広域構造物の地震応答概略評価のための 地盤モデル簡易構築手法

桐生 郷史1・野上 雄太1・坂井 公俊2・室野 剛隆2

¹正会員 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) E-mail:kiryu@jrc.jregroup.ne.jp

²正会員 (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) E-mail:ksakai@rtri.or.jp

線状構造物の地震時弱点箇所のスクリーニングを目的とした場合の地盤モデルの簡易評価法について検 討を行った.具体的には,離散的に存在している限られた地盤情報から,地盤を1次元および2次元にモ デル化し,逐次非線形解析を用いることで,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,1次元解析における補間手法としては,最近法を用いることで, パラメータの任意性を有さずに安定した解を得ることができる.また計算機資源として2次元解析が実施 可能な場合には,この場合の補間手法としても最近法を用いることによって簡易に不整形地盤の影響を考 慮した地震応答値の評価が可能であることを確認した.

Key Words : interpolation of ground structure, earthquake response, geographic information, seismic response analysis

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^{例えば1)}.新設する鉄 道構造物の設計においては、平野における地盤調査間隔 として50m~250m以下を目安としている²⁰のに対して、

一般に既存の地盤情報はより長い間隔で離散的にしか存 在していないことがほとんどである.そのため鉄道構造 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 簡易に実施する場合には、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、地震時弱点箇所の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^{例えば30~0}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^{例えば ^{7,8}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際の補間手法の 検討

(1) 検討方法

まず地盤を1次元にモデル化する際の補間手法につい 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)⁹」,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

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=0.01,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.

$$Z(x) = \frac{\sum_{i} w_i z_i}{w_i} \quad , \quad w_i = \frac{1}{R^n} \tag{1}$$

$$R_{i} = \left(\left(x_{i} - x_{j} \right)^{2} + k \left(y_{i} - y_{j} \right)^{2} \right)^{1/2}$$
⁽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¹⁰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的なパラメー タ¹⁰を用いた.また解析に必要な基準ひずみy₀₅は、既 往の試験結果をもとに提案されている値¹¹⁾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 ¹³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_h,は04,等価固有周期T_{eq}は04,07, 1.0(sec)の3ケースとし、入力地震動は、1995年兵庫県南 部地震におけるJMA神戸観測記録、1993年釧路沖地震に 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、まず地表面位置での地 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、



図-4 最近法により補間した地盤モデル

表-1	解析ケー	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	0.4	0.4 0.7	_	—
最近値						-
IDW(1)					2	0.001
IDW2	釧路沖地震	Original		1.0	2	0.1
IDW3					1	0.001



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.

続いて構造物の応答に着目した比較を行う. 各結果の



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

比較は、構造物の応答塑性率μ(=最大変位δmm/降伏変 位δ,)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.

$$\left|\mu_{cor} - \mu_{\rm int}\right| / \mu_{cor} \tag{3}$$

ここに, μ_{αr}: 正解値における構造物の応答塑性率, μ

in(NEAR):最近値における構造物の応答塑性率, $\mu_{in(IDW)}$: 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章に記載 する.

3. 地盤を2次元にモデル化する際の補間手法の 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.

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、工学的基盤相当一に入力した.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¹³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4.0%~7.0%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





図-12 代表地点における加速度波形の差分(線形)

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、線状構造物の地震時弱点箇所のスクリーニ ングを目的とした場合の地盤モデルの簡易評価法につい て検討を行った.具体的には、離散的に存在している限 られた地盤情報から、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.っ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,たとえ 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

- 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.
- (公財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同 解説 基礎構造物,丸善,2012.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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,pp497-508,2008.
- 8) 江藤稚佳子,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.
- Franke. R. : Scattered data interpolation: test of some methods, Mathematics and computation. 38, pp.181-200, 1982.
- 10) 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.
- 安田進,山口勇:種々の不撹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.

12) 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. の局所的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・シンポジウム論文集, pp.183-188, 1998.

13) 室野剛隆,西村昭彦,室谷耕輔:地震動に与える表層地盤

A SIMPLE METHOD OF CONSTRUCTING GROUND MODEL FOR EVALUATING RESPONSE OF STRUCTURE LOCATED IN WIDE-AREA

Satoshi KIRYU, Yuta NOGAMI, Kimitoshi SAKAI and Yoshitaka MURONO

Ground characteristics are usually obtained discretely by boring exploration. We therefore have to presume the seismic responses of structures in a wide-area using the limited geographic information. In this study, we proposed a simple method for constructing a ground model to evaluate seismic responses of the whole line. As a result, it was shown that we could evaluate the seismic ground responses with a certain level of accuracy even if the ground characteristics were estimated based on the nearest boring data, and could pick up relatively severe damaged structures among the whole line by the proposed method.