

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 908 Sept. 1998

液状化による不同沈下の予測手法の開発

宮	田	正	史
井	合		進
一	井	康	二

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 液状化による不同沈下の予測法	4
2. 1 予測法の骨子	4
2. 2 空間的ばらつきを持つ地盤物性のモデル化	5
2. 3 各地盤要素の沈下量算定法	6
2. 4 地表面の沈下量算定法	9
2. 5 本予測手法の解析手順	9
2. 6 本予測法に必要なパラメータ	10
2. 7 本予測法による算定結果の種類	11
3. 空間的ばらつきを持つ地盤物性の評価方法	12
3. 1 N値の分散および水平方向相関係数の算定法	13
3. 2 層厚の分散および水平方向相関係数の算定法	14
4. 液状化による不同沈下の計算例	15
4. 1 標準計算モデル	15
4. 2 試行回数・分散・水平方向相関距離等による影響	16
5. 結論	21
6. おわりに	21
参考文献	22
記号一覧	22
付録	23

Estimation of Differential Settlements due to Liquefaction

Masafumi MIYATA *
Susumu IAI **
Koji ICHII ***

Synopsis

Among various types of damage due to liquefaction of ground, differential settlements of foundation ground have a direct impact on large structures such as runways of airports and highways.

In the present study, a new method to estimate differential settlements due to liquefaction is proposed. The method is based on the Monte Carlo simulation, taking into account the spacial variability of geotechnical properties of subsoil profile. Typical examples of the results by the proposed method were shown to discuss the application of the present method in practice. These results show that the correlation distance b , the key parameter relevant to the spacial correlation of soil properties, has an important effect on the computed differential settlements.

Keywords : Liquefaction, Differential Settlements, Earthquake, Spacial Variability of Geotechnical Properties, Monte Carlo Simulation

-
- * Research Engineer, Structural Dynamics Laboratory, Structures Division
(3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 PHONE:+81-468-44-5029, FAX:+81-468-44-0839, E-mail:miyata@cc.phri.go.jp)
- ** Chief of Geotechnical Earthquake Engineering Laboratory, Structures Division
- *** Senior Research Engineer, Geotechnical Earthquake Engineering Laboratory, Structures Division

液状化による不同沈下の予測手法の開発

宮田正史* *

井合進**

一井康二***

要 旨

本研究では、液状化による広域地盤の不同沈下を予測する手法を開発した。本予測手法では、現実の複雑な地盤条件が不同沈下の算定になるべく合理的に反映されるように、地盤物性値の空間的ばらつきと水平方向への相関性および沈下をもたらす土要素間の3次元的な相互作用を考慮するものとしている。ここでいう地盤物性値とは、液状化による不同沈下に密接に関係するN値、層厚などを意味し、不同沈下に関する予測結果は、モンテカルロ法を用いて、確率的な解として算定するものである。

開発した手法の基本的な特性を把握・検討するために、計算の試行回数や地盤条件をパラメータとした例題計算を行った。この結果、本予測法においては、地盤のN値および液状化層厚の水平方向への相関性が、地盤の不同沈下に大きな影響を及ぼすことが確認された。

キーワード：液状化、不同沈下、地震、数値計算、地盤物性値の空間的ばらつき、モンテカルロ法

* 運輸省港湾技術研究所 構造部構造振動研究室
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1、TEL：0468-44-5029、FAX：0468-44-0839、E-mail：miyata@cc.phri.go.jp)

** 運輸省港湾技術研究所 構造部地盤震動研究室長

*** 運輸省港湾技術研究所 構造部地盤震動研究室

1. はじめに

地震時の液状化によってもたらされる構造物の被害形態には、種々のものがある。その中で、空港滑走路や高速道路などのように、特に高精度の平面性が要求される構造物では、液状化による広域の不同沈下が構造物の機能障害に結びつく例が多い。例えば、空港滑走路において液状化による地盤の不同沈下が発生した場合、滑走路に許容レベルを越える勾配が生じると、航空機の離発着がきわめて困難となることが挙げられる。

このような広域地盤を対象とした液状化による不同沈下の予測手法は確立されていない。予測手法が確立されていない理由として、1)広域地盤の地盤物性値の評価が難しいこと、2)液状化による地盤の不同沈下の実測例が少なく、解析モデルの適用性の検討が困難なこと、が挙げられる。前者について言えば、対象領域の地盤物性値が全て既知であれば、原理的には不同沈下の予測は可能である。しかし、実際には代表的と思われる調査点で地盤調査を実施し、その結果に基づいて検討対象全域の地盤条件を評価せざるを得ない場合が多い。このような従来型の調査法では、対象地盤の平均的な地盤物性値を評価することはできても、不同沈下に関する地盤物性値の空間的なばらつきを評価することは困難である。

本研究では、このような現状を踏まえ、地盤の物性値の空間的なばらつきを確率論的に評価し、これに基づいて液状化による不同沈下予測を行う新たな手法を開発することを目的とした。したがって、この手法の構築にあたっては、地盤物性値の空間的なばらつきに関する情報を、どのように反映させるかについて検討することが焦点と

なる。本報告では、開発した予測法の内容、予測の手順および予測に必要なパラメータを示している。また、本予測法を用いた例題計算を行い、本予測法の基本的な特性を検討している。

2. 液状化による不同沈下の予測法

本章では、開発した予測法の内容・解析手順、解析に必要なパラメータおよび解析結果として得られる算定項目について説明する。2.1に予測法の骨子を、2.2～2.4に解析理論を、2.5に全体の解析手順を、2.6に本予測法に必要なパラメータを、さらに2.7に本予測法による算定項目を示す。

2.1 予測法の骨子

先に述べたとおり、空港滑走路などのように高精度の平面性が要求される構造物では、液状化による広域の不同沈下が構造物の機能障害に結びつく例が多い。例えば、1964年の新潟地震では、図-1 および写真-1 に示すように、液状化により滑走路面に不同沈下が発生し、航空機の離発着をはじめとする空港の基本的な機能が停止した¹⁾。このような基本的な空港機能を維持できるか否かの限界は、滑走路面の凹凸を形成する一つ一つの山(谷)の高さや幅に関するものと考えられる。新潟空港の場合、図-1 に示すように、この山の高さは大まかには30cm程度、また、幅は50mから100m程度のオーダーを示している。液状化による不同沈下の予測においては、このような地表面の凹凸を定量的に算定することが、最終目標となる。

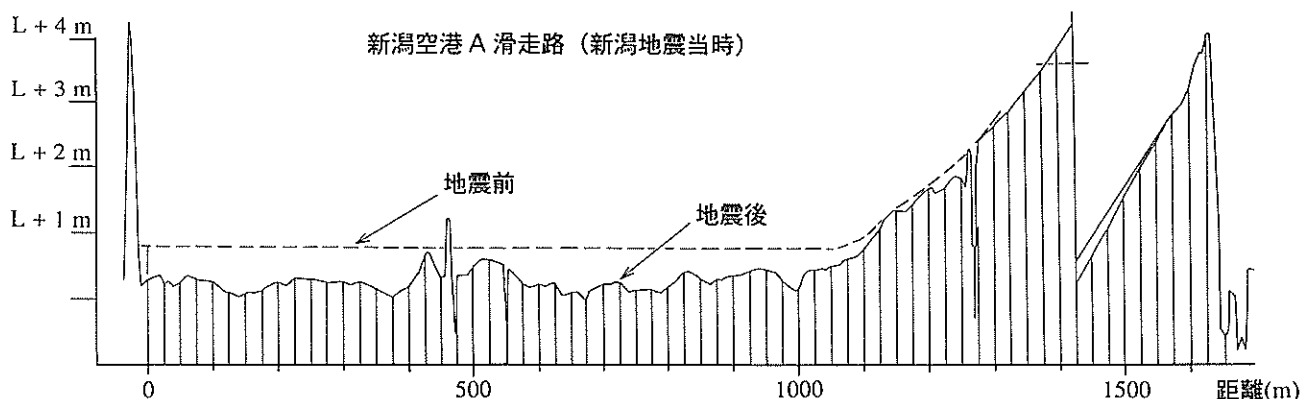


図-1 新潟空港滑走路の地震前後の地表面高さの分布 (1964年新潟地震)



写真-1 新潟空港B滑走路の被害状況(1964年新潟地震)

このような不同沈下の特性は、地震動の条件と地盤条件によって決定づけられると考えられる。例えば、地震動の空間的なばらつきが著しければ、これに応じて、地盤の液状化の程度が異なり、著しい不同沈下が発生する。同様に、地盤の液状化特性や液状化にともなう沈下特性に関連する地盤物性値（たとえば、N値など）のばらつきが著しければ、これに応じて地盤の液状化・沈下程度が空間的に異なり、著しい不同沈下が発生する。このような空間的にばらつきをもつ地震動および地盤条件は、本来は、個々の地震と地盤の条件に応じて、確定した値をとるものであり、その条件に応じて不同沈下も決定づけられる。しかし、このように決定論的に地盤物性値などを確定するのは、実際の地震・地盤条件があまりに複雑すぎるため、現実には困難である。

このような問題を解決するためによく用いられる手法として、確率論的手法がある。この手法では、地盤のばらつきをマクロに捉え、地盤物性値がある平均値のまわりに一定の分散でばらつくものと見なす。この方法によれば、液状化による不同沈下に関するN値や層厚などの地盤物性値は、同一土層内で、統計的に見て同じ平均値、分散を持つものとし、これに従ってランダムに変動するものと見なす。これにより、同一土層内でも、相隣り合う2点間では、一定の確率に従って異なった物性値を持つこととなり、全体として、空間的にばらつきを持つ地盤条件を表現するものである。

ただし、ランダムに変動するとはいっても、空間的に比較的近い距離にある2点間の地盤物性値は、それなりに似通った値をとるものと考えるのが自然である。その程度を定量的に表現する指標が空間的相関関数である。これは、ランダムに変動する2点間の確率変数の相関係数を、2点間の距離の関数として定義したものである。

このような空間的相関関数を導入することにより、不同沈下予測が、より合理的に行えることとなる。例えば、地盤物性値の空間的な相関が高い場合には、地盤は広域にわたって一様に沈下する傾向を示す一方、空間的な相関が低い場合には、地盤は不均一に沈下する傾向を示す。空間的相関関数の導入により、このような傾向を不同沈下予測において定量的に考慮することができるようになるものと考えられる。

本研究で開発した予測法は、このような確率論的アプローチを液状化による不同沈下に応用したものである。さきに述べたとおり、地盤の液状化程度には、地震動レベルと地盤の液状化抵抗の両者が関係する。また、その結果発生する沈下量には、液状化程度に応じた塑性体積ひずみや液状化層厚が関係する。最終的に発生する地表面の不同沈下量は、3次元的地盤構成と液状化した土要素の相対位置にも関係する。本予測法においては、これらの主要な要因を逐一考慮して、確率論的な解としてモンテカルロ法により不同沈下を予測するものである。なお、既往の研究として、このようなアプローチを粘土地盤の圧密に伴う不同沈下の予測に適用した例がある²⁾。

2.2 空間的ばらつきを持つ地盤物性のモデル化

本節では、空間的ばらつきを持つ地盤物性値のモデル化の理論を説明する。この理論においては、図-2に示すように、地盤を多数の要素に分割して考える。今、同深度にある2要素の中心点を*i*、*j*とし、その間の距離を r_{ij} とする。任意の要素中心点*c*における地盤の物性値を、それぞれ平均 X_c 、標準偏差 σ_c なる確率変数 X_c ($c=1,2,\dots,P$)として与えると、*i*、*j*点間の相関係数 τ_{ij} は次式で与えられる。

$$\tau_{ij} = \frac{\text{cov}[X_i, X_j]}{\sigma_i \sigma_j} \quad (1)$$

ここに、 $\text{cov}[X_i, X_j]$ は、 X_i と X_j の共分散である。ここで、相関係数 τ_{ij} が*i*、*j*点間の距離 r_{ij} によって一義的に規定されるものとし、次式による関数形を仮定する。

$$\tau_{ij} = \exp\left(-\frac{r_{ij}}{b}\right) \quad (2)$$

ここに、*b*は相関距離と呼ばれ、*b*が大きいほど広域にわたって相関が強いことを示す。この相関距離*b*は、後述する実際の土質調査より求めることができる。相関係数 τ_{ij} の例として、図-3に*b*=30 mの場合の相関係数

