

## (3) 有限要素法を用いた非弾性衝撃解析に関する考察

STUDY ON NON-LINEAR IMPACT ANALYSIS USING FINITE ELEMENT METHOD

伊藤義人\*, 笹田俊治\*\*, 大野 隆\*\*\*, 森 正樹\*\*\*\*, 八木伸人\*\*\*\*\*

Yoshito ITOH, Toshiharu SASADA, Takashi OHNO, Masaki MORI and Nobuto YAGI

\*工博 名古屋大学教授 理工科学総合研究センター(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

\*\*工修 名古屋大学大学院生 工学部土木工学科(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

\*\*\*名古屋大学大学院生 工学部土木工学科(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

\*\*\*\*名古屋大学大学院生 工学部土木工学科(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

\*\*\*\*\*栗本鉄工所部長 鋳物事業部技術開発グループ(〒559 大阪市住之江区泉2-1-64)

キーワード: 衝撃荷重, 定着構造, メタルライナー, 非線形衝撃解析

(impact load, anchorage system, metal liner, non-linear impact analysis)

## 1. 序論

土木工学において, 汎用解析コードを用いた衝撃解析が盛んに行われている. しかしながら, 公表されている解析例の多くは鉄筋コンクリート床版へのミサイルの落下などを対象とする問題に限定されているため, 衝撃を受ける材料の構成則のモデル化, 接触問題の取り扱い方などについて, 広く一般的に適用できるものは確立していない. 本研究では, 土木構造物の一部を対象として, 汎用有限要素法衝撃解析コードLS-DYNA3Dを用いたソフトな衝撃およびハードな衝撃両問題の解析により, 実験結果を再現するための材料構成則のモデル化についての考察を行った.

## 2. 材料の物性モデル

鋼の材料構成則は, von Misesの降伏基準に従う等方性弾塑性体とする. また, ひずみ速度効果による降伏応力の増加を高橋ら<sup>1)</sup>が提案した式により考慮した. 次に, コンクリートについては, 圧縮強度, 引張強度および弾性係数のひずみ速度依存性の考慮が解析結果に及ぼす影響を比較するため, TYPE1(考慮なし), TYPE2(考慮あり)の2種類のモデルを用いた. TYPE1はDrucker-Pragerの降伏基準を用いた完全弾塑性体である. 一方, TYPE2は山口ら<sup>2)</sup>が提案した3軸応力下の応力-ひずみ関係に破壊基準としてWilliam-Warnkeの5パラメータモデルを使用し, 圧縮破壊後の挙動は既往の研究例より, 応力を維持, または圧力を1/5, 偏差応力を0とした. また, 引張側ではTYPE1, TYPE2ともに最大圧力が引張強度を超えないようにした.

## 3. 解析の対象

本研究において解析の対象とした実験は, 石川らが行った中空鋼管およびコンクリート充填鋼管に対する衝撃載荷実験<sup>3)</sup>, および当大学で過去に行われたメタルライナー取付構造の衝撃載荷実験<sup>4)5)</sup>である. このうち, 鋼管の衝撃載荷問題は, 鋼管の変形が大きいため, ソフトな衝撃に分類される. また, メタルライナー取付構造の衝撃載荷問題は, メタルライナーの変位が小さい範囲ではハードな衝撃に属すると考えられる. よって, この2問題の解析を行うことで, 土木分野における, 比較的低速度( $10^0\text{m/s}\sim 10^1\text{m/s}$ )下のソフトな衝撃およびハードな衝撃の両問題を解析す

ることになる。

### 3.1 中空鋼管およびコンクリート充填鋼管衝撃載荷実験

中空鋼管の有限要素モデルおよびコンクリート充填鋼管の有限要素モデルを図1(a), (b)にそれぞれ示す。鋼管径は60.5mm, 鋼管厚さは3.2mm, 重錘重量は150kgf, 衝突速度は8m/secである。解析には, メッシュサイズの違いが解析結果に及ぼす影響を比較するために, 鋼管を円周方向に16分割したモデル(以後16分割モデルとする), 32分割したモデル(以後32分割モデルとする)の2種類のメッシュモデルを用いた。モデルの物性は, 鋼管および載荷用治具を等方性弾塑性体, ロードセルおよび重錘を等方性弾性体とした。また, 充填コンクリートには, コンクリートモデルTYPE1またはTYPE2を使用し, TYPE2では圧縮破壊後, 応力は維持されるものとした。

