

柱状改良体を有する複合地盤の地震応答特性に基づく均質モデル化

Homogeneous Modeling of Composite Ground with Columnar Improvement Based on Its Seismic Response Characteristics

若井明彦*・鶴飼恵三**・萩原吉洋***

Akihiko WAKAI, Keizo UGAI and Tomihiro HAGIWARA

* 正会員, 博(工), 群馬大学助教授, 工学部建設工学科(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1丁目)

** フェロー会員, 工博, 群馬大学教授, 工学部建設工学科(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1丁目)

*** 学生会員, 群馬大学大学院, 工学研究科(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1丁目)

The ground improvement based on the deep mixing method of soil stabilization is often carried out for the strength increase of the foundation. The development of an appropriate evaluation method of the seismic behavior of such a composite ground is an urgent business, because the performance-based design method will be adopted in the design code. In this study, the estimation method of the values of equivalent ground parameters to the composite ground with columnar improvement is proposed based on the dynamic elasto-plastic FEM and the neural network technique. By using the proposed method, the improved ground can be modeled as a homogeneous ground on the basis of its seismic response characteristics.

Key Words: earthquake, composite ground, finite element method, neural network, homogenization

キーワード: 地震, 複合地盤, 有限要素法, ニューラルネットワーク, 均質化

1. はじめに

地盤の支持力向上などを目的にソイルセメントコラム工法すなわち深層混合処理工法による地盤改良が行われる場合がある。これまでも、柱状改良体を有する複合地盤の支持力特性について解析的に評価することを試みた例はある¹⁾²⁾などが、地盤と改良体それぞれの適切な力学特性、改良範囲、基礎の形式や形状などを考慮した包括的な現象解明には至っていない。

各種構造物の地震時挙動を予測する場合、地盤と構造物との相互作用が考慮される。直接基礎を有する構造物の耐震設計については、基礎を支持する地盤の動的応答特性を適切に考慮することが必要である。この地盤が改良体を有する複合地盤であった場合も同様である。このような場合、改良地盤と上部構造物との一体化解析を行う環境も徐々に整いつつあるが、設計での便を考えると、最も簡易かつ実務的なアプローチは、複合地盤を等価な均一地盤に置き換えてモデル化することであろう。このようにすることで、改良体を有しない通常の地盤において適用されている現行の耐震設計手法を、そのまま改良地盤に対して適用することが可能となる。

ソイルセメントコラムに限らず、複合地盤の力学特性を巨視的に捉えて均質化する試みは行われている³⁾など。しかし、多くの場合、均質化される複合地盤が極めて単純な条件に絞られるか、逆に多くの考慮すべき要因がありながら、

均質化の過程でそれらの多くが無視されることがあり、実務設計に耐えうる任意条件下での均質化手法の開発は立ち遅れている。本研究では、3次元的な柱状改良範囲や地盤の強度変形特性、構造物基礎の形状が変化した場合を合理的に考慮しうる、新たな設計支援システムを構築するための基礎的研究を行うこととした。なお、上記システムを構築するために3次元動的弾塑性FEMによる一連のパラメトリック・スタディを行った。地盤は全応力モデルにより簡易化して扱うことにした。液状化の可能性のある地盤は対象としないことに留意されたい。

2. 研究の目的

すでに述べたように、本研究の主たる目的は、柱状改良体を有する複合地盤の地震応答特性に基づく均質モデル化である。以上により、耐震設計に適用しうる設計支援システムが構築される。もちろん、実際の設計に使うためには、FEMに基づくパラメトリック・スタディにおいて考慮する条件をさらに増やすとともに、設計に必要なかつ十分な情報が提供される入出力インターフェイスが実装されねばならない。しかし、それらの整備は言わば作業量の問題であり、本研究において新たなシステムを提案する趣旨と直接は関係しない。本研究では設計支援システムの細部については特に議論せず、システム全体の概念と開発の可能性について実証的な検討を行うにとどめた。

