

# 鉛直アレー地震観測地点に対して各種全応力 地盤地震応答解析法に基づき算定した震度の精度

上田稔1・遠藤大輔1・恒川和久2・今枝靖博2

<sup>1</sup>中部電力株式会社 技術開発本部 電力技術研究所 (〒459-8522 愛知県名古屋市緑区大高町字北関山20番地の1)

> E-mail:Ueda.Minoru@chuden.co.jp E-mail:Endou.Daisuke@chuden.co.jp 計シーテック 土木建築本部 技術コンサルタ

2株式会社シーテック 土木建築本部 技術コンサルタント部 (〒455-0054 愛知県名古屋市港区遠若町3-7-1)

E-mail:k.tsunekawa@ctechcorp.co.jp E-mail:y.imaeda@ctechcorp.co.jp

地震による被害を想定する場合,地盤地震応答解析の結果から算定した震度により検討するのが一般的である.震度を精度良く算定するには,信頼性の高い地盤地震応答解析を行うことが重要であるが,そのためには,地盤の物性値を適切に設定し,信頼性の高い解析手法を用いる必要がある.そこで,本稿では,いくつかの地点の鉛直アレー地震観測記録を対象に,等価線形解析法,周波数依存型の等価線形解析法,修正R-Oモデルおよび著者らが提案するMDMモデルによる全応力逐次非線形解析法,合計4種類の解析手法により加速度記録の再現解析を行い,解析結果から算定した震度の精度について検討した.その結果,等価線形解析,周波数依存型の等価線形解析,修正R-Oモデルを用いた全応力逐次非線形解析法では,震度5弱以下の地震の算定精度は良好であったが,震度5強以上の地震の震度の算定精度は良好でなかった.一方,MDMモデルによる全応力逐次非線形解析法では,震度の大きさに関わらず震度の算定精度は良好であった.

**Key Words:** Seismic intensity, Equivalent linear analysis, Frequency dependent equivalent linear analysis, Nonlinear total stress analysis, R-O model, MDM model

# 1.はじめに

地震による被害を想定する場合, 震度を用いるの が一般的であり、その震度は検討対象地点における 地盤地震応答解析を実施し,その結果として得られ る加速度時刻歴から算定される.従って,震度を精 度良く算定するには,信頼性の高い地盤地震応答解 析を行うことが重要である.信頼性の高い地盤地震 応答解析を行うには,地盤の初期速度構造や剛性と 減衰のひずみ依存性等の物性値を適切に設定するこ とと,信頼性の高い解析手法を用いることが重要で ある.解析手法としては,従来から用いられている 等価線形解析法(以下,SHAKE)<sup>1)</sup>,等価ひずみの 周波数依存性を考慮した等価線形解析法(以下, FDEL)<sup>2)</sup>が用いられる場合が多い.しかし,等価 線形解析法は強地震時のように地盤の非線形性が顕 著になる場合には,使用に適さないことが指摘され ており<sup>3)</sup> , その結果から算定された震度の精度には 疑問が残る. そこで, 本稿では, いくつかの鉛直ア レー地震観測記録を対象に,地盤地震応答解析から 算定した震度の精度について,地震観測記録,地盤 地震応答解析の結果、それぞれから震度を算定し、 それらを比較することで検討する. 地盤地震応答解 析法は,SHAKEとFDEL,修正R-Oモデル<sup>4)</sup>および 著者らが提案するMDMモデル<sup>5)</sup>を用いた全応力逐 次非線形解析法(以下,R-OおよびMDM)の4手法 を採用した.

## 2.検討対象地点と検討対象地震

検討対象とした地点と地震は,表-1に示す9地点における11地震である.9地点の地盤構成の概要と地震計設置位置を図-1に示す(印).なお,表-1の最大加速度は水平直交2成分のうち最大加速度の大きい方である.

# 3.地盤地震応答解析,MDMモデル,震度の 算定方法の概要

# (1) 地盤地震応答解析の概要

地盤地震応答解析では,図-1に示す地盤モデルの 最下部における観測加速度記録の水平直交2成分の うち最大加速度の大きい方を入力し,地表面もしく は地表面付近における地震計位置での加速度時刻歴 を算出した.

