

(15) 衝撃荷重を受けるコンクリート床板の降伏条件における影響

Effect on Yield Condition of Simply Supported Concrete Plate under Impact Loadings

三上 敬司*

Takashi Mikami

*博士(工学), 専修大学北海道短期大学 みどりの総合科学科 (〒079-0197 北海道美唄市字美唄 1610-1)

キーワード: 衝撃, 降伏条件, コンクリート床板, 弾塑性衝撃応答解析
(impact, yield condition, concrete plate, elasto-plastic impulsive response analysis)

1. まえがき

コンクリート材料に用いる降伏条件は一般的に Mohr-Coulomb の条件式が適用され, Drucker-Prager の条件も Mohr-Coulomb と同様にコンクリートなどの体積塑性変形を伴う材料に適用され, Mohr-Coulomb 条件と似ており, von Mises 条件の拡張された形である¹⁾。また, 衝撃荷重を受けるコンクリート材料の降伏条件式の影響に関する研究では土木学会衝撃問題研究会²⁾が von Mises および Drucker-Prager の降伏条件式をコンクリート材料に適用し実験結果と解析結果の比較検討を行っている。その結果, 工学的に重要な最大変位に限定すると, 低中速度衝突程度では両者は類似した挙動を示すことを報告している。しかし, 衝撃問題では材料の降伏関数の相違が動的挙動に及ぼす影響に関して検討している研究報告がそれ程多く見当たらないようである。

そこで, 著者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^{3,4)}を用い衝撃実験結果における動的応答^{5,6)}をシミュレートすることを目的として, 降伏応力度の変化がコンクリート床板の衝撃挙動に及ぼす影響について検討してきている⁷⁾。それを踏まえて, 本研究では弾・粘塑性のモデル化に降伏面と強度限界面と仮定し,

Concrete3D および von Mises の降伏関数が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及ぼす影響に関して検討する⁸⁾。

2. 実験の概要

衝撃実験は図-1 に示したようにブリティッシュ・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。試験体は形状寸法が $400 \times 400 \times 75\text{mm}$ のコンクリート矩形床板で, 図-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 $f_c=40\text{MPa}$ になるように配合設計を行った。

3. 動的解析

3.1 コンクリート材料の降伏関数



図-1 重錘衝撃荷重を受けた四辺単純支持
コンクリート床板

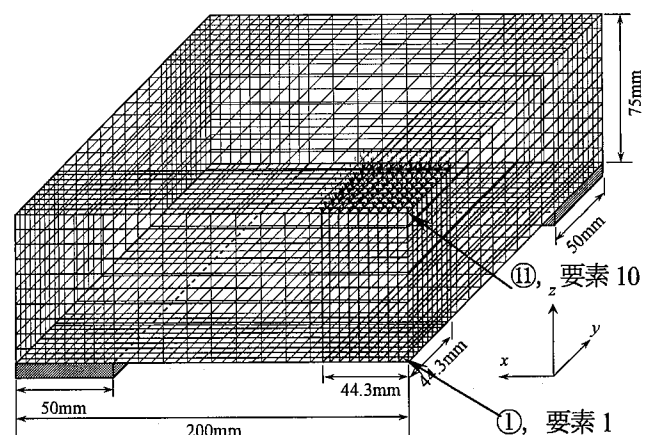


図-2 本解析モデル (実寸法の 1/4)

