

I-1

横方向衝撃力を受ける RC 橋脚模型の弾塑性衝撃応答解析

室蘭工業大学 フェロー 松 岡 健 一
三井建設(株) フェロー 三 上 浩
室蘭工業大学 正 員 安 藤 智 啓
室蘭工業大学 ○学生員 中 山 伸 一

1. はじめに

著者らは、鉄筋コンクリート (RC) 製梁、柱、板に関する合理的かつ汎用性のある衝撃応答解析手法の確立を目的として、市販の衝撃解析汎用コードに含まれる程度の比較的簡易な構成則を用いた RC 梁の三次元弾塑性衝撃応答解析を行い、本解析手法の適用性を実験結果と比較する形で検討を行ってきた¹⁾。その結果、主鉄筋比、断面寸法およびスパン長の違いに関わらず、静載荷時に曲げ破壊型となる RC 梁の衝撃挙動は、本解析手法により十分評価可能であることが明らかとなっている。一方、RC 柱や RC 版に関しては未だ十分な検討が行われていないのが現状である。このような背景より、本研究では、横方向衝撃力を受ける RC 橋脚模型に着目し、RC 梁の場合と同様に単純な構成則を用いた弾塑性衝撃応答解析を行い、著者らが過去に実施した RC 橋脚模型に関する実験結果²⁾と比較することによって提案する本解析手法の適用性について検討を行った。実験結果との比較検討は、RC 橋脚模型に作用する重錘衝撃力、残留変形量およびひびわれ分布性状である。また、本数値解析では簡易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減衰は考慮しているが、コンクリートや鉄筋の歪速度効果やコンクリートと鉄筋との間の付着特性等は無視することとした。なお、本数値解析は LS-DYNA (ver.940)を用いて行った。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

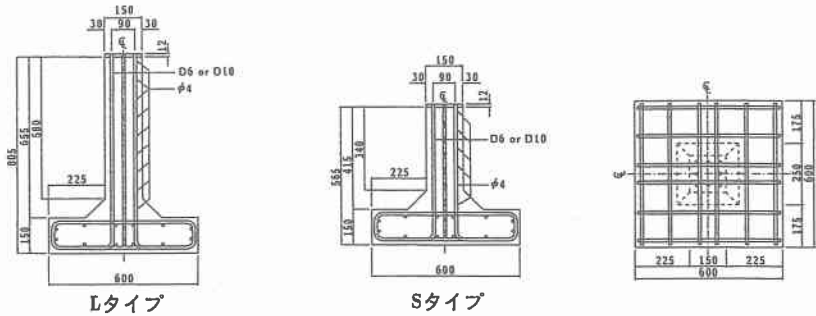
解析に用いた試験体は表一 1 に示す計 12 体である。表中の試験体名の第 1 項には、試験体のタイプ (L : 長柱, S : 短柱), 第 2 項には軸方向筋径および第 3 項には、せん断補強筋の数を示している。また、重錘落下は 1 m / sec 刻みの漸増繰り返し載荷実験を行い、RC 柱が破壊に至った衝突速度を確認後、それと同一の載荷速度で単一に載荷することとした。また、本研究では、破壊の定義を累積残留変形量がスパン長の 1 / 25 程度 (L タイプの

表一 1 試験体の一覧

試験体の名称	軸方向筋径 (本数)	せん断補強筋径 (本数)	載荷速度 (m/sec)	残留変形量 (mm)	破壊形式
L-10-9	D10 (8本)	φ4 (9本)	1	0.5	終局に至らず
			4	29.0	曲げ型
S-10-2	D10 (8本)	φ4 (2本)	1	0.0	終局に至らず
			4	15.0	せん断型
S-10-6	D10 (8本)	φ4 (6本)	1	0.0	終局に至らず
			4	9.0	終局に至らず
			5	22.5	せん断型
S-6-2	D6 (8本)	φ4 (2本)	1	2.0	終局に至らず
			3	17.0	せん断型
S-6-6	D6 (8本)	φ4 (6本)	1	1.0	終局に至らず
			3	10.5	終局に至らず
			4	9.0	終局に至らず

Elasto-plastic impact analysis of RC pier model under lateral impact loading
by Ken-ichi MATSUOKA, Hiroshi MIKAMI, Tomohiro ANDO and Sin-ichi NAKAYAMA