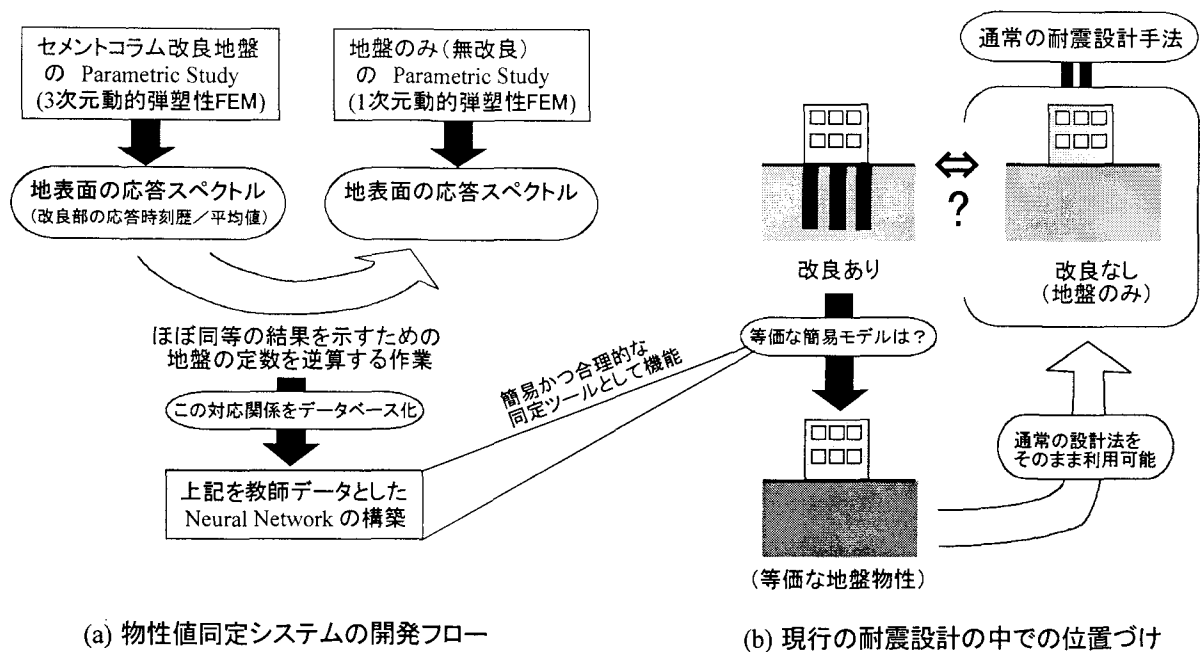


図-1 本研究の解析手順と成果の意義。

本研究の解析手順が図-1(a)に、本研究の成果と実務との関係が図-1(b)に示されている。図-1(a)の具体的な手順について説明しよう。例えば、ある入力地震動に対して動的弾塑性 FEM より地表面の応答時刻歴を求め、これをもとに応答スペクトルを算出できるとする。ここで無改良地盤を前提にして地盤の材料定数を種々に変化させた一連の解析結果を予め準備しておけば、改良地盤に対して得られた結果と等価な応答スペクトル特性を有する無改良地盤、すなわちその材料定数、を探すことは可能である。以上を改良幅や改良パターン、原地盤の物性、幾何学形状など異なったあらゆるケースに対して実施すると、任意の改良地盤に対応する無改良地盤の材料定数を把握できる。

一般に、上記のように調べた材料定数の対応関係は、単なる数式や簡易な線図などにより容易に表現できるようなものではない。そこで本研究では、入力情報と出力情報との間の相関性の表現に Neural Network を導入する。FEM による結果を教師データとして構築した Neural Network を利用すれば、煩雑な数値計算を一切行わずに任意の対応関係を容易に扱うことができる。

なお、本研究ではソイルセメントコラム工法に関わるすべての影響因子を考慮することはせず、いくつかの特徴的な因子のみに着目して、試行的にパラメトリック・スタディを行う。将来、より多くの因子を取り込んで同様のシステムを構築することで、実務設計に適用可能な、優れた物性値同定システムが完成するであろう。

3. 三次元解析モデル

ソイルセメントコラム工法による複合地盤を三次元にモデル化して動的応答解析を行う。例として、あるケース

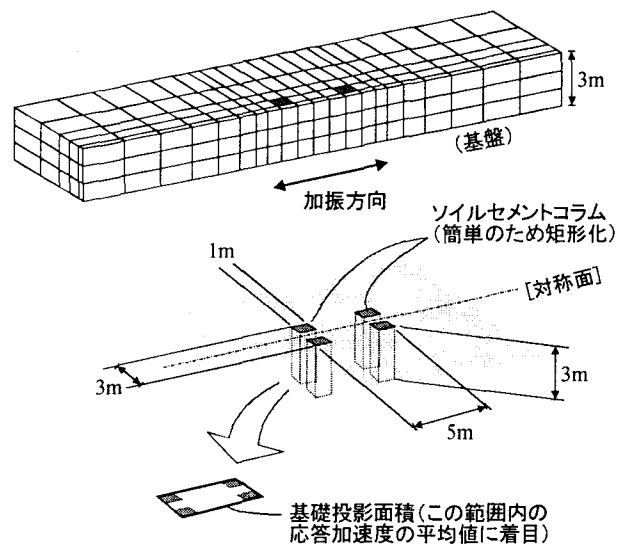


図-2 三次元有限要素メッシュの一例（パターン D）。

の有限要素メッシュを図-2 に示す。対称性を考慮して実際の半分の領域のみを解析領域とした。解析領域の端部を改良体位置から十分に離すことで反射波の影響をできるだけ小さくした。端部には、別途行った地盤のみの一次元応答解析の結果が、強制変位として入力される。

動的弾塑性 FEM では、以下の運動方程式を Newmark の β 法に基づく時間積分アルゴリズムにより解く。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + \{P\} = -[M]\{\ddot{U}\} \quad (1)$$

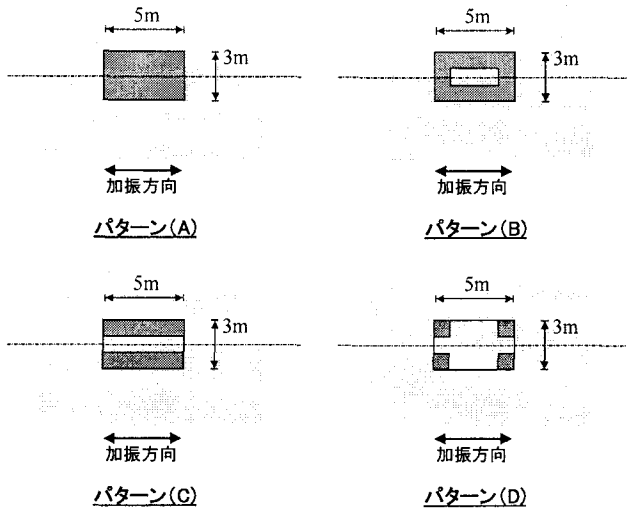


図-3 解析対象とした改良パターン。

$\{P\}$ は内部応力に等価な節点力ベクトルであり、線形弾性体では $\{P\} = [K]\{u\}$ である。 $[M], [C], [K]$ はそれぞれ質量、減衰、(初期)剛性マトリクス、 $\{u\}, \{U\}$ はそれぞれ(各位置の)相対変位、(基盤の)絶対変位ベクトルである。減衰マトリクスの導出には Rayleigh 減衰を仮定した。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

今回は周波数領域 0.2~2.0s で 3% 程度を確保する値として、 $\alpha = 0.171$, $\beta = 0.00174$ と仮定した⁹⁾。この値については今後検討の余地がある。

実際の設計支援システムを構築する際には、任意の基礎形状、地層構造に対する検討を行う必要があるが、今回、簡単化のため、直接基礎の投影面積および地層構成は、図-2 に示した大きさで固定して考えることにした。地盤は単一地層と仮定し、改良体は基盤に着底している場合を想定した。もちろん、将来、必要に応じて様々なケースを追加想定することは容易である。

