

構造物の地震応答値評価のための 地盤モデル簡易構築手法の検討

仲秋秀祐¹・坂井公俊¹・室野剛隆²・桐生郷史³・野上雄太³

¹正会員 工修（公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 工博（公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

³正会員 工博 ジェイアール東日本コンサルタンツ(株) 技術本部（〒171-0021 東京都豊島区西池袋1-11-1）

1. はじめに

地震時の構造物の応答は、地盤の挙動に大きく影響を受けるため、対象とした構造物地点の地盤の地震時挙動を適切に評価することが重要である^{例え1)}。一般に既存の地盤情報は離散的にしか存在していないことがほとんどであり、鉄道構造物のような線状に長く続く施設の地震時応答を評価する場合には、それらの地盤情報を、何らかの手法を用いて補間する作業が必要となる。その方法として一般には、各層の堆積年代等を考慮して、地質学的な観点から補間されることが多い。

しかしながら、一路線全体もしくは日本全国の全路線といった広範囲の施設を対象とした地震リスク評価等を行う場合には、解析対象構造の数は膨大であり、各地点において個別に地盤構造を推定することは困難である。また、一次スクリーニングのような全線を俯瞰した地震応答評価を行う場合には、各地点毎の個別の詳細な地盤挙動の評価ではなく、大まかな挙動の差異を評価できれば十分であると考えられる。この時、技術者の判断を必要としない簡便さを有し、かつ可能な限り精度のよい地盤構造推定手法が求められる。離散的に与えられた地震動波形や最大値情報を用いて地震動分布を補間しようとする検討は過去に多数実施されている^{例え2)～5)}が、この手法を用いる場合には離散的な地震動情報が既知情報として必要になる。さらにこの方法では不整形性地盤のような局所的に地震動が大きくなる効果を表現することは出来ない。また、離散的なボーリング柱状図に対して、各種補間手法を用いた地盤の2、3次元モデル構築についての検討は行われている^{例え6),7)}ものの、これが地震時地盤挙動に与える影響に

ついてはほとんど確認されていない。

そこで本研究では、広域構造物の地震被害を簡易かつ高精度に推定するための最適な地盤情報補間手法を構築することを目的とした基礎的な検討を行う。具体的にはまず、1次元の地盤応答解析を念頭に置いた場合の補間手法を複数実施することで、簡易かつ精度の高い手法を選定する。続いて局所的な地震増幅が想定されるような不整形地盤を対象に、2次元解析における補間手法の違いや、解析次元の違いが構造物の応答に及ぼす影響を把握することで、最適な地盤補間手法および解析次元について検討する。

2. 地盤を1次元にモデル化する場合の補間手法の検討

(1) 検討方法

まず地盤を1次元にモデル化する場合の補間手法について検討を行う。地盤の表現方法としては、地盤条件の基準となる「正解値」、距離による重み付けにより地層境界を補間する「逆距離荷重法（IDW法）⁸⁾」、対象地点から最も近いボーリング情報の地層境界をそのまま用いて補間した「最近値」の3ケースを設定した。この3ケースについて、それぞれ1次元の地盤応答解析を実施することで地表面位置での応答波形を評価する。続いて得られた地表面波形を用いて、構造物の応答を算定し、正解値と各補間手法の結果を比較することで、これら補間手法の違いが構造物の挙動に及ぼす影響を整理する。

(2) 検討条件

a) 地盤モデルの設定

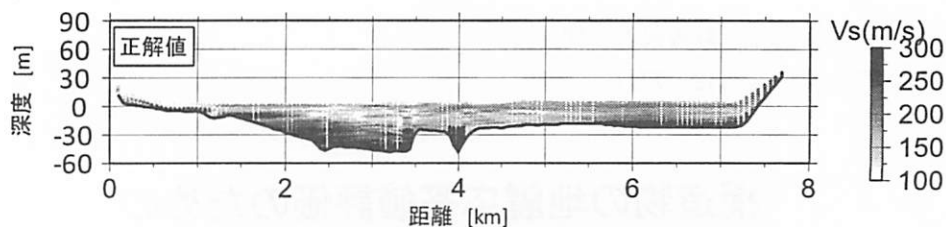


図-1 基準とした地盤モデル (正解値)

