



2018.3.14, 第6号

## はじめに

<御挨拶>

数値シミュレーション手法による地盤の液状化は解析手法とコンピュータの急速な発展とともに発展してきました。特に、1995年の兵庫県南部地震以降基本的な解析ツールとして定着してきています。一方、2011年の東日本大震災では広域で液状化が発生し、非常に大きな被害をもたらし、2016年には熊本地震が発生し、堤防をはじめ液状化被害が出ています。今後、南海トラフ巨大地震や首都直下地震が想定されており、対策やその照査のため解析手法の重要性が高まっています。これまで開発してきた有効応力に基づいた液状化解析プログラム LIQCA (Computer Program for Liquefaction Analysis) について、公開のためのセミナーや講習会を開催し、その普及に努めてきました。LIQCA プログラムも 2次元から 3次元、地盤と構造物との相互作用、不飽和地盤などを対象とし発展してきており、今後有限変形解析なども計画されてきています。

実用化、実装化には、一層の努力が必要なのが現状です。設立 5 年目の今年もよろしくお願いいたします。

2018 年 3 月

一般社団法人 LIQCA 液状化地盤研究所 会長 岡 二三生

### LIQCA 液状化地盤研究所 住所連絡先

606-8226 京都市左京区田中飛鳥井町 138-1

防災研究協会第 3 研究室気付

電話 & FAX 075-585-4445

e-mail [office@liqca.org](mailto:office@liqca.org)

## LIQCA 液状化地盤研究所について

当社団法人は2013年7月に設立され今年で5年目に入ります。現在正会員が16名、賛助会員が3社、理事は6名、監事2名で構成されています。ほぼ月1回の研究会を行い、最新の情報を取り入れた解析プログラムの開発、より使いやすいプログラム作成、ユーザーのためのサポート事業を行っております。詳しくは<http://liqca.org> を御覧ください。

## 昨年度のセミナーと活動

平成29年度は、不飽和用 testsim、LIQCA 3D の3次元3角柱ジョイント要素、拡張構成式の破壊条件の一般化、地震後圧密の取り扱いに関する説明追加や資料の更新などを行い、平成29年12月1日に京都キャンパスプラザにおいてLIQCA 液状化プログラムセミナーを開催しました。資料は“LIQCA2D17・LIQCA3D17 (2017年公開版) 資料”です。資料は、これまでと同様2017年版のプログラムの説明書とマニュアルに分けて作成しました。2016年度プログラムの追加セミナーは平成29年5月12日に京都キャンパスプラザにて実施しました。個別追加セミナーは2社に対して実施した。また、平成29年10月13日に京都キャンパスプラザにて、技術講習会を実施し、実技を含めた説明を行いました。多数のご参加御礼申し上げます。

## 次回のセミナー開催について

昨年12月2日のLIQCA 液状化解析プログラムの追加セミナーは5月18日(金)に京都で開催予定です。

## ホームページについて

LIQCA 液状化地盤研究所のHOME PAGEでのLIQCA情報のページでセミナーでの追加資料、正誤表やプログラムの保守情報を掲載しています。ただし、閲覧にはパスワードが必要です。

(<http://liqca.org>)

## 関連国内国際会議・研究集会

1. 土木学会第73期全国大会；8月29-31日まで、北海道大学にて。詳しくは

<http://committees.jsce.or.jp/zenkoku/> を参照ください。

2. 第53回地盤工学会研究発表会は、7月26-29日まで、サンポートホール高松にて。

3. 7th AP-UNSAT が2018年名古屋国際会議場で開催されます。7th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils Nagoya, Japan, August 23-25.

(<https://www.jiban.or.jp/e/activities/>で詳細)

4. China-Europe Conference on Geotechnical Engineering, August 13-16, Vienna, Austria  
<https://china-euro-geo.com/>

5. 材料学会第67期通常総会・学術講演会,高知工科大学永国寺キャンパス

(〒780-8515 高知市永国寺町2番22号) URL :

<https://www.kochi-tech.ac.jp/>

6. 日本材料学会塑性工学部門委員会地盤力学分科会,地盤力学セミナー；平成30年3月5日

(月) 15:00~17:00 日本材料学会2階 中会議室〒606-8301 京都市左京区吉田泉殿町  
講師：岡 二三生(京都大学名誉教授) 内容：多相多孔質体の力学(Biotの係数)、締固め問題、会員は資料が閲覧できます。

## 編集後記

春めいてきましたが皆様ご健勝のこととお喜び申し上げます。ニューズレターNO.6号です。昨年は10月に豪雨災害、2月は豪雪と自然災害が多発しています。足立監事のコラムは液状化後の圧密解析に関するもので、有用な情報です。コラムを担当いただいた足立監事大変お忙しいところありがとうございました。今後も、研究所への皆様のご支援をお願いします。

