まで次の 3 種の養生を行なった。

養生 A: 脱型後 28 日まで水中養生(20±3°C)とし、以後空中保存(20±3°C, 50±5% P.H.)。

養生 B: 養生 A の供試体を試験前 3 日間だけ水に浸漬。

養生 C: 脱型後、試験開始直前まで水中養生をし、衝撃試験中も供試体が乾燥しないように湿布で包んである。これは養生 B についても同じである。

なお、実験②に用いた供試体の材令は圧縮強度の安定したと思われる約 0.5~2 年である。

(4) 衝撃試験機および衝撃応力波

衝撃試験機はページの衝撃試験機に似た機構を有しており、エンドレスチェーンで重錘(40 kg)を200 cm以下の任意の高さまで引き上げ自然落下させるもので、

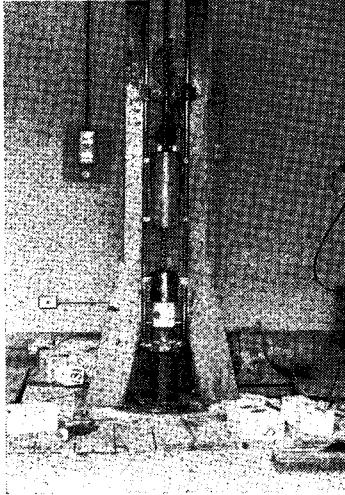


Photo 1 衝撃試験機

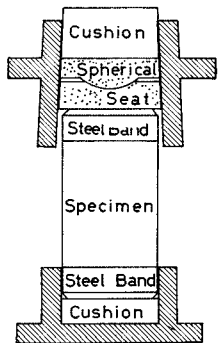


Fig. 1

Fig. 1のような供試体設置で衝撃試験をすると、衝撃応力波は Photo 2 のようになり、実際の杭打ちで発生する応力波形とは異なったものとなる。すなわち、実際の杭打ちでは、杭先端からの反射波が先端地盤の条件によって圧縮あるいは引張り

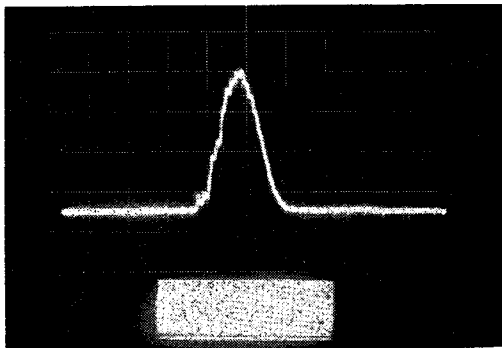


Photo 2 応力波形

Photo 1 にその外観を示す。

供試体設置部を拡大すると、Fig. 1 のようになり、クッション材を供試体上下部に配置している。下部クッションは合成樹脂(商品名ホスターレン)で弾性係数 6000 kg/cm^2 、厚さ 2 cm である。上部クッションとしては、実験①では、合成ゴム、ホスターレンおよび樫の3種を用い、実験②ではホスターレンのみとした。なお、実験①では上部クッションのない場合も衝撃試験を行なった。これらクッション材の弾性係数は、それぞれ 1500 、 1600 および 50000 kg/cm^2 で、厚さはいずれも 4 cm とした。

Fig. 1 のような供試体設置で衝撃試験をすると、衝撃応力波は Photo 2 のようになり、

もなるが、本実験のように供試体が短い場合には圧縮のみとなる。

Photo 2 の応力波形は、供試体中央部にその面の平均縦ひずみを得るように直角4方向にひずみゲージを貼り、直並列結線をしてブリッジ回路の一边として、ブリッジには直流電池電圧(3 V)を印加してひずみ変化によるブリッジ出力を高利得プリアンプを通じて、シンクロスコープに映像させたものである。

(5) 繰返し衝撃応力

繰返し衝撃応力は同一バッチ、同一養生の供試体(29~30個)から6~5個の静的強度を求め、その平均強度の70、80および90%が得られるように重錘の落高を決定した(実験②では70および80%のみである)。

なお、重錘の落高と衝撃応力との関係は水セメント比50%の1:2モルタルの供試体に半導体ゲージを貼布し、実験に用いた各クッションについてそれぞれ Fig. 2 に示すような関係をあらかじめ求めておき、これを用いて落高を決める。この場合、衝撃応力はモルタル供試体の動弾性係数から求めたものである。Fig. 2 の関係を得るのにモルタル供試体を用いたのは、半導体ゲージのゲージ長が短く、コンクリート供試体の場合の粗骨材の影響を除くためである。