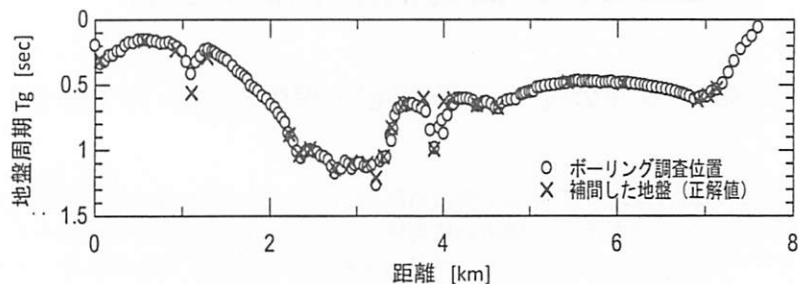
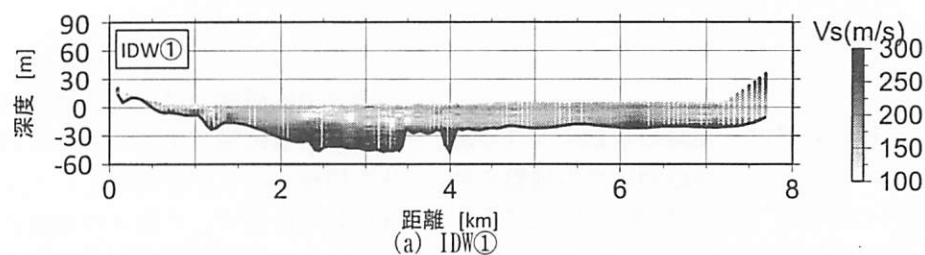
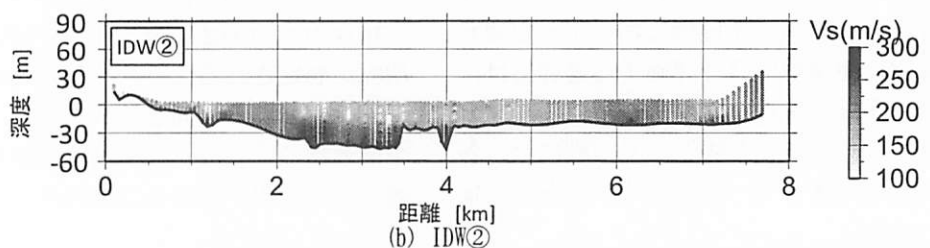


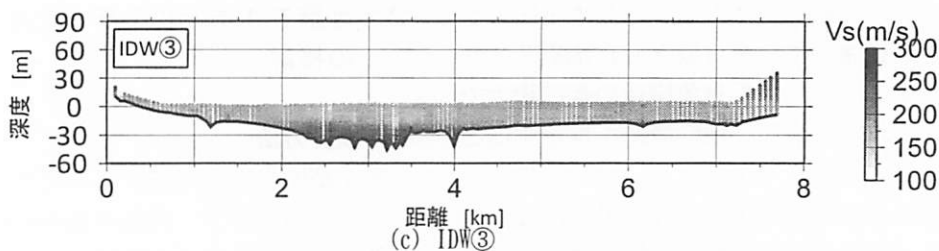
図-2 表層地盤の固有周期分布



(a) IDW①



(b) IDW②



(c) IDW③

図-3 IDW法により補間した地盤モデル

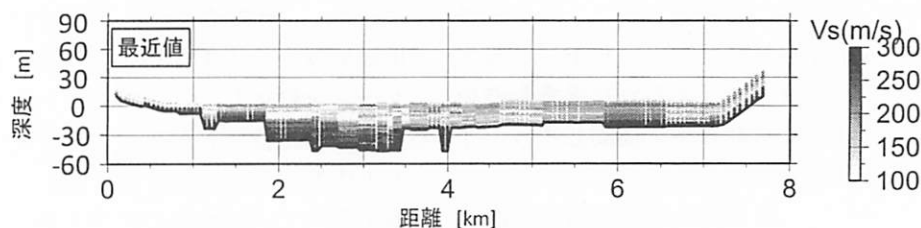


図-4 最近法により補間した地盤モデル

対象とした地点は、延長約8kmの直線状に延びる鉄道路線である。この地点においてボーリング調査は約200m間隔で合計48地点実施されている。また、この区間に高架橋174ブロックが建設されている。

まずはこの48地点のボーリング結果を用いて、地形情報なども合わせて地質学的な観点から総合的に判断して地層境界を設定した。正解値として設定した地盤条件を図-1に示す。図-2は、ボーリング調査

表-1 解析ケース

補間法	入力地震動	最大加速度振幅	構造物の 降伏震度	構造物の等価 固有周期	IDW法のパラメータ				
					n	k			
正解値	兵庫県 南部地震	100gal 300gal Original	0.4	0.4 0.7 1.0	—	—			
最近値					—	—			
IDW①	釧路沖地震				2	0.001			
IDW②					2	0.1			
IDW③					1	0.001			

位置の地盤および補間した地盤の各構造物位置での固有周期の分布を示している。これらの図より、正解値として設定した地盤の層構成、固有周期の分布は連続的に変化していることが分かる。

続いて今回用いた地盤の簡易補間手法について説明する。IDW法は式(1)に示すように、ボーリング調査地点までの距離による重み付けにより地層境界値を補間する手法である。なお、ボーリング情報は、水平方向と鉛直方向では調査間隔が大きく異なるため、式(1)を用いて距離算定時に水平方向と鉛直方向に重みを考えることとした。補間に必要なパラメータ n, k については、合計3ケース（IDW①： $n=2$ ， $k=0.001$ ，IDW②： $n=2$ ， $k=0.1$ ，IDW③： $n=1$ ， $k=0.001$ ）を実施した。IDW法を用いて設定した地盤モデルを図-3に示す。

$$Z(x) = \frac{\sum w_i z_i}{\sum w_i}, \quad w_i = \frac{1}{R_i^n} \quad (1)$$

$$R_i = \left((x_i - x_j)^2 + k(y_i - y_j)^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 $Z(x)$ ：位置 x における推定値、 z_i ：地点 i における観測記録、 w_i ：地点 i における重み関数、 R_i ：地点 i と位置 x の距離、 n ：乗数である。

