

I-17

RC 梁の重錘落下衝撃挙動に関する数値シミュレーション

室蘭工業大学 正員 松岡 健一
 三井建設(株) 正員 三上 浩
 室蘭工業大学 正員 小室 雅人
 室蘭工業大学 学生員 小林 竜太

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の合理的な耐衝撃設計法を確立するためには、実験的研究のみならず理論的・数値解析的研究を推進することが必要不可欠である。しかしながら、衝撃工学分野では構造物に生じる応力波動伝播の問題や塑性域を考慮した数値解析が要求されることより研究事例も少なく、未だ精度的に妥当な解析手法が確立されていないのが現状である。著者等は、これまで補強筋の材質や断面寸法の異なる RC 梁模型の重錘落下衝撃実験を基に、単純な構成則を用いた場合の弾塑性衝撃応答解析を行い、その数値解析手法の適用性について検討を行ってきた¹⁾²⁾。その結果、提案している解析手法は大略実験結果の変位挙動、最大応答変位、残留変位等を算定評価できることが明らかになった。しかしながら、より信頼性の高い解析手法を確立するためには、材料構成則の影響のみならず境界条件や RC 梁のモデル化に対するより詳細な影響も把握しておく必要がある。本研究では特に材料構成則以外のモデル化が数値解析結果に与える影響を把握することを目的として断面寸法および鉄筋比の異なる RC 梁について重錘落下による弾塑性衝撃応答解析を試み、実験結果と比較する形でそれらの影響を評価し検討することとした。なお、本数値解析では、単純な構成則を用いることを前提としているため、塑性化によるエネルギー吸収や質量に比例する減衰効果は考慮しているが、コンクリートと鉄筋の歪速度効果および不完全付着等の影響は無視している。また、本数値解析には非線形衝撃応答解析汎用プログラム LS-DYNA (version 940) を用いた。

2. 実験概要

本研究において対象とした RC 梁は図-1 に示すような断面寸法の異なる 3 タイプの複鉄筋矩形梁である。実験では支点部のリバウンドを防止するために RC 梁の両端面から 25 cm の位置で鋼製の治具を用いて梁の上下を固定している。治具全体は RC 梁の回転を許容し、ピン支持に近い構造となっている。衝撃荷重は RC 梁のスパン中央部に重量 200 kgf、直径 15 cm の重錘を所定の高さから自由落下させることによって載荷している。各 RC 梁に対する重錘落下による載荷は、衝突速度 1 m/sec から 1 m/sec 刻みで増加させる繰り返し落下実験を行い、破壊に至った最終載荷速度を確認の後、その最終載荷速度で単一に載荷することとした。ここでは、RC 梁の破壊を残留変形量が梁の純スパンの 1/50 (4 cm) 程度に至った状態と定義している。測定項目は図-1 に示しているように RC 梁上下縁の変位、上下端鉄筋歪および支点反力である。変位測定には容量 80 mm の非接触式レーザー変位計を用いている。なお、各 RC 梁に用いている異形鉄筋の材質は D10 が SD295A、D19 が SD395 である。本数値解析に用いた試験体は表-1 に示されているような断面寸法およ

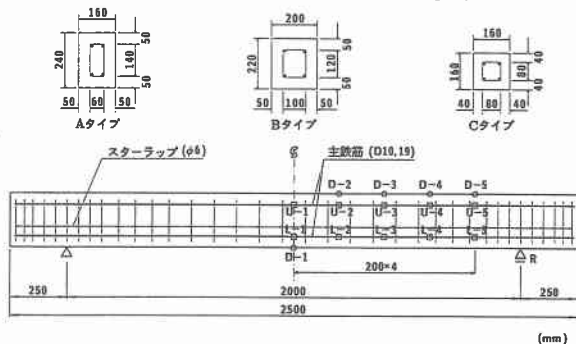


図-1 複鉄筋 RC 梁模型の配筋状況および測定位置

Numerical Simulation on Impact Response Behavior of RC Beams due to Weight Falling
 by Ken-ichi MATSUOKA, Hiroshi MIKAMI and Masato KOMURO and Ryuta KOBAYASHI

