

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

Effect on Supported Area 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

ブリティッシュ・コロンビア大学土木工学科では2.5, 5MPaの1軸および2軸方向拘束力を作用させた単純支持されたプレーンおよび鋼繊維補強コンクリート矩形床板の重錘落下衝撃実験を行い、それらの耐衝撃挙動を検討している¹⁾。拘束力を受けた場合と比較するために、その実験では前段として拘束力を受けない場合の実験を行っている。後述するが、本実験におけるコンクリート床板の支持は幅50mm四方の鋼製支持台上に置かれているだけで、リバンド防止のために上下に拘束されていない。この理由として、上述したように軸方向に拘束力を作用させた場合のプレーンおよび鋼繊維補強コンクリート板の耐衝撃挙動を検討することが研究の目的であることと重錘質量(578kg)に対する供試体質量(約30kg前後)は5%程度と非常に小さな質量であるためにリバウンドがほとんど発生していないことが確認されている。実験における支持状態は鉛直方向を支えているのみと極めて単純である。一方、単純支持条件を有限要素法等によって解析するにはコンクリート床板の支持部を鉛直方向に拘束している場合が多いと思われる。このことは、前述した実験の拘束条件を完全に満足していないものと思われる。このような実験における支持部では衝撃初期で床板と支持台との接触面積が変化する場合があるものと考えられる。もし支持部の接触面積が変化した場合、床板の衝撃挙動に及ぼす影響について検討することも重要であるものと考えられる。

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²⁾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、降伏応力度やひび割れ引張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や弾・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^{3),4)}、von Misesの降伏関数^{5),6)}が及ぼす影響について検討している。それらの結果を踏まえて、本研究では前述した支持部の鉛直方向拘束数が衝撃荷重を受ける四辺単純支持コンクリート矩

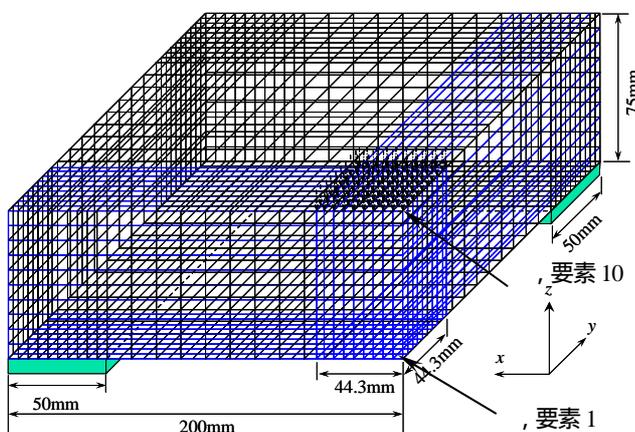


図-1 本解析モデル(実寸法の1/4)

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。

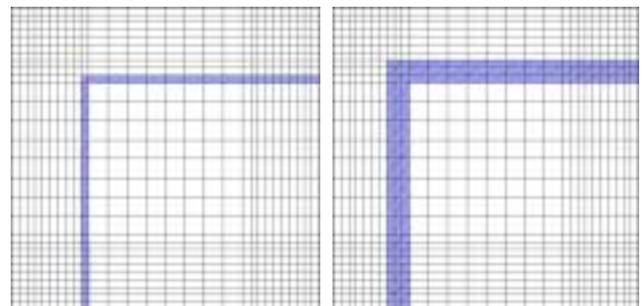
2. 実験の概要

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=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(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400×400×75mm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

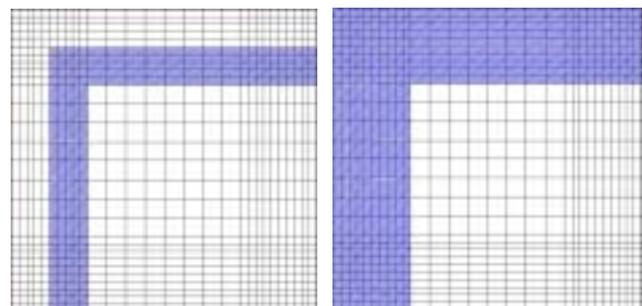
3.1 コンクリート材料の降伏関数

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²⁾式(1)は c 、 β の値を設定し、降伏関数を決定する。



(a) Support-2(703点)

(b) Support-4(787点)



(c) Support-6(879点)

(d) Support-All(1144点)

図-2 本解析に用いた支持部の鉛直方向拘束数

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

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

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。Drucker-Prager型の降伏関数では2軸応力状態におけるKupferの実験結果から $c=0.1775$, $\beta=1.335$ となる⁷⁾。また、引張挙動は、引張剛性に式(2)に示す 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、 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-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 方向変位を図-2(a)~(d)に示したように703, 787, 879, 全体拘束の1,144節点を拘束した4ケースについて検討した。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 $\sigma'_0 = 0.1 f_c$ 、ひび割れ引張応力度が $f_t = 0.1 f_c$ 、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

