

周辺単純支持されたコンクリート矩形床板の弾性衝撃応答解析

Response Analysis of simply support Rectangular Plate under Impact Loading

専修大学北海道短期大学 環境システム科 正 員 三上 敬司

1. まえがき

近年、各研究機関において鉄筋コンクリート梁・床版における非線形衝撃解析や破壊挙動解析が盛んに行われている。樹谷ら¹⁾は三次元個別要素法を用いて版の衝撃破壊解析を行い、その妥当性に関して検討している。三上ら²⁾は拡張個別要素法を用いて鉄筋コンクリート構造物の破壊挙動解析に関して検討している。また、衝撃解析コードの LS-DYNA3D を用いて衝撃問題を解析し、その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。岸ら³⁾は低速な重錘落下衝撃を受ける各種コンクリート梁の弾塑性衝撃応答解析を、大沼ら⁴⁾は高速衝突荷重を受ける鉄筋コンクリート床版の衝撃応答解析を検討し、両結果は大略一致していることを報告している。しかし、このような解析コードは高価なソフトウェアであることから、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⁵⁾を用い、衝撃実験結果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性挙動に関して、古典板理論および Mindlin 板理論^{6,7)}と本解析結果を比較検討することとする。

2. 実験の概要

衝撃実験は写真-1 に示したようにプリティッシュ・コロム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 $H=250, 500\text{mm}$ 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 (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 $400 \times 400 \times 75\text{mm}$ の矩形床板で、写真-1 に示したように寸法 $300 \times 300\text{mm}$ 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た。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ことを目的として加速度計が取り付けられている。実験データはデータ処理システムに基づいた高速コンピュータによって得られた。供試体はプレーンコンクリート、3種類の鋼繊維補強コンクリート床板 (Hooked End, Flattened End, Crimped) を作製した。コンクリートの 28 日圧縮強度はいずれの試験体も 40MPa になるように設計されている。

3. 解析仮定および結果

本研究では x および y 方向に対称であることから、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 9251 個、要素数は 7840 個である。実験における支持条件はコンクリート床板がその周辺が単純支持されていることから、支持部は z 方向の変位 1144 点を拘束している。荷重は実験データより得られた時間方向の衝撃荷重 (図-2) を図-1 に示したように、モデル上部中央部 100 節点に接点荷重として作用させている。なお、本論文では前述した重錘底面積 (直径 100mm) を換算すると載荷幅は $88.6 \times 88.6\text{mm}$ となることから、本解析モデルには図-1 載荷幅 $44.3 \times 44.3\text{mm}$ として作用させることとする。コンクリートの材料物性は得られた実験結果より、弾性係数 E_c が $3.5 \times 10^7 \text{kN/m}^2$ 、密度 ρ が 2.4t/m^3 、ポアソン比 ν が 0.2 である。数値積分では Newmark β 法 ($\beta=0.25, \gamma=0.5$) を用い、時間刻みを Courant 条件⁸⁾より計算すると $1.26 \mu\text{sec}$ となるが、本解析では $1 \mu\text{sec}$ として数値計算を行った。減衰は Rayleigh 減衰を用い、その定数 h を 0, 0.05 および 0.1 の 3 種類で計算を行った。



写真-1 衝撃荷重を受ける四辺
単純支持されたコンクリート床板

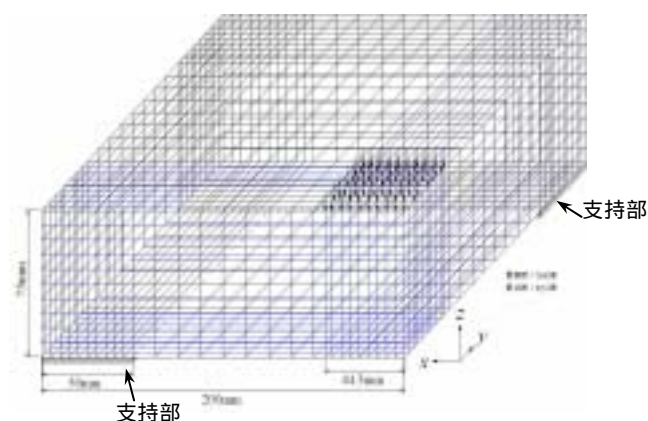


図-1 本解析モデル (実寸法の 1/4)

