

## (20) 縦衝撃を受けるモルタル棒の

### 挙動に関する基礎的研究

金沢大学大学院 ○中田 吉彦

金沢大学 榎谷 浩

金沢大学 梶川 康男

#### 1. まえがき

衝撃荷重が作用する場合の構造部材の挙動は、広範囲な分野において、重要かつ基礎的問題である。本研究では、基礎的なものとして波動方程式に支配されるモルタル棒の縦衝撃問題について、実験的ならびに数値解析的に検討したものである。解析においては、本来、不連続体の解析に有効である個別要素法を用い、理論解および実験結果との比較・検討を行った。具体的には、要素の大きさの影響、破壊の取り扱い、などについてパラメトリックスタディを行っている。

#### 2. 実験概要

**2.1 実験方法** 本実験は、図1のようにモルタル角柱(6cm×6cm×100cm)を高さ165cmから吊り下げ、同様に吊り下げたロードセルを所定の高さからモルタル角柱に衝突させることにより行った。実験時には、その角柱の3箇所のひずみ(打撃面から20, 40, 80cmの位置)とロードセルにより荷重を測定した。また、測定のサンプル時間は、5μs/wordである。なお、実験に用いたモルタルのヤング係数は $2.17 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、圧縮強度は $241.2 \text{ kgf/cm}^2$ 、引張強度は $21.0 \text{ kgf/cm}^2$ である。

**2.2 実験結果および考察** 衝撃力がモルタル角柱に作用すると、それは角柱内を応力波となって伝播し、また反射、干渉を起こすため静的な荷重を受ける場合とは異なった様子で破壊が起こる。応力波は、一般に固定境界面では符号が変わらず反射するので入射波と重なり合って大きな応力が生ずる。また、自由境界面では応力の符号が反転するので、圧縮の応力波が伝播する場合でも、引張応力が発生する。そのため、本実験のように圧縮衝撃力を受ける角柱でも引張破壊が起こる可能性がある。

弾性域の応力波形と塑性(破壊)域の応力波形の差異を明確にするために、非破壊時と破壊時の応力波形の実験結果と破壊状況を、それぞれ図2、図3(圧縮波を正と置くことにする)、図4に示す。非破壊時では、図2のように応力波の引張の第1波目以降、減衰しながらも同じ周期で伝播している。一方、破壊時では、図3(d)の破壊した場所に一番近い位置の応力波をみると、1.8ms以降、周期のずれが生じることから、このあたりで破壊が生じたと推論される。

