

コンクリート部材の振動逸散減衰特性

北見工大 正員 三上修一・大島俊之・山崎智之
 構造技研 曳地 正和
 東設土木C. 正員 安田 基治

1. はじめに

劣化したコンクリート構造物の健全度診断や残存寿命評価を行う上で、現場検査でのより高精度な診断の解析方法が必要である。コンクリート構造物の非破壊検査において超音波による欠陥診断や劣化度診断などは詳細な内部損傷評価によく使われる。この弾性波による診断においてはコンクリート中を伝播する超音波の減衰の影響を知ることが必要である。

本論文では不均質材料としてのコンクリート中を伝播する超音波における実験結果を示す。すなわち超音波の逸散、散乱、材料減衰に影響する因子について検討を行い、影響因子の内から骨材の粒径、体積率をパラメータとした供試体を作製しこれら3種類の減衰特性を実験的に検討する。超音波の伝播に関するコンクリート中のセメントペーストと骨材の間の境界面、体積率の影響は波形解析によって解析を行う。また、コンクリートの材料減衰は砂利と砂とセメントペーストの体積率の関数となることを示す。

2. コンクリートの減衰特性

コンクリート中を伝播する超音波の減衰特性はコンクリート中の骨材と骨材の接触条件、骨材とモルタルの接触条件、空隙などに大きく依存することが知られている。一方、コンクリートの内部減衰は組成微粒子間の内部摩擦によって生じる。この内部摩擦は骨材と骨材または骨材とモルタルの間で生じる。垂直応力とせん断応力の両方の分布がコンクリートの内部減衰に影響する。垂直応力 σ とせん断応力 τ の関係はクーロンによって次のように与えられている。

$$\tau = \mu \sigma + c \quad (1)$$

ここで、 μ = 摩擦係数、 c = 定数である。一方コンクリートの強度はモルタルと骨材との接触条件の変化（ボンド剥離）として評価されるので、コンクリートの内部減衰と強度には共通のメカニズムが存在する事が予想される。コンクリート中の超音波の減衰メカニズムは、粘性減衰定数（非線形減衰、内部摩擦、内部減衰） α_1 、骨材境界における散乱減衰定数 α_2 、内部クラックや空隙による反射が原因の減衰定数 α_3 の3つの部分に分かれると言われている¹⁾。

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \quad (2)$$

超音波は伝播する間に減衰を受けるために、粘性減衰 α_1 に影響する因子として、周波数、超音波のモード、構造のマイクロメカニクス、温度、含水率が挙げられる。粘性減衰 α_1 は次式のように表される。

$$\alpha_1 = \delta / \lambda \quad (3)$$

ここで、 δ = 対数減衰率、 λ = 超音波の波長である。

後述するように本論文では骨材寸法より十分長い波長の周波数を使った振動実験によって波形解析を行い、対数減衰率を曲線近似法（CFM）とハーフパワー法（HPM）を使って求めている。

コンクリートと内包物（Inclusion）との間の超音波の散乱減衰定数 α_2 は、骨材の平均形状、超音波の波長と骨材の平均寸法の比（ d/λ ）、骨材とモルタルの弾性係数比（ E_g/E_m ）、全体積に対する骨材の体積率（ p ）、骨材の全体積（ T ）を用いて説明される。明石はソニック法によるコンクリートの散乱減衰定

Characteristics of Damping and Attenuation of Oscillation in Concrete Members.

by Shuichi MIKAMI, Toshiyuki OSHIMA, Tomoyuki YAMAZAKI, Masakazu HIKICHI and Motoharu YASUDA.

