

せん断補強筋を用いたRC版の 3次元衝撃破壊挙動解析と耐衝撃性評価

Evaluation of Shear Reinforcement on Impact Resistance of RC Slab by 3-D Impact Analysis

宮本文穂* 三戸雅文** 中村秀明***

Ayaho MIYAMOTO, Masafumi MITO and Hideaki NAKAMURA

* 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755 宇部市常盤台2557)

** 工修 建設技官 建設省河川局防災課 (〒100 東京都千代田区霞が関2-1-3)

*** 工博 山口大学助手 工学部知能情報システム工学科 (〒755 宇部市常盤台2557)

In general, the failure mode of RC slabs under impact load would change with the loading rate, shapes of impactor, etc., that is, punching shear failure to be more dominant. Then, if the possibility of punching shear failure can be expected in the RC slabs, it is better to improve the failure mode to bending failure by structural modifications, because from absorbed energy point of view.

In this paper, the effects of shear reinforcement on impact resistance of RC slabs such as the index of local deformation, the volume displaced, etc., based on the 3-D impact analysis which includes some related dynamic effects are discussed. From the analytical results, it is found that the arrangement of shear reinforcement in RC slabs can be improved significantly on the indexes of punching shear failure mode of the RC slabs.

Key Words: soft impact load, reinforced concrete slab, shear reinforcement, 3-D impact analysis, impact resistance, strain softening

1. はじめに

古くからの研究対象となってきた土木構造物における衝撃問題は、発生確率こそ低いとその挙動の複雑さとともに被害の甚大さから近年注目を集めるようになり、構造物に耐衝撃性を確保することが重要となる場合がある。そこで、本研究では土木構造物に車両、航空機等が衝突する場合を想定したソフトな衝撃問題¹⁾を取り上げ、3次元非線形有限要素解析を用いてRC版の衝撃破壊挙動解析を行うとともに、せん断補強筋配置効果の解析結果を述べるものである。

本研究で使用した6面体要素を用いた3次元非線形有限要素解析プログラムは、従来より著者らが開発してきた積層化非線形有限要素解析手法^{2),3)}では、実験結果と比べて、比較的早い段階で各要素が破壊した状態になり、実験における衝撃荷重の第一ピーク後の挙動の精度良い推定が困難であったため、ここでは、①コンクリート要素の弾塑性および破壊状態を3次元応力状態で評価するためのOttosenモデル⁴⁾の導入、②ひび割れ発生後のコンクリートの剛性を評価するためのコンクリートの引張軟化特性の導入^{5),6)}および③ひび割れ発生後の変形状態やひび割れ分布特性に大きく影響するとされる、コンクリー

ト要素と鉄筋要素間の付着特性の導入を行うとともに、その精度の検証を行ったものである⁷⁾。ここではその概要を述べるとともに、RC版の押し抜きせん断タイプの衝撃破壊挙動に大きく影響を及ぼすと考えられるせん断補強筋の有無および配筋量と載荷速度をパラメータとし、種々の指標を用いて各種RC版の耐衝撃性の評価およびせん断補強筋の耐衝撃性への影響の解析的検討を試みるものである。

2. 3次元衝撃破壊挙動解析の概要⁷⁾

RC版の衝撃破壊挙動解析には、6面体要素を用いた3次元有限要素解析法を用いる⁷⁾。すなわちRC版のコンクリート部分を8節点6面体のアイソパラメトリック要素でモデル化し、図-1に示す2辺単純支持のRC版の1/4有限要素モデルについて解析を行った。ここで、衝撃荷重は、図-1中の①の部分に部分等分布で作用させた。動的平衡方程式の解法にはNewmark- β 法($\beta=1/4$)を用い、コンクリート要素の弾塑性および破壊条件にはOttosenの4パラメータモデル⁴⁾を用いる。また、特に最大衝撃荷重作用後の実験結果に対する解析精度の向上を目指して、コンクリートと鉄筋間の付着特性の導入と、Bazant等