続いてこれらの数式を用いた地盤補間手法を用いずに、対象地点に最も近いボーリング調査の結果を準用するという手法も、実務設計などでは用いられることが多い。この手法（以降では最近法と呼ぶ）はパラメータ等が不要であるために扱いが非常に容易であり、かつ地盤構造の推定手法としては最も簡便な方法である。最近法として設定した地盤モデルを図-4に示す。

2つの補間手法により設定した地盤モデルを比較すると、IDW法によるモデルは、設定するパラメータにもよるが、地層構成が正解値と大きな相違はないように見える。さらに地層構成が水平方向に連続的に変化しているのに対して、最近法では、使用するボーリングデータが変化する地点で地層構成が水平方向に不連続となっていることが確認できる。

b) 解析手法・解析モデル

地盤の解析手法は、1次元逐次非線形解析とし、

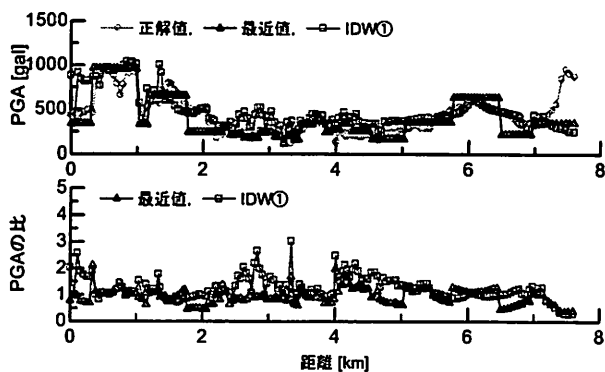
非線形構成則は、GHE-Sモデル⁹⁾を用いる。土の動的変形特性は、多数の三軸試験結果に基づいた標準パラメータ⁹⁾を用いた。また解析に必要な基準ひずみ $\gamma_{0.5}$ も、既往の試験結果をもとに提案されている値¹⁰⁾を用いた。減衰は、地盤、速度毎に提案されている周波数依存のQ値¹¹⁾を参考として、これにフィッティングするようなレイリー減衰を用いた。これらはいずれも鉄道構造物の地盤応答解析手法として利用頻度の高い手法である。なお、応答値を算定する構造物は、鉄道構造物（ラーメン高架橋）を想定し、簡易な1質点系モデルでモデル化を行った。

c) 解析ケース

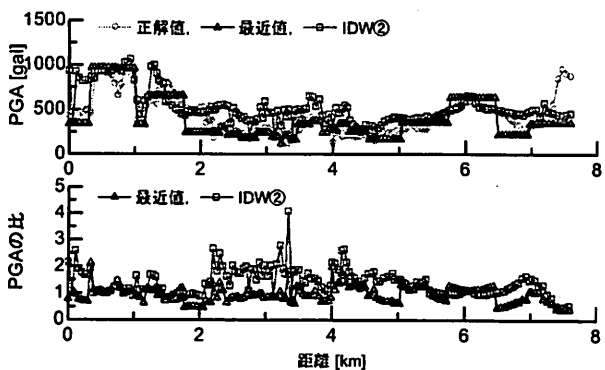
構造物の降伏震度 K_{by} は0.4、等価固有周期 T_{eq} は0.4、0.7、1.0(sec)の3ケースとし、入力地震動は、兵庫県南部地震におけるJMA神戸観測記録、釧路沖地震におけるJMA釧路観測記録を用いることとし、最大加速度振幅を100gal、300gal、オリジナルの3段階に変化させた場合について、それぞれ工学的基盤位置に入力した。表-1に今回検討を行った全解析ケースを示す。

(3) 検討結果

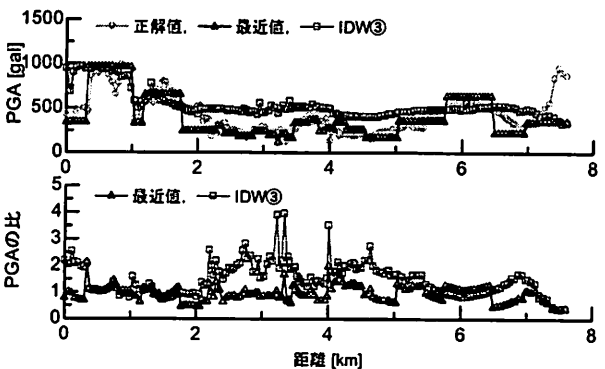
構造物の応答を比較する前に、まず地表面の地盤応答について整理した。図-5における各図の上段は、JMA神戸観測記録を入力地震動とした場合の正解値、最近値およびIDWのケースにおける各地点の最大応答加速度PGAを示し、下段は、各補間手法によるPGAを正解値のPGAで除した値を示している。IDW①～③のケースの応答値を比較すると、IDW①のケースが最も精度が良いことを確認できる。つまり今回の地点においてIDW法を使用する場合には、パラメータを $n=2$ ， $k=0.001$ に設定することが適切であると言える。また同図(a)の最近値とIDW①の結果を比較すると、各地点において両手法とも若干の誤差が生じているものの、その誤差の程度は概ね同等と言える。また、各補間手法の特徴として、IDW法では応答値が連続的に変化するのに対して、最近法では設定した地盤モデルと同様に応答値も不連続となることが確認された。