**動的解析から圧密解析に移行する際の特異な応答とその対処**

一般社団法人 LIQCA 液状化地盤研究所監事

株式会社安藤・間

足立有史

1. 背景

LIQCAによる液状化解析は、地震中の挙動に加え、地震後の過剰間隙水圧消散に伴う変形量の評価もその目的のひとつである。地震後の計算では、慣性力や減衰を考慮しない圧密解析が実施されている。これまでの解析事例において動的解析から圧密解析に移行する際に速度、変位や過剰間隙水圧などの応答値が瞬間的に増減する特異な現象が確認されている(図1参照)。このような現象が生じるとその後の過剰間隙水圧の消散や変形量に影響を与える可能性が懸念される。

LIQCA2D17・LIQCA3D17(2017年公開版)資料マニュアル第Ⅱ編4.4では、上述の特異な応答の発生状況とその対処について、一部事例を示し紹介した。本資料は、これら検討内容をより詳細に示したものである。

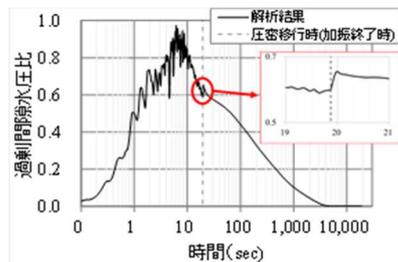
2. 解析モデル

圧密移行時の特異な応答の発生要因を調べる目的で図2に示す盛土モデルを対象に検討を実施した。本モデルは、LIQCAマニュアル4.2.2章図-II-4.11解析モデルと同様であり、モデルパラメータも同様の値を使用した。境界条件は、水平固定—鉛直自由を標準とした。検討に使用した入力加速度波形を表1に示す。

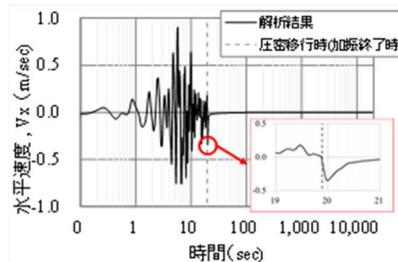
3. 検討項目

圧密移行時の特異な応答に関して下記の3項目に着目して検討を行った。

- ① 入力地震動の0gal付加の効果
- ② 境界条件の影響
- ③ メッシュ分割の影響



(a)液状化層の過剰間隙水圧比



(b)盛土の水平加速度

図1 圧密解析移行時の特異応答の例

4. 解析結果

(1) 0gal 付加の影響

動的解析に使用する入力加速度データの後続に0gal加震を付加することで、特異な応答がどのように変化するかを確認した。表2に平成7年兵庫県南部沖地震波形を例に0gal付加時間の解析ケース(0~300秒)を示す。他の2波形についても同様に0gal付加時間を変化させた解析を実施した。

表3に平成7年兵庫県南部沖地震波形における盛土天端の水平速度Vxおよび鉛直変位Dyの応答値を示す。0galを付加しない場合は、圧密に移行した際に水平速度Vxが急激に増加し、また、鉛直変位が急激に減少する現象が生じている。これに対して0gal付加時間を追加したケースはこれらの特異な現象が解消される傾向を示し、その時間が長くなるほどその傾向は顕著であった。このことから圧密移行時の振動を十分に低減させることが重要であると考えられる。これらの応答は、十勝沖地震波においてもほぼ同様であったが、一方で東北地方太平洋沖地震波では、0galの追加の有無によらず特異な挙動は生じなかった。

図3に圧密移行時に生じる水平速度の特異な振幅値の比較を示す。水平速度の特異な応答を解消するために必要な0gal付加時間は、兵庫県南部地震では300秒、十勝沖地震では200秒、東北地方太平洋沖では0秒となり、入力地震動により異なる結果を示した。

動的解析では加速度項があり、ダルシー則ではないが、圧密解析では加速度項はないため、図4に圧密移行時の過剰間隙水圧の分布から液状化層の間隙水のレイノルズ数を算定した結果を示す。ここで、地盤中の透水に関するダルシーの法則が成立する条件として層流状態である必要がある。地盤中の流れにおけるレイノルズ数Reは次式より算定され、一般に $Re \leq 10$ の関係が成立するときに層流域であると言われている<sup>2,3)</sup>。

$$Re = (\rho_w v D) / \mu \quad (1)$$

ここに、vは流速(cm/s)、Dは平均粒径(D50またはD60)(cm)、μは水の粘性係数(g/scm)である。図4より0galを付加して特異な応答を低減することでレイノルズ数も同様に低減する傾向を示した。レイノルズ数は $Re \leq 10$ となる0gal付加時間は、兵庫県南部地震では100秒、十勝沖地震では50秒、東北地方太平洋沖では0秒であった。これは図3に示した水平速度の特異な応答を解消するために必要な0gal付加時間と同程度以下であることから、圧密移行時点での透水現象がダルシーの法則を満足していると判断できる。

(2) 境界条件の影響

次にモデルの側方境界の影響について検討を行った。図2の側方固定境界モデルに対して、図5に示すように側方に幅広要素(3025m)を付加し半無限地盤を表現したモデルを比較した。

