

[2105] 鉄筋コンクリート版構造の衝撃破壊挙動解析
に関する基礎的研究

正会員 藤井 学 (京都大学工学部)
 正会員 宮本 文穂 (神戸大学工学部)
 正会員 ○鮎子多浩一 (住友電工)
 中辻純一郎 (竹中土木)

1. まえがき 原子力施設・海洋構造物・各種貯蔵タンク等厳しい外力環境におかれているコンクリート構造物の中には、偶発的外力（飛行機・船舶・車両等の衝突）として衝撃作用に対する配慮が必要となる場合がある。しかし、このような衝撃作用に対するコンクリート構造物の挙動は複雑となり、また外力特性及びこれによる破壊現象の把握の困難さ等から設計上効果的な対処ができない現状にある。

本研究は、従来より著者らがRCはりに対して適用していた2次元動的非線形有限要素解析¹⁾を、積層化手法を用いて3次元に拡張してRC版構造の衝撃挙動解析に適用した結果を、RC版及び都市高速道路に付随して設置されるRC高欄の、自動車交通を想定した衝撃実験結果と比較することにより、その解析精度の検証を行うとともにRC版構造の衝撃破壊挙動の解明を試みたものである。

2. 積層化有限要素解析によるRC版構造の衝撃挙動解析とその精度

2.1 RC版構造の積層化有限要素モデル及び解析方法

本解析は、積層化手法を用いた板の曲げ有限要素解析²⁾と動的弾塑性解析を併用して行う。解析に当たっての基本仮定を以下のように設定する。

- (1) 弾塑性域においても法線保持の仮定が成立し、微小変形理論が適用できるものとする。
- (2) RC版を仮想のコンクリート層と、軸力と平面方向のせん断力を負担する線材として取り扱う鉄筋層でモデル化する。
- (3) 要素で代表されるコンクリート各層は、平面応力場にあるものとみなし、層間に滑りは生じないものとする。
- (4) 弾塑性域とも曲げモーメントを弾性部分の中心回りで取扱い、面内軸力の影響を無視する。
- (5) ひびわれ発生後のコンクリート層モデルを直交異方性体と仮定する。
- (6) 入力データとして用いる各材料特性は、静的一軸特性に基づくものを用いる。

本解析で対象としたRC版構造は、2辺単純支持RC版と片持ち版構造系としてのRC高欄である。

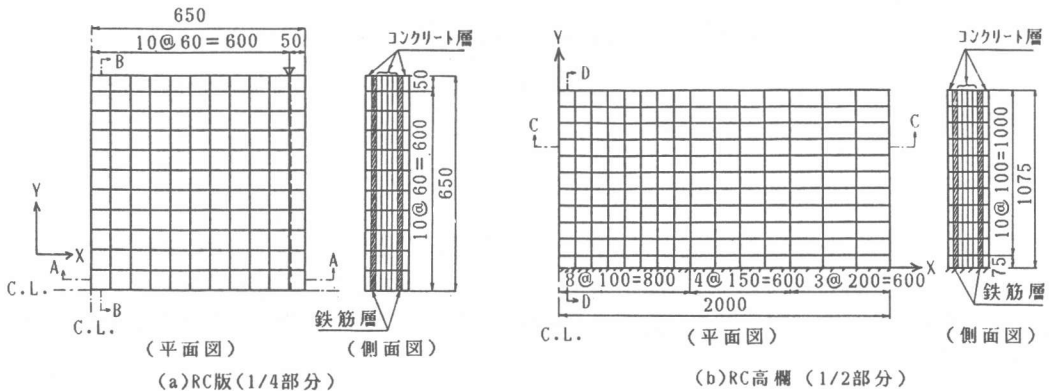


図1 RC版構造の積層化有限要素モデル (単位: mm)

図1(a)(b)に、解析に用いたそれらの1/4部分及び1/2部分の有限要素モデルを示す。RC版の形状・寸法は、130x130x13cmの正方形版とし、スパンは120cmで版中央部分等分布(パッチ)载荷とした³⁾。確認実験で用いた