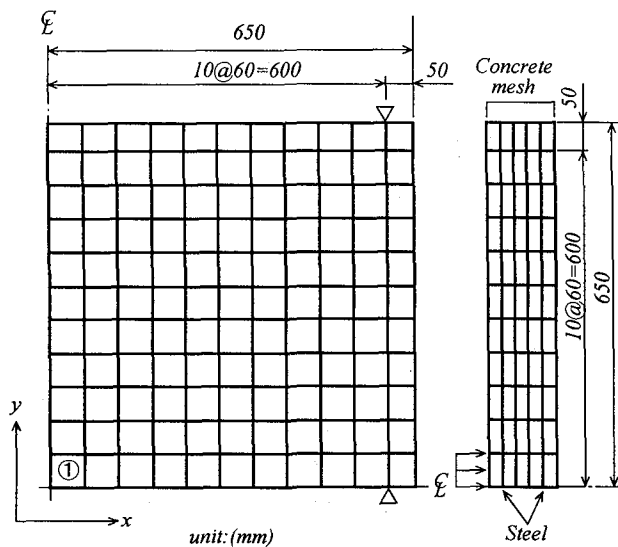


図-1 6面体要素3次元有限要素解析の要素分割

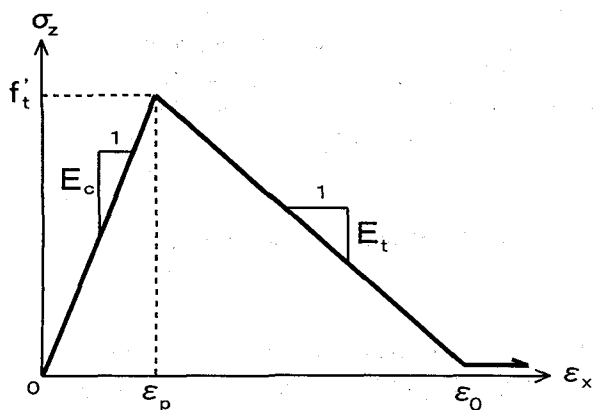


図-2 コンクリートの引張軟化特性

により提案されたコンクリートの破壊エネルギーを用いた引張軟化特性^{5),6)}の導入を試みている。なお、解析では鉄筋を線材として扱う。

2.1 コンクリートの引張軟化特性

本解析に取り入れたコンクリートの引張軟化特性は、Z.P.Bazant 等が提案したコンクリートの破壊エネルギーを用いる引張軟化特性^{5),6)}である。Bazant 等は多くの実験結果から破壊エネルギーをコンクリートのヤング係数(E_c)、引張強度(f'_t)、粗骨材の最大寸法(d_a)を用いて式(1)に示すような推定式で提案している。

$$G_f = \frac{(0.3044 f'_t + 2.72) f_t^2 d_a}{E_c} \quad (1)$$

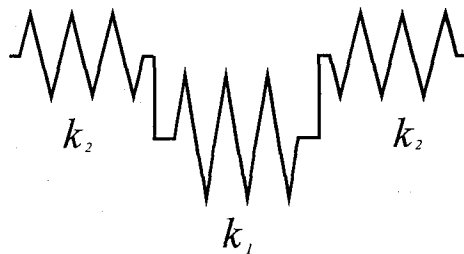


図-3 付着バネモデル

ここで、 G_f は破壊エネルギー(kgf/cm)であり、 E_c はヤング係数(kgf/cm²)、 f'_t は引張強度(peak stress)(kgf/cm²)、 d_a は粗骨材の最大寸法(cm)である。

また、コンクリートの引張軟化特性を図-2 のように1つの直線で近似し、その傾きを E_t と仮定すると、コンクリートの破壊エネルギーの算定式は式(2)のように表される。

$$G_f = w_c \left(1 - \frac{E_c}{E_t} \right) \frac{f_t^2}{2E_c} \quad (2)$$

ここで、 E_t は引張軟化特性(kgf/cm²)であり、 w_c はひび割れ幅($w_c = n d_a$ (cm))、 n は実験から求められる定数であり、コンクリートに対しては $n \approx 3$ である。

上式(2)を式(1)に代入することにより E_t が求められる。

2.2 コンクリートと鉄筋間の付着特性

コンクリートと鉄筋間の付着特性を完全付着として解析を行うと、部材中の破壊が進行した際に、構造物の変形の解析値が実験値に比べて小さくなる傾向にあるため、鉄筋コンクリート部材の解析には付着特性を考える必要がある。付着特性の解析モデルとしては、D.Ngo, A.C.Scordelis らが提案したボンドリンク要素⁸⁾が、最も一般的に用いられている。しかしながら、6面体要素を用いた3次元有限要素法へのボンドリンク要素の導入は、収束が非常に難しく共役勾配法を用いた場合には発散することが多くなるため適切とはいえない。そこで、以下に示す簡易的な方法を用いて付着特性を取り入れることにした。図-3に示すモデルは、バネ k_1 が鉄筋を、 k_2 がコンクリートと鉄筋間の付着バネを表している。それぞれのバネ定数が k_1, k_2 であり、またそれぞれのバネの相対変位が x_1, x_2 であるとする。このように考えると、付着特性を取り入れた鉄筋要素のヤング係数 E^* は次式で表すことができる。