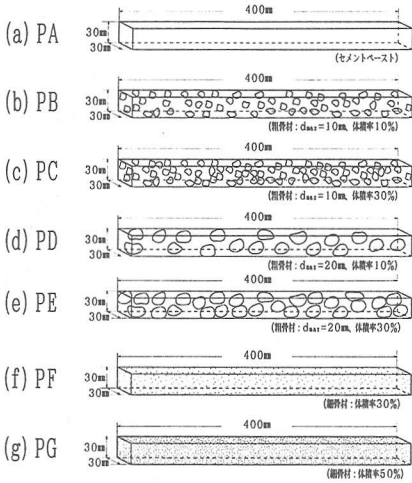


図1 供試体

表1 供試体中の骨材の最大粒径・体積率および境界表面積

	$d_{max}(mm)$	$d(mm)$	$V_a(cm^3)$	$V_r(cm^3)$	$V_{a\ total}(cm^3)$	$N(\text{pieces})$	$S_a(cm^2)$	$S_{a\ total}(cm^2)$
PB	10	8	0.268	0.1	36	134	2.01	270
PC	10	8	0.268	0.3	108	403	2.01	810
PD	20	16	2.14	0.1	36	17	8.04	135
PE	20	16	2.14	0.3	108	50	8.04	405
PF	2	1	0.000524	0.3	108	206265	0.0314	64800
PG	2	1	0.000524	0.5	180	343775	0.0314	10800

Total V=360cm³

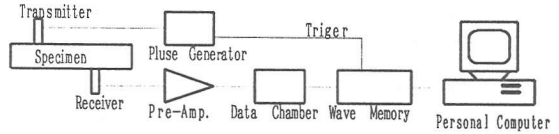


図2 逸散減衰測定システム

数に関する関係式を示している¹⁾。ここで、 $d/\lambda < 3$ である。

$$\alpha_z = 2\pi p T \left(\frac{E_s - E_m}{E_m} \right)^2 \lambda^4 \quad (4)$$

コンクリートの減衰定数に影響を及ぼす測定要因には、センサーの接触条件・水セメント比・温度・測定システムの周波数特性・入射波形の変形モードの選択・波長と周波数・受信センサーの周波数帯等がある。同じ測定条件下で測定された減衰定数の再現性を高めるためにはこれらの条件を考慮して測定を行う必要がある。そこで、同じ設定で実験の全ての部分の設定に細心の注意をしなければならない。そして、モード転換からの減衰の影響と波動エネルギーの幾何学的放射の影響の結果を分離して上記の影響を明らかにできる。

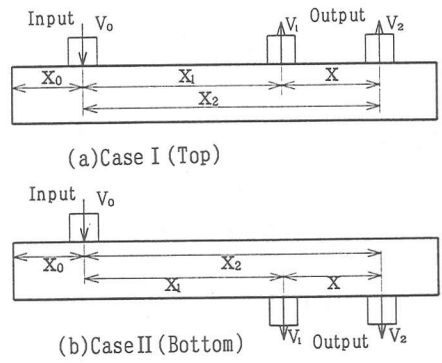


図3 センサー配置

3. 実験による逸散減衰特性

3.1 供試体

骨材による散乱と超音波波動との間の減衰の影響を考慮して得られた、セメントペースト中に異なる形状の骨材を持つ7個の供試体を図1に示すように作製した。この供試体の寸法は30mm×30mm×400mmの正方形断面棒である。供試体の形状パラメータは表1に示す通りである。水セメント比は50%とし、表中の記号は d_{max} =骨材の最大粒径(mm)、 V_r =骨材の体積率(%)である。骨材の形状を球体と仮定した場合のセメントペーストと骨材の間の全境界表面積($S_{a\ total}$)の概算は表1に示すようになる。これらの数値は表1に示すように平均骨材粒径 d (mm)を考慮した骨材の体積率によって計算された。ここで V_a はひとつの骨材要素の体積(cm^3)、 N は V_a と V_r (供試体)から計算された骨材要素の概数、 S_a は平均直径から骨材要素ひとつについて計算された表面積であり、 $S_{a\ total}$ は全境界表面積である。

3.2 逸散減衰の測定

実験は図2に示す測定システムで行った。実験では2種類のタイプの受信センサーを使用している。センサーV(広帯域センサー、AE900S-WB)は供試体表面に対して鉛直方向の波(曲げモード)を検出し、センサ

