

四辺単純支持されたコンクリート矩形床板の弾塑性衝撃応答解析

専修大学北海道短期大学 正会員 三上 敬司

1. まえがき

近年、幾つかの研究機関では非線形衝撃解析コード Ls-Dyna3D などを用いて衝撃問題を解析し、解析結果と実験結果と比較して解析結果の妥当性について検討している。しかし、このような解析コードは高価なアプリケーションであることから、一般的に普及されていないようである。

そこで、本研究では三次元弾塑性有限要素法の動的応答解析用プログラムを用い衝撃実験結果における動的応答をシミュレートすることを目的として、衝撃荷重を受ける四辺単純支持コンクリート矩形床板の弾塑性挙動に関して弾性挙動の場合と比較検討する。

2. 実験の概要

衝撃実験はブリティッシュ・コロンビア大学土木工学科に設置されている大型衝撃実験装置を用いて行った。衝撃力は質量 578kg の重錘を落下高さ $H=250\text{mm}$ から自由落下させることによって発生させている。なお、重錘の先端 (Tip) 形状は平底で直径が 100mm の円形である。試験体は形状寸法 $400\times400\times75\text{mm}$ のコンクリート矩形床板で、写真-1 に示したように幅 50mm 四方の鋼製支持台上に単純支持されている。これより、スパン長は 300mm である。また、重錘が受ける衝撃力は Tip 内に埋め込まれているロードセルによって測定されている。床板中央裏面には床板載荷点直下の変位と床板の慣性力を

求めるために加速度計が取り付けられている。なお、コンクリートの 28 日圧縮強度は 40MPa になるように設計されている。

3. 非線形数値解析

3.1 非線形有限要素解析

非線形運動方程式は次式となる。

$$[M]\ddot{d} + [C]\dot{d} + [p(d, \dot{d})] = [f] \quad \cdots(1)$$

ここで、

[M]: 質量マトリックス [C]: 減衰マトリックス
 $[p(d, \dot{d})]$: 内部抵抗力のベクトル [f]: 外力のベクトル
 $\ddot{d}$: 正規化された加速度 $\dot{d}$: 正規化された速度
 d : 正規化された変位

3.2 コンクリートの材料特性

コンクリートの材料非線形モデルにおいては圧縮挙動では弾・粘塑性のモデル化に降伏面 F_0 と強度限界面 F_f の仮定を用いた。

$$F_0(\sigma, \sigma_0) = cI_1 + (c^2I_1^2 + 3\beta J_2)^{1/2} - \sigma_0 = 0$$

$$F_f(\sigma, \sigma_f) = cI_1 + (c^2I_1^2 + 3\beta J_2)^{1/2} - \sigma_f = 0 \quad \cdots(2)$$

ここで、 I_1 , J_2 はそれぞれ第 1 および第 2 応力不変量で、 σ_0 は降伏応力度、 σ_f は破壊応力度である。2 軸応力状態についてはクーパーの実験結果から、 $c=0.1775$, $\beta=1.335$ を用いた。引張挙動において、引張剛性は e 関数で表示し、次式より求めた。

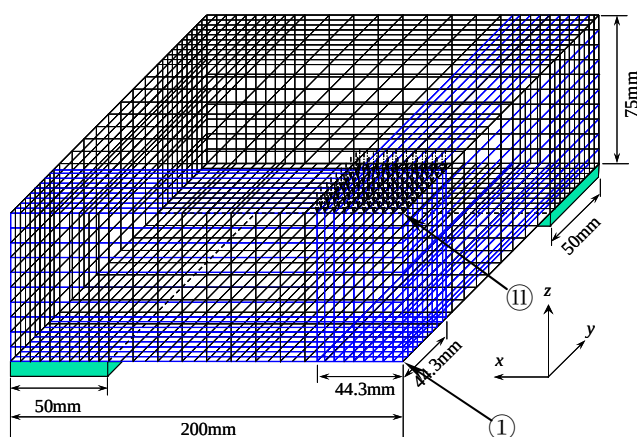


図-1 本解析モデル (実寸法の 1/4)