表4に解析ケースを示す。0gal付加時間を0秒~200秒の範囲で変化させ比較検討を行った。解析結果(水平速度(Vx)、鉛直変位(Dy))を表-5に示す。両モデルとも、加振終了時に0galを付加することで特異な応答が解消傾向にあることを確認した。ただし、側方固定境界モデルに比べ幅広要素モデルの方が特異な応答の振幅が大きく、解消のための0gal付加時間も長くなる傾向を示した。

(3) メッシュ分割の影響

さらに解析モデルのメッシュ分割の影響について検討を行った。図2の現状のモデルに対して、要素幅を1/2に細分化したモデル(図6)と要素高さを1/2に細分化したモデル(図7)を比較した。入力加速度波形として平成7年兵庫南部沖地震波(道路橋示方書Ⅱ-I-1)を用いた。表6に解析ケースを示す。要素幅1/2モデルについては0gal付加時間を0秒~200秒の範囲で変化させた比較検討も行った。

【要素幅の影響】

表7にの解析結果(水平速度(Vx), 鉛直変位(Dy))を示す。細分化したモデルにおいても、圧密移行時の特異な応答が確認された。また、現状モデルと同様200secの0galを付加することで解消されることが確認された。

【要素高さの影響】

表8に現状モデルと要素幅1/2モデルにおける水平速度(Vx), 鉛直変位(Dy)の比較図を示す。両モデルとも圧密移行時の特異な応答が確認できるが、特に水平変位Dxにおいては、要素幅1/2モデルの方が顕著に生じていることがわかる。

図8に圧密移行時に発生する水平速度の特異なパルス状の振幅値の比較を示す。現状のモデルに比べ要素高さ1/2モデルでは減少傾向を示したが、要素幅1/2モデルでは増加傾向を示した。また、現状モデルと同様に0gal付加時間の増加に伴い特異な応答は解消する傾向を示した。

5. おわりに

動的解析から圧密解析に移行する際に生じる特異な応答について検討を行った。その結果、以下のことを確認した。

- ・特異な応答は振動が十分に収束しない状態で圧密解析に移行する場合に生じやすい。
- ・入力加速度データの後続に一定時間の0galを付加することで解消できる。
- ・0gal付加時間は、入力地震動により異なるが、本検討では最大で300

秒であった(兵庫県南部地震波)。

- ・側方固定境界の場合に比べて幅広要素を用いた疑似自由地盤の場合の方が特異な応答の振幅が大きく、解消のための0gal付加時間も長くなる傾向を示した。
- ・現状モデルに対して要素幅を1/2に細分化した場合、特異な応答の振幅が増加傾向を示し、一方、要素高さを1/2に細分化した場合は、減少傾向を示した。

以上、本検討結果がLIQCAを用いた研究・解析業務の一助となれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 一般社団法人 LIQCA 液状化地盤研究所: LIQCA2D17・LIQCA3D 17(2017年公開版)資料マニュアル, 2017.
- 2) Groundwater hydraulics, Sato,K. & Y.Iwasa eds., Springer, P.21, 2003.
- 3) 森口周二, 沢田和秀, 八嶋厚, 花北誠: 地盤材料の直接的モデル化に基づく透水シミュレーション, 第22回 中部地盤工学シンポジウム論文集, 2010.

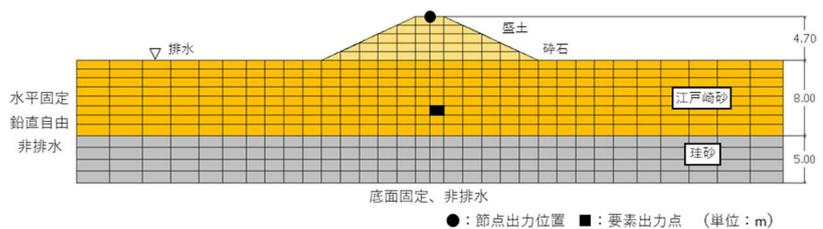


図2 解析モデル

表1 入力加速度波形

入力地震動	入力波形
①平成7年兵庫県南部地震 (道路橋示方書Ⅱ-I-1) 【19.87秒、振幅0.3倍】	
②平成15年十勝沖地震清水道路出張所 (道路橋示方書Ⅰ-I-1) 【99.9秒、振幅0.3倍】	
③平成23年東北地方太平洋沖地震 (道路橋示方書Ⅰ-I-2) 【240.0秒、振幅0.3倍】	

表 2 0gal 付加の解析ケース一覧

入力波	0gal 付加時間	入力波形 (圧密解析前)
平成7年兵庫県南部地震 【19.87秒】	0秒	
	50秒	
	100秒	
	200秒	
	300秒	

表-3 解析結果【0gal 付加時間の効果】 (兵庫県南部地震、盛土天端速度  $V_x$ , 変位  $D_y$ )