本研究で特に着目した操作因子は、基礎投影面積内の改良パターンである。解析対象として一連の改良パターンを平面図にて図-3 に示す。柱状改良体は円形断面であるが、解析の簡略化のため、矩形断面にモデル化した。実際には改良体個々の形状は現象に密接に関係するため、隣接する改良体同士の配置が接円タイプなのか、重複タイプなのかも含めて、いずれ細密なメッシュに基づく解析を行うなど、詳細な影響検討が必要である。改良体の配置については、図-3 に示した以外のパターンも数多く考えられるが、今回 Neural Network の教師データに採用するケースはここに示した 4 種類のみとした。

これら各パターンについて、地盤および改良体の材料定数を表-1 のように設定した。いずれの材料も鵜飼・若井による繰返し載荷モデル⁴⁾を適用し、全応力解析を行った。本モデルに関して、弾塑性挙動時の応力ひずみ関係は次式で与えられる。

表-1 地盤と改良体の材料定数(鵜飼・若井モデル⁴⁾)。

(a) 地盤							
Type	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ	γ (kN/m ³)	$b\gamma_{G_0}$	n
(a)	30.8	0.49	20.	0	16	1.2	2.3
(b)	61.5	0.49	40.	0	16	1.2	2.3
(c)	92.3	0.49	60.	0	16	1.2	2.3

(b) 改良体							
Type	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ	γ (kN/m ³)	$b\gamma_{G_0}$	n
(d)	308.	0.49	200.	0	16	1.2	2.3

$$\dot{\sigma}_{ij} = \left[D_{ijkl} - \frac{D_{ijpq} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{pq}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} D_{mnkl}}{-\frac{\partial f}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial \varepsilon_{ij}^p} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{kl}}} \right] \dot{\varepsilon}_{kl} \quad (3a)$$

$$D_{ijkl} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \delta_{ij}\delta_{kl} + \frac{E}{2(1+\nu)} (\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) \quad (3b)$$

$$G_0 = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3c)$$

$$\begin{cases} h = \gamma = \bar{\gamma}(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij0}) & (\text{on 骨格曲線}) \\ h = \tilde{\gamma} = \bar{\gamma}(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ija}) & (\text{on 履歴ループ}) \end{cases} \quad (3d)$$

本モデルでは、せん断応力とせん断ひずみの代表量として以下の $\bar{\tau}, \bar{\gamma}$ が用いられているが、式(3d)のようにある量により差し引いた相対値を引数とする場合が多い。式(3d)における添字 0 および a を付したひずみテンソルは、それぞれ初期および最新の載荷方向反転時の値を示す。

$$\bar{\tau}(\sigma_{ij}) = \sqrt{J_2} \sin\left(\frac{\pi}{3} + \Theta\right) \quad (4a)$$

$$\bar{\gamma}(\varepsilon_{ij}) = 2 \cdot \sqrt{J_2^*} \sin\left(\frac{\pi}{3} + \Theta^*\right) \quad (4b)$$

$$\Theta = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(-\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right) \quad \left(0 < \Theta < \frac{\pi}{3} \right) \quad (4c)$$

J_2, J_3 は偏差応力の第二、第三不変量、* を付したものは同じく偏差ひずみの不変量である。

処女載荷時の骨格曲線および載荷方向反転後の履歴ループ上での降伏関数はそれぞれ f, f' のように与える。 f の右辺は双曲線状の応力ひずみ関係 ($\bar{\tau}$ の最大値が τ_f) を与える。 f' の右辺はより高次の曲線形状を表現できる。

表-2 パラメトリック・スタディのケース一覧.

Case No.	改良パターン	地盤	改良体
1	(A)	(a)	(d)
2	(A)	(b)	
3	(A)	(c)	
4	(B)	(a)	
5	(B)	(b)	
6	(B)	(c)	
7	(C)	(a)	
8	(C)	(b)	
9	(C)	(c)	
10	(D)	(a)	
11	(D)	(b)	
12	(D)	(c)	

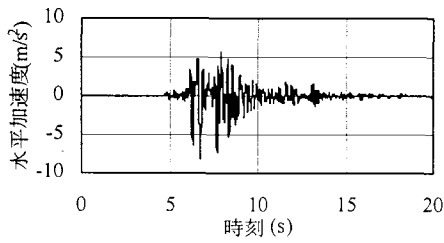


図-4 入力地震波形（神戸海洋気象台 NS 波形）.

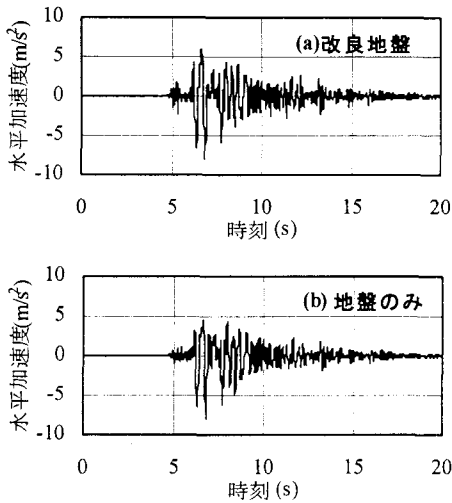


図-5 地表面の応答加速度の時刻歴（ケース 10）.

$$f = \bar{\tau}(\sigma_{ij}) - \frac{G_0 \cdot \bar{\gamma}(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij0})}{1 + \frac{G_0 \cdot \bar{\gamma}(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij0})}{\tau_f}} \quad (5a)$$

$$f' = \bar{\tau}(\sigma_{ij} - \sigma_{ija}) - \frac{a \cdot \bar{\gamma}(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ija})^n + G_0 \cdot \bar{\gamma}(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ija})}{1 + b \cdot \bar{\gamma}(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ija})} \quad (5b)$$

