

単純支持コンクリート床板の衝撃挙動に及ぼす軟化係数の影響

Effect on Softening Parameter of Simply Supported Concrete Slab 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

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¹⁾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研究の目的とし、弾・粘塑性性のモデル化に降伏面と強度限界面と仮定し、Drucker-Prager型の降伏関数を用いた弾塑性動的応答解析を行っている。著者は落下高さH=250mmにおける降伏応力度、ひび割れ引張応力度の変化、床板を支持する鉛直方向拘束数がコンクリート床板の衝撃挙動に及ぼす影響などについて検討してきた^{2,3)}。その結果、降伏応力度 $\sigma_0=0.1f_c$ 、ひび割れ引張応力度 $f_t=0.1f_c$ とした場合、また支持部では鉛直方向拘束数が支持部全体に作用させた場合、支持部にもひび割れが発生しているものの床板裏面のひび割れ分布を概ね酷似していることが明らかとなった。さらにH=500mmにおけるひび割れ発生ひずみがコンクリート床板の衝撃挙動に及ぼす影響についても検討した⁴⁾。その結果、ひび割れ発生ひずみ $\epsilon_0=0.0064 \epsilon'_{cu}$ の場合はH=250mmの場合と同様に支持部にもひび割れが発生しているものの、コンクリート床板裏面のひび割れ分布に概ね酷似していることを明らかにした。図-2に示したように、材料の圧縮挙動および引張挙動において破壊後の軟化現象を検討することも肝要であると思われる。

以上より、本研究ではH=500mmにおける圧縮挙動における降伏応力度および破壊後の軟化係数がコンクリート床板の衝撃挙動に及ぼす影響に関して実験結果⁵⁾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⁵⁾。衝撃力は質量578kgの重錘を所定の高さ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

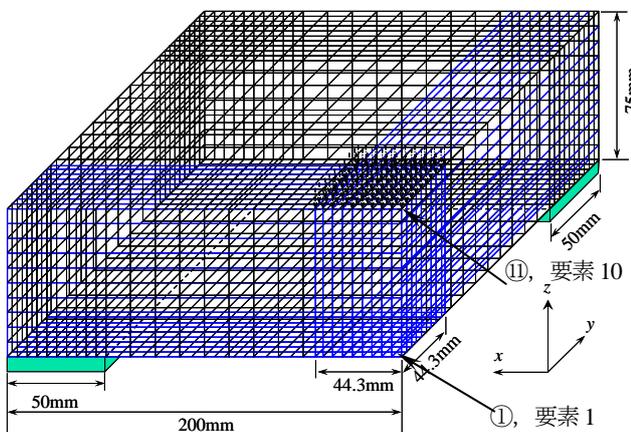


図-1 本解析モデル (実寸法の1/4)

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 $f_c=44.5\text{MPa}$ 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¹⁾。式(1)は c, β の値を設定し、降伏関数を決定する。

$$\begin{aligned} F_0(\sigma, \sigma_0) &= cI_1 + (c^2I_1^2 + 3\beta J_2)^{1/2} - \sigma_0 = 0 \\ F_f(\sigma, \sigma_f) &= cI_1 + (c^2I_1^2 + 3\beta J_2)^{1/2} - \sigma_f = 0 \quad \dots(1) \end{aligned}$$

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。式(1)で示したDrucker-Prager型の降伏関数では2軸応力状態におけるKupherの実験結果から $c=0.1775, \beta=1.335$ となる⁶⁾。図-2はエネルギー逸散による降伏応力度および破壊応力度の変化を示している。それらの応力度は次式で表される。

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \alpha_1 f'_c & (W_p \leq W_p^f) \\ \sigma_0 &= \alpha_1 f'_c \exp(-\alpha_c k) & (W_p > W_p^f) \dots(2) \\ \sigma_f &= \beta_0 f'_c (1 - \beta_1 W_p) & (0 < W_p < W_p^f) \end{aligned}$$

ここで、 α_1 :弾性限界値、 β_0, β_1 :実験結果から決定されるパラメータ、 α_c :破壊後の軟化係数(=5, 10, 1000)、 W_p :粘塑性エネルギー密度、 W_p^f :破壊応力度に達した場合の粘塑性エネルギー密度 $k := W_p - W_p^f$