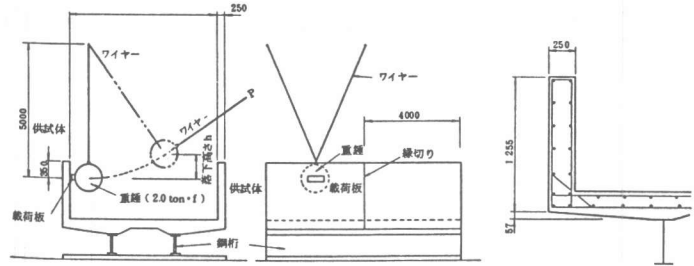
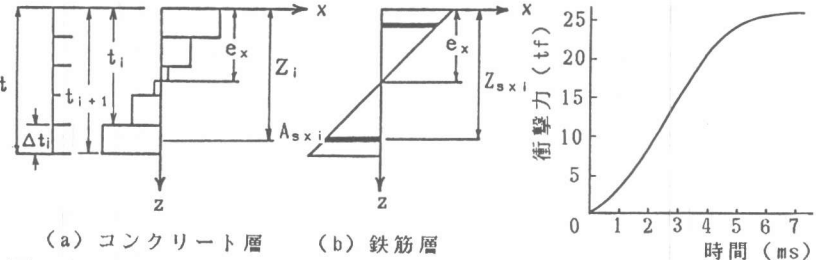


図2 RC高欄の形状、寸法及び载荷方法(単位: mm)

RC高欄の供試体及び载荷方法の概要を図2に示す。2つのRC版構造に対する



(a) コンクリート層 (b) 鉄筋層

衝撃入力は、重錘の自由落下により与えられ、衝撃力は重錘加速度に重錘質量を乗じて算出した。

図3 コンクリート及び鉄筋層のひずみ

図4 衝撃力~時間関係の一例

なお、解析モデルの積層数は2層の鉄筋層を含む合計8層で、鉄筋層の弾性係数は、x、y両方向の鉄筋量によって換算したものを与える。

積層化モデルにおける各層のひずみを図3のように仮定し、断面内の中立軸位置を次式で求めるものとする。

$$e_x = \frac{1/2E_c \cdot t^2 + E_s \cdot \sum A_{sxi} \cdot Z_{sxi}}{E_c \cdot t + E_s \cdot \sum A_{sxi}}, \quad e_y = \frac{1/2E_c \cdot t^2 + E_s \cdot \sum A_{syi} \cdot Z_{syi}}{E_c \cdot t + E_s \cdot \sum A_{syi}} \quad (1)$$

ここで、 e_x 、 e_y は、x及びy方向それぞれの弾性部分の中心、 E_c 、 E_s は、それぞれコンクリート及び鉄筋の弾性係数、 A_{sxi} 、 A_{syi} は、x及びy方向それぞれの鉄筋層iの単位長さ当たりの平均断面積、 Z_{sxi} 、 Z_{syi} は、xおよびy方向それぞれのi層中心の版上縁からの距離、tは版厚である。

積層要素には非適合長方形板曲げ要素を用い、その要素を含む断面の剛性マトリックスは、次式で示す各層の剛性マトリックス $[K]_i$ をたし合わせて得られる。

$$[K]_i = \iint [B]^T [D]_i [B] dx dy \quad (2)$$

ここで、

$$[D]_i = \Delta t_i \begin{bmatrix} \{(z_i - e_x)^2 + \frac{\Delta t_i^2}{12}\} D_{11}, & \{(z_i - e_x)(z_i - e_y) + \frac{\Delta t_i^2}{12}\} D_{12}, & \{(z_i - e_x)(z_i - e_{xy}) + \frac{\Delta t_i^2}{12}\} D_{13} \\ \text{sym.} & \{(z_i - e_y)^2 + \frac{\Delta t_i^2}{12}\} D_{22}, & \{(z_i - e_y)(z_i - e_{xy}) + \frac{\Delta t_i^2}{12}\} D_{23} \\ & & \{(z_i - e_{xy})^2 + \frac{\Delta t_i^2}{12}\} D_{33} \end{bmatrix}$$

$$\{\sigma\}_i = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \{\varepsilon\}_i, \quad \text{ここで、}\{\sigma\}_i, \{\varepsilon\}_i \text{は、それぞれ平面応力場にある} i \text{層の応力とひずみである。}$$