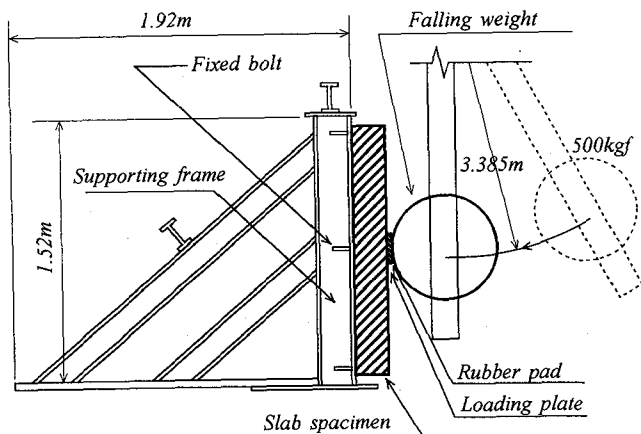


図-4 振り式衝撃実験装置

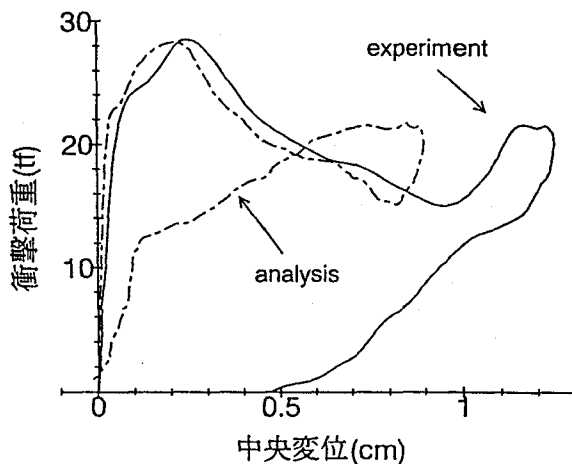


図-6 衝撃荷重～版中央変位曲線の比較

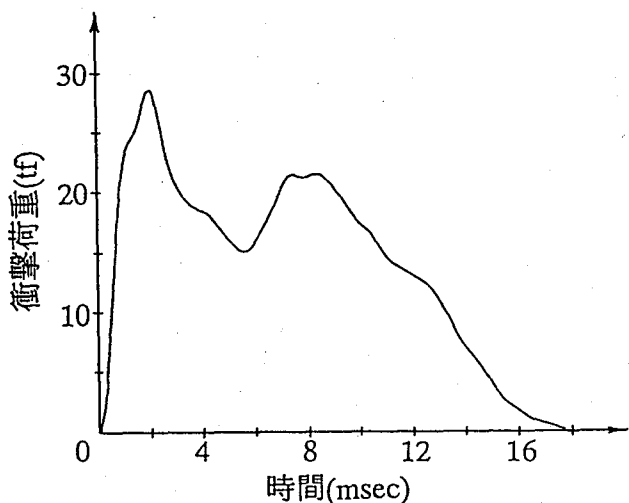


図-5 衝撃荷重～時間関係

$$E^* = \frac{E \times \frac{\ell}{A} k_2}{2E + \frac{\ell}{A} k_2} \quad (3)$$

ただし、 E は鉄筋のヤング係数である。次に、単位面積当たりの鉄筋の付着バネ定数を $\alpha (= 7300 \text{ kgf} / \text{m} \cdot \text{m}^2)$ とし、鉄筋要素面積を $2B$ 、奥行き単位長さ当たりの付着長を $\frac{\sum s_i}{L}$ とすると、鉄筋要素の付着バネ定数は次式となる。

$$k_2 = \alpha \frac{\sum s_i}{L} B \quad (4)$$

したがって、付着バネの相対変位 x_2 は付着特性を取り入れた鉄筋要素のひずみを ε^* とすると、次式で表すことができる。

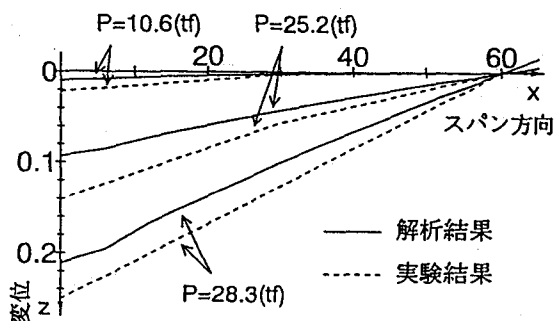


図-7 各衝撃荷重段階の変形分布の比較

$$x_2 = \frac{E^* A \varepsilon^*}{k_2} \quad (5)$$

なお、上記誘導の詳細は、文献7)に詳しく記されている。

この方法を用いた場合、簡便にコンクリートと鉄筋間の応力伝達のずれを表現することができ、共役勾配法の収束性に対しても影響を及ぼさないと考えられる。

2.3 解析精度の確認実験

6面体要素を用いた3次元有限要素法に対する数値解析精度を検討するために、図-1に示す解析モデルと同一のRC版に対して重錘落下衝撃実験を行った。実験で用いたコンクリートは、圧縮強度 $= 331 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ 、引張強度 $= 24.3 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ であり、鉄筋にはSD35(ヤング係数 $2.1 \times 10^6 \text{ kgf} / \text{cm}^2$)を用いた。実験は図-4に示す振り式衝撃実験装置を用いて行い、500kgfの円盤状の衝撃体を所定の落下高さまで引き上げ、振りのように落下させることによって斜線部分に設置したRC版に衝撃荷重を与えた。RC版は2辺支持の両端をそれぞれボルトによって固定した。また、本研究ではソフトな衝撃作用を対象としているため、載荷位置であるRC版中央部に鉄板を固定しその上にゴム板を接着しており、衝撃荷重はこれらを介

してRC版に伝えられる。

解析精度の確認実験と対応させる解析にあたっては、入力する衝撃荷重データは重錘落下高さ $h=65\text{cm}$ の実験によって得られた荷重～時間関係(図-5)を用いる。このRC版の破壊実験における衝撃荷重波形には、弾性挙動実験の場合とは異なり衝撃荷重のピークが2回ある。この衝撃荷重の第1のピークは、衝突初期の被衝撃体の抵抗によるもので、第2のピークは版中央から端部へ伝播し反射波として中央に戻ってくるために起こる高次の振動モードによる弾塑性挙動であると考えられる⁹⁾。したがって、RC版が完全な破壊に至らなかったためにこのように2つのピークがあらわれたものと考えられる。