引張挙動では、図-3に示したように引張軟化曲線を用い、式(3)に示したように引張剛性に e 関数を用いている。

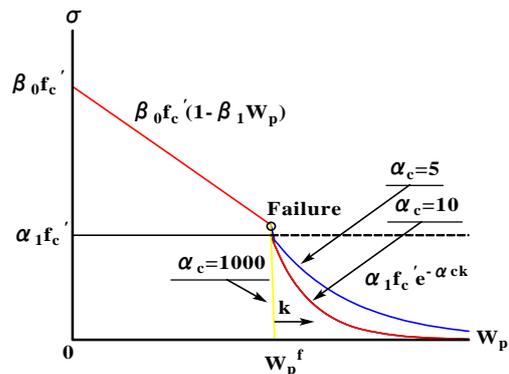


図-2 エネルギー逸散による降伏・破壊応力度の変化

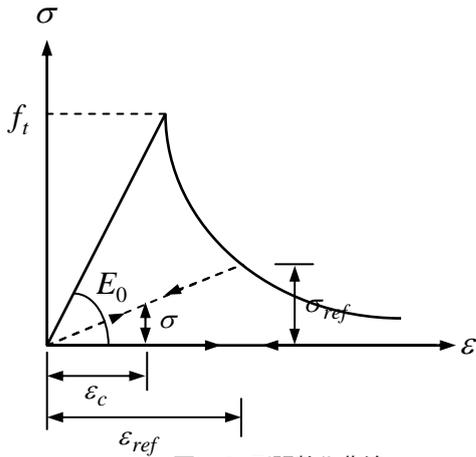


図-3 引張軟化曲線

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

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

ここで、 E_0 ：コンクリートの弾性定数 $=3.5 \times 10^7 \text{kN/m}^2$ 、 ε ：ひび割れ域の引張ひずみ、 ε_0 ：ひび割れ発生ひずみ、 α ：引張軟化係数である。その軟化係数 α は次式で表わされる。

$$\alpha = (G_f - 1/2 l_c E_0 \varepsilon_0^2) / l_c E_0 \varepsilon_0 \quad l_c = (dV)^{1/3} \quad \dots(4)$$

ここで、 G_f ：破壊エネルギー、 l_c ：ひび割れ判定におけるサンプリング点の特定値、 dV ：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-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。支持部は図-1 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、本論文では支持部の z 方向変位 1,144 節点を拘束している。荷重は図-4 に示したように実験結果から得られた衝撃荷重を用い、その荷重をモデル上部 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 $\sigma_0 = 0.2, 0.3 f_c$ 、ひび割れ発生ひずみが $\varepsilon_0 = 0.0064 \varepsilon'_{cu}$ 、破壊ひずみが $\varepsilon'_{cu} = 0.003$ 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 1) に従って時間刻み $8 \mu\text{sec}$ で Newmark β 法 ($\beta = 0.25, \gamma = 0.5$) 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 0.1 とした。

3.3 数値解析結果

3.3.1 z 方向変位および x, z 方向応力度の時刻歴応答波形

図-5(a)~(f)は降伏応力度 $\sigma_0 = 0.2, 0.3 f_c$ における破壊後の軟化係数 $\alpha_c = 5, 10, 1000$ とした場合、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 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

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 ($\beta = 0.25, \gamma = 0.5$)
弾性係数 $E_0 = 3.5 \times 10^7 \text{kN/m}^2$	
ポアソン比 $\nu = 0.2$	・時間刻み： $8 \times 10^{-6} \text{sec}$
圧縮強度 $f_c = 44.5 \text{MPa}$	
弾性限界値 $\alpha_0 = 0.2, 0.3$	・減衰：Rayleigh 減衰, 減衰定数： $h = 0.1$
ひび割れ発生ひずみ $\varepsilon_0 = 0.0064 \varepsilon'_{cu}$	
破壊ひずみ $\varepsilon'_{cu} = 0.003$	・ひび割れ発生モデル： 一様ひび割れモデル (Smeared Model)
破壊エネルギー $G_f = 0.1 \text{kN/m}$	
$\alpha_c = 5, 10, 1000$	・ひずみ速度効果を考慮に入 れていない
$\beta_0 = 1.836 \quad \beta_1 = 1.088$	
	・せん断保持なし