0gal 付加時間	水平速度 ( $V_x$ )	鉛直変位 ( $D_y$ )
0秒		

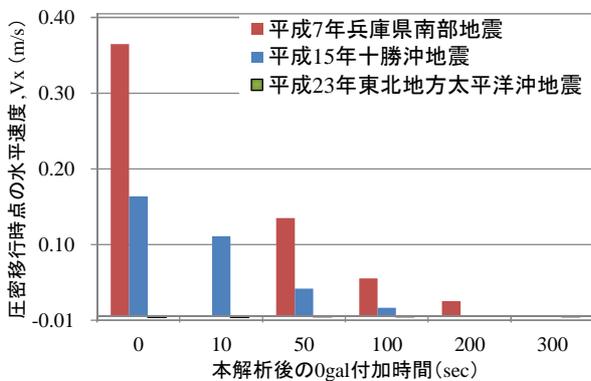
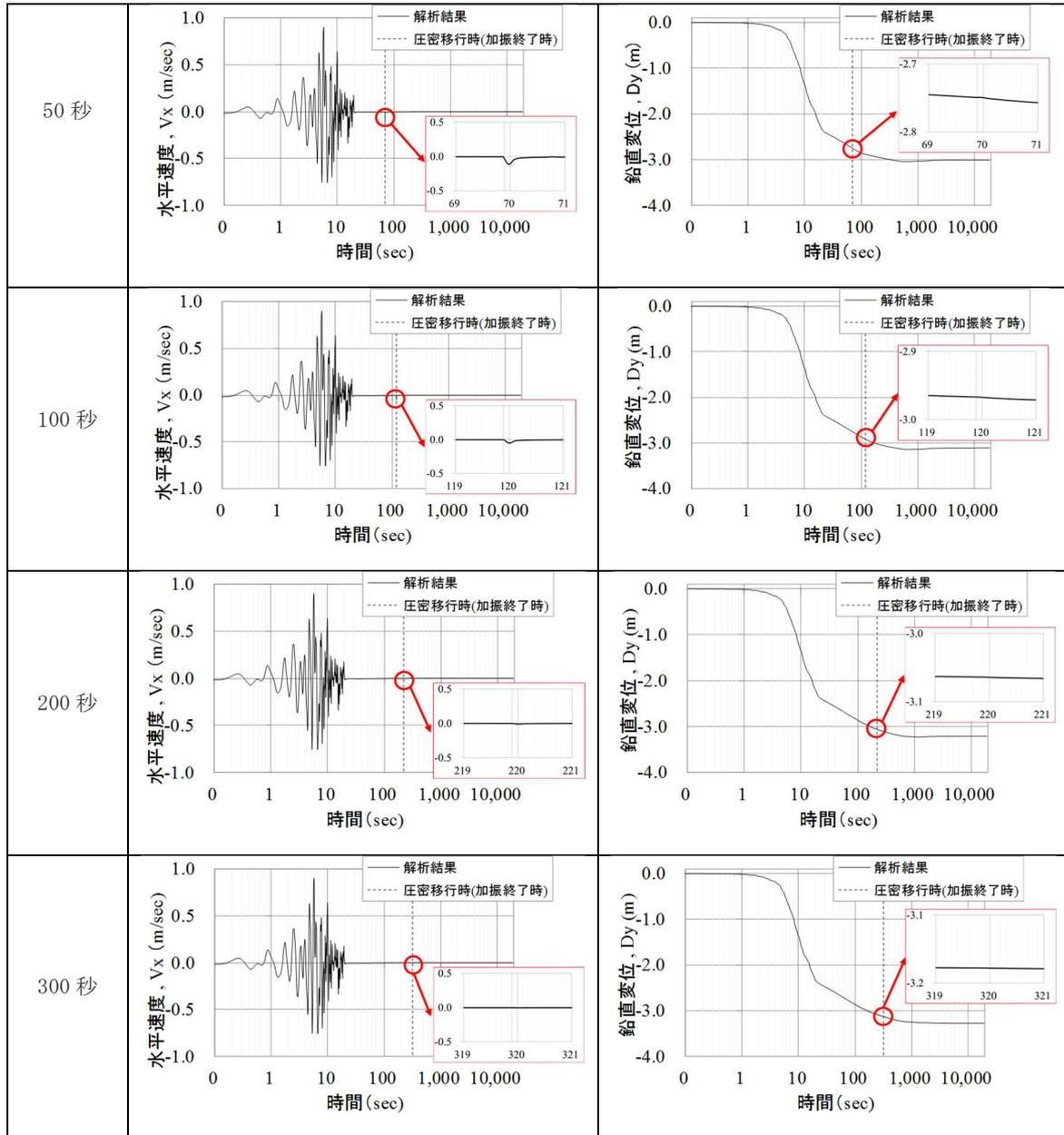


