

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

Elasto-plastic impact response analysis of simply supported rectangular concrete Plate

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、衝撃問題を解析する手法としては大きな変形や局所的な破壊に有効な個別要素法¹⁾、さらに連続体から非連続体に至るまでの動的破壊挙動の解析が可能な数値解析法である拡張個別要素法²⁾、コンクリートの破壊現象を解析するため、要素間に生ずるすべりや分離を簡単に扱うことができ、コンクリート部材の重要な破壊形式であるせん断破壊を含む崩壊パターンを容易に捕らえることができる剛体バネモデル³⁾などを用いて、主として破壊シミュレーションに関して解析結果と実験結果とを比較検討している。また、非線形衝撃解析コードDyna3-D⁴⁾、Ls-Dyna3D⁵⁾、MARCなどが上げられ、それぞれ解析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。しかし、このような解析コードは高価なアプリケーションであることから、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⁶⁾を用い衝撃実験結果^{8,9)}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 (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 400×400×75mm のコンクリート矩形床板で、図-1 に示したように幅 50mm で 400×400mm 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 40MPa になるように設計されている。

3. 非線形数値解析

3.1 非線形有限要素解析

非線形運動方程式は次式となる。

$$[M][\ddot{d}] + [C][\dot{d}] + [p(d, \dot{d})] = [f] \quad \cdots(1)$$

ここで、

[M]: 質量マトリックス [C]: 減衰マトリックス
[p(d, \dot{d})]: 内部抵抗力のベクトル [f]: 外力のベクトル
[\ddot{d}]: 正規化された加速度 [\dot{d}]: 正規化された速度
[d]: 正規化された変位

3.2 コンクリートの材料特性

コンクリートの材料非線形モデルにおいては圧縮挙動では弾・粘塑性のモデル化に降伏面 F_0 と強度限界面 F_f の仮定を用いた。^{6,7)}

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

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

ここで、 I_1 、 J_2 はそれぞれ第 1 および第 2 応力不変量で、 σ_0 は降伏応力度、 σ_f は破壊応力度である。2 軸応力状態についてはクーパーの実験結果から、 $c=0.1775$ 、 $\beta=1.335$ を用いた。引張挙動において、引張剛性は e 関数で表示し、次式より求めた。

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

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

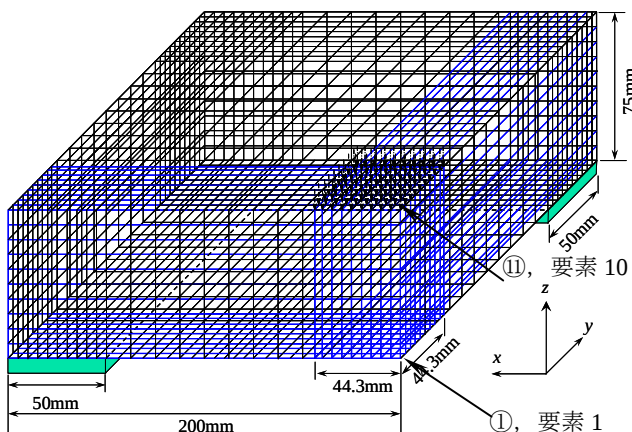


図-1 本解析モデル (実寸法の 1/4)