G_0 は初期せん断弾性係数、 b, n は履歴ループの形状および目標とする $h-\gamma$ 関係などから決まる定数である。

せん断強度 τ_f は Mohr-Coulomb の降伏規準に従うので、

$$\tau_f = c \cdot \cos \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi \quad (6)$$

今回は非排水（等体積）状態を仮定するため、処女載荷時の骨格曲線および載荷方向反転後の履歴ループ上での塑性ポテンシャルは、それぞれ g および g' で与えられる。

$$g = \sqrt{J_2(\sigma_{ij})} \quad (7a)$$

$$g' = \sqrt{J_2(\sigma_{ij} - \sigma_{ija})} \quad (7b)$$

この他、履歴ループの補正方法など、モデルの詳細については文献⁴⁾を参照されたい。

今回は、解析を簡単化するため、地盤のヤング率 E と粘着力 c のみが連動して変化した3通りの定数セットを対象とし、他のすべての定数は一定とした。動的変形特性すなわち $G-\gamma, h-\gamma$ 関係に関連するパラメータの決定に際しては、既往の報告⁵⁾などを参考にした。個々の定数の定量的意味について、今回は厳密な議論の対象としない。具体的な設計支援システム構築の段階で、これらについて詳細な工学的検討がなされるべきであろう。

これらと先に述べた改良範囲の組合せとを合わせた計 12 ケースの条件一覧を表-2 に示す。解析に用いた入力地震動は、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台 NS 波形（図-4）とした。耐震設計に用いる地震波形の選択には慎重な検討が必要であるが、これについても本研究の議論対象から外れるので言及しないこととする。

4. 三次元 FEM の結果と Neural Network による学習

改良された地盤と等価な均質地盤定数を同定するために、基礎投影面積（図-2 に図示）内の地表面位置での応答加速度の平均時刻歴に着目した。図-5(a)はケース 10 におけるその結果の一例である。比較のため、地盤のみの場合の応答時刻歴を図-5(b)に示す。耐震設計上、上部構造物の応答加速度が重要となる場合が多いので、これらの時刻歴から計算した応答スペクトルを図-6 に示す。参考までに、ケース 11 および 12 と、各々に対応する地盤のみのケースの結果も同図に示す。各ケースにおいて、地盤改良を行うことにより応答特性は変化するが、これらの傾向は改良体の定数の設定により異なることに留意されたい。

同様に表-2 のすべてのケースに関して同様の計算を行う。個別のケースの結果の差異についての詳述は省略するが、改良体の占める体積が増えるほど、また地盤のヤング率や強度が大きくなるほど、地盤は見かけ上硬くなるため、応答スペクトルの値は小さめに、またスペクトル値の極大周期は短周期側に移動する傾向がある。参考までに、各ケースのスペクトル特性の違いがどの程度であるかを確認するため、12 ケースの結果をまとめて図-7 に示した。

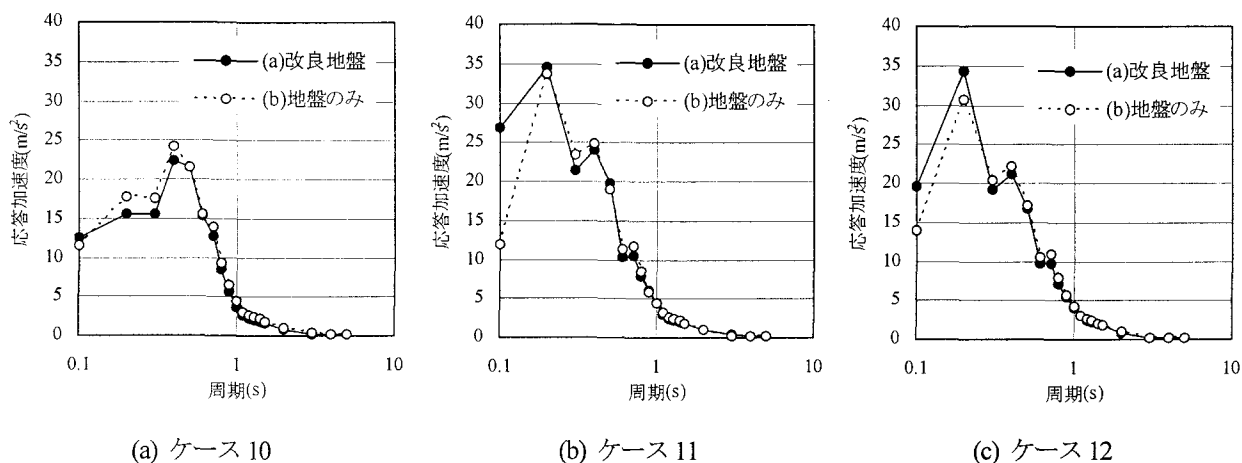


図-6 地表面位置での応答スペクトル（改良地盤のケースと、各々に対応する地盤のみのケースの比較）。

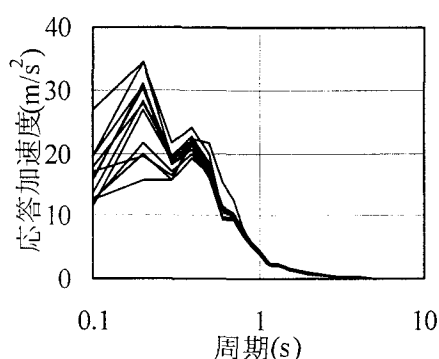


図-7 全ケースの応答スペクトルの比較。

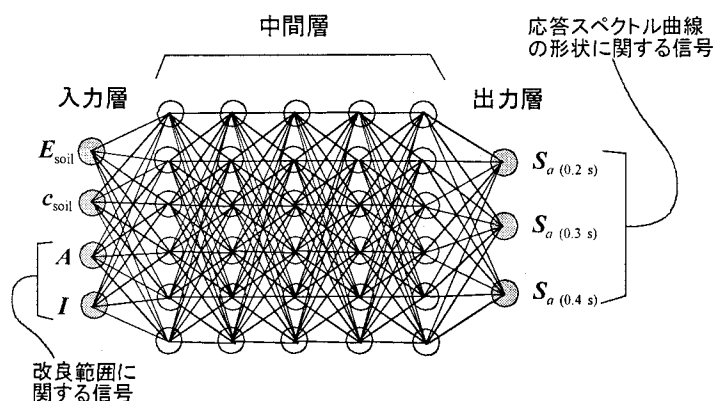


図-8 今回用いた Neural Network の模式図。

以上に基づき、次に FEM による各解析ケースの条件に関する情報を教師信号、応答スペクトルの形状に関する情報を出力信号とした階層型 Neural Network を構築する。Neural Network の定式化について、以下に簡単に記す。