び鉄筋比の異なる4ケースである。表中の解析ケース名は断面タイプおよび異形鉄筋の呼び径を示している。なお、実験時のコンクリートの力学的特性を表-2に示している。

3. 解析仮定

3.1 RC 梁のモデル化

本数値解析に用いた衝撃応答解析用汎用プログラム LS-DYNA³⁾ は衝突体に衝突時の速度を与えることにより衝突体と被衝突体の一体解析が可能である。図-2に試験体 A-19 における全体の要素分割図を示している。ここでは、図-1に示されているように RC 梁が二軸対称であることより解析断面を 1/4 モデルと仮定した。要素分割は分割数による精度検討の場合を除き、図-2に示す程度を標準とした。図-2に示す A-19 の全要素数、全節点数はそれぞれ 4666、6014 である。本数値解析で用いた要素タイプは、コンクリート、異形鉄筋、重錘および治具に対して6節点あるいは8節点固体要素を、スターラップ(φ6)は他の要素と比較して小さく解析時間に大きな影響を与えることより、剛性、断面積、重量が等価な梁要素にモデル化している。なお、要素の積分点は解析時間を短縮するため1点積分を基本としているが、主鉄筋に関しては断面方向に1要素でモデル化しているため8点積分を用いることとした。また、重錘とコンクリート、治具とコンクリートの要素間には、面と面の接触・剝離を伴う滑りを考慮した接触面(スライドインターフェイス)を定義している。全数値解析時間は実験結果との長期的な変形状態について比較検討するため160msec までとしている。なお、1ケース当たりの所要時間は HP 9000/C180 で約4時間である。

3.2 物性モデル

本数値解析では、コンクリートや主鉄筋に対する弾塑性体モデルとして LS-DYNA にあらかじめ組み込まれている物性モデルを用いることとした。コンクリート要素には引張による破壊を考慮した土質体・クラッシュャブルモデルを用いている。このモデルは、圧力がカットオフ値に達すると要素が破壊したとみなされ圧縮および引張応力が伝達しないように定義されている。降伏の判定は Von Mises の降伏条件に従うこととしている。また、異形鉄筋の要素には降伏後の硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルを用い、降伏後は等硬化を仮定し、バウシinger効果は考慮しないものとしている。本数値解析に用いたコンクリートおよび異形鉄筋の応力-歪関係を図-3に示している。コンクリートは材料試験結果に基づき、0.2% 歪時の応力を降伏応力とし、0.15% 歪に達した状態で降伏するものと仮定してバイリニア型にモデル化した。なお、本数値解析では降伏応力として圧縮強度を仮定している。また、引張側の破壊応力は降伏応力の 1/10 と仮定

表-1 解析ケース一覧

解析ケース	断面タイプ	鉄筋径	鉄筋比 (%)	載荷速度 (m/sec)
A-19	A	D19	1.88	6
B-10	B	D10	0.42	4
B-19	B	D19	1.69	6
C-19	C	D19	2.98	5

表-2 コンクリートの力学的特性

試験体	材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
A-19 B-19 C-19	86	284	1.97×10^5	0.19
B-10	84	276	1.95×10^5	0.19

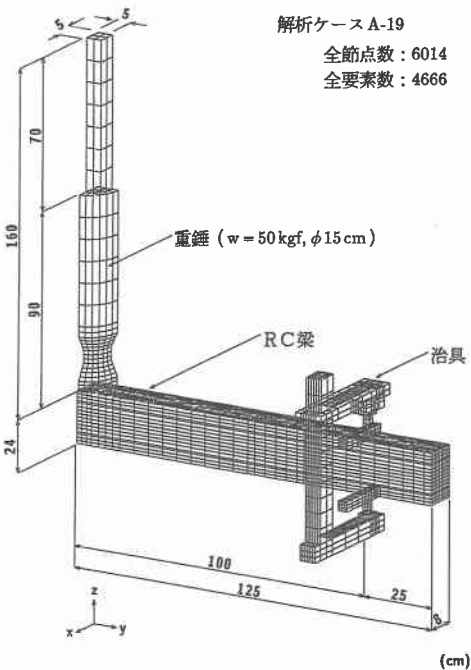
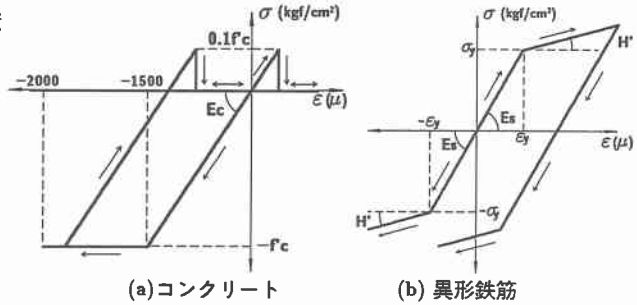


