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

Round-Robin analysis on impact behavior of RC beam subjected to a falling-weight impact force

岸 徳光* 安藤智啓** 井元勝慶*** 河西良幸**** 香月 智† 上林厚志†† 桝谷 浩†††
Norimitsu KISHI, Tomohiro ANDO, Katsuyoshi IMOTO, Yoshiyuki KASAI, Satoshi KATSUKI, Atsushi KAMBAYASHI and Hiroshi MASUYA

*工博 室蘭工業大学教授 工学部 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)
**博 (工) 防衛庁第四研究所研究員 施設構造研究室 (〒229-0006 相模原市渕野辺 2-9-54)
***博 (工) (株) 大林組技術研究所担当部長 プロジェクト部 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸 4-640)
****工博 前橋工科大学教授 工学部 建築学科 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1)
†工博 防衛大学校助教授 理工学部 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
††工修 (株) 竹中工務店技術研究所研究員 (〒270-1352 千葉県印西市大塚 1-5-1)
†††工博 金沢大学助教授 工学部 土木建設工学科 (〒920-0942 石川県金沢市小立野 2-40-20)

In order to confirm the accuracy of various numerical analysis methods for estimating impact resistant behavior of RC beams, Round-Robin pre/post-analysis for impact behavior of rectangular RC beam subjected to a falling-weight impact force was conducted. Representative six researchers including professors were jointed for this research project, in which analysis methods used here were: two two-dimensional analysis methods using beam element and multi-layered shell element; two-dimensional discrete element methods; and three-dimensional finite element methods. From this research project, it was recognized that all methods used here can be available for evaluating the impact behavior of the RC beam with a good accuracy when a suitable constitutive model, damping factor, and boundary conditions may be used.

Key Words : *RC beam, falling-weight impact test, impact behavior, impact response analysis, round-robin analysis*
キーワード : RC梁, 重錘落下衝撃試験, 衝撃挙動, 衝撃応答解析, ラウンドロビンアナリシス

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) / プレストレスコンクリート (PC) 構造物等の耐衝撃用途を目的とした土木・建築構造物の合理的な耐衝撃設計法を確立するためには，実験のみならず実験結果を補間する意味からも数値解析的な研究が必要不可欠である．近年，コンピュータの目覚ましい発展により，RC/PC構造物やこれらの構成要素である梁，柱，版部材の衝撃挙動を精度よく再現できる数値解析手法の確立に向けた検討が，多くの研究機関で精力的に行われるようになってきた．しかしながら，これらの数値解析的研究はこれまで各機関が独自のノウハウの下に実施した実験結果と比較することによってその妥当性を評価している．したがって，その妥当性の評価は，各研究者や技術者の個人的な見解に基づいて行われているのが現状である．しかしながら，今後のRC/PC構造物や構造部材の衝撃挙動に関する数値解析結果を蓄積・集約して設計工学に発展・反映させるためには，各解析手法の特徴やそれぞれの解析手法の確からしさを把握しておくことが重要である．

このような観点より，我が国の各機関で採用している解析手法の特徴や数値解析結果の精度の現状を把握することを目的として，静載荷時に曲げ破壊が卓越する矩形RC梁に着目し，重錘落下衝撃荷重載荷時の衝撃挙動に関するラウンドロビンアナリシスを実施した[1)]．なお，ラウンドロビンアナリシスには，プレアナリシスとポストアナリシスの2種類がある．このうち，プレアナリシスとは，ある想定した現象に対して参加機関が一同に予備解析を実施し，予め決められた項目に関する解析結果を解析手法とともに一般に公表するものである．一方，ポストアナリシスとは，プレアナリシスに参加した機関が，実験終了後に実験結果をより精度よくシミュレートするために解析モデルや材料構成則モデルに関する再検討を行い，必要であれば事後解析を実施してその結果を公表するものである．

2. ラウンドロビン・プレアナリシスの実施要領

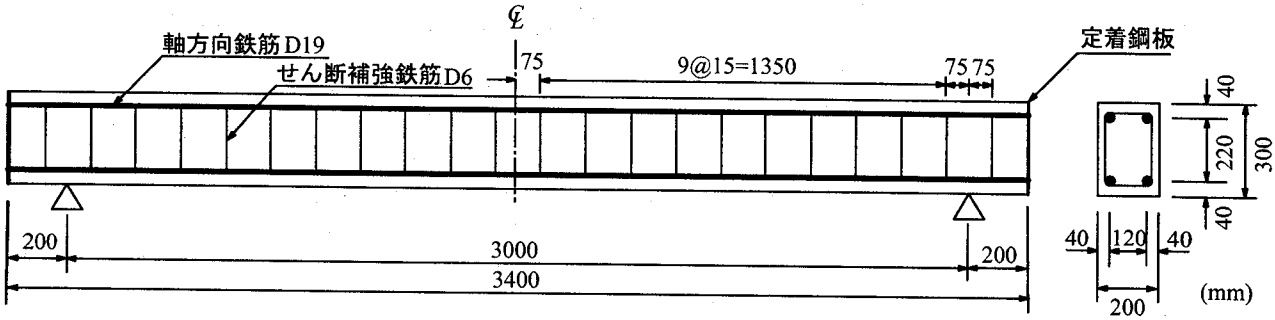
以下の条件のもとに，重錘落下による矩形RC梁の衝撃挙動に関するラウンドロビン・プレアナリシスを実施することとした．

表－1　解析条件および出力項目

解析対象	両端に 200 mm の張出しを有するピン支持された矩形断面 RC 梁
RC 梁の形状寸法	矩形断面 (200 × 300 mm)，純スパン長 = 3,000 mm，全長 = 3,400 mm
配筋	主鉄筋比 = 1 % の複鉄筋 RC 梁 (図－1 参照)
コンクリート強度	39.2 MPa
主鉄筋	SD345 D19，降伏強度 = 392 MPa
せん断補強筋	SD295A D6，降伏強度 = 343 MPa
重錘	質量 = 400 kg，先端形状 = 高さ 2 mm のテーパ（曲率半径 = 1,407 mm） 材質：弾性係数 = 206 GPa，ポアソン比 = 0.3，詳細は 図－2 参照
重錘衝突速度	7 m/s
載荷装置	室蘭工業大学に設置されている構造物耐衝撃耐荷力評価試験装置
支点部治具	跳ね上がり防止装置および支点反力測定用治具付きでピン支持状態（ 図－3 参照)
載荷点位置	スパン中央点
出力応答値	時間は重錘が RC 梁に衝突する時間を 0 ms として整理する． 1) 重錘衝撃力波形，合支点反力波形，載荷点変位波形; 2) 最大重錘衝撃力値とその発生時間 3) 最大片側支点反力値とその発生時間; 4) 最大変位とその発生時間

表－2　試験体の設計値一覧

主鉄筋比 P_t	せん断スパン比 a/d	静的曲げ耐力 P_{usc} (MPa)	静的せん断耐力 V_{usc} (MPa)	せん断余裕度 α ($=V_{usc}/P_{usc}$)
0.010	5.77	70.8	170	2.40



図－1　RC 梁試験体の形状寸法および配筋状況

2.1 解析条件および出力項目

表－1 の条件のもとに RC 梁に関するラウンドロビン・プレアナリシスを実施することとした．

2.2 RC 梁の設計値一覧

表－2 には，用いた試験体の設計値一覧を示している．表中，静的曲げ耐力 P_{usc} および静的せん断耐力 V_{usc} は，土木学会コンクリート標準示方書に基づいて算定している．このうち，P_{usc} は断面分割法を適用して算定した．また，本試験体は実構造を想定していないことより，各耐力算定時の部材係数は $\gamma_b = 1.0$ としている．表より，本試験体はせん断余裕度 α ($= V_{usc}/P_{usc}$) が 1.0 以上であり，静載荷時に曲げ破壊が先行する梁であることが分かる．