なお、質量モデルとしては、整合質量モデルを用い、非適合長方形板曲げ要素の整合質量マトリックスで表示した。

弾塑性構成モデルは、等質等方弾性体の弾性係数(E, ν)に対応させて弾塑性係数(E_p, ν_p)を想定し、異方性の主軸(x, y)を各要素の主応力方向にとり、材料の一軸状態によって決まる変換パラメータ(η, ξ)を用いて、弾塑性体のヤング係数とポアソン比を $\eta_x E, \xi_x \nu, \eta_y E, \xi_y \nu$ のように表す。なお、各積層要素の破断及び破壊現象の取り扱いは、その部分に蓄積されていた弾性ひずみエネルギーを内部応力に等価な要素節点力に置換する方法を用いる。

動的平衡方程式の解は、Newmark- β 法($\beta = 1/4$)を利用することにより次に示す連立一次方程式の解として得るものとする¹⁾。

$$([K] + \frac{1}{\beta \Delta t^2} [M]) \cdot \{\Delta u\}_{t+\Delta t} = \{\Delta R\}_{t+\Delta t} + [M] \cdot (\frac{1}{\beta \Delta t} \{\dot{u}\}_t + \frac{1}{2\beta} \{\ddot{u}\}_t) \quad (3)$$

ここで、 $[M], [K]$ は、質量及び剛性マトリックスであり、 $\{\dot{u}\}_t, \{\ddot{u}\}_t$ は速度及び加速度ベクトル、 $\{\Delta R\}_{t+\Delta t}, \{\Delta u\}_{t+\Delta t}$ は、微小時間 Δt における外力及び変位増分ベクトルである。ただし、本解析では各時間ステップでの不釣り合い力を解消するまで反復計算を行うものとする。

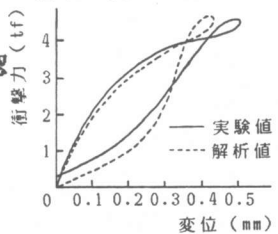
以上の解析において、データとして入力するコンクリート及び鉄筋の材料一軸特性は実験値を、衝撃力データは、重錘落下試験によって得られる衝撃力～時間関係(図4参照)を用いる。RC版においては、載荷板にゴム板を介してソフトな衝撃作用として、RC高欄の場合は、接触面の材質が両方とも鋼であるためハードな衝撃作用となっている。従って、後者の場合、最大衝撃力以後は自由振動として解析する。衝撃力データの作成に当たっては、解が Δt に対して安定するように数種類に変化させ、解の安定性を検討した結果、表1のように決定した。

表1 各種衝撃解析における時間増分(Δt)

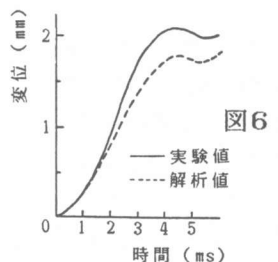
版構造の種類	解析の種類	
	弾性解析 (msec)	破壊解析 (msec)
R C 版	0.2	0.05
RC高欄	最大衝撃力まで	0.025
	最大衝撃力以降	0.1

2.2 確認実験による解析精度の確認

図5, 6は、弾性範囲内での各挙動を解析値と実験値で比較した一例を示したものである。図5(a),(b)は、RC版の衝撃力～変位履歴及びRC高欄の変位応答を示したものである。これより、RC版及びRC高欄とも多少の差異はみられるものの解析結果は実験結果と良い一致を示していることが分かる。図6(a),(b)に示すRC版及びRC高欄の応答加速度の波形は、ある一定周期で振動していることがわかり、実験値と解析値はほぼ一致しているといえる。図7は、RC版の衝撃力～変位関係を弾塑性範囲で実験及び解析結果を比較したものであり、衝撃力が大きくなると差異が生じているが、載荷初期における剛性は比較的良く一致しているといえる。