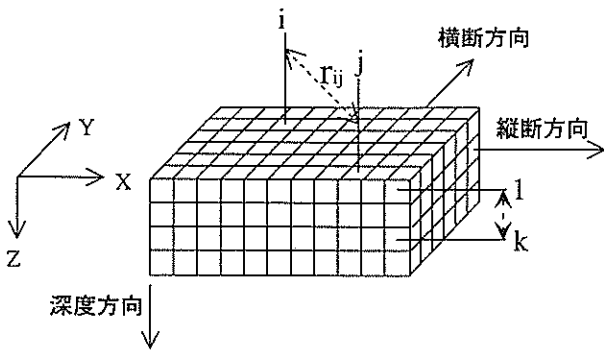


図-2 地盤要素の分割モデル

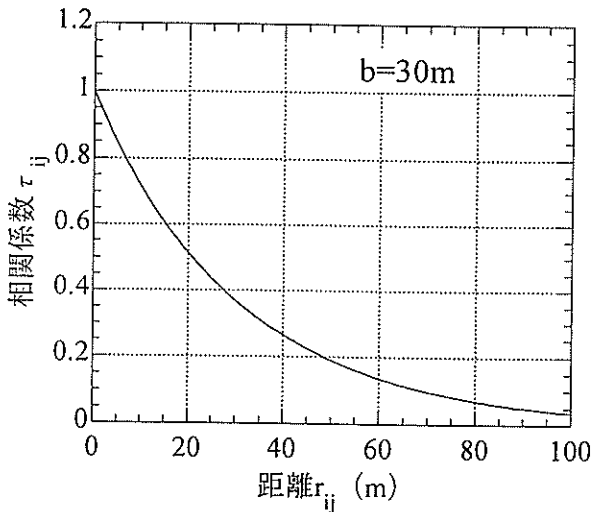


図-3 水平方向相関係数と距離の関係 (相関距離 b=30m)

を示す。本来であれば、実際の地盤物性値の空間的ばらつきのデータを基に、これを最も適切に表現する関数形を選定することが望ましい。しかし、本研究では、まず、手始めとして、式(2)の関数形を仮定して、以下の検討を進めることとした。

確率変数ベクトル $\{X\}^T = \{X_1, X_2, \dots, X_P\}$ に対する共分散マトリックス $[C_X]$ は、標準偏差 σ 、相関係数 τ_{ij} を用いて、次式で与えられる。

$$[C_X] = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 \tau_{12} & \dots & \sigma_1 \sigma_p \tau_{1p} \\ \sigma_2 \sigma_1 \tau_{12} & \sigma_2^2 & \dots & \sigma_2 \sigma_p \tau_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_p \sigma_1 \tau_{p1} & \sigma_p \sigma_2 \tau_{p2} & \dots & \sigma_p^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

これを、例えば下三角行列 $[C_X^*]$ を用いて、

$$[C_X] = [C_X^*] \cdot [C_X^*]^T$$

$$[C_X^*] = \begin{bmatrix} c_{11} & & & \\ c_{21} & c_{22} & & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{p1} & c_{p2} & \dots & c_{pp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

のようにLU分解すれば、各要素の確率変数 X_c は、平均0、分散1の P 個の独立な正規乱数 a_c ($c=1, 2, \dots, P$) を用いて、以下のように与えられる。

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \\ \vdots \\ \bar{X}_p \end{Bmatrix} + [C_X^*] \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{Bmatrix} \quad (5)$$

不同沈下の予測にあたっては、地盤の N 値と層厚を確率変数として与える。これらの地盤物性値のばらつきは、式(5)により表現され、同式におけるマトリックス $[C_X^*]$ の対角項が各点でのランダムな変動分を、また、同マトリックスの非対角項が空間的相関の寄与分を表す。

実際の計算における入力データとしては、 N 値と層厚に関して相関距離 b および分散 σ を与える必要がある。これらの値は、本来は、 N 値と層厚とでは、それぞれ異なるものとなるはずであり、また、土層ごとに異なる値をとるものと考えられる。しかし、計算時間の節約の観点から、LU分解を一回で済ますことがのぞましく、このためには、式(2)～(4)により理解されたとおり、すべての土層に共通する相関距離 b および分散 σ を与えることが必要である。さらに、 N 値および層厚について、同一の相関距離を用いることにより、LU分解は両者に共通して一回で済ますことができる。そこで、以下の解析では、計算時間の節約の観点から、このような単純化のための条件を課して数値解析を実施している。

2.3 各地盤要素の沈下量算定法

本節では、各地盤要素ごとに発生する沈下量の算定法を、図-4のフローチャーを用いて説明する。なお、本節の文中で、() 内に丸印で示す番号は、図-4中の番号と対応している。

この算定法は、基本的には、2.1で述べたとおり、対象とする地盤要素の液状化の程度を予測し、これに基づいて沈下量を算定するものである。液状化の程度の予測

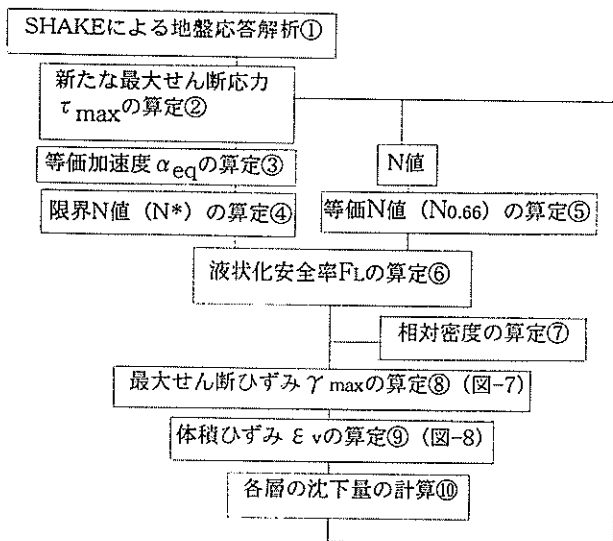


図-4 各地盤要素の沈下量算定手順

には、液状化に対する安全率に相当する指標（液状化安全率）を用いる。この指標 F_L は、式(6)により定義する(6)。なお、本来の液状化安全率の定義は、せん断応力比の比として定義されるが、ここでは付録に示す理由のため、式(6)の定義としている。

$$F_L = \frac{N_{0.66}}{N^*} \quad (6)$$

ここに、 $N_{0.66}$ は液状化抵抗の指標として港湾地域における液状化の予測・判定に広く用いられている等価N値³⁾（有効上載圧力 0.66 kgf/cm^2 に換算したN値）を示し、次式により求められる(5)。

$$N_{0.66} = \frac{N - 1.828 (\sigma'_v - 0.66)}{0.399 (\sigma'_v - 0.66)} \quad (7)$$

$$\left\{ 0 \leq \sigma'_v \leq 3 (\text{kgf/cm}^2), 2 \leq N_{0.66} \leq 40 \right\}$$

ここに、 σ'_v は有効上載圧力、 N は標準貫入試験のN値である。

式(6)の分母 N^* は液状化の発生限界の指標ともいえる限界N値であり、対象とする地震によって地中に発生するせん断応力比が作用した時に、液状化する地盤のN値の上限値（非液状化にとどまる地盤のN値の下限値と一致する）を表す。限界N値は、地盤の地震応答計算に基づき、以下のようにして算定する。

まず、各地盤要素に作用する最大せん断応力 τ_{\max} (2) を、等価線形地震応答解析 (SHAKE⁴⁾) (1) に

より算定する。次に、港湾の液状化予測・判定法³⁾ に従い、等価加速度 α_{eq} (3) を次式により算定する。

$$\alpha_{eq} = 0.7 \times \frac{\tau_{\max}}{\sigma_v} \times g \quad (8)$$

ここに、 g は重力加速度である。

算定された等価加速度をもとに、港湾の液状化予測・判定法³⁾ の判定チャート (図-5) に基づき、限界N値を算定する。同図中に示すとおり、チャートの領域IIとIIIの境界線が、液状化発生有無の境界となっており、この境界線上で、算定した等価加速度に対応する等価N値が、算定すべき限界N値となる。なお、このチャートを利用する前に、対象地盤の粒度範囲を図-6 に基づき定める必要が有る。

次に、既往の室内試験の結果⁵⁾ を利用して (図-7)、式(9)に示す推定相対密度 D_r^* (%) (7) をパラメータとして、液状化安全率 F_L (6) より最大せん断ひずみ (γ_{\max}) を算定する(8)。さらに、液状化した砂の最大せん断ひずみと体積ひずみ (ϵ_v) に関する室内試験の結果⁵⁾ (図-8) に基づいて、過剰間隙水圧消散後の液状化地盤要素の体積ひずみを算定する(9)。

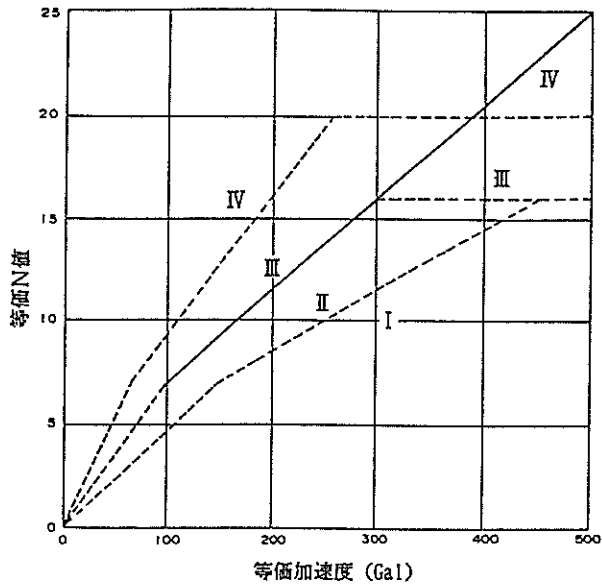
$$D_r = 21 \times \sqrt{\frac{N}{(\sigma'_v + 0.7)}} \quad (9)$$

各地盤要素の沈下量 s^* は、地盤要素の体積ひずみおよび地盤要素の厚さ ΔH を用いて、次式により算定する(10)。

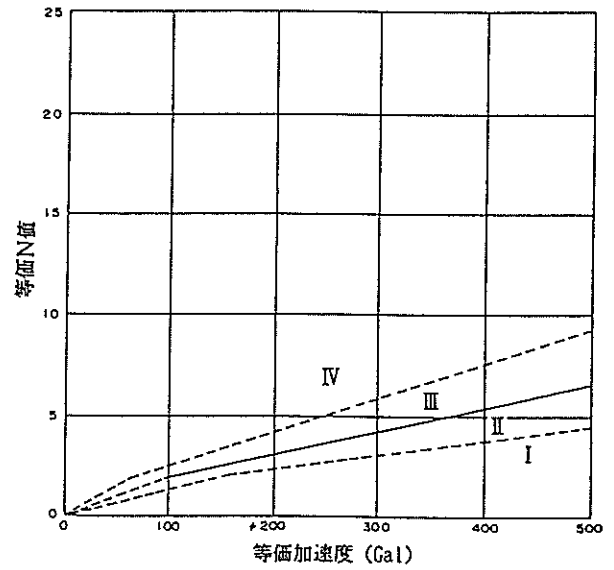
$$s^* = \Delta H \times \epsilon_v \quad (10)$$