第 n 層の i 番目ユニットと第 $n-1$ 層の j 番目ユニットの結合荷重を $W_{i,j}^{n,n-1}$ とすれば、第 n 層の i 番目のユニットの出力値 X_i^n は、

$$u_i^n = \sum W_{i,j}^{n,n-1} \cdot X_j^{n-1} \quad (8a)$$

$$X_i^n = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{u_i^n - h_i^n}{T_n}\right)} \quad (8b)$$

である。 h_i^n はしきい値、 T_n は温度定数であり、ニューロンの発火しやすさを制御する。 $T_n = 0.5$ とした。今回の計算に用いたのは 5 層（各層 6 ユニット）の階層型 Neural Network である。その模式図を図-8 に示す。

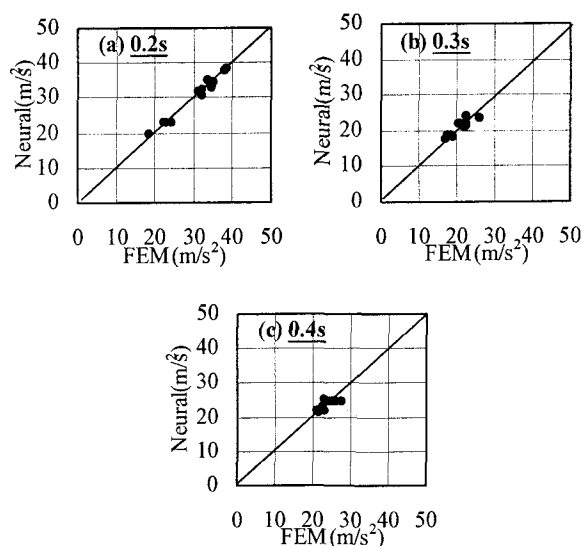


図-9 FEM の結果と Neural Network により予測した応答スペクトル値の比較（点が各ケースに対応）。

表-3 地盤の材料定数（一次元 FEM 解析）.

Case	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ	γ (kN/m ³)	$b\gamma_{G_0}$	n
1-1	30.8	0.49	20.	0	16	1.2	2.3
1-2	30.8		30.				
1-3	30.8		40.				
1-4	30.8		50.				
1-5	30.8		60.				
2-1	46.1		20.				
2-2	46.1		30.				
2-3	46.1		40.				
2-4	46.1		50.				
2-5	46.1		60.				
3-1	61.5		20.				
3-2	61.5		30.				
3-3	61.5		40.				
3-4	61.5		50.				
3-5	61.5		60.				
4-1	76.9		20.				
4-2	76.9		30.				
4-3	76.9		40.				
4-4	76.9		50.				
4-5	76.9		60.				
5-1	92.3		20.				
5-2	92.3		30.				
5-3	92.3		40.				
5-4	92.3		50.				
5-5	92.3		60.				

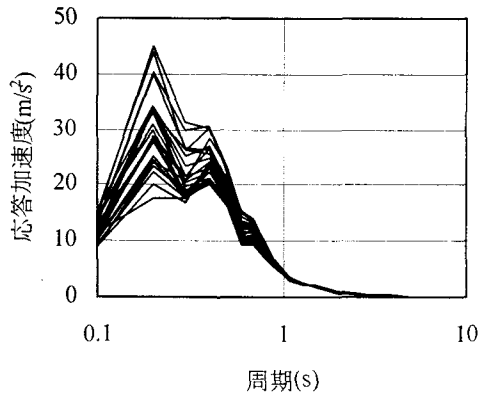


図-10 一次元解析の全ケースの応答スペクトルの比較.

本研究では、応答スペクトルの形状を表現する情報として、周期 0.2, 0.3, 0.4s の時のスペクトル値に着目した。厳密な根拠はないが、個々の応答スペクトル曲線を特定するために最低限必要な情報として 3 点程度の情報量は妥当と思われる。この 3 つの値を出力信号、先の 12 ケースの解析条件（地盤の E と c 、改良範囲）を教師信号とした Neural Network を構築する。教師信号に用いるため、改良範囲を数値化する必要があるが、今回は改良体の平面形状に着目し、改良面積 A 、図心軸に関する加振方向の断面二次モーメント I の 2 つを教師信号に加えることとした。実際の入力の際にはこれらの信号を 0 から 1 の範囲に正規化していることに留意されたい。学習アルゴリズムには、Error Back Propagation 法⁹を採用した。本計算では、結合荷重の調整量の重みを制御する学習速度係数 $\eta = 0.6$ 、前回の結合荷重の調整量の重みを考慮する平滑化係数 $\alpha = 0.4$ とした。

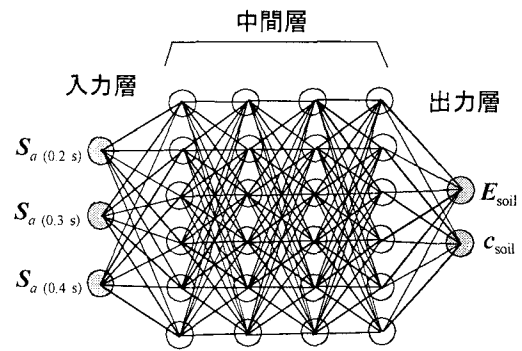


図-11 一次元解析の整理に用いた Neural Network.