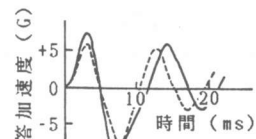


(a) RC版の弾性履歴曲線の比較(版中央)

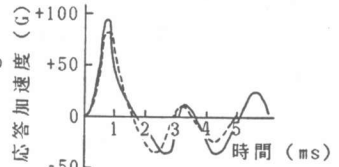


(b) RC高欄の変位～時間関係の比較(載荷直下)

図5 RC版構造の変位挙動



(a) RC版(版中央)



(b) RC高欄(載荷直下)

図6 応答加速度～時間関係の比較

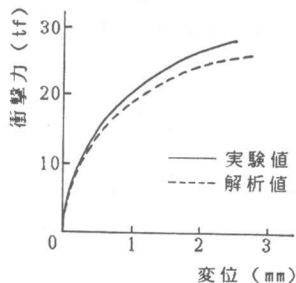


図7 RC版の衝撃力～変位関係の比較(版中央)

以上の結果より、本解析は、面内軸力の影響を無視しているにもかかわらず、弾塑性範囲での実験結果を比較的高精度で再現で

きるものと考えられる。

3. 各種RC版の衝撃挙動解析

ここでは、普通強度RC版、高強度RC版、鋼繊維補強RC版（以下、RC版、HRC版、FRC版と呼ぶ）の3種類のRC版について、実験より得られたコンクリートの材料一軸特性(図8参照)をパラメータとして解析し、実験結果と比較するとともに、各種版の衝撃破壊挙動について検討する。ここで、コンクリートの引張り破断（ひびわれ）については、引張り限界ひずみを設定した。なお、鋼繊維補強コンクリートの引張り一軸特性は、図9のようにモデル化した。また、軽量コンクリートRC版(LRC版)についても、材料特性を図8に示すように設定して同様に解析した。この場合、軽量コンクリートの単位体積重量を 1.5tf/m^3 とした。

図10(a)、(b)は、実験及び解析における各種版の衝撃力～変位関係を示したものである。これより、解析結果は実験結果と良好な対応を示しており、解析においても実験で得られる各種版の特徴が現れており、RC版を基準に比較すると、HRC版、FRC版ともに剛性が大きく、FRC版はひびわれ発生後の剛性低下が小さく、その傾向は高衝撃力域まで及んでいることがわかる。また、LRC版は低衝撃力域から剛性が小さくなっている。なお、解析においては、約3倍の載荷速度¹⁾の衝撃力波形を入力した場合についても併記している。これより、載荷速度が大きくなると、各種版共通に慣性力が大きく作用し剛性が大きくなる傾向が明らかとなる。

図11(a)～(e)、図12(a)～(e)に、各種版におけるスパン中央配力筋方向のたわみ分布及び断面内ひびわれ進展状況の解析結果を示す。RC版については約3倍の載荷速度の場合の解析結果も示している。これより、RC版を基準として比較すると、LRC版は比較的たわみの分散がよく破壊の進行が早い傾向にあり、FRC版は配力筋方向にほぼ均等なたわみ分布及び破壊状況となり、降伏線の形成が推察され有効幅が大きくなると考えられる。また、逆にHRC版の場合は破壊領域に近づくにつれて局所的な変形及びひびわれ進展状況を示すようになり、破壊範囲が狭くなると推察できる。また、載荷速度が大きい場合については、たわみ分布及び破壊状況が局所的になる傾向