表-1 対象地点と対象地震の 最大加速度,液状化の有無

取入加述及,从外1000月無						
対象地点	対象地震	最大 加速度 (Gal)	液状化			
ウトナイ	1993年1月15日 北海道釧路沖地震	104	無			
L地点	1989年2月19日 (地震 A)	100	無			
	1995年7月30日 (地震B)	173	無			
宮城県 船岡	1987年4月7日	131	無			
M 地点	1992年2月24日	180	無			
関電技研	1995年1月17日 兵庫県南部地震	507	無			
N地点	1995 年 1 月 17 日 兵庫県南部地震	198	無			
釧路西港	1993年1月15日 北海道釧路沖地震	468	有			
ワイルト <sup>*</sup> ライフ	1987年11月24日 (地震 E)Elmore Ranch 地震	126	無			
	1987年11月24日 (地震 S)Superstition Hills 地震	180	有			
ポート アイランド	1995年1月17日 兵庫県南部地震	423	有			

表-2 計測震度と震度の関係

計測震度 I	震度
2.5 ~ 3.4	3
3.5 ~ 4.4	4
4.5 ~ 4.9	5 弱
5.0 ~ 5.4	5 強
5.5 ~ 5.9	6弱
6.0 ~ 6.4	6強
6.5 ~	7

# (2) MDMモデルの概要

逐次非線形全応力解析で用いた構成則である MDMモデルは,修正R-Oモデルを改良したもので,繰返し荷重反転時の接線剛性を意味する $G_{MDM}$ という新しいパラメータを定義することにより,骨格曲線の乗り移り,硬化・軟化挙動を表現することができる(詳細は参考文献5)).

# (3) 震度の算定方法の概要

気象庁が定めている震度は,地震観測位置での水平直交2成分,上下1成分の3成分を合成した加速度時刻歴から,式(1)により計測震度を算定し,表-2に基づき震度に換算する<sup>6)</sup>.

$$I = 2\log(a) + 0.94 \tag{1}$$

I: 計測震度

a:3成分を合成した波形の絶対値が,ある値 a以上となる時間の合計が0.3秒となる値

本検討では、地震観測記録による震度は、水平直交2成分のうち最大加速度が大きい方の1成分を水平2成分として仮定し、上下成分は考慮せずに震度を算定した・地盤地震応答解析の結果による震度は、地震観測記録の水平直交2成分のうち最大加速度が大きい方の1成分を対象に再現解析を行い、地震観測記録と同様の方法で震度を算定した・

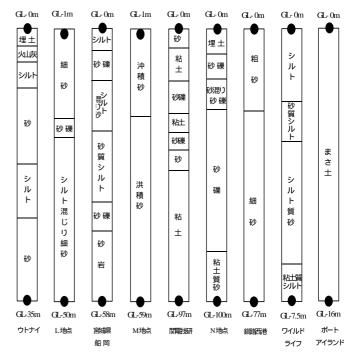


図-1 対象地点の地盤構成の概要と地震計設置位置

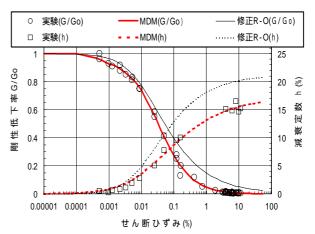


図-3 地盤のひずみ依存性の再現状況の一例 (ポートアイランドのまさ土)

#### 4.解析条件の設定

# (1) 地盤の初期速度構造の設定

地盤の初期速度構造は,S波検層により得られたせん断波速度(以下,Vs)を基に,弱震記録等から算定した地盤の固有振動数を再現するように設定した(詳細は,L地点では参考文献7),釧路西港では参考文献8),ポートアイランドでは参考文献9)).