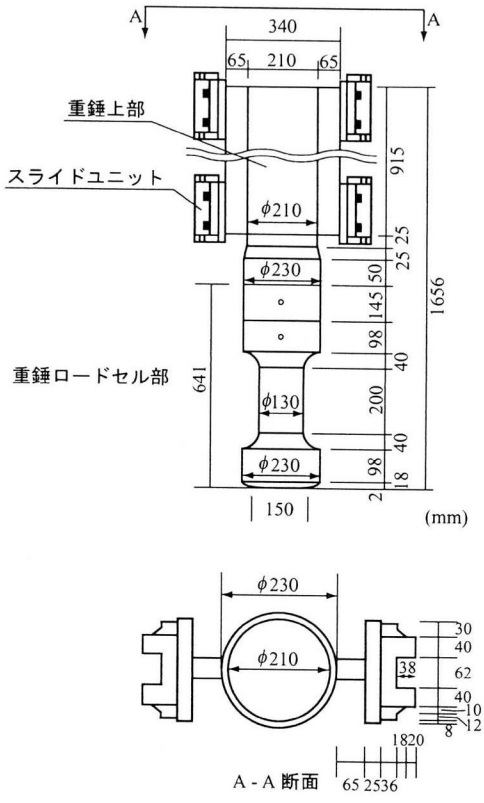
3. 衝撃載荷実験の実施

3.1 実験の概要

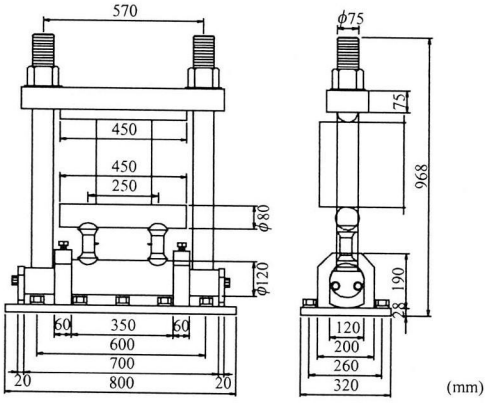
写真－1 には，室蘭工業大学において実施した RC 梁に関するラウンドロビンアナリシスのための重錘落下衝撃実験の状況を示している．実験は，重錘を衝突速度が $V = 7$ m/s に相当する高さ 2.5 m から自由落下させることにより実施した．本実験装置は，重錘の落下位置および落下姿勢が均一になるように，上下左右および前後が固定されたリニアウェイレールを介して落下するように工夫が施されている．

3.2 材料物性値

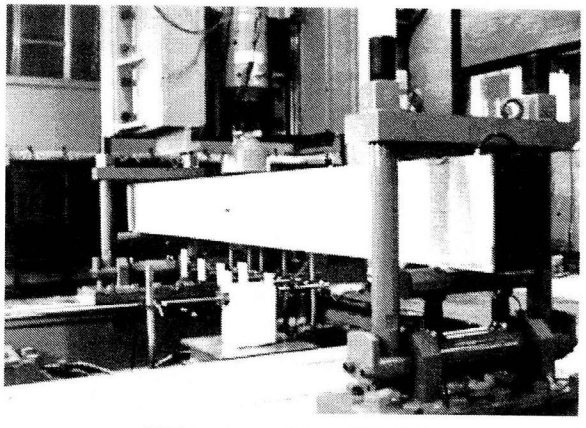
実験時のコンクリートの材料物性値は材齢が 11 日で圧縮強度，弾性係数，ポアソン比がそれぞれ 32.3 MPa，28.3 GPa，0.19 である．また，鉄筋の規格は D19 が SD345，D6 が SD295A である．各鉄筋の降伏強度，引張強度は D19 が 379 MPa，581 MPa であり，D6 が 373 MPa，518 MPa である．プレアナリシス時の値に比べて，コンクリート強度は 6.9 MPa 程度，鉄筋降伏強度は D19 が 13 MPa 程度小さく，D6 が 30 MPa 大きい値を示している．



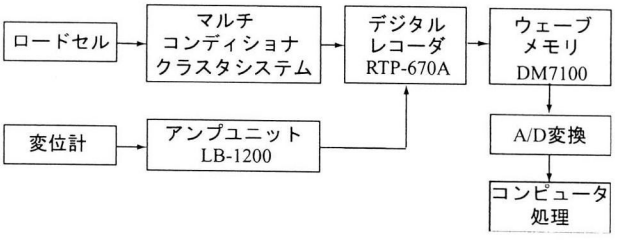
図－2 重錘の形状寸法



図－3 支点部治具の形状寸法



写真－1 RC 梁の実験状況



図－4 測定システム

3.3 測定項目および測定システム

実験時の測定項目は，重錘衝撃力波形 P，合支点反力波形 (以下，支点反力) R，RC 梁軸方向各点における鉛直方向変位 (以下，変位) 波形 D (載荷点より 300 mm ピッチに測定) である．P の測定には容量および応答周波数がそれぞれ 1,470 kN，DC～4.0 kHz の起歪柱型ロードセル[1]を，R の測定には容量 500 kN，応答周波数 DC～2.4 kHz の重錘衝撃力測定用ロードセルと同型のものを用いている．また，D の測定にはストローク 200 mm，応答周波数 915 Hz のレーザ式変位計を用いている．各センサは，レーザ式変位計を除き全て歪ゲージタイプである．したがって，これらのセンサーに対しては全て直流増幅器を用いることとした．各センサーからの出力波形は全て広帯域用データレコーダ (応答周波数 DC～40 kHz) に一括収録し，その後 100 μs/word のサンプリングで A/D 変換を施している．なお，各応答波形はフィルター処理をせずに整理することとした．**図－4** には，本測定システムの流れ図を示している．

4. 実験結果

実験結果から得られた重錘衝撃力，支点反力および変位波形に関して，以下に各項目毎に示す．なお，各波形は，重錘の衝突時間を 0 ms とし，重錘衝撃力，支点反力，変位は正載荷時の値を正として整理している．

図－5 には，重錘衝撃力波形を示している．**(a) 図**は 160 ms 間を，**(b) 図**には 5 ms 間を拡大して示している．重錘衝撃力波形は衝撃初期に急激に立ち上がり，最大値に達した後，1 ms 程度で零レベルまで急激に減少している．その後，振幅の小さい波動が 30 ms 程度持続している．

図－6 には合支点反力波形を示している．衝撃初期には，継続時間が 10 ms 程度の振幅の大きい正弦半波の波が励起し，その後重錘衝撃力の継続時間と同程度である正弦半波状の波形成分と高周波成分が合成された波形が励起されている．また，衝撃初期には衝撃荷重載荷の反動により支点部が負載荷状態となっていることが分かる．**図－5, 6** より，最大支点反力値は最大重錘衝撃力値の 1/4～1/5 程度であり，支点反力波形の波動の立ち

上がり勾配は重錘衝撃力波形のそれよりも緩やかであることが認められる．

図－7 は，載荷点変位波形を示している．図より，衝撃荷重載荷後，変位は零レベルまで復元することなく，60 mm 前後の値を中心に減衰自由振動を示していることが分かる．

図－8 には，実験終了後の RC 梁のひび割れ分布を示している．図より，梁全体に渡って下縁から上縁に進展する曲げひび割れおよび，支点から 1/4 スパン近傍部の梁上縁から下縁に向かって進展する曲げひび割れが発生していることが分かる．また，載荷点部から梁下縁に 45° 程度の角度で貫通する斜めひび割れも発生している．全般的には，梁中央部で角折れが生じており，曲げ破壊型の破壊性状を示しているものと判断される．