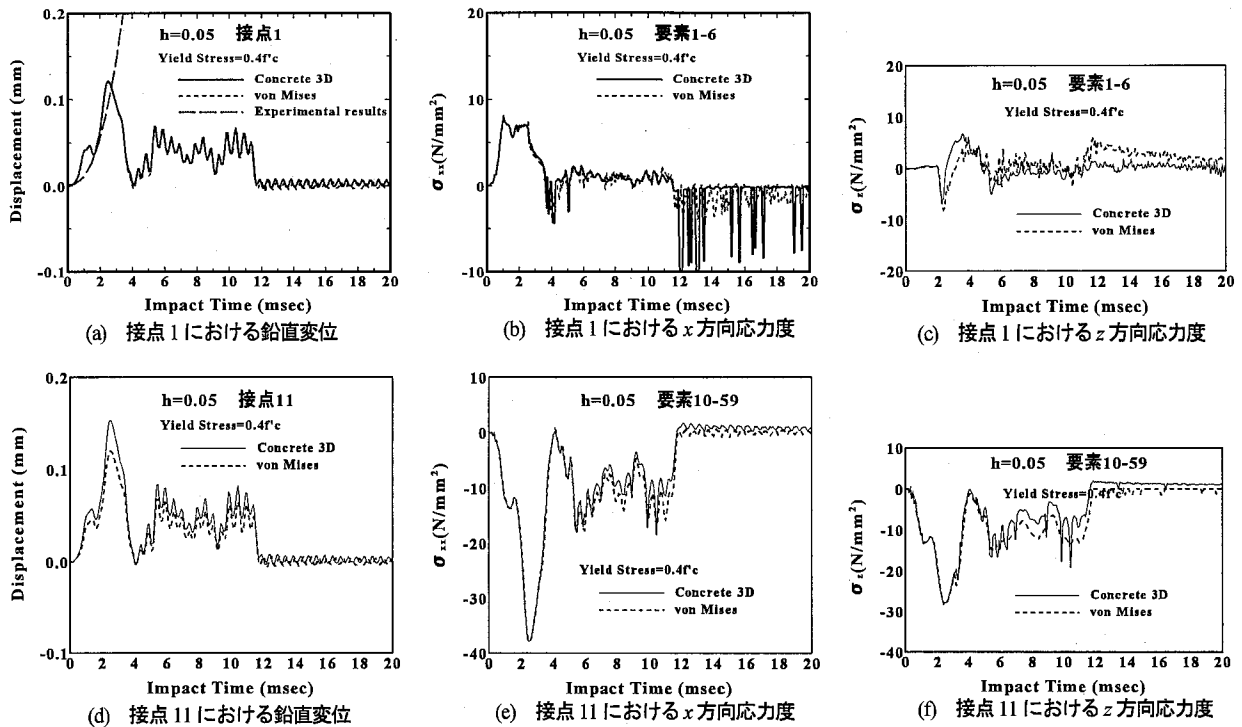


図-3 接点 1, 11 における z 方向変位, x 方向応力度, z 方向応力度の時刻歴応答波形

本研究に用いた降伏関数はコンクリートの材料非線形モデルの圧縮挙動を弾・粘塑性のモデル化に降伏面 F_0 と強度限界面 F_f と式(1)に示したように仮定した. 式(1)は c と β の値を設定し, 降伏関数を決定する.

$$F_0(\sigma, \sigma_0) = cI_1 + (c^2I_1^2 + 3\beta J_2)^{1/2} - \sigma'_0 = 0$$

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

ここで, I_1 は応力の 1 次不変量, J_2 は偏差応力の 2 次不変量で, σ_0 は降伏応力度, σ_f は破壊応力度である. 降伏関数は 2 軸応力状態におけるクーパーの実験結果から, Concrete3D の降伏条件は $c=0.1775$, $\beta=1.335$, von Mises の降伏条件では $c=0$, $\beta=1$ とした. また, 引張挙動は, 引張剛性に式(2)のような e 関数を用いた.

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

$$\sigma' = E_0 \varepsilon_0 e^{-(\varepsilon - \varepsilon_0)/\alpha} \quad (\sigma' > f_t) \quad \dots(2)$$

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.

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

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. また, ひび割れ発生後のモデル化を行い, ひび割れ発生モデルには一様ひび割れモデル (Smearred Model) を用いた.