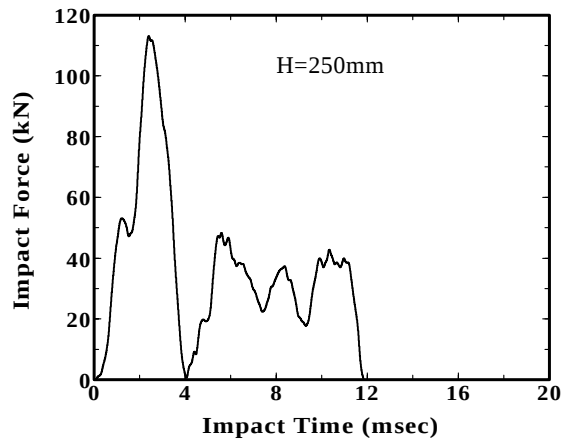
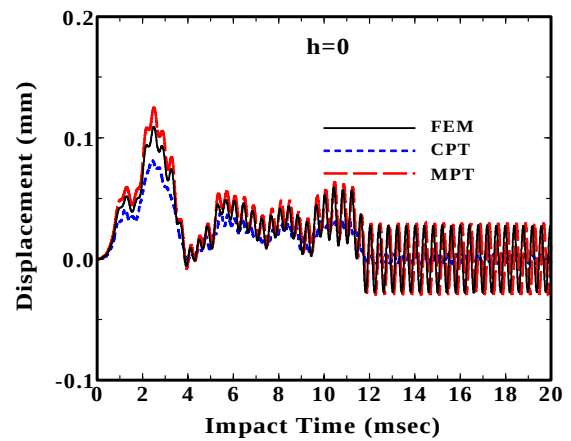
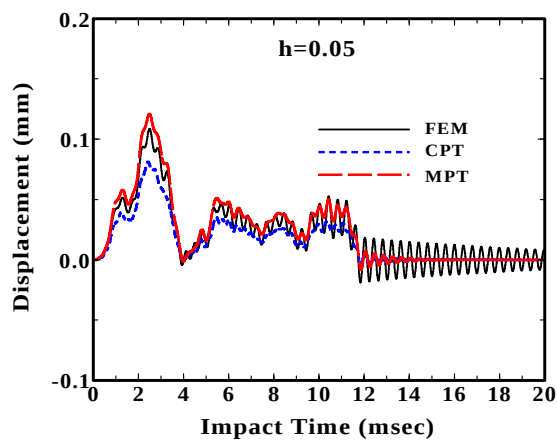


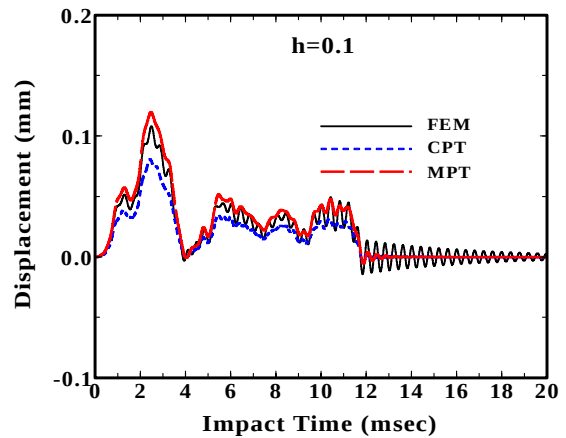
図-2 落下高さ $H=250\text{mm}$ の場合における重錘衝撃力の時刻歴応答