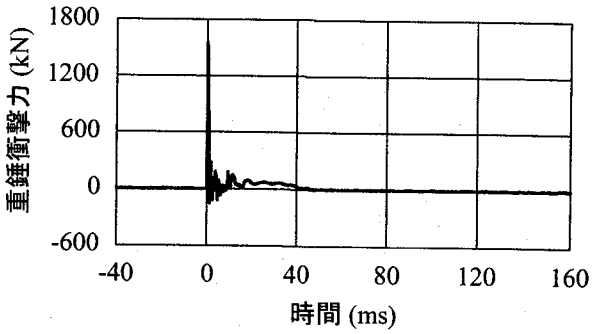
5. 各研究者が適用した解析手法の概要

表－3 には，各研究者が採用した解析手法の仕様を一覧にして示している．なお，本ラウンドロビンアナリシスの試みは，前述のように各参加研究者の解析手法の優劣を判断することが目的ではなく，各解析手法の確からしさや境界条件の設定，簡略化法を含めた数値解析手法の適用性を検討することに第 1 の狙いがある．これより，ここではラウンドロビンアナリシスに参加した研究者名は特定せず，解析法のみを特定して表すこととする．表より，ラウンドロビンアナリシスに用いられた解析手法の構成は，梁要素や積層シェル要素を用いる 2 次元有限要素法 (FEM) の適用が 2 研究者 (以後，解析法－1，2)，2 次元個別要素法 (DEM) の適用が 2 研究者 (等径六角形配置，四角形配置の場合を，それぞれ解析法－3，4)，固体要素を用いた三次元 FEM の適用が 2 研究者 (支点治具を簡略した場合を解析法－5，支点治具をモデル化した場合を解析法－6) の 6 種類であることが分かる．

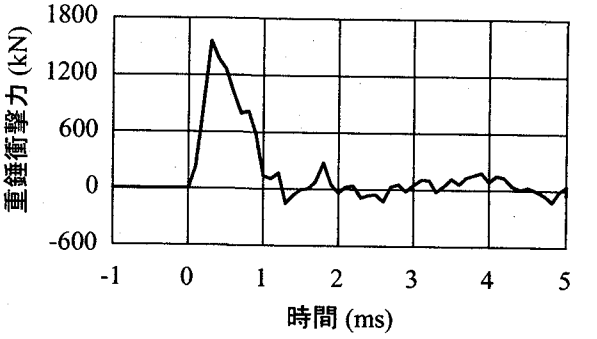
上述のように，3 次元解析は 2 研究者で採用し，他 4 研究者が 2 次元解析を採用している．また，3 次元解析を採用した 2 研究者は解析モデルが大きく異なるもののいずれも市販の汎用コードである LS-DYNA を採用している．2 次元解析法を適用した 4 研究者はいずれも自社・自作コードを用いている．時間積分法に関しては，2 次元 FEM である解析法－1，2 は Newmark β 法を適用した陰解法であるが，他の 4 研究者は全て中心差分法を適用した陽解法を採用している．以下に各研究者が使用した解析モデルおよび材料構成則について概説する．

5.1 解析法－1

図－9 には解析法－1 で採用した梁要素を用いた場合の解析モデルを示している．図に示されているように RC 梁と重錘はそれぞれ 12，1 要素に分割されている．

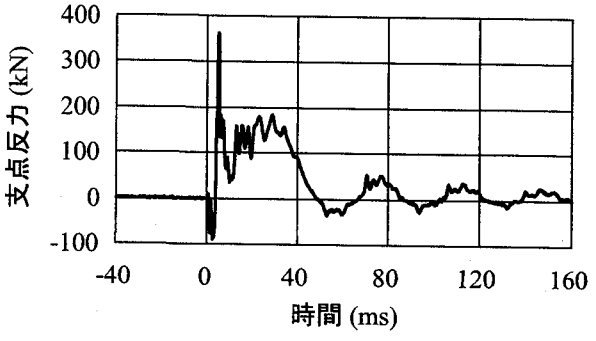


(a) 160 msまでの重錘衝撃力波形

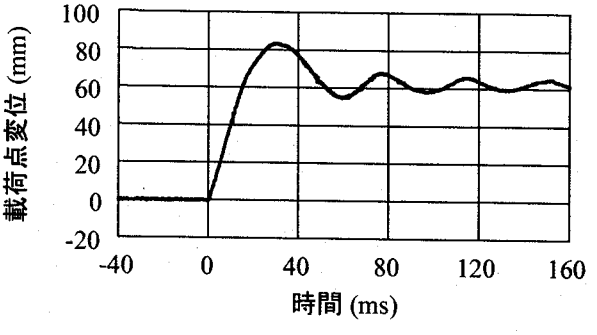


(b) 5 msまでの重錘衝撃力波形

図－5 重錘衝撃力波形



図－6 支点反力波形

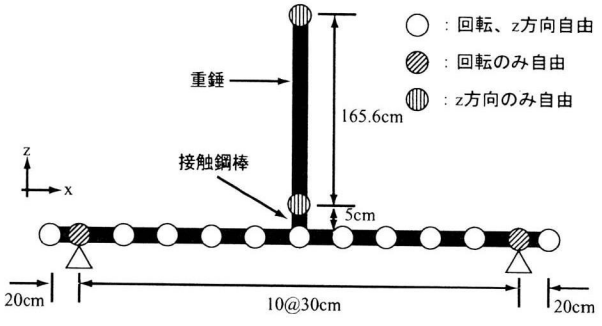


図－7 載荷点変位波形

図－8 実験終了後のひび割れ分布

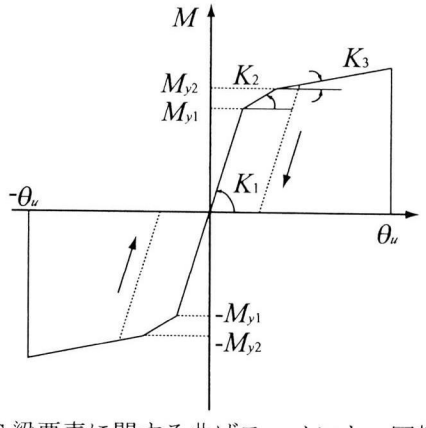
表－3　各解析手法の仕様一覧

項目	解析法－1	解析法－2	解析法－3	解析法－4	解析法－5	解析法－6
次元	2次元	2次元	2次元	2次元	3次元	3次元
離散化手法	FEM	FEM	DEM	DEM	FEM	FEM
時間積分法	陰解法	陰解法	陽解法	陽解法	陽解法	陽解法
使用コード名	自作コード	自社コード	自社コード	自作コード	LS-DYNA	LS-DYNA
解析モデル	full モデル	1/4 モデル	full モデル	1/2 モデル	1/4 モデル	1/4 モデル
コンクリート		積層	等径六角形配置	等径四角形配置	固体要素	固体要素
軸方向筋	梁要素		ばねモデル	ばねモデル	梁要素	固体要素
せん断筋		シェル要素	ばねモデル	ばねモデル	梁要素	梁要素
全節点数	15	78			627	7257
全要素数	14	40	3291	433	456	5996
時間刻み	1 μs	50 μs	0.1 μs	0.54 μs	82.4 μs	0.7 μs
要素分割（Y方向）					2	8
〃（Z方向）		12	25	9	6	14
〃（X方向）	10	34	100	49	22	41
要素直径			1.44 cm	3.60 cm		
要素積分点数	1点積分	4点積分			1点積分	1 & 8点積分
支点境界条件	ピン支持	上下縁ローラー	上下縁ピン	下縁ピン	下縁ピン	治具モデル化
減衰定数	20 %	RC 梁に 5 %	0 %	0 %	0 %	5 %

