

RC版の衝撃応答解析における主鉄筋のモデル化に関する一検討

A consideration of rebar modeling for impact response analysis of RC slabs

室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三井住友建設 (株)	フェロー	三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学大学院	正会員	岡田 慎哉 (Shin-ya Okada)
室蘭工業大学大学院	○ 学生会員	鈴木 健之 (Kenshi Suzuki)

1. はじめに

我が国における土木構造物に関する設計法は、許容応力度設計法から限界状態設計法を経て、性能照査型設計法に移行しつつある。このような状況下においては、耐衝撃構造物の設計に関しても性能照査型設計に移行していくことが肝要であると考えられる。著者らは過去にRC部材の衝撃挙動解析に関して、小型部材を対象に各種解析手法の妥当性の検討等を実施しており、境界条件や減衰定数に留意することによって信頼性の高い解析を実施することが可能であることを示した。また、小型RC梁に関する解析手法を踏襲した場合の実規模RC桁への適用性に関する検討も行っている。しかしながら、より実構造に近いRC版部材に対する衝撃挙動解析手法に関しては、未だ解析事例が少ないのが現状である。

このような背景から、本研究では、RC版に関する衝撃応答解析手法を確立することを目的に、RC版の重錘落下衝撃実験を実施し、併せて数値解析を行い、その結果について実験結果と比較することで、RC版のモデル化に関し

て検討を行った。検討方法はRC版のモデルに関して軸方向鉄筋のモデル化において、(1)2節点梁要素を用いる場合と(2)8節点固体要素を用いる場合について、数値解析結果を実験結果と比較することにより、軸方向鉄筋のモデル化が解析結果に与える影響について検討を行った。

なお、本数値解析には、三次元有限要素法に基づいた衝撃応答解析用汎用プログラムLS-DYNAを用いている。

2. 試験体概要

図-1には、本数値解析で対象としたRC版の形状寸法および配筋状況を示している。RC版の寸法は $2,000 \times 2,000 \times 180$ mmであり、下端鉄筋にはD16を用い、平均かぶりは40 mmとした。また、鉄筋は四辺の外縁に配置した溝型鋼に溶接することで定着を確保している。試験体の支持条件は、支持間隔を1,750 mmとした四辺支持とし、支点部は四辺四隅とも上下方向への変位を抑え回転を許容する単純支持に近い支持状態となっている。重錘落下衝突位置は重錘直径に対する鉄筋間隔の影響が生じないように、RC版中央部の鉄筋交差位置直上としている。重錘には直径60 mmおよび120 mmの2種類の鋼製円柱を用いた。質量は共に300 kgである。衝撃载荷実験は、所定の高さから重錘を一度だけ自由落下させる単一载荷とし、実験を行っている。

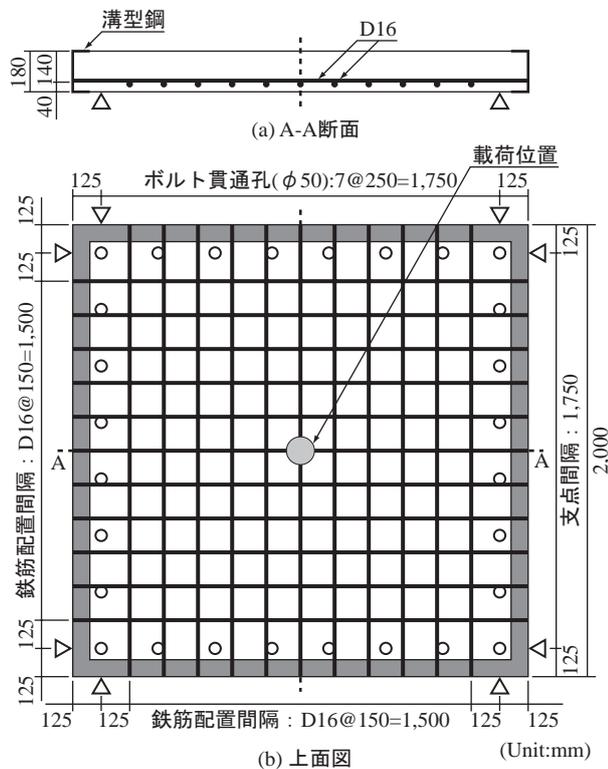


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

3. 数値解析概要

3.1 数値解析モデル

図-2には、本数値解析で用いたRC版の要素分割状況および配筋状況を示している。解析対象のモデル化は、溝型鋼には4節点板要素、その他の要素には8節点固体要素を適用した。また、鉄筋のモデル化に関しては、前述のように2節点梁要素または8節点固体要素のいずれかを用いてモデル化している。数値解析モデルは、構造および荷重条件の対称性を考慮し、1/4モデルとした。境界条件として、支点の底部において実験時と同様に、上下方向への変位を抑え回転のみを許容している。なお、対称面にはシムメトリ条件を入力している。また、コンクリートと重錘および支点治具間には、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。コンクリートと鉄筋および溝型鋼の間は完全付着としている。衝撃力は衝突位置に配置した重錘に初速度を入力することにより与えている。なお、重錘質量は実験と同様に300 kgとしている。