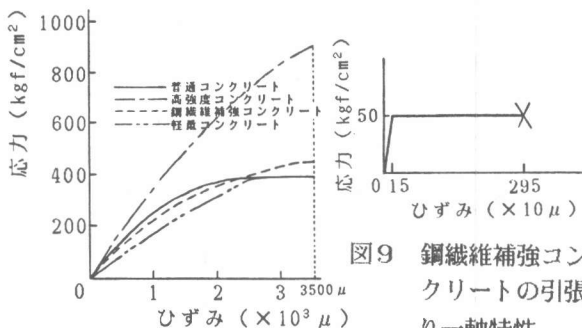


図8 各種コンクリートの材料一軸特性

図9 鋼繊維補強コンクリートの引張り一軸特性

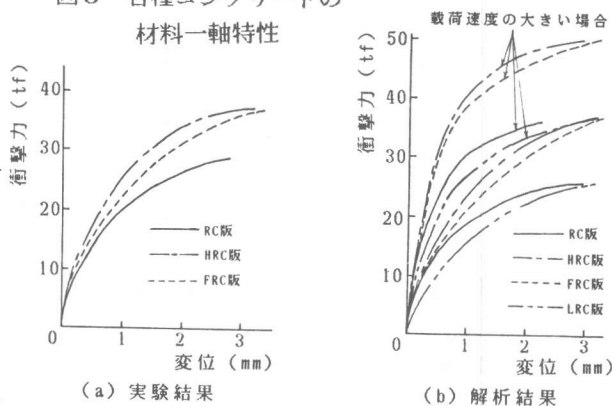


図10 各種版の衝撃力～変位関係（版中央）

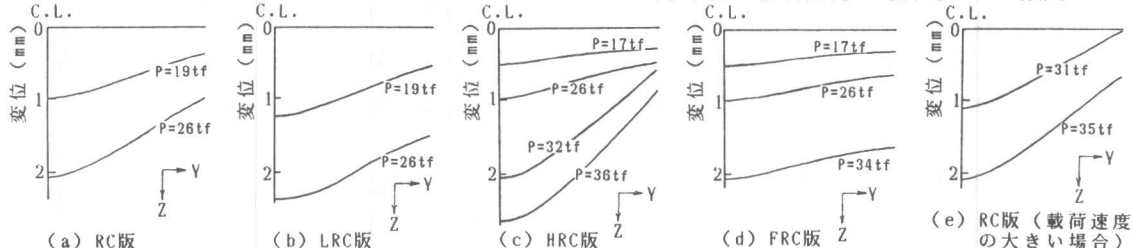


図11 各種版の配力筋方向のたわみ分布（解析結果）

が確認できる。

図13(a)、(b)は、RC版、FRC版(1/4部分)の解析における、主応力直角方向図(最大衝撃力時)を示したものであり、ひびわれ発生方向を示すものである。これらは、後述する実験結果とほぼ対応する傾向を示しており、FRC版の裏面引張りひびわれ(実線)の方向は降伏線に沿う傾向を示すことがわかる。

次に、図14(a)~(c)に各種版の実験における最終的な破壊状況(裏面)を示す。ここで実験における破壊挙動について述べる。RC版、HRC版は、繰り返し衝撃作用を受けると初期に曲げひびわれが卓越し、劣化の進行とともにコンクリートの裏面剝離を伴って押し抜きせん断破壊に至る。しかし、HRC版の方が大きな変形能を示し、高衝撃力まで曲げで耐えるが、最終的な押し抜き範囲は少し狭くなる傾向がみられる。一方、FRC版は卓越した降伏線を形成し最後まで曲げで破壊に至り、コンクリート片の飛び散は大きく改善される。よって、前述の解析における破壊挙動は、この各種版の実験における破壊性状を良く表していると考えられる。本解析においては、コンクリートの一軸特性、特に要素の引張り破壊に伴う応力解放の特徴が破壊性状に影響しているものと考えられ、FRC版は、鋼繊維により急激な応力解放が阻止されるためひびわれが分散し、HRC版では、微小時間に比較的大きな応力が解放されるため局所的な破壊になるものと思われる。

4. 衝撃作用を受けるRC高欄への適用

ここでは、比較的ハードな衝撃作用下におけるRC高欄の挙動を検討する。図15は、RC高欄及び軽量コンクリート(LRC)高欄の変位応答を示したものであるが、RC高欄の変位応答の解析値は実験値より大きめとなる傾向がある。また、LRC高欄の解析値は、RC高欄のものより同一衝撃作用下での変形量が大きくなるという結果が表われた。