先に述べたとおり、本予測法は確率論的手法に基づくものであり、以上の算定においては、地盤の物性値および最大せん断応力を確率変数として与える。具体的には、式(7)におけるN値、式(8)における最大せん断応力、および式(10)における地盤要素の厚さの値は、モンテカルロの試行毎に変化する(2)。

なお、確率論的解析に必要となる最大せん断応力の平均値と分散は、以下のようにして算定する。まず、地盤物性値 (N値と層厚) についてモンテカルロの試行を行い、確率的なばらつきを考慮した地盤モデルを求める。このモデルを用いてSHAKEの計算を適当回数行い、その結果得られた最大せん断応力のばらつきをもとに、その平均値と分散を求める。



(a) 粒度範囲Aの土層に対するもの



(b) 粒度範囲B,およびBcの土層に対するもの

図-5 等価加速度と等価N値による液状化予測のための土層の分類³⁾

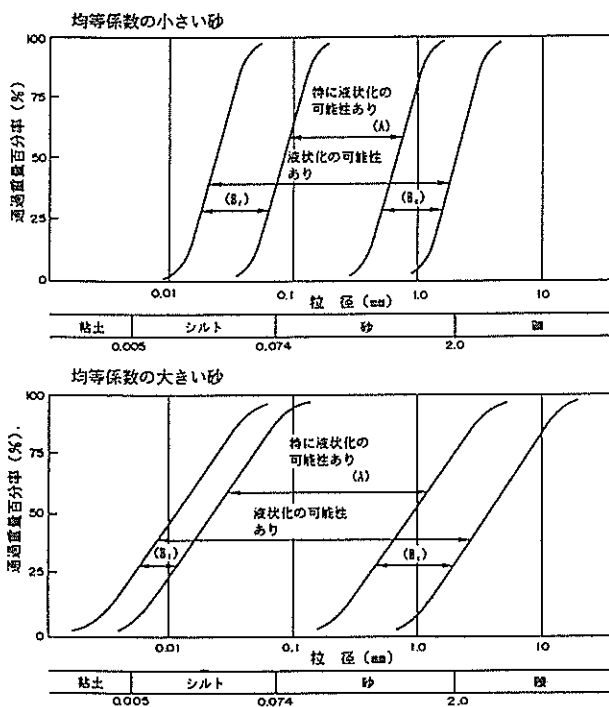


図-6 液状化の可能性のある土の粒度³⁾

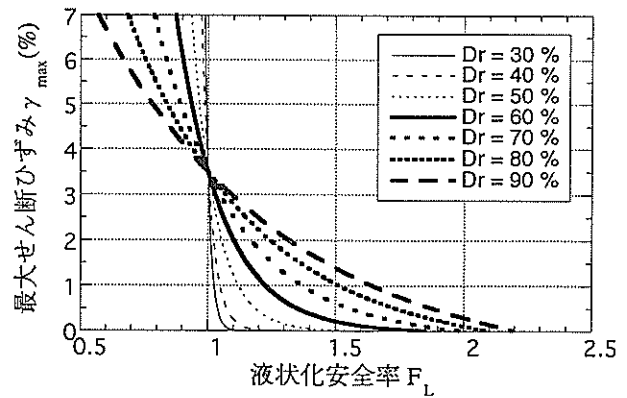


図-7 最大せん断ひずみと安全率の関係⁵⁾

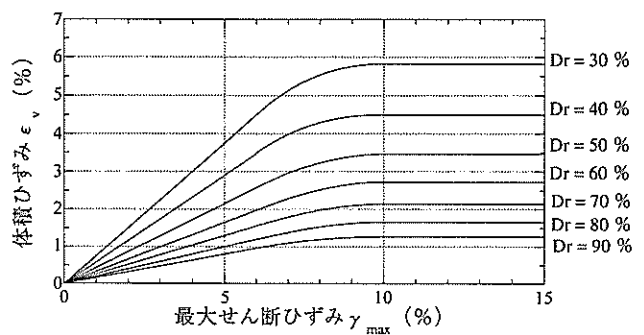


図-8 最大せん断ひずみと体積ひずみの関係⁵⁾

2. 4 地表面の沈下量の算定法

2. 3節では、各地盤要素の沈下量を独立に算定している。この算定結果を用いて地表面の沈下量を算定するが、地盤沈下の実現象として、各地盤要素が独立に沈下するとは考えられない。実際は、ある地盤要素が沈下（鉛直方向の体積収縮）した場合、その周辺地盤を引きずるように沈下すると考えられる。従って、不同沈下の算定において、地盤要素間の沈下の相互作用を考慮する必要がある。このため本予測法では、3次元的な沈下の相互作用を考慮するために、以下に示す沈下に関する影響係数を導入している。

沈下に関する影響係数を導入するにあたっては、沈下について着目する地表面の位置と各要素の平面的な相対位置および深さ方向の位置関係（3次元的な位置関係）を考慮する必要がある。このうち、平面的な位置関係については、先に図-2に示したとおり、各要素の（平面的な）中心点 j により規定することができる。深さ方向については、同図に示したように、上から k 番目の要素の（深さ方向の）中心点を k とすることにより同様に規定される。このように各要素の中心点の番号を規定すると、鉛直断面内において、沈下に関する影響係数は、図-9を用いて定義することができる。同図において、深度 D 、幅 B なる要素 jk が S_{jk}^* 沈下した場合、その地盤要素の上方地表面の各点 $i = j, j+1, j+2, \dots$ における沈下量を S_{ijk} とすると、次式に示すように影響係数 I_{ijk} ($k=1, 2, \dots, u$) が定義される。

$$I_{ijk} = \frac{S_i}{S_{jk}^*} \quad (11)$$

ここで、影響係数が既知ならば、 i 地点の地表面沈下量 S_i は、各地盤要素 jk による沈下量 S_{ijk} に、影響係数を乗じた値の合計として、次式より求められる。

$$S_i = \sum_j \sum_k I_{ijk} \cdot S_{jk}^* \quad (12)$$

以上の方法により、隣接した地盤要素同士で地表面の沈下を配分し合い、液状化による地盤沈下時の地盤要素間の相互作用を近似的に考慮することが可能となっている。本予測法で用いた影響係数は、軸対称条件のもとFEM弾性解析を行うことにより算定した。

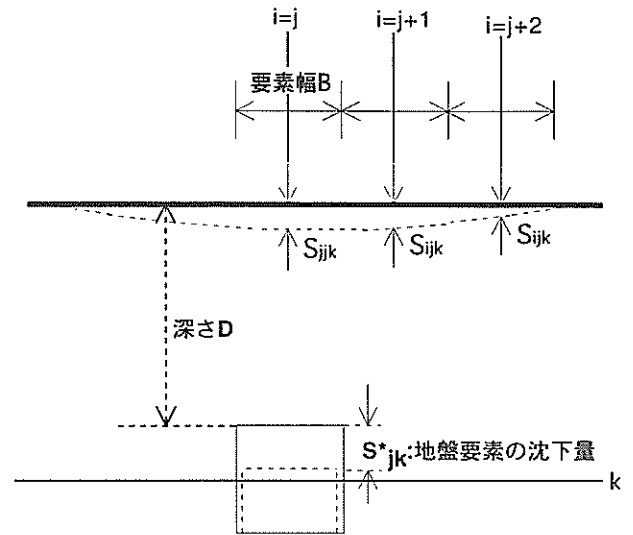


図-9 沈下に関する影響係数の定義

2. 5 本予測法の解析手順

液状化による不同沈下予測の理論は、以上のとおりであるが、これらの理論を用いて、実際に解析を行う際の手順を以下に具体的に示す。この手順は、概ね図-4に示すものと同様であるが、本節では解析手順がより明確となるように、そのフローを、図-10に示すように簡略化して示した。以下、これに沿って、本予測法の解析手順を説明する。なお、本節文中の()内に示す丸印番号は、図中の番号に対応している。

(1) データ入力 (①)

本予測法の入力データとして、計算対象領域・要素サ

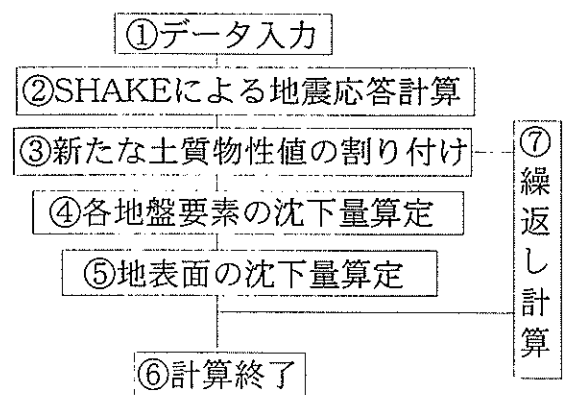


図-10 本予測法の解析手順

イズ・境界条件等の計算条件、対象地盤のN値・層厚・単位体積重量・細粒分含有率・土質分類等の地盤条件および入力地震波形の入力が必要である。特に、地盤条件の内、N値および層厚の分散・相関距離は、対象地盤のN値および層厚の空間的ばらつきに合致した値を与える必要がある。N値および層厚の分散の与え方については、3章に詳しく述べる。

(2) SHAKEによる地震応答解析 (②)

(1) で与えられた地盤条件のもと、SHAKEによる地震応答解析を行い、対象地盤中の各要素に作用する最大せん断応力を求める。得られた最大せん断応力は、(4) に示す地盤要素の沈下量算定に使用される。従って、地盤条件や地震波の種類・加速度レベル等は、不同沈下の計算結果に影響を及ぼすことになる。

(3) 水平方向の地盤物性値の相関 (③)

地盤物性値は確率変数として繰返し計算毎にランダムに与えられる。従って、本予測法では、各地盤要素のN値と層厚は正規確率変数に従い計算毎にランダム変動するが、それらの値は各試行毎に見ると、水平方向に相関を持つように与えられる。

(4) 各地盤要素の沈下量算定 (④)

(2) および(3) で求めた最大せん断応力と地盤N値より液化化安全率を算定し、2.3 に示した手順で、地盤中の各要素の沈下量の算定を行う。但し、本予測法の沈下計算は、液化化の可能性のある砂質土を対象としている。従って、粘性土と判断された土層については、地震時の液化化による沈下は生じないと仮定している。

(5) 地表面の沈下量 (⑤)

(4) で算定した地盤中の各地盤要素の沈下量と2.4 に示した沈下に関する影響係数から地表面の沈下量を算定する。これにより、地盤の沈下時における要素間同士の3次元的な相互作用が近似的に考慮することができる。

(6) 地盤物性値のばらつきとモンテカルロ法 (⑥・⑦)

既に述べたように、本予測法では、地盤の液化化沈下量に関する地盤のN値と層厚を、あるばらつきを持った正規分布に従う確立変数として与えている。従って、本予測法では計算試行毎に地盤条件が変化しており、モンテカルロの繰返し計算を行うことより、地盤の沈下分布に関する確率的な解が求められる。

2.6 本予測法に必要なパラメータ

表-1 に、本予測法に必要な計算条件、地盤条件等の一覧を示す。本節では、表中の項目の中で、その設定に特に注意が必要なものについて説明を行う。

(1) 要素サイズ

水平方向の要素幅は、地表面の沈下形状を詳細に表現できるように、ある程度小さい幅とする必要がある。地盤物性の水平方向の相関が高い領域(相関距離程度の幅)において不同沈下による山や谷が一つ形成されると仮定すると、その一つの山(谷)を表現できる分割数が要素幅の目安となる。

(2) 繰返し計算回数

モンテカルロ法による計算の繰返し回数(試行回数)が少ない場合、不同沈下に関する正確な算定結果が得ら

表-1 本予測法に必要な計算条件および地盤条件の一覧

計算条件
計算領域
メッシュサイズ
繰返し計算数
境界条件
地盤物性値の補間方法
地震波の選定

地盤条件	
土質調査	土質調査位置
	地下水位
	N値
	単位体積重量
	細粒分含有率
土層区分	各層のN値・層厚の分散
	各層の土質分類
	港湾基準による粒度分布
	各層のN値・層厚の水平方向相関係数
	最大せん断応力の分散