表-1には、本数値解析で対象とした解析ケース一覧を示している。表中、第一項目は载荷径 (cm) を示しており、第二項目には重錘衝突速度 (m/s) に鉄筋要素のモデル (B :

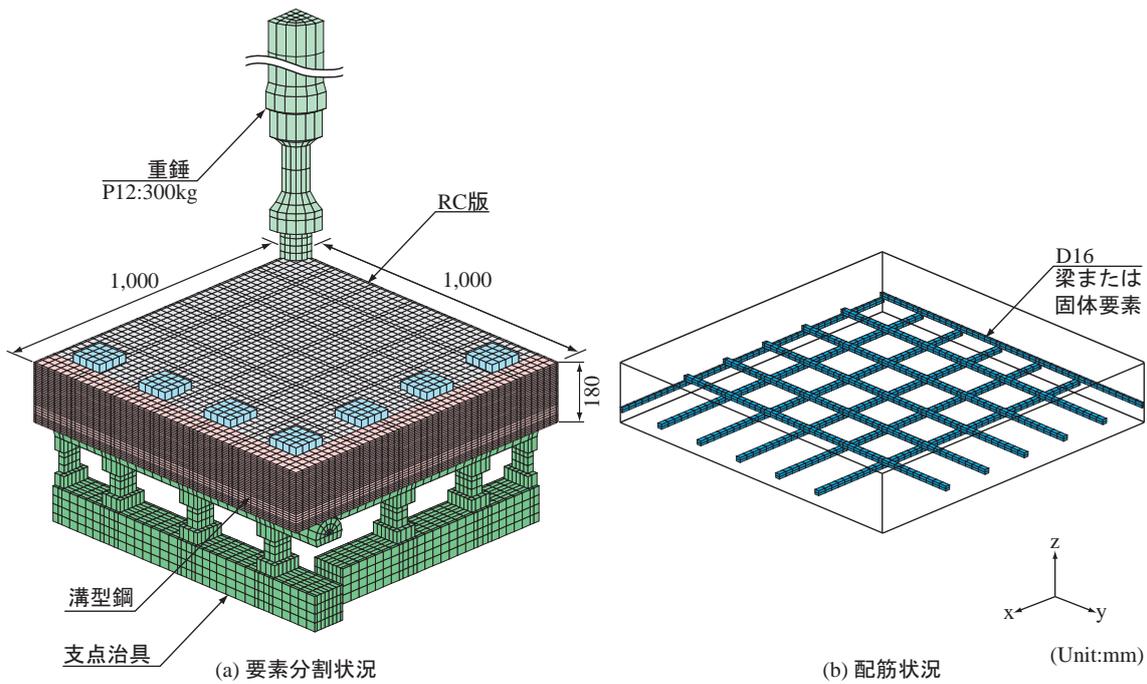


図-2 要素分割状況および配筋状況 (載荷径 120 mm の場合)

表-1 数値解析ケース一覧

ケース名	載荷径 (mm)	衝突速度 (m/s)	鉄筋のモデル
P6-V3B	60	3	梁要素
P6-V3S			固体要素
P6-V4B		4	梁要素
P6-V4S			固体要素
P6-V5B		5	梁要素
P6-V5S			固体要素
P12-V5B	120	5	梁要素
P12-V5S			固体要素
P12-V6B		6	梁要素
P12-V6S			固体要素
P12-V7B		7	梁要素
P12-V7S			固体要素

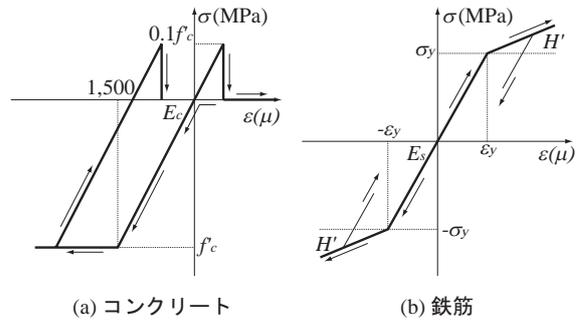


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

表-2 数値解析に用いた各材料の力学的特性値

材料	密度 ρ (ton/m ³)	圧縮/降伏強度 (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	2.35	27.2	18.3	0.167
鉄筋	7.85	345	206	0.3
重錘	6.86	-	206	0.3