2.4 解析精度の検証

図-6 に解析および実験におけるRC版の衝撃荷重～版中央変位曲線の比較を示す。また、図-7 にRC版の衝撃荷重の第1ピーク時までの各荷重段階での変形分布の比較を示す。これらの図から解析結果は実験結果と比較して衝撃荷重の第1ピーク時から除荷段階までは良く一致しているものの、その後の挙動は一致しているとは言い難い。この原因としては、本解析が荷重増分法を用いており、解析結果の除荷時における挙動を無視して負の荷重を作用させているため、除荷時およびその後の再載荷時において版の挙動と荷重との関係がアンバランスになっているためであると考えられる。また、本解析での供試体の要素分割は計算上の都合もあり多少粗くなっており、従って精度の向上する立体要素に比べて、扁平な直方体形状になっている。このため、解析上での応力およびひずみの要素間相互の伝達が不完全となり、図に示されるような違いとなつてあらわれたのではないかと思われる。しかしながら、コンクリート版の衝撃作用による破壊現象を対象とした場合には、弾塑性変形と考えられる除荷から第2ピーク時の挙動よりも、衝撃荷重の第1ピーク前後までが特に重要であると考えられる。したがって、コンクリート版の破壊挙動を評価する場合には本解析方法でも十分な精度が得られるものと考えられ、以後におけるRC版の破壊時衝撃挙動に対しては、この6面体要素を用いた3次元有限要素解析を用いることにする。

3. せん断補強筋を用いたRC版の耐衝撃性評価

本解析で対象とするRC版は、縦、横それぞれ130cm、厚さ13cm、スパン長120cmの2辺単純支持複鉄筋コンクリート版である。RC版に組み込むせん断補強筋は、押し抜きせん断破壊等の局所的な破壊を防ぐことを目的としており、その配筋位置はRC版の破壊時の変形状態およびひび割れ分布等から、図-8のRC版の1/4部分図に示すように載荷面近傍に鉛直方向(Type-A)および斜め方向(Type-B)とした。斜め方向のせん断補強筋は、落石覆工

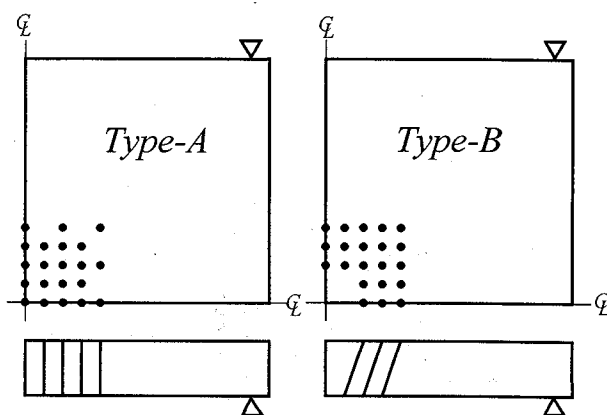


図-8 せん断補強筋の配置図 (RC版の1/4部分)

表-1 せん断補強筋の種類および配筋位置の組合せ

名称	せん断補強筋径	配筋位置
RC-1	なし	なし
RC-2	D6	Type-A
RC-3	D13	Type-A
RC-4	D6	Type-B

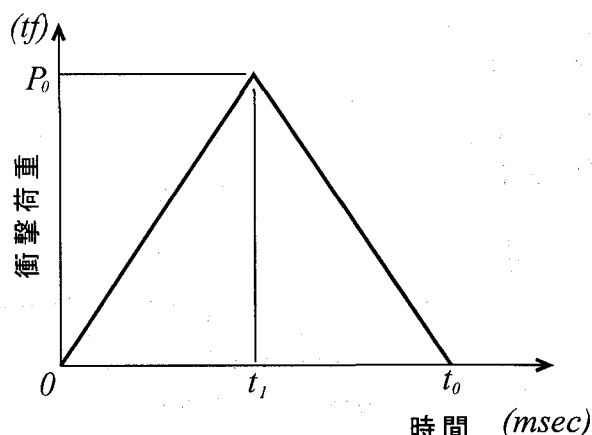


図-9 衝撃荷重～時間関係 (3角形近似)

等の耐衝撃性が要求される構造物では衝撃体の衝突位置の不確定性から配筋位置の設定が困難であるが、本解析ではせん断補強筋位置等の耐衝撃性への影響を検討するために取り上げるものとした。解析を行う各種RC版モデルの名称と、鉄筋の種類および配筋位置の組合せを表-1に示す。また、入力する衝撃荷重は版中央部に作用させ、簡単化のため衝撃荷重～時間曲線には図-9に示すような3角形近似した衝撃荷重波形を用いる。衝撃荷重のピークと構造側の応答のピークには、時間的なずれが考えられるが、本研究で対象としているソフトな衝撃問題では、このような時間的なずれは、小さいものとして、便宜上、耐衝撃性の評価は、各載荷速度において衝撃荷重のピーク時にちょうど破壊したものに対して行う。ただし、本解析におけるRC版の破壊条件は、コンクリート要素の圧壊もしくは鉄筋要素の破断をRC版の構造的破