(a) 減衰定数 $h=0$



(b) 減衰定数 $h=0.05$



(c) 減衰定数 $h=0.1$

図-3 各減衰定数における中立軸鉛直変位の時刻歴応答

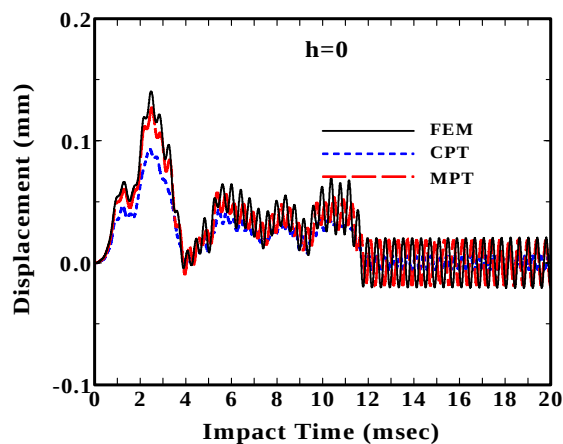


図-4 荷路面積 $1/2$ における減衰定数 $h=0$ の場合の中立軸鉛直変位の時刻歴応答

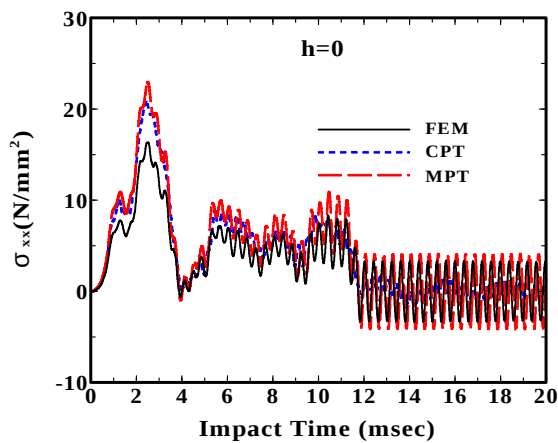
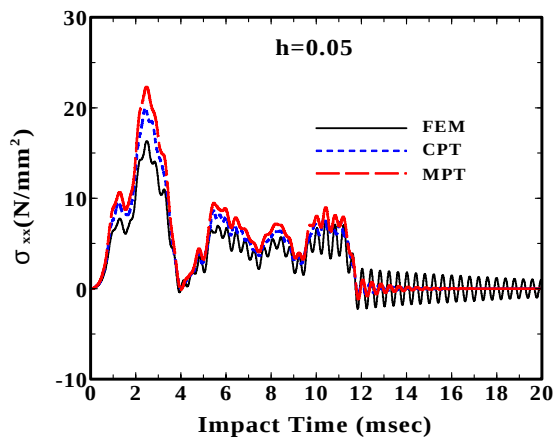
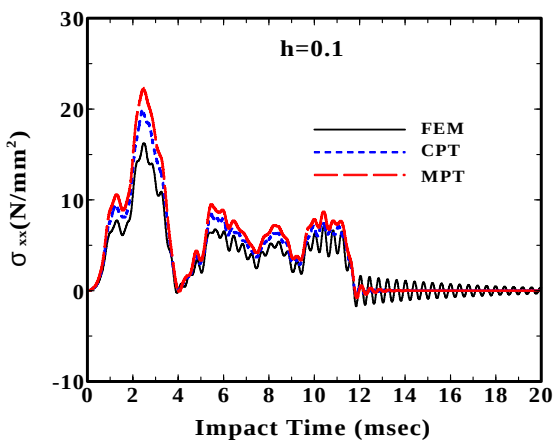
1) 中立軸鉛直変位の時刻歴応答

本解析では図-2 に示したように実験結果から得られた落下高さ $H=250\text{mm}$ の場合における重錘衝撃力を作用させた場合のコンクリート床板の弾性挙動を検討した。

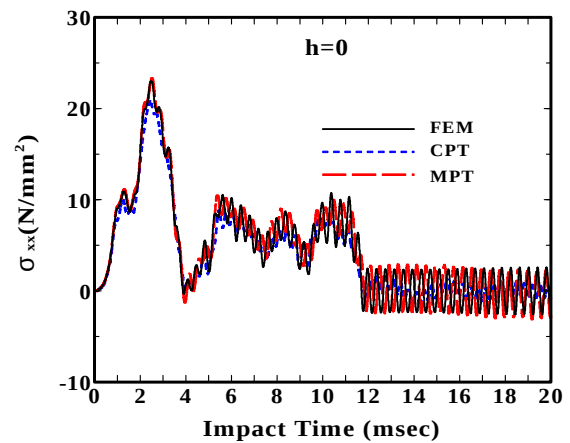
表 - 1 各減衰定数の場合の最大鉛直変位(mm)