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 $= 2.4 \text{ t/m}^3$	数値積分: Newmark β 法 ($\beta=0.25, \gamma=0.5$) 時間刻み: $8 \times 10^{-6} \text{ sec}$
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 $f_c = 44.5 \text{ MPa}$, 降伏応力度 $\sigma'_0 = 0.1 f_c$ ひび割れ引張応力度 $f_t = 0.1 f_c$	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 $\varepsilon'_{cu} = 0.003$	ひずみ速度効果を考慮に入れていない
破壊エネルギー $G_f = 0.1 \text{ kN/m}$	せん断保持なし

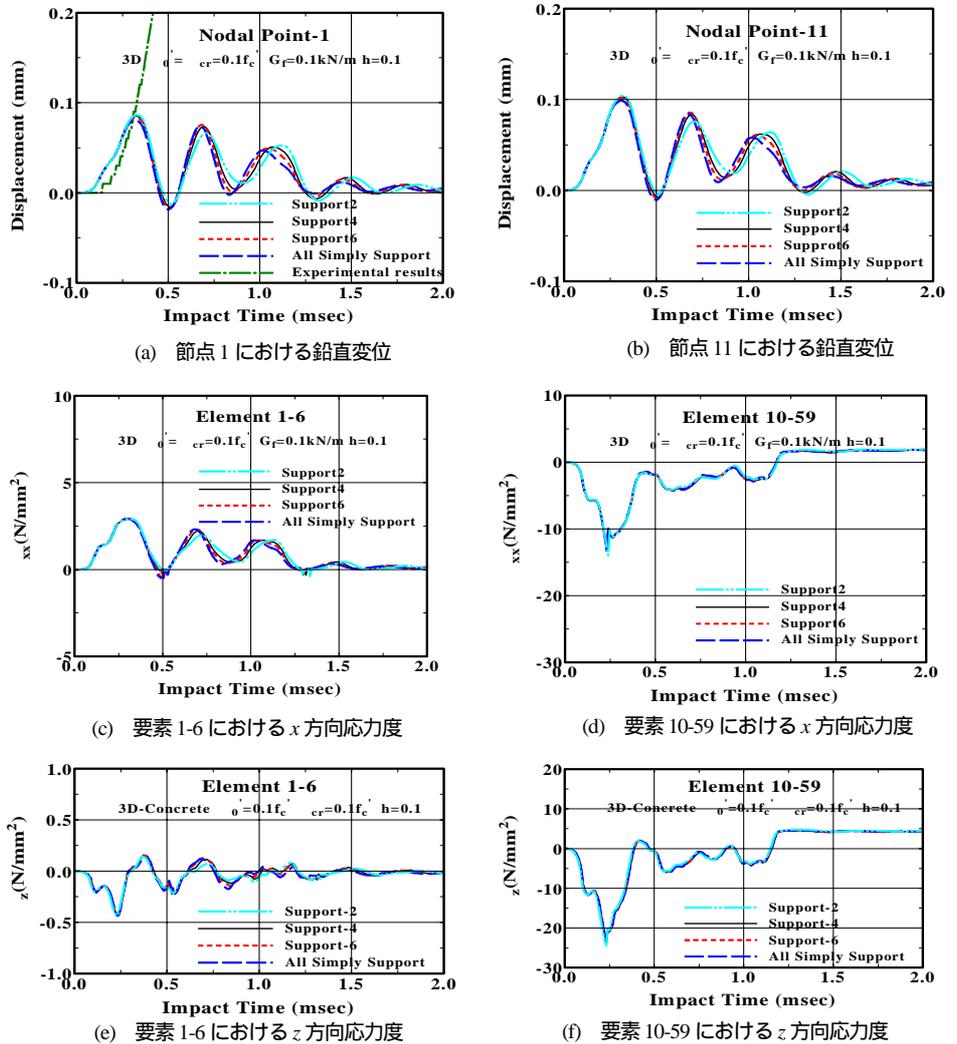


図-3 各接点、各要素における z 方向変位, x, z 方向応力度の時刻歴応答波形

うに数値積分では文献2)に従って時間刻み $8 \mu\text{sec}$ 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, z 方向応力度の時刻歴応答波形