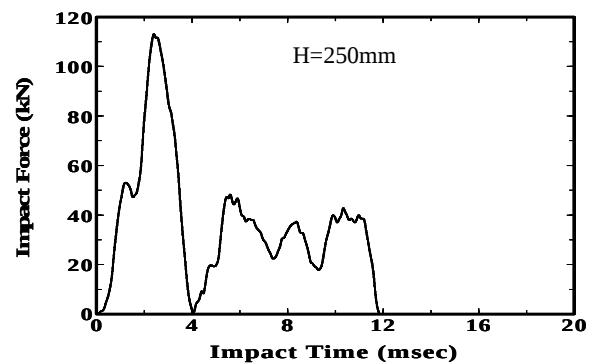


図-2 落下高さH=250mmの場合における重錘衝撃力の時刻歴応答

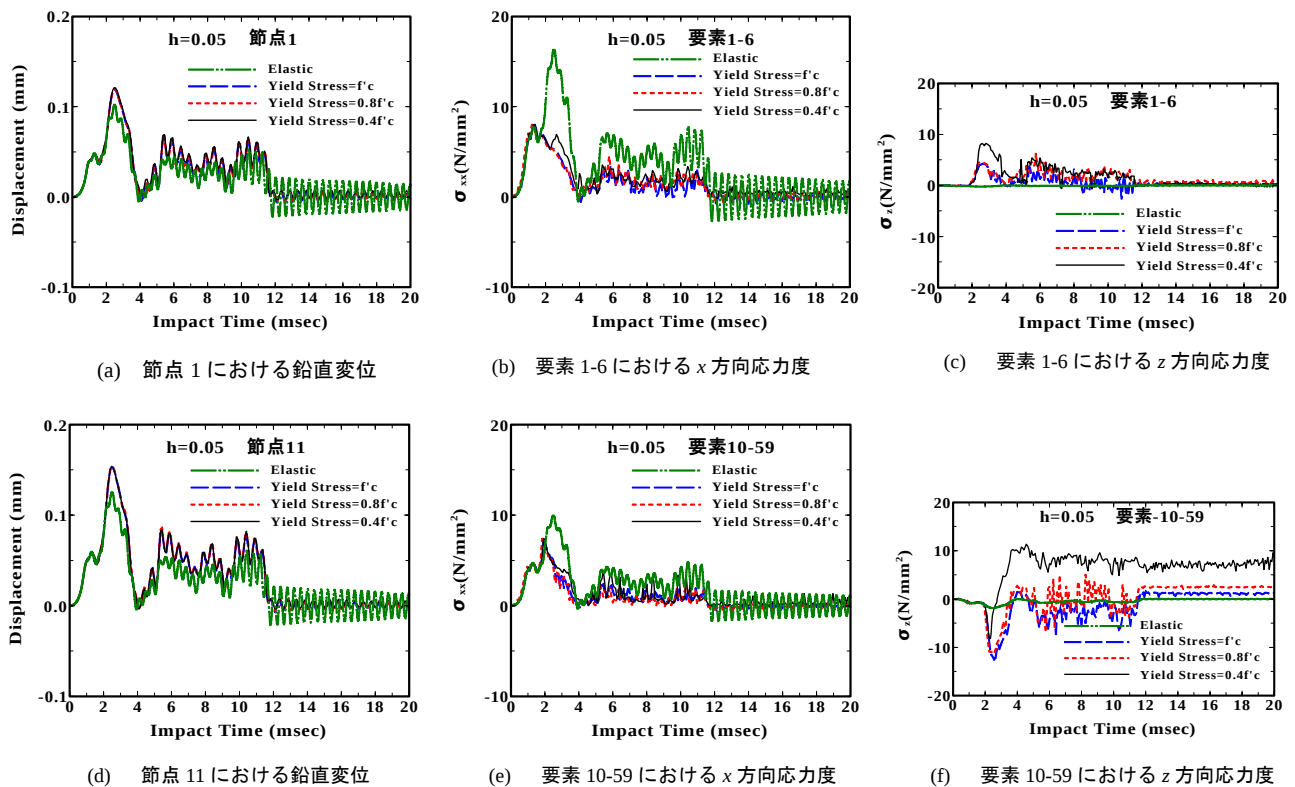


図-3 z 方向変位, x 方向応力度, z 方向応力度の時刻歴応答波形

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.

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

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.

4. 数値解析結果

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. 支持条件は供試体が周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 (図-2 に示した衝撃力波形) を図-1 に示したようにモデル上部中央部に等分布荷重として 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 (半径 100mm) を $44.3 \times 44.3 \text{ mm}$ の矩形面積に換算して作用させている. 数値解析における材料定数は, 実験結果よりコンクリートの密度 ρ が 2.4 t/m^3 , ポアソン比 ν が 0.2, ひび割れ引張応力度が $7 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$, 破壊ひずみが 0.0035 である. 数値積分は時間刻み $80 \mu\text{sec}$ で Newmark β 法 ($\beta_1=0.25$, $\gamma=0.5$) を用いて行った. 減衰は要素全体に Rayleigh 減衰を用いてその減衰定数 h を 0.05 とした.