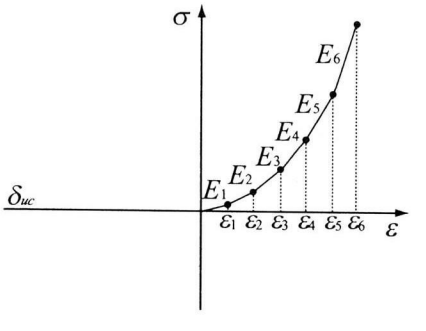


図－9　解析法－1の解析モデル

また，重錘－RC 梁間には接触鋼棒を設置し，後述のように圧縮力のみを伝達するモデルを定義している．なお，支持部は，支点治具を忠実にモデル化せずに梁の断面重心位置をピン支持としている．各要素の剛性特性に関しては，RC 梁要素の場合には図－10(a) に示しているように断面方向に 12 分割して断面分割法により曲げ剛性を評価しトリリニア型にモデル化している．図中の第 1，第 2 降伏曲げモーメントは M_{y1} = 68.2 kN·m，M_{y2} = 74.2 kN·m であり，曲げ剛性は K_1 = 18.6 MN·m，K_2 = 0.25 MN·m，K_3 = 0.07 MN·m である．せん断剛性，軸剛性 は特に規定していない．また，重錘要素は弾性体 (断面積 415 cm^2，密度 5,820 kg/m^3) とし，軸剛性のみを規定している．接触鋼棒は長さを 5 cm，重錘と RC 梁間の接触力と変位の関係を表現するために，図－10(b) で示すような多折線近似の応力－歪関係を仮定している．図中の各折線の弾性係数は E_1 = 8.42 MPa，E_2 = 40.0 MPa，E_3 = 62.0 MPa，E_4 = 80.0 MPa，E_5 = 120.0 MPa，E_6 = 192.0 MPa であり，各折点の歪値は ε_1 = 0.08，ε_2 = 0.16，ε_3 = 0.20，ε_4 = 0.24，ε_5 = 0.28，ε_6 = 0.32 である．また，除荷勾配は E_u = 2.0 GPa と設定している．



(a)　RC 梁要素に関する曲げモーメント－回転角関係



(b)　接触鋼棒要素の応力－歪関係

図－10　解析法－1で採用した各要素の剛性特性

5.2 解析法－2

図－11 には，解析法－2で採用した積層シェル要素を用いた解析モデルを示している．本解析では，断面方向にコンクリート部を 10 要素，鉄筋部を 2 要素に分割した梁の完全付着を仮定する積層シェル要素を採用している．なお，軸方向には半スパンを 34 分割している．せん断補強筋は重量のみを考慮している．重錘および支

点治具はばね要素でモデル化している．支点境界は設定条件と等しい位置でピン支持としている．**図－12** には本解析に適用した材料構成則を示している．重錘－梁間には引張歪に対して軸剛性を 1/10,000 にした非線形ばねを設置している．コンクリート要素に関してはひび割れ発生後の軟化を考慮している．図中，コンクリートの引張強度 f_t は圧縮強度 f'_c の 1/10 と仮定している．また，ひび割れ発生後のポストピークにおけるひび割れ面と平行方向の引張側応力－歪関係は，

$$\sigma = f_t \exp\{-1000(\varepsilon - \varepsilon_t)\} \tag{1}$$

と仮定している．ここで，ε_t はひび割れ発生歪である．一方，圧縮側の応力－歪関係は，ひび割れ面と直交方向に関しては，$\varepsilon \leq \varepsilon'_{c0}$ に対して

$$\sigma'_1 = f'_c \left\{ 1 - (1 - \varepsilon/\varepsilon_t) \frac{E_0 \varepsilon'_{c0}}{f'_c} \right\} \tag{2}$$

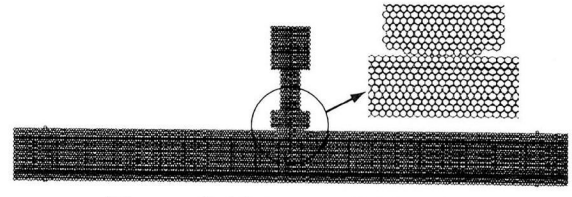
と仮定している．また，ひび割れ面と平行方向に関しては低減係数を導入し，$\lambda = 0.3$ として

$$\sigma'_2 = \lambda \sigma'_1 \tag{3}$$

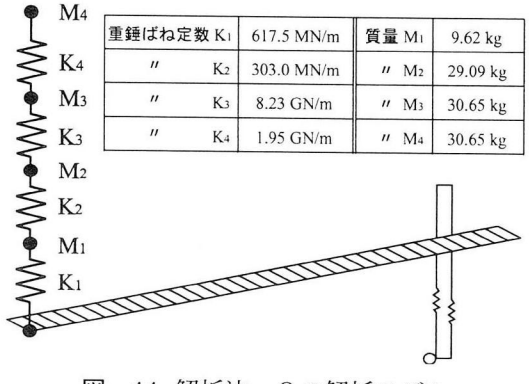
と設定している．ここで，ε'_{c0} は f'_c 発生時の圧縮歪であり，$\varepsilon'_{c0} = 2{,}500\ \mu$ と仮定している．いずれの場合も最大応力到達後 $0.2\ f'_c$ まで線形に除荷され，その後 $0.2f'_c$ を保持するものと仮定している．また，鉄筋要素に関しては，$\alpha_s = 1/1{,}000$ の歪硬化を考慮するバイリニア型の移動硬化則を適用している．なお，減衰定数は梁要素に対して 5 %，重錘要素に 1 %を設定している．

5.3 解析法－3

図－13 には，解析法－3で適用した 2 次元個別要素法に基づいた解析モデルを示している．本解析では，半径 0.72 cm の円形個別要素を等径六角形配置にして RC 梁の断面高さ方向に 25 段配置している．要素間には，隣り合う要素の間に作用する軸力および接線方向力を評価するために各方向に対してばねとダッシュポットを配置している．なお，要素間ばねのばね定数は K = 4.03 GN/m と仮定している．また，主鉄筋は，**図－14** に示すように隣り合う要素を繋ぐ軸ばねとして配置し，せん断補強筋は上端筋と下端筋を 3 分割する要素間を繋ぐ軸ばねとして配置している．支点部は RC 梁の上下端

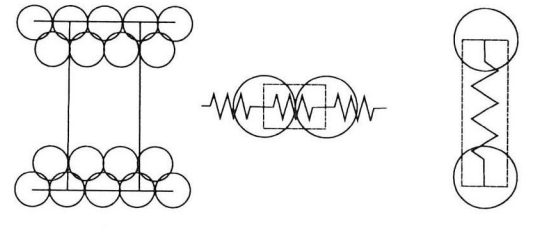


図－13 解析法－3の解析モデル



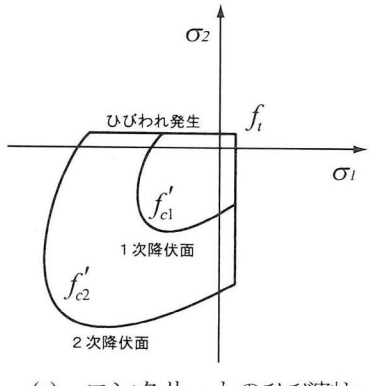
重錘ばね定数 K1	617.5 MN/m	質量 M1	9.62 kg
〃 K2	303.0 MN/m	〃 M2	29.09 kg
〃 K3	8.23 GN/m	〃 M3	30.65 kg
〃 K4	1.95 GN/m	〃 M4	30.65 kg