—H (周波数特性100kHz~500kHzまでほぼフラット、AE404RY) は表面と平行な波(縦波動モード)を検出する。入射波は図3に示すようなセンサーV(共振周波数50kHz)を用いて入射している。センサー配置は図3(a) Case Iと図3(b) Case IIに示すようにした。入射センサー(Transmitter)と受信センサー(Receiver)の共振周波数の選択と、共振点の位置にこれらのセンサーを設置することはたいへん重要である。そこで、可視化シミュレーションを行い現実の測定の前にセンサー位置や周波数のおおよその選定を行っている。

3.3 測定結果

逸散減衰 α_2 を求めるために次の二つの式を用いている。(5)式は伝播距離 x_1 、 x_2 における超音波の振幅を V_1 、 V_2 としたときの逸散減衰をあらわすRothingの提案式である²⁾。また、(6)式は逸散減衰を音響減衰として表示した場合の関係式である。

$$\alpha_2 = \frac{\ln(V_1/V_2)}{x_2 - x_1} \quad (\text{neper/cm}) \quad (5)$$

$$\alpha_2' = \frac{20 \log_{10}(V_1/V_2)}{x_2 - x_1} \quad (\text{db/cm}) \quad (6)$$

この α_2 と α_2' について実験結果を表2に示す。セメントペースト供試体中のそれぞれの骨材は比重に影響を及ぼす。材料のわずかな分布特性は供試体の表面と底面の間で作られる。供試体の表面側(Top)と底面側(Bottom)での逸散の違いを表2に示す。表中のV, HはセンサーVとHの結果に対応し、TopはCase Iに、BottomはCase IIに対応している。Bottom側の減衰定数を比較すると曲げモードの場合より縦波動モードの逸散が小さい。しかし、Top側では逆の傾向が見られる。鉛直振動の刺激による共振特性はPDの場合にみられる。骨材要素分布の偏心の影響はPBの減衰特性に現れている。骨材の全境界表面積(S_a)が大きくなると逸散も大きくなる傾向がある。しかしPFを越えると増加は止まり減少傾向がみられる。

4. 粘性減衰の実験

ここでは図1に示す供試体の一端を固定支持して加振実験を行い図4の測定システムで加速度を測定した。測定波形より減衰定数を求め骨材による減衰の影響の比較を行う。また減衰定数から式(3)によって求めた粘性減衰特性についても比較を行い、粘性減衰の影響を含む平均減衰定数を求めることを目的として、図5に示すような二種類の実験を取り扱う。図5(a)は片持ばりの曲げ振動モードの加速度計配置と加振方向を示している。図5(b)はねじり振動モードを示している。ここでは曲げについては鉛直方向の加速度を、ねじりについては水平方向の加速度をそれぞれ室温・空气中の条件で測定した。また、加振は供試体先端部分を打撃によって所定の振動モードが得られるようにしている。加速度の測定には10G(応答周波数100Hz)の加速度変換器を供試体に両面テープで直接固定した。供試体は表面乾燥状態で実験を行っている。

表2 逸散減衰定数 (α_2 、 α_2')

			α_2	α_2'
PA	V	Top	0.0362	0.3144
		Bottom	0.0299	0.2599
	H	Top	0.0035	0.0305
		Bottom	0.0047	0.0406
PB	V	Top	0.0225	0.1957
		Bottom	0.0606	0.5261
	H	Top	0.0060	0.0522
		Bottom	0.0342	0.2971
PC	V	Top	0.0262	0.2276
		Bottom	0.0273	0.2373
	H	Top	0.0593	0.5152
		Bottom	0.0356	0.3088
PD	V	Top	-0.0267	-0.2316
		Bottom	-0.0120	-0.1733
	H	Top	0.0269	0.2341
		Bottom	—	—
PE	V	Top	0.0233	0.2028
		Bottom	0.0613	0.5325
	H	Top	0.0408	0.3544
		Bottom	0.0316	0.2745
PF	V	Top	0.0614	0.5337
		Bottom	0.0540	0.4692
	H	Top	0.0756	0.6568
		Bottom	0.0244	0.2120
PG	V	Top	0.0393	0.3412
		Bottom	0.0276	0.2398
	H	Top	0.0216	0.1879
		Bottom	0.0150	0.1306