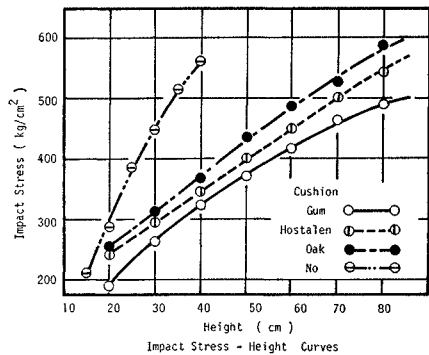


Fig. 2

(6) 衝撃疲労度の測定

衝撃によるコンクリートの疲労過程の進行状態測定は超音波パルス速度の測定によった。すなわち、供試体が疲労し、内部にひびわれなどが生じると見掛けの伝播速度が遅くなり、また波長の短いものが透過しにくくなるからである。

本実験では、適当な衝撃回数ごとに超音波パルス速度試験を行なった。超音波パルスの伝播方向は供試体の長さ方向で、発受振子には 100 kHz のチタン酸バリウム磁器のランジュバン型を使用した。

(7) 微小ひびわれの測定

繰返し衝撃による微小ひびわれの発達状況を調べるために、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ダイヤモンドカッターで切断し、検査面を砥石でみがいてから約 20 分間水洗いした後、これを乾燥させ次の要領でひびわれを測定した。

検査面に水で 20 倍に稀釈したコンクリート用蛍光探傷剤をふきつける。液が乾燥した後、検査面をハケで種々の方向からぬぐい、余分の探傷剤を取り除く。検査面を紫外線探傷灯で照射して肉眼で観察した後、この状態で写真撮影を行ない、ネガフィルムを精密投影機で 10 倍に拡大してひびわれ図を作る。検査面中央に直径 3 cm の円を描き、その円内についてクラック係数 C_r を次の式で求めた。

$$C_r = \frac{L}{A} \text{ (cm/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 L ：測定円内の全ひびわれ長 (cm)、 A ：被測定円の面積 (cm²)。なお、ひびわれ長の測定にはボンドクラックやモルタルクラックの区別はつけていない。

4. 実験結果および考察

(1) 静的強度

コンクリート供試体の製作は、実験①については静的圧縮試験用に 5~6 本、衝撃試験用に各応力比 (70, 80, 90%) とも 8 本の計 29~30 本の供試体を 1 組して行ない、総本数はゴムクッションの 2 組を除いて 655 本 (22 組) である。Table 2 に衝撃試験前に行なった静的圧縮強度試験結果および破壊までの衝撃回数を示す。衝撃試験はこの平均圧縮強度の 70, 80 および 90% の衝撃応力が生じるように、Fig. 2 から重錘の落高を決定し

Table 2 Static Strength and Average Number of Cycles (\bar{N}) to Failure Experiment (1)

Cushion	Mixing	Water Curing; 7 days				Water Curing; 28 days			
		Comp. Strength	Stress Level (%)			Comp. Strength	Stress Level (%)		
			70	80	90		70	80	90
Gum	A	409	3 650	520	149	420	2 565	1 121	73
	B	431	(2 000)	894	98	542	346	118	97
Hostalen	A	429	2 199	1 566	548	411	986	236	74
	B	507	1 396	156	45	509	(2 000)	222	148
	C	533	2 727	352	65	506	3 914	1 051	897
Oak	A	396	2 090	865	547	461	325	117	68
	B	493	252	99	97	511	496	274	121
	C	478	1 822	98	47	512	2 868	579	534
No	A	400	436	212	185	508	439	253	90
	B	541	575	239	132	609	123	80	33
	C	584	215	153	74	614	138	95	71

Table 3 Static Strength and Average Number of Cycles (\bar{N}) to Failure, Experiment (2)

Mixing	Batch	Comp. Strength (kg/cm ²)	Stress Level			
			70%		80%	
			Impact Stress	Repeat Number	Impact Stress	Repeat Number
A	(D)	550	385	(2 000)	440	1 444
	(F)	600	420		480	
	(G)	600	420		480	
B	(D)	500	350	1 632	400	904
	(F)	540	378		432	
	(G)	550	385		440	
C	(E)	610	427	668	448	216

た。

実験②は配合 B の供試体について行なったが、各養生方法による平均圧縮強度および破壊までの衝撃回数を Table 3 に示す。ここで、バッチ (D) および (E) は試験材令が 26~27 カ月であり、バッチ (F) および (G) は 3~4 カ月である。なお、実験②では、衝撃応力は各バッチの平均強度に対する応力比 (70, 80%) が得られるようにした。

なお、一口に破壊といってもその状態はいろいろあり、破壊を定義するのは困難をきわめたが、一般に供試体が次の状態になったとき破壊とみなした。

- ① 完全に爆裂的現象を示したとき (爆裂破壊)
- ② 頭部が破損して衝撃を加えるごとに、粉末が飛散する状態になったとき (頭部破壊)
- ③ 供試体が縦あるいは横方向に割れたとき (ひびわれ破壊)

しかしながら、これらは実験者の主観によるところが大きいために、的確な破壊時を決めることは至難であり、また破壊とみなしたもので必ずしも全部がこれ以上の衝撃を与えることは不可能であるという状態でないことに注意しなくてはならない。

