

論文 矩形RC版の耐衝撃挙動解析におけるコンクリートに関する降伏条件式の影響

玉木 美帆^{*1}・岸 徳光^{*2}・今野 久志^{*3}・川瀬 良司^{*4}

要旨: 本研究では、矩形RC版の耐衝撃挙動を適切に評価可能な数値解析手法を確立することを目的に、形状寸法の異なるRC版に関する重錘落下衝撃実験結果と比較することにより、その妥当性を検討した。本研究では、特にコンクリート要素に関する降伏条件(von MisesとDrucker-Prager)を変化させた場合の妥当性に着目して検討を行った。検討結果、重錘衝撃力、支点反力波形および変位波形は降伏条件式で大差はない。しかしながら、小型、大型に関わらずひび割れ分布はDrucker-Pragerの降伏条件式を用いる場合が、実験結果を適切に評価することが明らかとなった。

キーワード: RC版、重錘落下衝撃実験、降伏条件、弾塑性衝撃応答解析、三次元有限要素法

1. はじめに

我が国の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、耐衝撃用途構造物の設計に関しても性能照査型設計法に準じた設計手法を確立することが重要であると考えられる。

著者らは、合理的な耐衝撃設計法の確立に向け小型RC梁に関する数多くの重錘落下実験を実施して、入力エネルギーと残留変位および部材に要求される静的耐力に関する関係式を提案している¹⁾。また、簡易な構成式を用いた動的解析手法も提案し²⁾、小型から大型の梁に対する重錘落下衝撃実験結果との比較により、提案手法の妥

当性も検討している³⁾。これにより、数多くの数値解析を実施し、小型から大型RC梁まで適用可能な信頼性の高い上述の関係式と類似の設計式を提案するに至った⁴⁾。その結果、RC梁に関しては、各限界状態を規定する残留変位を与えることにより、耐衝撃性を確保する為に要求される静的耐力を算定することができ、性能照査型耐衝撃設計を可能にしている。

一方、RC構造物は、主に梁部材と版部材から構成されている。従って部材設計を行うことを想定すると、梁のみならず版部材の耐衝撃設計法も確立することが極めて重要である。曲げ破壊が卓越する梁部材の場合には、比較的容易に挙動検討が可能である。しかしながら、版部