梁要素, S: 固体要素) を付して示している。

RC版の要素分割に関しては、軸方向にはそれぞれ約35mm、版厚方向には約5mmとして分割している。各解析ケースの総節点数および総要素数は、鉄筋に固体要素を適用したケースはP6, P12試験体共に総節点数が58,834、総要素数が55,814であり、鉄筋に梁要素を適用したケースでは総節点数が47,413、総要素数が45,158である。

減衰定数は、質量比例分のみを考慮するものとし、鉛直方向最低次固有振動数に対して0.5%と設定している。なお、本数値解析は、重錘がRC版に衝突した時点をも0msとし、RC版の挙動が定常状態に至るまでの60ms間について実施した。

3.2 材料物性モデル

図-3には、各材料の等価一軸応力-ひずみ関係を示している。

図-3(a)に示すように、コンクリート要素の等価一軸応

力-ひずみ関係は、圧縮側に関しては折線近似による相当応力-相当ひずみ関係を仮定し、圧縮強度を降伏強度とする完全弾塑性のバイリニア型を適用している。コンクリートの圧縮側に関しては、相当ひずみが1,500 μ に達した状態でコンクリートが降伏すると仮定している。引張側に関しては線形の相当応力-相当ひずみ関係を仮定し、応力が引張強度に達した時点で引張応力を伝達しないとするカットオフを定義している。なお、引張強度は既往の研究²⁾の場合と同様に圧縮強度の1/10と仮定している。また、降伏の判定にはDrucker-Pragerの降伏条件式を採用している。

図-3(b)に示すように、鉄筋要素に用いた等価一軸応力-ひずみ関係は、降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルである。降伏の判定には、von Mises