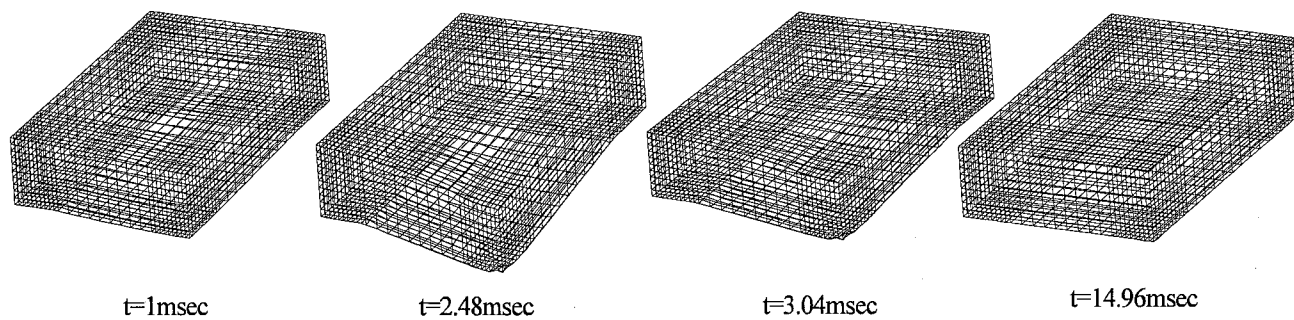
3.2 解析モデルおよび物理定数

図-2 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. 支持条件は図-2 のようにコンクリート床板が四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用い, その荷重を図-2 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. コンクリート材料の物理定数はコンクリートの密度が $\rho = 2.4 \text{ t/m}^3$, ポアソン比が $\nu = 0.2$, 降伏応力度 $\sigma'_0 = 0.4 f'_c$, ひび割れ引張応力度が $f_t = 7 \text{ MPa}$, 破壊ひずみが $\varepsilon'_{cu} = 0.0035$ と仮定した. 数値積分では文献 2) に従って時間刻み $80 \mu\text{sec}$ で Newmark β 法 ($\beta_1 = 0.25$, $\gamma_1 = 0.5$) を用いて計算した. 減衰項には要素全体に Rayleigh 減衰を用い, その減衰定数 h を 0.05 とした.

3.3 数値解析結果

図-3(a)~(f) は図-1 に示した節点 1, 11 における z 方向変位, 要素 1 (積分点 No.6), 10 (積分点 No.59) における x 方向および z 方向応力度の時刻歴応答波形を示している. なお, (a) 図には床板裏面に設置された加速度計より得られた応答加速度値を 2 回数値積分して求めた載荷点直下における鉛直方向変位 (破線) を示している. (a) 図では, 載荷時間 11.84 msec まで両降伏条件における応答値には差異が見られないものの, その後の自由振動状態では両者に若干差が見られる. 一方, 実験値と両解析値を比較すると, 両解析値は衝撃初期の約 3 msec まで実験結果とほぼ一致しているものの, その後, 実験結果では供試体が破壊に至っていることから放物線的に急激に増加していることがわかる. このことから, 両解析値



