

地震応答解析のための地下構造データの構築

災害マネジメント研究室 1150166 山下 茜

Key words データ補間 ボーリングデータ 地盤モデル 地震 動的相互作用

1. はじめに

1.1. 研究背景

来る南海トラフ地震の規模はマグニチュード8~9とされ、30年以内の発生確率は70%程度である¹⁾。そして、過去の南海トラフ地震において、地震発生後の津波来襲や地盤沈下が記録されている。南海トラフ地震による被害を最小限に抑えるためには、地震発生後、津波が来襲するまでに避難を行うことが肝心であり、地震発生後の市街地の建物の被害状況を把握しておくことは、避難をすすめる上で非常に重要である。

一方で、建物と地盤の堅さの相対関係の差異によって、建物と地盤の動的相互作用の効果が現れる。地盤が軟弱である場合及び構造物が中・低層のRC造建物である場合、建物に比べて地盤の方が相対的に軟らかいため、建物直下の地盤が建物の動きにつられ大きく変形し、動的相互作用の影響が大きくなる。高知市街地において、地下地盤は軟弱であり²⁾、構造物の大半は中・低層であるため、高知市街地において地震応答解析を行う際に建物と地盤の動的相互作用を考慮することは重要である。ここで、建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析は地盤を代表する地盤ばねの上に建物を載せるモデルを用いて行われ、地盤ばねはボーリングデータなどによって得られる地盤の物性値から算出される³⁾。

1.2. 研究目的

こうち地盤情報公開サイト⁴⁾において、整備・公開されているボーリングデータを用いて、ボーリングデータのない地点に関しても建物と地盤の動的相互作用を考慮した地震応答解析が行えるよう、データの内挿手法を検討し、建物と地盤の動的相互作用を考慮した地震応答解析を行うための地下構造データを構築することが本研究の目的である。

1.3. 研究概要

地下構造は複雑であり、ボーリングデータをそのまま補間することは容易ではない。そこで、地盤を5層にモデル化する手法を提案し、補間による地下構造データの構築と算出される地盤ばねの値の精度の検討を行う。

2. 5層地盤モデルの作成

2.1. 既往研究 高知市街地の浅層地盤モデルの構築⁵⁾

高知市街地を対象として、周期1秒前後よりも短周期の地震動増幅特性を特徴づける浅層地盤モデルの構築に関する研究である。アカホヤ火山灰層上面、完新統基底面、基盤層上面の3つの境界面に関して、3次元的な形状が推定可能であることが述べられている。

2.2. 物性値の取得

地盤ばねを算出するために必要な物性値はS波速度、P波速度、ポアソン比、密度、層厚である。ボーリングデータにS波速度の値がない場合はN値から式(1)⁶⁾を用いて、P波速度の値がない場合はS波速度の値から式(2)⁷⁾を用いて算出する。ポアソン比はS波速度とP波速度の値から式(3)⁸⁾を用いて求める。

本研究では工学的基盤に到達していないボーリングデータについては対象から除外する。

$$V_s = \begin{cases} 100N^{1/3} & (\text{粘性土}) \\ 80N^{1/3} & (\text{砂質土}) \end{cases} \quad \text{式(1)}$$

$$V_p = \begin{cases} 1.65V_s + 960 & (V_s \leq 1500 \text{ m/s}) \\ 1.11V_s + 1290 & (V_s > 1500 \text{ m/s}) \end{cases} \quad \text{式(2)}$$

$$\nu = \frac{1 - 2(V_s / V_p)^2}{2(1 - (V_s / V_p)^2)} \quad \text{式(3)}$$

ここで

V_s : S波速度

N : N値

V_p : P波速度

ν : ポアソン比

2.3. モデルの作成手法

「高知市街地の浅層地盤モデルの構築」に述べられているアカホヤ火山灰層上面、完新統基底面、基盤層上面の3つの境界面は、地盤特性の点においても境界面となっていることから、この3つの境界面に表層下面を加えた4つの境界面によって地盤を5層にモデル化する。