れない。従って、試行回数は、算定結果が試行回数に依存しないような回数以上に設定する必要がある。

(3) 地盤物性値の補間方法

N値および層厚等の地盤物性値は、土質調査地点以外では得られない。従って、調査点間の地盤物性値は、土質調査地点間を補間することにより与える。補間方法は、直線補間、重み付平均、曲線近似等の中から対象断面に応じた方法を選択する。なお、補間方法の詳細については、本報告では言及していない。

(4) 境界条件

沈下に関する影響係数を導入することにより、沈下の相互作用の影響を考慮している。しかし、計算領域の境界外側の各地盤要素の沈下データは存在しないため、沈下に関する影響係数による地表面沈下量の算定はできなくなる。これを回避するため、本予測法では、以下に示す2種類の境界条件を仮定している。一つは、計算領域の境界面に対して、各地盤要素の沈下量が対称であるとする仮定、二つ目は境界外側の各地盤要素の沈下量は、境界面の沈下量と等しいとする条件である。これらの境界条件により、境界付近の地表面沈下量の算定が可能となる。

(5) 地下水位

本予測法において、地下水位以浅の地盤は液状化しないとして評価される。従って、地下水位深度は、液状化判定の重要なパラメータであり、入力データとして必要不可欠なパラメータである。地下水位の補間方法も、(3)に示す地盤物性値の場合と同様の方法により行うことができる。

(6) 各土層のN値・層厚の分散及び水平方向相関係数

これらのパラメータは、不同沈下の計算結果に大きな影響を及ぼすと考えられるため、その設定には十分な注意が必要である。実際の地盤調査から、これらのパラメータを求める方法の詳細は3章に示す。

(7) 最大せん断応力の分散

地盤に作用する最大せん断応力の分散は、N値および層厚の分散と同様、不同沈下の計算結果に大きな影響を及ぼすと考えられるため、その設定には十分な注意が必要である。最大せん断応力の分散については、2.3で述べた方法によって設定する。

2.7 本予測法による算定結果の種類

本節では、本予測法による算定結果の項目およびその内容を示す。本予測法は、モンテカルロ法による繰返し計算であるため、地表面沈下量はモンテカルロの計算試行毎に算定される。また、全試行終了後に、地表面沈下

量および不同沈下量の平均、分散、最大値が得られることになる。図-11に本予測法における不同沈下の定義を、図-12に要素分割図を示す。

(1) 地表面の絶対沈下量

地表面の絶対沈下量は、地表面の各要素中央点における地震前の原地盤面からの平均的な沈下量を表す。モンテカルロの試行計算毎に、対象領域の地表面の沈下量が得られる。ここで、試行回数第 l 回目における i 地点の地表面位置における絶対沈下量を $S(l)_i$ 、全試行回数を L とすると、地表面沈下量に関して以下に示す結果が得られる。

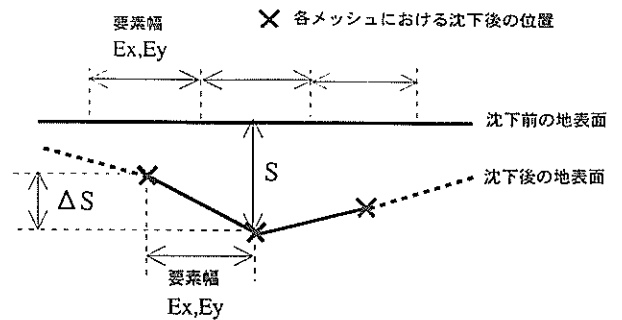


図-11 不同沈下の定義

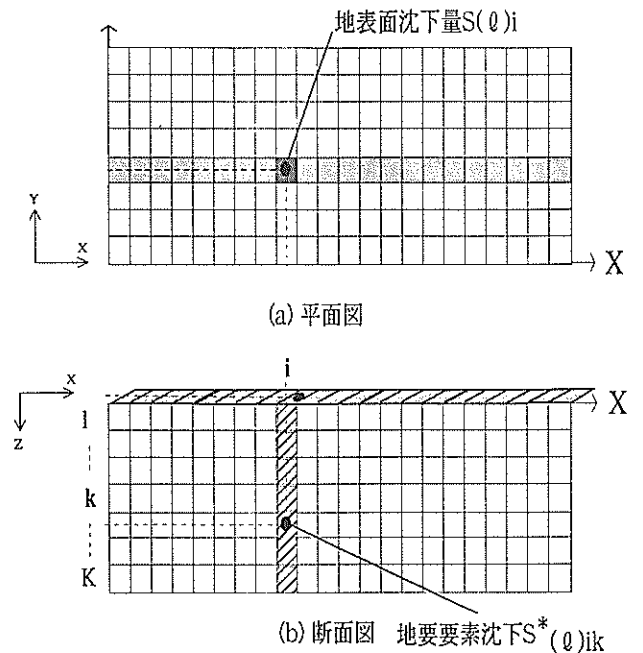


図-12 地盤要素の分割モデル

・試行 l 回目における計算対象領域の地表面平均沈下量、分散、最大沈下量を式(13)、(14)、(15)に示す。

$$\bar{S}^{(l)} = \frac{1}{P} \sum_i S^{(l)}_i \quad (13)$$

$$\sigma_{S^{(l)}}^2 = \frac{1}{P} \sum_{ii} \left(S^{(l)}_i - \bar{S}^{(l)} \right)^2 \quad (14)$$

$$S_{(l)\max} = \max \left\{ S^{(l)}_i \right\} \left\{ \text{for } i = 1 \dots P \right\} \quad (15)$$

・全試行 L 回後の i 地点の地表における、地表面平均沈下量、分散、最大沈下量を式(16)、(17)、(18)に示す。

$$\bar{S}_i = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L S^{(l)}_i \quad (16)$$

$$\sigma_{S_i}^2 = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \left(S^{(l)}_i - \bar{S}_i \right)^2 \quad (17)$$

$$S_{\max i} = \max \left\{ S^{(l)}_i \right\} \left\{ \text{for } l = 1 \dots L \right\} \quad (18)$$

・全試行 L 回後の計算対象領域の地表面平均沈下量、分散、最大沈下量を式(19)、(20)、(21)に示す。

$$\bar{S} = \frac{1}{P-L} \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^P S^{(l)}_i \quad (19)$$

$$\sigma_{S_i}^2 = \frac{1}{P \times L} \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^P \left(S^{(l)}_i - \bar{S} \right)^2 \quad (20)$$

$$S_{\max} = \max \left\{ S^{(l)}_i \right\} \left\{ \text{for } i = 1 \dots P, l = 1 \dots L \right\} \quad (21)$$

(2) 不同沈下量

本予測法では、不同沈下量は、隣接する要素間の沈下量の差として定義する。要素 i に X 方向に隣接する要素を i' 、 Y 方向に隣接する要素を i'' とすれば、試行回数第 l 回目における X 方向（縦断方向）、 Y 方向（横断方向）への不同沈下量は、それぞれ式(22)、(23)に示すとおりに求められる。

$$\Delta S_{(l,X)i} = \left| S^{(l)}_i - S^{(l)}_{i'} \right| \quad (22)$$

$$\Delta S_{(l,Y)i} = \left| S^{(l)}_i - S^{(l)}_{i''} \right| \quad (23)$$

不同沈下量に関する計算結果に関しては、(1)の絶対沈下量と同様に、試行 l 回目における計算対象領域の地表面平均不同沈下量・分散・最大不同沈下量、全試行 L 回後の地表面の i 地点における地表面平均不同沈下

量・分散・最大不同沈下量、および全試行 L 回後の計算対象領域の地表面平均不同沈下量・分散・最大不同沈下量が得られる。

(3) 不同沈下勾配

不同沈下勾配は、水平方向の沈下勾配を表す。本予測法では、(2)で算定した不同沈下量を要素幅で除した値を、便宜的に沈下勾配と定義する。試行回数第 l 回目における、 X 方向（縦断方向）への不同沈下勾配を式(24)に、 Y 方向（横断方向）への不同沈下勾配を式(25)に示す。

$$G_{(l,X)i} (\%) = \frac{\Delta S_{(l,X)i}}{E_X} \times 100 \quad (24)$$

$$G_{(l,Y)i} (\%) = \frac{\Delta S_{(l,Y)i}}{E_Y} \times 100 \quad (25)$$

ここに、 E_X は X 方向の要素幅、 E_Y は Y 方向の要素幅である。不同沈下勾配に関する計算結果に関しても、同様に試行 l 回目における計算対象領域の地表面不同沈下勾配の平均・分散・最大、全試行 L 回後の地表面の i 地点における不同沈下勾配の平均・分散・最大、および全試行 L 回後の計算対象領域の地表面不同沈下勾配の平均・分散・最大が得られる。

(4) 不同沈下率

試行回数第 l 回目の各地表面の不同沈下量を、地表面の平均沈下量で除したものを不同沈下率と定義する。 X 方向（縦断方向）への不同沈下率を式(26)に、 Y 方向（横断方向）への不同沈下率を式(27)に示す。不同沈下率に関する計算結果に関しても、他の諸量と同様に、試行 l 回目における計算対象領域の不同沈下率の平均・分散・最大、全試行 L 回後の地表面の i 地点における不同沈下率の平均・分散・最大、および全試行 L 回後の計算対象領域の不同沈下率の平均・分散・最大が得られる。

$$r_{(l,X)i} (\%) = \frac{\Delta S_{(l,X)i}}{\bar{S}^{(l)}} \times 100 \quad (26)$$

$$r_{(l,Y)i} (\%) = \frac{\Delta S_{(l,Y)i}}{\bar{S}^{(l)}} \times 100 \quad (27)$$

3. 空間的ばらつきを持つ地盤物性の評価方法

空間的ばらつきを持つように地盤物性値のモデル化を行う場合、2.2節に示したように N 値と層厚の平均値、分散および相関距離 b が必要である。地盤物性値の分散

と水平方向の相関係数は、本予測法の計算結果に大きな影響を及ぼすため、その設定には充分注意を払う必要がある。本節では、実際の土質調査より、N値と層厚の平均、分散および水平方向相関係数を算定する手順について述べる。3.1にN値に関する算定法を、3.2に層厚に関する算定法を示す。

3.1 N値の分散および水平方向相関係数の算定法

(1) 地盤調査間隔

地盤物性値の平均、分散および水平方向の相関係数を算定するためには、これらの算定に適した方法で対象地盤の調査を行う必要がある。この場合、通常の地盤調査とは異なり、地盤条件の分散および水平方向への相関性

が充分把握できる程度の密な間隔の調査が必要となる。水平方向の調査間隔が大きすぎる場合、地盤物性値の水平方向の相関性が把握できなくなるからである。本予測法において、工学的に満足すべき精度で不同沈下の予測を行うためには、概ね数m~10m程度間隔の地盤調査を行う必要があると考えられる。但し、実際の地盤調査では、検討対象の全領域を、このように密な間隔で調査することは現実的でない。対象地盤を代表する数カ所で間隔が密である地盤調査を実施し、その結果を対象地盤全域に適用するのが現実的である。