図3 0gal 付加時間と x 方向速度の関係

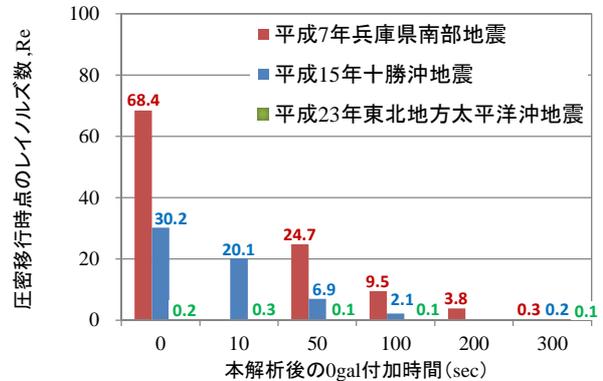


図4 0gal 付加時間とレイノルズ数の関係

\* 平成7年兵庫県南部地震を対象とした0gal 付加時間10secの解析は未実施。

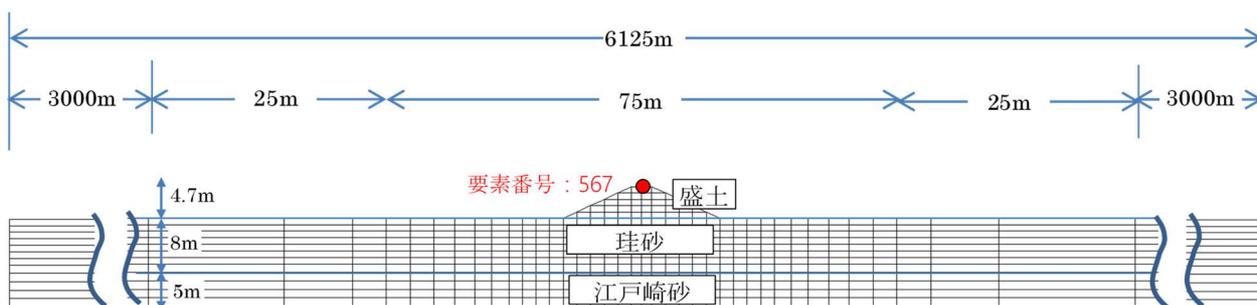
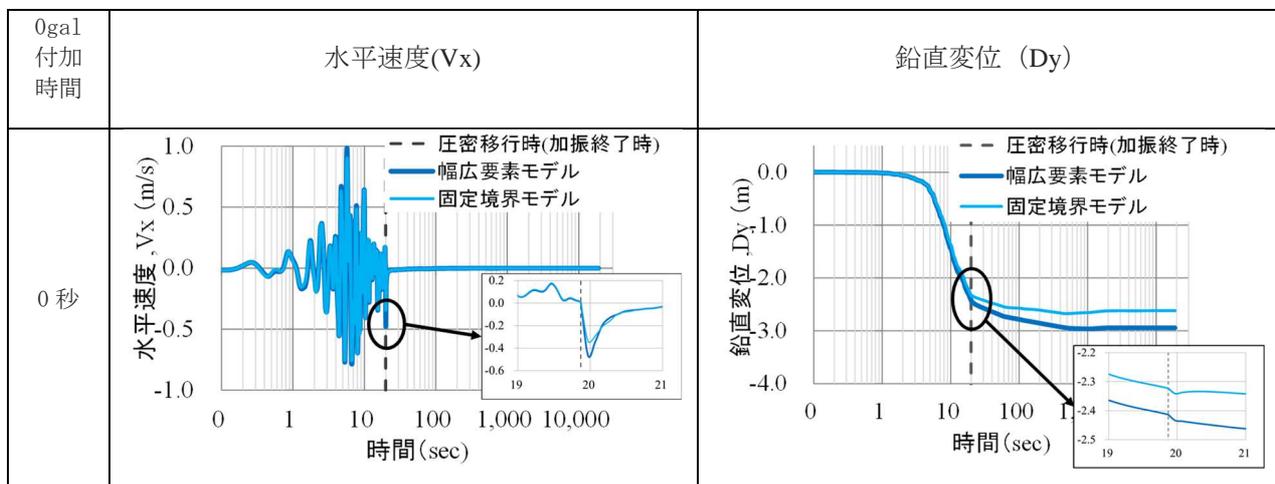