図 - 3(a) ~ (d)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 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 (一点鎖線) を示している. (a) 図より, z 方向変位応答波形は, $t=0.328\text{msec}$ で最大応答値を示し, 除荷後($t=1.256\text{msec}$)の応答値は急激に減少し, その後は自由振動状態を呈しかつ残留変位を生じていることがわかる. 4 ケースを比較すると, z 方向拘束点が減少するとその最大応答値は徐々に増加し, その後の応答波形は拘束点の減少によって位相のずれが顕著に見られ, 自由振動時での床板の固有周期も徐々に長くなっていることがわかる. 載荷点直下における変位の(b)図では床板底面の (a)図より全体的に大きめな応答値をかつ酷似した応答波形を示している. 床板底面の x 方向応力度の(c)図では前述した変位応答波形と酷似し, 主に引張側の応力度を示していることがわかる. 一方, 載荷点直下の x 方向応力度の(d)図では $t=1.176\text{msec}$ まで圧縮応力度が生じ, それ以降では引張応力度へ移行していることがわかる. 4 ケースを比較す

ると, (d)図では鉛直方向の拘束点の変化に対して応答波形に変化がないことから, 載荷点直下の x 方向応力度は鉛直方向の拘

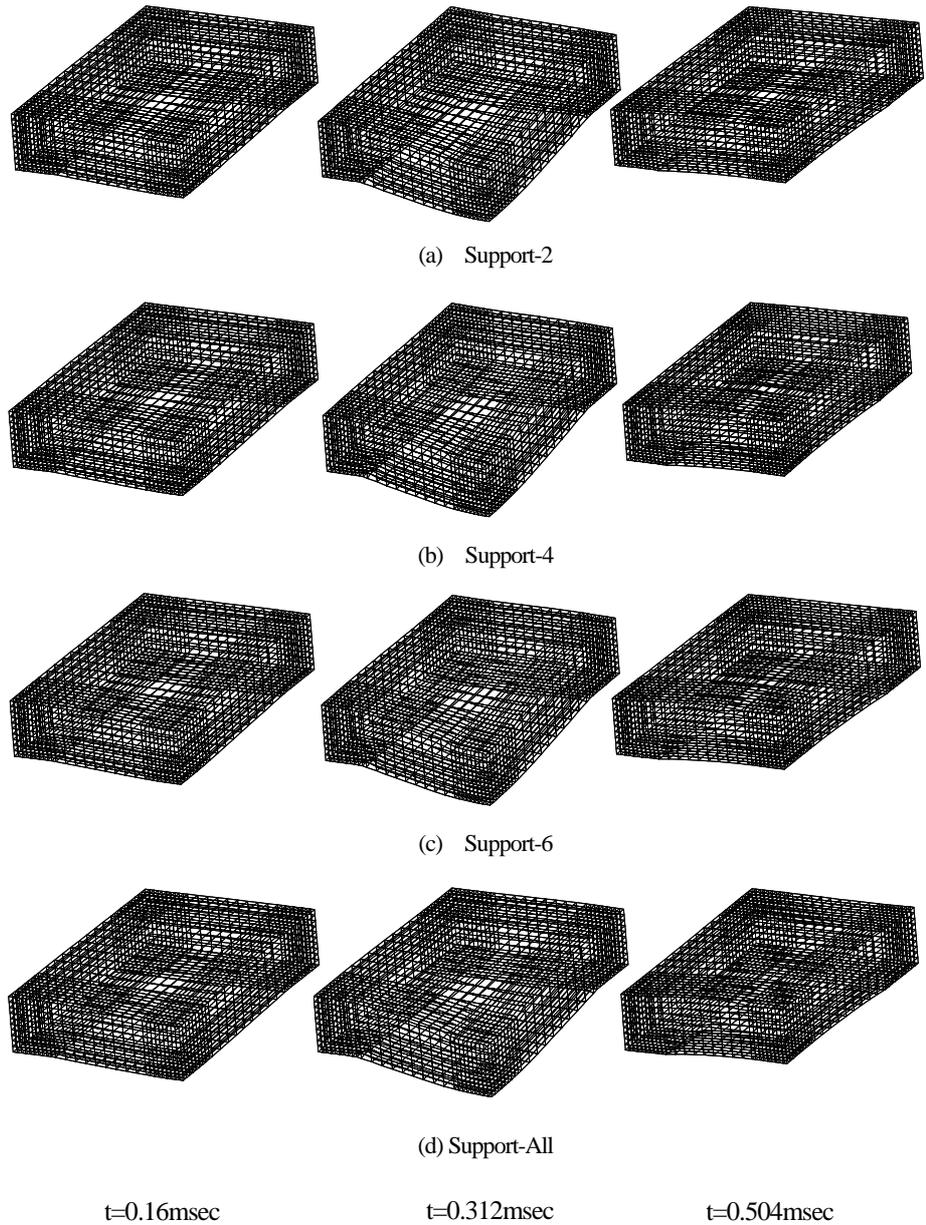


図 - 4 コンクリート床板の変位分布

Primary crack
 Secondary crack



(a) Support-2 (b) Support-4 (c) Support-6 (d) Support-All

図 - 5 コンクリート床板裏面のひび割れ分布($t=1.448\text{msec}$)