図－11 解析法－2の解析モデル

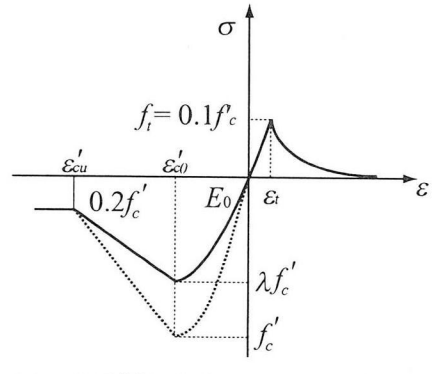


(a) 鉄筋ばねの配置　(b) 主鉄筋のモデル化　(c) せん断補強筋のモデル化

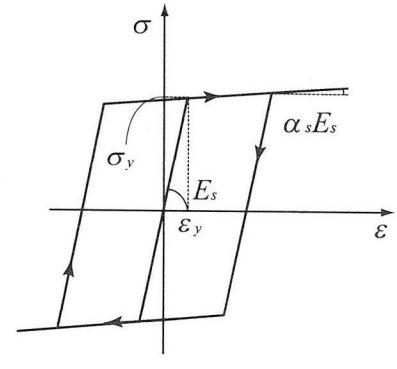
図－14 解析法－3における主鉄筋，せん断補強筋のモデル化



(a) コンクリートのひび割れ発生条件と降伏面



(b) ひび割れ発生後のコンクリートの応力－歪曲線



(c) 鉄筋の応力－歪曲線

図－12 解析法－2で採用した各材料の構成則モデル

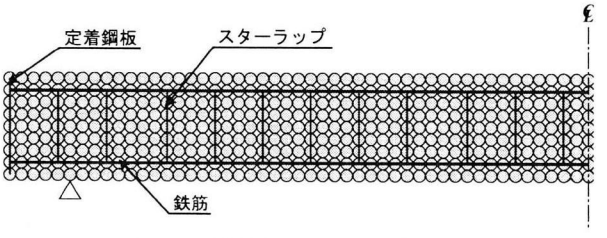
部に各一要素を配置してピン支持としている．材料物性値に関しては基本的に設定値を採用している他，コンクリートの引張強度，弾性係数，ポアソン比，密度を，それぞれ f_t = 3.32 MPa，E_c = 27.9 GPa，ν_c = 0.20，ρ_c = 2,400 kg/m^3 としている．また，主鉄筋およびせん断補強筋の破断歪は，局所的な効果を考慮して，それぞれ ε_{ua} = 0.234，ε_{us} = 0.208 と設定している．

5.4 解析法－4

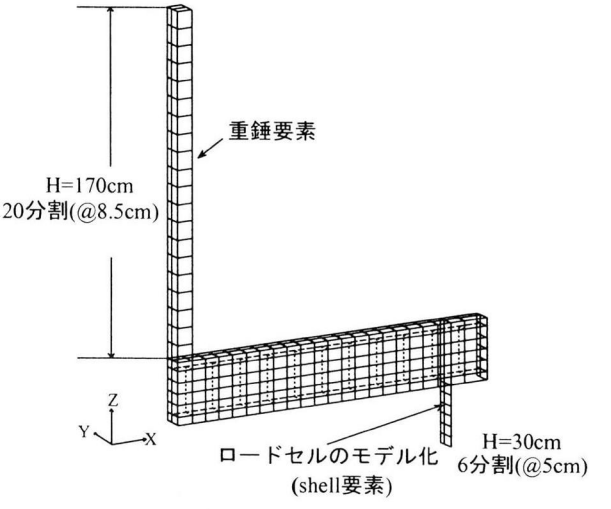
図－15 には，解析法－4の個別要素法を用いた場合の2次元解析に関する解析モデルを示している．個別要素は直径が 3.6 cm であり，等径四角形状に配置している．同一材料間の法線方向，接線方向のばね定数 K_n，K_s は梁の断面幅 20 cm と修正係数 (α = 0.7) を考慮して，決定している．コンクリート要素の場合は K_n = 3.97 GN/m，K_s = 1.68 MN/m，軸方向鉄筋要素の場合は K_n = 3.30 GN/m，K_s = 0.14 MN/m と決定している．また，コンクリート要素の法線方向，接線方向の力－変位関係は，**図－16** に示された構成則に従うこととしている．ここで F，δ はコンクリート要素間に作用する軸方向力および相対変位，Q は接線方向力である．また，内部摩擦角は θ = 37° と設定している．一方，鉄筋要素の力－変位関係は，軸方向，接線方向共に完全弾塑性のバイリニア型にモデル化している．ここで，接線方向の降伏応力は軸方向降伏力を F_s として $F_s/\sqrt{3}$ と仮定している．降伏の判定には von Mises の降伏条件を適用している．また，引張限界伸びも規定しており，引張限界歪と2要素間の距離の積として定義している．なお，コンクリート要素，鉄筋要素には歪速度効果を考慮している．コンクリート要素に関しては，引張歪に対して 3.0，圧縮歪に対して 2.0 であり，鉄筋要素に関しては引張，圧縮歪共に 1.2 としている．減衰定数は考慮していない．支点反力波形に関しては高周波成分が卓越することより 1 ms の矩形移動平均を施している．

5.5 解析法－5

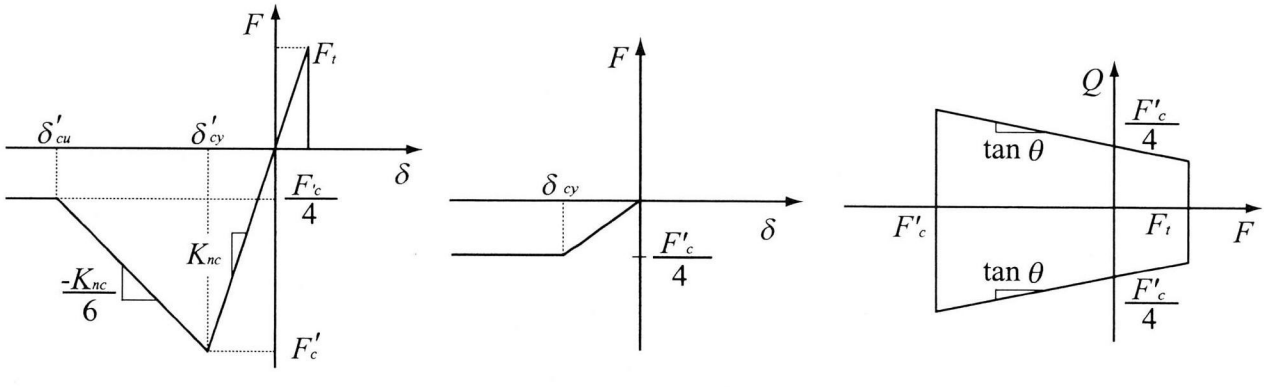
図－17 には，解析法－5の3次元弾塑性有限要素法を用いた場合の解析モデルを示している．本解析法では，重錘先端部要素と RC 梁の載荷点部要素には，重錘のリバウンド現象を再現するために接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している．材料構成則に関しては，コンクリート要素には歪速度依存性を考慮した山口－藤本モデル [2]，軸方向鉄筋要素には，歪速度依存性を考慮したバイリニア型の弾塑性体モデルを適用している．鉄筋要素の歪硬化係数は初期弾性係数の 1/100 としている．なお，重錘衝撃力および支点反力には 1 kHz のローパスフィルター処理を施している．