図16~17は、RC高欄の衝撃挙動特性の解析結果を示したものである。すなわち、図16には、衝撃作用初期における載荷板直下の鉛直方向及び水平方向たわみ分布を示し、また、図17(a)、(b)には、RC高欄1/2部分での主応力直角方向分布を示している。これらより、衝撃作用初期におい

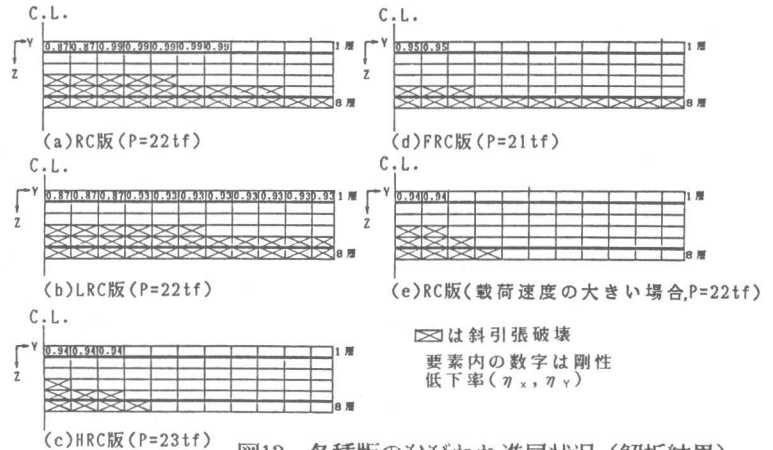


図12 各種版のひびわれ進展状況(解析結果)

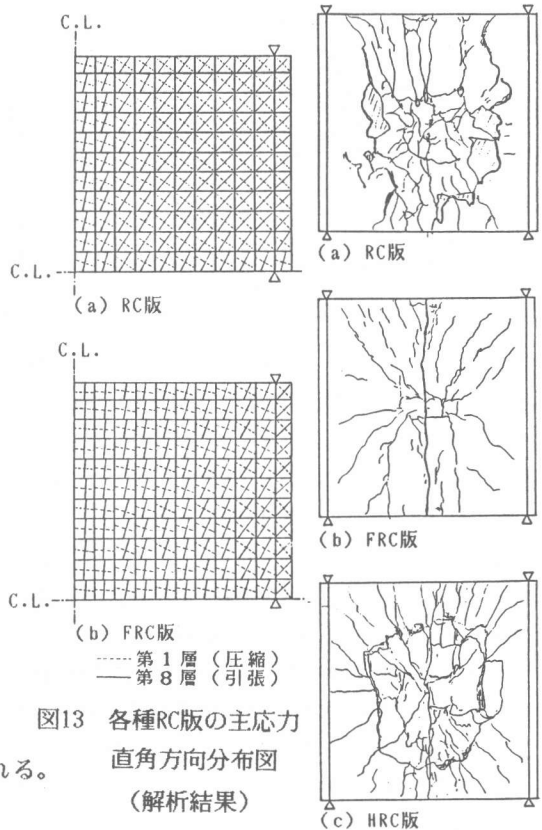


図13 各種RC版の主応力直角方向分布図(解析結果)