1) 時刻歴応答波形

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, 10 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, 各波形はコンクリートが弾性体の場合, コンクリートの降伏応力度を f_c , $0.8 f_c$, $0.4 f_c$ とした場合である. (a) 図より, コンクリート板の降伏強度が減少することによって, 最大鉛直変位は僅かながら増加している. また, 各応答波形は図-2 で示した衝撃力応答波形と酷似し, その第 1 波目はそれ程高次モード波形が現れていないものの, 4 msec 以降では顕著に高次モード波形を示していることがわかる. 一方, 弾性体とした場合の波形では弾塑性体の場合と比較して最大変位が約 0.8 倍となり, その応答波形は弾塑性体の場合より全体的に高周波成分の影響を受けている. また, 弾性体および弾塑性体の場合は載荷時間以降ではいずれも自由減衰振動波形を示し, 弾塑性体の場合では振幅が急激に減少し, 弾性体の場合では減衰定数 $h=0.05$ かつ固有周期 0.4 msec で自由減衰振動波形を呈していることがわかる. 以上より, 弾塑性体の場合では下縁にひび割れが発生しコンクリート板の剛性が低下したためと考えられる. (b) 図より, 弾塑性体の x 方向応力度の応答波形は降伏応力度が減少しても最大応答値はほとんど変化せず, 弾性体の場合と比べて約 0.5 倍と弾性体の場合より低く目の応答値を示し, 最大応答値に達する時間は弾性体の場合より約 1/2 倍短い時間で発生していることがわかる. また, 弾塑性体の場合ではひび割れ引張応力度に達した後に急激に応答値が減少し, 一方, 弾性体の場合では 2 msec 以降もさらに増加していることがわかる. これは弾塑性体の場合ではコンクリート板にひび割れが発生し, コンクリートの軟化によって x 方向応力度が増大できないことを意味している. (c) 図より, 弾塑性体の z 方向応力度の応答波形 (要素 1) では

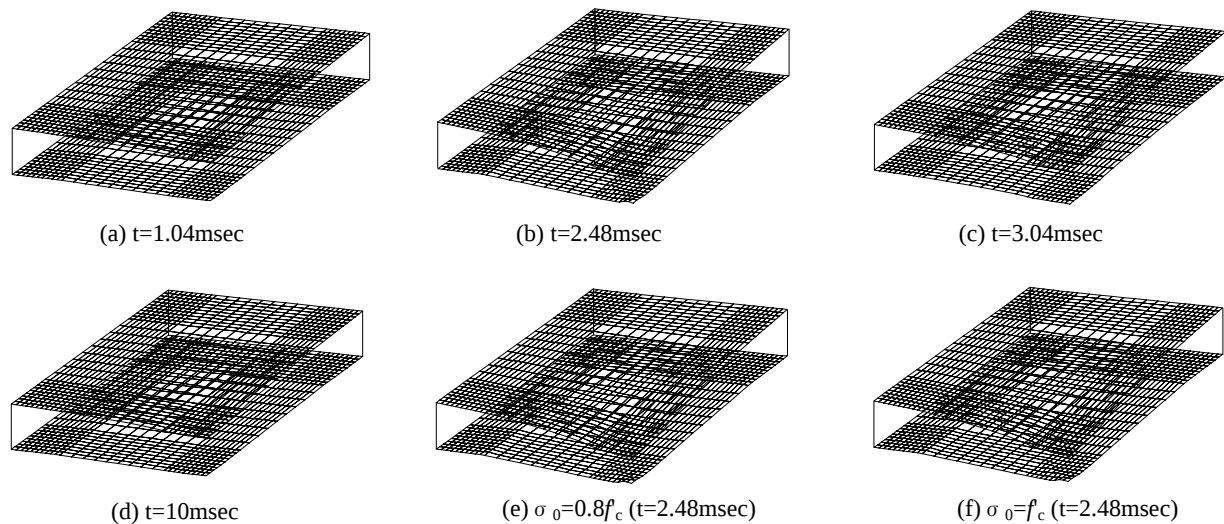


図-4 任意時間における $\sigma_0=0.4f_c$, $t=2.48\text{msec}$ における $\sigma_0=f_c$ および $\sigma_0=0.8f_c$ のコンクリート板の変位分布推移