(a) 正解値, 最近値, IDW①の比較



(b) 正解値, 最近値, IDW②の比較



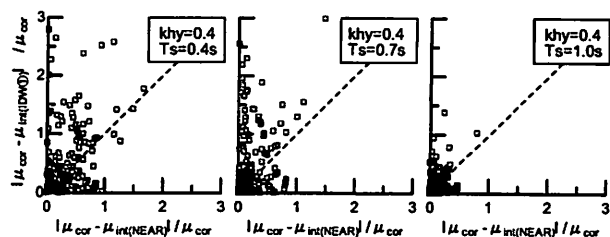
(c) 正解値, 最近値, IDW③の比較

図-5 各地点の最大応答加速度分布

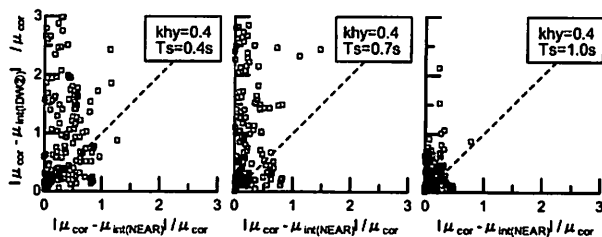
続いて構造物の応答に着目した比較を行う。各結果の比較は、構造物の応答塑性率 $\mu (= \delta_{\max} / \delta_y)$ を対象として整理した。図-6 は、兵庫県南部地震および釧路沖地震の各地震動（加速度調整なし）を入力地震動としたケースにおける各地点の構造物の応答塑性率 μ について、正解値と補間値の差を正解値で基準化する式(3)を用いて比較した結果を示している。

$$\frac{|\mu_{\text{cor}} - \mu_{\text{int}}|}{\mu_{\text{cor}}} \quad (3)$$

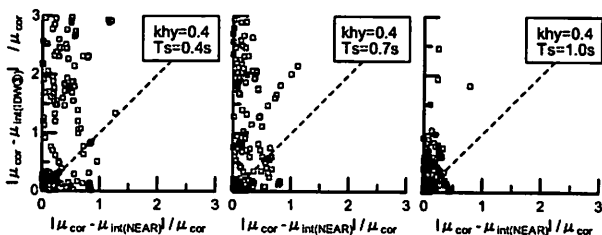
ここに、 μ_{cor} ：正解値における構造物の応答塑性率、 $\mu_{\text{int(NEAR)}}$ ：最近値における構造物の応答塑性率、 $\mu_{\text{int(IDW)}}$ ：IDW 法における構造物の応答塑性率を示す。構造物の周期によって補間手法の精度は若干異なるものの、全体的には最近値と IDW 法の補間精度に



(a) 最近値, IDW①の比較



(b) 最近値, IDW②の比較



(c) 最近値, IDW③の比較

図-6 $|\mu_{\text{cor}} - \mu_{\text{int}}| / \mu_{\text{cor}}$

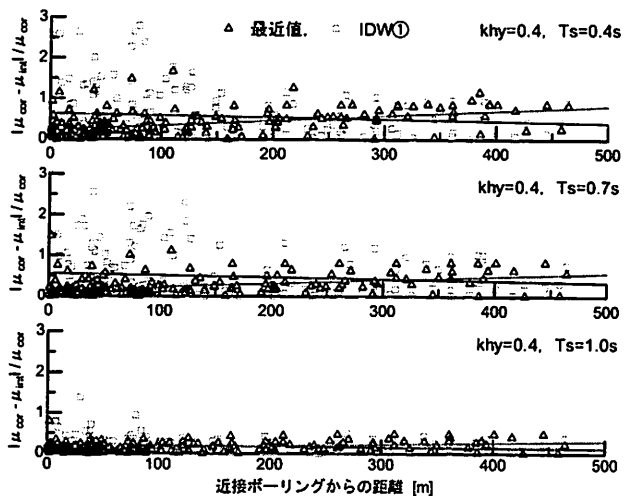


図-7 近傍ボーリング距離と基準化した $|\mu_{\text{cor}} - \mu_{\text{int}}| / \mu_{\text{cor}}$

大差がないと言える。また、正解値との誤差としては、差分絶対値/ μ が概ね 2 以下に集中していることから、いずれの補間法も倍半分程度の精度で推定できるものと考えられる。また、本報では省略した地震動の入力レベルを変化させた結果についても、同様の傾向が見られた。

続いて地盤調査間隔による最適な補間法の変化について考察するために、地盤を補間する間隔と、構造物応答の予測誤差の関係について比較を行った。

その結果を図-7に示す。図-7の横軸はボーリング調査位置と着目した地盤位置の離隔、縦軸は応答塑性率の差分絶対値を示す。着目した地盤位置が、ボーリング調査位置から近いほど最近法による手法は精度がよく、距離が遠いほどIDW法の精度がよい傾向にある。また、全体的にIDW法は、最近法と比較し、ばらつきが大きいことが確認できる。