(2) 衝撃疲労強度

実験①における実験結果から、2 000 回打撃までに全供試体が破壊した応力階について、各応力階 (S) における破壊までの繰返し回数 (衝撃疲労強度 N) の分布から、順序統計量の理論を用いて生存確率 $P(P=1-r/(n+1))$ 、ただし n は各応力階での供試体数、 r は破壊回数的小さいほうからの順位) を求め、 P と N との関係を対数正規確率紙上にプロットしたものを Fig. 3 に示す。Fig. 3 から、いずれの応力階もほぼ直線に近似することができ、コンクリートの衝撃疲

疲労強度は対数正規分布にしたがうことが認められる。

したがって、2000 回打撃で全供試体が破壊した応力階の平均繰返し回数 (\bar{N}) は $P-N$ の帰線直線を最小自乗法により求め、 $P=50\%$ となるときに繰返し回数を計算すればよい。

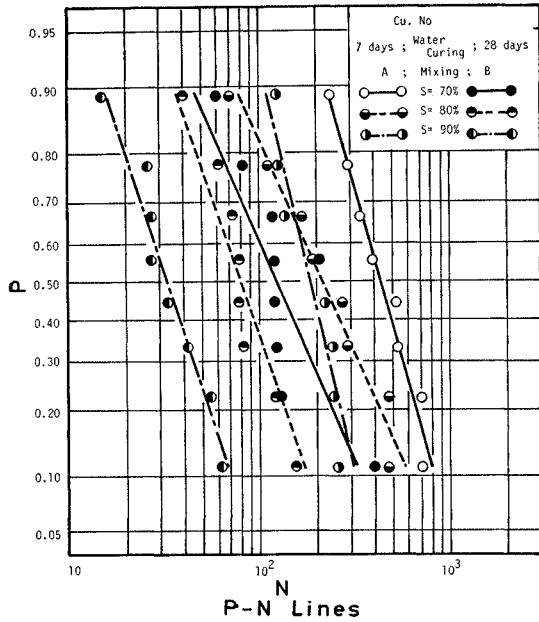


Fig. 3

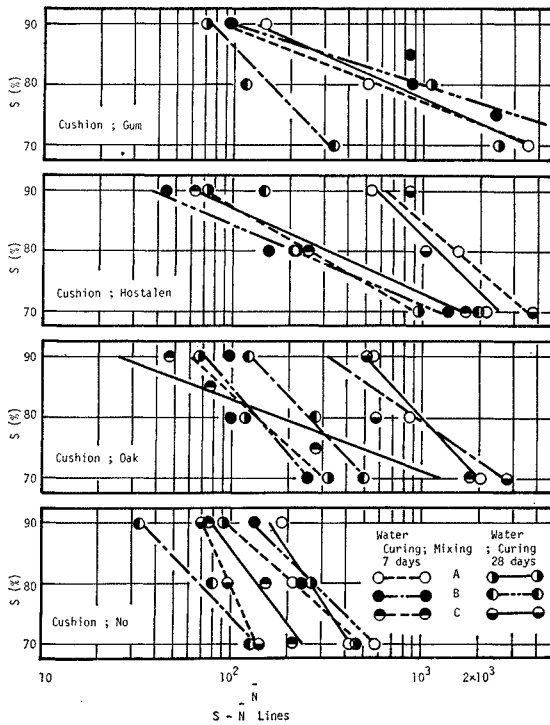


Fig. 4

2000 回打撃によっても破壊しなかった供試体を含む応力階については、2000 回打撃で破壊しなかったものも、2000 回以下の打撃で破壊したものと同一確率分布にしたがって破壊するものであって、たまたま 2000 回打撃でも破壊しなかっただけであると仮定して、成岡らが提案した対数正規分布における最良線形推定量に関する数表¹³⁾を用いてその応力階における平均繰返し回数を推定した。

Table 2 に各応力階における平均繰返し回数 (\bar{N}) を示し、Fig. 4 に平均繰返し回数と応力階との関係を示す。Fig. 4 の $S-\bar{N}$ 関係はこれを直線で近似して最小自乗法により求めたものである。なお、Table 2 の (2000) は全供試体が 2000 回打撃によっても破壊しなかったことを示す。また、Fig. 4 のクッション; ゴムおよび樫からわかるように、水中養生 7 日でそれぞれ配合 B および C については応力階 75 および 85% についても衝撃試験を行なった。