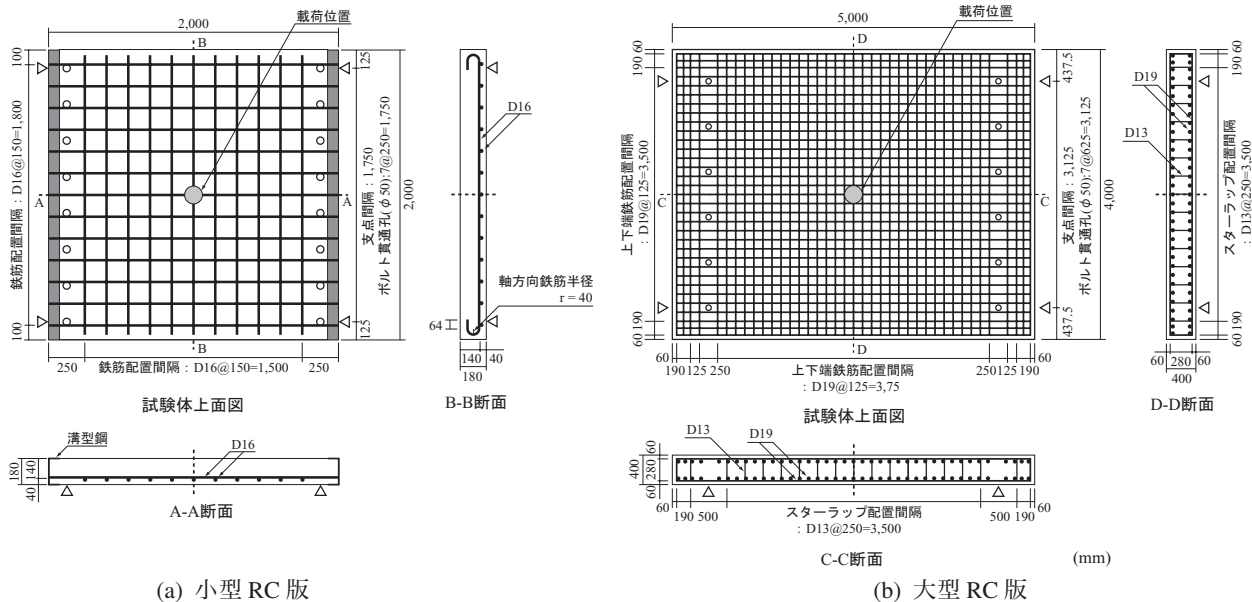


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

*1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程 建築社会基盤系専攻(土木工学コース) (正会員)
 *2 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 教授 工博 (正会員)
 *3 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム 総括主任研究員 博(工) (正会員)
 *4 (株) 構研エンジニアリング 取締役 博(工) (正会員)

材の場合には、押し抜きせん断破壊的な挙動を伴うためにその挙動検討も容易でない。著者らは、四辺支持の小型 RC 版に関する重錘落下衝撃実験を実施して、性能照査型設計法の確立に向けた研究を実施し、設計手法の提案を行っている⁵⁾。しかしながら、任意の境界を有する RC 版に関しては、平面的な広がりや、支点治具の製作を含めた実験装置を充実しなければならないことにより、物理的経済的にそれほど容易ではない。このため、簡易で信頼性の高い数値解析手法の確立が早期に望まれるところである。

このような観点から、本研究では、RC 版の形状寸法を変化させた場合にも適用可能な数値解析手法を確立することを目的に、重錘落下衝撃実験結果との比較のもとに梁と同様に簡易な材料構成則を適用した場合の三次元弾塑性型有限要素法による数値解析を実施し、その妥当性を検討した。本研究では、特にコンクリート要素に関する降伏条件式に着目して、von Mises と Drucker-Prager の降伏条件式の適用性について検討を行うこととした。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汎用プログラム LS-DYNA⁶⁾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小型 RC 版および大型 RC 版の形状寸法および配筋状況を示している。小型 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 150 mm 間隔で格子状に配置し、平均かぶりは 40 mm とした。また、支点治具を設置した二辺に関しては外縁に溝型鋼を配置し溶接することで定着を確保している。一方、大型 RC 版の寸法は $5,000 \times 4,000 \times 400$ mm であり、上下端鉄筋には D19 を用い 125 mm 間隔で格子状に配置している。また、スターラップには D13 を用い 250 mm 間隔で千鳥状に配置している。有効高さは 340 mm である。

試験体の支持条件は、いずれの試験体においても二対辺支持とし、支点部は二辺四隅とも上下方向への変位を拘束し回転を許容する単純支持に近い支持状態としている。支持間隔は、小型 RC 版の場合は 1,750 mm、大型 RC 版の場合は 3,125 mm である。重錘落下位置は、RC 版中央部の鉄筋交差位置直上としている。重錘は鋼製円柱を用い、小型 RC 版に対しては、質量 300 kg、衝突部直径が 90 mm であり、底面には片当たりを防止するように 2 mm のテーパを設けている。大型 RC 版に対しては、質量 2 ton、重錘直径が 1,000 mm であり、底部高さ 175 mm は半径 800 mm の球状となっている。衝撃荷重実験は、小型、大型 RC 版でそれぞれ衝突速度を 4 m/s、4.4 m/s (1 m 落下) とし、一度だけ自由落下させる単一荷重法により行っている。測定項目は、両試験体とも重錘衝撃力、合



(a) 小型 RC 版



(b) 大型 RC 版

写真-1 実験状況

支点反力（以後、単に支点反力）および荷点変位である。重錘衝撃力は、小型 RC 版の場合には重錘に内蔵されている衝撃荷重測定用ロードセルを用い、大型 RC 版の場合には重錘上面に設置した加速度計を用いて測定し、加速度に重錘質量を乗じて評価している。支点反力は、両支点治具に内蔵されている衝撃荷重用ロードセルを用いて測定し、全ての応答値を総和して合支点反力とした。変位は、レーザー式非接触型変位計により測定している。