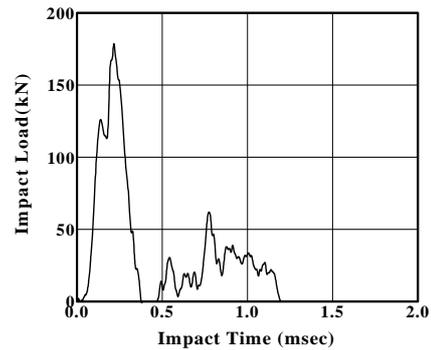


図-4 落下高さ $H = 500 \text{mm}$ における衝撃力の時刻歴応答

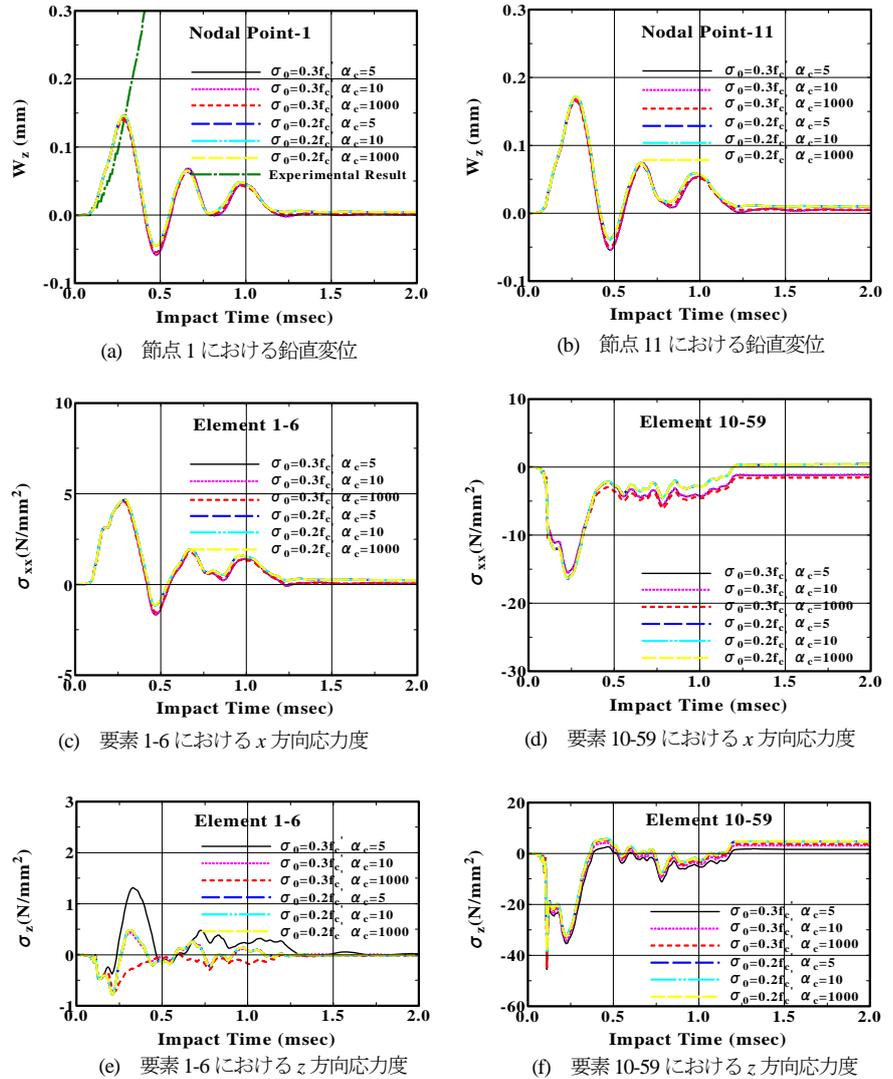
られた応答加速度値を 2 回数値積分して求めた載荷点直下における鉛直方向変位 (一点鎖線) を示している。(a)図は、載荷中央底部における z 方向変位応答波形を示している。応答波形は $t = 0.288 \text{msec}$ で最大応答値 (0.14mm) を示し、除荷後 ($t = 1.192 \text{msec}$) の応答波形は急激に減少し、その後は残留変位を僅かながら生じているものの明確な自由減衰振動状態を呈していないことがわかる。両降伏応力度を比較すると、最大変位応答値は $\sigma_0 = 0.2 f_c$ の場合の方がやや大きめの値を示しその後は僅かながら差が見られ、除荷後の変位応答値は $\sigma_0 = 0.2 f_c$ の場合の方が $0.3 f_c$ の場合よりやや大きめのドリフト量を示している。両降伏応力度における軟化係数を比較すると、軟化係数の相違による応答波形にはほとんど差異が見られないことがわかる。一方、実験値と両解析値を比較すると、いずれの解析値も衝撃初期の約 0.3msec まで実験値とほぼ一致しているものの、コンクリート床板は破壊に至っているために実験値の変位はさらに増加していることがわかる。(b)図は載荷点中央直下における z 方向変位応答波形を示している。最大変位応答値は 0.17mm で応答波形も(a)図の場合より全体的に大きめの値を示し、除荷後のドリフト量もやや大きめの値を示している。応答変位と降伏応力度および軟化係数との関係では(a)図の場合とほぼ同様に $\sigma_0 = 0.2 f_c$ の場合の方が $0.3 f_c$ の場合より全体的に大きく、その変位応答波形は軟化係数による影響をそれ程大きく受けていないことがわかる。