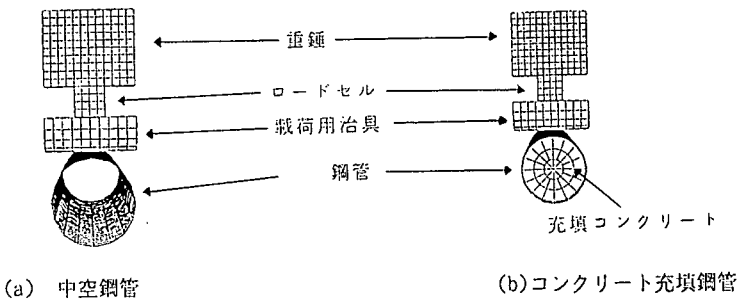


図1 有限要素モデル

### 3.2 メタルライナー取付構造の一面せん断衝撃実験

図2(a)に, 一面せん断実験における供試体形状および実験装置の概要を, 図2(b)に, 解析に使用した有限要素モデルを示す。この有限要素モデルは対称性を考慮して, 切断面鉛直方向の変位および切断面平行方向の回転を拘束した1/2モデルを使用した。各材料定数には, 文献4)の材料試験結果を使用した。解析モデルの物性は全て等方性弾塑性体とした。

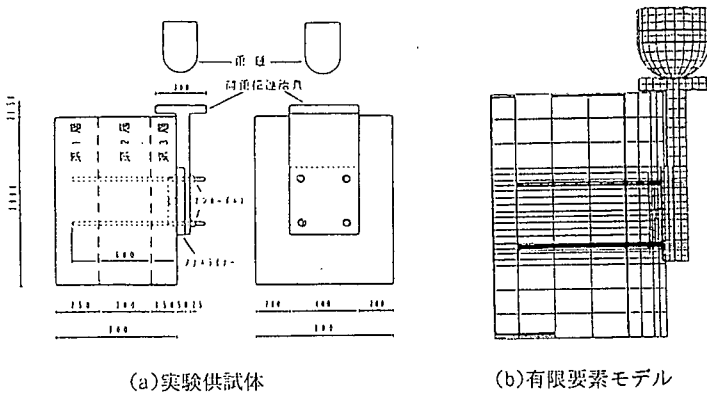


図2 メタルライナー取付構造一面せん断実験

### 3.3 メタルライナーの鉛直衝撃載荷実験

解析に使用した有限要素モデルを図3に示す。モデルは対称性を考慮した1/2モデルである。解析モデルの物性は,

岩石重錘をコンクリートの物性TYPE2, メタルライナーを等方弾塑性体, ロードセルその他を等方性弾性体とした。なお, 材料試験の結果, 重錘に使用した花崗岩の圧縮強度は581kgf/cm<sup>2</sup>, ヤング率は3.17×10<sup>5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>であったため, 圧縮強度およびヤング率については花崗岩の値を使用した。

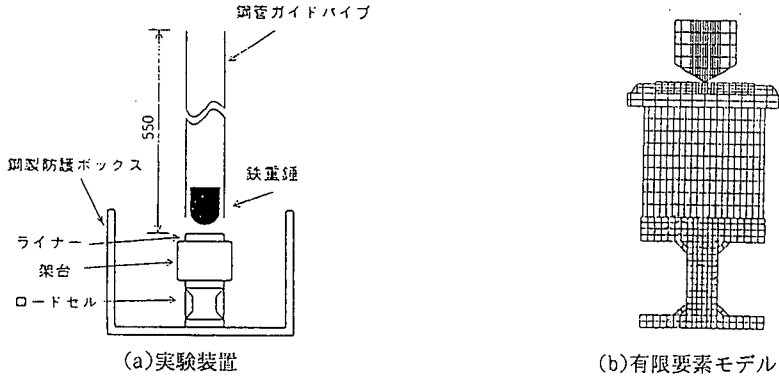


図3 メタルライナー鉛直衝撃載荷実験

#### 4. 解析結果および考察

##### 4.1 中空鋼管の衝撃載荷解析

鋼管載荷部下縁変位時刻歴図およびロードセル荷重時刻歴図より時間軸を消去することにより得られた荷重-鋼管載荷部下縁変位関係を図4に示す。ロードセル荷重時刻歴波形は, 酒巻ら<sup>6)</sup>と同様の手法により, ローパスフィルターの値を決定して高周波成分の除去を行った。図中, 実線は実験結果, 点線は16分割モデルの解析結果, 破線は32分割モデルの解析結果を, xは終局変位を表す。終局変位は次式により算定した。

$$\delta_L > 0.8(D - 2t) \quad \text{ここに, } D: \text{鋼管径, } t: \text{板厚}$$

解析結果は両者ともほぼ一致し, 変位80mm付近までは実験結果を良く再現している。この結果より, 今後は鋼管を16分割したモデルを使用することに決定した。次に図5において, 実線は実験結果, 点線は鋼管の物性にひずみ速度効果を考慮しない解析結果, 破線はひずみ速度効果を考慮した解析結果を表す。ひずみ速度効果を考慮した解析結果の方が, 実験結果により近い値となった。

