

論文 混合モードひび割れ進展の加力周波数への依存性に関する考察

渡辺 健^{*1}・大津 政康^{*2}

要旨: コンクリート構造物の動的破壊現象の解明に関連して、衝撃的な外力の周波数の影響について研究を進めている。本研究では、加力周波数のひび割れ進展挙動への影響について検討した。その結果、衝撃的な加力によって混合モードひび割れの進展方向が変化する現象が鋼球落下試験によって見いだされた。そこでその原因解明のために BEM 解析による応力解析を行った。これにより、周波数の変化によって、ひび割れの進展方向が変化する原因について破壊力学的に考察した。

キーワード: 動的破壊現象, 周波数, 鋼球落下試験, BEM 解析

1. はじめに

コンクリート構造物の動的破壊挙動の解明に関して、衝撃力の影響についての実験的な研究が進められている¹⁾。本研究では、鋼球落下試験における加力周波数による破壊モードの変化に関する成果²⁾を踏まえ、混合モードひび割れの進展方向が変化する現象に着目した。そこで、ノッチ付き供試体の鋼球落下試験と BEM 解析による応力解析を行い、衝撃力が持つ周波数の影響とそれによる応力分布の変化について破壊力学に基づいて考察した。

2. 衝撃力

2.1 衝撃応答理論

構造物の弾性動的応答は、変位法ならば変位に関する弾性波動の基礎式を解けばよい³⁾。その場合、構造物への地震力あるいは衝撃力は時間の関数として与えられる。一般の解析では弾性波動方程式を満足するように、初期条件及び境界上に対する応答を直接に解くことにより時刻歴応答が決定される。一方、時間関数はフーリエ解析の理論により周期関数に分解可能である。この外力の周期関数の振幅値の絶対値を周波数に対してプロットしたものが周波数スペク

トルである。図-1 に代表的な外力のスペクトル成分の概念図を示す。静的な外力は周波数ゼロの成分のみであり、完全なインパルスではゼロから無限大まで同じ大きさの成分を持つ。一般には図-1 のように準静的で 1Hz 以下、衝撃力としてはそれ以上 100Hz 程度までの成分を持つと考えられている。このような高周波数成分を加力を含む点が動的問題の特徴といえる。

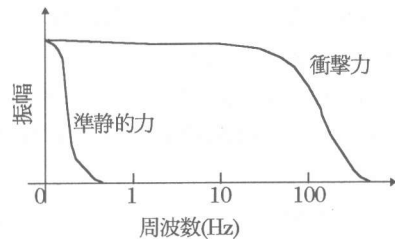


図-1 外力と周波数成分

一方、構造物の動的な変位応答も周期成分に分解可能となる。ただし、周期関数の解は、ある周波数成分に対する応答しか与えない。ところが、全ての外力は周期関数の和で表せるため、解も同様に重ね合わせることにより、種々の衝撃的な外力に対しても弾性応答の範囲では周波数領域で解析可能となる。問題は、部材はその

* 1 熊本大学大学院 自然科学研究科後期課程環境科学専攻 (正会員)

* 2 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合表

最大粒径 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 (cc)	スランプ ^o (cm)	空気量 (%)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			
20	50	48	172	344	830	1021	104	3.0	6

形状及び入力関数によって変形挙動が異なることである。

2.2 鋼球落下の持つ周波数

鋼球落下試験においては、入力する外力の周波数成分が大きな影響を与える。そこで衝撃の時間関数とその周波数成分の関係について考察した。衝撃力を入力関数は正弦波の 1/2 波長で近似できることが知られている⁴⁾。したがって、次式で与えられる入力関数としての接触時間 T_c が衝撃力の周波数成分を決定することになる。

$$T_c = [5.97 \{ \rho (\delta p + \delta s) \}^{0.4} R] / H^{0.1} \quad (1)$$

ただし

$$\delta p = [1 - \nu p^2] / [\pi E_p]$$

$$\delta s = [1 - \nu s^2] / [\pi E_s]$$

ρ は鋼球の密度(kg/m³)、 R は鋼球の半径(m)、 H は落下高さ(m)、 νp 、 E_p は落下面材料のポアソン比と弾性係数(Pa)で、 νs 、 E_s は鋼球のポアソン比と弾性係数(Pa)である。