場合 17.2 mm，Sタイプの場合 13.6 mm) に達した状態とした．なお，S-10-6 および S-6-6 に関しては，その破壊前後の載荷速度についても解析を行なっている．さらに，RC 橋脚模型の弾性範囲程度の応答を把握するために載荷速度 1 m/sec の場合についても解析を行っている．試験体の形状寸法および補強筋の配置位置を図－1 に示す．軸方向筋数は D6 または D10 が 8 本であり，試験体の全断面に対する補強割合は各々 1.13%，2.54% である．なお，試験体のせん断補強筋比は，コンクリート標準示方書の棒部材に対する構造細目の規定を適用して丸鋼を用いた場合の最少量とした．なお，表－2 および表－3 にはコンクリートと鉄筋の力学的特性を示している．



図－1 試験体の形状寸法および補強筋の配置状況 (mm)

表－2 コンクリートの力学的特性

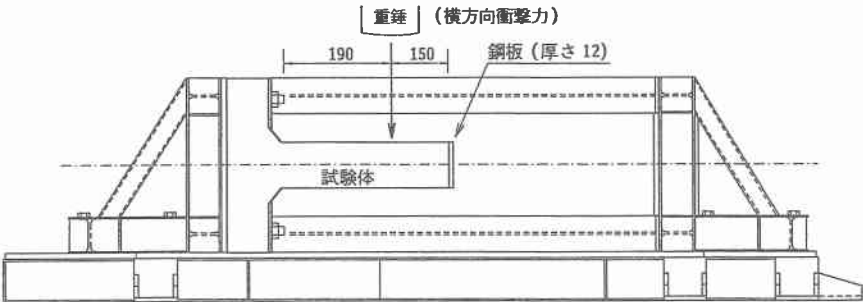
材令 (日)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	圧縮強度 (MPa)
21～37	25	0.2	38

表－3 鉄筋の力学的特性

材質	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	降伏応力 (MPa)
SD295A	206	0.3	294

2.2 実験方法

実験は室蘭工業大学に設置されている落下衝撃万能試験機を用いて行った．試験体 S-6-6 における載荷治具の概要を図－2 に示す．衝撃荷重は，円柱状の鋼製重錘 (直径：15cm，重量 1.96 kN) を所定の高さにセットした後，試験体の前面より 15 cm の位置に重錘を自由落下させて載荷した．試験体は横置きとし，フーチングは 4 本のアンカーによって剛な鋼板と緊結した．なお，重錘底部は，片当たりを防止するため 2 mm のテーパを有する球底としている．計測項目は，重錘に内蔵した起歪柱型の衝撃荷重測定用に開発したロードセルによる重錘衝撃力波形，および載荷点直下における残留変形量である．また，実験終了後には試験体のひびわれをスケッチし，ひびわれ性状および破壊性状を検討している．



図－2 載荷治具の概要図 (mm)

3. 解析仮定

3.1 RC 橋脚模型のモデル化

図-3 に試験体 S-6-6 における全体の要素分割図を示している。ここでは、RC 橋脚模型の対称性を考慮して解析断面を 1/2 断面としてモデル化した。全要素数、全節点数は各試験体で多少異なるが、図-3 に示す試験体 S-6-6 でそれぞれ 7173, 8544 である。解析に用いた要素タイプは、6 節点あるいは 8 節点の固体要素および梁要素である。このうち、コンクリート、異形鉄筋および重錘には固体要素を、スターラップ ($\phi 4$) には計算時間の短縮を計るため、梁要素を適用した。また、重錘とコンクリートとの要素間には、接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。なお、解析時間は 80msec までの計算とし、解析所要時間は 1 ケース当たり HP 9000/C180 を使用して約 7 時間である。