図－15 解析法－4の解析モデル



図－17 解析法－5の解析モデル

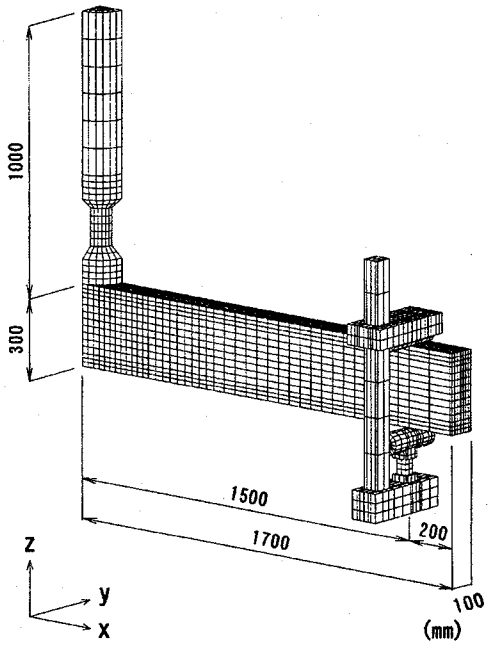


(a) 初期段階における法線方向の構成則　(b) 再接触時における法線方向の構成則　(c) 接線方向の構成則

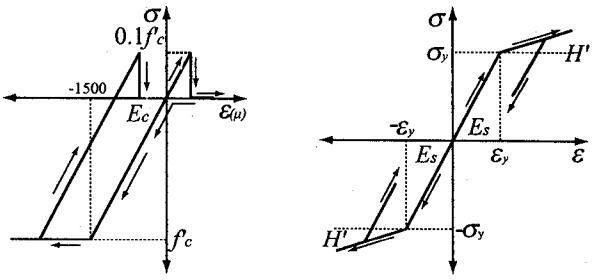
図－16 解析法－4で採用したコンクリート要素の構成則モデル

5.6 解析法－6

図－18 には解析法－6の3次元弾塑性有限要素法を適用した場合の解析モデルを示している．解析モデルは，RC 梁のみならず，重錘，支点治具，ロードセル等の形状寸法を忠実にモデル化している．要素はコンクリート，重錘，支点治具，ロードセル，軸方向鉄筋部には 8/6 節点固体要素を，せん断補強筋要素には梁要素を適用している．RC 梁への衝撃荷重は解析法－5の場合と同様に重錘モデルの全節点に 7 m/s の初速度を付加することにより与えている．重錘－梁間，梁－支点治具間には面と面の接触－剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義し，重錘や梁のリバウンドを考慮している．また，鉄筋とコンクリート要素間は全て完全付着を仮定している．図－19 には本解析に採用したコンクリートと軸方向鉄筋に関する構成則モデルを示している．コンクリート要素に関しては，弾性係数を 20.6 GPa，引張強度を圧縮強度の 1/10 と仮定している．その応力－歪関係は圧縮側に対しては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，引張側は引張強度に到達後にカットオフされるものとしている．鉄筋要素に関しては塑性硬化係数を弾性係数の 1/100 とするバイリニア型の等方硬化則を適用している．なお，その他の重錘，せん断補強筋，支点治具要素は全て弾性体と仮定している．また，荷重に比例する粘性減衰定数は RC 梁の最低時固有振動数に対して 5 % を設定することとしている．



図－18 解析法－6の解析モデル



(a) コンクリート　　(b) 軸方向鉄筋

図－19 解析法－6で採用した各材料の構成則モデル

6. 実験結果とプレアナリシス結果の比較

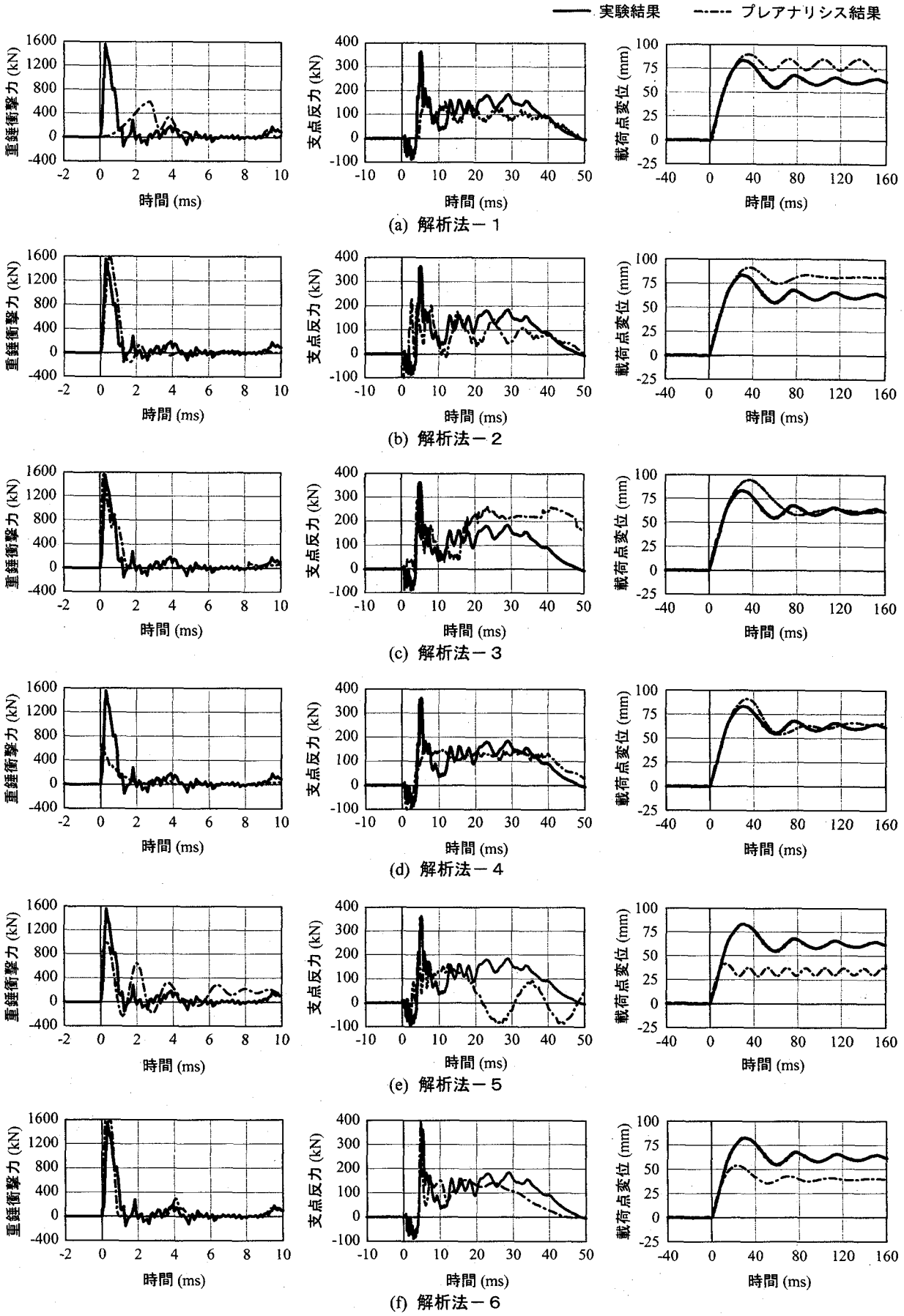
図－20 には，各解析法に基づいたプレアナリシス結果の重錘衝撃力波形，支点反力波形および載荷点変位波形を実験結果と比較して示している．なお，各波形は重錘の衝突した時点を 0 ms とし，160 ms までを整理している．

解析法－1の場合には，重錘衝撃力波形の分布は実験結果と大きく異なっていることが分かる．支点反力波形は最大値に差異が見られるものの，全体的な分布性状は両者で比較的対応している．載荷点変位波形に関しては，最大値は実験結果より若干大きく，また振動周期は若干短く示されている．しかしながら，全体的な分布性状は比較的よく実験結果と対応しているものと判断される．

解析法－2の場合には，重錘衝撃力波形は後述の解析法－3の場合と同様に，波形の立ち上がりから減衰に至るまで両者でよく対応していることが分かる．支点反力波形に関しては，低周波成分の分布性状は解析結果の振幅が若干小さいものの両者でほぼ対応しているようである．一方，高周波成分に関しては解析結果の周期が実験結果と比較して若干大きく評価されている．載荷点変位波形に関しては，解析結果の最大値が大きくかつ振動周期が長く示されているものの，最大値の差異は 10 %程度と小さい．