解析方法	$h=0$	$h=0.05$	$h=0.1$
FEM	0.109	0.109	0.108
CPM	0.081	0.081	0.081
MPT	0.125	0.121	0.120

図 - 3 では減衰定数 $h=0, 0.05, 0.1$ の場合における三次元有限要素法 (FEM: 実線), 古典板理論 (CPT: 点線) および Mindlin 板理論 (MPT: 破線) で求めた中立軸位置での鉛直方向変位 w の時刻歴応答を示している。図(a)での各応答変位波形は荷重時間内では衝撃力波形と酷似し、その波形に 3, 5 次の高次モード波形が重なっており、除荷後は各最低次固有周期で自由振動していることがわかる。自由振動における応答波形は FEM および MPT の場合では変位零値を中心軸として振幅約 0.03mm で上下に振動している。CPT の場合は自由振動時で急激に減少しその振幅値はほぼ零に近い値を示している。表 - 1 に示したように、減衰定数 $h=0$ の場合、CPT の最大変位は約 0.081mm 、MPT の場合は 0.125mm 、

(a) 減衰定数 $h=0$ (b) 減衰定数 $h=0.05$ (c) 減衰定数 $h=0.1$ 図-5 各減衰定数における x 方向の応力度の時刻歴応答

FEM の場合は 0.109mm となり、FEM の場合は MPT の場合に比べてやや低めな値を、CPT の場合は FEM と MPT の場合に比べて小さめな値を示していることがわかる。 $h=0.05$ の場合における(b)図では最大変位応答値が減衰定数の影響をそれ程受けていないものの、時間が長くなるにつれて、徐々にその影響を受けていることがわかる。特に、CPT および MPT の場合は自由振動時に

図-6 荷路面積 $1/2$ における減衰定数 $h=0$ の場合の x 方向応力度の時刻歴応答表 - 2 各減衰定数の場合の x 方向応力度(N/mm^2)

解析方法	$h=0$	$h=0.05$	$h=0.1$
FEM	16.33	16.29	16.24
CPT	20.76	19.93	19.78
MPT	22.94	22.21	22.14

応答波形が急激に減少し、減衰自由振動状態へ移行して時間とともに零値に収収していることがわかる。 FEM の場合は荷荷時間内では MPT の場合と酷似した応答波形を示しているものの、自由振動時では MPT および CPT の場合と異なり減衰定数 $h=0.05$ における減衰自由振動状態を示していることがわかる。 $h=0.1$ の場合における(c)図では $h=0.05$ の場合に比べて荷荷時間内の各応答波形が減衰の影響によって全体的に滑らかな波形を示していることがわかる。 前述の場合と同様に、FEM の場合は自由振動時で減衰定数 $h=0.1$ における減衰自由振動状態を示していることがわかる。 図-5 は $h=0$ の場合における荷荷面積を本論文の $1/2$ 荷荷面積にした場合の中立軸鉛直変位⁹⁾を示している。 最大応答値に着目すると、CPT の場合は 0.093mm 、MPT の場合は 0.127mm 、FEM の場合は 0.140mm となり、本解析における荷荷面積の場合と比較して各応答値はやや大きくなり、FEM の場合の方が MPT の場合よりもやや大きめな値を示していることがわかる。

これより、各理論の最大変位応答値は減衰定数による影響をほとんど受けていないことがわかった。 また、各変位応答値および波形は荷荷面積の影響を受けていることがわかった。

2) x 方向下縁応力度の時刻歴応答

図 - 5 は減衰定数 $h=0, 0.05, 0.1$ の場合における FEM, CPT および MPT で求めた x 方向下縁応力度 σ_{xx} の時刻歴応答を示している。 図(a)より、 $h=0$ における応答波形は前述した変位応答波形と酷似し、その最大応答値は、CPT の場合では 20.76N/mm^2 、MPT の場合は 22.94N/mm^2 、FEM の場合では 16.33N/mm^2 となり、MPT の場合が FEM および CPT の場合に比べて最も大きな値を示し、FEM の場合が最も小さな値を示してい