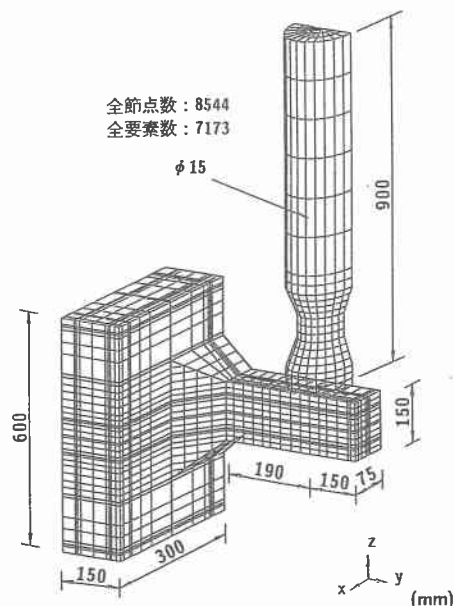


図-3 試験体 S-6-6 における全体の要素分割図

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。本

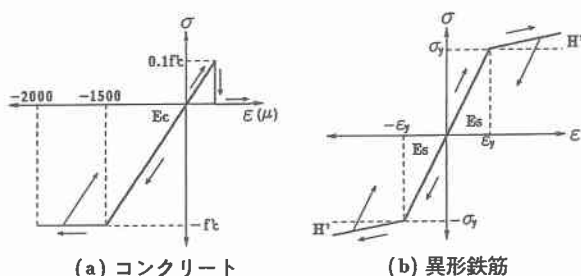


図-4 数値解析に用いた応力-歪曲線モデル

数値解析では降伏応力として圧縮強度を仮定している。なお、引張側の破壊応力は降伏応力の 1/10 と仮定した。一方、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、降伏後は等方硬化を仮定し、バウシinger 効果は考慮しないものとしている。また、異形鉄筋の材料定数は公称値 (表-3 参照) 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。なお、図-4 には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-歪関係を示している。

4. 減衰定数 h の決定

本数値解析では、コンクリート要素、鉄筋要素とも弾塑性挙動を呈し、その塑性歪エネルギー成分が大きな減衰作用を示すものと考えられる。しかしながら、質点の振動に伴う質量に比例した粘性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最低次の弾性固有振動周期に対する減衰定数 (以下、単に減衰定数 h と呼ぶ) 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 には S-6-6-V3 に関して減衰定数を変化させた場合の自由端部の残留変形量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。図中の 45° の勾配を持つ線は数値解析結果と実験結果が一致していることを意味している。従って、この線より下の領域は実験値が大きいことを、上の領域は解析結果が大きいことを示している。図より、減衰定数 $h=0.02$ の場合が実験結果と最もよく対応していることより、以降の本数値解析では減衰定数を $h=0.02$ にすることとする。

5. 異形鉄筋要素の硬化係数 H' の決定

本研究では、単純な構成則を用いた RC 橋脚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は無視している。しかしながら、RC 橋脚が著しい損傷を受け大きなひびわ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、真の塑性硬化の他に歪速度効果等が RC 橋脚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。本研究では、特に S-6-6-V3 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 $H'=0$ 、 $E_s/10$ 、 $E_s/100$ の 3 ケースである。なお、減衰定数に関しては前章での検討結果をふまえ全要素に対して $h=0.02$ とした。図-6 に測定点の残留変形量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、 $H'=E_s/100$ 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 $H'=E_s/100$ とすることとする。

6. 数値解析結果と実験結果の比較

6.1 残留変形量

図-7 には全ケースの試験体の残留変形量に関する数値解析結果と実験結果を比較して示している。図より単一載荷実験において破壊に至っている 4 ケースに関しては、数値解析結果が実験結果よりも若干小さな値を示していることがわかる。しかしながら、その他のケースに関しては両者はよく一致している。これより、数値解析結果は終局変位を越える場合には実験結果を多少過小評価するものの終局変位程度以下の場合には実験結果と良く対応することが明らかとなった。

6.2 重錘衝撃力波形分布

図-8 には対象としたケースのうち S-10-6-V4、L-10-9-V4、S-6-6-V3、S-6-2-V3 の重錘衝撃力波形について実験結果と解析結果を比較して示している。なお、両波形の衝撃初期には 500 Hz 以上の高周波成分が含まれている。しかしながら、柱の応答性状に影響を与えるものと判断される主波動に関して実験結果と数値

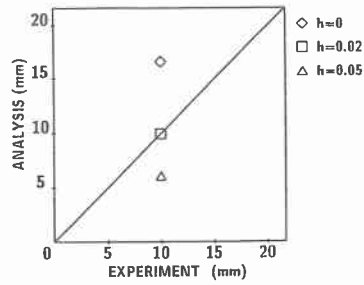


図-5 柱自由端部の残留変形量に関する各減衰定数 h の実験結果との比較 (S-6-6-V3)

