

降伏条件が衝撃荷重を受けるコンクリート床板に及ぼす影響

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

専修大学北海道短期大学 みどりの総合科学科 ○ 三上 敬司 (Takashi Mikami)

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、降伏応力度的変化がコンクリート床板の衝撃挙動に及ぼす影響や弾・粘塑性のモデル化に降伏面と強度限界面と仮定し、Concrete3D、von Mises の降伏関数が及ぼす影響について検討している^{7),8),9)}。それらの結果を踏まえて、本研究では前述した降伏関数と Drucker-Prager 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比較検討する。

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・コロニ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=250mm 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 (Tup) 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 400×400×75mm 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 Tup 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

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 、 λ 、 β の値を設定し、降伏関数を決定する。

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

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

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 Kupher の実験結果から、Concrete3D の降伏条件の場合は $c=\lambda=0.1775$ 、 $\beta=1.335$ 、von Mises の場合では $c=\lambda=0$ 、 $\beta=1$ とした^{3),4)}。また、Drucker-Prager の場合は図-1 に示した Kupher の実験結果¹⁰⁾を近似して得られた直線より、 $c=0.1$ 、 $\lambda=0$ 、 $\beta=1/3$ 、 $\sigma'_0=0.48f'_c$ とした。また、引張挙動は、引張剛性に式(2)に示す e 関数を用いた。

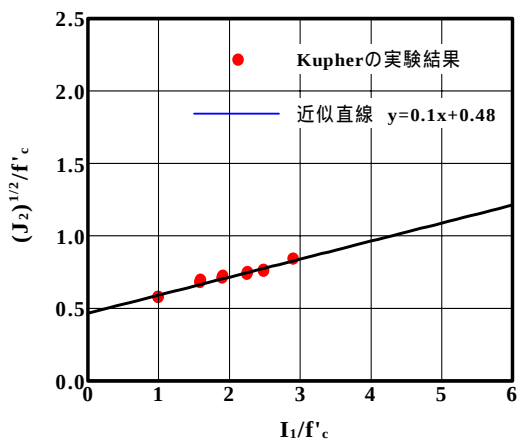


図-1 Drucker-Prager の破壊基準
(Kupher の実験結果より)

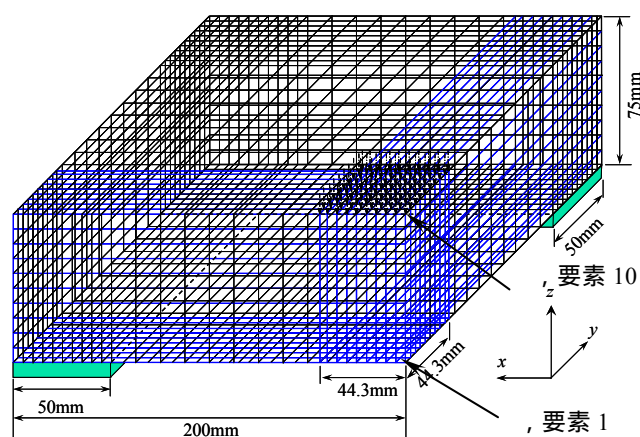


図-2 本解析モデル (実寸法の 1/4)

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

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

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、 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(Smeared Model)を用いた。

3.2 解析モデルおよび材料物性値

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材料物性値は表-1に示したように、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。数値解析条件に関しては表-1に示したように、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。