この場合には、sin 関数のスペクトル分析により、図-2 のように接触時間 T_c から入力周波数の上限として

$$f_{\max} = 1.25 / T_c \quad (2)$$

が導かれる。

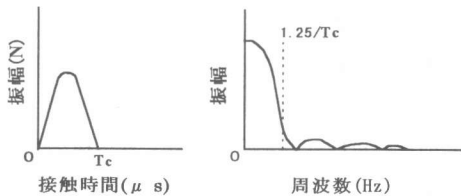


図-2 鋼球落下による入力波形とスペクトル成分

また鋼球の質量、落下高さをそれぞれ m 、 h

とすると荷重の最大値 F_{\max} は次式によって得られる。

$$F_{\max} = m\sqrt{2gh} / (0.637T_c) \quad (3)$$

3. 実験概要

3.1 使用供試体

実験に際しての図-3 の正面図のような $50 \times 100 \times 400$ mm の角柱コンクリート供試体を作成した。また破壊モードの比較を行うために、供試体下部中央及び供試体中央から 50mm の位置にノッチを設けた供試体も作成した。ノッチ付きの供試体を図-3 の下段に示す。コンクリートの配合は表-1、28 日間水中養生後の力学的特性は表-2 に示す。

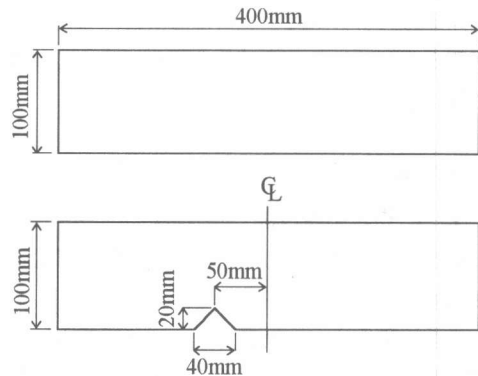


図-3 供試体図

表-2 コンクリートの力学的特性値

引張強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	ポアソン比
2.76	33.07	0.20

3.2 鋼球落下試験

鋼球落下試験の概要を図-4 に示す。

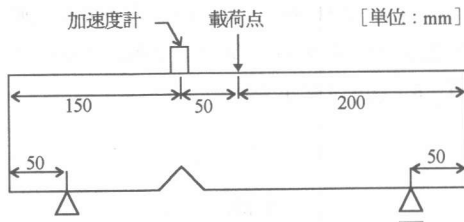


図-4 鋼球落下試験

図-4 は、ノッチ付き供試体の例を示している。供試体を両端支持状態で保持し、供試体上面の中心線上に高さ 10cm から直径 30mm の鋼球を自由落下させた。鋼球の密度は 7781kg/m^3 、ポアソン比は 0.3 であるので接触時間および入力周波数の上限は式(1)、式(2)よりそれぞれ $T_c=151\ \mu\text{sec}$ 、 $f_{\text{max}}=8256\text{Hz}$ となる。载荷点より 50mm 離れた供試体上面に配置した加速度計より検出した弾性波の波形をパーソナルコンピュータに記録し、FFT 処理することにより周波数スペクトルを求めた。

また衝撃力の持つ周波数が破壊モードに及ぼす影響を調べるために、静的な荷重による 3 点曲げ試験と、直径 76mm の鋼球を 2m の高さから落下させる準静的な衝撃破壊試験とを行った。それぞれ荷重及び衝撃は図-4 に示す载荷点に与え、供試体の支持条件も同様である

4. BEM 解析

2次元動的 BEM 解析として、任意の周波数 f での定常場の積分方程式を解くことにより境界上の変位を決定した。解析に用いたモデルを図-5 に示す。ノッチがないモデルは境界点数 100、内部点数 279 となっており、ノッチ付きのモデルは境界点数 100、内部点数 275 である。ここで、BEM 解析においては均質体としての力学的特性が必要である。そこで密度を実測値より求め、ポアソン比を表-2 より 0.20 とした。弾性係数は、弾性波の波速を計測し求めた結果、弾性波の波速が 4425m/s 、弾性係数が 43.1GPa となった。

解析においては周波数 f を連続的に変化させて解析することにより、供試体における解析上

の周波数スペクトルを求めた。これにより、鋼球落下試験において得られた周波数スペクトルを解析によって再現することにした。また、解析によって求められた周波数スペクトルの周波数ピークにおいて内部点の応力解析を行った。その内部点の位置を図-5 中に示す。