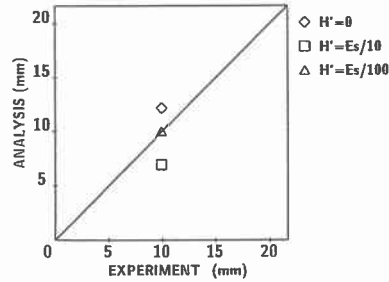


図-6 柱自由端部の残留変形量に関する各硬化係数 H' の実験結果との比較 (S-6-6-V3)

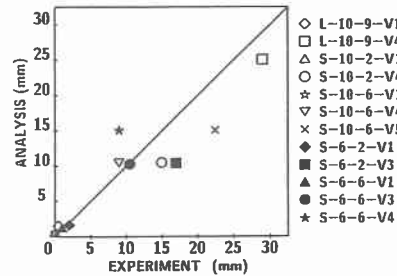
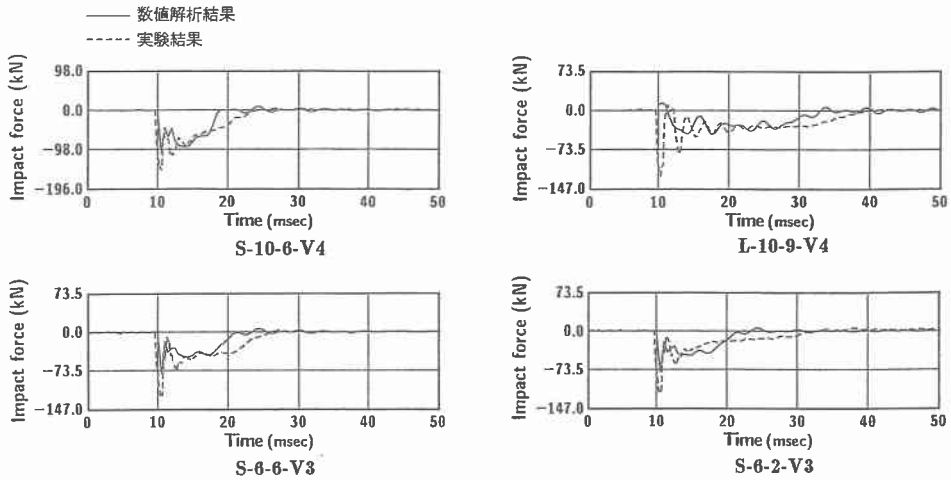


図-7 柱自由端部の残留変形量に関する実験結果との比較

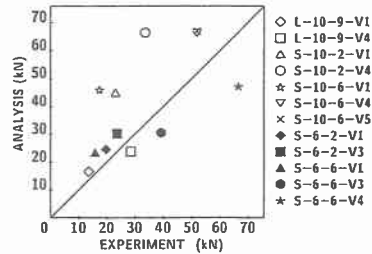


図－8 重錘衝撃力波形に関する数値解析結果と実験結果の比較

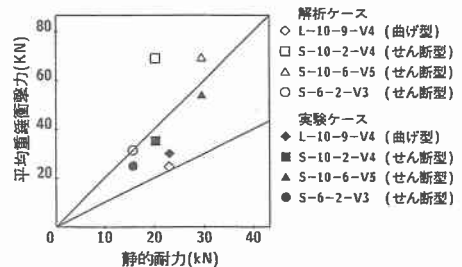
解析結果を比較するものとし、実験および数値解析結果とも 2.5 msec の矩形移動平均法による数値フィルター処理を行っている。図より、主波動の継続時間に関してはいずれのケースにおいても数値解析結果が実験結果に比べて短く示されているが、大略両者はよく対応しているものと判断される。

6.3 平均重錘衝撃力と静的耐力

図－9 には全ケースの平均重錘衝撃力について、実験結果と数値解析結果を比較して示している。ここで、平均重錘衝撃力とは、重錘衝撃力波形を継続時間について積分して求めた力積を継続時間で除したものである。図より S-10-2-V4 は数値解析結果が実験結果の 2 倍程度となっているが、他の試験体に関しては大略両者類似の値となっていることがわかる。図－10 には実験結果と数値解析結果に関する各ケースの最大速度における平均重錘衝撃力と静的耐力との関係を示している。静的耐力はコンクリート標準示方書に示されている設計評価式を用いて算定した。図中、破壊形式が曲げ型である試験体（L タイプ）には静的曲げ耐力を、破壊形式がせん断型である試験体（S タイプ）には静的せん断耐力を静的耐力として用いた。図中の 45° の勾配線は平均重錘衝撃力が静的耐力の 2 倍であることを意味している。さらに、図中の 22.5° の勾配線は平均重錘衝撃力が静的耐力と一致していることを示している。図より、破壊形式が曲げ型の試験体においては平均重錘衝撃力が静的耐力と概ね同程度と推定できる。また、破壊形式がせん断型である試験体については平均重錘衝撃力が静的耐力のほぼ 2 倍程度であるものと推定できることが明らかとなった。