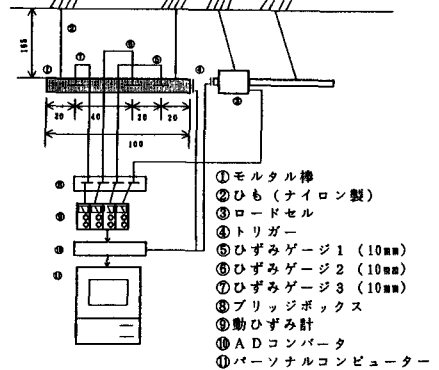


図1 実験装置

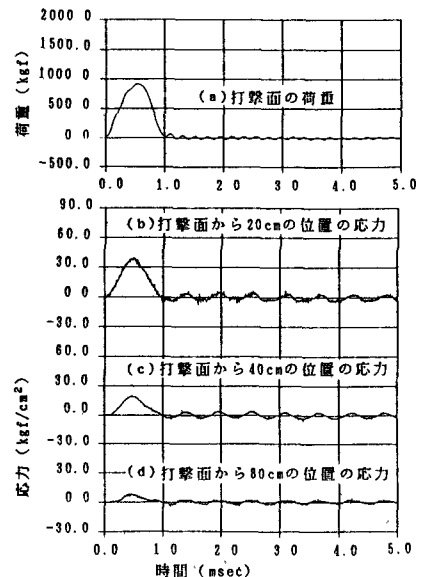


図2 非破壊時の荷重-時間曲線、ひずみ-時間曲線

また、波が伝わる伝播速度  $C$  (以後、波速と呼ぶことにする) は、波動理論から  $C = \sqrt{E/\rho} = \sqrt{(2.17 \times 10^5 / 2.02 \times 10^{-6})} = 3.28 \times 10^5 \text{ cm/s}$  であるので、モルタル棒を往復するのに要した時間を  $\tau$  (以後、基本周期と呼ぶ) とすると  $\tau = 2L/C = 0.61 \text{ ms}$  である。ただし、 $E$ : 圧縮試験から求めた弾性係数、 $\rho$ : モルタルの密度、 $L$ : モルタルの長さである。今、図3 (a) をみると荷重の載荷時間は、約  $0.9 \text{ ms}$  であり、モルタル棒を往復する時間  $0.61 \text{ ms}$  より長いので、実際には約  $0.7 \text{ ms}$  から引張応力が現れる。しかし、先にも述べたように実際に破壊した時刻  $1.8 \text{ ms}$  と一致しないのは、モルタルの材料強度のばらつきなどが原因として考えられる。

### 3. モルタルのモデル化と解析結果

**3.1 モデル化** 解析は、モルタルの塊を有限個の剛要素と仮定し、コンクリートの塊のもつ弾性的および非弾性的性質を剛体の接触点間に挿入したばねとダッシュポットによって表現する個別要素法<sup>1)</sup>を用いることにした。モルタルのモデル化は、要素 ( $6 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ ) の存在領域を  $60 \text{ cm} \times 160 \text{ cm}$ 、奥行きを  $6 \text{ cm}$  とした内部に配置し、2次元モデルの円筒要素を用いることにする。接触判定を行うための領域は高さ方向、幅方向を要素分割数に比例して分割した (図5参照)。以後、このモデルを基本として数値計算を進める。なお、要素接点の法線方向に関しては弾性ばね (ばね定数  $k_n$ ) とダッシュポット (減衰定数  $C_n$ ) を、同様に接線方向には弾性ばね (ばね定数  $k_s$ )、ダッシュポット (減衰定数  $C_s$ ) をそれぞれ並列に配置する。ここでは、簡単のために減衰定数  $C_n$ 、 $C_s$  は零とした。また、時間増分  $\Delta t$  は質量  $m$  の質点がばね定数  $k_n$  のばねを上下に有する1自由度系の固有周期  $T = 2\pi \sqrt{m/2k_n}$  を基準として定め、解析することにする。

#### 3.2 解析結果

(A) 一端固定棒の弾性範囲内での理論解との比較  
実験値との比較の前に、縦衝撃問題を解析でどの程度近似できるかを検討するために、まず、一端固定棒の弾性範囲での理論解との比較を行った。図6に示すようなステップ状の衝撃荷重を受ける一端固定棒を考える。ここでは、要素分割数による影響について検討してみることにする。要素分割数は66個 (2段×33)、268個 (4段×67)、1064個 (8段×133) の3種類を用