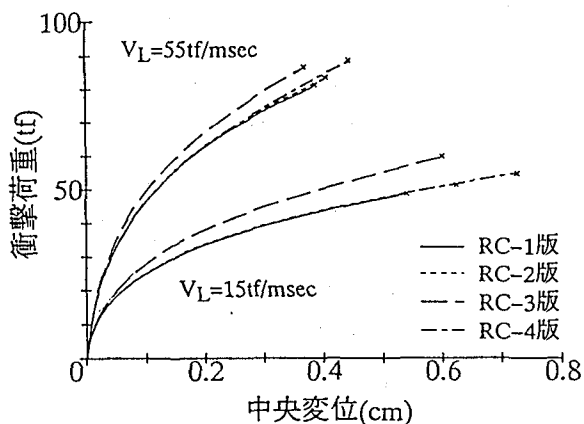


図-10 衝撃荷重～版中央変位曲線

表-2 破壊時衝撃荷重および最大変位

名称	$V_L = 15\text{tf/msec}$		$V_L = 55\text{tf/msec}$	
	破壊時衝撃荷重 (tf)	最大変位 (cm)	破壊時衝撃荷重 (tf)	最大変位 (cm)
RC-1	48.8	0.54	81.3	0.38
RC-2	51.3	0.62	82.9	0.40
RC-3	59.8	0.60	86.3	0.37
RC-4	54.6	0.73	88.3	0.44

壊とみなす。なお、本解析におけるコンクリートは、普通コンクリートとし、過去の実験結果を参考にして $f'_c = 331\text{kgf/cm}^2$ を用いる。

3.1 各種コンクリート版の衝撃破壊挙動

図-10 に載荷速度 $V_L = 15\text{tf/msec}$ と $V_L = 55\text{tf/msec}$ の衝撃荷重を与えた場合の、表-1 に示した各種コンクリート版の衝撃荷重～版中央変位曲線をまとめて示す。また、表-2 に破壊時衝撃荷重と最大変位を示す。これより載荷速度が速くなるとともに破壊時衝撃荷重が大きくなり、逆に破壊時の版中央変位は小さくなる傾向があることがわかる。また、曲線の傾きによって表される版の見かけの版剛性は、載荷速度の上昇とともに増加しているが、版剛性の大きさは両載荷速度とも RC-1 版、RC-2 版、RC-4 版、RC-3 版の順に大きくなる傾向がみられる。次に、せん断補強筋を鉛直方向に配置した (Type-A 配筋) コンクリート版の破壊時衝撃荷重を比較した場合、両載荷速度の場合ともせん断補強筋量を多くしていくにつれて破壊時衝撃荷重は大きくなっている。しかしながら、表-2 からわかるように、RC-4 版 (Type-B 配筋) の破壊時衝撃荷重を他の 3 種類の版と比較した場合、載荷速度 $V_L = 15\text{tf/msec}$ では RC-2 版より少し大きくなるにとどまっているが、 $V_L = 55\text{tf/msec}$ の場合では RC-3 版とほぼ等しくなっている。このように、載荷速度が $V_L = 15\text{tf/msec}$ 程度の比較的遅い場合では耐荷力の向上にせ

ん断補強筋量の増加が有効な方法であるが、載荷速度が $V_L = 55\text{tf/msec}$ 程度の比較的速い場合には、衝撃体の衝突位置に対し適切な方向に配筋することによっても大きく向上することがわかる。

次に、図-11～図-14 に載荷速度 $V_L = 15\text{tf/msec}$ および $V_L = 55\text{tf/msec}$ の衝撃荷重による RC 版の破壊時と各衝撃荷重段階での変形分布を示す。これらの図の x 軸は主筋方向、 y 軸は配筋方向を示している。また、実線は RC-1 版の破壊時における各種コンクリート版の変形分布を示している。これらの図より載荷速度 $V_L = 15\text{tf/msec}$ での各種コンクリート版の変形分布を比較すると、鉛直方向のせん断鉄筋量を増加することによって、同一荷重時の載荷面近傍に変形が集中している状態が改善され、曲げ変形分布に移行する傾向にあることがわかる。また、配筋方向の端部における変位も、せん断補強筋量とともに増加しており、破壊モードが押し抜きせん断破壊モードから曲げ破壊モードに改善される可能性があることがわかる。また、RC-4 版の破壊時における変形分布は、図-14 より曲げ破壊モードとなっており、同じ D6 の鉄筋を用いている RC-2 版よりも高い耐衝撃性を示していると考えられる。次に、載荷速度が $V_L = 55\text{tf/msec}$ の衝撃荷重が作用したときの変形分布を比較する。図-11～図-14 より、RC-1 版に対して鉛直方向にせん断補強筋を配筋した RC-2 版、RC-3 版では、いずれも破壊時に載荷面近傍に変形が集中しており破壊モードに改善効果があまりみられない。これは、図-15 に示すように、載荷速度が比較的遅い場合は、押し抜きコーンの角度が緩やかであるため、せん断ひび割れが鉛直方向に入ったせん断補強筋を効率よく交差し、ひび割れの発達が抑えられるのに対し、載荷速度が速くなると押し抜きコーンの角度は急になり、押し抜きに抵抗できるせん断補強筋の本数が減少してしまうからであると考えられる。このためにせん断補強筋量を増加させても、コンクリート版の破壊モードを改善することができないと思われる。しかしながら、押し抜きコーンの角度が急になった場合においても、押し抜きに抵抗できるように斜め方向に配筋した場合には、RC-4 版のように押し抜きせん断破壊モードを曲げ破壊モードへと改善できる可能性があると考えられる。