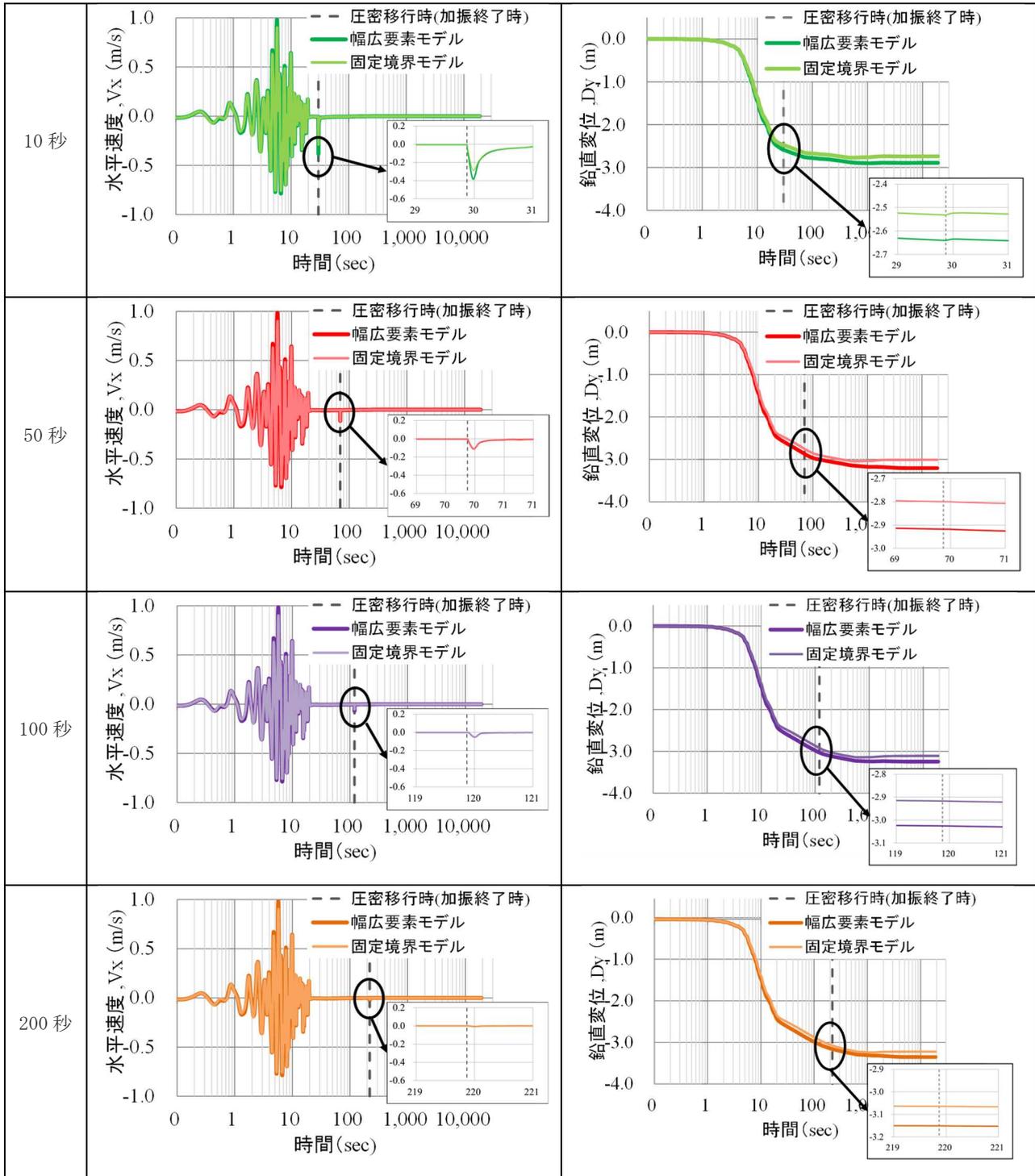
図5 幅広要素を用いた場合の解析モデル

表4 解析ケース一覧（側方境界の影響）

入力波	解析モデル	0gal 付加時間 (秒)
平成7年兵庫県南部地震 (道路橋示方書II-I-1) 【19.87秒】	固定境界 (図2)	0
		10
		50
		100
		200
	幅広要素 (図5)	0
		10
		50
		100
		200

表5 解析結果【側方境界の影響】（兵庫県南部地震、盛土天端速度  $V_x$ 、変位  $D_y$ ）





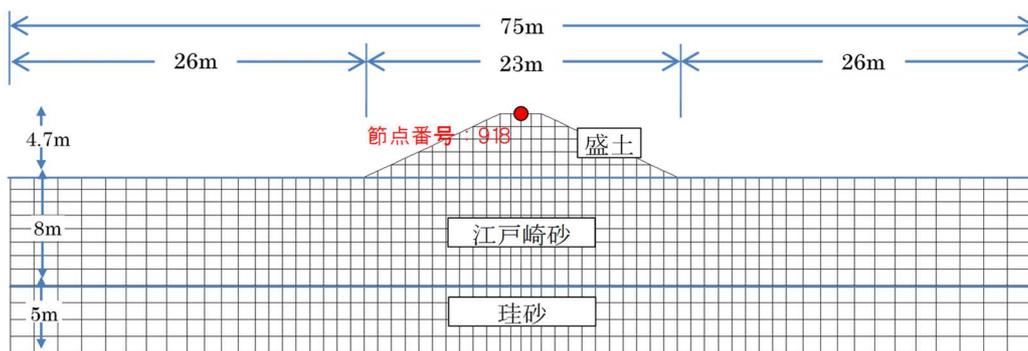


図-6 要素幅細分化モデル (要素幅 1/2 モデル)