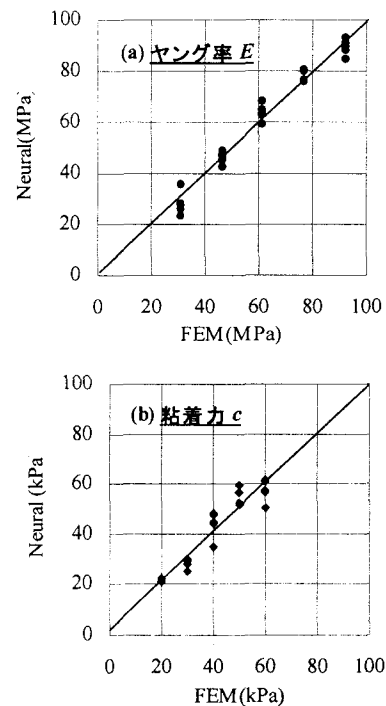


図-12 FEM の入力定数と Neural Network により予測した地盤定数の比較（点が各ケースに対応）.

学習の結果、12 個の解析ケースに対応する入力データに対して良好な予測値を出力する Neural Network が構築された。図-9 は横軸に FEM の結果より直接算出した応答スペクトル値（図-9(a), (b), (c) はそれぞれ周期 0.2, 0.3, 0.4s の値）を、縦軸に Neural Network による予測値をプロットしたものである。両者は完全には一致していないが、工学的に十分な相関性を有していると判断される。

5. 一次元 FEM によるパラメトリック・スタディ

前章までに、任意の改良ケースに関して、周期 0.2, 0.3, 0.4sec の応答スペクトル値を予測するためのシステムが完成した。残された課題は、一次元的弾塑性 FEM による一連のパラメトリック・スタディを行い、改良された地盤

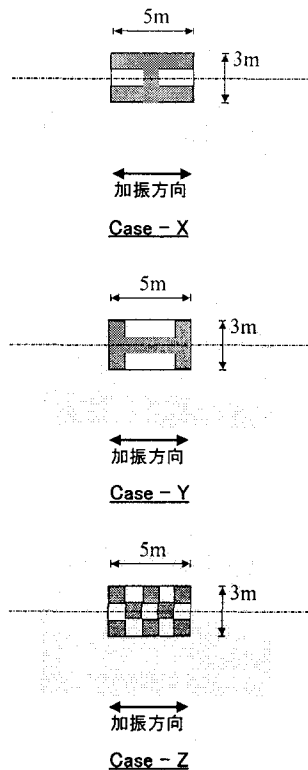


図-13 学習履歴のない条件を用いた解析ケース。

表-4 地盤と改良体の材料定数（学習履歴のない条件）。

(a) 地盤							
Case	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ	γ (kN/m ³)	$b\gamma_{G_0}$	n
X	30.8	0.49	20.	0	16	1.2	2.3
Y	53.8		35.				
Z	69.2		45.				

(b) 改良体							
Case	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ	γ (kN/m ³)	$b\gamma_{G_0}$	n
X,Y,Z	308.	0.49	200.	0	16	1.2	2.3

と等価な均質地盤定数を同定するための第二の Neural Network を構築することである。

表-1 および表-2 を参照して、ここでは表-3 に示すような材料定数を用いた均一地盤に対する計 25 ケースの一次元解析を行った。入力地震波形等はすべて三次元の場合と同様である。すべてのケースについて、地表面の応答加速度の時刻歴から応答スペクトルを算出したものが図-10 である。図-7 に比べてスペクトル曲線の変動幅は大きく、以上のケースにより、三次元 FEM により得られた応答スペクトル曲線のほとんどが包含されると考えられる。

今度は、図-10 のように得られた応答スペクトルの中の周期 0.2, 0.3, 0.4s の時の値を教師信号、その時の地盤の

材料定数の中の E と c を出力信号とした階層型 Neural Network を構築する。中間層数は 4 層とした。模式図を図-11 に示す。Error Back Propagation においては、前章と同様に、温度定数 $T_n = 0.5$ 、学習速度係数 $\eta = 0.6$ 、平滑化係数 $\alpha = 0.4$ とした。

学習が終了した Neural Network に対して、FEM で用いた材料定数の値を横軸、対応する応答スペクトル値をもとに Neural Network から推定した材料定数の値を縦軸にプロットした関係図を図-12 に示す。図-9 と同様に、両者は完全には一致していないが、工学的に十分な相関性を有している。以上より、等価な地盤定数を同定するための二つの Neural Network が構築された。

6. 構築したシステムの有効性検証

提案する予測システムの有効性を検証するため、改良範囲や地盤定数をランダムに選定した 3 ケース（ケース X, Y, Z）に関して、三次元 FEM により求めた地表面の応答スペクトルと提案システムにより同定した地盤定数に基づく一次元 FEM 結果の応答スペクトルとを比較する。当然のことながら、これら 3 ケースは、いずれも前章までの Neural Network を構築するための教師データには扱われていない解析条件である。

これらの各ケースの改良パターンを図-13 に、材料定数を表-4 にそれぞれ示す。材料定数については、これまでの Neural Network の学習では地盤の E と c の連動した変化だけしか考慮していないため、同様に地盤の E と c の値のみを変化させた。改良体についてはこれまでの定数と同一とした。

まず、図-8 と図-11 に示した二段階の Neural Network を順に適用することで、等価な地盤定数を予測する。ケース X, Y, Z について、等価な均質地盤の材料定数を同定した結果を表-5 にまとめた。いずれのケースの同定結果も、原地盤の材料定数と改良体の材料定数との中間的な値を得ている。改良効果の大きなケースほど、同定された定数値が改良体の材料定数に近くなると考えられる。

次に、同定された定数を用いた一次元 FEM 解析を行い、地表面の応答加速度の時刻歴から応答スペクトルを計算する。一方、ケース X, Y, Z をそのまま三次元 FEM 解析し、その結果から求めた応答スペクトルをこれと比較する。以上をまとめたのが図-14 である。応答スペクトルの絶対値だけでなく、スペクトル曲線の形状を良く再現していることが分かる。提案する手法に基づき、柱状改良体を有する複合地盤の地震応答特性に基づく均質モデル化が可能であることが示された。

なお、FEM の結果と提案法の結果が完全に一致するためには、図-8 および図-11 の Neural Network の精度を向上させるため、FEM によるパラメトリック・スタディのケース数を増やすとともに、それに基づく学習作業を繰り返す必要がある。Error Back Propagation 法以外のより優れた

表-5 提案システムに基づく等価な地盤定数の予測結果.