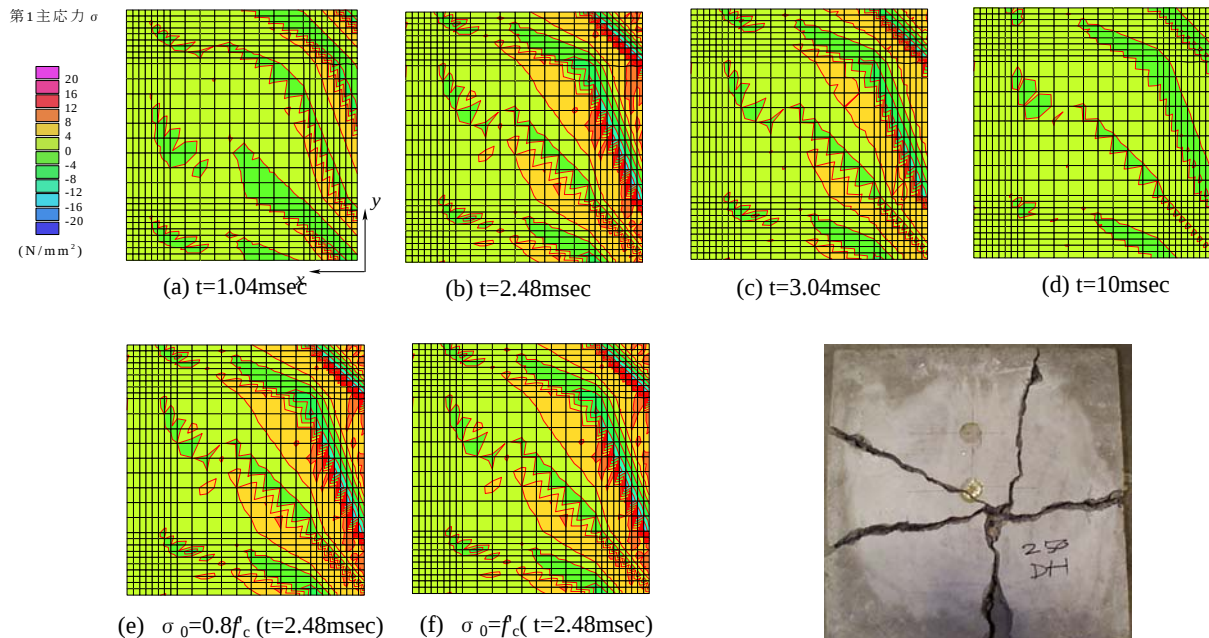


図-5 任意時間における $\sigma_0=0.4f_c$ および $t=2.48\text{msec}$ における $\sigma_0=f_c$, $\sigma_0=0.8f_c$ の解析モデル底面の第1主応力分布



図-6 実験終了後のコンクリート板のひび割れ分布状況

降伏応力度が小さくなると逆に引張側の応答値が大きくなり、 $0.4f_c$ の最大応答値は降伏応力度が f_c の場合に比べて約2倍程度大きな値を示していることから、板裏面ではスポーリングが発生していることがわかる（図-6を参照）。また、弾性体の場合は下方に鉛直方向応力があまり伝達されていないことから、底面ではスポーリングが生じることができる程度の引張応力が発生していないことがわかる。（d）図における節点11は荷重作用直下であることから、弾性体および弾塑性体の最大鉛直変位は節点1に比べて約1.3倍大きい応答値を示しているものの、両節点の波形はほぼ酷似していることがわかる。（e）図より、弾塑性体の x 方向応力度の応答波形（要素10）は弾性体の場合と比べて、最大応答値が弾性体の場合に対して約0.8倍と全体的に低めの応答値を示していることがわかる。また、弾塑性体の場合ではひび割れ引

張応力度 $7 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ に達した後に急激に応答値が減少し、弾性体の場合では 2msec 以降もさらに増加し、弾塑性体の場合よりも最大応答値が大きくなっていることがわかる。（f）図より、弾塑性体の z 方向応力度の応答波形（節点1）は降伏応力度が小さくなると逆に引張側の応答値が大きくなり、 $0.4f_c$ の最大応答値は f_c の場合に比べて約2倍程度大きな応答値を示している。上縁の要素10では弾塑性体の応答波形が圧縮側から引張側へ移行しているものの、弾性体の場合では応答値が小さ目となっていることがわかる。以上より、弾塑性体のエネルギーは弾性体の場合に比べて材料による逸散が見られることがわかった。

2) コンクリート板の変位分布

図-4(a)～(d)は時間 $t=1.04, 2.48, 3.04, 10\text{msec}$ における $\sigma_0=0.4f_c$ の場合のコンクリート板(1/4 図)の変位分布

および(e), (f)図は $t=2.48\text{msec}$ における $\sigma_0=0.8f_c$, f_c の場合におけるコンクリート板(1/4 モデル)変位分布推移を示している. コンクリート板の変位分布は載荷初期では載荷部分のみに変位が集中し, $t=2.48\text{msec}$ で最大変位となり変位応答が下面側のみならず板全体に広がり, 除荷直前($t=10\text{msec}$)では小さな応答を示していることがわかる. (e), (f)図より, 降伏強度が f_c , $0.8 f_c$ とした場合でも変位分布は酷似していることがわかる.