表層下面については、S波速度100m/s以下を表層とするモデルAと、地質コードがBのものを表層とするモデルBを設定する。

表 2-1. モデル A の境界条件

第1層	$V_s \leq 100 \text{ m/s}$
第2層	地質コード : M1, G1a, G1s
第3層	地質コード : S1v, G1b, S1b, M2
第4層	地質コード : G2, S2, M3, WRG, WRM, WRS
第5層	工学的基盤

表 2-2. モデル B の境界条件

第1層	地質コード : B
第2層	地質コード : M1, G1a, G1s
第3層	地質コード : S1v, G1b, S1b, M2
第4層	地質コード : G2, S2, M3, WRG, WRM, WRS
第5層	工学的基盤

5層地盤の各層の物性値は、層厚を重みとする重み付き平均式(4)によって求める。

$$X = \frac{\sum (X_i \times H_i)}{\sum H_i} \quad \text{式(4)}$$

ここで

- X:対象となる物性値
- X_i:対象となる物性値の第i層の値
- H_i:第i層の層厚

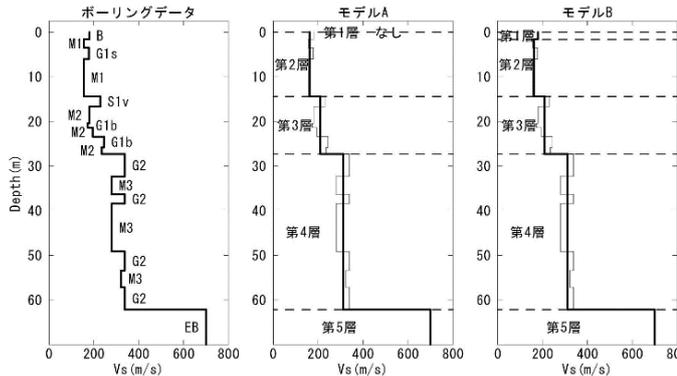


図 2-1. 5層地盤モデル

2.4. モデルの精度検討

地盤ばねを算出する面における5層地盤モデルの精度を検討するためにコーンモデル⁸⁾を用いてボーリングデータ及び5層地盤データから水平地盤ばねと回転地盤ばねを算出し、比較する。

5層地盤モデルから求めた地盤ばね定数の、ボーリングデータから求めた地盤ばね定数に対する比のヒストグラムを示す。

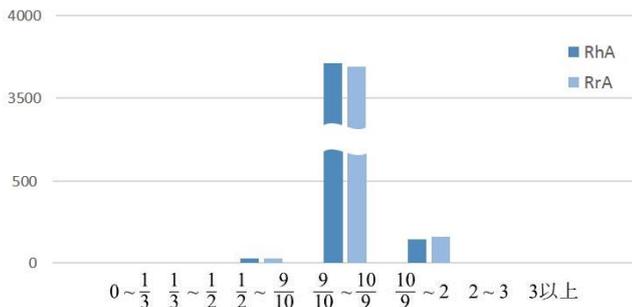


図 2-2. モデル A ヒストグラム

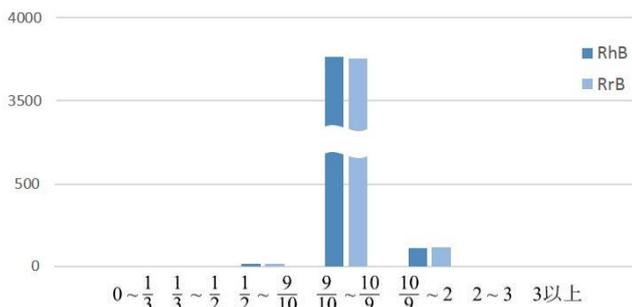


図 2-3. モデル B ヒストグラム

ここで

- K:地盤ばね定数
- Rx:ボーリングデータから算出した地盤ばね定数に対する地盤ばね定数 Kx の比
- 各条件を添え字で記す。
- h:水平地盤ばね
- r:回転地盤ばね
- A:5層地盤モデル A
- B:5層地盤モデル B

精度を量る指標としてσを式(5)で定める。σが0に近いほどRが1に近いことを示し、精度が良いといえる。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\log_{10} R)^2}{m}} \quad \text{式(5)}$$