実験②の結果についても、上述の方法とまったく同一方法を用いて、各養生方法における各応力階の平均繰返し回数を算出し、その結果を Table 3 に示す。

なお、本実験で衝撃回数を 2000 回で打ち切ったのは、この回数は実際のコンクリート杭を施工する場合、2000 回の打撃で中間層を打ち貫けるものであると仮定したためである。

a) 養生方法および乾湿の影響

Fig. 4 により、養生方法による衝撃疲労強度の差について調べると、水中養生 7 日の供試体のそれが 28 日養生供試体のそれと比較して大きくなったり、小さくなったりしており、養生方法が衝撃疲労強度に与える影響は明らかにはならなかった。本実験では、いずれの供試体も水中養生後 22 日の空中保存期間があり、衝撃試験時の供試体はいずれも同程度に乾燥しており、コンクリートの特性に大きな差が生じなかったためと思われる。その一例として水中養生期間の相違による圧縮強度の差を調べると、Table 4 に示すように、有意水準 5% の検定で圧縮強度に差が認められるのはわずかしかない。

一方、実験②では、同じ養生方法でも衝撃試験前 3 日間だけ水に浸漬した養生 B の供試体が浸漬しない養生 A よりも衝撃疲労強度は小さく、また衝撃試験時まで水中養生を行ない湿潤状態のまま試験した養生 C よりも大きくなっている。コンクリートの乾湿状態は、また供試体の破壊形式にも影響を与え、養生 A の供試体の多くは大きなひびわれが発生するのに対して、養生 C ではほとんど爆裂的破壊を示した。Green¹⁴⁾ は水中養生供試体はいったんひびわれが発生すると数回の打撃で破壊することを指摘しているが、彼の実験が

Table 4 Test of Difference between 7 days and 28 days in Strength

Cushion Mixing	Test of Variance			Test of Difference					
	Test Criterion	F Distribution	Significant	Aver. Strength		Test Criterion	T Distribution	Significant	
				7 days	28 days				
Gum	A	21.7	7.15	Yes	409	420	0.259	2.365	No
	B	1.08	7.39	No	431	542	2.846	2.262	Yes
Hostalen	A	3.72	7.15	No	429	411	0.615	2.228	No
	B	3.33	7.15	No	507	509	0.076	2.228	No
	C	2.15	7.15	No	533	506	0.771	2.228	No
Oak	A	4.43	7.15	No	396	461	2.425	2.228	Yes
	B	7.30	7.39	No	493	511	0.563	2.262	No
	C	6.07	9.36	No	478	512	1.063	2.262	No
No	A	1.44	9.36	No	400	508	4.654	2.226	Yes
	B	1.31	9.36	No	541	609	4.242	2.262	Yes
	C	1.47	9.36	No	584	614	0.869	2.262	No

水中養生後ただちになされたものならば、これを裏付けたものである。逆に空中養生供試体は破壊までの十分早い回数からひびわれの兆候がみられたが、なおかなりの繰返し衝撃に耐えた。Green は、またひびわれ発生までの衝撃回数は空中養生よりもむしろ水中養生供試体のほうが大であると報告しているが、本実験のように圧縮強度に対する衝撃応力の比を一定にすると、逆の結果になっている。

圧縮強度に対する衝撃応力の比が一定でも、湿ったコンクリートほど衝撃疲労強度が劣るのは、衝撃荷重によってコンクリート中の自由水が圧縮され、これが原因で微小ひびわれの助成をうながすためと推察される。

以上から、圧縮強度が安定したと思われる材令で、しかも衝撃時に十分乾燥しているならば、水中養生の長短によって衝撃疲労強度に大きな差はなく、むしろ衝撃時のコンクリートの乾湿状態が衝撃疲労強度に影響をおよぼすものと考えられる。

なお、Table 4 は実験値から求めた F 値 (Test Criterion) が有意水準 5% で F -分布表から得た F 値よりも小さければ、2 組の測定値は同一母集団に属している (有意差なし, No.) とする。そして、それぞれの平均値の差の検定を t 分布により行ない、実験値から求めた t 値 (Test Criterion) が t 分布表から得た t 値よりも小さければ、2 つの平均値には有意な差がない (No.) としたものである。

b) 圧縮強度の影響

実験①では、コンクリートの圧縮強度が衝撃疲労強度におよぼす影響を調べるために 3 種類の配合を用いたが、いずれのクッション材の場合も配合 B と C との圧縮強度には有意水準 5% の検定で有意な差は生じなかった。そのため圧縮強度が衝撃疲労強度におよぼす影響は明らかにはならなかったが、配合 B と

C とではいずれのクッション材の場合も富配合 (配合 C) のほうが衝撃疲労強度は大きくなる傾向にある。一方、配合 A の圧縮強度はほかの配合のそれよりもほぼ 100 kg/cm^2 程度低くなっているが (Table 2 参照)、衝撃疲労強度は水中養生 7 日の場合には配合 B, C よりも大きく、水中養生 28 日では逆に小さくなっている。すなわち、本実験のみでは 450 kg/cm^2

前後の圧縮強度を有するコンクリートの場合、衝撃疲労強度に影響するのは圧縮強度なのか、あるいは養生方法なのかは明らかにはならなかった。これらの問題については、今後の研究にまきたい。

c) クッション材の影響

クッション材の相違が衝撃疲労強度に与える影響は、Fig. 4 からわかるように、応力階が大きくなるにしたがい、配合および養生によるばらつきが大きく一定の関係は生じていないが、応力階 70% になると若干の例外を除いてクッション材の弾性係数が大きくなるにしたがい衝撃疲労強度は小さくなる傾向にあり、クッション材のない場合が最も小さくなっている。