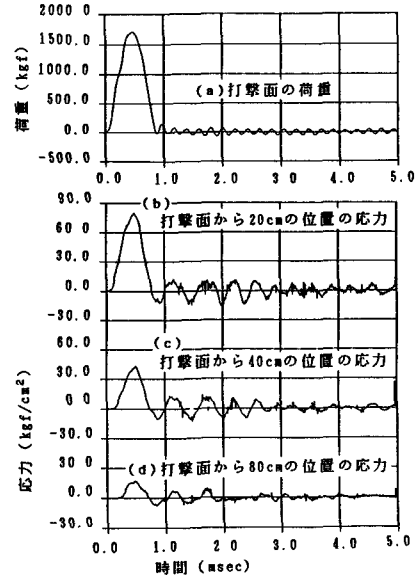


図3 破壊時の荷重-時間曲線、ひずみ-時間曲線



図4 破壊状況

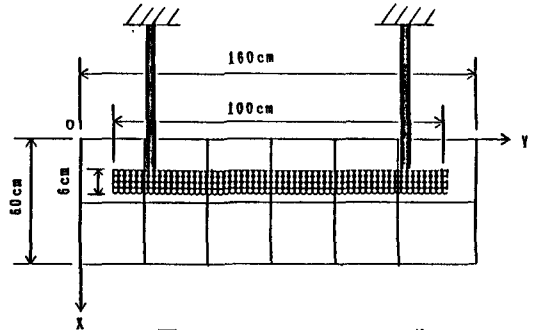


図5 モルタルのモデル化

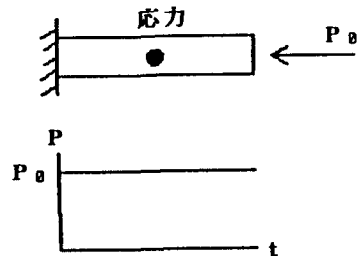


図6 ステップ荷重を受ける一端固定棒

い  $\Delta t = T/20$  で解析した。図7に本解析と理論解による棒中央の応力の応答曲線を示す。この図において応力は荷重  $P_0$  を静的に載荷した時の応力  $\sigma_0 = P_0/A$  で無次元化し、時間は基本周期  $\tau$  で無次元化した。計算は  $5\tau$  まで行った。応力は、理論解では規則的な矩形波であるが本解析はたち上がり後、振動しながら理論解に近づいていく。本解析が初期値問題であるため、時間の経過とともに理論解から外れていく傾向があるが、位相のずれはどれもほとんどない。この図において応力は要素分割数が多いほど振動が小さく、理論解の矩形波に近づく。

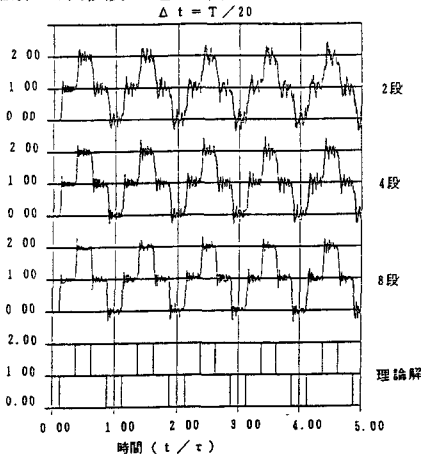


図7 要素分割数の変化による一端固定棒の中央の応力の応答曲線

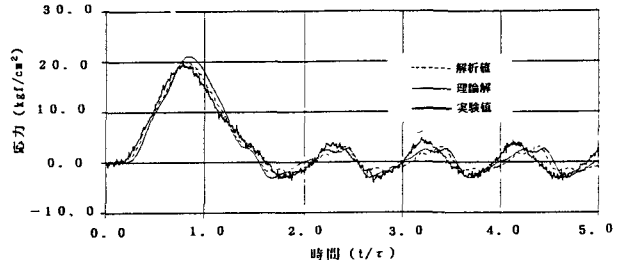


図8 非破壊時の打撃面から40cmの位置の応力の応答曲線

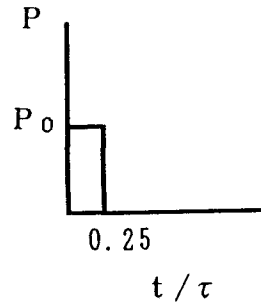


図9 荷荷時間の短い矩形の衝撃荷重

(B) 非破壊時の解析結果と実験値との比較

モデル化は (A) の解析結果に基づいて、 $\Delta t = T/20$ 、要素分割数は405個 (5段×81) を用いた。諸定数のうち試験体の寸法は実験で用いた試験体の値を、弾性係数は圧縮試験で得られた値を用いた。本解析で入力する荷重は、2 (a) の実験結果で得られた打撃面における荷重を用いた。

図8に打撃面から40cmの位置の実験値と特性曲線法による理論解と本解析の応力の応答曲線を示す。立ち上がりは実験値に比べ理論値と解析値がやや遅れることがわかる。また位相については時間の経過とともに理論値と解析値が実験値とずれていくことがわかる。圧縮応力のピークは、はじめは理論解が大きいですが、2波目以降実験値が大きく、また引張応力のピークは、解析値が理論値や実験値に比べ比較的小さいことがわかる。

(C) 破壊時の解析結果と弾性結果との比較 解析に用いたモルタルの構成関係については、モルタルの圧縮特性は圧縮破壊を考慮せず、引張特性に対しては引張強度に達した後、破断するものと仮定した。解析の対象は、(B)と同様に要素分割数405個 (5段×81)、 $\Delta t = T/20$ で行った。

(1) 荷荷時間の短い矩形の衝撃荷重が作用した場合 まず、はじめに図9のように荷荷時間の短い矩形の衝撃荷重が作用した場合を考える。図10 (a) は破壊状況を示し、○の数字は破壊した順序である。解析結果では、打撃面から77.5cmと75cm位置で引張応力は引張強度に達し破壊が認められた。そして、破壊した時刻は、77.5cmが  $t/\tau = 0.63$  で75cmが  $t/\tau = 0.64$  である。荷荷時間は  $t/\tau = 0.0 \sim 0.25$  であるので、最初の圧縮波が  $t/\tau = 0.5$  の時引張波にかわり、 $t/\tau = 0.625$ 以降に、モルタル棒中に引張応力が存在する。図10 (b), (c) は、それぞれ打撃面から80cm, 40cmの位置の弾性解と破壊した時の応力の応答曲線を示す。破壊した位置に近い (b) をみると、破壊が起こった時刻以降、弾性解と比較して周期の変化が