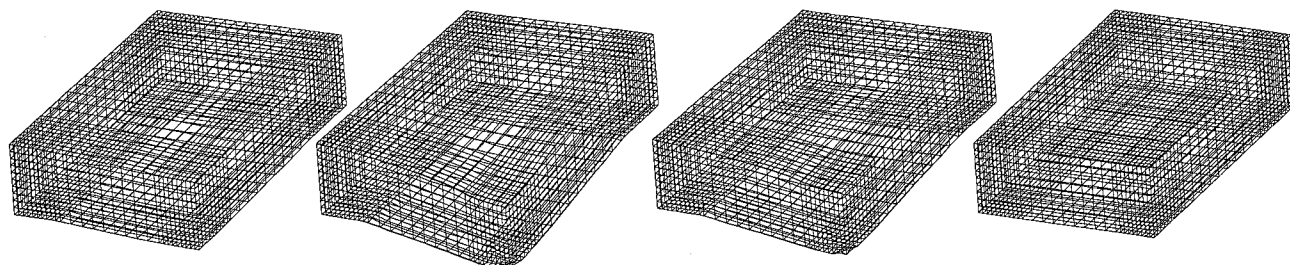
t=1msec

t=2.48msec

t=3.04msec

t=14.96msec

(a) 3D コンクリートの場合



t=1msec

t=2.48msec

t=3.04msec

t=14.96msec

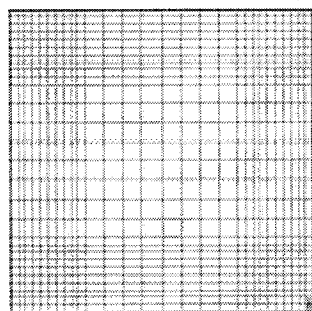
(b) von Mises の場合

図-4 コンクリート床板の変位分布

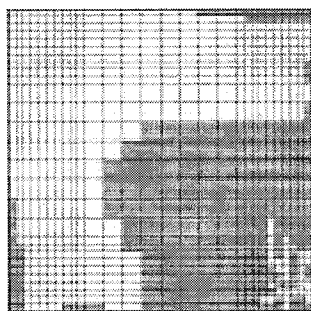
1次ひび割れ

2次ひび割れ

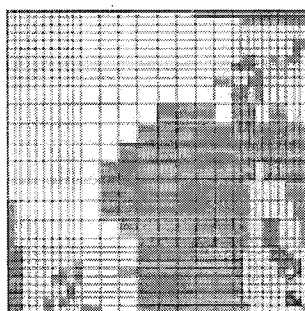
圧潰



t=1msec



t=2.48msec

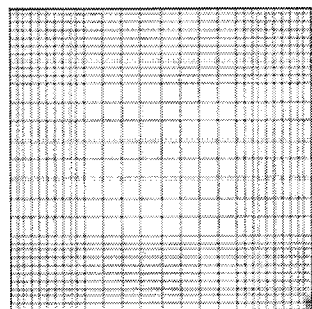


t=10.0msec

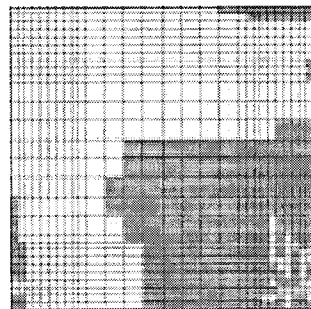


t=14.96msec

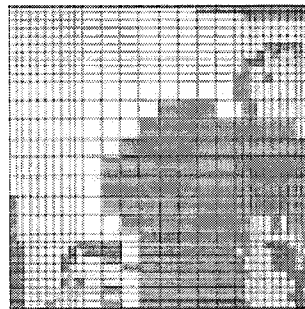
(a) 3D コンクリートの場合



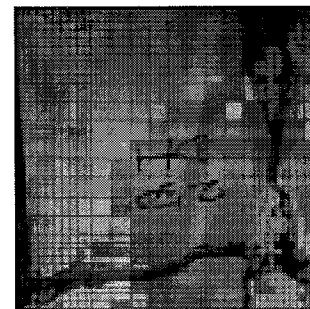
t=1msec



t=2.48msec



t=10.0msec



t=14.96msec

(b) von Mises の場合

図-5 コンクリート床板裏面のひび割れ位分布

は衝撃初期まで実験結果とほぼ一致しているものの、その後の両者の挙動は異なっていることがわかる。(b)図での両解析結果は(a)図と同様に載荷時間以内まではほぼ一致しているものの、その後は両者の応答値に差が見られる。(c)図は床板中央下面における z 方向応力度を示している。 z 方向応力度では衝撃初期で圧縮応力となり、その後は引張応力へ移行していることがわかる。両降伏条件を比較すると、両者の立ち上がり時間はほぼ一致しているものの、その後はやや応答波形が異なっていることがわかる。(d)図ではConcrete3Dの応答値の方がvon Misesの場合に比べて全体的にやや大きめな値を示している。(e)図および(f)図の応答波形では載荷荷重直下であることにより、両者ともに主に圧縮応力度が作用していることがわかる。その応答値は両者とも主波動の応答値までほぼ一致しているものの、その後両者はやや異なった応答値を示していることがわかる。

図-4は任意の時間 $t=1, 2.48, 3.04, 14.96\text{msec}$ におけるConcrete3Dおよびvon Misesの場合のコンクリート床板裏面の変位分布を示している。コンクリート板の変位分布は載荷初期では主に載荷部分に変位が集中し、 $t=2.48\text{msec}$ で最大変位となりその応答が載荷面積部分の局所的な変位のみならず板全体に拡がり、 $t=3.94\text{msec}$ では変位応答値が徐々に減少し、除荷後($t=14.96\text{msec}$)では変位応答値も小さくなり自由振動状態を呈していることがわかる。両降伏条件を比較すると、両者は概ね酷似した変位分布を示していることがわかる。