(c)図は床板底面中央点における x 方向応力度の時刻歴応答波形を示している。 x 方向応力応答波形は変位応答波形と同様に $t = 0.288 \text{msec}$ で最大応答値 4.7N/mm^2 (引張領域) に達し、その後は徐々に減少し一時圧縮領域に移行するものの再び引張領域

に戻り除荷後($t=1.192\text{msec}$)は引張領域における残留応力が僅かながら生じていることがわかる。両降伏応力度と比較すると、両者の応答波形は前述したように最大応答値まではほぼ一致し、その後、両者はやや差が見られ、除荷後は $\sigma_0=0.3f_c$ の場合では零値を、 $\sigma_0=0.2f_c$ の場合では自由減衰振動状態を明確に示さず残留応力が僅かながら生じていることがわかる。また、 x 方向応力応答波形でも軟化係数による影響をそれ程大きく受けていないことがわかる。(d)図は載荷点中央直下における x 方向応力応答波形を示している。載荷点直下の x 方向応力度では $t=0.232\text{msec}$ で最大応答値($=16.5\text{N/mm}^2$)に達し、 $t=1.192\text{msec}$ まで圧縮応力度が生じ、それ以降の応答波形は $\sigma_0=0.2f_c$ の場合も α_c にそれ程大きく影響されず引張側領域へ移行し自由減衰振動状態とはならずほぼ零値を示している。一方、 $\sigma_0=0.3f_c$ 、 $\alpha_c=5, 10$ の場合では最大応答値が 15.4N/mm^2 かつ圧縮応力度となり、 $t=1.192\text{msec}$ 以後は僅かながら圧縮側の応答値を示していることがわかる。また、 $\sigma_0=0.3f_c$ 、 $\alpha_c=1000$ の場合では最大応答値が 16.5N/mm^2 で圧縮領域を示していることがわかる。