以上より、地盤を1次元にモデル化する場合には、適切なパラメータを設定したIDW法と最近法による構造物応答の推定精度にはそれほど差が見られないことが分かった。ここで、IDW法を用いる際のパラメータは、今回はIDW①によるものが適切であったが、実際には地点の堆積状況によって変化すると考えられ、それぞれの地域ごとに最適な値が変化するものと考えられる。そのため、簡易かつある程度の精度で構造物の応答を予測することを目的とした場合には、パラメータ設定の任意性のない最近法による地盤の補間の方が適切な手法であると考えられる。

ただし、不整形地盤等の特殊な地盤条件を有する場合、1次元解析ではその地盤特性が及ぼす影響を評価することが出来ないため、2次元解析が必要となる可能性がある。解析次元の違いが及ぼす影響については次節に記載する。

3. 地盤を2次元にモデル化の際の補間手法の検討

(1) 検討概要・方法

1次元解析と同様に、地盤条件として基準となる「正解値」と対象地点から最も近いボーリング情報の地層境界をそのまま用いて補間した「最近値」を設定した。なお、基準となる地盤は、不整形を有する地盤を対象とし、解析モデルや補間手法の違いが、構造物の挙動に及ぼす影響を整理した。また、1次元解析も合わせて行い、応答値を比較することで、最適な解析次元についても検討を行った。

(2) 検討条件

a) 地盤条件の設定

解析に用いた地盤モデルを図-8に示す。(a) 正解値A-2Dは、約200m区間に2箇所(図中の▽)のボーリング結果を有する地盤を地形情報なども合わせて地質学的な観点から総合的に判断して地層境界を設定したものであり、本検討ではこれを正解値とした。また、今回の対象地点においては、2箇所のみボーリングデータが得られており、その間の地盤構造としては、正解値としてもこれとは異なる構造となっ

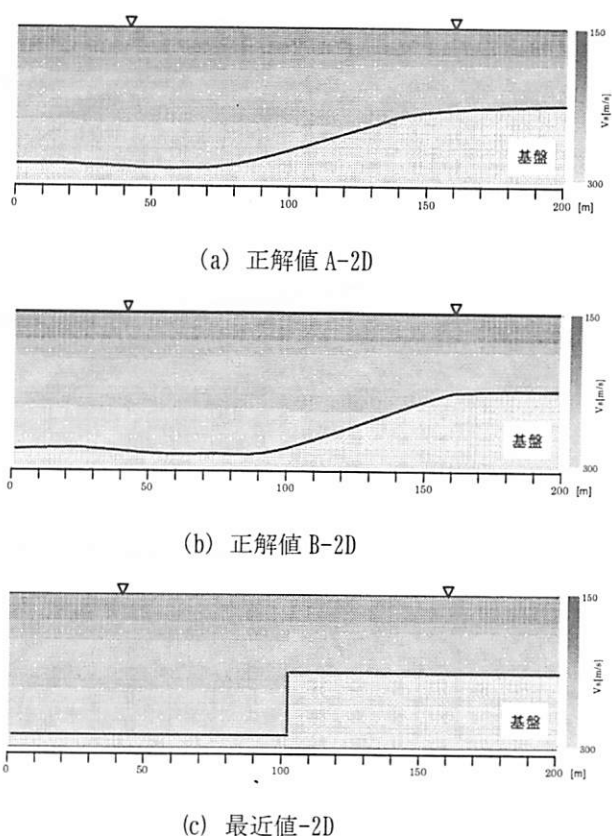


図-8 地盤モデル

ている可能性もある。そこで、不整形の形状の不確実性を考慮するため、傾斜位置は(a)と同様で、基盤面の傾斜を2倍程度に急勾配とした地盤(b) 正解値B-2Dも合わせて正解値として設定した。(c) 最近値-2Dは、(a)を基準に対象地点から最も近いボーリングの地層境界がボーリング地点の中間まで連続しているとして補間したものであり、本検討ではこれを最近値とした。この方法は、前章で検討を行った最近値の考え方を2次元モデルに拡張したものといえる。

地盤の応答解析は、図-8に示した地盤モデルに対して2次元解析(以下、正解値2D、最近値2Dと呼ぶ)、および正解値の1次元解析(以下、正解値1Dと呼ぶ)を行う。最近値2Dと正解値1Dのどちらが正解値2Dの結果をより再現できているかを評価することで、地盤モデル化の方針として、詳細な1次元モデルを構築する方法がよいか、簡易に補間した2次元モデルを構築する方法がよいか、または不整形を有する可能性がある地盤においては、それらを考慮して2次元で詳細にモデル化する必要があるのかを確認する。なお、正解値1Dは、図-8の各地盤モデルに対して約1.0m間隔で詳細な層構成を評価して行った。

表-2 解析ケース

CASE	比較地層モデル			入力地震動
CASE①	正解値A-2D	正解値A-1D	最近値-2D	兵庫県南部地震
CASE②	正解値B-2D	正解値B-1D	最近値-2D	