束点の変化による影響をほとんど受けていないことがわかる。床板底面の z 方向応力度の(e)図では主に引張応力度が生じているものの、応答値は小さくスポーリングが発生していないことが推測される。このことは後述する図-5の床板裏面ひび割れ分布からも推測される。4 ケースを比較すると、 z 方向の変位応答波形と同様に位相のずれが僅かながら見られる。載荷点直下の(f)図では(d)図と同様な傾向を示し、4 ケースを比較すると載荷点直下の z 方向応力度は載荷点直下の x 方向応力度と同様に鉛直方向の拘束点数による影響をほとんど受けていないことがわかる。

3.3.2 コンクリート床板の変位分布

図-4は任意の時間 $t=0.16, 0.312, 0.504$ msec における4ケースのコンクリート床板(1/4モデル)の変位分布を示している。極初期衝撃時での $t=0.16$ msec の場合では載荷部および板全体で僅かながら下方への変位が見られる。載荷部および板全体では $t=0.312$ msec の最大変位時で下方への変位が見られる。 $t=0.504$ msec の場合では前者とは逆に板全体が上方へ変位していることがわかる。一方、支持部が全体拘束されている(d)図では支持部での変位が生じていない。また、支持部の拘束点が増減すると張出し部となるため(a)~(c)図では支持部を中心にスパン内と同様に張出し部でも $t=0.312$ msec の場合では上方へ、また $t=0.504$ msec の場合では下方への変位が生じることがわかる。

これより、支持部全体が拘束されている場合はスパン内のみが上下に振動し、支持部の拘束点が増減する場合はスパン内および支持部の拘束点を中心に張出し部も上下方向に振動していることがわかった。

3.3.3 コンクリート床板裏面のひび割れ分布

図-5(a)~(d)は $t=1.448$ msec における鉛直方向拘束数に対するコンクリート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。Support-2~Support-All における解析結果の場合は x, y 方向の十字方向にかつ四隅に向かって斜めにひび割れが発生していることがわかる。さらに、Support-All のひび割れ分布では支持点近傍に沿ってひび割れが発生しているが、それ以外の場合では支持部の拘束点が増加することによってその領域が拡がりかつ十字方向のひび割れは床板のエッジ近傍まで進行していることがわかる。Support-All の場合では支持部全体が拘束されているために衝撃力が支持部全体に分散されていることから、他の場合に比べてひび割れ領域が広がっていないことがわかる。Support-2~Support-6 の場合は前述したように支持部で張出し部が拘束部分を中心として上下振動によって、Support-All の場合に比してひび割れ分布の範囲が広がっていることがわかる。また、Support-2~Support-All の1次ひび割れは十字方向、斜め方向および支持部近傍に沿って、2次ひび割れの場合は十字方向および支持部近傍に分布し、Support-All の場合では十字方向のみに発生していることがわかる。一方、衝

撃実験におけるコンクリート床板裏面のひび割れ分布は重錘落下地点から放射状に5つのひび割れが発生し、解析結果と比較すると支持部に沿ったひび割れを除けば、解析結果は実験結果のひび割れ分布を概ね近似しているものと考えられる。

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境界面と仮定し、Drucker-Prager型の降伏関数を用いて、支持部の拘束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鉛直変位の時刻歴応答波形では支持部の鉛直方向拘束点数が最大応答値および固有周期に影響を与え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, z 方向応力度では支持部の鉛直方向拘束点数に影響を受けていないことがわかった。
- 3) スパン内の床板の変位分布では支持部の鉛直拘束点による影響がそれ程見受けられないものの、支持部の鉛直拘束点1,144個より減少すると支持点を中心に張出し部も上下振動していることがわかった。
- 4) スパン内の床板裏面のひび割れ分布では1次ひび割れ分布は各ケースともに概ね酷似し、2次ひび割れの場合は各ケースによって変化している。また、全拘束した支持部の分布ではひび割れ分布の範囲が狭いことがわかった。実験結果と解析結果と比較すると、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。

参考文献

- 1) 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
- 2) Ernest, H., Numerical Methods and Software for Dynamic Analysis of Plates and Shells, Pineridge Press, 1988.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Kupfer, H., Hilsdorf, H.K., Rüschi, H: Behavior of concrete under biaxial stress, ACI Journal, pp. 656-666, August, 1969