図-2 全体の要素分割図

した。また、異形鉄筋は公称の材料定数（弾性係数が $E_s=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、降伏応力が SD295A で 3000 kgf/cm^2 、SD345 で 3500 kgf/cm^2 とし、ポアソン比を $\nu_s = 0.3$ とする）を用いることとした。その他の要素に対する物性モデルは全て弾性体と仮定している。



4. 異形鉄筋要素の硬化係数 H' の決定

図-3 数値解析に用いた応力-歪曲線モデル

本研究では、単純な構成則を用いた RC 部材の弾塑性衝撃応答解析手法を確立することを目的としていることより、コンクリートあるいは異形鉄筋の歪速度効果による強度の上昇を無視することとした。しかしながら、RC 梁が著しい損傷を受け大きなひび割れの発生とともに鉄筋が塑性域に達するような場合には、これら歪速度効果が RC 梁の動的応答性状に少なからず影響を与えるものと考えられる。本研究ではこのような状態に対処するため、異形鉄筋要素に対して等方弾塑性体モデルを適用し、実験結果との比較により最適な硬化係数 H' を決定することで、それらの影響を考慮することとした。従って、ここで決定される硬化係数 H' には鉄筋の材料特性の他、歪速度効果等、不確定な効果が含まれたものとなっている。本研究では、特に A-19 の試験体に関して検討を行うことによって、硬化係数 H' を決定することとした。設定した硬化係数 H' は $H'=0$ 、 $E_s/6$ 、 $E_s/12$ の 3 ケースである。なお、減衰定数に関しては後項で詳細に検討するが、ここでは全要素に対して $h=0.05$ と仮定した。図-4 に各測定点の応答変位波形に関する数値解析結果を実験結果と比較して示している。図より、 $H'=E_s/12$ の場合が最も実験結果と対応していることより、以後の数値解析は、全て $H'=E_s/12$ とすることとする。

5. 減衰定数 h の決定

本研究では、繰り返し荷重載荷によって RC 梁が破壊に至ったときの載荷速度を用いた単一載荷実験に対して数値解析を行っている。従って、全ての RC 梁においてコンクリート要素、鉄筋要素とも弾塑性状態になり、その塑性歪エネルギー成分が大きな減衰作用を示す。しかしながら、質点の振動に伴う質量に比例した減衰効果も含まれているものと考えられることより、ここではその効果を考慮するため最低次の弾性固有振動周期に対する減衰定数（本論文ではこの減衰定数を単に減衰定数 h と呼ぶこととする）

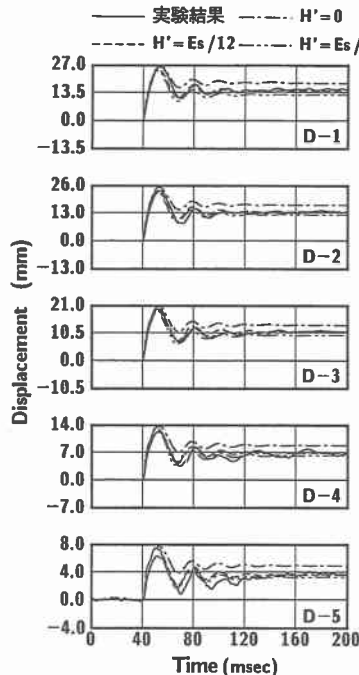


図-4 各硬化係数 H' の数値解析結果と実験結果の比較 (A-19, $h=0.05$)

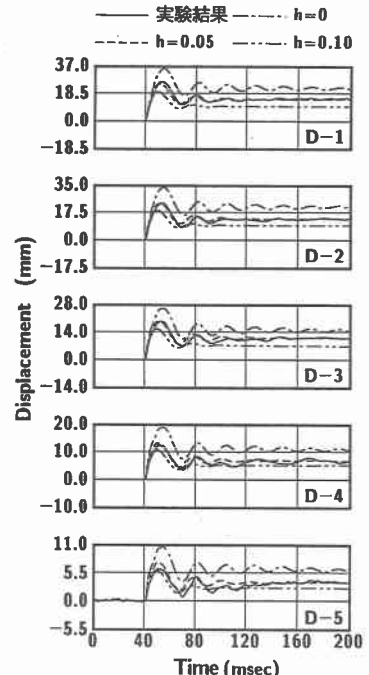


図-5 各減衰定数 h の数値解析結果と実験結果の比較 (A-19, $H'=E_s/12$)