## (2) 地盤のひずみ依存性の設定

地盤のひずみ依存性は、まず、繰返し三軸試験の結果を再現するようにMDMモデルのパラメータを設定した.その再現状況の一例を修正R-Oモデルの例と合わせて、図-3に示す.MDMモデルでは、ひずみが小さな領域から大きな領域まで再現できていることが分かる.なお、ワイルドライフについては参考文献10)をもとに、関電技研とN地点について

は参考文献11)から設定した.また,このひずみ依存性は拘束圧依存性を式(2)により考慮した.

$$\gamma_{r2} = \gamma_{r1} \left( \frac{\sigma_{m2}}{\sigma_{m1}} \right)^{0.5} \tag{2}$$

r2:任意の深度の参照ひずみ

r1:試験の結果から設定した参照ひずみ

m2':任意の深度の有効拘束圧

*㎜*′:試験の有効拘束圧

次に,SHAKE,FDELにおける地盤のひずみ依存性は,MDMモデルで設定したものと同一となるように設定した.なお,SHAKE,FDELにおける最大ひずみと有効ひずみの換算係数は0.65とした.

(3) 解析メッシュサイズ,積分時間刻み,レーリー減衰の設定

解析メッシュサイズは、1m程度とした.R-O, MDMでは、積分時間刻みは0.001秒とし、解の安定のために剛性比例型のレーリー減衰を考慮した.その比例定数は、0.0008である.

# 5.解析結果

地表面もしくは地表面付近の地震計位置での加速度時刻歴の再現状況の一例を図-4に示す.紙面の都合により,震度5弱以下の場合にはワイルドライフ(地震E)とL地点(地震A)について,震度5強以上の場合にはワイルドライフ(地震S)について示す(SHAKE,MDMによる再現状況の詳細は,参考文献12)).

地震観測記録による震度の再現状況を図-5に示す、縦軸は震度、横軸は検討対象地点である、点線の左側が震度5弱以下、右側が震度5強以上である、表-3に地震観測記録による震度と地盤地震応答解析の結果をもとに算定した震度が一致した地震波の数を、解析手法ごとに、震度5弱以下と震度5強以上に分けて示す。

ワイルドライフ(地震E), L地点(地震A)のように 震度5弱以下の地震については,いずれの解析手法 でも地震観測記録を良好に再現できており,地震観 測記録による震度の再現状況も良好である(図-5, 表-3).一方,ワイルドライフ(地震S)のように震 度5強以上の地震については,MDMは地震観測記録 を良好に再現できているが,SHAKE,FDEL,R-O は再現状況が良好でない.また,地震観測記録によ る震度の再現状況も,MDMは5地震中5地震再現で きているが,SHAKEは5地震中1地震,FDEL,R-Oは 5地震中2地震しか再現できていない(図-6,表-3).

また,紙面の都合で割愛したが,地盤の初期のVsをS波検層ではなく,N値から換算して設定した場合には,どの解析手法によっても,震度の再現状況は良好でなかった $^{13)}$ .このことから,地盤の初期速度構造を適切に設定することが重要であることが確認された.

#### 6.まとめ

MDMモデルを用いた全応力逐次非線形解析によれば,震動レベルが小さい地震から大きい地震まで,震度の算定精度は良好であった.

SHAKE, FDEL, R-Oは, 震度5弱以下の地震であれば, 震度の算定精度は良好であるが, 震度5強以上の地震では算定精度が良好でなかった.

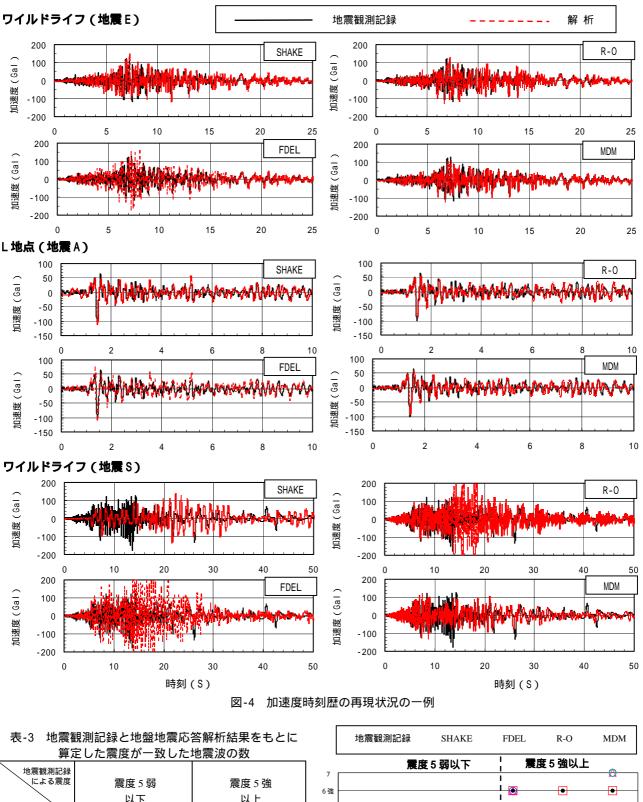
本稿では紙面の都合で示さなかったが,地盤の 初期速度構造の設定に際しては,地盤の固有振動 数を再現するように設定することが重要である.