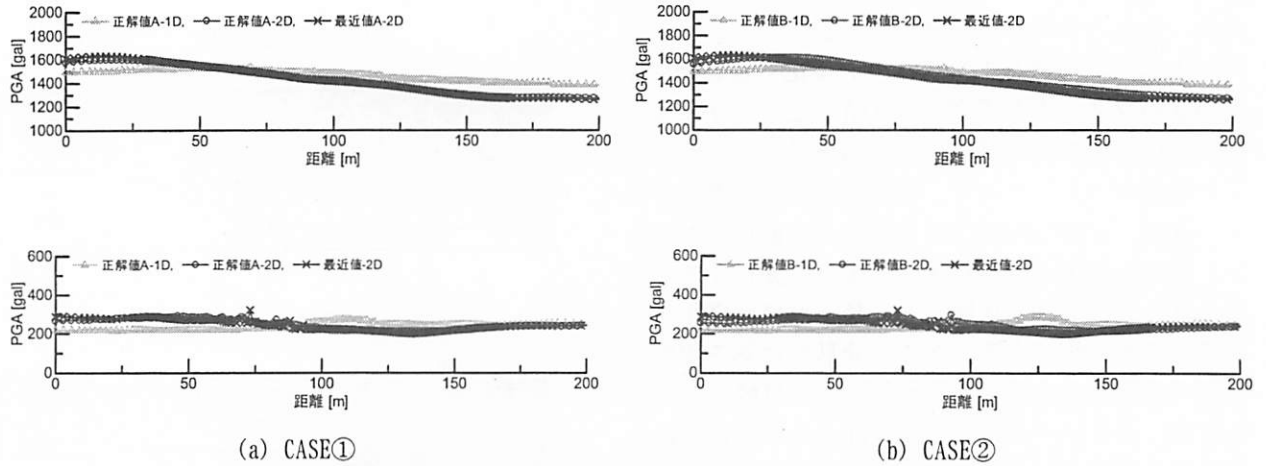


図-9 地表面最大応答加速度 (上段：線形，下段：非線形)

b) 解析手法・解析モデル

地盤の解析手法は、逐次非線形解析とし、1次元解析と同様に地盤の非線形構成則、動的変形特性および減衰を設定した。また、地盤の不整形の影響のみを明確に把握するため、合わせて線形解析も行った。応答値を算定する構造物も1次元の解析同様に、鉄道構造物(ラーメン高架橋)を想定した。

c) 解析ケース

入力地震動は、兵庫県南部地震におけるJMA神戸観測記録を対象に、工学的基盤相当に入力した。また構造物の応答は、地表面位置の応答波形を用いた弾性加速度応答スペクトルによって比較を行うこととした。表-2に解析ケースを示す。

(3) 検討結果

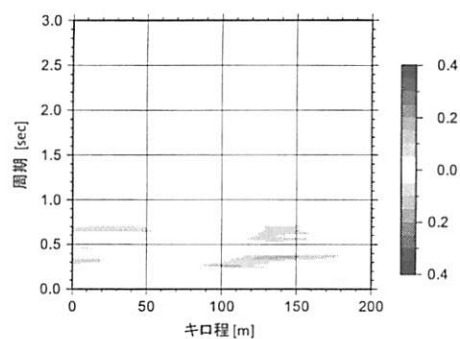
1次元解析と同様、構造物の応答を比較する前に、まず地表面の地盤応答について比較した。図-9に各地点の地表面最大応答加速度を比較した結果を示す。表層地盤の厚い領域(図の左側)では正解値1Dが正解値2Dを下回り、表層地盤の薄い領域(図の右側)では正解値1Dが正解値2Dを上回っている。この結果は、片側傾斜の不整形部で形成された水平方向伝播波の影響であると考えられ、既往の研究¹²⁾と同様の傾向にある。また、正解値2Dと最近値2Dは非常に近い値を示していることが分かる。

続いて構造物の応答に対する比較を行う。図-10、図-11は、CASE①およびCASE②地盤モデルにおける各地点での地表面応答波形の加速度応答スペクトル(h=0.05)を算定し、正解値2Dとの差異を評価した結

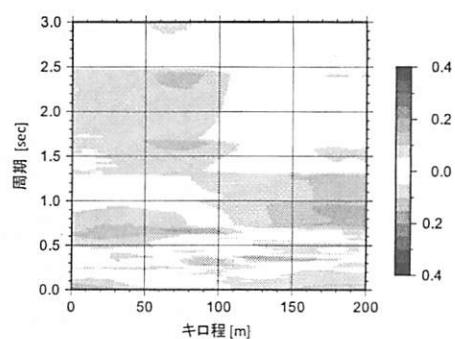
果を示す。線形解析の結果において、最近値2Dは、正解値2Dと最大でも1割程度の誤差であるのに対し、正解値1Dは正解値2Dと最大2割程度の誤差が生じていることが分かる。また、非線形解析結果において、最近値2Dは、正解値に対して最大2割程度の誤差が生じているのに対し、正解値1Dは4割以上の誤差が発生している。さらに、線形、非線形ともに正解値1Dは広い周期帯域において誤差が生じているが、最近値2Dの誤差発生周期は短周期成分に集中していることも分かる。