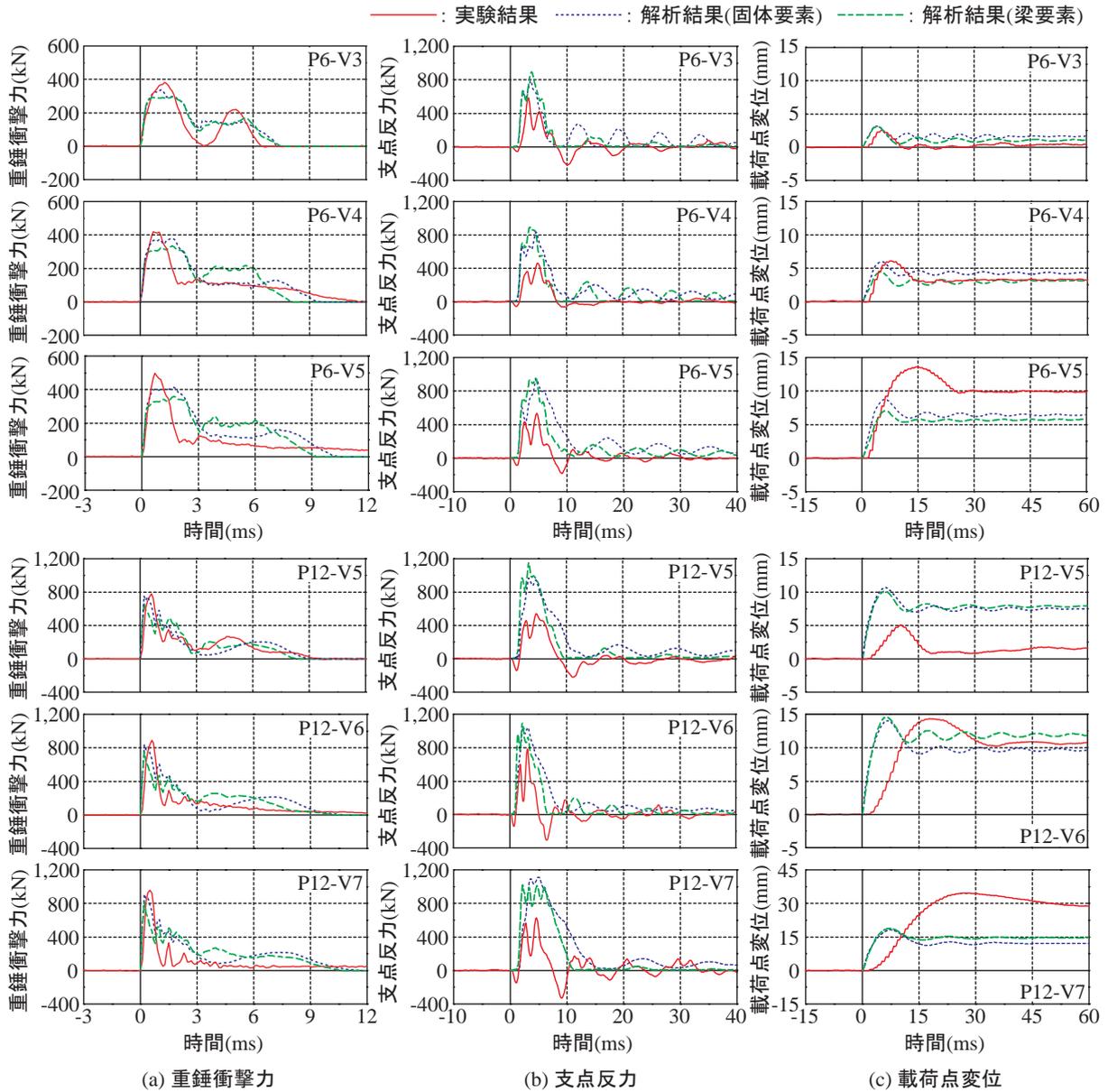


図-4 各種応答波形

の降伏条件を採用している。塑性硬化係数 H' は弾性係数 E_s の1%と仮定している。

表-2には、本数値解析に用いた各材料の力学的特性値を示している。

4. 実験結果と解析結果の比較

4.1 各種応答波形

図-4には、各種応答波形を解析ケースごとに比較して示している。図中、実験結果を赤色、鉄筋を梁要素と固体要素でモデル化した場合の解析結果をそれぞれ緑色と青色で示している。

図-4(a)より、重錘衝撃力波形における実験結果は、载荷初期の振幅が大きく周期の短い第1波と、その後の振幅が小さく周期の長い第2波で構成されていることが分かる。また、载荷径および衝突速度が大きくなるほど、最大値が大きくなる傾向が見られる。次に解析結果について見ると、梁要素および固体要素を適用した場合において、最

大値や波形性状は類似の傾向を示し、実験結果を概ね再現しているものと判断できる。

図-4(b)より、支点反力波形における実験結果は、载荷径および衝突速度に関わらず、最大値、支点反力継続時間に大きな違いは見られない。次に解析結果について見ると、梁要素および固体要素による最大値、支点反力継続時間の大きな違いは見られない。また、最大値は実験結果と比較し载荷径に関わらず過大評価となり、支点反力継続時間は衝突速度の増加と共に過大評価となる傾向が見られる。

図-4(c)より、载荷点変位波形における実験結果は、衝突速度の増加に伴い最大値も増加している。さらに、裏面に押し抜きせん断による裏面剥離が生じると、最大変位は飛躍的に増加する傾向がある。次に解析結果を見ると、梁要素と固体要素による違いは特には見られない。また、衝突速度が低く、押し抜きせん断による裏面剥離が発生していない場合には、実験結果と概ね近い値を示しているものの、押し抜きせん断による裏面剥離が発生した場合には、