Case	E (MPa)	c (kPa)
X	100.	20.5
Y	63.8	29.5
Z	87.8	47.6

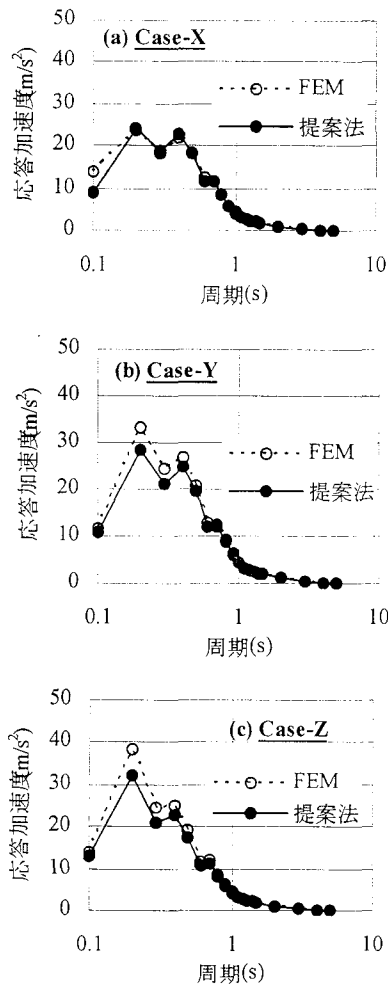


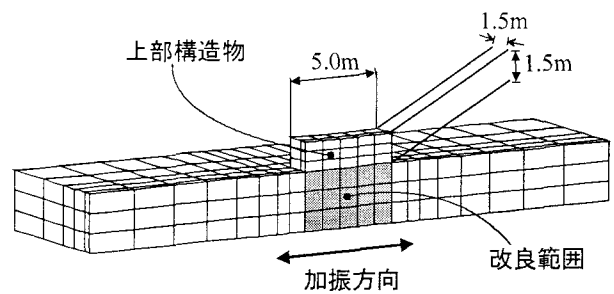
図-14 提案法とFEMの比較（学習履歴のないケース）.

学習アルゴリズム⁷⁾も提案されているが、それらの適用に関しては今後の課題である。

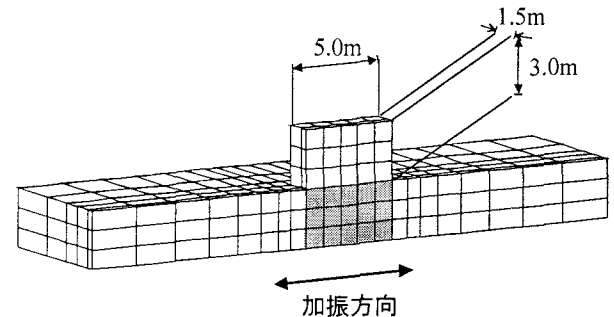
なお、本研究の目的と外れるが、あくまでもFEMは近似解であるため、適切な構成モデルおよび材料定数の選択については今後も実証的な研究の継続が必要であろう。

7. 上部構造物の影響について（今後の課題）

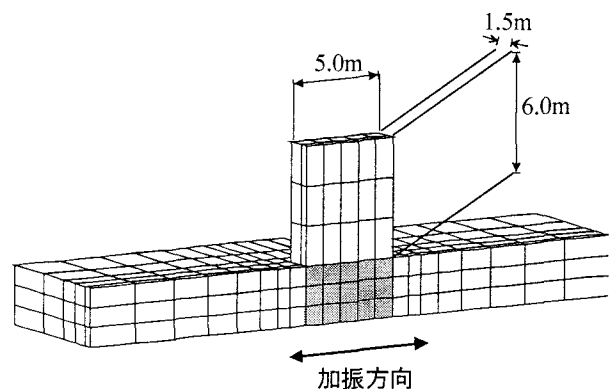
本研究では、地表面位置での応答スペクトル特性に基づいた地盤の均質化について提案を行った。上部構造物の応答特性を応答スペクトルから評価するという立場は、建築構造物の耐震設計に関する現行設計法に則ったものである。現行設計法への準拠を第一に考えるのであれば、地盤



(a) ケースXS-1



(b) ケースXS-2



(c) ケースXS-3

図-15 上部構造物の影響を考慮した解析ケース.

改良を伴わない地盤に対する設計方針と同様に、応答スペクトルのみが適合していれば複合地盤の均質化は適切になされたと評価されよう。

しかし、実際に構造物が存在する系の地震応答特性は、本研究で提案する手法に基づき均質化された地盤と、厳密には異なることが予想される。例えば、柱状改良体への応力集中による局所的な塑性化が進行し、地盤のせん断剛性だけでなく、改良体の鉛直押し込み剛性が現象を左右する因子となる場合が考えられる。

以上の影響を考慮するため、3種類の高さを有する構造物を改良地盤上に設置し、同様に動的応答解析を行った。有限要素メッシュを図-15に示す。構造物は均質な弾性体（ $E = 25000\text{MPa}$ ， $\nu = 0.15$ ， $\gamma = 20\text{kN/m}^3$ ）である