る． $h=0.05$ の場合は変位応答波形の場合と同様に $h=0$ の場合での卓越した高次モード波形がやや滑らかな波形に変化していることがわかる．特に， $h=0.1$ の場合はさらに顕著に滑らかな波形となる傾向を示していることがわかる．表-2 に示したように，最大下縁応力度は減衰定数にそれ程大きな影響を受けていないことがわかる．一方，図-6 は $h=0$ の場合における載荷面積を本解析の $1/2$ 載荷面積にした場合の x 方向下縁応力度 σ_{xx} を示している⁶⁾．図(a)の場合と同様な傾向を示し，FEM および MPT の場合における最大下縁応力度は約 23N/mm^2 で，CPT の場合は約 21N/mm^2 と前者に比べて小さな値を示している．

これより，FEM，MPT，CPT の x 方向下縁応力度は本解析における載荷面積の場合では CPT および MPT のいずれも FEM の応答値よりも大きめの値を示しているものの，その載荷面積 $1/2$ における MPT の場合では FEM の応答値にほぼ一致している．このことから，応答値は載荷面積に大きな影響を受けることがわかった．

4. あとがき

本研究では実験結果をシミュレートするために，三次元有限要素法による衝撃荷重を受ける四辺単純支持されたコンクリート矩形床板の動的解析を行い，減衰定数および載荷面積が鉛直方向変位， x 方向下縁応力度に及ぼす影響について，本解析結果と古典板理論および Mindlin 板理論とを比較検討した．その結果を以下に示すと，

- 1) MPT における変位応答値は載荷面積にそれ程影響を受けずに FEM の場合に大略的に近似した応答値を示すことがわかった．CPT の場合は FEM の場合に一致していないことがわかった．
- 2) MPT における応力度応答値は載荷面積の大きさによって FEM の場合と必ずしも近似できるとは限らないことがわかった．CPT の場合は変位の場合と同様に FEM の場合に一致していないことがわかった．
- 3) 減衰定数に関しては，次のことがわかった．
 - a) 各最大応答値は減衰定数にそれ程大きな影響を受けていないこと．
 - b) 両理論の応答波形とも載荷時間内では酷似しているものの，除荷後では $h=0$ における MPT の場合は FEM の応答波形に酷似していることがわかった．一方， $h=0.05$ および 0.1 の場合における両理論は FEM の応答波形と一致していないこと．

今後は，衝撃荷重を受けるコンクリート床板の支点反力およびコンクリート床板や繊維補強コンクリート床板における非線形衝撃応答解析について検討する予定である．

参考文献

- 1) 梶谷ら：3次元個別要素法による版の衝撃破壊解析，土木学会第59回年次学術講演概要集，pp.727-728，2004.
- 2) 三上ら：拡張個別要素法による鉄筋コンクリート構造物の破壊挙動解析，土木学会第59回年次学術講演概要集，pp.729-730，2004.
- 3) 岸ら：矩形 RC 梁の重錘落下衝撃挙動に関するラウンドロビンアナリシス，構造工学論文集，Vol.49A，pp.1299-1310，2003.
- 4) 大沼ら：Dynamic Response and Local Rupture of Reinforced Concrete Beams and Slabs under Impact Loadings, 8th SMIRT, 1985.
- 5) Ernest Hinton: Numerical Methods and Software for Dynamic Analysis of Plates and Shells, Pineridge Press, 1988.
- 6) 三上：重錘落下衝撃による四辺単純支持矩形床板の弾性衝撃応答解析，専修大学北海道短期大学紀要第31号，pp.21-39，1998.
- 7) 三上：衝撃力を受ける四辺単純支持矩形床板にか十時間方向文形状が及ぼす影響，専修大学北海道短期大学環境システム科学研究報告集，No.6，pp.411-422，1999.
- 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．
- 9) 三上：四辺単純支持されたコンクリート矩形床板の衝撃応答解析，土木学会第59回年次学術講演概要集，pp.725-726，2004.