(2) N値の分散の算定法

図-13にN値の平均、分散および水平方向相関係数を求めるための地盤調査例を示す。図中に示すとおり、

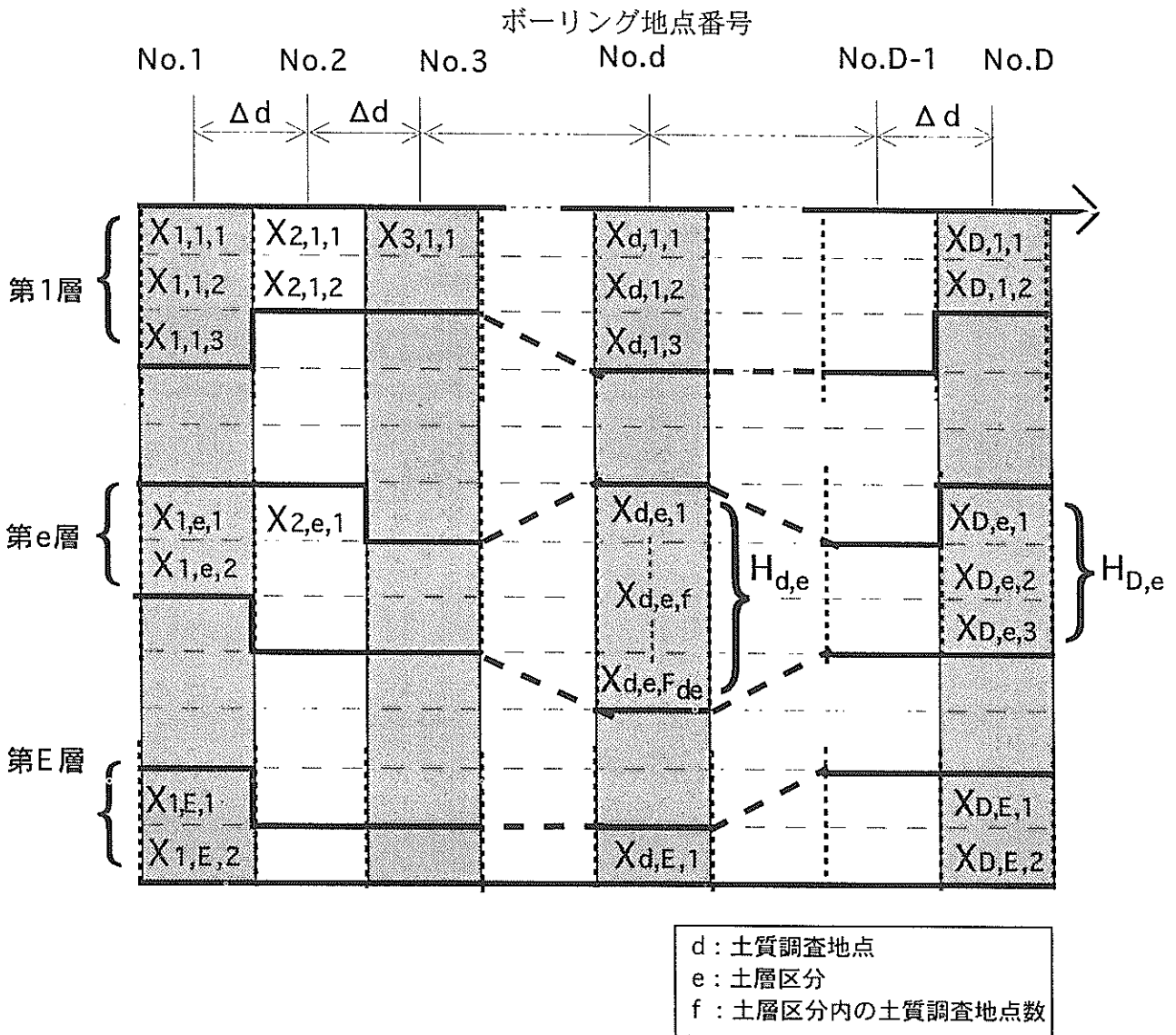


図-13 土質調査例

地盤調査は、調査地点間隔 Δd 、調査地点数 D において実施されたとする。ここで、対象地盤を、同一の地盤条件を有すると判断できる各土層に分割するものとし、その総数を E とする。各土層内には、各調査地点で、土層深度方向に複数個の N 値が含まれることとなり、その個数を表すため、左から d 番目の地盤調査点における第 e 層中の N 値の調査結果の数を F_{de} とする。また、図中の左から第 d 番目の地盤調査点における第 e 層中の上から f 番目の N 値を $X_{d,e,f}$ と表す。

N 値は同一土層内では、統計的に見て同じ平均値、分散、相関を持つと仮定する。すなわち、同一土層内の N 値は、土層内の平均 N 値からのずれ（ばらつき）として与えられる。この仮定に基づくと、第 e 層における N 値の平均値は次式により算定される。

$$\bar{X}_e = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D \left[\frac{1}{F_{de}} \sum_{f=1}^{F_{de}} X_{d,e,f} \right] \quad (28)$$

これを用いて、第 e 層の N 値の分散は、次式により与えられる。

$$\sigma_{X_e}^2 = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D \left[\frac{1}{F_{de}} \sum_{f=1}^{F_{de}} (X_{d,e,f} - \bar{X}_e)^2 \right] \quad (29)$$

以上の手順より、各土層ごとの N 値の平均値および分散が求められる。

(3) N 値の水平方向相関係数

以上の平均値および分散を用いることにより、第 e 層の N 値の水平方向相関係数 $\tau_{Xe}(m \cdot \Delta d)$ $\{m=1 \cdot \cdot D-1\}$ は、次式により求められる。

$$\tau_{Xe}(m \times \Delta d) = \frac{\frac{1}{D-m} \sum_{n=1}^{D-m} (\bar{X}_{d,e} - \bar{X}_e)(\bar{X}_{d+m,e} - \bar{X}_e)}{\sigma_{X_e}^2} \quad (30)$$

$$\bar{X}_{d,e} = \frac{1}{F_{de}} \sum_{f=1}^{F_{de}} X_{d,e,f} \quad (31)$$

例えば、 $m=1$ の場合は距離 Δd の水平方向相関係数が得られ、 $m=2$ の場合は同様に距離 $2 \cdot \Delta d$ の相関係数が求められることになる。

以上により、実際の土質調査結果より、距離 Δd 毎の N 値の水平方向相関係数が算定される。不同沈下の予測に当たっては、得られた相関係数と 2.2 の式 (2) に示す相関関数が一致するように、最適な相関距離 b を最小自乗法の適用等により求める。

3.2 層厚の分散および水平方向相関係数の算定法

(1) 層厚の分散の算定法

図-13 中の左から第 d 番目の土質調査地点における、第 e 番目の土層区分の層厚を $H_{d,e}$ と表す。層厚は、 N 値の場合と同様に、同一土層内では、統計的に見て同じ平均値、分散、相関を持つと仮定する。すなわち、同一土層内の層厚は、土層内の平均層厚からのずれ（ばらつき）として与えられる。この仮定に基づくと、土層区分 e における層厚の平均値は次式により算定される。

$$\bar{H}_e = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D H_{d,e} \quad (32)$$

これを用いて、第 e 層の層厚の分散は、次式により与えられる。

$$\sigma_{H_e}^2 = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D (H_{d,e} - \bar{H}_e)^2 \quad (33)$$

以上の手順より、各土層ごとの層厚の分散が求められる。

式(33)により与えられる層厚 H_e の分散は、平均層厚に対する分散である。一方、本予測法の計算では、地盤要素高さに関する分散値が入力値として必要である。土質調査点 d 、土層区分 e の深度方向の要素高さを Δh 、同土層内の要素分割数を $F_{d,e}$ ($=H_{d,e}/\Delta h$) とすると、要素高さ Δh に関する分散は次式により与えられる。

$$\sigma_{h_e}^2 = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D \left[\frac{(H_{d,e} - \bar{H}_e)^2}{F_{d,e}} \right] \quad (34)$$

以上の手順により、地盤要素高さに関する層厚の分散が求められる。

(2) 層厚の水平方向相関係数

以上の平均値および分散を用いることにより、第 e 層の層厚の水平方向相関係数 $\tau_{He}(m \cdot \Delta d)$ $\{m=1 \cdot \cdot D-1\}$ は、次式により求められる。

$$\tau_{He}(m \times \Delta d) = \frac{\frac{1}{D-m} \sum_{n=1}^{D-m} (H_{d,e} - \bar{H}_e)(H_{d+m,e} - \bar{H}_e)}{\sigma_{H_e}^2} \quad (35)$$

例えば、 $m=1$ の場合は距離 Δd の相関係数が得られ、 $m=2$ の場合は同様に、距離 $2 \cdot \Delta d$ の相関係数が求められることになる。

以上により、 N 値の場合と同様に、実際の土質調査結果より、距離 Δd 毎の層厚の水平方向相関係数が算定さ

れる。不同沈下の予測に当たっては、得られた相関係数と2. 2の式(2)に示す相関関数が一致するように、最適な相関距離 b を最小自乗法の適用により求める。

なお、さきに述べたとおり、本研究における解析では、計算時間の節約のため、N値と層厚の水平方向相関係数は、同一として検討を行っている。

4. 液状化による不同沈下の計算例

本章では、本予測のモンテカルロ試行計算における試行回数、地盤のN値・液状化層厚の分散・水平方向への相関、および入力最大加速度をパラメータとした例題計算を行う。これらの結果により、本予測法の基本的な特性を把握する。

4. 1 標準計算モデル

本章では、計算条件を変えた比較計算を行うが、その際に基準となる標準モデルを設定する。標準計算モデルの対象領域は、図-14に示すとおり、水平方向に200m(縦断方向)×200m(横断方向)、鉛直方向に20mの地盤とする。水平方向の要素サイズは10m×10mを標準とし、鉛直方向への要素分割の間隔は2mとする。地盤条件としては、水平成層地盤を仮定し、同一の土層においては、対象領域の全地点において、同じ地盤物性値を与えている。図-15にN値の深度分布と地下水位高さを示す。対象地盤は全て砂層であると仮定し、砂層の細粒分含有率は0%、単位体積重量は1.8tf/m³とする。地下水位は、全地点において地表面下2.0mとする。

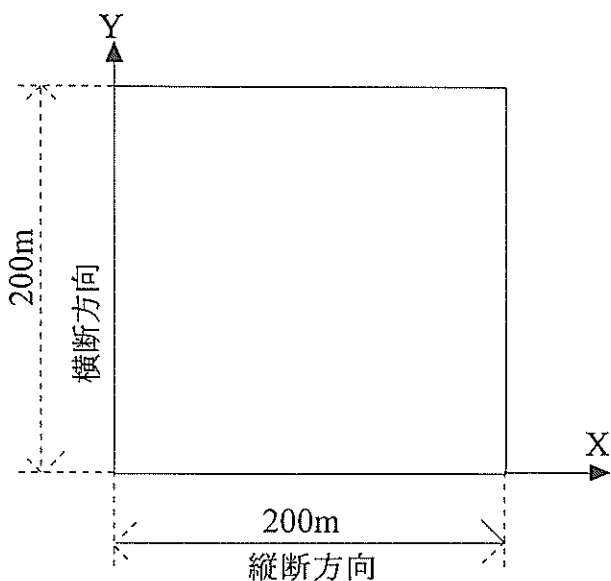


図-14 解析対象地盤の平面図(例題計算)

深度 (m)	N値(回)					
	0	10	20	30	40	50
2	埋土		15	▽		
4			10	-----		
6	砂層1					
8			20	-----		
10	砂層2					
12			30	-----		
14	砂層3					
16			-----			
18			40	-----		
20	砂層4					
22	砂層5		50			

▽ 地下水面位置

図-15 N値の深度分布(標準計算モデル)

入力地震波は、港湾施設の設計において、入力用地震動として用いられている八戸波を使用している。N値および層厚の水平方向相関距離は50m、N値の分散は5回²、層厚の分散は1.0m²、最大せん断応力の分散は0.15(tf/m²)²を標準モデルのパラメータとする。表-2に各計算ケースの名称と計算条件および各パラメータの一覧を示す。表中のCASE3が標準モデルである。

本予測計算では、試行計算毎に、地表面の各地点における沈下量が算定される。一例として、図-16に標準モデル(CASE3)の試行1回目の地表面沈下分布を示す。本図は、縦軸に地表面の絶対地下下量を示している。同図から、一つの山や谷の幅が50m程度の不同沈下が生じていることがわかる。一方、全試行の計算終了後、2.7に示したような不同沈下に関する諸量が算定される。本章では、全試行回後の対象領域全域における、平均沈下量(以後、試行平均沈下量と呼ぶ)、最大沈下量(以後、試行最大沈下量)、均不同沈下勾配(以後、試行平均沈下勾配)および最大不同沈下勾配(以後、試行最大沈下勾配)を指標として、計算条件や地盤物性ばらつき等が不同沈下の算定結果に及ぼす影響を検討している。