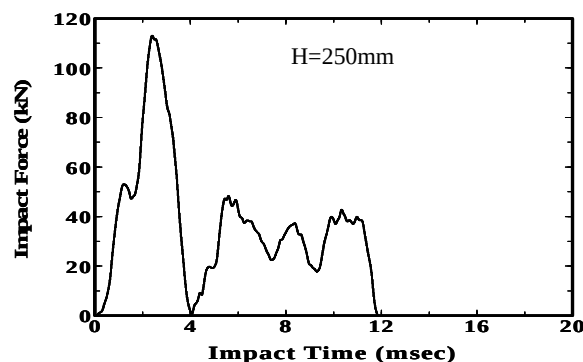


図-2 落下高さ $H=250\text{mm}$ の場合における重錘衝撃力の時刻歴応答

キーワード：弾塑性衝撃応答解析，三次元有限要素法，コンクリート床板

連絡先：専修大学北海道短期大学（〒079-0197 美瑛市字美唄 1610-1, TEL 0126-63-0249, FAX 0126-63-3666）

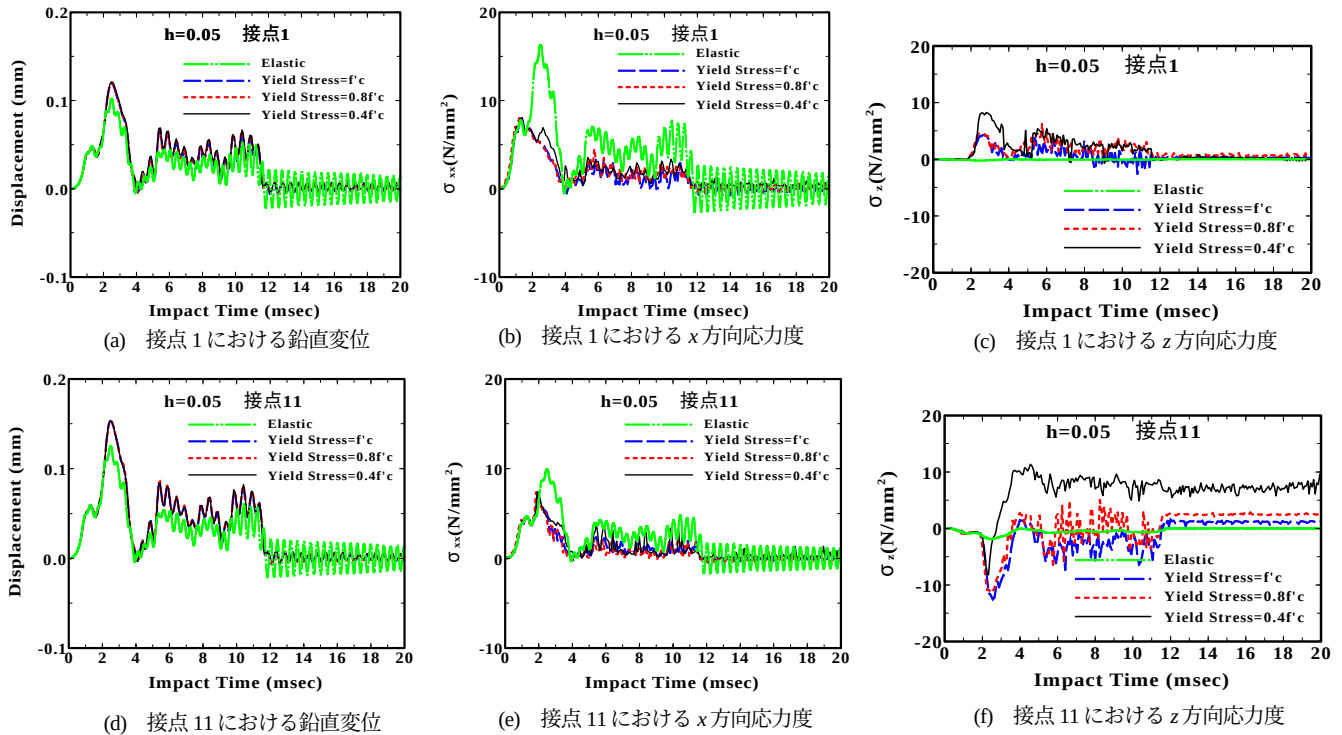


図-2 接点 1, 11 における z 方向変位, x 方向応力度, z 方向応力度の時刻歴応答波形

$$\sigma = E_0 \varepsilon \quad (\sigma \leq f_t')$$

$$\sigma = E_0 \varepsilon_0 e^{-(\varepsilon - \varepsilon_0)/\alpha} \quad (\sigma > f_t') \quad \dots(3)$$

ここで, E_0 はコンクリートの弾性定数 $= 3.5 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, ε はひび割れ域の引張ひずみ, ε_0 はひび割れひずみ, α は軟化定数である. 軟化定数 α は次式で表わされる.

$$\alpha = G_f / l_c E_0 \varepsilon_0, \quad l_c = (dV)^{1/3} \quad \dots(4)$$

ここで, G_f は破壊エネルギー ($= 0.1 \text{ kN/m}$), l_c はひび割れ判定におけるサンプリング点の特定値, dV はサンプリング点により表わされるコンクリート容積である.

4. 解析結果

図-1 に示した本解析モデルをコンクリート床板の 1/4 モデルとして, 要素全体は 8 節点固体要素でモデル化している. 節点数は 9,251 個, 要素数は 7,840 個である. 支持条件は供試体が周辺単純支持されていることにより, 支持部の z 方向の変位 1,144 点を拘束している. 