写真-1には、小型および大型 RC 版の実験状況を示している。

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 版の要素分割状況を示している。解析対象のモデル化は、溝型鋼には 4 節点シェル要素、鉄筋要素には 2 節点梁要素、その他の要素には 8 節点固体要素を適用した。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た 1/4 モデルであ

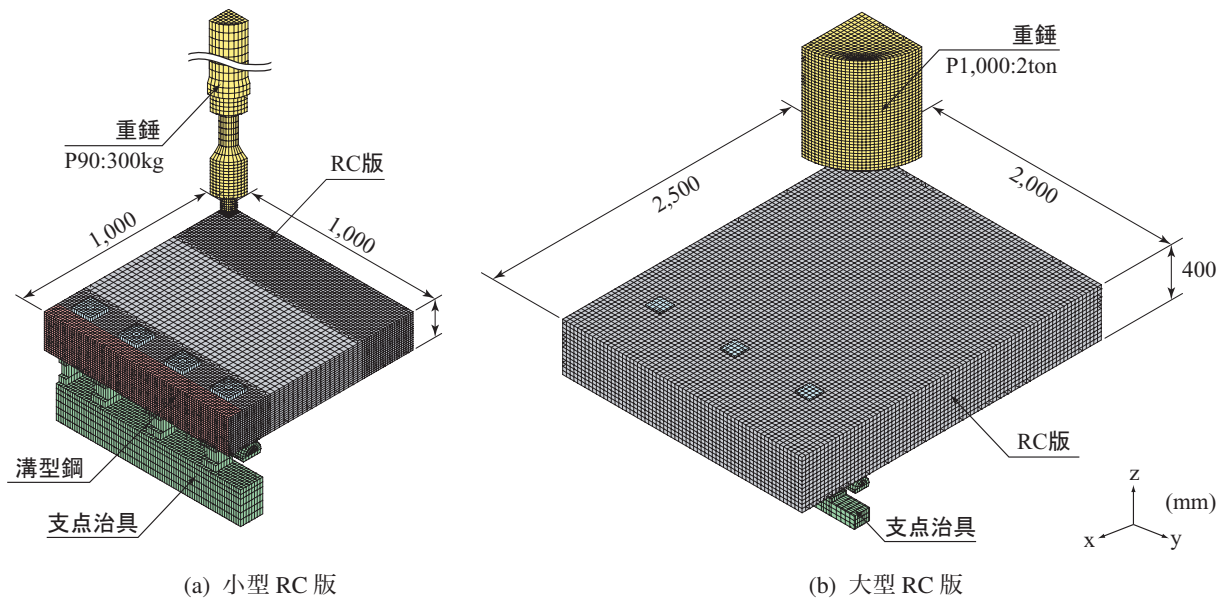


図-2 要素分割状況

る。境界条件は版の大きさに関わらず、実験時と同様に支点の底部において上下方向への変位を抑え回転のみを許容する単純支持に近い状態としている。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の全要素に設定した初速度を入力することにより与えている。

RC版の要素分割に関しては、小型RC版の場合は、軸方向要素の基準要素長を35mmに設定し、支点治具周辺や重錘落下点近傍の要素長を12.5mmとした。また、重錘落下点近傍部はより詳細に解析することし要素長を6.25mmと設定している。版厚方向には全長にわたって要素等を10mmとしている。一方、大型RC版に関しては、形状寸法が大きいことより、要素長が約30mmの立方体要素に分割している。各解析ケースの総節点数および総要素数は小型RC版で94,534, 86,644、大型RC版で99,057, 94,718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5.0%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間について実施し、小型RC版の場合は80ms、大型RC版の場合は180msとした。