3.2 耐衝撃性評価

衝撃荷重作用下におけるコンクリート構造物の挙動は静的荷重下とは大きく異なる。同一コンクリート構造物でも衝撃体の種類や載荷速度の変化によって破壊モードが異なるため、耐衝撃性を定量的あるいは定性的に評価する指標が必要となる。そこで本研究では、耐衝撃性評価の指標¹⁰⁾として、表-3 に示す (1) 破壊時衝撃荷重、(2) 局変形指数、(3) たわみ体積、を取り上げ RC 版の耐衝撃性の評価を行う。

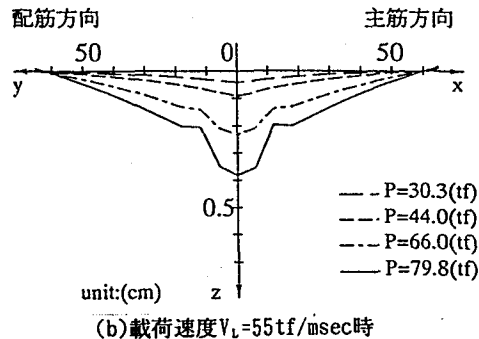
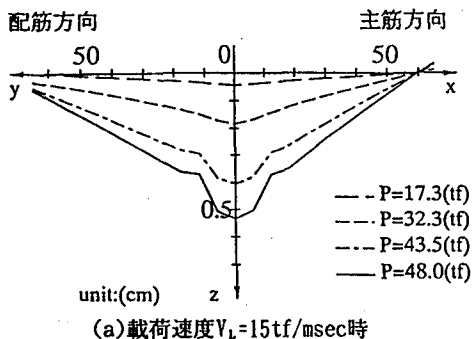


図-11 各衝撃荷重段階の変形分布 (RC-1版)

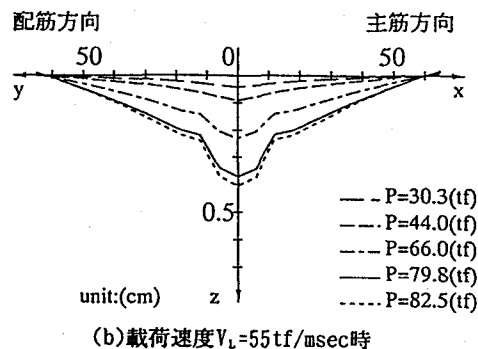
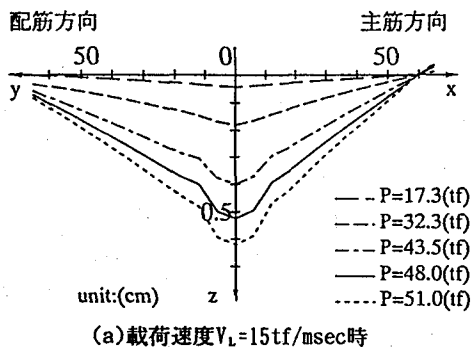


図-12 各衝撃荷重段階の変形分布 (RC-2版)

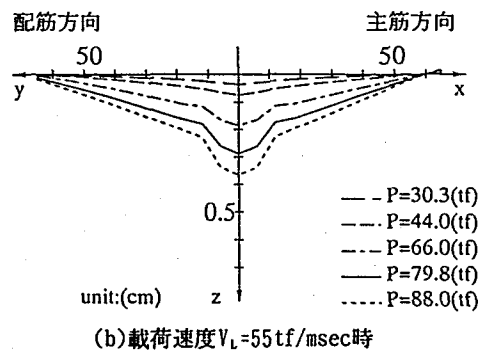
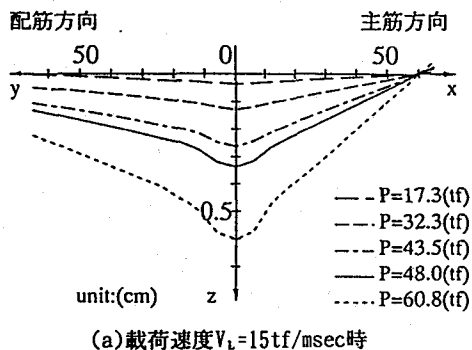


図-13 各衝撃荷重段階の変形分布 (RC-3版)

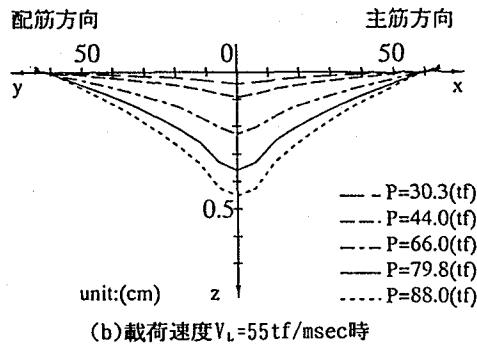
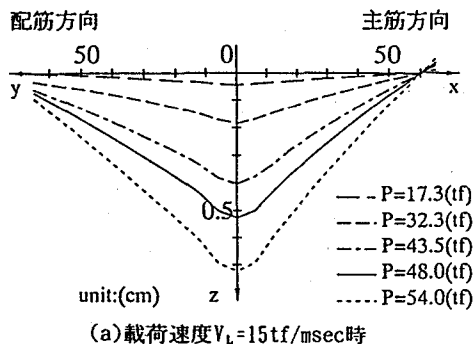


