

個別要素法を用いたモルタル棒の縦衝撃解析

○金沢大学大学院 中田 吉彦
金沢大学工学部 正員 榎谷 浩
金沢大学工学部 正員 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・検討を行っている。

2. 実験概要

(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距離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(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/ch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 kgf/cm^2 、引張強度は 21.0 kgf/cm^2 である。

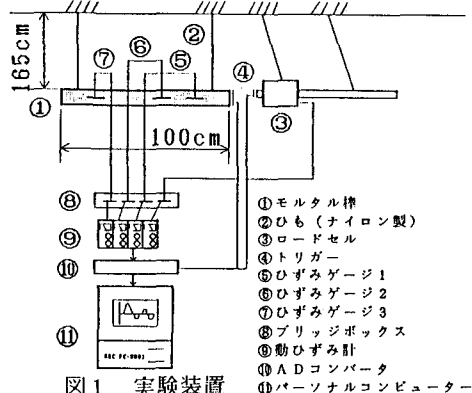


図1 実験装置

(2) 実験結果および考察 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の一例を、それぞれ図2、図3(圧縮波を正とおく)に示す。また、破壊は打撃面から約70cmの位置で起こった。非破壊時には、図2(b)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、破壊時には図3(b)をみると1.8ms以降、周期のずれが生じていることから、このあたりで破壊が生じたと推論される。

また、波が伝わる伝播速度Cは、波動理論から $C = \sqrt{E/\rho} = 3.28 \times 10^5 \text{ cm/s}$ であるので、モルタル棒を往復するのに要した時間を τ (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($2.17 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)、 ρ :モルタル棒の密度($2.02 \times 10^{-6} \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{cm}^4$)、L:モルタル棒の長さ(100cm)である。今、図3(a)をみると荷重の載荷時間は約0.9msであり、モルタル棒を往復する時間(0.61ms)

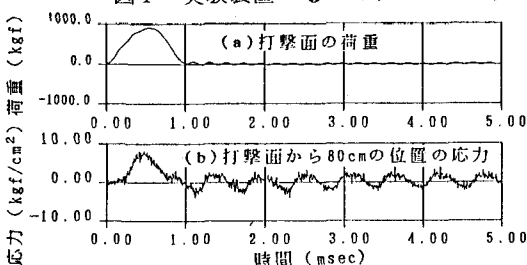


図2 非破壊時の荷重、応力-時間曲線

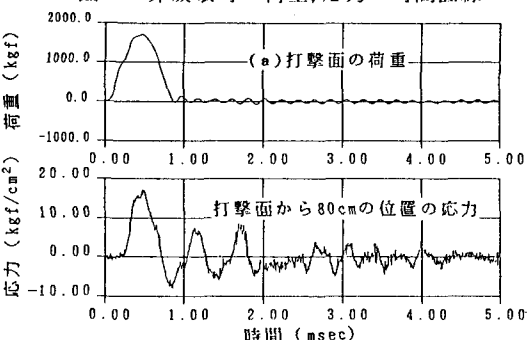


図3 破壊時の荷重、応力-時間曲線

より長いので、実際には約0.7ms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1.8msと一致しないのは、モルタル棒の材料強度のばらつきなどが原因として考えられる。

3. 解析結果 解析は、モルタル棒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¹⁾を用い

ることとした。時間増分 Δt は、質量 m の質点が、ばね定数 k_n (法線方向)のばねを上下に有する1自由度系の固有周期 $T=2\pi\sqrt{m/2k_n}$ を基準とする。なお、減衰は考慮せず零とした。

(1) 非破壊時の解析結果と実験値との比較

モデルは $\Delta t = T/20$ 、要素分割数は405個(5段 $\times$ 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。また、本解析で入力する荷重は、図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4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。この図において時間は基本周期 τ で無次元化した。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が、2波目で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。

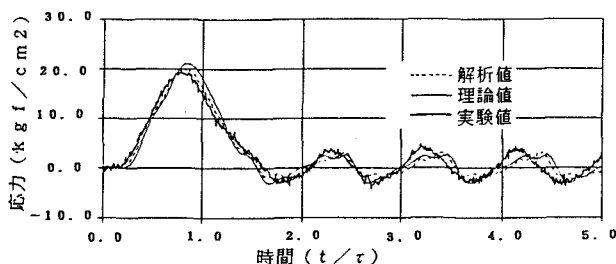


図4 非破壊時の打撃面から40cmの位置の応力の応答曲線

示す。この図において時間は基本周期 τ で無次元化した。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が、2波目で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。

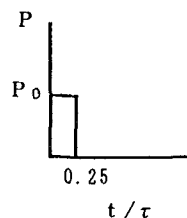


図5 荷重時間の短い矩形の衝撃荷重

(2) 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棒の構成関係については、モルタル棒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。解析は、

(1)と同様に要素分割数405個(5段 $\times$ 81)を用い、 $\Delta t = T/20$ で行った。荷重は図5のように荷重時間の短い矩形の衝撃荷重を入力した。図6(a)は破壊状況を示し、○の数字は破壊した順序である。破壊した位置は、打撃面から77.5cmと75cmの2ヶ所で、破壊した時刻はそれぞれ $t/\tau = 0.63$ 、 0.64 である。荷重時間は $t/\tau = 0.0 \sim 0.25$ であるので、最初の圧縮波が引張波に転ずる $t/\tau = 0.625$ 以降に、モルタル棒中に引張応力が存在する。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。図6(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認められた。

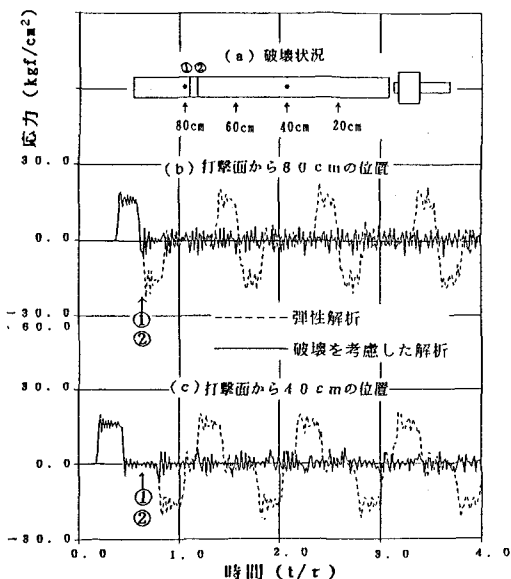


図6 荷重時間の短い矩形の荷重が作用した場合の破壊状況と40cm、80cmの位置の応力の応答曲線

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棒やコンクリートの応力波による破壊の取り扱い(構成関係など)にさらに検討が必要と考えられる。

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, NO. 33, pp13-46, 1985. 5