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に仮定している。すなわち、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ものと仮定している。また、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と仮定した。また、降伏の判定にはvon MisesおよびDrucker-Pragerの降伏条件式を採用し、それらの適用性について検討を行うこととしている。

von Mises降伏条件では、材料の降伏が静水圧に無関係とし、最も重要な変数として八面体せん断応力が最大せん断応力の代わりに用いられる。従って、降伏条件式は八面体せん断応力が限界値 k に達したときとして、次のように定義される。

$$f(J_2) = J_2 - k^2 = 0 \quad (1)$$

k は純せん断のときの降伏応力であり、本研究の場合は $k = f'_c / \sqrt{3}$ として示される。 J_2 は偏差応力の2次不変量である。また、Drucker-Prager降伏基準は、純せん断あるいは八面体せん断応力が静水圧 I_1 に線形に依存すると仮定するものであり、次のように定義される。

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (2)$$

ここで、 α と k はそれぞれ材料定数およびせん断降伏応力を表している。 α が0のとき、式(2)はvon Misesの降伏基準となる。このため、Drucker-Prager降伏基準は、von Misesの降伏基準の拡張した降伏基準と言える。また、 α はコンクリートの内部摩擦角を ϕ として

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (3)$$

から求められる。本数値解析では $\phi = 30^\circ$ と仮定した。

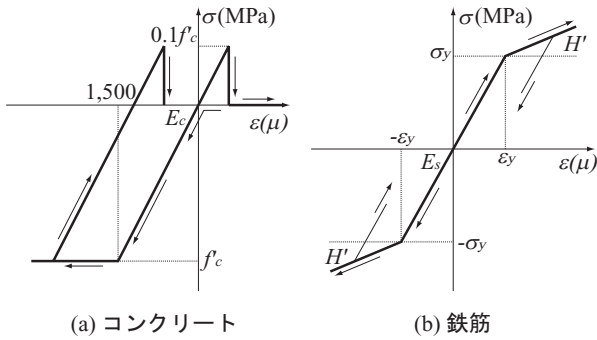


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

表-1 数値解析に用いた各材料の力学的特性値

試験体	材料	密度 ρ (ton/m ³)	強度 (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
小型 RC 版	コンクリート	2.35	26.6	17.7	0.167
	鉄筋	7.85	383	206	0.3
	重錘	6.38	-	206	0.3
大型 RC 版	コンクリート	2.35	34.2	22.8	0.167
	鉄筋	D19	393	206	0.3
		D13	382		
	重錘	2.89	-	206	0.3

なお、本研究では衝突速度が4 m/s程度と小さいことより、材料の歪速度硬化は小さいものと判断し、簡略化して考慮していない。

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

表-1には、本数値解析に用いた各材料の力学的特性値を一覧にして示している。

3.3 コンクリート要素に関する換算引張強度の設定

コンクリート要素に分布ひび割れを仮定する場合において、要素1個に貫通ひび割れが発生する場合を仮定すると、要素長によって応力の平均化等によりひび割れ発生荷重が異なってくる。本研究では、要素長が異なる場合においてもひび割れを適切に評価するため、RC梁⁷⁾の場合と同様に引張破壊エネルギー等価の概念を適用して換算引張強度を設定することとした。

換算引張強度の設定方法は、以下の通りである。すなわち、要素で引張破壊エネルギーが等価になるように、基準要素のひび割れの方向と直交する方向の要素長を y_0 、引張強度を f_{i0} 、任意要素の要素長を y_i とすると、換算引張強度 f_{ii} は、

$$f_{ii} = f_{i0} \sqrt{\frac{y_0}{y_i}} \quad (4)$$

として示される。なお、版構造の場合は2方向のひび割

表-2 数値解析ケース一覧

ケース名	試験体	降伏条件
S-VM	小型 RC 版	von Mises
S-DP		Drucker-Prager
B-VM	大型 RC 版	von Mises
B-DP		Drucker-Prager

れが想定される。しかしながら、分散ひび割れを仮定する場合には、要素に作用する圧力が破壊圧力に達した時点で、要素は引張応力を伝達することが不可能となことより、本研究では、簡略化して支持辺に平行あるいは直交するひび割れを仮定し、換算引張強度を評価することとした。なお、直行する方向のひび割れに対しても適用可能とするために平面的に要素を正方形に分割している。