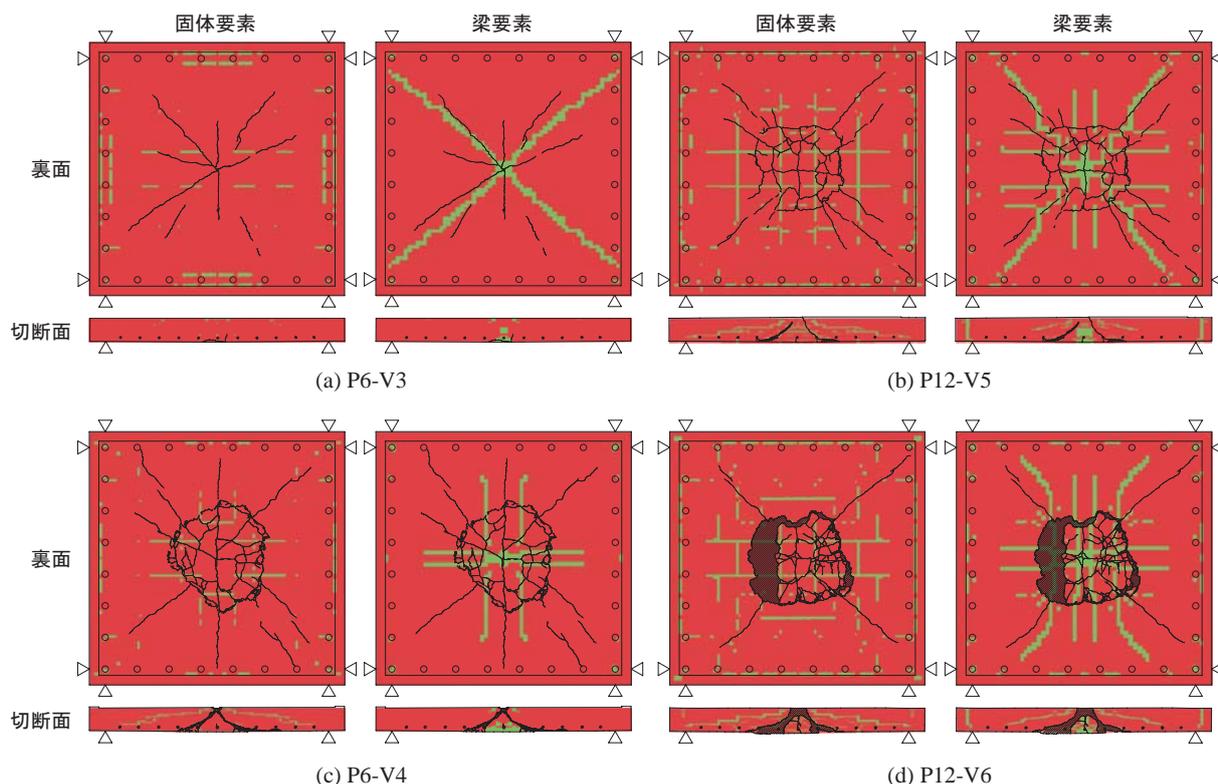


図-5 ひび割れ分布性状

実験結果と比較して数値解析結果は過小評価となる。これは、数値解析において押し抜きせん断破壊を適切に再現することが困難であるためと推察される。

4.2 ひび割れ分布性状

図-5には、数値解析結果から得られる荷重点最大変位時のRC版に関する裏面および切断面の第一主応力分布図とひび割れ分布図を重ねて示している。図中、緑色の領域(コンクリート要素の第一主応力が $-0.001\sim 0.001$ MPaの範囲)は応力零近傍要素を示しており、最大変位時点ではひび割れが発生しているものとして評価することが可能である。なお、ここではP6-V3,V4およびP12-V5,V6試験体について記載している。

図-5(a)より、実験結果は衝突速度が低い場合は、裏面には曲げによるひび割れが発生し、切断面にはひび割れの発生が生じていない。図-5(b), (c)より衝突速度が増加すると、荷重点部を中心として円形状にひび割れが発生していることより、押し抜きせん断破壊しているものと推察される。図-5(d)のように、更に衝突速度を増加すると押し抜きせん断ひび割れ発生部から剥離を伴うようになる。次に解析結果を見ると、衝突速度の増加と共に裏面および切断面にひび割れが進展するが、実験結果のような押し抜きせん断ひび割れは見られない。一方、断面では実験結果における押し抜きせん断によるひび割れと類似したひび割れを確認できる。また、梁要素を適用した場合に比較し、固体要素を適用した場合はひび割れが過小に評価される傾向にあることがわかった。

5. まとめ

本研究では、RC版の押し抜きせん断破壊挙動を適切に

再現可能な数値解析手法の確立を目的として、重錘落下衝撃荷重を受ける四辺支持RC版に対し、鉄筋のモデル化に関して、梁要素と固体要素を適用した場合について解析を実施し、実験結果と比較する形で検討を行った。以下に本研究で得られた事項を整理する。

- (1) 重錘衝撃力波形に関して、梁要素と固体要素を適用した場合による大きな違いは見られず、実験結果をよく再現できる。
- (2) 支点反力波形および荷重点変位波形に関しても、梁要素と固体要素を適用した場合による違いは顕著には見られないが、実験結果を再現できるまでには至っていない。
- (3) ひび割れ分布性状に関して、固体要素を適用した場合は、梁要素を適用した場合に比較して過小評価となる傾向があるが、その再現性は低い。

今後、支点反力波形、荷重点変位波形およびひび割れ分布性状について、更に検討を重ね、解析手法の精度向上に向けて研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) John O.Hallquist : LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2006.6
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡 健一, 安藤 智啓 : 静荷時に曲げ破壊が卓越するRC梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.215-233, 1999.4
- 3) 三上 浩, 岸 徳光, 今野 久志, 岡田 慎哉 : RC版の静的・衝撃押し抜きせん断性状に与える上端鉄筋の影響, コンクリート工学年次論文集, pp.745-750, Vol.29, No.3, 2007