を用いて評価することとし、実験結果と比較する形でその減衰定数を決定した。図-5は A-19 に関して減衰定数 h を変化させた場合の各測定点の応答変位波形に関する数値解析結果を実験結果と比較して示している。図より、減衰定数 $h=0.05$ の場合が実験値と最もよく対応していることより本数値解析では以後の全数値解析において、減衰定数を $h=0.05$ にすることとする。

6. 弾塑性衝撃応答解析における解析モデルの影響

6.1 支点部のモデル化が数値解析結果に与える影響

ここでは、支点部のモデル化が数値解析結果に与える影響を把握するために、実験装置と同様に治具をモデル化した場合およびローラー支持を想定して、支点となる節点に上下方向拘束の条件を付加する場合の2ケースについて検討を行った。なお、対象とした解析ケースは B-19、C-19 の2体である。図-6,7に RC 梁の各測定点における応答変位波形および支点反力波形について数値解析結果と実験結果を比較して示している。なお、ここで対象とする支点反力は RC 梁の片側に関する支点反力である。また、支点反力波形には衝撃初期に高周波成分が含まれてくる。本論文ではロードセル波形との比較を容易にするため、これらの波形に 2.5msec (25ワード) の矩形移動平均法による数値的なフィルター処理を行った。図より、応答変位波形に着目すると、最大応答変位はいずれの試験体においても実験結果とよく対応しておりモデル化の違いによる影響は小さいことがわかる。残留変位に着目すると支点部に治具をモデル化した場合では実験結果と良く対応しているが、ローラー支持を仮定する場合は全ての試験体および測定点において過小評価していることがわかる。これは、実験では RC 梁は幅を有する治具によって支持されているが、ローラー支持の場合には支点部節点のみに拘束条件を付加していることにより、反力が節点に集中して作用し近傍の要素が塑性化して入力エネルギーがこの塑性化に消費されるためと考えられる。支点反力波形に着目すると、治具をモデル化した場合は実験結果と比較的良好に対応しているが、ローラー支持とした場合には類似した応答性状を示しているものの応答変位波形と同様過小評価する傾向にある。以上の数値解析結果より、载荷点部の最大応答変位に関しては支点部のモデル化の影響は小さいが支点反力に与える影響は大きいものと判断される。