図-17に標準モデル(CASE3)の試行平均沈下量の分布を示す。水平成層地盤を仮定しているため、沈下量

表-2 例題計算ケースと計算条件・パラメーターの一覧

計算ケース	試行回数 (回)	メッシュサイズ (m)	境界条件	相関距離 (m)	分散			入力最大 加速度 (cm/s ²)
					N値 (回) ²	層厚 (m) ²	最大 せん断応力 (tf/m ²) ²	
case1	20	10	境界対称	50	5	1	0.15	200
case2	50	10	境界対称	50	5	1	0.15	200
case3	100	10	境界対称	50	5	1	0.15	200
case4	200	10	境界対称	50	5	1	0.15	200
case5	50	10	境界対称	25	5	1	0.15	200
case6	50	10	境界対称	100	5	1	0.15	200
case7	50	10	境界対称	50	2	1	0.15	200
case8	50	10	境界対称	50	10	1	0.15	200
case9	50	10	境界対称	50	5	0.5	0.15	200
case10	50	10	境界対称	50	5	3	0.15	200
case11	50	10	境界対称	50	5	1	0.15	50
case12	50	10	境界対称	50	5	1	0.15	100

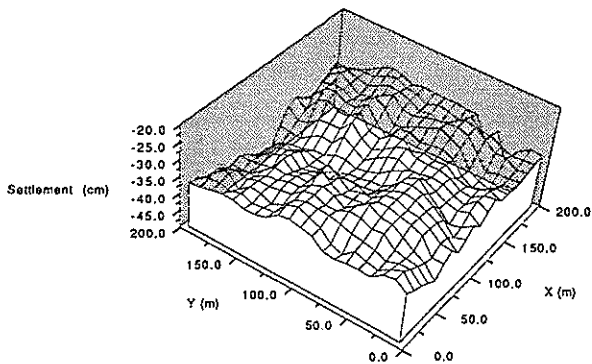


図-16 地表面の沈下分布 (試行回数1回目、CASE3)

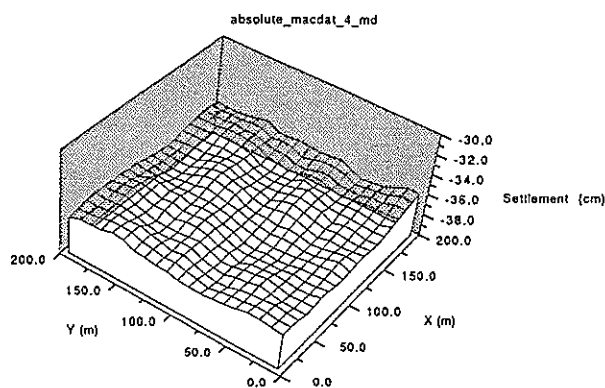


図-17 試行平均沈下量の分布 (CASE3)

の期待値としては、一様分布となり不同沈下が生じない結果となっている。

4.2 試行回数・分散・水平方向相関距離等による影響

本節では、各種入力パラメータが計算結果に与える影響を検討する。入力パラメータとして、モンテカルロの試行回数、水平方向の相関距離、N値・層厚の分散、入力地震動の最大加速度を対象とする。

(1) 試行回数の影響

標準モデルにおいて、モンテカルロの試行回数を20、50、100、200回 (CASE1、CASE2、CASE3、CASE4に対応) と変化させた場合の、試行回数と試行平均沈下量および試行最大沈下量の関係を図-18に示す。この結果より、本計算条件の場合、試行平均沈下量は試行回数の大小の影響を受けていない。一方、試行最大沈下量は、試行回数が100回以上でほぼ一定となることがわかる。

同様に、試行回数と試行平均沈下勾配および試行最大沈下勾配の関係を図-19に示す。この結果より、試行最大沈下勾配は試行回数100回以上で、ほぼ一定値となることがわかる。従って、本予測法では各計算条件に応じた、適切な試行回数の設定が必要である。以上の結果を踏まえて、例題計算の試行回数は、100回を標準とした。

(2) 水平方向相関係数の影響

図-20、図-21に相関距離 b が25m (CASE5) および100m (CASE6) の試行回数1回目の地表面沈下量分布を、図-22、図-23に地表面沈下量コンターを示

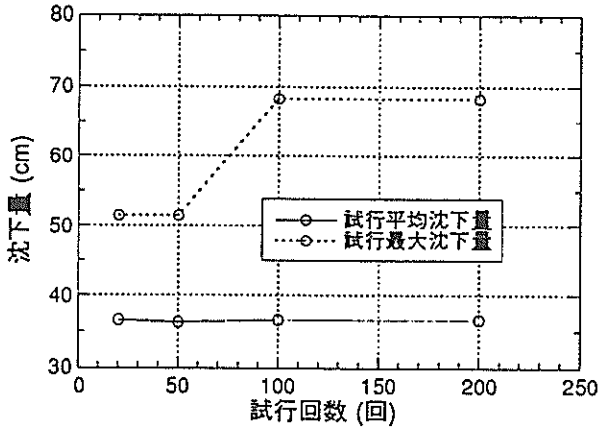


図-18 試行回数と沈下量の関係

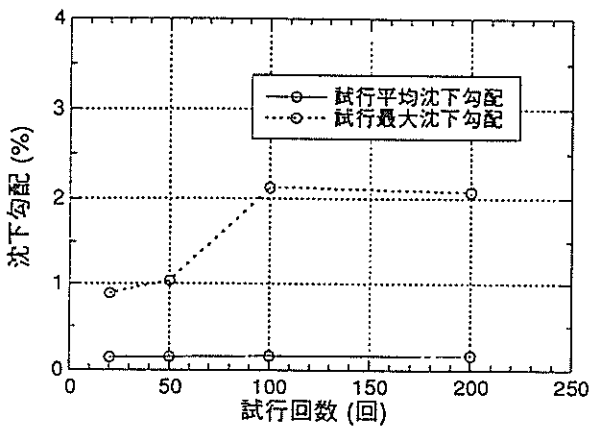


図-19 試行回数と沈下勾配の関係

す。両者の比較より、相関距離の大小が、本予測法による沈下形状の算定結果に大きな影響を及ぼすことがわかる。すなわち、地盤物性の相関距離が大きい場合、地表面沈下量の水平方向の相関性は広範囲にわたり、結果として地表面の沈下分布は大きな起伏がなく、かつ滑らかな分布となる。逆に相関距離が小さい場合には、地表面の水平方向の相関性は狭い領域に限られるため、一山の凹凸の幅が小さく、山や谷の勾配が大きい起伏のある沈下分布となる傾向にある。

相関距離 b を 25、50、100m (CASE5、CASE3、CASE6 に対応) と変化させた場合の、相関距離と試行平均沈下勾配および試行最大沈下勾配の関係を図-24 に示す。この結果によると、相関距離が大きくなると、試行平均およ

び試行最大の沈下勾配が大きくなる傾向にあることがわかる。これは上に示した理由と同様であると考えられる。

このように、水平方向の相関距離は算定される沈下量の分布特性に大きく影響を及ぼす。従って、本予測法に用いる相関距離については、特に慎重な検討が必要がある。これらの相関係数は、3章に示した土質調査を実施し、対象地盤に相応しい相関距離を求める必要があると言える。

(3) N値と層厚の分散の影響

a) N値の分散の影響

N値の分散を替えた場合の検討を行う。図-25 にN値の分散が2 (回²) の場合 (CASE7) の、試行回数1回目の地表面沈下分布を示す。同様に、図-26 にN値の分散が10 (回²) の場合 (CASE8) を示す。両者の比較より、算定される沈下量の分布は、N値の分散の大小によって異なることがわかる。すなわち、N値の分散が大きい場合、地表面の起伏が大きくなる傾向にある。これは、N

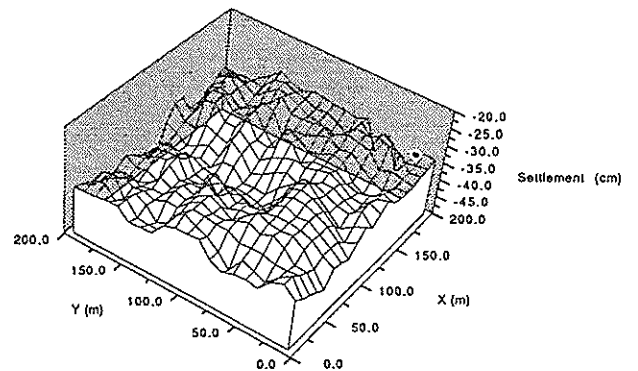


図-20 地表面の沈下分布(試行回数1回目、 $b=25\text{m}$ 、CASE5)

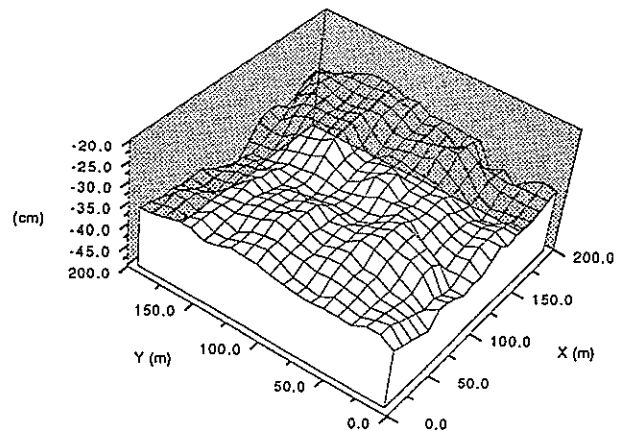


図-21 地表面の沈下分布(試行回数1回目、 $b=100\text{m}$ 、CASE6)

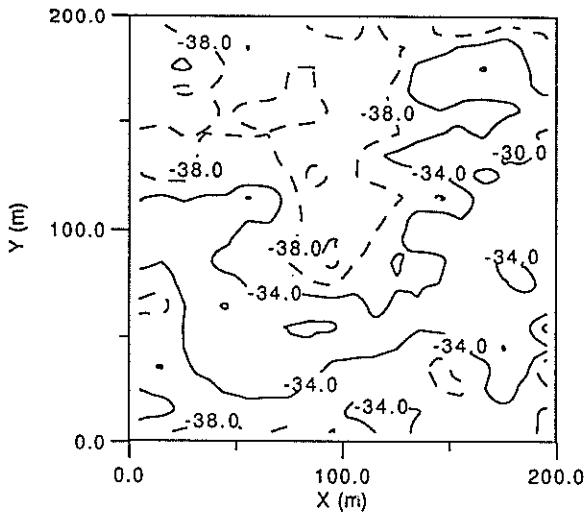


図-22 地表面の沈下コンター(試行回数1回目、 $b=25m$, CASE5)

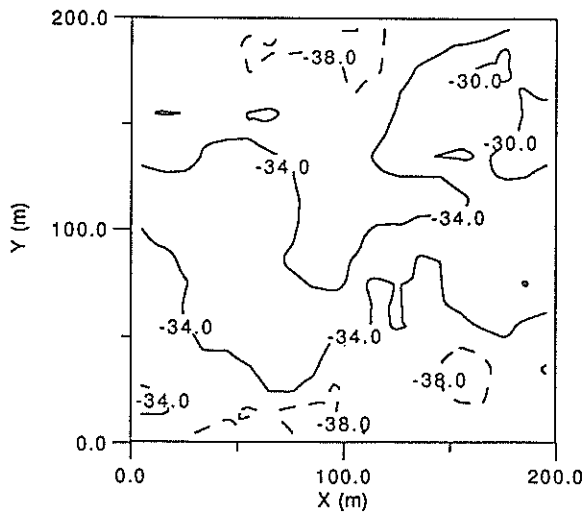


図-23 地表面の沈下コンター(試行回数1回目、 $b=100m$, CASE6)