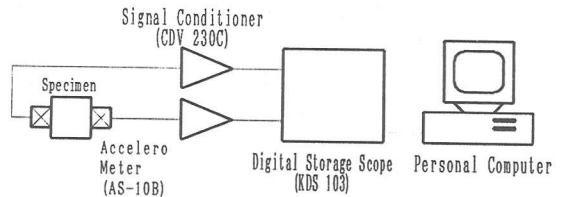


図4 振動減衰測定システム

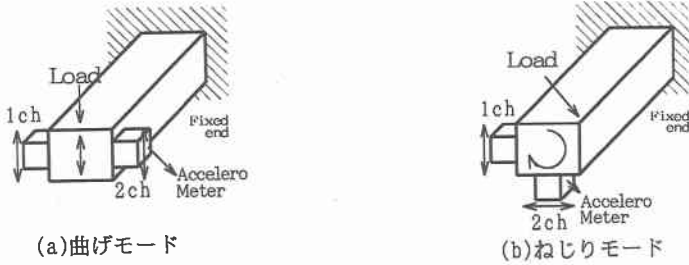


図5 センサー配置

表3 振動モードによる減衰定数の比較 (ζ (%), α_1 (%), f (Hz))

	Bending						Torsion					
	C.F.M			H.P.M			C.F.M			H.P.M		
	ζ	α_1	f	ζ	α_1	f	ζ	α_1	f	ζ	α_1	f
PA	3.3	0.26	43	1.5	0.12	45	4.8	0.38	62	3.3	0.26	63
PB	4.3	0.34	31	1.9	0.15	33	4.5	0.35	60	2.5	0.20	61
PC	2.2	0.17	52	1.5	0.12	51	6.2	0.49	53	2.0	0.16	54
PD	2.8	0.22	48	1.3	0.10	51	4.0	0.31	58	1.9	0.15	57
PE	4.1	0.32	28	4.2	0.33	28	3.5	0.27	45	2.7	0.21	46
PF	3.7	0.29	43	5.0	0.39	42	4.4	0.35	65	2.5	0.20	67
PG	3.8	0.30	45	2.8	0.22	47	5.0	0.39	65	3.1	0.24	67

4. 1 測定結果

本研究では減衰定数を曲線近似法 (C.F.M、Curve Fitting Method) とハーフパワー法 (H.P.M、Half Power Method) の2種類の計算方法を使用している。ここでは支持条件と衝撃条件を安定させるために共振周波数の近傍で調整している。この場合は波長が非常に長いことになるので、粘性減衰 α_1 は(3)式により求める。

この場合 $\lambda = 2l$ 、 $l = 40\text{cm}$ として α_1 を計算する。各供試体の減衰定数 ζ (%)、粘性減衰 α_1 (%) と周波数 f (Hz) は表3に示す通りである。C.F.Mによる減衰定数がH.P.Mによる結果と比較べて大きい。また、この供試体の場合、減衰定数の8%程度が粘性減衰である。さらに曲げ振動による減衰定数はねじり振動の場合に比べ小さい。減衰定数は全境界表面積が大きくなると曲げ振動の減衰定数は小さくなる。この実験の場合は、打撃による加振を行うので振幅を一定にすることが難しい、減衰を検討するためには振幅依存性を考慮する必要がある。

5. まとめ

コンクリート中を伝播する超音波の逸散減衰や粘性減衰が得られた。コンクリート中の骨材による内部散乱の影響は次のようにまとめることができる。

- 1) 逸散減衰定数は曲げ波動モードで2~7%、縦波動モードで0.3~7%の値が得られた。
- 2) 境界表面積が大きくなると逸散減衰定数は増加傾向にある。
- 3) 粘性減衰は境界表面積が大きいほど曲げ振動の減衰定数は小さくなる。
- 4) 粘性減衰定数は約0.3%が得られた。
- 5) 曲げ振動による減衰定数はねじり振動に比べ小さい。

参 考 文 献

- 1) 明石外世樹、コンクリートの非破壊試験に関する研究、土木学会論文集、第390号/V8、pp.1-22、1988.2.
- 2) Rothing, H. : Measuring Ultrasonic Attenuation in Concrete, Building Research and Practice, Jan-Feb, 1975.