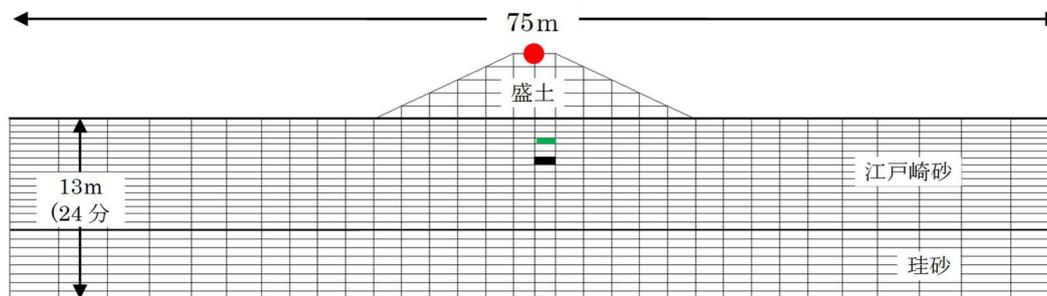
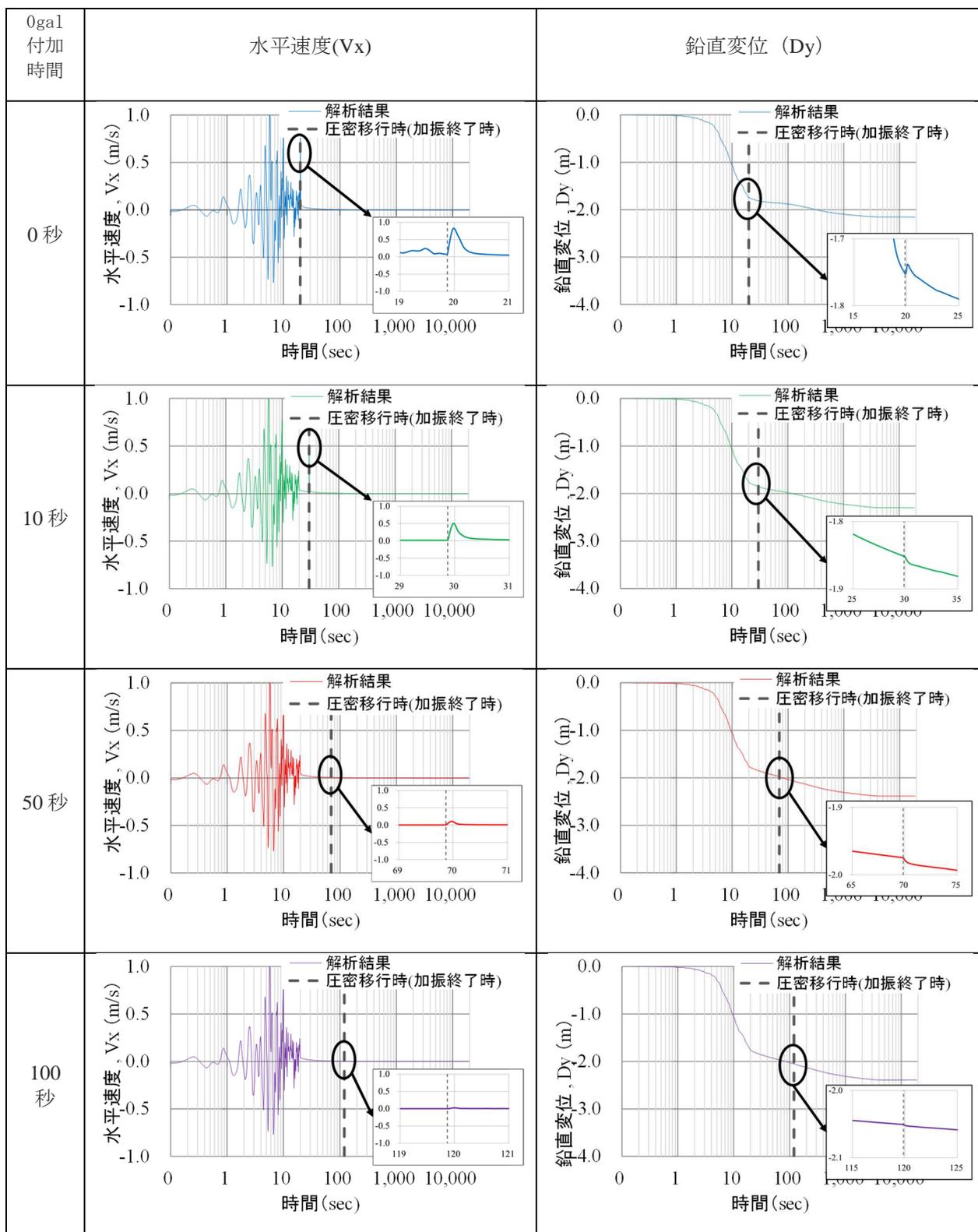


図 7 要素高さ細分化モデル (要素高さ 1/2 モデル)

表 6 解析ケース一覧 (要素幅細分化)

入力波	解析モデル	0gal 付加時間 (秒)
平成7年度兵庫県南部地震 (道路橋示方書Ⅱ-I-1)	要素幅 1/2 (図 6)	0
		10
		50
		100
		200
	要素高さ 1/2 (図 7)	0