図－9 平均重錘衝撃力に関する数値解析結果と実験結果の比較



図－10 平均重錘衝撃力と静的耐力の関係

6.4 ひびわれ分布と最大主応力分布の関係

本数値解析では引張応力がカットオフ値に達すると要素が破壊され、主応力が零となる。ここでは、このような状態において要素にひびわれが発生しているもの(図中、緑色の等色線)と評価し、実験結果のひびわれ分布と比較することとした。図-11には S-10-6-V4、L-10-9-V4、S-6-6-V3、S-6-2-V3 について実験終了時の試験体に発生したひびわれ分布と解析における最大応答時の主応力分布を比較して示している。図より、載荷点部直下の曲げひびわれおよび載荷点部から橋脚底部に向かう斜めひびわれ分布が示されていることがわかる。これより、本数値解析によって RC 橋脚模型の変形状態やひびわれ性状を推定することは十分可能であることが明らかとなった。

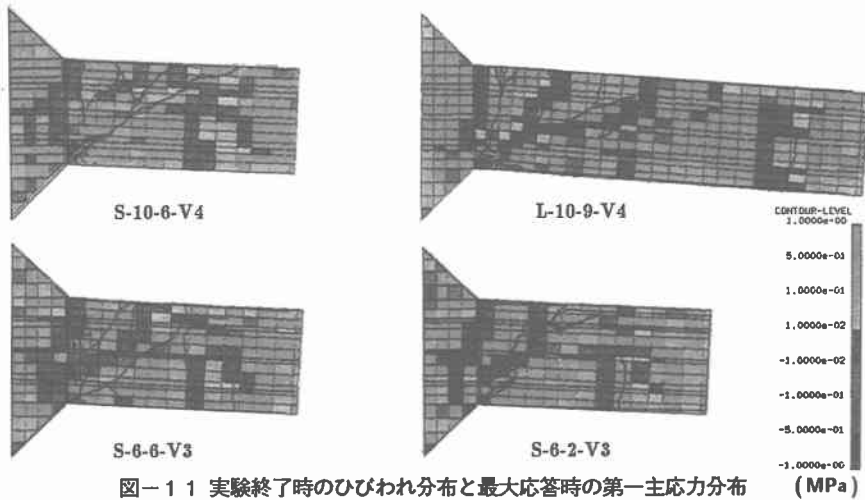


図-11 実験終了時のひびわれ分布と最大応答時の第一主応力分布 (MPa)

7. まとめ

本研究では、RC 橋脚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、横方向衝撃力を載荷させた RC 橋脚模型の弾塑性衝撃応答解析を試み、実験結果と比較することにより本数値解析手法の適用性について検討を行った。本研究で得られた結論を要約すると、

- 1) 粘性減衰定数および鉄筋の塑性硬化係数 H' を適切に同定することより終局変位程度以下の残留変形量に関しては実験結果と良く対応する。
- 2) 本解析手法を用いることにより重錘衝撃力波形およびコンクリートのひびわれ分布に関しては比較的精度良く実験結果を再現できる。
- 3) 実験結果同様、破壊形式に応じて曲げ破壊型 RC 柱の場合には静的耐力と同程度、せん断破壊型 RC 柱の場合には静的耐力の 2 倍程度の平均重錘衝撃力として衝撃力評価が可能であることが明らかとなった。今後は試験体に軸力を作用させた数値解析を試み、残留特性、破壊特性および重錘衝撃力特性を検討する予定である。

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, 西 弘明, 小山田 芳裕: 横方向衝撃力を受ける RC 橋脚模型の破壊性状と耐衝撃性, 構造工学論文集, Vol. 42A, pp. 1579-1588, 1997.
- 3) John O.Hallquist : LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1997.9.