換算引張強度の具体値に関しては、小型 RC 版において基準要素長を35.0 mmとし、25.0, 12.5, 6.25 mmの要素長を有する要素の換算引張強度は3.14, 4.45, 6.29 MPaと設定した。一方、大型 RC 版の場合には、全要素を30 mmとしていることより、換算引張強度は3.69 MPaとしている。

4. 実験結果と解析結果の比較

表-2には、本研究で実施した数値解析ケースの一覧を示している。

4.1 各種応答波形

(1) 重錘衝撃力波形の比較

図-4および図-5には、実験結果および解析結果の重錘衝撃力、支点反力、载荷点変位に関する各応答波形をそれぞれ示している。

図-4(a)および図-5(a)には、重錘衝撃力波形を比較して示している。図より、いずれの解析ケースも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い第1波と、その後の振幅が小さい第2波で構成されており、主波動の継続時間は大型、小型に関わらず6 ms程度となっている。衝突過程におけるリバウンド的な挙動を考慮すると小型、大型 RC 版でそれぞれ約12.5, 22.5 msで大型 RC 版が10 msほど長い。

実験結果と解析結果を比較すると、試験体の規模および降伏条件に関わらず、解析結果における重錘衝撃力の最大値は実験結果と比較して小さい値を示していることが分かる。また、解析結果の衝撃力波形を見ると、実験結果よりも緩やかな形状を示しており、実験結果を再現するには至っていない。

(2) 支点反力波形の比較

図-4(b)および図-5(b)は、支点反力波形の比較図を示している。図より、実験結果に関しては、小型 RC 版の

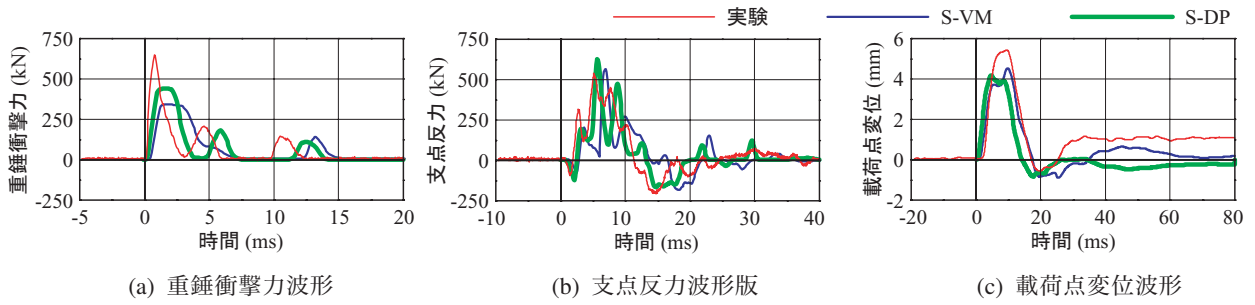


図-4 各種応答波形 (小型 RC 版)

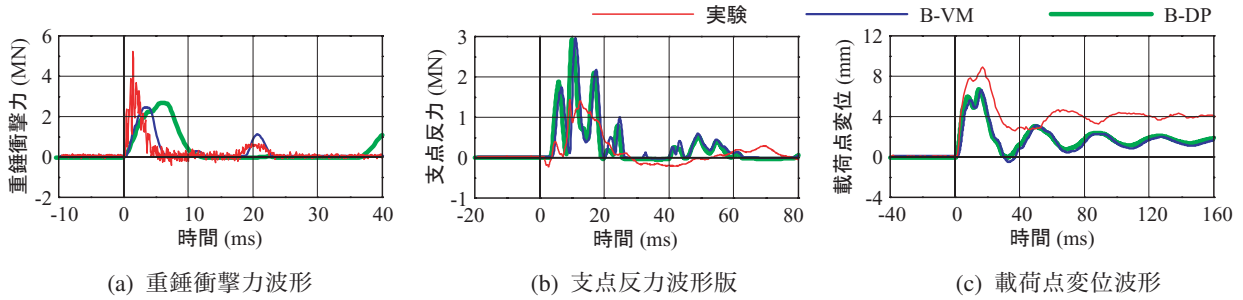


図-5 各種応答波形 (大型 RC 版)