(e)図は床板裏面中央における z 方向応力度を示している。各応力応答波形は圧縮領域から引張領域に移行して、除荷後は零値を示していることがわかる。このことは衝撃初期で載荷面から圧縮応力が底面に伝播し、その後底面で引張側に移行していることがわかる。しかし、全体的に応答値が小さいのでスポーリング現象による破壊は生じていないことがわかる。 $\sigma_0=0.3f_c$ 、 $\alpha_c=5$ の場合は衝撃初期で圧縮応力度が 0.5N/mm^2 となり、引張応力度が 1.3N/mm^2 となり引張側の応力応答値は他の場合に比べてやや大きめの値を示していることがわかる。 $\sigma_0=0.3f_c$ 、 $\alpha_c=1000$ の場合は衝撃初期で圧縮応力度が約 0.7N/mm^2 となり、その後も圧縮側の応力を示している。(f)図は載荷中央直下における z 方向応力度を示している。応力応答波形は $t=0.112\text{msec}$ で最大応答値(圧縮領域)を示し、 $t=0.384\sim 0.512\text{msec}$ では一時引張領域へ、その後再び圧縮領域に、除荷後は再び引張領域へ移行し明確な自由減衰振動状態を呈せず一定値を示していることがわかる。 $\sigma_0=0.3f_c$ 、 $\alpha_c=5$ の場合は他の場合に比して圧縮領域ではやや大きめの応答値を、また引張領域ではやや低めの応答値を、全体的には包絡線的な波形を示していることがわかる。また、最大応答値は $t=0.112\text{msec}$ で約 45N/mm^2 を示していることから、コンクリートの圧縮強度 f_c をやや超えていることがわかる。

これより、 z 方向変位応答波形、底部中央の x 方向応力応答波形、載荷部の z 方向応力応答波形では最大応答値を含む第1波目まで概ね降伏応力度および軟化係数による影響を受けずに



図一 各接点、各要素における z 方向変位、 x 、 z 方向応力度の時刻歴応答波形

ほぼ一致し、それ以降はそれらに影響を僅かながら受けていることがわかった。また、載荷中央の x 方向応力応答波形、底部中央の z 方向応力応答波形では波形全体が降伏応力度および軟化係数による影響をやや受けていることがわかった。

3.3.2 コンクリート床板裏面のひび割れ分布

図6および7(a)~(c)は $t=1.448\text{msec}$ の降伏応力度 $\sigma_0=0.2, 0.3f_c$ の場合で、軟化係数 $\alpha_c=5, 10, 1000$ に対する床板裏面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のひび割れ状況に解析結果を重ねて示している。解析結果のひび割れは1次ひび割れを赤色、2次ひび割れを黄色で示している。近似しているものと考えられる。

図一6より、 $\sigma_0=0.2f_c$ の場合の解析結果では載荷点中央からひび割れが発生し、そのひび割れは四隅かつ x, y 方向に放射状に拡がり、さらに支持部周辺の内側に拡がっていることがわかる。このことは、支持部全体が拘束されているために、衝撃荷重が載荷点部に作用することによって支持部内側に引張応力が発生し、その影響でひび割れが生じているものと考えられる。ひび割れ分布は主として一次ひび割れであるが、載荷点端部か

ら放射状にまた支持部内側周辺に発生していることがわかる。軟化係数が5~1000と変化させることによって、ひび割れ状況が僅かながら推移していることがわかる。

図-7 ($\sigma_0=0.3f_c$) では図-6の場合と同様なひび割れ状況を示しているものの、降伏応力度が大きくなっていることから二次ひび割れ数が支持部で相当減少していることがわかる。軟化係数が5~1000と変化によるひび割れ状況への影響についても、前述した図-6の場合とほぼ同様に僅かながら受けていることがわかる。

実験結果と解析結果との比較については、いずれの解析結果も支持部周辺のひび割れを除けば実験結果とほぼ酷似していることがわかる。

以上より、軟化係数変化による床板裏面ひび割れ状況は影響をやや受けているものの、降伏応力度変化では支持部周辺部に生じる二次ひび割れ数にやや大きな影響を及ぼしていることがわかった。

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、Drucker-Prager型の降伏関数を用いて、降伏応力度および破壊後の軟化係数の変化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) 載荷部および底面中央点におけるz方向変位の時刻歴応答波形では最大応答値は降伏応力度および軟化係数に影響されずに、その以降の波形にはそれらの影響を僅かながら受けていることがわかった。解析結果と実験結果を比較すると、解析結果は衝撃初期まで実験結果を近似していることがわかった。
- 2) 載荷部および底面中央点におけるx方向応力度は底面中央部の応力応答波形では1)の変位応答波形と酷似した挙動を示している。また、載荷部では降伏応力度および軟化係数にやや影響を受けていることがわかった。
- 3) 載荷部および底面中央点におけるz方向応力度は底面中央点における応力応答波形では全体的に値が小さいものの降伏応力度および軟化係数に影響を受けていることがわかった。一方、載荷部では $\sigma_0=0.3f_c$ 、 $\alpha_c=5$ の場合が衝撃初期でコンクリート強度を超えかつ全体的には包絡線的な波形を示していることがわかった。
- 4) 床板裏面のひび割れ分布では $\epsilon_0=0.0064\epsilon'_{cu}$ を一定とした場合で、軟化係数より降伏応力度の方が2次ひび割れ分布に大きな影響を及ぼしていることがわかった。実験結果と解析結