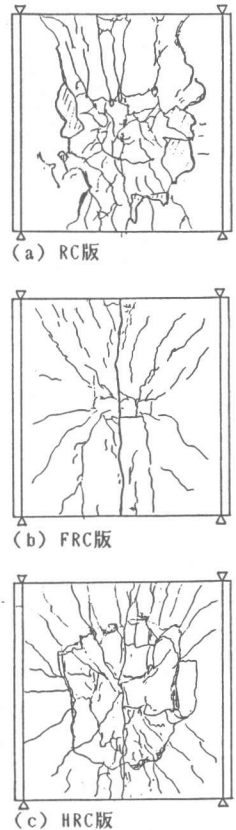
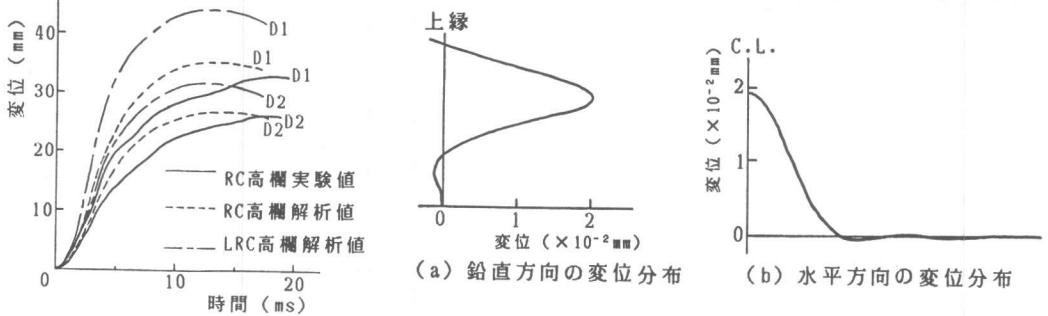


図14 各種RC版の最終破壊状況(実験結果)

ては慣性力、高次振動モードの影響により局所的なたわみ性状を示す領域が存在し(図16参照)、高欄各部に複雑な応力分布の発生が現れていることが明かとなる(図17(a)参照)。また、図17(b)



図中D1、D2は上縁よりそれぞれ10cm、35cm(載荷直下)位置での変位

図15 RC及びLRC高欄の変位～時間関係

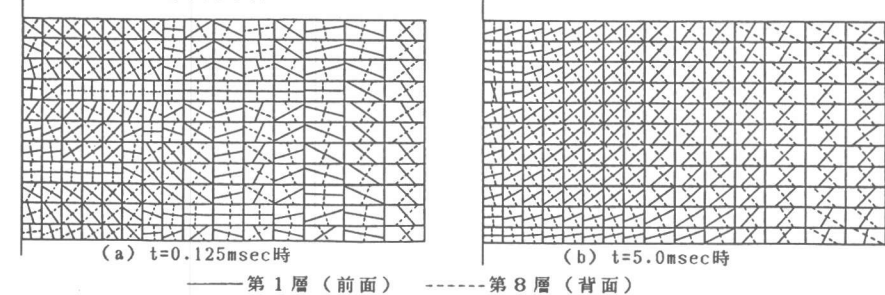


図17 RC高欄の主応力に直角方向分布図(解析結果)

より、実線で示した主応力直角方向分布(引張りひびわれに相当する)が、図18に示した実験におけるRC高欄の最終ひびわれ状況と一致しており、ひびわれ状況の解析も可能であると考えられる。

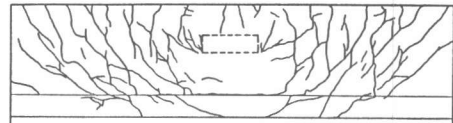


図18 RC高欄の最終ひびわれ状況(実験結果)

5. 結論

本研究は、積層化有限要素解析手法をRC版構造の衝撃破壊挙動解析に適用し、その解析精度の確認を行うとともに実構造物へ応用したものである。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 積層化有限要素手法を用いた本衝撃解析は、面内軸力の影響を無視しているにもかかわらずRC版構造に関する実験結果を比較的高精度で推定可能なことが明かとなった。
- (2) 本解析における入力データとして材料一軸特性及び載荷速度を変化させることにより、各種RC版の衝撃破壊挙動特性の変化を明確に解析できた。
- (3) 本実験におけるRC高欄のようなハードな衝撃作用となるものについては、その弾塑性範囲での挙動を最大衝撃力以後自由振動として解析することによってほぼ妥当な結果が得られた。

参考文献

1) 藤井, 宮本, 森川; 衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの力学的挙動に関する基礎的研究、土木学会論文集 第360/V-3, 1985.2 2) 内山 ほか; 鉄筋コンクリート床版の弾塑性解析、建築学会論文集、1979.2 3) 藤井, 宮本, 鮎子多, 岡; 単一衝撃を受けるコンクリート版の破壊挙動に関する研究、第8回コンクリート工学年次学術講演会論文集、1986