図-5は任意の時間 $t=1, 2.48, 10.0, 14.96\text{msec}$ における両降伏条件のコンクリート床板(1/4モデル)のひび割れ分布を示している。なお、実験結果と解析結果のひび割れ分布を比較するために、破壊時における床板(1/4)のひび割れ状況を $t=14.96\text{msec}$ で示し、また解析結果では1次、2次ひび割れおよび圧潰を任意時間に対するひび割れ分布の変化を示している。両解析におけるひび割れ分布では $t=1\text{msec}$ における載荷点直下で1次ひび割れが発生し、 $t=2.48\text{msec}$ では載荷面積内で2次ひび割れが発生し、1次ひび割れは両エッジ部分およびスパン中央から支持部の約1/2近傍まで拡がっていることがわかる。 $t=10\text{msec}$ では圧壊が載荷点近傍から上方に向いおよび支持部の一部の床板に発生している。 $t=14.96\text{msec}$ ではひび割れが $t=10\text{msec}$ に比べて載荷面積の約1/2および支持部の一部にさらに拡がっていることがわかる。また、両降伏条件におけるひび割れ分布は両者ともにほぼ酷似していることがわかる。両降伏条件と実験結果と比較すると、両解析結果は載荷面積および支持部辺りの損傷度が大きい部分で概ね実験結果におけるひび割れ分布をシミュレートしていることがわかる。

4. まとめ

本研究では弾・粘塑性のモデル化に降伏面と強度限界面と仮定し、Concrete3Dおよびvon Misesの降伏関数が

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及ぼす影響に関して検討した。その結果を以下のようにまとめた。

- 1) 床板中央底面における z 方向変位の応答波形では、降伏関数の相違による影響はほとんど見られず、また実験結果と比較すると立ち上がり時間や最大値に到達する時間までの波形は両者が酷似していることがわかった。一方、載荷重直下では降伏条件によって応答値に差が見られることがわかった。
- 2) 床板中央底面における x および z 方向応力度の応答波形では、第1応答波形までにはほぼ酷似した波形を示しているものの、その後の波形ではやや差が見受けられることがわかった。
- 3) コンクリート床板裏面の変位分布では、両降伏条件ともに概ね酷似した分布を示していることがわかった。
- 4) コンクリート床板のひび割れ分布では、両降伏条件におけるひび割れ分布は若干異なっているものの、両者は概ね一致しているものと思われる。実験結果と比較すると両条件ともにコンクリート床板の載荷面積および支持部エッジ辺りの損傷度が大きい部分では概ね実験結果のひび割れ分布をシミュレートしていることがわかった。

参考文献

- 1) Chen, W.F. (安達ら監訳): コンクリート構造物の塑性解析, 丸善株式会社, 1985.
- 2) 土木学会編: 衝撃実験・解析の基礎と応用, 構造工学シリーズ15, 2004.
- 3) Ernest, H.: Numerical Methods and Software for Dynamic Analysis of Plates and Shells, Pineridge Press, 1988.
- 4) 真下 和彦, 源 一臣, 佐藤 由教, 熊田 陽志, 鈴木 悠子: 衝撃線荷重を受ける炭素短繊維補強コンクリート開口部付円筒殻の終局耐力, 東海大学紀要工学部, Vol.41, No.2, pp.77-82, 2001.
- 5) Sukontasukkul, P., Mindess, S., Banthia, N. and Mikami, T.: Impact Resistance of Laterally Confined Fibre Reinforced Concrete Plates, Material and Structures / Materiaux et Constructions, Vol. 34, No.244, December, 2001.
- 6) 三上 敬司: 四辺単純支持された鋼繊維補強コンクリート床板の耐衝撃挙動, 専修大学北海道短期大学環境科学研究所報告集, No.10, pp.39-46, 2003.
- 7) 三上 敬司: 四辺単純支持コンクリート矩形床板の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 第62号, 2006.2.
- 8) 三上 敬司: 衝撃荷重を受けるコンクリート矩形床板の降伏条件による影響, 土木学会第61回年次学術講演概要集, pp.349-350, 2006.9.