図-12は、線形解析結果に着目し、モデル地盤における20mごとの地表面加速度波形の最近値2Dと正解値2Dの差分、および正解値1Dと正解値2Dの差分を示している。この結果から最近値2Dの誤差に比べて正解値1Dの誤差は全時刻において明らかに大きくなっていることが分かる。また、主要動である4.0s~7.0s程度に着目すると、正解値1Dでは、距離に応じて山谷のピーク時間にずれが生じており、1次元解析では考慮されない表面波の影響が誤差を大きくしている要因と考えられる。

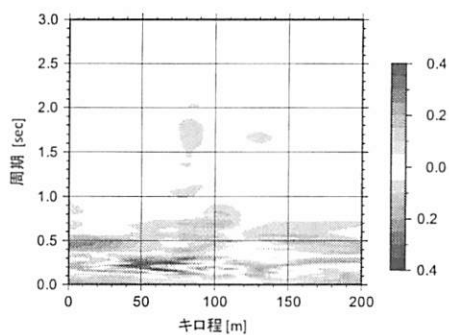
以上より、不整形を有する地盤を対象とした場合、2次元モデルに対して、1次元モデルは不整形地盤の影響を考慮できないため、たとえ正しい構造を推定できていたとしても誤差が大きくなる可能性がある。一方で、最近値2Dの結果から分かるとおり、2次元解析において地盤情報を最近法で補間した場合でも、正解値2Dとの誤差は小さくなっている、つまり不整形地盤の影響を簡易に評価することでも、表面波等の影響を簡便に考慮することができ、結果的



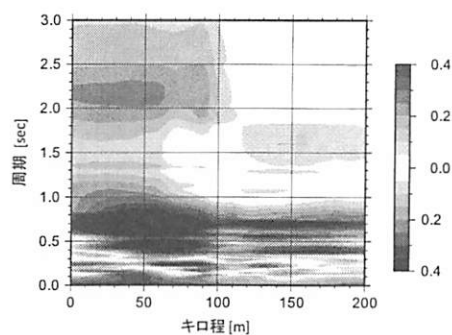
(最近値 2D-正解値 2D) / 正解値 2D



(正解値 1D-正解値 2D) / 正解値 2D

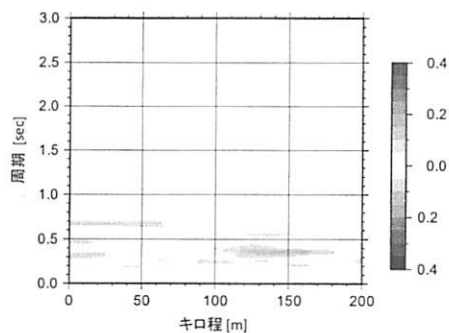


(最近値 2D-正解値 2D) / 正解値 2D

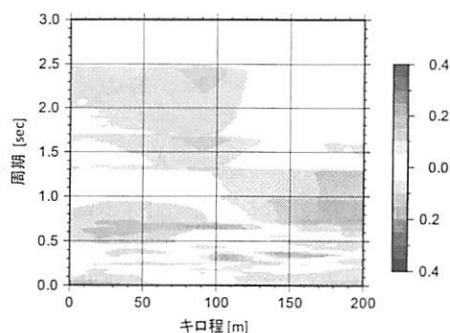


(正解値 1D-正解値 2D) / 正解値 2D

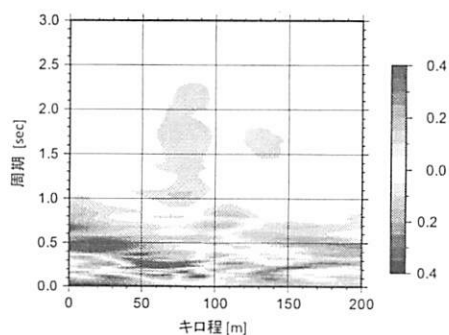
図-10 CASE① 加速度応答スペクトルの誤差 (上段：線形，下段：非線形)



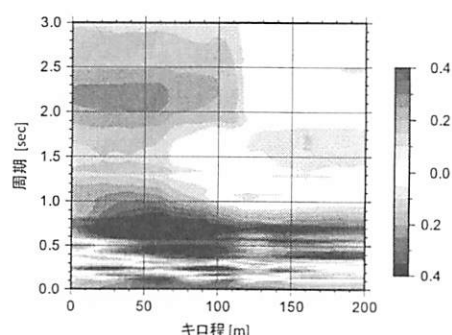
(最近値 2D-正解値 2D) / 正解値 2D



(正解値 1D-正解値 2D) / 正解値 2D



(最近値 2D-正解値 2D) / 正解値 2D



(正解値 1D-正解値 2D) / 正解値 2D

図-11 CASE② 加速度応答スペクトルの誤差 (上段：線形，下段：非線形)