(3) 静的特性の変化

衝撃荷重によってコンクリートの静的特性がいかに変化するかを調べるために、実験①で配合 A、水中養生 7 日の供試体を用いて、適当打撃回数ごとに衝撃試験を中止して静的試験を行ない、応力-ひずみ曲線を求めた。その応力-ひずみ曲線の一例を Fig. 5 に示し、これらの応力-ひずみ曲線から求めた割線弾性係数 $E_{1/3}$ -打撃回数関係を Fig. 6 に示す。

Fig. 5 から衝撃荷重を受けたコンクリートの応力-ひずみ曲線は、上に凸な状態から繰返し回数の増加につれて直線上になり、さらに繰返し回数が増加すると S 字形に変化し、破壊に至っている。これは Van Ornum¹⁵⁾

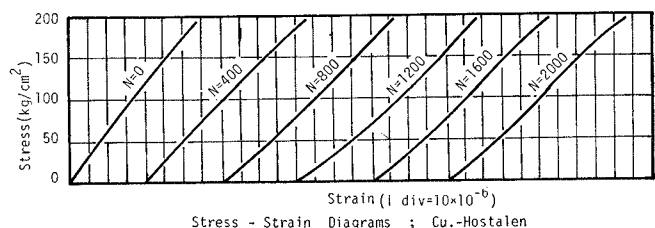


Fig. 5

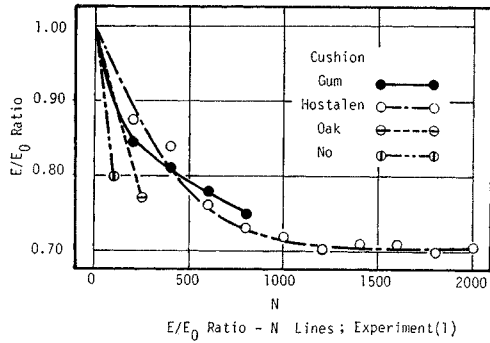


Fig. 6

が行なった角柱供試体の圧縮疲労試験の結果とまったく同様の傾向にあり、衝撃疲労試験も圧縮疲労試験と同じ疲労過程を持つものと推測される。

破壊直前の弾性係数は、Fig. 6 から、最初の 70~80% に低下している。また、ゴムとかホスターレンなどの弾性係数の小さいクッション材の場合は、コンクリートの弾性係数は繰返し衝撃によって徐々に低下して破壊にいたるが、樫などの弾性係数の大きいクッション材あるいはクッション材のない場合には、コンクリートは疲労の少ない状態で破壊にいたるものと考えられる。

(4) 2000 回打撃後の残存強度について

コンクリート杭は特殊工法を除き、一般には連続打撃によって地中深く打込まれるものであるから、打撃完了後の杭コンクリートの強度を知る必要がある。実験①では、2000 回打撃でも破壊しなかった供試体について、

Table 5 Residual Strength and Residual Dynamic Modulus

Mixing	Water Curing (days)	Cushion	Stress Level (%)	Static Strength (kg/cm ²)	Residual Strength (kg/cm ²)	Difference of Strength	Dynamic Modulus Ratio (%)	Difference of Dynamic Modulus	Residual Specimen
A	7	Hostalen	70	429	408	No	91	Yes	5
			80	397	No	102	No	3	
A	7	Gum	70	409	359	No	81	Yes	5
A	7	Oak	70	396	433	No	92	Yes	4
B	7	Hostalen	70	507	490	No	94	No	2
			70	433	449	No	101	No	5
			75	460	No	93	No	3	
			80	460	No	90	No	2	
			85	448	No	81	Yes	1	
C	7	Hostalen	70	533	450	Yes	72	Yes	4
C	7	Oak	70	478	462	No	86	Yes	2
A	28	Hostalen	70	420	325	Yes	99	No	1
A	28	Gum	70	420	443	No	90	No	4
			80	448	No	85	Yes	2	
B	28	Hostalen	70	509	528	No	88	Yes	8
C	28	Hostalen	70	506	528	No	95	Yes	5
			80	561	No	79	Yes	3	
C	28	Oak	70	512	515	No	78	Yes	4

連続打撃後の供試体両端面を清掃し、ソニック方法による動弾性係数を測定した後、イオウキャッピングを行ない圧縮試験を行なった。その結果を Table 5 に示す。

Table 5 において、強度の比較は衝撃試験をした供試体と同一配合、同一養生供試体の圧縮強度と残存供試体のそれにより行ない、動弾性係数の比較は衝撃試験をした供試体の試験前後の動弾性係数を用いて行なった。この場合、強度低下の有無および動弾性係数低下の有無は有意水準 5% で検定したものである。