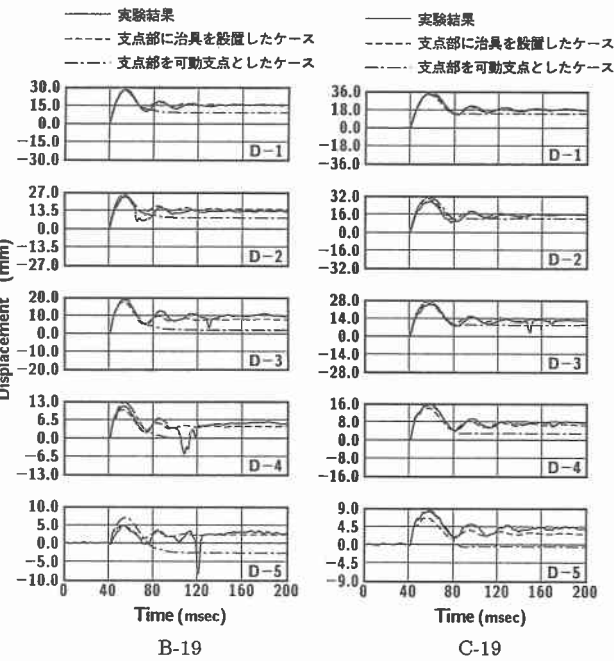


図-6 応答変位波形

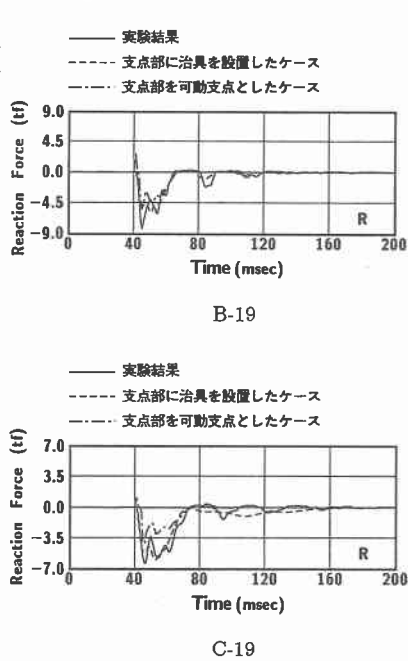


図-7 支点反力波形

6.2 重錘のモデル化が数値解析結果に与える影響

本数値解析では、RC 梁に作用する衝撃荷重を重錘要素に衝突時の速度を与えることにより載荷している。ここでは、重錘高さの違いが数値解析結果に与える影響を把握するため、重錘を実験時と同様（高さ 160cm、直径 15cm）にモデル化した場合と、直径を等しく高さ方向にそれぞれ 80cm、10cm と変化させ単位体積重量を大きくした場合の 3 ケースについて検討を行った。なお、解析ケースは B-19 を対象とし、特に応答変位波形に着目して検討を行った。図-8 に重錘高さを変化させた各ケースについての応答変位波形を実験結果と比較して示している。図より、重錘高さが小さくなるにしたがい応答変位は若干大きく評価される傾向にある。しかしながら、それらの誤差は重錘高さ $h=160\text{cm}$ の場合を基準とすれば全ての測定点において 1 割以内であることから重錘高さの変化が数値解析結果に与える影響は小さいものと判断される。

6.3 スターラップのモデル化が数値解析結果に与える影響

本研究では、標準的なスターラップ（ $\phi 6$ ）の要素モデルとして、解析所要時間の短縮を考慮し、剛性、断面積、重量が等価な梁要素にモデル化している。しかしながら、簡易な数値解析では主鉄筋のみを考慮し、スターラップを無視して解析を行うことも多い。ここでは、スターラップのモデル化が数値解析結果に与える影響を把握するため、スターラップを考慮した場合と考慮しない場合について検討を行った。なお、解析ケースは、破壊形式が曲げ破壊型である場合とせん断破壊型に近い場合を対象とし、それぞれ B-10、A-19 について数値解析を行った。図-9 に応答変位波形に関して解析結果と実験結果を比較して示している。図より、曲げ破壊型の B-10 に着目すると、いずれのケースにおいても解析結果は実験結果とよく対応していることがわかる。しかしながら、せん断破壊に近い場合の A-19 の場合には、スターラップを考慮しないケースで最大応答変位が多少大きく、残留変位が過小評価されていることがわかる。従って、スターラップのモデル化が解析結果に与える影響は、曲げひび割れが卓越する RC 梁に対しては小さく無視できるものと考えられるが、せん断ひび割れが卓越する RC 梁に対しては大きいことが明らかになった。これより、明らかに曲げ破壊型である場合を除きスターラップを考慮して解析すべきであると判断される。