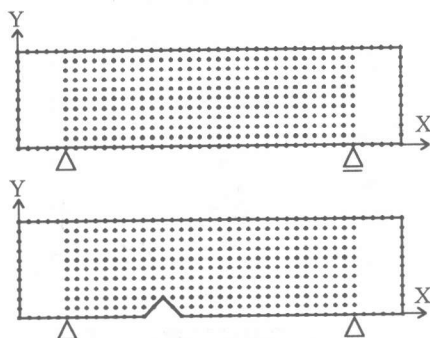


図-5 解析モデル

5. 結果と考察

鋼球落下試験によって得られた波形及び周波数スペクトルの結果を図-6 に示す。周波数スペクトルを比較してもノッチの影響はほとんど見られなかった。これはノッチがもたらす影響に比べ、供試体の形状が持つ共振周波数が大きいと考えられる。

次に BEM 解析によって求めた周波数スペクトルを図-7 に示す。ノッチがないモデルでは、図-7 中に示す矢印の位置に 2 つのスペクトルピークがあり、それぞれ 1298Hz 、 2148Hz である。一方、ノッチ付きのモデルでは矢印で示す 3 か所、 1337Hz 、 2128Hz 、 4404Hz にスペクトルピークが確認された。 4404Hz のピークは他に比べ小さいピークではあるが、ノッチがないモデルには見られないためにノッチによる影響であると考えられる。また、 2100Hz 付近のスペクトルピークは、実験でのスペクトルピークにも見られている。

このように供試体の持つ周波数スペクトルを確認した後、供試体を実際に破壊する実験を

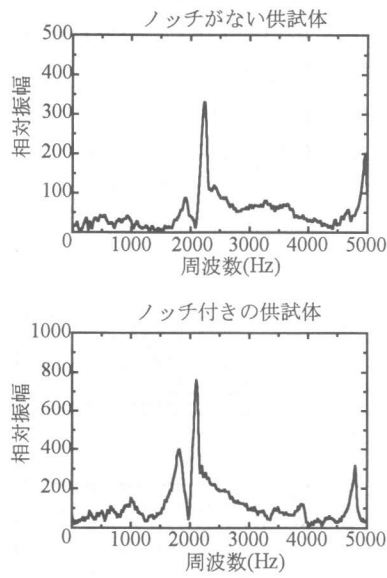


図-6 鋼球落下試験による周波数スペクトル

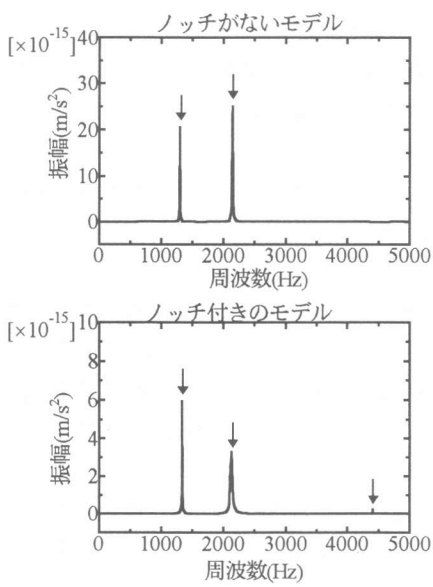


図-7 BEM 解析による周波数スペクトル

行った。直径 76mm の鋼球を 2m の高さから落下させ破壊させた。その場合鋼球の持つ上限周波数は式(1)、式(2)より 4397Hz となり、解析で得られたノッチの影響によるスペクトルピーク