表7 解析結果【要素幅 1/2】（兵庫県南部地震、盛土天端速度  $V_x$ , 変位  $D_y$ ）



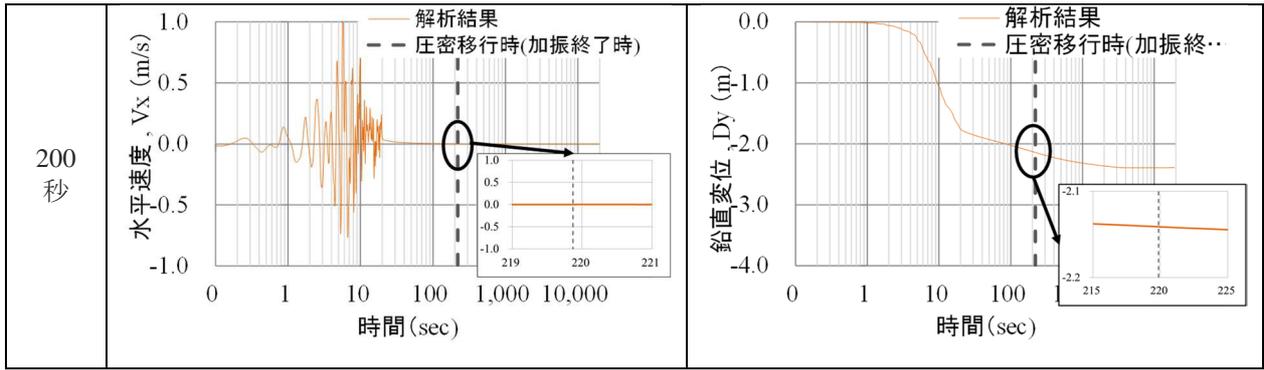


表-8 解析結果 (要素高さ 1/2)

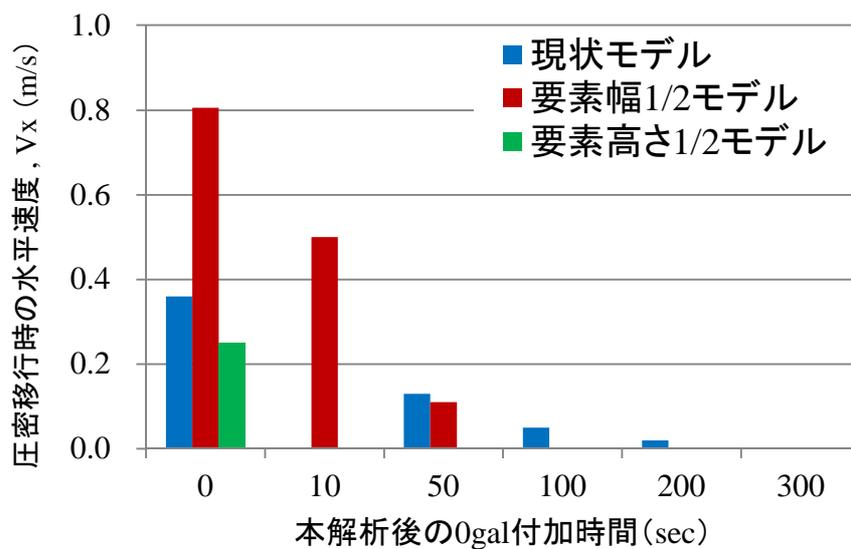
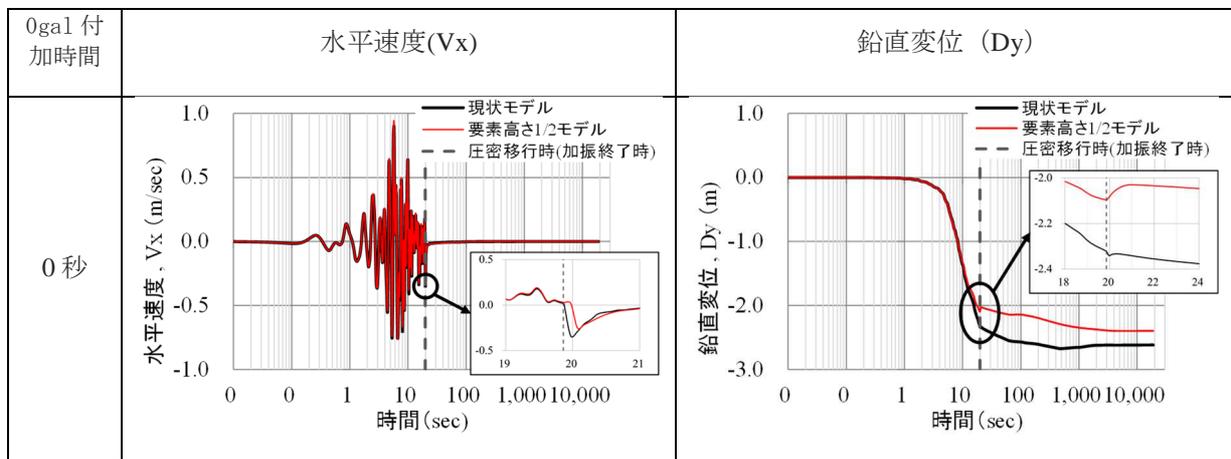


図8 メッシュ分割の違いによる特異値の比較結果 (速度  $V_x$ )