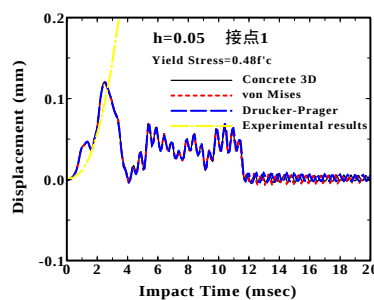
3.3 数値解析結果

3.3.1 z 方向変位および x 方向応力度の時刻歴応答波形

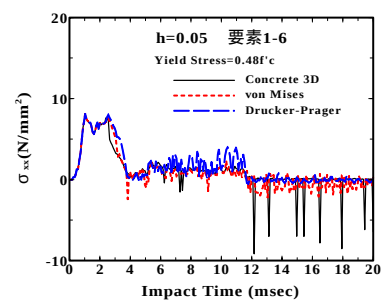
図-3(a)~(d)は図-2に示した節点1, 11における z 方向変位、要素1(積分点No.6)、10(積分点No.59)における x 方向応力度の時刻歴応答波形を示している。なお、(a)図には床板裏面に設置された加速度計より得られた応答加速度値を2回数値積分して求めた載荷点直下における鉛直方向変位(一点鎖線)を示している。(a)図より、各降伏条件における応答波形は、 $t = 2.49 \text{ msec}$ で最大応答値を示し、除荷後は応答値が急激に減少し自由振動状態を呈していることがわかる。3つの降伏条件を比較すると、各応答値は載荷時間11.84msecまでほぼ一致し、除荷後は固有周期に相違が見られる。一方、実験値

表-1 材料物性値と数値解析条件

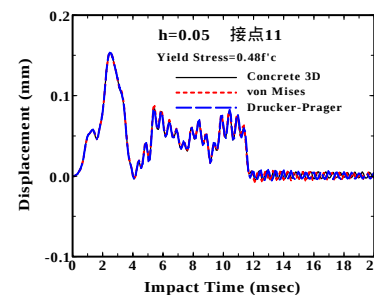
コンクリートの材料物性値	数値解析条件
密度 $\rho = 2.4 \text{ t/m}^3$	数値積分: Newmark β 法 ($\beta = 0.25$, $\gamma = 0.5$) 時間刻み: $8 \times 10^{-5} \text{ sec}$
弾性係数 $E_0 = 3.5 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ ポアソン比 $\nu = 0.2$	減衰: Rayleigh 減衰, 定数 $h = 0.05$
圧縮強度 $\sigma'_c = 40 \text{ MPa}$, 降伏応力度 $\sigma'_0 = 0.4 \sigma'_c$ ひび割れ引張応力度 $f_t = 7 \text{ kN/m}^2$	ひび割れ発生モデル: 一様ひび割れモデル (Smeared Model)
破壊ひずみ $\varepsilon'_c = 0.0035$	ひずみ速度効果を考慮 に入っていない
破壊エネルギー $G_f = 0.1 \text{ kN/m}$	せん断保持なし