4404Hz を含んでいる。この場合、荷重の最大値は式(3)より約 62500N である。実験後の破断面を図-8、図-9 に示す。

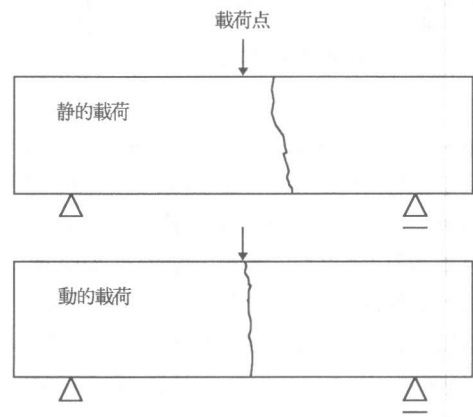


図-8 ノッチがない供試体の破壊試験後のひび割れ

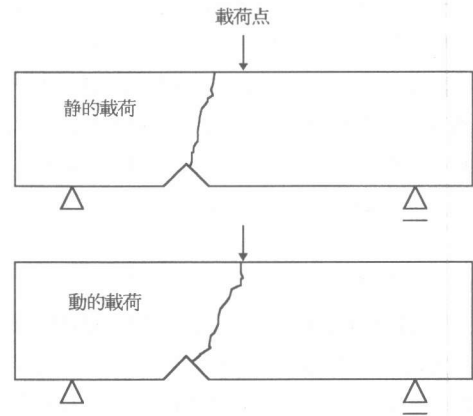


図-9 ノッチ付きの供試体の破壊試験後のひび割れ

図-8 のノッチがない供試体においては、静的荷重実験では破断面が荷重点よりずれた位置に生じたのに対し、動的荷重においては荷重点真下に破断面が生じている。

図-9 のノッチ付きの供試体において、静的荷重による破断と動的荷重による破断を比較すると、静的荷重の場合、ひび割れがノッチから

上方にのみ進展しており、荷点までひび割れが達していないことが分かる。動的荷の場合ひび割れはノッチと荷点を結ぶようにひび割れが進展し破断している。これらの結果より、静的荷と動的荷を比較した場合、周波数が高くなったことがひび割れの進展方向をより斜めに変化させたと考えられる。

次に BEM 解析によるノッチがない供試体モデルとノッチ付きの供試体モデルの変形モードをそれぞれ図-10、図-11 に示す。ただし、入力周波数が変化することにより入力エネルギーが変化することを考慮し、荷点において $1 \mu \text{joul}$ の入力エネルギーに換算した変形量であり、その実際の変位を 10000 倍にして示している。

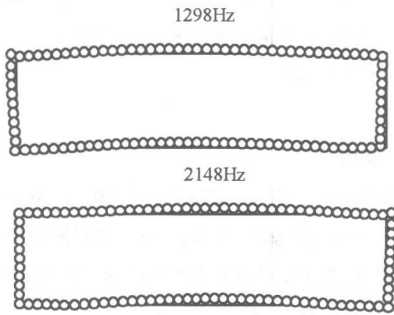


図-10 ノッチがない供試体モデルの変形モード

図-10 より、ノッチがない供試体モデルにおける周波数スペクトルの1次ピーク、2次ピークでは、ほとんど同じ曲げモードの変形モードを示していることが確認される。図-8 のように実際の破断は曲げモードで生じており、これが静的と動的荷の影響が顕著に見られない原因と考えられる。一方、図-11 より、ノッチ付きの供試体モデルにおける変形モードを見ると、周波数スペクトルの3次ピークに当たる4404Hzにおいて同一のエネルギー入力に対して最も大きな変形が起きていることが分かる。また、周波数スペクトルの1次ピークと2次ピークの変

形に大きな差がないのは、図-10 に示すノッチがない供試体の解析結果と一致している。このように解析でも4404Hzの場合にのみ、ノッチの影響が認められた。

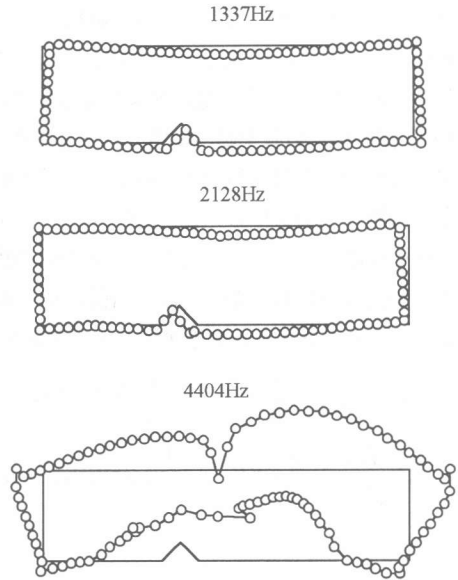


図-11 ノッチ付きの供試体モデルの変形モード

そこで、各変形モードの内部応力を BEM 解析で求めた。応力も変位と同様に $1 \mu \text{joul}$ の入力に対する応力に換算して評価した。その結果、ノッチがない供試体の内部応力 σ_{xx} 、 σ_{xy} 、 σ_{yy} は1298Hzと2148Hzの差異がわずかであり、周波数の影響をほとんど受けていないことが明らかとなった。これも破壊モードの差異のない理由だと考えられる。