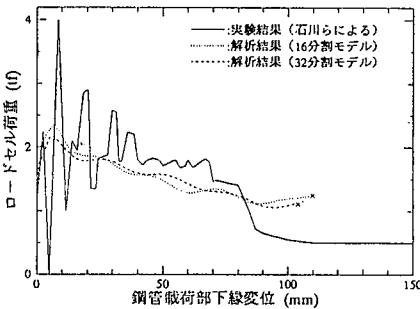


図4 中空鋼管荷重-変位関係 1

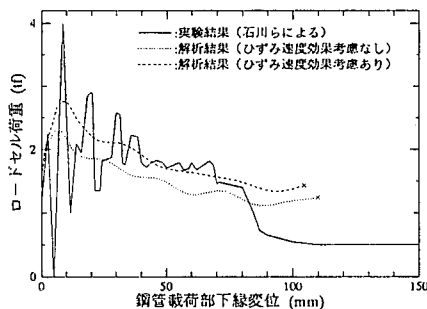


図5 中空鋼管荷重-変位関係 2

##### 4.2 コンクリート充填鋼管の衝撃載荷解析

図6において, 実線は実験におけるロードセル荷重-載荷部下縁変位関係を, 点線は鋼, コンクリートともにひずみ速度効果を考慮した解析結果(コンクリートモデルTYPE2を使用)を, 破線は鋼, コンクリートともにひずみ速度効果

を考慮していない解析結果（コンクリートモデルTYPE1を使用）をそれぞれ表す。図6より、鋼、コンクリートともにひずみ速度効果を考慮することの影響が大きいことが分かる。一方、図7に示す解析結果は、鋼のひずみ速度効果を両方とも考慮し、コンクリートのひずみ速度効果の考慮の有無が及ぼす影響を比較したものである。図6および図7を比較することにより、コンクリートのひずみ速度効果の考慮よりもむしろ鋼のひずみ速度効果の考慮の有無が及ぼす影響の方が大きいことが分かる。

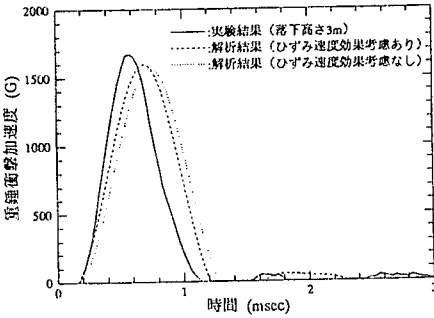


図6 コンクリート充填鋼管荷重-変位関係 1

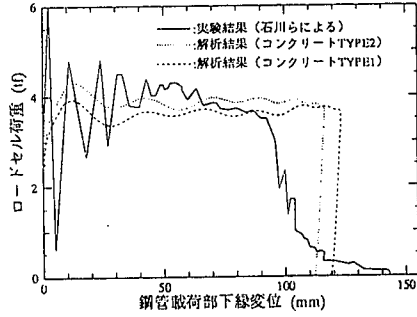


図7 コンクリート充填鋼管荷重-変位関係 2

#### 4.3 メタルライナー取付構造の一面せん断衝撃載荷解析

はじめに、鉄重錘を用いた解析結果を示す。図8は重錘落下高さ3mにおける重錘加速度時刻歴を表し、実験結果を実線で、鋼のひずみ速度依存性を考慮した解析結果を破線で、鋼のひずみ速度依存性を考慮していない解析結果を点線でそれぞれ示す。最大加速度は解析結果の方がやや小さい値となったが、鋼のひずみ速度依存性の考慮の有無による結果の差は小さいことが分かる。これは、先に示した中空鋼管およびコンクリート充填鋼管の衝撃解析のような変形の大きいソフトな衝撃問題の解析では鋼のひずみ速度依存性の考慮の有無による影響が大きいことと比較すると大きな違いであり、本解析のように変位の小さいハードな衝撃問題の解析では、鋼のひずみ速度依存性の考慮の有無が解析結果に及ぼす影響は小さいと言える。図9に重錘の落下高さを変えて解析を行い、重錘衝撃力を実験結果と比較したものを示す。図中、Hertz解とは文献4)で論じたHertzの衝撃力算定値であり、鉄重錘の場合は係数0.45を、コンクリート重錘の場合は係数0.40をそれぞれ乗じることでその最大衝撃力が近似できる。解析結果はややばらつきがあるものの、概ね実験結果に近い値となり、衝撃力のピーク値を十分再現できると言える。