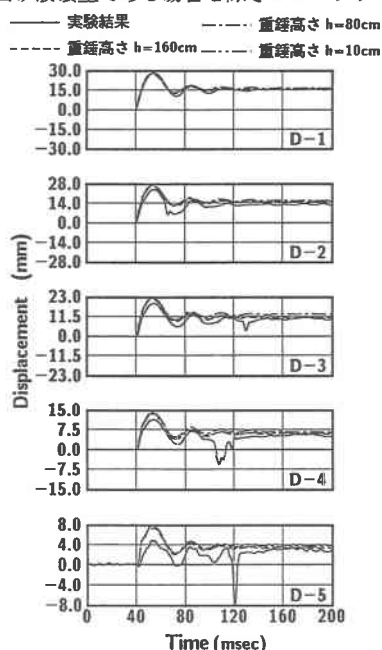


図-8 重錘高さの違いによる数値解析結果と実験結果の比較

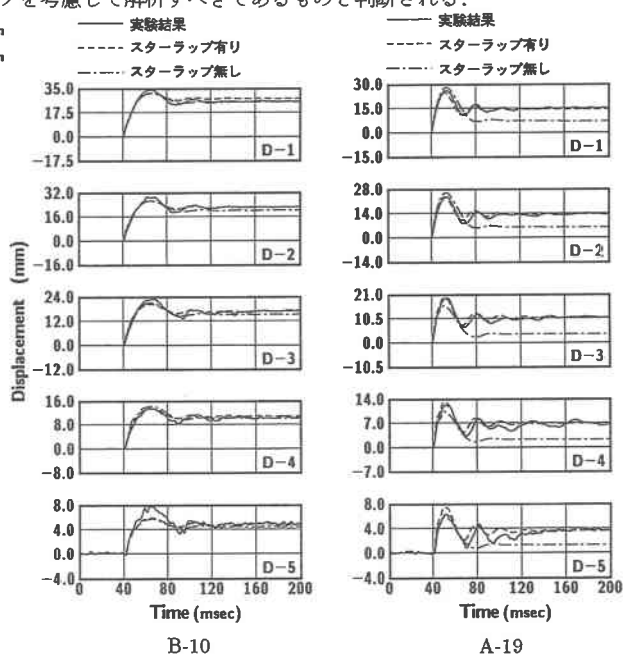


図-9 スターラップのモデル化の有無による数値解析結果と実験結果の比較

6.4 RC 梁の要素分割が数値解析結果に与える影響

要素分割は解析精度および解析所要時間に大きく影響するため、分割数が小さく、かつ精度の高い数値解析が望まれる。ここでは RC 梁の要素分割の程度が解析結果に与える影響を把握するため、試験体 C-19 を対象として検討を行った。表一 3 に解析ケースの一覧を示し、図一 10 に各ケースの断面方向要素分割図を示している。なお、スパン方向の要素分割はいずれも標準の分割モデルと同一とした。図一 11 にそれぞれのケースに対する各測定点の応答変位波形を示している。図より、測定点 D-1 に関してはケース 1 が、測定点 D-5 に関してはケース 3 において若干誤差が生じている。しかしながらそれらの誤差は 1~2 mm 程度であり、本論文で設定した全ての要素分割モデルは工学的に標準分割モデルと同程度の精度を有していることがわかる。これより高さ方向の分割を 6 分割と極端に粗くした場合でも、工学的には十分な精度を有しているものと判断される。しかしながら、RC 梁のひび割れ位置をある程度正確に推定評価するためには標準モデル程度の要素分割が必要であろう。

7. まとめ

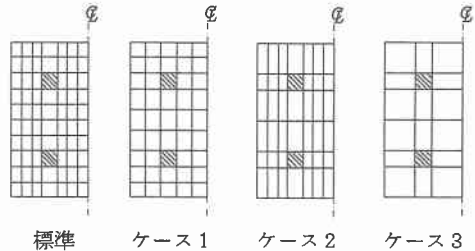
本研究では、RC 梁の材料構成則以外のモデル化が数値解析結果に与える影響を把握することを目的として、断面寸法の異なる 4 ケースの RC 梁についての重錘落下による弾塑性衝撃応答解析を試み、実験結果と比較する形で検討を行った。本研究で得られた結論を要約すると、1) 支点部のモデル化は、残留変位や支点反力値に与える影響が大きく、治具を実際と同様にモデル化することが望ましい。2) 重錘高さに関するモデル化の数値解析結果に与える影響は小さく、単純なモデル化でも比較的良く再現出来る。3) スターラップ要素のモデル化は、せん断破壊型に近い場合には影響が大きい。これより、明らかに曲げ破壊型である場合を除き、スターラップは考慮すべきであるものと判断される。4) 要素分割に関しては、高さ方向に 6 分割程度でも比較的良い精度で結果が得られることが明かになった。勿論、ひび割れ性状を正確に把握するためには分割数を多くした数値解析が必要となる。

参考文献

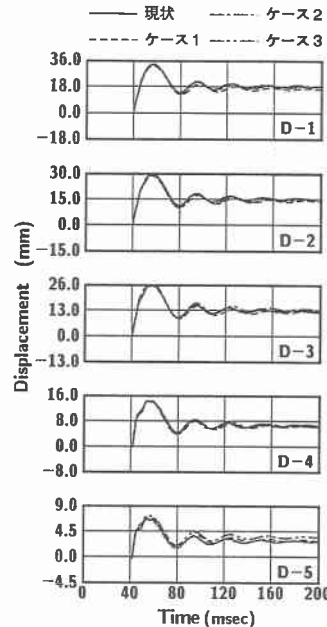
- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 小室 雅人, 松岡健一: 弾塑性衝撃応答解析法の RC 梁への適用性, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 1579-1588, 1997.
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 小室 雅人, 山内昌昭: 重錘落下衝撃を受ける RC 梁の三次元弾塑性応答解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 53 号 (A), pp. 74-79, 1997.
- 3) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1997.9.

表一 3 解析ケース一覧

解析ケース	総要素数	総節点数	断面高さ方向の分割数	断面幅方向の分割数
標準	3810	5010	10	7
ケース 1	2956	4086	9	5
ケース 2	2878	3954	6	7
ケース 3	1942	2870	6	3



図一 10 各ケースにおける断面方向要素分割図



図一 11 各ケースにおける応答変位波形の比較