解析法－3の場合には，重錘衝撃力波形に関しては，最大値や荷重継続時間等の分布性状が解析結果と実験結果でよく対応している．支点反力波形に関しても，衝撃初期の第 1 波とその後の継続時間の長い第 2 波から成る分布性状は両者で類似している．しかしながら，第 2 波目の最大値や継続時間には差異が見られる．載荷点変位波形に関しては，解析結果の最大値が大きくかつ振動周期が長く示されている．しかしながら，最大値に関する両者の差異は 15 %程度である．

解析法－4の場合には，重錘衝撃力波形の分布性状が実験結果と大きく異なっている．すなわち，解析結果の最大値は小さく，荷重の継続時間は長い．支点反力波形は，衝撃初期の高周波成分が励起していない．これは，応答波形に対して矩形移動平均処理したことによるものと推察される．しかしながら，低周波成分の分布性状は概略対応しているようである．載荷点変位波形に関しては，前述の解析法－3の場合と同様に解析結果の最大値が大きく，振動周期も長く示されている．しかしなが



図－20 各解析法によるプレアナリシス結果と実験結果の比較

ら，ここでも最大値に関する両者の差異は 10 %程度である．

解析法－５の場合には，重錘衝撃力波形における衝撃初期の正弦半波の継続時間は実験結果と大略等しいことが分かる．しかしながら，最大振幅値や第 1 波目以後の波形性状は実験結果と異なっている．すなわち，解析結果の衝撃初期における最大振幅値は小さく評価され，かつ後続の波形は減衰自由振動的な性状を示している．支点反力波形に関しても，最大値は実験結果に比べて小さく，かつ荷重の継続時間も短く，重錘衝撃力波形と同様に減衰自由振動状態と類似した性状を示しており，実験結果を精度よくシミュレートするには至っていない．また，載荷点変位波形に関しても最大値が実験結果の 1/2 程度であり，除荷後の振動周期が実験結果の 1/2 以下と短く評価されている．

解析法－６の場合には，重錘衝撃力波形および支点反力波形とも，解析結果と実験結果はよく対応していることが分かる．しかしながら，載荷点変位波形に関しては，振動周期は大略実験結果と対応しているものの，振動の振幅は小さく評価されている．

7. ポストアナリシス

ラウンドロビン・プレアナリシス結果と実験結果の比較を公開後，プレアナリシス結果と実験結果の差異について検討を行い，ポストアナリシスを試みた．なお，プレアナリシス結果が十分の精度であるとして特に修正を行わない研究者 (解析法－２，３) もある．以下にプレアナリシス後の変更点について，その概要を述べる．

7.1 ポストアナリシスの仕様および修正点

表－4 には，最終的に採用したポストアナリシスにおける解析手法の仕様を各解析法毎に示している．表中，網掛け部がポストアナリシスにおける変更点である．網掛け部のない解析法－２，３に関しては，プレアナリシスの場合と同様であることを示している．表より，解析法－１，６の場合には，減衰定数をそれぞれ 20 %から 5 %，5 %から 2 %に変更している．また，個別要素法を採用している解析法－４の場合には要素直径を 3.6 cm から 2.5 cm として，要素数を 441 から 898 に増加させている．また，解析法－５の場合には解析法－６と同様に治具に固体要素を用いて詳細にモデル化している．その他，解析法－１の場合には接触鋼棒の長さを 5 cm から 1 cm に変更している．さらに RC 梁の剛性特性および接触鋼棒の応力－歪特性値を以下のように修正している．すなわち，RC 梁の断面の各降伏曲げモーメントは M_{y1} = 62.2 kN·m，M_{y2} = 70.6 kN·m，M_{y3} = 17.70 kN·m である．また，接触鋼棒の各弾性係数は E_1 = 0.08 MPa，E_2 = 61.9 MPa，E_3 = 149 MPa，E_4 = 192.0 MPa，E_5 = 192.0 MPa，E_6 = 192.0 MPa であり，各折点の歪値は ε_1 = 0.05，ε_2 = 0.10，ε_3 = 0.15，ε_4 = 0.20，ε_5 = 0.25，ε_6 = 0.50 である．また，除荷時の剛性勾配は E_u = 192.0 MPa としている．解析法－４，６の場合には，実験時の材料試験結果に基づき各材料定数を修正している．

7.2 ポストアナリシス結果と実験結果との比較

図－21 には各機関におけるポストアナリシスおよびプレアナリシス結果と実験結果との比較を，プレアナリシス時と同様の各波形について示している．

解析法－１に関する検討結果を見ると，重錘衝撃力波形分布はプレアナリシス時より改善していることが分かる．すなわち，衝撃初期の立ち上がり勾配や荷重の継続時間が実験結果により対応した傾向を示している．支点反力波形に関しては，低周波成分がプレアナリシス結果と類似の性状を示しているものの，高周波成分は励起されず，実験結果やプレアナリシス結果と大きく異なっている．載荷点変位波形は，実験結果とよく対応していることが分かる．このように，梁要素を用いた解析においても，RC 梁や接触鋼棒に用いるパラメータを適切に同定することによって比較的よい精度で実験結果をシミュレート可能であることが明らかとなった．

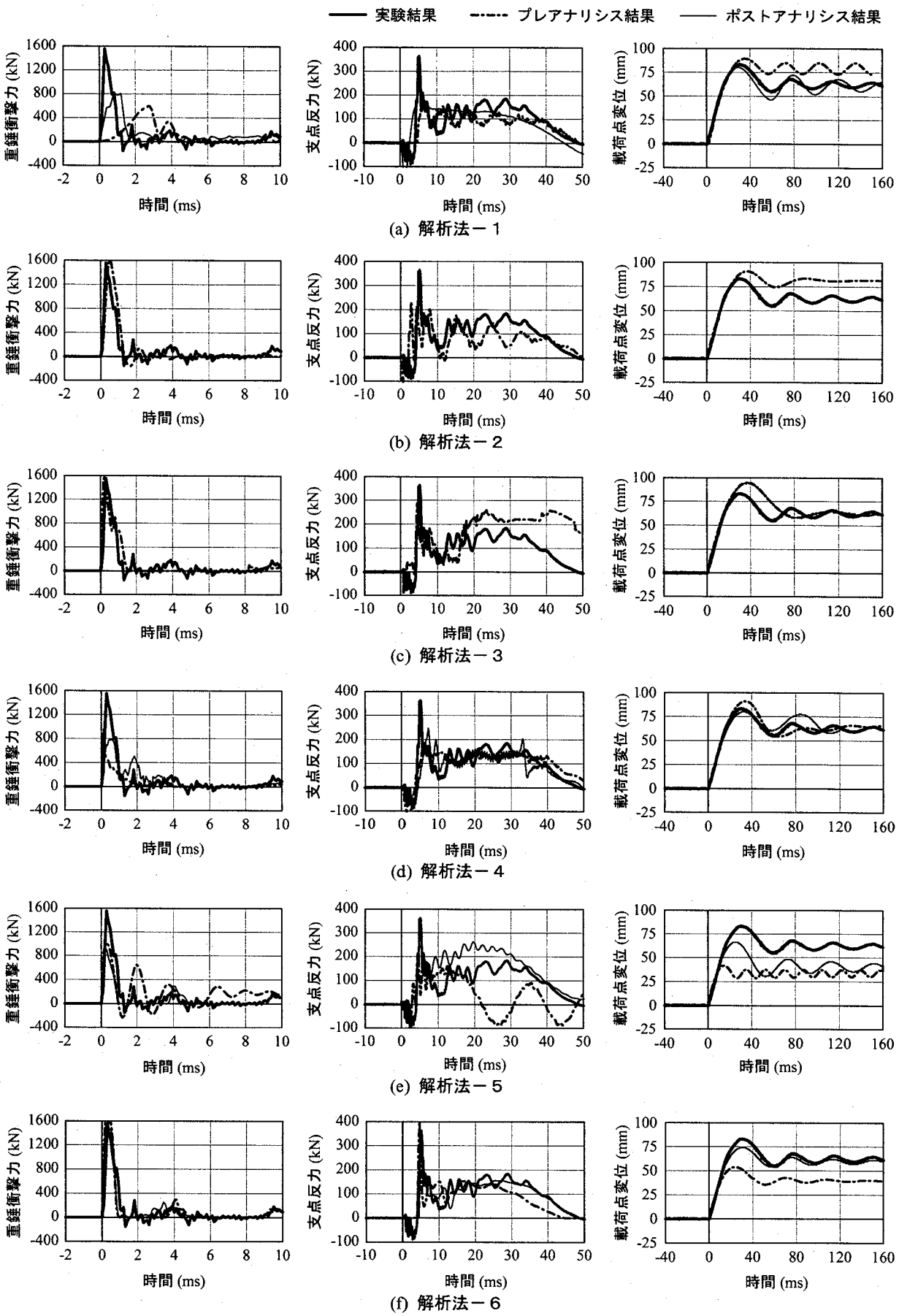
解析法－２，３に関しては，解析者がポストアナリシスが必要ないとの判断より解析を実行していないため，プレアナリシス結果と同様の分布を示している．