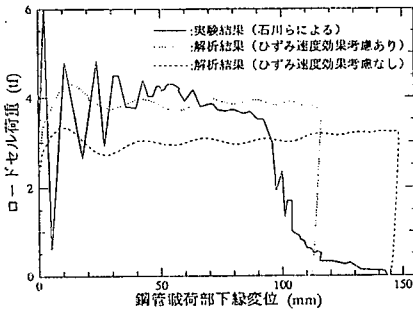


図8 鉄重錘衝撃加速度波形

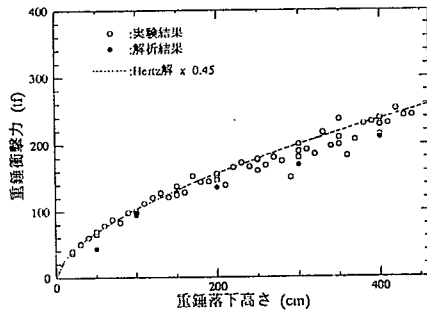


図9 鉄重錘落下高さ-重錘衝撃力関係

次に、コンクリート重錘を用いた解析結果を示す。図10は、落下高さ50cmでの重錘加速度波形図であり、実験結果を実線で、解析結果を点線で示している。解析に使用したコンクリートモデルはひずみ速度効果を考慮したものであ

り、圧縮破壊後の挙動は圧力を0.2倍、偏差応力を0に仮定している。解析結果の加速度ピーク値は280Gであり、実験結果の平均値303Gと近い値となった。次に、圧縮破壊後の挙動として、上記のモデルに加えて、応力を維持する仮定に基づくモデルによる解析を行った結果を図11の重錘落下高さーピーク衝撃力関係に示す。実験結果に見られるばらつきは、重錘が落下の度に局部変形が生じ、落下高さ50cm2回目でクラックが入り割れたことが原因である。解析結果は、落下高さ20cm、30cmではともにほぼ等しい値であり、落下高さ50cmで大きな差が出た。実験結果と比較するとかなりばらつきが見られるが、圧縮破壊後の応力の軟化を表現するモデルの方がより実験結果に近い結果が得られることが分かった。

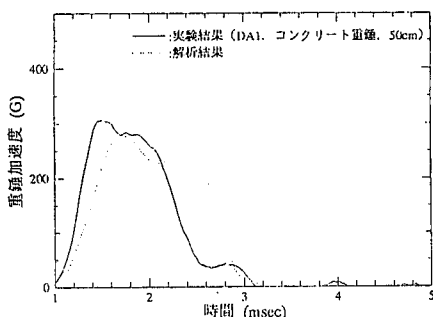


図10 コンクリート重錘衝撃加速度波形

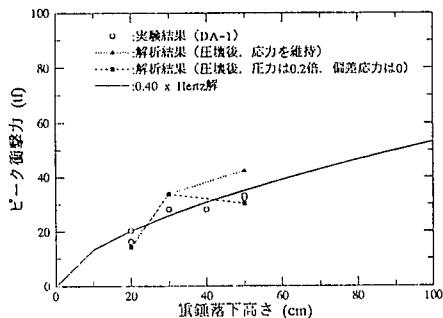


図11 コンクリート重錘落下高さー重錘衝撃力関係

#### 4.4 メタルライナーの鉛直衝撃載荷解析

図12に落下高さ1mにおける衝撃力時刻歴のコンクリートモデルTYPE2を用いた解析結果と実験結果の比較を示す。図中、重錘衝撃力の実験結果を実線、解析結果を破線、ロードセル衝撃力の実験結果を点線、解析結果を一点鎖線でそれぞれ表す。重錘衝撃力、ロードセル衝撃力の最大値はともに実験結果と近い値が得られた。一方、重錘衝撃力に対するロードセル衝撃力の立ち上がり時刻の遅れは実験結果、解析結果ともに約0.3ms認められた。次に、各落下高さにおける解析結果と実験結果の比較を図13に示す。解析結果は重錘落下高さ50cmでは実験結果よりも約3tf大きい値を示したが、重錘落下高さ200cmでは実験結果よりも10tf程度小さくなった。これは、岩石重錘の物性にコンクリートを代用していること、および岩石重錘が落下高さ2mでも破壊しないのに対し、コンクリート重錘はより低い落下高さで破壊する可能性が高いことを考慮すると、落下高さ2mでは物性にコンクリートのものを使用することが不適切であるといえる。しかしながら、それより低い落下高さでは、岩石重錘の物性値をコンクリートの物性モデルに適用して最大重錘衝撃力を推測することは十分可能であると考えられる。