場合には低周波成分と次数の高い振動成分から構成されている。一方、大型 RC 版の場合には周波数の高い振動成分は出現していない。

次に実験結果と解析結果の比較を行うと、小型 RC 版の場合において、von Mises の降伏条件を仮定する場合には、最大値は実験結果と大略対応している。また、荷荷時の継続時間は実験結果より長いことが分かる。これに対して、Drucker-Prager の降伏条件を仮定する場合には、最大値および荷重載荷時における継続時間は、実験結果とほぼ対応しており、その後の周期も適切に評価されている。一方、大型 RC 版の場合には、いずれの降伏条件式を仮定する場合においても、最大支点反力および荷荷初期波形性状が異なるものの、低周波成分および周波数特性は実験結果と類似している。

(3) 荷荷点変位波形の比較

図-4(c) および 図-5(c) は、荷荷点変位波形に関する比較図を示している。図より、実験結果はいずれの場合も荷荷時に振幅の大きい正弦半波状の分布を示し、その後残留変位を伴って減衰自由振動を呈していることが分かる。

次に、数値解析結果を実験結果と比較すると、小型 RC 版において最大変位に関しては両降伏条件式で類似した値を示しているが、実験結果よりも小さい値を示していることが分かる。

その後の残留変位に関しては、Drucker-Prager の降伏条件式を仮定する場合には、リバウンドした状態で若干負方向に残留している。一方、von Mises 降伏条件式を仮定する場合には正の残留を示すものの、実験結果よりも小さい。

一方、大型 RC 版に着目すると、いずれの降伏条件式を仮定する場合にも、最大変位、残留変位ともに類似の波形分布を示し、実験結果と比較して過小に評価していることが分かる。

4.2 ひび割れ分布性状の比較

図-6 には、各ケースの数値解析結果から得られる最大変位時における RC 版裏面の第一主応力分布図とひび割れ分布図を示している。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)は応力零近傍の要素を示しており、最大変位時にはひび割れが発生しているが、実際に零応力が発生しているものとして評価可能である。

図-6 (a) の実験結果より、小型 RC 版の場合には、荷荷点を中心として対角線状のひび割れと、円形状のひび割れが発生している。円形状のひび割れは押し抜きせん断破壊の兆候を示している。大型 RC 版の場合には、小型 RC 版の場合と同様に荷荷点を中心とした放射状のひび割れに加え、支持方向と平行の曲げひび割れも見られる。

解析結果を見ると、小型 RC 版に関しては、図-6 (b) より von Mises の降伏条件式を仮定する場合には、自由辺に向かう曲げひび割れが顕在化して発生している。実験結果と比較すると、円形状の押し抜きせん断破壊型のひび割れは発生せず、過小評価の傾向にあることが分かる。一方、図-6 (c) に示す Drucker-Prager の降伏条件式を仮定する場合には、荷荷点を中心として対角線状のひび割れおよび円形状のひび割れが発生している。実験結果と比較すると、解析結果の方がひび割れが多く発生しているものの、実験結果を概ね再現しているものと判断される。