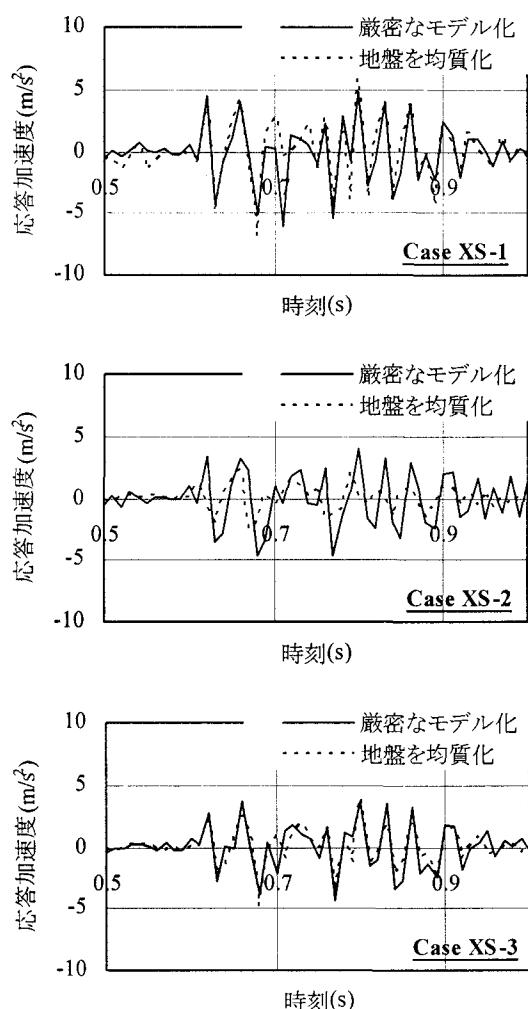


図-16 各ケースの構造物基部の水平応答加速度の時刻歴。

と仮定した。地盤改良のパターンや材料定数等は、いずれも前章のケース X と同一である。一方、提案手法に基づき、ケース X に対して同定した等価な地盤定数は、表-5 で示したように、 $E = 100\text{MPa}$ 、 $c = 20.5\text{kPa}$ であったが、この定数を有する均質な地盤上に構造物が設置されたケースを、図-15 のメッシュを用いて同様に解析した。

これらの各ケースについて、構造物の基礎位置での応答加速度時刻歴をそれぞれ比較したものが図-16 である。時刻歴中の特に応答の大きな時間帯のみを拡大して示した。各ケースともに、厳密なモデルと均質化地盤モデルの時刻歴波形は若干異なることが分かる。設計支援システムの精度をより向上させたい場合には、すでに述べたような地盤改良パターンや各材料定数に加えて、上部構造物の形状を考慮すると、効果的であることが推定される。

より詳細な検討を行うためには、構造物および地盤内の加速度応答の分布性状などについて考察する必要があるが、そのためにはより多くの追加解析を実施することが望まれる。これらの課題をすべて一度に扱うべきか、一部の因子に限定した研究を先行すべきかについては意見の分かれるところと思われるが、今後の継続的な検討課題として取り組んでいきたい。

8. まとめ

本研究において提案した設計支援システムにより、柱状改良体を有する複合地盤の地震応答特性に基づく均質モデル化が可能であることが示された。

将来、より多くの因子を取り込んで同様のシステムを構築することで、実務設計に適用可能な、優れた物性値同定システムが完成する。それには FEM による一連のパラメトリック・スタディにおいて考慮する条件をさらに増やすことが必要である。具体的には、基礎投影面積、改良体の範囲、深さ、地盤内の成層構造、地盤の E と c 以外の材料定数、改良体の材料定数などを変動させた多くのケースの追加解析が必要である。

また、本システム構築のメリットを最大限生かすため、設計に必要なかつ十分な情報が提供される入出力インターフェイスを実装することも今後重要であろう。三次元動的弾塑性 FEM のように多大な労力を要することなく、Neural Network により、一般の設計者が容易に高精度の解を求めようということは極めて工学的意義が大きい。

謝辞

ソイルセメントコラム工法に関して貴重なご助言を戴いた「公団ソイルセメントコラム工法設計・施工指針」改訂委員会（二木幹夫委員長）の方々 に記して謝意を表します。

また、Neural Network の教師データに弾塑性 FEM の結果を適用する発想は、東電設計株の信岡卓氏と阿南健一氏ら⁸⁾ が斜面崩壊予測に関して実施中の一連の研究の立場を参考にしたものであるため、ここに記して厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 二木幹夫・前嶋匡：ソイルセメント柱体（コラム）の水平支持力特性に関するシミュレーション，第 29 回土質工学研究発表会，pp.2297-2300，1994。
- 2) 横田康行・前田良刀・落合英俊・大和章一：改良地盤上の直接基礎の支持力特性に関する三次元的検討，第 47 回地盤工学シンポジウム論文集，pp.271-278，2003。
- 3) 佐藤友美・桑原直範・前田健一：均質化応答解析による締固め砂杭液状化対策地盤の液状化特性と耐震性能評価，第 47 回地盤工学シンポジウム論文集，pp.173-178，2003。
- 4) 若井明彦・鶴飼恵三：土の $G-\gamma$ 、 $h-\gamma$ 関係と Mohr-Coulomb の破壊規準を考慮した斜面の動的弾塑性応答解析，地震時の斜面の不安定化メカニズムと設計法に関するシンポジウム論文集，地盤工学会，pp.39-44，1999。
- 5) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，pp.196-202。
- 6) McClelland, J. L. and Rumelhart, D.E. : Explorations in Parallel Distributed Processing, Cambridge, MA, MIT Press, 1988。
- 7) 村瀬治比古・小山修平・石田良平：パソコンによるカルマンニューロコンピューティング，森北出版株式会社

社, 1994.

- 8) 信岡卓・阿南健一・鵜飼恵三・若井明彦・蔡 飛：急傾斜地の斜面崩壊予測支援システムの開発検討, 第38回地盤工学研究発表会, 2003.
- 9) 地盤工学会編：弾塑性有限要素法がわかる, 地盤技術者のためのFEMシリーズ②, pp.23-24, 2003.
(2004年4月16日 受付)