ここで

m:データ数

σ_{hA}は0.00038, σ_{rA}は0.00041, σ_{hB}は0.00029, σ_{rB}は0.00031であり、モデル A, モデル B とともに十分な精度でモデル化できているといえる。

3. データ補間

3.1. 補間手法

自己相関の見られる地質学の分野のデータの補間方法としてクリッキングがある⁹⁾。S波速度, P波速度, ポアソン比, 密度についてはクリッキング手法で、層厚についてはクリッキング手法とTINによってデータ補間を行う。

添え字として以下を追加する。

- 1:層厚の補間方法 クリッキング
- 2:層厚の補間方法 TIN

3.2. 補間精度の検討

補間方法とモデルの検討を行うためにボーリングデータをいくつか抜き取り補間をし、補間データから算出した地盤ばね定数と、元のボーリングデータから算出した地盤ばね定数を比較する。本研究では周囲のボーリングデータがそろっている点について15点2セット、周囲のデータの一部がそろっていない点について15点2セットの計60点について補間を行う。周囲のボーリングデータがそろっている30点をデータ群P、周囲のボーリングデータの一部がそろっていない30点をデータ群Qとする。

添え字として以下を追加する。

- P:周囲のボーリングデータがそろっている
- Q:周囲のボーリングデータがそろっていない

モデル A, B それぞれに対し、層厚をクリッキングで補間したデータから求めた地盤ばね定数と、TINで補間したデータから求めた地盤ばね定数の、のボーリングデータから作成した地盤ばねに対する比のヒストグラムを示す。