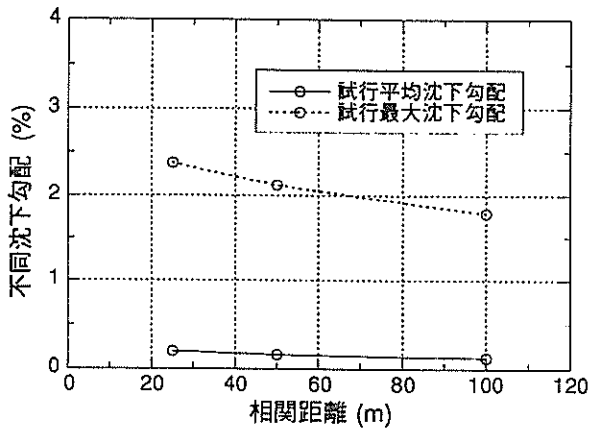


図-24 相関距離と沈下勾配の関係

値の分散が大きいと、N値のばらつきが大きくなり、水平方向相関距離が同じ地盤でも、隣り合う地盤要素の沈下量の差が大きくなるためである。同様に図-27、図-28にN値の分散が2(回²) (CASE7) および10(回²) (CASE8) の、試行回数1回目の地表面沈下量のコンターを示す。両者の比較から、N値の分散が大きいと、地表面の不同沈下勾配が大きくなり、N値の分散が小さいと、地表面の不同沈下勾配は小さくなる傾向にあることがわかる。

図-29に、N値の分散と試行平均沈下勾配および試行最大沈下勾配の関係を、図-30に、N値の分散と試行平均沈下量および試行最大沈下量の関係を示す。これらの結果より、N値の分散が大きくなるにつれ、地表面の試行最大沈下勾配および試行最大沈下量がN値の分散の増加に伴い大きくなることわかる。

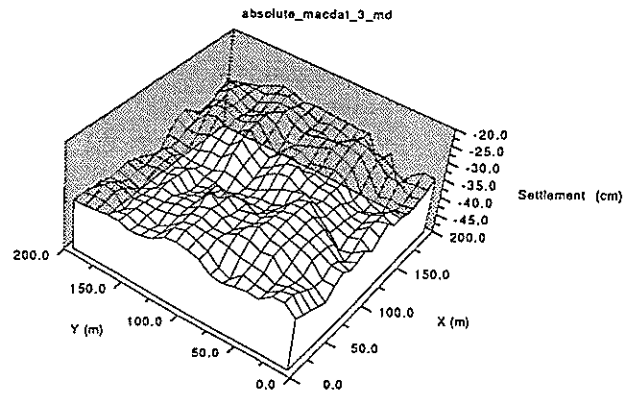


図-25 地表面の沈下分布(試行回数1回目、 $\sigma_N^2=2.0$, CASE7)

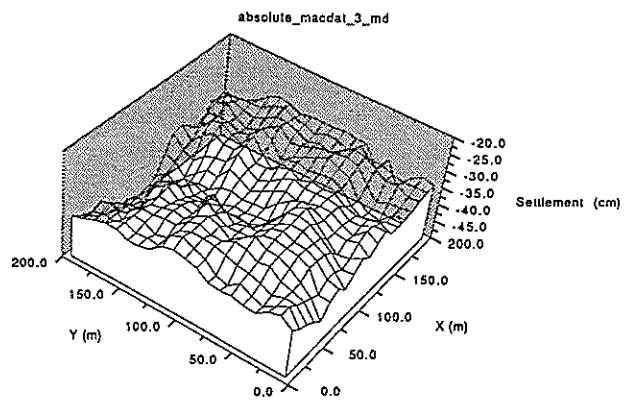


図-26 地表面の沈下分布(試行回数1回目、 $\sigma_N^2=10.0$, CASE8)

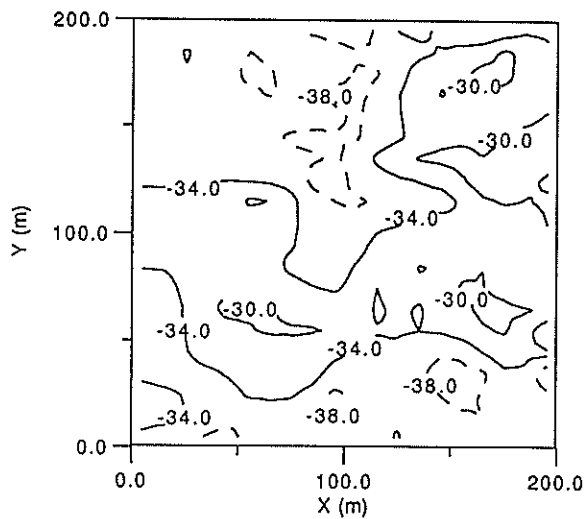


図-27 地表面の沈下コンター
(試行回数1回目、 $\sigma_N^2=2.0$, CASE7)

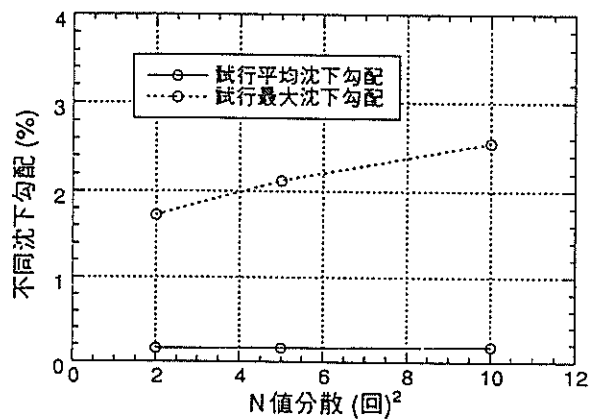


図-29 N値分散と沈下勾配の関係

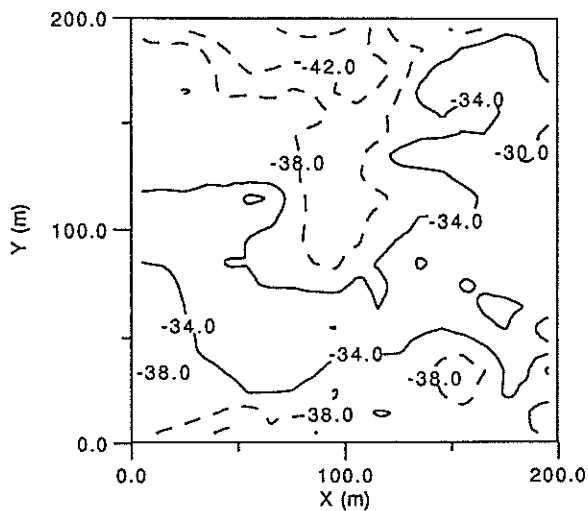


図-28 地表面の沈下コンター
(試行回数1回目、 $\sigma_N^2=10.0$, CASE8)

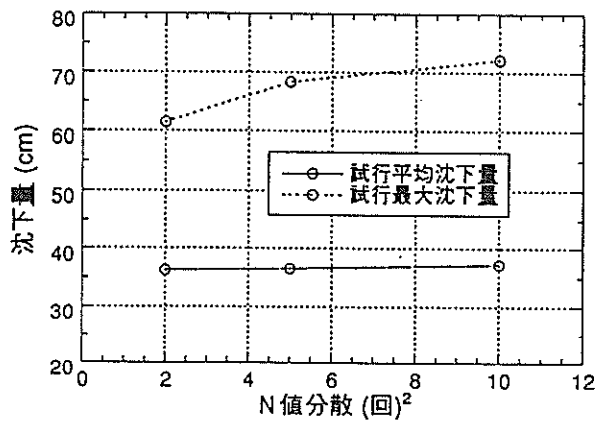


図-30 N値分散と沈下量の関係

b) 層厚の分散の影響

図-31、図-32 に層厚の分散が $0.5 \text{ (m}^2\text{)}$ (CASE9) および $3.0 \text{ (m}^2\text{)}$ (CASE10) の、試行回数1回目の地表面沈下分布を、図-33、図-34 に地表面の沈下コンターを示す。これらの結果は、N値の分散と同様の傾向にあり、層厚の分散が大きくなるにつれ、地表面の起伏が大きくなり、不同沈下勾配も大きくなる傾向にある。

図-35 に層厚の分散と試行最大沈下量および試行平均沈下量との関係を、図-36 に層厚の分散と試行最大沈下勾配および試行平均沈下勾配との関係を示す。これらの結果より、層厚の分散が大きい場合、試行最大沈下量および試行最大沈下勾配は大きくなる傾向にある。

以上の結果が示すように、N値および層厚の分散は地表面の不同沈下勾配に大きな影響を及ぼす。従って、本予測法を用いて不同沈下を予測する際には、解析に用いる各分散に関する十分な検討が必要であると言える。

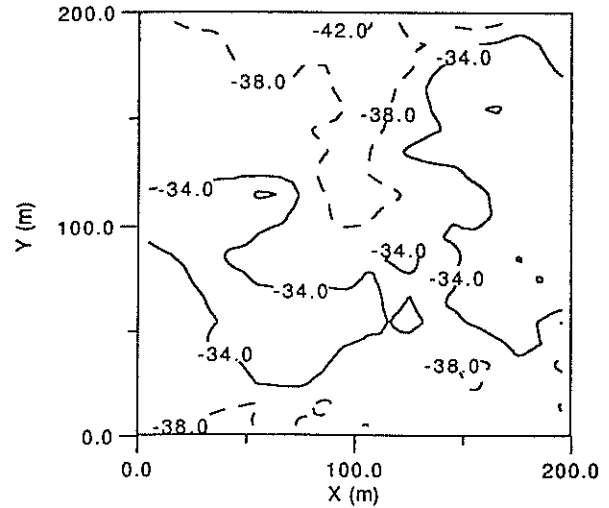


図-33 地表面の沈下コンター
(試行回数1回目、 $\sigma_H^2=0.5$, CASE9)

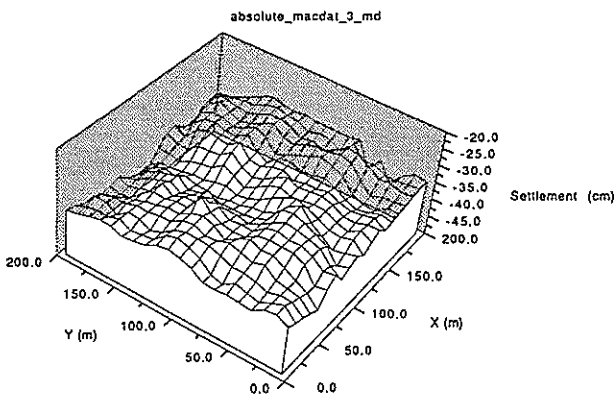


図-31 地表面の沈下分布(試行回数1回目、 $\sigma_H^2=0.5$, CASE9)

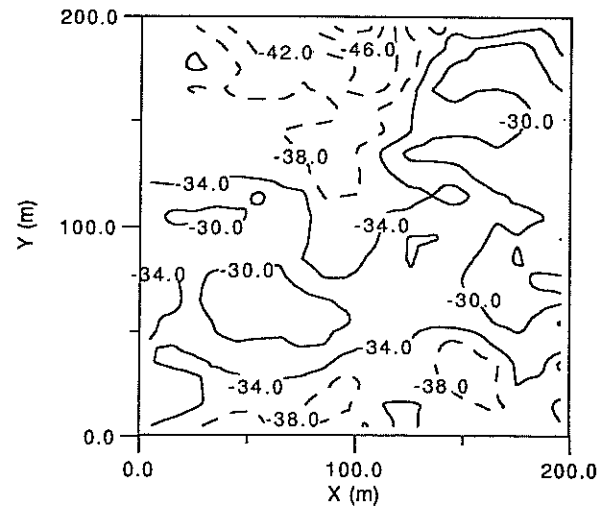


図-34 地表面の沈下コンター
(試行回数1回目、 $\sigma_H^2=3.0$, CASE10)