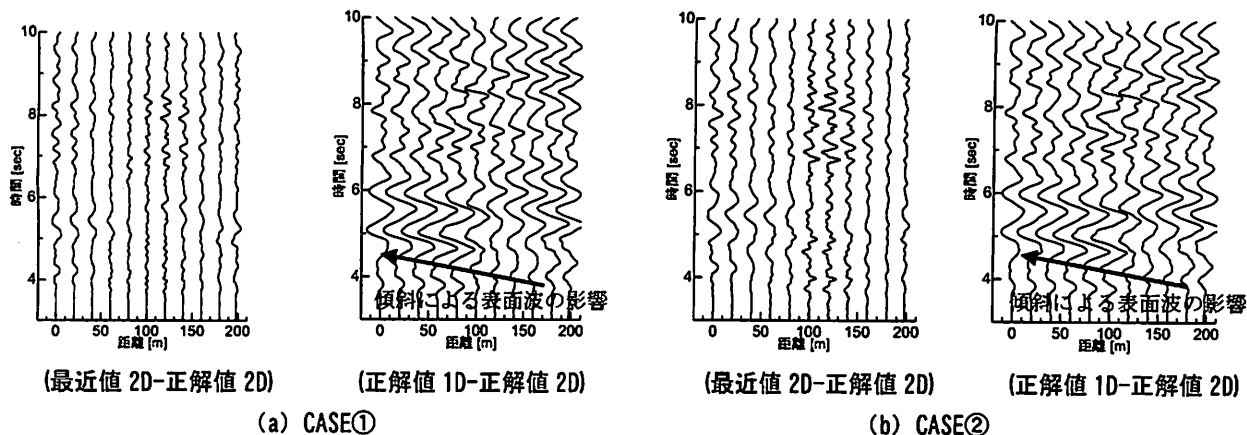


図-12 代表地点における加速度波形の差分 (線形)

に構造物の応答を比較的良好に再現できると言える。

4. まとめ

本検討は、地盤を1次元および2次元にモデル化し、非線形動的応答解析を用いて、地盤補間手法および地盤のモデル化の違いが構造物の応答に及ぼす影響の把握を行った。その結果、広域構造物の地震被害を推定するための最適な地盤情報補間手法および解析次元について、以下の知見が得られた。

- ①1次元で地盤をモデル化し、構造物の応答を評価した場合、パラメータを適切に設定したIDW法と最近法の推定精度はそれほど変わらない。つまり事前情報が何もない場合にはIDW法のパラメータ設定には任意性が残されており、この場合は最近法の方が推定精度が高くなることも考えられる。これはIDW法に限らずクリギング等の補間法にも同様に言えることである。よって広範囲の地盤挙動、構造物応答を簡易に推定することを目的とした場合の地盤の1次元表現方法としては、最近法が適切であると言える。
- ②不整形地盤のような地点を対象とする場合、例えば正しい地盤構造を推定できていたとしても、1次元でモデル化すると、最終的な地盤挙動、構造物応答の推定精度は低い。これは、地盤の不整形性による表面波等の影響を考慮できないためである。一方で上記①で選定した最近法によって地盤を2次元にモデル化した場合、不整形の影響を簡便に考慮できるために、正しい地盤構造を推定した1次元解析結果よりも、挙動の推定精度が高くなっている。そのため、解析時間が問題にならないような場合には、最近法を用いて地盤を2次元にモデル化することで、簡易に不整形の影響を取り込んだより精度の高い検討が可能となる。

参考文献

- 1) 土木学会編：動的解析と耐震設計（第2巻）動的解析の方法，1989。

- 2) 高田至郎，尾崎竜三：地震動観測記録の補間に基づく兵庫県南部地震の加速度分布特性，神戸大学工学部建築学科土木系教室兵庫県南部地震学術調査団被災メカニズム解析と復興に関する論文シリーズ，Vol.1-2，1996。
- 3) 星谷勝，野田茂，稲田裕：観測情報に基づく条件付非正規確率場の推定理論の誘導，土木学会論文集，No.571/I-40，pp.83-95，1997。
- 4) 野田茂，盛川仁，山崎文雄：地震動振幅を用いた基盤地動分布の確率的補間，土木学会論文集，No.640/I-50，pp.131-147，2000。
- 5) 末富岩雄，石田栄介，磯山龍二：空間補間による地震動分布推定の高精度化のための一検討，第28回地震工学シンポジウム論文集，2005。
- 6) 田辺晋，中西利典，木村克己，八戸昭一，中山俊雄：東京低地北部から中川低地にかけた沖積層の基盤地形地質調査研究報告，第59巻，第11/12号，pp.497-508，2008。
- 7) 江藤雅佳子，石原与四郎，田辺晋，木村克己，中山俊雄：ボーリング柱状図資料を用いたN値と岩層の3次元分布モデルー東京低地北部における沖積層の例ー，地質学雑誌，第114巻，第4号，pp.187-199，2008。
- 8) Franke. R. : Scattered data interpolation: test of some methods, Mathematics and computation. 38, pp.181-200, 1982.
- 9) 野上雄太，室野剛隆：S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定，土木学会地震工学研究発表会論文集，30，2009。
- 10) 安田進，山口勇：種々の不撓乱土における動的変形特性，第20回土質工学研究発表会講演集，pp.539-542，1985。
- 11) 福島美光，翠川三郎：周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的なQ-1値とそれに基づく地盤増幅率の評価，日本建築学会構造系論文集，460，pp. 37-46，1994。
- 12) 室野剛隆，西村昭彦，室谷耕輔：地震動に与える表層地盤の局所変化の影響と耐震設計への適用に関する提案，ローカルサイト・エフェクト・シンポ論文集，pp.183-188，1998。