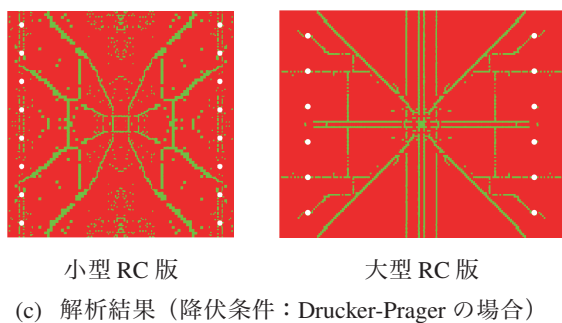
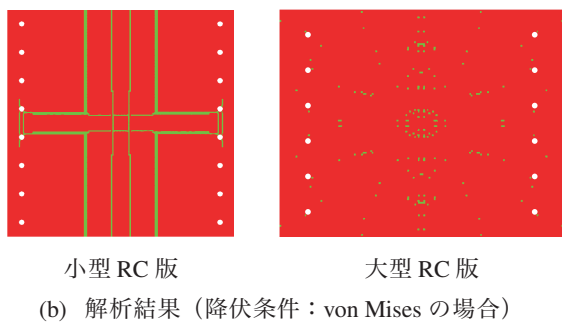
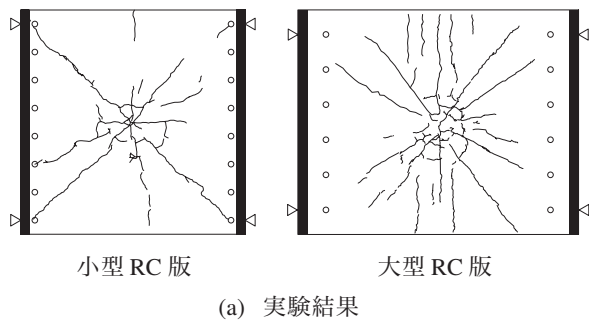


図-6 RC版の裏面ひび割れ分布性状

大型 RC 版に着目すると、図-6 (b) に示す大型 RC 版に着目すると、von Mises の降伏条件式を仮定する場合には、ほとんどひび割れは見られない。一方、図-6 (c) に示す Drucker-Prager の降伏条件式を仮定する場合には、載荷点を中心とした放射状のひび割れおよび支持方向と平行の曲げひび割れおよび押し抜きせん断破壊に起因する円形状のひび割れも見られ、実験結果を適切に評価していることが分かる。

5. まとめ

本研究では、耐衝撃用途 RC 構造部材の性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた検討の一環として、RC 版を対象に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、形状寸法の異なる 2 種類の矩形 RC 版に関する重錘落下衝撃実験結果の基に、2 種類の降伏条件式 (von Mises, Drucker-Prager) を設定し、それらの適用性について検討を行った。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は、RC 版の形状寸法に関わらず、いずれの降伏条件式を用いた場合においても、実験結果を再現するに至っていない。
- (2) 支点反力波形に関しては、RC 版の形状寸法に関わらず、2 つの降伏条件式でほぼ類似の応答性状を示す。また、小型 RC 版の場合には実験結果を適切に評価可能である。
- (3) 最大応答変位、残留変位に着目すると、RC 版の形状寸法に関わらず、いずれの降伏条件式も過小評価する傾向にあるが、概ね実験結果を評価可能である。
- (4) ひび割れ分布に着目すると、von Mises の降伏条件式を仮定する場合には、押し抜きせん断ひび割れを適切に評価できない。一方、Drucker-Prager の降伏条件式を仮定する場合には、曲げおよび押し抜き破壊型のせん断ひび割れ分布も適切に評価可能である。
- (5) 総合的には小型、大型を問わず RC 版の数値解析には Drucker-Prager の降伏条件式を用いる場合が、実験結果とよく対応する。

以上より、今後は衝突速度、形状寸法を種々変化させた場合における数値解析を実施して最適な降伏条件式を提案したいと考えている。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃設計法に関する一提案, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.177-190, 2000.4
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載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.
- 3) 岸 徳光, A.Q.Bhatti, 今野久志, 岡田慎哉: 重錘落下衝撃荷重載荷時の大型 RC 桁に関する衝撃応答解析法の適用性検討, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1261-1272, 2006.3
- 4) 岸 徳光, 今野久志, 三上 浩, 岡田慎哉: 大型 RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, Vol. 54A, pp. 1077-1088, 2008.
- 5) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: 低速度衝撃を受ける四辺支持 RC 版の耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, Vol. 55A, pp. 1327-1338, 2009.3
- 6) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2006.6
- 7) 岸 徳光, Abdul Qadir Bhatti, 三上 浩, 岡田慎哉: 破壊エネルギー等価の概念を用いた大型 RC 桁に関する衝撃応答解析手法の妥当性検討, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1227-1238, 2007.3