図-14 各衝撃荷重段階の変形分布 (RC-4版)

表-3 耐衝撃性評価

・破壊時衝撃荷重
耐衝撃性を表す指標。 大きいほど耐衝撃性に優れている。
・局部変形指数
局所的な変形を表す指標。 大きいほど破壊時の曲率半径が小さい。
・たわみ体積
変形状態を体積で表した指標。 大きいほど版全体がなめらかに変形。

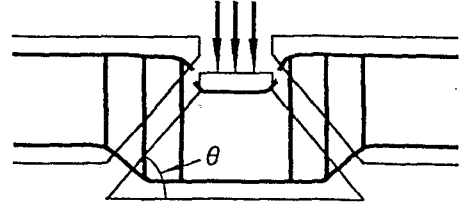


図-15 押し抜きコーン

3.2.1 破壊時衝撃荷重

図-16 に、各種RC版の載荷速度に対する破壊時の衝撃荷重の変化をまとめたものを示す。これより、各種RC版とも破壊時衝撃荷重は載荷速度の増加とともに大きくなっていることがわかる。また、鉛直方向にせん断補強筋を配置したRC版では、いずれの載荷速度においてもせん断補強筋量が多いRC版ほど、破壊時衝撃荷重は大きな値を示している。しかしながら、RC-4版は載荷速度 $V_L = 35 \text{tf/msec}$ 以上の場合に、4種類の版のうち最も大きな破壊時衝撃荷重を示している。したがって、耐荷力の増大を期待する場合、RC-4版のように押し抜きせん断ひび割れを横切るように斜め方向に設置することがより効率的となると考えられる。

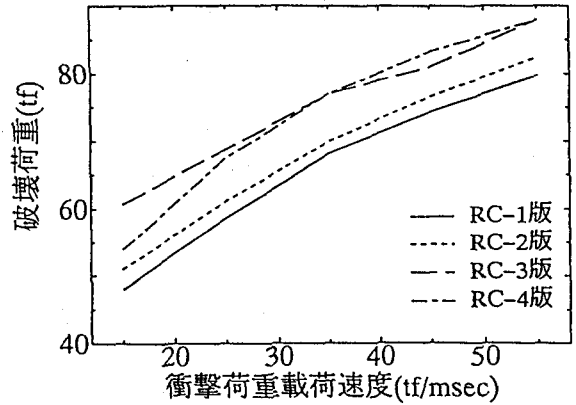


図-16 破壊時衝撃荷重の比較

3.2.2 局部変形指数

衝撃荷重を受けるRC版は、局所的な変形をした後に破壊に至りやすい。このようなRC版の破壊時の局所的な変形を表す値として、載荷面近傍における曲率 ($1/R$) が考えられるが、曲率には破壊時変位 (δ_u) の大きさの影響が含まれている。そこで本解析では、図-17 に示すように版中央および版中央から偏心距離 $\Delta X = 18 \text{cm}$ での変位を用いて式(6)により曲率の算定を行い、式(7)で示されるように、破壊時の曲率を載荷点変位で除した値を局部変形指数と定義し、RC版の局所的な変形を定量的に扱う。

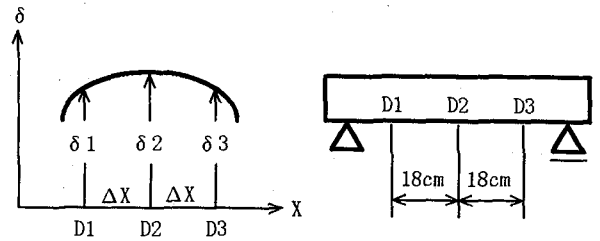


図-17 コンクリート版の破壊時曲率の算定法

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{\Delta X^2} (\delta_1 + \delta_3 - 2\delta_2) \quad (6)$$

$$\text{局部変形指数}(I_L) = \frac{\text{破壊時曲率}(1/R)}{\text{破壊時変位}(\delta_u)} \quad (7)$$

図-18 に各種RC版の破壊時における局部変形指数の載荷速度に対する変化をまとめたものを示す。これより各種RC版とも、載荷速度の増加とともに局部変形指数も増加しており、載荷面近傍へ変形が集中していることがわかる。局部変形指数は、RC-1版が4種類の版のうちで最も大きな値を示しており、載荷面近傍への変形の集中が大きく押し抜きせん断破壊の傾向を示していることがわかる。また、RC-4版はいずれの載荷速度に対しても