謝辞:本研究を実施するにあたり,地震観測記録等 の情報を提供していただいた関係各位に深く感謝の 意を表します.

#### 参考文献

- Schnable, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.; SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layerd sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley, 1972
- 2) 杉戸真太,合田尚義,増田民夫:周波数依存性を考慮した 等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集,No.493/-27,pp.49-58,1994.
- 3) 上田稔, 虎谷健司, 山﨑浩之, 恒川和久: 10地点のアレー 観測記録の再現解析に基づくSHAKEの適用限界に関する 検討, 第37回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.2119-2120, 2002.
- 4) 龍岡文夫,福島伸二:砂のランダム繰返し入力に対する応力~歪関係のモデル化(),生産研究359,30巻9号,pp.26-29,1978.
- 5) 熊崎幾太郎,上田稔:瞬間変形係数のひずみ依存性を考慮した履歴モデルの定式化,第54回土木学会年次学術講演会講演概要集, -B111,pp.220-221,1999.
- 6) 震度を知る 基礎知識とその応用 , (株)ぎょうせい,
- 7) 上田稔,熊崎幾太郎,今枝靖博,恒川和久,永坂英明: MDMモデル依存非線形全応力解析によるいくつかの実地 盤地震応答アレー観測記録の再現,第26回地震工学研究 発表会講演論文集,pp.465-468,2001.
- 8) 上田稔,熊崎幾太郎,山崎浩之,恒川和久; MDMモデル 依存非線形全応力解析による北海道釧路沖地震のアレー 観測記録の再現と液状化判定,第26回地震工学研究発表 会講演論文集,pp.473-476,2001.
- 9)上田稔,熊崎幾太郎,鈴木隆;兵庫県南部地震のポートア イランドにおける地盤地震応答の全応力非線形解析によ るシミュレーション,電力土木,No.282,pp.62-66,1999.
- 10) Mourad Zeghal , Ahmed-W.Elgamal ; ANALYSIS OF SITE LIQUEFACTION USING EARTHQUAKE RECORDS , Jurnal of Geotechnical Engineering Vol.120, No.6, pp.996-1017, 1997
- 11) 副田悦生, 玉井秀喜, 田中昌廣, 竹澤請一郎, 前川太, 天野真輔: 鉛直アレー記録による非線形解析法適用性に ついての一考察, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, pp.485-488, 2001.
- 12) 上田稔,山崎浩之,恒川和久;レベル2地震を含む11地点の鉛直アレー地震観測記録と液状化の有無の再現解析,レベル2地震動による液状化に関するシンポジウム論文集,pp.357-364,2003.
- 13) 上田稔,遠藤大輔,今枝靖博,恒川和久,永坂英明;N 値により初期速度構造を設定した場合の地盤地震応答解 析に基づき算定した震度の精度,第58回土木学会年次学 術講演会講演概要集, -356,pp.711-712,2003.

(2003.10.10受付)



地震観測記録による震度解析手法	震度 5 弱 以下	震度 5 強 以上	ŧ
SHAKE	5/6	1/5	
FDEL	5/6	2/5	
R-O	6/6	2/5	
MDM	6/6	5/5	

分子:地震観測記録による震度を再現できた地震波の数

分母:地震観測記録による震度の再現解析を行った地震波の数



図-5 地震観測記録による震度の再現状況