Table 5 から、2000 回打撃後の残存供試体強度は一部の例外を除いて打撃前の圧縮強度よりも低下しているとは認められない。むしろ、両者の平均値を比較すると、残存強度のほうがわずかに大きくなっている場合もある。しかし、これは同一バッチ内の強度のばらつきによって生じたものと考えられる。なお、強度の低下が認められたものは供試体に可視ひびわれが生じていたものである。したがって、連続打撃後の供試体に外部損傷がなければ、強度低下はないものと考えられる。

一方、動弾性係数は 2000 回打撃によって破壊しなかった供試体を含む全グループの約 60% に低下が認められ、低下の認められないものでも一部を除いて平均値で約 10% の低下が生じている。動弾性係数は、後述するように、衝撃繰返し回数の少ない間に超音波パルスの伝播速度が低下することから供試体の性状変化が考えられるので、低下すると考えてさしつかえないと思われる。

(5) 衝撃回数と超音波パルスの伝播速度

衝撃荷重によるコンクリートの疲労性状を知るために、適当な打撃回数にときに衝撃試験を中断して超音波パルスの伝播速度 V を測定し、これと衝撃前の伝播速度 V_0 との比 V/V_0 の変化を調べた。

実験①では、配合 A、水中養生 7 日の供試体でクッション材にホスターレンを用いた場合について測定し、実験②では各応力階ごとに測定した。それぞれの測定結果を Fig. 7 および 8 に示す。

Fig. 7 および 8 からいずれの場合も、伝播速度比 V/V_0 は最初の数十回の打撃でわずかに低下し、いったんほぼ一定あるいは非常にゆるやかな低下を保った後、急激に低下し、供試体

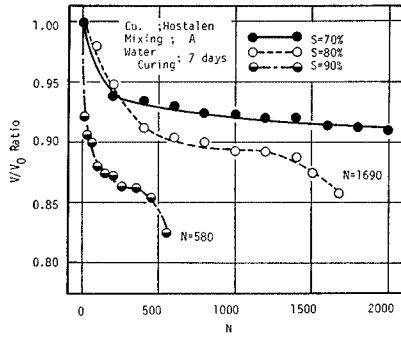


Fig. 7

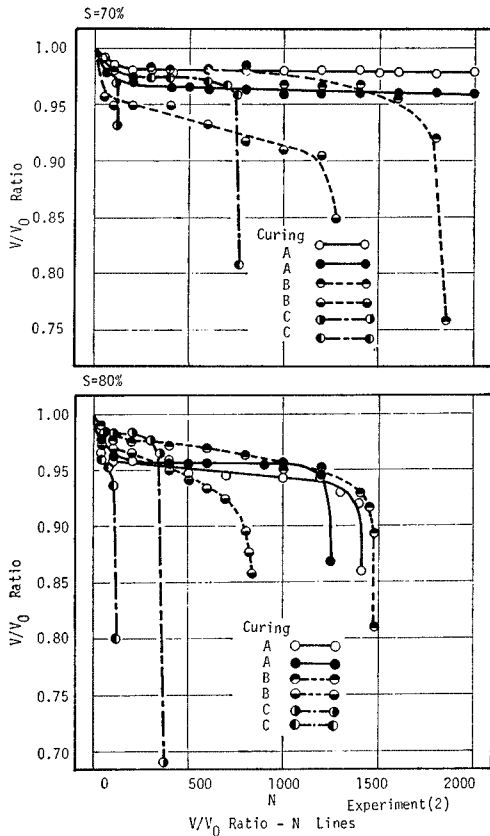


Fig. 8

は破壊していることがわかる。超音波パルスの伝播速度低下はコンクリートの内部性状，すなわち内部ひびわれの発達によるものと考えられる。したがって，コンクリート供試体に繰返し衝撃を与えると，コンクリートは初期の衝撃によってわずかに疲労し，いったんほぼ一定あるいは非常にゆるやかな疲労の進行の後，急激に疲労し破壊にいたるものと考えられる。この場合，応力階が小さいと初期の衝撃による疲労は少なく，かつその後の疲労の進行も非常にゆるやかであるが，応力階が90%と大きくなると，初期の疲労が非常に大きくまたその後の

疲労の進行もほかと比較して早くなっている (Fig. 7 参照)。また，Fig. 8 から，供試体がより湿潤状態にあるほど，初期の打撃によって疲労した後の疲労の進行が一定にならず早くなる傾向にある。しかしながら，供試体内部まで十分に湿潤状態にあると考えられる養生Cの場合は，微小ひびわれが発達しても，そこに水が浸透して伝播速度がいったん低下した後，一定に保つものもあり，その後大きなひびわれのために伝播速度が低下しはじめると急激に破壊している。