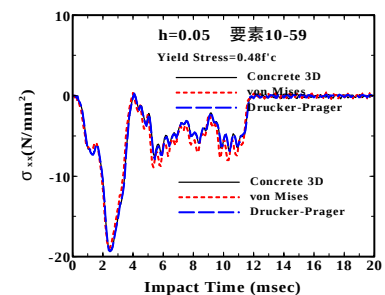
(a) 接点1における鉛直変位



(b) 接点1における x 方向応力度



(c) 接点11における鉛直変位

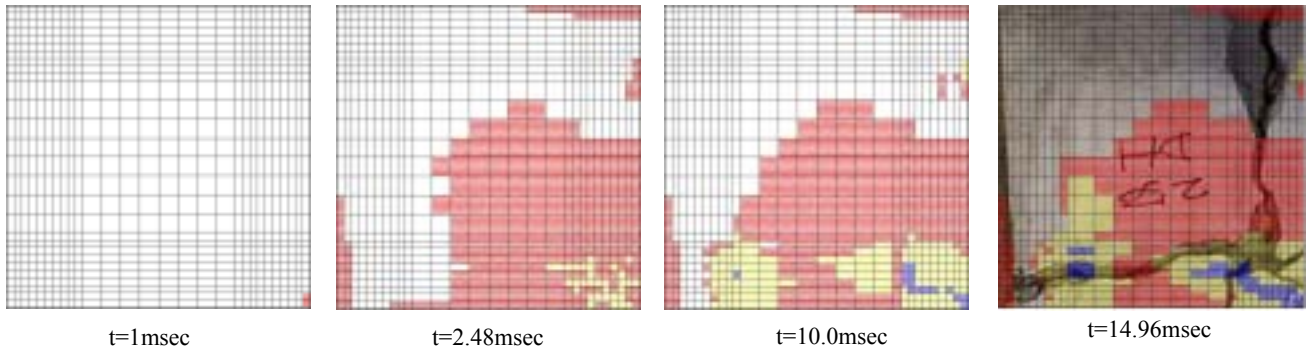


(d) 接点11における x 方向応力度

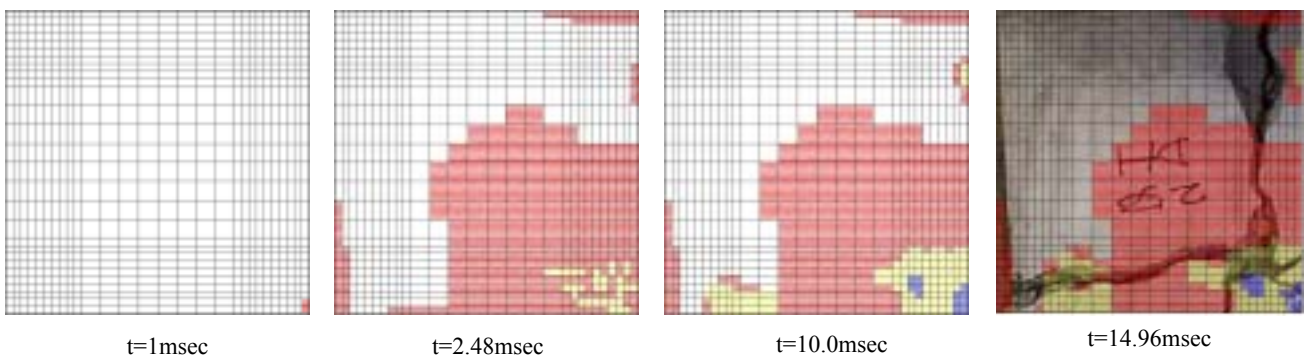
図-3 接点1, 11における z 方向変位,
要素1, 10における x 方向応力度の時刻歴応答波形

と各解析値を比較すると、各解析値は衝撃初期の約3msecまで実験結果とほぼ一致しているものの、その後、実験結果ではコンクリート板が破壊に至っていることから急激に放物線的に増加していることがわかる。このことから、各解析値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)図における各主応力波形はほぼ酷似しているものの、その後はいずれの解析結果とも高周波波形の影響を受けている。特に、Concrete3Dの場合では除荷後に高周波波形が顕著に見られる。このことは x 方向応力度が十分収斂していないことによる影響であるものと推測される。(c)図でも(a)図と同様に載荷時間内では各応答波形はほぼ一致しているものの、除荷後では固有周期