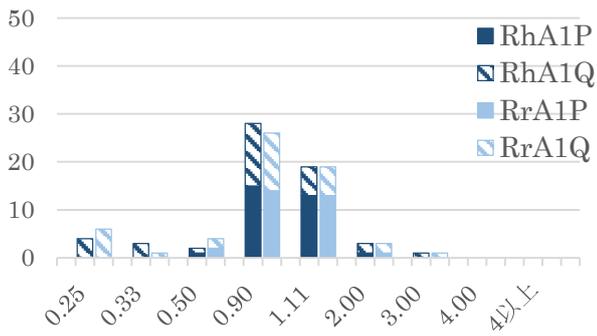


図 3-1. A1 ヒストグラム

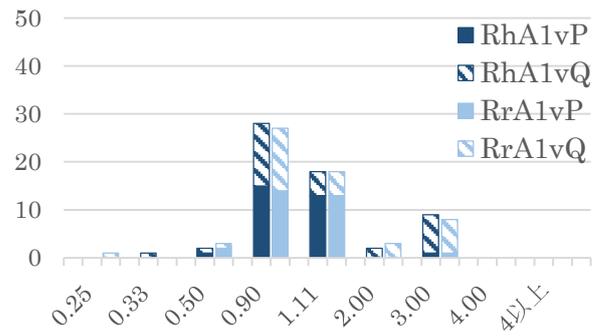


図 3-5. A1v ヒストグラム

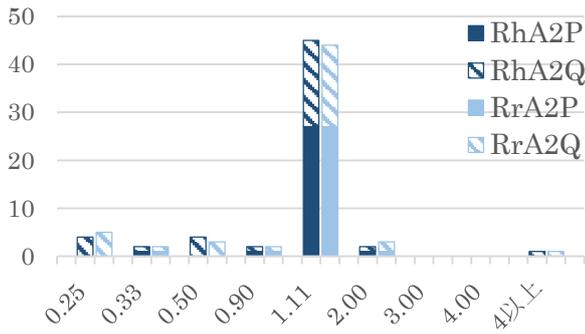


図 3-2. A2 ヒストグラム

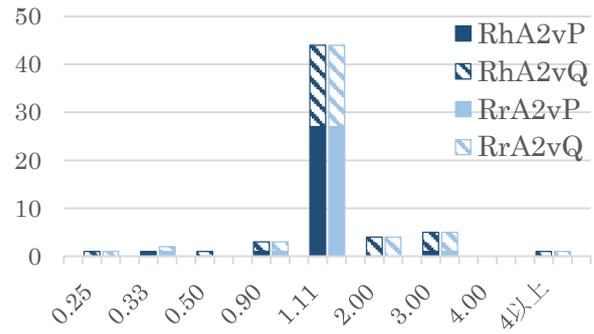


図 3-6. A2v ヒストグラム

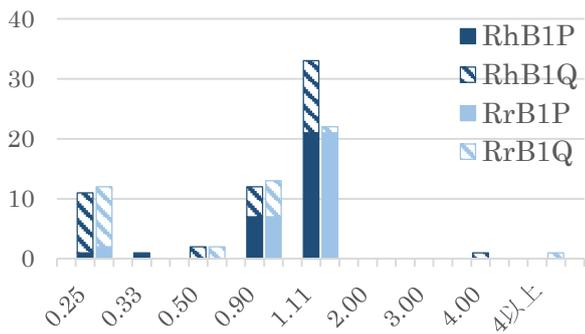


図 3-3. B1 ヒストグラム

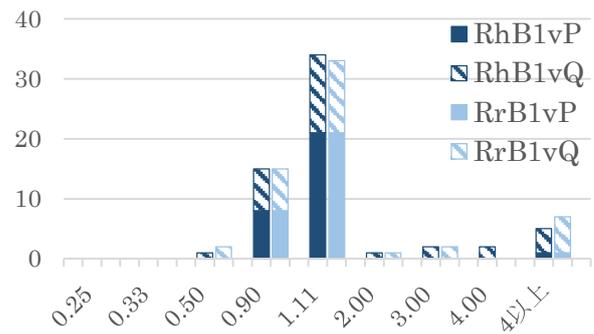


図 3-7. B1v ヒストグラム

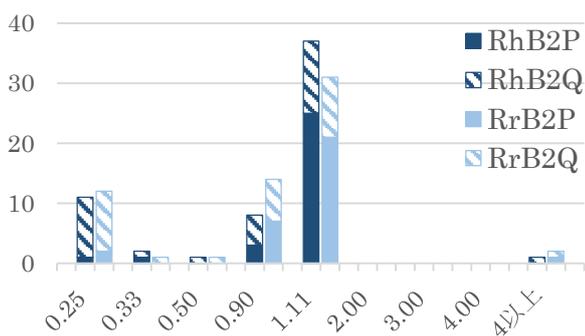


図 3-4. B2 ヒストグラム

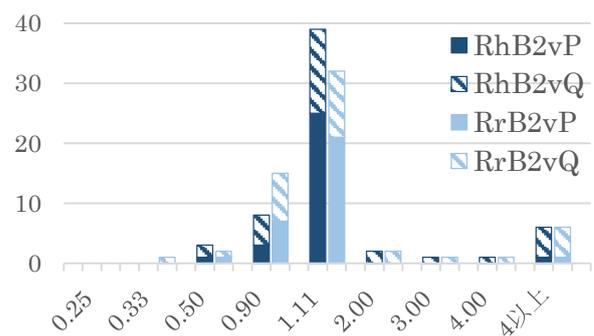


図 3-8. B2v ヒストグラム

表 3-1. 各ケースの σ

モデル	oh1	or1	oh2	or2	oh1v	or1v	oh2v	or2v
A	0.448	0.490	0.216	0.224	0.346	0.381	0.210	0.217
P	0.143	0.152	0.163	0.172	0.094	0.097	0.123	0.126
Q	0.618	0.676	0.259	0.266	0.480	0.531	0.271	0.280
B	0.873	0.939	0.257	0.264	0.941	1.003	0.258	0.265
P	0.396	0.432	0.166	0.172	0.411	0.442	0.164	0.170
Q	1.169	1.255	0.323	0.331	1.266	1.348	0.326	0.334

図 3-1 と図 3-2, 図 3-3 と図 3-4 を比較することで層厚の補間方法としてはクリッキングより TIN の方が適していることが明らかとなった。図 3-1 と図 3-3, 図 3-2 と図 3-4 を比較することで 5 層地盤のモデル化手法としてモデル B よりもモデル A の方が精度良く補間できることが明らかとなった。

P については、比較的精度は良いが、Q について精度向上が求められる。当然ではあるが、周囲のデータがそろっている方がそろっていない場合よりも精度が上がるため、ボーリングデータの数が増えることで、精度が向上することを確認できた。