ノッチ付きの供試体モデルの応力分布では、 σ_{xx} では周波数の影響が小さく、 σ_{xy} では多少の影響が見られた。最も影響を受けたのが σ_{yy} であり、代表例として図-12 に1337Hzと4404Hzにおける σ_{yy} の応力分布図を示す。

図-12 より4404Hzの方が大きな応力が発生しており、これは図-11 に示す $1 \mu \text{joul}$ に対する変位が4404Hzの方が大きいことに対応すると考えられる。また図-12 中に示す A、B のよ

うに応力分布の変化する部分が 4404Hz では載荷点側に動いている。このことに着目し、線形破壊力学⁵⁾の理論を用いて考察した。ノッチ位置上の鉛直方向に対してのノッチ先端部から点 A、点 B のなす角度をそれぞれ θ_A 、 θ_B とすると $\theta_A=0^\circ$ 、 $\theta_B=40^\circ$ である。線形破壊力学の理論によると σ_{yy} は式(4)のように表すことができ、 K_I 、 K_{II} は応力拡大係数と呼ばれるもので K_I 成分が多いほど引張卓越の破壊モードであり、 K_{II} 成分が多いほどせん断卓越の破壊モードであるといえる。式(4)より 1337Hz の場合は K_I のみとなり引張卓越モードと判定でき、4404Hz の場合 K_I 、 K_{II} がほぼ同じ割合となり引張とせん断が混在した混合モードと判断することができる。

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left\{ \frac{3}{4} \cos(\theta/2) + \frac{1}{4} \cos(5\theta/2) \right\} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left\{ -\frac{5}{4} \sin(\theta/2) - \frac{1}{4} \sin(5\theta/2) \right\} \quad (4)$$

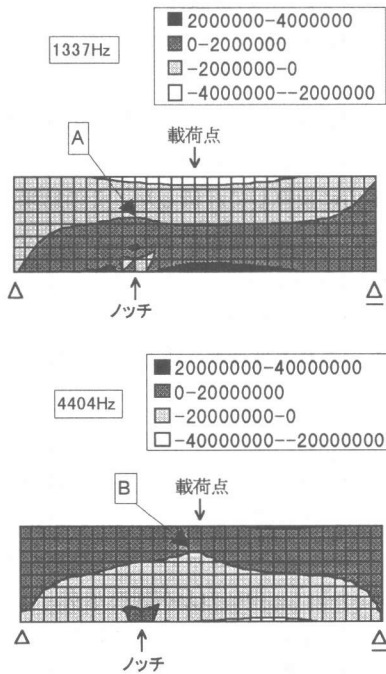


図-12 ノッチ付きの供試体モデルの σ_{yy} の応力分布

6. 結論

コンクリート構造物の動的破壊挙動の解明において、衝撃力が持つ周波数の影響についての鋼球落下試験と BEM 解析による応力解析を行った結果、以下のような結果が得られた。

- (1) ノッチ付きの供試体の静的載荷による破断と動的載荷による破断を比較した場合、入力を持つ周波数が高くなった結果、ひび割れの進展方向がより斜めに変化することが確認された。
- (2) BEM 解析により求めた内部応力を線形破壊力学の理論を用いて考察した結果、入力を持つ周波数が低い場合では引張卓越モードを示し、入力周波数が高い場合では引張とせん断が混在した混合モードを示すことが認められた。これは破壊試験の結果と対応しており、入力周波数が高くなった結果、ひび割れの進展方向が変化し、破壊モードが引張卓越モードから引張とせん断が混在した混合モードへと変化することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 別府万寿博・香月 智・石川信隆・宮本文穂：衝撃突き上げ装置による RC 橋脚模型の輪切り状ひび割れに関する実験的研究, No.577/I-41, pp165-180, 1997.10
- 2) 渡辺 健・大津政康・坂本健俊：鉄筋コンクリート柱の高周波数振動と破壊挙動の考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.2, pp363-368, 1997.6
- 3) M.Ohtsu: On High-Frequency Seismic Motions of Reinforced Concrete Structures, J. Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No.544/V-32, pp277-288, 1992.6
- 4) 白鳥雅也・桧貝 勇・岡村雄樹：軽い衝撃を受けるコンクリート部材の応答解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, pp.679-684, 1992.6
- 5) 岡村弘之：線形破壊力学入門, 培風館, 1976