破壊直前に急激に疲労することは上述のとおりであるが，急激に疲労しはじめるときの伝播速度比の値は湿潤状態によって若干の差が認められる。すなわち，養生Aでは0.93~0.95，養生BおよびCではそれぞれ0.90~0.93 および0.95~0.98 となっている。また養生AおよびBの場合は，急激に疲労しはじめるときの伝播速度比は最初の数十回の打撃によって低下したときの伝播速度比よりも小さい値になる傾向があるが，養生Cではほぼ同じ値になっている。これはコンクリートが湿潤状態にあるほど，破壊が急激に生じるためと考えられる。

(6) 微小ひびわれの観察

衝撃回数-伝播速度比曲線 (Fig. 7, 8) は前述したように明確な特長が存在しているので，コンクリートの疲労度として，Fig. 9 に示すように定義する。すなわち，

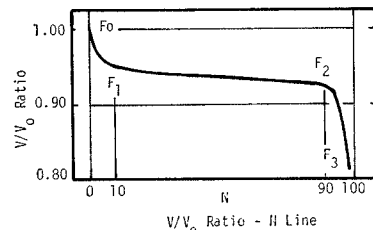


Fig. 9

F_0 : 無衝撃の状態

F_1 : 初期の急激な疲労の進行がとまり，疲労の進行がゆるやかになり始めるところ。この点は衝撃破壊回数を100とすると，5~10となる。

F_2 : ほぼ一定または非常にゆるやかな疲労の進行のうち，再び急激に疲労が進行しはじめるところで，この点は前述のほぼ90に相当する。

F_3 : 破壊直前と思われるところ，あるいは破壊してしまったもの

供試体内部の微小ひびわれの観察は，各養生方法による供試体の疲労度 F_0 , F_1 , F_2 および F_3 について行なった (実験②のみ)。この場合，ひびわれ検査面は衝撃方向およびこれに直角な方向の2種類とした。これは，前述したように供試体の破壊が縦われ，あるいは横われ

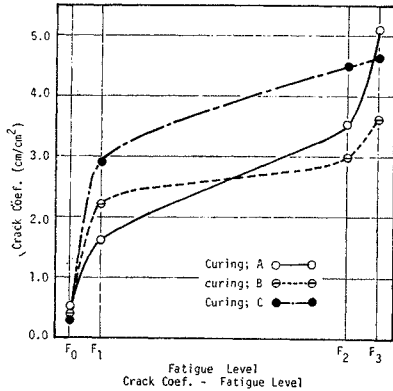


Fig. 10

によって生じたためである。上述のように、疲労度 F_3 の衝撃回数を 100 としたとき、疲労度 F_1 および F_2 の衝撃回数はそれぞれほぼ 10 および 90 前後であるから、横軸に各疲労度をそれぞれ 0, 10, 90 および 100 の各点にとって、測定したクラック係数の平均値を示すと Fig. 10 のようになる。

内部ひびわれを検査した数は少ないが、Fig. 10 は Fig. 7 および 8 と同じ傾向にあることがわかる。すなわち、コンクリートの繰返し衝撃による疲労過程は微小ひびわれの発達過程であると考えられる。したがって、微小ひびわれの発達過程を超音波パルスの伝播速度測定によって間接的に測定することは非常に有効な手段といえる。

ただ、疲労度 F_1 では超音波パルスの伝播速度に養生方法による差が認められなかったのに対して、クラック係数には明確な差が認められた。これは湿潤状態にある供試体は衝撃荷重によって内部に微小ひびわれが発達しても、そこに水が浸透するために超音波パルスを比較的よく透過させ、伝播速度に差が生じなかったものと考えられる。

Table 6 Pulse Velocity of Virgin Specime

Mixing A	Mixing B	Mixing C
4 550	4 545	5 000
4 490	4 750	4 930
4 550	4 630	4 960
4 545	4 620	4 900
Aver. =4 530	Aver. =4 640	Aver. =4 950

より湿潤状態にあるものほど伝播速度は早く、特に養生 C は A, B 養生よりも明らかに早くなっている。

Hsu¹⁶⁾ らは、コンクリートは無載荷のうちからすでにボンドクラックが存在することを指摘しているが、本実験でも無載荷の状態ではやはり微小ひびわれ(ほとんどがボンドクラック)の存在が認められた。そして、供試

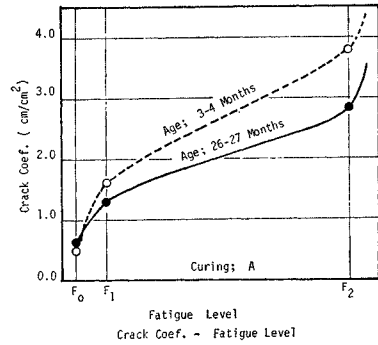


Fig. 11

体がより乾燥状態にあるものほどクラック係数は大きくなっており、乾燥収縮が原因と思われる。

ところで、養生 A および B には材令の異なる供試体が含まれているが、前述の考察はこれらを一括している。そこで、養生 A について、材令によるクラック係数を比較すると Fig. 11 のようになる。疲労度 F_0 では、クラック係数は若材令の供試体のほうが小さいが、疲労度 F_1 になると長期材令のほうが小さくなり、 F_2 になるとその差はさらに大きくなっている。無載荷におけるクラック係数の差は、無載荷のうちに存在する微小ひびわれが乾燥収縮などの進行に伴い増加することが原因と考えられる。一方、疲労度 F_1 および F_2 になると、長期材令の供試体のクラック係数が小さく疲労があまり進行しないのは、一般に材令が大きくなるほど衝撃疲労強度が大きくなるといわれていることを裏付けるものと考えられる。