3) コンクリート板裏面の第1主応力分布

図-5 (a)~(d) は任意の時間ごとにおけるコンクリート板裏面(1/4 モデル)の第1主応力分布の推移を, (e)および(f)図では $t=2.48\text{msec}$ での $\sigma_0=0.8f_c$, f_c の場合におけるコンクリート板の第1主応力分布を示している. 図-6 には実験終了後のコンクリート板裏面全体のひび割れ分布状況である. (a)図ではほぼ放射状に左上方へ第1主応力が進展し, (b)図の第1主応力はさらに大きくなりその分布が広がっていることがわかる. (c), (d)図では第1主応力が徐々に減少へ推移している様子がわかる. (e), (f)図と(b)図と比較すると, 第1主応力分布は降伏応力を変化させてもほぼ酷似した分布を示していることがわかる.

図-6 は実験終了後のコンクリート板裏面全体のひび割れ分布状況を示している. ひび割れ分布状況より, 重錘落下衝撃を受けた単純支持されたコンクリート板の場合は落下点部分から5本のひび割れが発生し, 各ひび割れは放射状に四方の支持部へ向って進展し最終的には破壊に至っている. これは曲げひび割れによって破壊したことがわかる. 解析結果の第1主応力分布とコンクリート板のひび割れ分布状況とを比較すると, 解析結果では第1主応力が放射状に左上方へ進展しているものの, ひび割れ分布とはやや異なっていることがわかる. このことは実験と解析に用いた載荷面形状の相違によるものと考えられる.

5. あとがき

三次元弾塑性有限要素法を用い, 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応答解析を行い, 降伏応力度を変化させた場合における鉛直変位, x 方向応力度, z 方向応力度, 変位分布および第1主応力分布に及ぼす影響に関して検討した. その結果を以下に示す.

- 1) 鉛直方向変位応答波形により, 弾塑性体における最大鉛直変位は降伏応力度が小さくなるに従って僅かながら大きくなり, 弾性体の場合は弾塑性体の場合に比して小さ目の値を示すことがわかった.
- 2) 弾塑性体の x 方向応力度応答波形では降伏応力度のほとんど影響を受けていないことがわかった. 弾性体の場合と比較して, 下縁では約 1/2 倍, 上縁では約 0.8 倍と低め目の応答値を示し, 特に下縁では曲げによってひび割れが発生していると推測され, そのことによって応答値は弾性対の場合に比べて低め目値を示していることがわかった.
- 3) 弾塑性体の z 方向下縁応力度応答波形では降伏応力度がコンクリート圧縮応力度の 0.4 倍の場合が最大

応答値となり, その応答値は引張強度 $7 \times 10^3 \text{kN/m}^2$ よりも大きくなることからスポーリング現象が生じていることがわかった. また, 載荷点では衝撃初期で圧縮応力度が発生し, その後引張へ移行していることがわかった. 特に, その傾向が顕著に示されている降伏応力度が $0.4 f_c$ の場合であった.

- 4) 変位分布では降伏強度による影響がそれ程顕著に現れていないことがわかった.
 - 5) 第1主応力分布では4)の場合と同様に降伏強度による影響はそれ程顕著に現れていないことがわかった. また, 実験終了後のコンクリート板裏面のひび割れ分布と比較すると, 第1主応力分布は載荷点中心から放射状に進展しているものの, ひび割れ分布とは多少異なった分布性状を示していることは重錘底面形状と載荷面形状との相違によるものと思われる.
- 今後は, 衝撃力と支持部反力との関係, ひび割れ分布性状の再検討を含め, 降伏条件の相違による応答性状に及ぼす影響に関して検討する予定である.

参考文献

- 1) 榎谷ら: RCはりの衝撃挙動特性に関するDEM によるパラメトリック解析, pp.1635-1644, 構造工学論文集, Vol.51A, 2005.3.
- 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) 石川信隆ら: RC製砂防ダム袖部の衝撃破壊に対する剛体バネモデルの適用性, 計算工学講演会論文集, Vol.1, No.2, pp.895-898, 1996.
- 4) 大沼ら: Dynamic Response and Local Rupture of Reinforced Concrete Beams and Slabs under Impact Loadings, 8th SMIRT, 1985.
- 5) 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.
- 6) Ernest Hinton: Numerical Methods and Software for Dynamic Analysis of Plates and Shells, Pineridge Press, 1988.
- 7) 真下ら: 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.
- 8) Sukontasukkul,P.etc : Impact Resistance of Laterally Confined Fibre Reinforced Concrete Plates, Material and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 34, No.244, December, 2001.
- 9) 三上: 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.
- 10) W.F.Chen (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.
- 11) 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.
- 12) 三上: 四辺単純支持されたコンクリート矩形床板の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会第60 回年次学術講演概要集, pp.305-306, 2005.