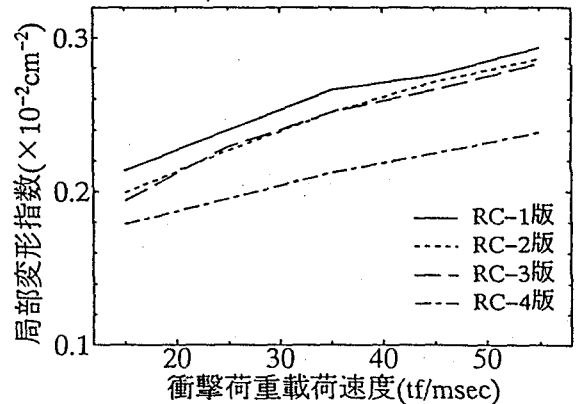


図-18 局部変形指数の比較

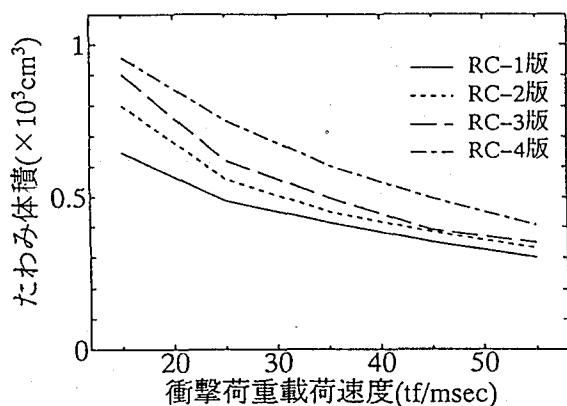


図-19 たわみ体積の比較

他の版に比べて値が小さく、RC版破壊時の局所的な変形の集中傾向が大きく改善されていることがわかる。

3.2.3 たわみ体積

たわみ体積は、無載荷の状態でのRC版面を基準とし、破壊時の版全面にわたるたわみ分布を積分し、その変形状態を体積表示したものである。RC版の破壊モードが曲げ破壊モードの場合には版全体が大きく変形するが、押し抜きせん断破壊モードの場合には局所的な変形となりたわみ体積は小さくなると考えられる。したがって、たわみ体積は構造物の破壊モードおよび衝撃吸収エネルギーと相関性強いと考えられる。図-19に破壊時における各種RC版のたわみ体積の変化をまとめたものを示す。いずれの版とも載荷速度の増加とともにたわみ体積は減少しており、変形能の低下がわかる。また、鉛直方向にせん断補強筋を配置したRC-2版、RC-3版は、載荷速度 $V_L = 15 \text{tf/msec}$ の場合にはRC-1版に対して比較的大きな値を示しており変形能は比較的大きいと考えられるが、載荷速度が大きくなるに従ってたわみ体積の値は急激に減少しており、RC-1版の値に近づいていることがわかる。一方、RC-4版はいずれの載荷速度においても4種類の版のうちの最も大きな値を示しており、RC版の破壊時における変形能の改善効果の大きいことがわかる。

4. 結論

本研究は、鉄筋コンクリート版に対するソフトの衝撃問題を対象に、コンクリートの引張軟化特性と、コンクリートと鉄筋間の付着特性を導入した3次元有限要素解析を用いて、せん断補強筋を用いたRC版の衝撃挙動の把握と耐衝撃性評価を解析的に検討したものである。本研究で得られた主な結果をまとめると以下ようになる。

- ① 引張軟化特性および付着特性を考慮した有限要素解析結果は、衝撃荷重の第1ピークと除荷付近までは比較的良好な精度が得られるものの、除荷の終了から第2ピークにかけてはあまり良好な精度とは言えない。

しかしながら、コンクリート版の衝撃挙動解析と耐衝撃性の評価に関しては、第1ピークあたりまでが重要であると考えられ、本解析法でも十分な精度が得られるものと考えられる。

- ② せん断補強筋を鉛直方向に配置した場合において、せん断補強筋量の増加は載荷速度の比較的遅い衝撃荷重に対して耐衝撃性改善に有効な手段であるが、載荷速度が比較的速度になると破壊モードの改善効果が小さくなることがわかった。一方、押し抜きせん断ひび割れを効率よく横切るように斜め方向に配筋した場合には、耐衝撃性の改善効果が大きく期待できることがわかった。

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会，衝撃問題研究小委員会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ 6，土木学会，1994。
- 2) A. Miyamoto, Michael W. King, M. Fujii : Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, ACI Structural Journal, V.88, No.4, pp.411-419, 1991.
- 3) A. Miyamoto, Michael W. King, M. Fujii : Analysis of Failure Modes for Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, ACI Structural Journal, V.88, No.5, pp.538-545, 1991.
- 4) W.F. Chen, D.J. Han : Plasticity for Structural Engineers, Springer-Verlag, New York, 1988.
- 5) Zdenek P. Bazant, B.H. Oh : Crack band theory for fracture of concrete, Matériaux et Constructions, Vol.16, No.93, pp.155-177, 1983.
- 6) D.J. Han, W.F. Chen : Constitutive Modeling in Analysis of Concrete Structure, Journal of Engineering Mechanics, Vol.113, No.4, pp.577-593, 1987.
- 7) 宮本文穂・北山篤・五嶋真澄：3次元有限要素解析によるRC版の衝撃破壊挙動解析と精度の検証，構造工学論文集，Vol.42A，pp.1325-1336，1996。
- 8) Ngo, D., Scordelis, A.C. : Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams, ACI Journal, pp.152-168, 1967.
- 9) 今野久志・本名一夫・城ヶ端政次：衝撃力を受けるRC版の挙動—落石覆道動的設計のために—，落石覆道の衝撃問題に関する研究論文集，北海道開発局開発土木研究所構造研究室，構造研究室資料第3号，pp.78-83，1990。
- 10) 宮本文穂・石橋照久・三戸雅文：コンクリート版構造の耐衝撃性評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.40A，pp.1605-1618，1994。

(1996. 9. 6 受付)