顕著に現れる。また、(c)のように破壊した位置から離れたところでは、破壊が起こった時刻より少し遅れて周期の変化が見られる。

(2) 実験結果で得られた荷重時間の長い衝撃荷重が作用した場合

次に図3 (a)の実験で得られた荷重時間の長い衝撃荷重をそのまま解析に入力する。図11 (a), (b), (c)は図9と同様で破壊状況と応答曲線である。(a)をみると破壊は①60cm→②70cm→③38.75cm→④51.25cm→⑤63.75cm→⑥42.5cm→⑦47.5cm→⑧77.5cmの順に起きた。(b)の80cmの位置のみで周期のずれが顕著に現れるのは、①60cmの位置の破壊と、80cmの位置に近い所で破壊が生じた②70cm破壊である。(c)も同様に、周期の変化が見られるのは①60cmの位置の破壊と40cmの位置に近い所で破壊が生じた③38.75cm, ④51.25cm, ⑥42.5cm, ⑦47.5cmである。例えば、④の破壊が起こった後、⑥の破壊が起こるまでに、周期の短い応力波が伝播しているのは③と④を境界面とした長さ12.5cmの小さな物体が孤立したためと考えられる。

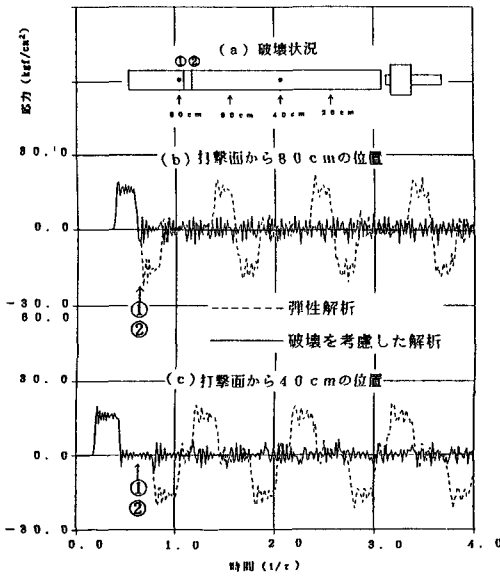


図10 荷重時間の短い矩形の荷重が作用した場合の破壊状況と40cm, 80cmの位置の応力の応答曲線

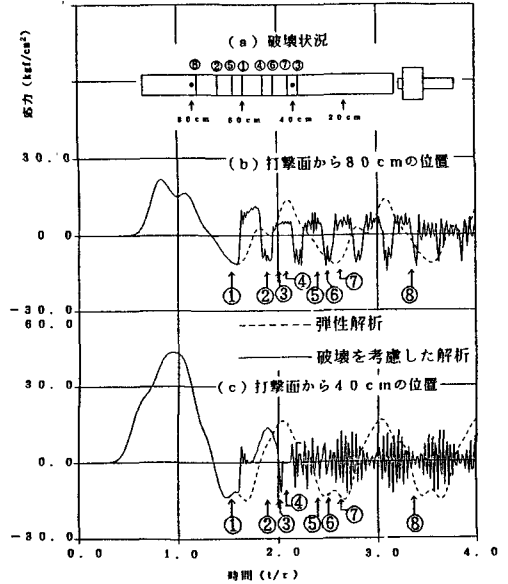


図11 実験で得られた荷重時間の長い荷重が作用した場合の破壊状況と40cm, 80cmの位置の応力の応答曲線

4. まとめ

本研究では、モルタル棒の縦衝撃問題を実験的ならびに数値解析的に検討した。本解析法は一次元弾性応力波問題を解くための有効な一解析法であることが示された。また、今後、材料が不均質であるモルタルやコンクリートの応力波による破壊の取り扱いにさらに検討が必要と考えるが、応力波による破壊も非常に簡便に取り扱うことができることを示した。

参考文献

1) 木山, 藤村: カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文集, N0. 333, pp13-46, 1985. 5