6. む す び

本研究は配合、養生、乾燥状態およびクッション材など実験要因が多い割には供試体数も少なく、また配合別による強度差が生じなかったり、データのばらつきが大きいなど多くの問題を残しているが、次のことがいえると思う。

(1) 静的強度に対する一定の衝撃応力比のもとでは、コンクリートの衝撃疲労強度は対数正規分布にしたがう。

(2) コンクリートの衝撃疲労強度は養生方法よりもむしろ衝撃時のコンクリートの乾湿状態によって大きく左右され、静的強度に対する一定の繰返し応力下では、湿潤コンクリートは乾燥コンクリートよりも疲労強度は劣る。

(3) クッション材の弾性係数が小さいほど、衝撃疲労強度は大きくなる傾向にある。

(4) 2000 回打撃によっても破壊しなかったコンク

リートも、表面に損傷がなければ、その圧縮強度は無載荷のものとは比べて低下は認められない。しかし、静、動両弾性係数とも低下が認められ、コンクリート内部に変化が生じているものと考えられる。

(5) 超音波パルスの伝播速度によって、衝撃荷重によるコンクリートの疲労過程を知り得る。この場合、伝播速度は初期の衝撃によりわずかに低下し、いったんほぼ一定あるいは非常にゆるやかな低下を保った後、急激に低下して供試体は破壊する。ただし、初期の衝撃による伝播速度の低下は、静的強度に対する衝撃応力の比が大きいほど多い傾向にある。

(6) コンクリートの衝撃疲労過程は微小ひびわれの発達過程であり、その発達過程を超音波パルスの伝播速度によって間接的に測定することは非常に有効な手段と考えられる。

(7) クラック係数は、無載荷においては、若材令のものほど小さいが、繰返し荷重によって長期材令の供試体のほうが小さくなり、繰返し回数が大きくなるほどその差は大きくなる。

本研究の一部は、昭和 45 年度文部省科学研究費によって実施したものであることを付記し、感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) Blake, B.E. : Recommended Practices for the Driving of Prestressed Concrete Piles, Technical Paper, Cement and Concrete Association of Australia.
- 2) Sandhu, R.S. : Resistance of Concrete to Impact Loading, Indian Concrete Journal, May 1963.
- 3) Green, H. : Impact Strength of Concrete, Proc. of I.C.E., July No. 6769.
- 4) 岡田・明石ほか：コンクリートの打撃抵抗に関する研究，土木学会第 19 回年次学術講演会概要集，1964
- 5) Granville, W.H., G. Grime, E.N. Fox and W.W. Davies : An Investigation of the Stress in Reinforced Concrete Piles During Driving, Technical Paper No. 20, Building Research Station H.M.S.O., London. 1938.
- 6) 渡辺ほか：コンクリートの繰返し打撃に関する研究，コンクリートボールパイル協会技術委員会衝撃小委員会，研究報告
- 7) Hsu, T.T.C., F.O. Slate, G.M. Sturman and G. Winter : Microcracking of Plain Concrete and the Shape of Stress-Strain Curve, Jour. of A.C.I., Feb. 1963.
- 8) 丹羽ほか：三軸圧縮荷重下におけるコンクリート中の微小クラックと残存強度，コンクリートジャーナル，Vol. 7, No. 12, Dec. 1969.
- 9) Shah, S.P. and S. Chandra : Critical Stress, Volume Change and Microcracking of Concrete, Jour. of A. C.I., Vol. 65, No. 9, Sep. 1968.
- 10) Krishnaswamy, K.T. : Strength and Microcracking of Plain Concrete under Triaxial Compression, Jour., of A.C.I., Oct. 1968.
- 11) McCall, J.T. : Probability of Fatigul Failure of Plain Concrete, Jour. of A.C.I. Aug. 1958.
- 12) 阪田，西林ほか：統計的処理によるコンクリートの疲労寿命に関する研究，土木学会論文報告集，第 198 号，1972 年 2 月
- 13) 成岡ほか：疲労試験における途中打ち切りデータ処理に関する研究，土木学会論文報告集，第 189 号，1971 年 5 月前出 3)
- 14) Van Ornum : Fatigue of Cement Products, Transaction ASCE, Vol. 51, 1903.
- 15) 前出 7)

(1973.2.26・受付)