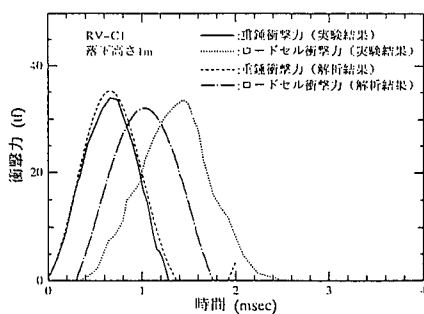


図12 衝撃力時刻歴の比較

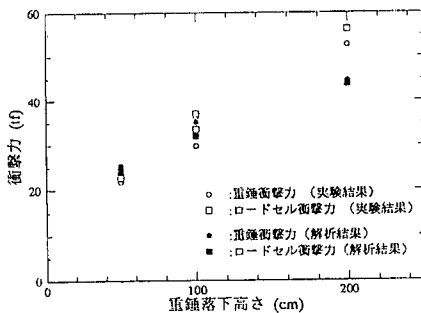


図13 重錘落下高さー衝撃力関係

## 5. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

1. 中空鋼管およびコンクリート充填鋼管の衝撃解析では、鋼およびコンクリートのひずみ速度効果を考慮したモデルにより、実験結果の荷重-変位関係と良い一致を示す結果を得た。
2. コンクリート充填鋼管の衝撃解析では、鋼のひずみ速度効果の考慮が応答結果に及ぼす影響はコンクリートのひずみ速度効果の考慮が及ぼす影響よりも大きいことを明らかにした。
3. 重錘としてコンクリートを用いた問題の解析では、圧縮破壊後の応力の軟化を表現するモデルの方が実験結果をより良く再現することを示した。
4. メタルライナー鉛直衝撃載荷解析では、コンクリート重錘の破壊が生じない落下高さでは、岩石重錘の物性値をひずみ速度効果を考慮したコンクリートの物性モデルに使用して最大重錘加速度を推測できることを示した。
5. 中空鋼管およびコンクリート充填鋼管の衝撃解析のように変形の大きいソフトな衝撃問題における鋼のひずみ速度依存性の考慮が必要であるのに対し、鉄重錘を用いたメタルライナー取付構造の衝撃解析のように変形の小さいハードな衝撃問題では鋼のひずみ速度依存性の考慮の有無が重錘加速度に及ぼす影響はごく小さいことを示した。

なお、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金一般研究(c) (課題番号06650516)を受けて行ったものである。

## 参考文献

- 1) 高橋芳彦, 大野友則, 太田俊昭, 日野伸一: 衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果, 構造工学論文集 Vol. 37A, pp. 1567-1580, 1991. 3.
- 2) 山口弘, 藤本一男, 野村設郎: 高圧3軸応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係 その2 高速載荷, 日本建築学会構造系論文報告集 第396号, pp. 50-58, 1989年2月.
- 3) 石川信隆, 伊藤一雄, 川嶋幾夫, 鈴木宏: モルタル充填鋼管はりの衝撃限界吸収エネルギーに関する実験的考察, 構造工学論文集 Vol. 37A, pp. 1581-1589, 1991. 3.
- 4) 伊藤義人, 八谷徹, 宇佐美勉, 片岡誠, 草田昭一: 衝撃荷重を受けるメタルライナー取付構造物の耐荷力と変形能に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol. 39A, pp. 1539-1552, 1993. 3.
- 5) 伊藤義人, 川口雅樹, 笹田俊治, 八木伸人: メタルライナーの硬度変化と衝撃力に関する研究, 構造工学論文集 Vol. 42A, 1996. 3, 投稿中.
- 6) 酒巻勝, 小翠幹太, 藤掛一典, 大野友則: 落錘衝撃実験における荷重計測に関する一考察, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第1部(B), pp. 1064-1065, 平成7年9月.
- 7) 伊藤義人, 増田進一, 笹田俊治, 八木伸人: コンクリート面を防護する種々のメタルライナーの衝撃実験, 構造工学論文集 Vol. 41A, pp. 1239-1248, 1995. 3.