荷重は実験データより得られた衝撃荷重を図-1 に示したようにモデル上部 100 節点に作用させている. なお, 載荷幅は実験に用いた重錘底面積を等分布荷重かつ $44.3 \times 44.3 \text{ mm}$ の矩形面積に換算して作用させている. 実験結果より, コンクリートの密度 ρ が 2.4 t/m^3 , ポアソン比 ν が 0.2, ひび割れ引張応力度が 7 N/mm^2 , 破壊ひずみが 0.0035 である. 数値積分は時間刻み $80 \mu\text{sec}$ で Newmark β 法 ($\beta_1=0.25$, $\gamma=0.5$) を用いて行った. 減衰は要素全体に Rayleigh 減衰を用いてその減衰定数 h を 0.05 とした.

図-2(a)~(f) は接点 1, 11 における z 方向変位, x 方向応力度, z 方向応力度の時刻歴応答波形を示している. なお, 各波形はコンクリートが弾性体, 降伏応力度を f_c , $0.8 f_c$, $0.4 f_c$ とした場合である. (a), (d) 図より, コンクリートが弾塑性体の最大変位では弾性体の場合に比べていずれも約 1.2 倍大きく, 弾塑性体の応答波形は荷重時間内では衝撃力波形と同じ波形を示しているが, 除荷後では急激に減少して弾性体の場合程顕著に自由振動波形を示していないことがわかる. (b), (e) 図より, 弾塑性体の x 方向応力度応答波形は弾性体の場合と比べて最大応答値が接点 1 では約 0.5 倍, 接点 11 では約 0.8 倍と弾性体の場合より全体的に低めの応答値を示していることがわかる. また, 弾塑性体の場合ではひび割れ引張応力度に達した後に, 急激に応答値が減少しているが, 弾性体の場合では 2 msec 以降もさらに増加していることがわかる. 一方, (c), (f) 図より, 弾塑性体の z 方向応力度応答波形 (接点 1) は降伏応力度が小さくなると逆に引張側の応答値が大きくなり, $0.4 f_c$ の最大応答値は f_c の場合に比べて約 2 倍程度大きな応答値を示し, 接点 11 の場合は弾塑性体の応答波形では圧縮側から引張側へ移行しているが, 弾性体の場合では応答値が小さくかつ圧縮応力度のみが発生していることがわかる. これより弾塑性体のエネルギーは弾性体の場合に比べて材料による逸散が見られることがわかった.