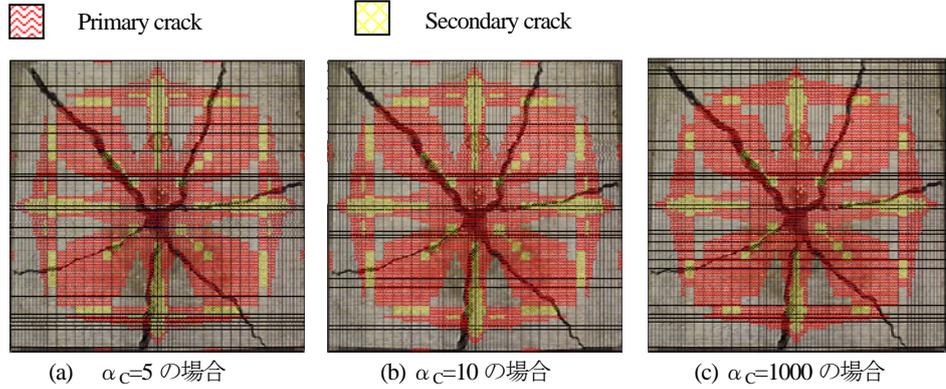


図-6 軟化係数変化における床板裏面ひび割れ状況($\sigma_0=0.2f_c$)

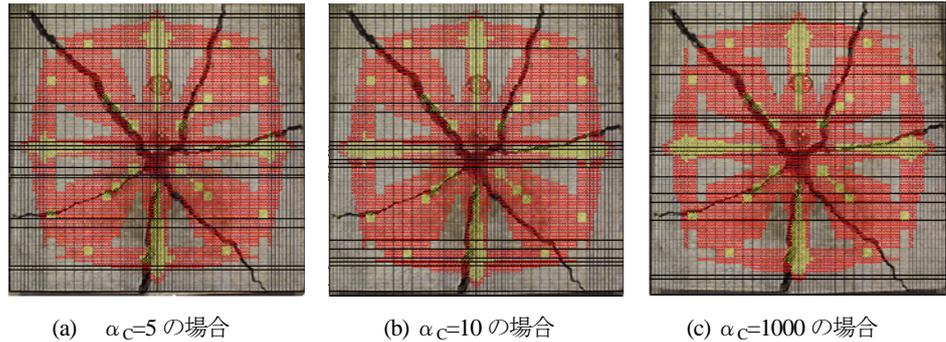


図-7 軟化係数変化による床板裏面ひび割れ状況($\sigma_0=0.3f_c$)

果と比較すると、両者の床板裏面のひび割れ分布は支持部以外では大略的に酷似しているものと考えられる。

今後は引張軟化係数が衝撃挙動に与える影響についても検討する予定である。

参考文献

- 1) Ernest, H., Numerical Methods and Software for Dynamic Analysis of Plates and Shells, Pineridge Press, 1988.
- 2) Mikami, T., Sukontasukkul, P., Mindess, S. and Banthia, N.: Impact Response of a Simply Supported Plain Concrete Slab, First International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading, August, 2007.
- 3) 三上 敬司: 単純支持コンクリート床板の衝撃挙動に及ぼす支持拘束数の影響, 土木学会北海道支部論文集, 第64号, 2008.
- 4) 三上 敬司: ひび割れ発生ひずみがコンクリート矩形床板の衝撃挙動に及ぼす影響, 土木学会第63回年次学術講演概要集, pp.1055-1056, 2008.
- 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) Kupfer, H., Hilsdorf, H.K., Rüschi, H.: Behavior of concrete under biaxial stress, ACI Journal, pp. 656-666, August, 1969.
- 7) 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.
- 8) 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.