モデル A, モデル B ともに Q について小さい側に精度の悪いデータが多数見られ、特にモデル B では顕著である。原因として、実際には層が無いにも関わらず補間によって薄い層が紛れ込んだことが考えられる。

ポアソン比は式(3)より S 波速度と P 波速度から求められるため、補間によって得られたポアソン比の値と、補間によって得られた S 波速度、P 波速度から求めたポアソン比の値を比較することで、層の有無の指標とできる可能性がある。差が 0.1 以上の場合、その層は無いものと判断した場合のヒストグラムを前頁右段、図 3-5~3-8 に示す。

添え字として以下を追加する。

v:ポアソン比を指標として考慮

R が 1 に近い値であったデータに関しては、ポアソン比を指標として層の有無を判断しても R の値はほとんど変化しない。一方、R が 1 に対して極端に小さかったデータに関してはポアソン比を指標として考慮することで、R の値は大きくなり、 σ の値は 0 に近づき精度が向上しているといえる。しかし、ポアソン比を考慮した結果、R が 1 より小さかったデータの中には、1 を超えて大きくなるものもあり、1 を目指して近づいているとは言い切れない。モデル A とモデル B を比較すると、ポアソン比を考慮した場合の R の増加量は、モデル B の方がモデル A より大きく、モデル A に関してはポアソン比を考慮することが精度向上につながっているが、モデル B に関しては、精度に変化は見られない。

2 章において、5 層モデルは十分な精度で地盤をモデル化できていることが確認されたため、5 層モデルと、補間して得たデータを比較する。ポアソン比を指標として層の有無を判断することで、層数は 5 層モデルの層数に近づいた。したがって、ポアソン比を考慮することで R が 1 を越えて大きくなった原因は、他の物性値の補間の精度の低さにあり、ポアソン比は精度向上のための指標として適切であるといえる。

4. おわりに

地下構造データを構築する手法として、地盤を 5 層にモデル化し補間する手法を提案し、検討を行った。地盤ばねを算出するという面において、5 層地盤モデルは十分な精度があることを確認した。5 層に地盤をモデル化することで、物性値の補間が容易に可能となった。さらに、補間方法として、S 波速度、P 波速度、ポアソン比、密度に関してはクリッキング手法が、層厚に関しては TIN が適することが明らかとなった。

モデル化の手法として、S 波速度が 100m/s 以下の層を表層とし、表層下面、アカホヤ火山灰層上面、完新統基底面、基盤層上面の 4 つの境界面で 5 層にモデル化すると、良い精度で補間できた。

周囲のボーリングデータが存在している地点に関しては十分な精度で補間可能であることを確認できた。周囲のデータが揃っていない点に関しても、ポアソン比を指標として層の有無を判断することで、結果的には比較的良い精度で補間できた。さらに、ボーリングデータが増えることで精度が向上することが期待できる。

謝辞

本研究に際して、様々なご指導を頂きました甲斐芳郎教授、高木方隆教授、田島昌樹准教授に深謝いたします。

参考文献

- 1)地震調査研究推進本部 海溝型地震の長期評価の概要 <http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/kaikou.htm> (最終閲覧日 2015 年 2 月 6 日)
- 2)社団法人高知県建築設計監理協会(1992)「高知地盤図」p17, pp.46-47
- 3)日本建築学会(2006)「建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計」
- 4)高知地盤情報利用連絡会 こうち地盤情報公開サイト <http://www.geonews.jp/kochi/index.html> (最終閲覧日 2015 年 1 月 31 日)
- 5)大堀道広他(2013)「高知市街地の浅層地盤モデルの構築」『日本地震工学会論文集』第 13 巻第 1 号
- 6)日本道路協会(1990)「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」p.121
- 7)新潟県ホームページ 第 10 回地震、地質・地盤に関する小委員会 地盤の速度構造の推定および 2 次元不整形地盤モデルに関する補足説明 http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Article/1-jisin10.pdf (最終閲覧日 2015 年 1 月 31 日)
- 8)国土交通省建築研究所(2001)「改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景」pp.79-83
- 9)高木方隆(2012)「国土を測る技術の基礎」pp.313-317