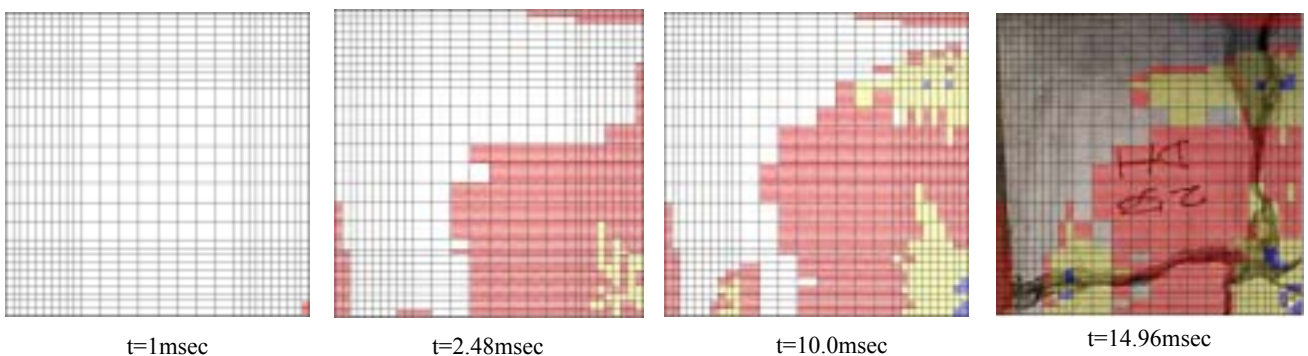
 1次ひび割れ
  2次ひび割れ
  破壊



(a) Concrete3D 場合



(b) von Mises の場合



(c) Drucker-Prager の場合

図 - 4 コンクリート床板裏面のひび割れ位分布

主に圧縮応力度が作用していることがわかる。その応答値はいずれも第一応答波形までほぼ一致しその後はやや異なった固有周期を示しているものの、概ね酷似した応答波形を示しているものと思われる。

3.3.2 コンクリート床板裏面のひび割れ位分布

図 - 4 は任意の時間 $t=1, 2.48, 10.0, 14.96$ msec における各降伏条件のコンクリート床板裏面(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、実験終了時における床板裏面(1/4)のひび割れ状況を $t=14.96$ msec のみで示し、また解析結果は1次、2次ひび割れおよび破壊を任意時間に対するひび割れ分布の変化を示している。Concrete3D のひび割れ

分布では $t=1$ msec における載荷点直下で1次ひび割れが発生し、 $t=2.48$ 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部から支持部の一部まで広がっていることがわかる。 $t=10$ msec では破壊が載荷点近傍から斜め横方向に向いおよび支持部の一部の床板に発生している。 $t=14.96$ msec ではひび割れが $t=10$ msec に比べて横方向へおよび支持部の一部にさらに広がっていることがわかる。しかし、実験結果の上部のやや大きな損傷部については解析結果では一次および二次ひび割れが狭い範囲に発生している程度でありシミュレートしていない。 $t=1, 2.48$ msec における Von Mises の場合では Concrete3D の場合とほぼ酷似している。 $t=10$ およ

び14.96msecではConcrete3Dの場合と比較すると両者のひび割れ分布が若干異なっているものの、概ね大差はないものと思われる。実験結果と比較すると、Von Misesの場合ではConcrete3Dの場合とほぼ同様な分布性状を示し、Concrete3Dの場合と同様にそれ程分布性状が酷似していないものと思われる。Drucker-Pragerの場合は1,2.48msecではConcrete3D, von Misesの場合と概ね酷似しているひび割れ分布を示していることがわかる。10および14.96msecにおけるDrucker-Pragerの場合は右上部の支持部に一次および2次ひび割れが広がっており、両降伏条件とは明らかにひび割れ分布が異なっていることが分かる。実験結果と比較すると、Drucker-Pragerの場合は両降伏条件より実験結果のひび割れ分布を比較的に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, von Mises および Drucker-Prager 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) 載荷直下および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顕著な差が見られず、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。
- 2) 載荷直下および床板中央底面における x 方向応力度の応答波形では、三者は第1応答波形までにほぼ酷似した波形を示しているものの、その後の応答波形や固有周期にやや差が見受けられることがわかった。
- 3) コンクリート床板のひび割れ分布では、Drucker-Prager の場合は Concrete3D および Von Mises の場合に比して

実験結果のひび割れ分布を比較的に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 洋, 河角 誠, 色部 誠監訳): 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.
- 9) 三上 敬司: 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, 土木学会第8回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.93-96, 2006.11.
- 10) Kupfer, H., Hilsdorf, H.K., Rüsch, H: Behavior of concrete under biaxial stress, ACI Journal, pp. 656-666, August, 1969.