解析法－４に関しては，重錘衝撃力波形の最大値が実験結果に比べて小さいものの，その周波数特性は実験結果に対応していることが分かる．支点反力波形に関しては，低周波成分はプレアナリシス時と同様に大略実験結

表－4 ポストアナリシスにおける各機関の解析手法の仕様一覧

項　　目	解析法－１	解析法－２	解析法－３	解析法－４	解析法－５	解析法－６
全節点数	15	78			2178	7257
全要素数	14	40	3291	898	1914	5996
時間刻み	1 μs	50 μs	0.1 μs	0.376 μs	82.4 μs	0.7 μs
要素直径			1.44 cm	2.5 cm		
支点境界条件	ピン支持	上下縁ローラー	上下縁ピン	下縁ピン	治具モデル化	治具モデル化
減衰定数	5 %	RC 梁に 5 %	0 %	0 %	0 %	2 %

※　　部はプレアナリシスとの変更点



図－21 ポストアナリシスとプレアナリシス結果および実験結果との比較

果を再現している．載荷点変位波形に関しては，最大応答値が実験結果と大略類似している．しかしながら，2波目の振幅は若干大きく示されている．全体的にはポストアナリシスによって解析精度が向上していると判断される．これより個別要素法を適用する場合において，要素数が精度に大きく影響することが明らかになった．

解析法－5の場合には，支点治具部を解析法－6と同じく固体要素でモデル化している．重錘衝撃力波形に関しては最大値が未だ実験値に比べて小さく示されている．しかしながら，除荷後の波形は実験結果と同様ほぼ零レベルを持続しており，実験結果とよく対応していることが分かる．支点反力波形に関しても，最大値は未だ実験結果との差異が見られるものの，荷重の継続時間が実験結果とよく対応しており，ポストアナリシスによって解析精度が向上していることがうかがえる．載荷点変位波形に関しては，最大値が未だ実験結果より小さく示されているが，プレアナリシス時に比べると改善が図られている．特に振動周期は実験結果とよく対応していることが分かる．これより解析法－5の場合には，実験に即して支点治具をモデル化することにより，より精度の高い解析が可能であることが明らかになった．

解析法－6に関しては，重錘衝撃力波形の分布性状はプレアナリシス時と同様に実験結果とよく対応している．支点反力波形は，荷重の継続時間がより実験結果に対応している．載荷点変位波形に関しては，最大値が若干小さく示されているものの振動周期や残留変位は非常によく実験結果をシミュレートしており，解析精度の改善が図られている．これより，減衰定数はRC梁の変位波形に大きく影響することが明らかとなった．また，本検討結果によって曲げ破壊が進行するRC梁の場合には最低次固有振動に対して2％の減衰定数を仮定することにより，RC梁の衝撃挙動が精度よくシミュレーション可能であることが明らかになった．

8. まとめ

本研究では，我が国におけるRC構造を対象とした衝撃応答解析に関する解析精度の現状を把握し，かつ標準的な解析方法の確立に向けての資料収集を目的に，静的に曲げ破壊が卓越する矩形RC梁の重錘落下衝撃荷重載荷時の衝撃挙動に関するラウンドロビンアナリシスを実施した．その結果，

1) プレアナリシスにおいて，重錘衝撃力波形に関しては，梁要素を用いた有限要素解析の場合には衝撃初期の波形性状が大きく異なるものの，他の解析手法の場合には大略実験結果と類似したものとなる．支点反力波形に関しては，支点治具を詳細にモデル化せずに3次元有限要素解析を用いた解析法の場合には低周波成分の周期が1/2程度と小さい結果となるが，その他の解析手法の場合の低周波成分は類似の結果を示している．載荷点変位波形に関しては，3次元有限要素法を用いた解析結果はいずれもが過小評価となっているが，他の2次元解析手法による解は実験結果と大略類似した性状を示している．
2) ポストアナリシスに関しては，解析手法にかかわらず，いずれの場合も実験結果と大略類似の結果を得ることが出来た．これよりRC梁の衝撃挙動は解析の次元，離散化手法，時間積分法にかかわらず適切なモデルや材料構成則，減衰定数を設定することにより，比較的精度のよい評価が可能である．
3) 特に個別要素法の場合には一要素の大きさが，また3次元有限要素法の場合には支点治具のモデル化の有無や質量に比例する減衰定数の大きさがRC梁の衝撃挙動に大きく影響することが明らかになった．

以上より，RC構造物の耐衝撃挙動を解析するための1つの指標を示すことが出来たものと判断される．しかしながら，本検討は単純な断面形状でかつ曲げ破壊が先行するRC梁を対象として実施したものである．今後は各解析法に対する汎用性の高い指針を提示することが出来るように継続的に検討して行きたいと考えている．

謝辞　本ラウンドロビンアナリシスへの参加研究者（機関）は，井元勝慶氏（大林組技術研究所），河西良幸氏（前鹿島建設技術研究所，現前橋工科大学），香月 智氏（防衛大学校），上林厚志氏（竹中工務店技術研究所），岸 徳光氏（室蘭工業大学），桝谷 浩氏（金沢大学）である．

実験は2000年3月10日に室蘭工業大学に設置されている耐衝撃耐荷力評価実験装置を用いて，大野友則氏（防衛大学校），小林治俊氏（大阪市立大学），三上 隆氏（北海道大学））の他，岸 徳光氏，桝谷 浩氏，河西良幸氏，三上 浩氏（三井建設），今野久志氏（北海道開発局），川瀬良司氏（構研エンジニアリング），松野 進氏（日立造船）の立ち会いのもとに実施された．また実験を実施するにあたり室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻の栗橋祐介君（現北海道開発土木研究所研究員）をはじめとする大学院生には多大なる御支援を頂いた．ここに記して感謝の意を表する．

参考文献

1) 土木学会構造工学委員会，衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会：第II編委員会経過報告，5．ラウンドロビン・プレアナリシスの実施要領および経過報告，第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp.82-111, 2000.
2) 山口 弘，藤本一男，野村設郎：高速荷重を受ける鉄筋コンクリート梁の動的応答解析，構造工学論文集，Vol.33B, pp.189-199, 1986.

（2002年9月13日受付）