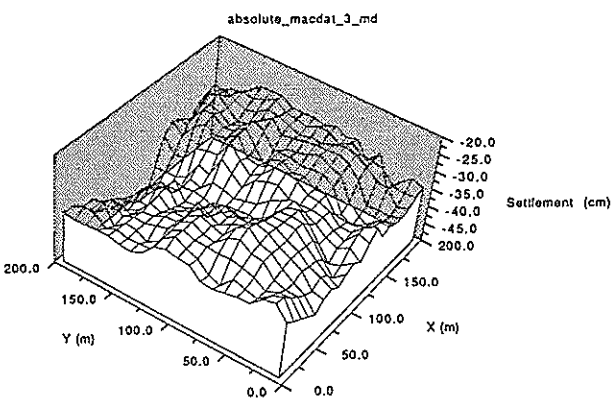


図-32 地表面の沈下分布(試行回数1回目、 $\sigma_H^2=3.0$, CASE10)

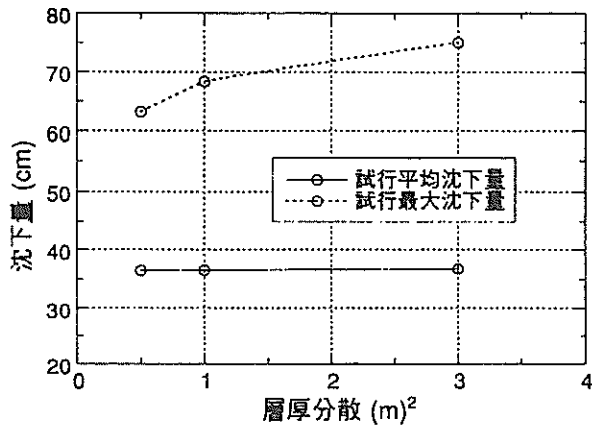


図-35 層重分散と沈下量の関係

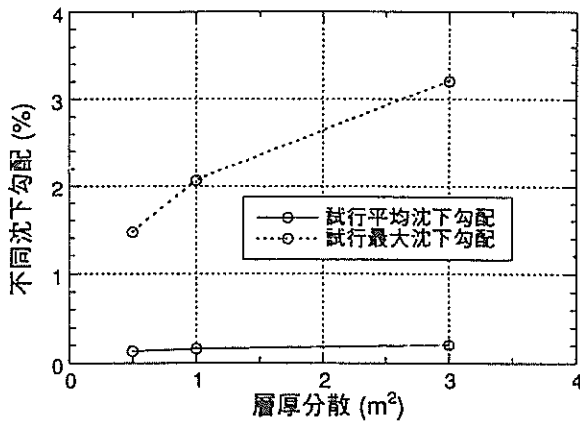


図-36 層重分散と沈下勾配の関係

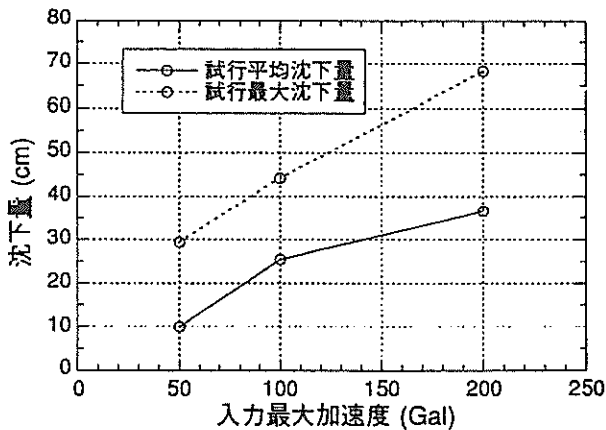


図-37 入力最大加速度と沈下量の関係

(4) 入力地震動の最大加速度の影響

図-37 に、入力最大加速度と試行最大沈下量および試行平均沈下量との関係を示す。入力加速度の増大に伴い、沈下量は大きくなる結果となり、実際の被災傾向と整合する結果となっている。

5. 結論

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

(1) 本研究では、地盤の物性値のばらつきと水平方向への相関性および3次元的な沈下の相互作用を考慮したモンテカルロ法を用いることによって、少ないボーリング地点のデータから、液状化による広域地盤の不同沈下を予測する手法を開発した。

(2) 本予測法の基本的な特性を把握するために、水平方向に200m×200m、深度方向に20mの領域の砂質地盤を対象とした例題計算を行った。その結果、以下に示す特性が認められた。

a) 計算条件が本予測の計算結果に与える影響を評価するために、試行回数を変えた比較計算を行った。その結果、今回の条件下では、試行回数100回程度で計算結果が安定した。

b) 各パラメータが本予測の計算結果に与える影響を評価するために、水平方向の相関距離、N値・層厚の分散等を変えた比較計算を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・地盤物性の相関距離が大きい場合、地表面沈下量の水平方向の相関性は広範囲にわたり、地表面の沈下分布は大きな起伏がない滑らかな分布となる。反対に相関距離が小さい場合は、地表面の水平方向の相関性は狭い領域に限られるため、一山の凹凸の幅が小さく、山や谷の勾配が大きい起伏のある沈下分布となる。

- ・相関距離が小さいと、不同沈下勾配は大きくなる傾向にある。また、各分散が大きくなると、地表面の最大沈下量および最大不同沈下勾配は大きくなる傾向にある。

(3) N値等の地盤物性値の水平方向相関距離および分散が、本予測法の計算結果に大きな影響を及ぼすことから、本予測法の実際への適用に向けては、相関距離、N値と層厚の分散を精度良く求めることが重要な検討課題となる。

6. おわりに

液状化による不同沈下の予測の問題は、港湾の分野ではもちろんのこと、広く液状化に関する一般の研究分野

においても、全く未開拓の新しい研究課題といえる。本研究では、その皮切りとして、モンテカルロ法の適用を試み、一応の成果を得ることができた。しかし、今後解決すべき課題も山積みの状態である。例えば、本予測法では地盤の側方流動、噴砂、舗装、地中構造物の影響等を考慮していない。また、実務上は、建設残土等による埋立地盤における液化化による不同沈下の問題がきわめて重要であるが、このような地盤材料に関する地盤調査データは少ない。従って、この点に関する試験および検討が必要である。

また、本予測法が実際の液化化による不同沈下予測にどの程度の適用性を有するかについての検討も、今後の課題となっている。今後、地震時液化化事例・模型振動実験等を通じて、この点の検討を進める所存である。

(1998年6月23日受付)

参考文献

- 1)新潟空港災害復旧工事報告:第一港湾建設局新潟港工事事務所、昭和42年6月。
- 2)土田 孝、小野 憲司:数値シミュレーションによる不同沈下の予測とその空港舗装設計への適用、港湾技術研究所報告、第27巻、第4号、pp.127-143、1988。
- 3)運輸省港湾局監修:埋立地の液化化対策ハンドブック、(財)沿岸開発技術研究センター、1993。
- 4)Shnabel, P .B., Lysmer. J. and Seed, H.B. : SHAKE, A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No.EERC 72-12, University of California at Berkeley, 1975.
- 5)Kenji Ishihara and Mitutoshi Yoshimine : Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquake, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188, 1992.

記号一覧

b : 相関距離 (m)
 c : 任意の地盤要素の中心点番号
 d : ボーリング調査地点番号
 D : ボーリング調査地点の総数
 Δd : ボーリング調査の間隔 (m)
 D_r^* : 推定相対密度 (%)
 e : 土層区分番号
 E : 土層区分の総数
 E_x, E_y : 水平方向の地盤要素幅 (m)

f : 土層区分内の土質調査地点数
 F : 土層区分内の土質調査地点の総数
 F_l : 液化化安全率
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 G : 隣り合う地盤要素間の不同沈下勾配 (%)
 Δh : 各地盤要素の層厚 (m)
 i, j : 同深度にある地盤要素の中心点番号
 I_{ijk} : 沈下に関する影響係数
 H : 土層区分の層厚 (m)
 k : 深度方向の地盤要素の中心点番号
 ℓ : モンテカルロの試行回数 (回)
 L : モンテカルロの全試行回数 (回)
 N : 地盤調査によるN値
 N_{eq} : 等価N値
 N^* : 限界N値
 P : 同深度における全地盤要素数
 r : 不同沈下率 (%)
 r_{ij} : 同深度の要素 i, j 間の距離 (m)
 s^* : 各地盤要素の沈下量 (m)
 s : 地表面沈下量 (m)
 Δs : 隣り合う地盤要素間の不同沈下量 (m)
 u : 沈下の影響を考慮する水平方向の地盤要素数
 X : 任意の地盤要素の中心における地盤物性値
 α_{eq} : 等価加速度 (m/s^2)
 γ_{max} : 最大せん断ひずみ (%)
 ϵ_v : 体積ひずみ (%)
 σ_v' : 有効上載圧力 (kgf/cm^2)
 σ_H : 土層厚さに関する層厚の分散 (m^2)
 σ_h : 地盤要素高さに関する層厚の分散 (m^2)
 σ_N : N値の分散 (回²)
 τ_{ij} : 同深度にある地盤要素 i, j 間の水平方向相関係数
 τ_{max} : 最大せん断応力 (kgf/cm^2)
 τ_H : 層厚の水平方向相関係数
 τ_x : 地盤物性値 (N値) の水平方向相関係数

付録．液状化安全率の定義

本論文では、液状化安全率を下式のように、等価N値と限界N値の比として定義している。

$$F_L = \frac{N_{0.66}}{N^*} \quad (\text{付.1})$$

一方、本来の液状化安全率は、せん断応力比の比として、以下のように定義される。

$$F_L^* = \frac{(\tau_{l \max} / \sigma'_v)}{(\tau_{d \max} / \sigma'_v)} \quad (\text{付.2})$$

ここに、 σ'_v は有効上載圧力、 $\tau_{d \max}$ は地盤中に発生する最大せん断力、 $\tau_{l \max}$ は対象地盤の液状化抵抗を表すせん断応力を示す。ここで、式(付.2)の分母の $(\tau_{d \max} / \sigma'_v)$ と本文中の式(8)の等価加速度とは以下の関係がある。

$$\alpha_{eq} = 0.7 \times \frac{\tau_{d \max}}{\sigma'_v} \times g \quad (\text{付.3}) \quad (\text{式(8)の再掲})$$

同様に、式(付.2)の分子の $(\tau_{l \max} / \sigma'_v)$ は、等価N値 $N_{0.66}$ なる地盤の液状化発生限界を規定する等価加速度 $\alpha_{eq}^*(N_{0.66})$ (以下、限界等価加速度と呼ぶ)と以下の関係がある。

$$\alpha_{eq}^*(N_{0.66}) = 0.7 \times \frac{\tau_{l \max}}{\sigma'_v} \times g \quad (\text{付.4})$$

よって、式(付.2)の液状化安全率は、以下のように限界等価加速度と等価加速度の比として定義できる。

$$F_L^* = \frac{\alpha_{eq}^*(N_{0.66})}{\alpha_{eq}} \quad (\text{付.5})$$

本論文の手法に基づくと、上式の分母はSHAKEの計算結果から算定した最大せん断応力を式(8)に代入することにより算定する。分子は、港湾の液状化予測・判定法³⁾の判定チャート(付図-1(図-5の再掲))の領域IIとIIIの境界を利用して、等価N値に対応する等価加速度を算定する。

式(付.5)により液状化安全率 F_L^* を定義する場合、等価N値が16以上の範囲では、式(付.5)の分子が定義できないという問題が生じる。これに対して、式(付.1)では、このような問題は発生しない。そこで、本論文では便宜的な面も残されているが、全ての地盤条件に対して液状化安全率の算定が可能となるように、(付.1)式により液状化安全率を定義した。

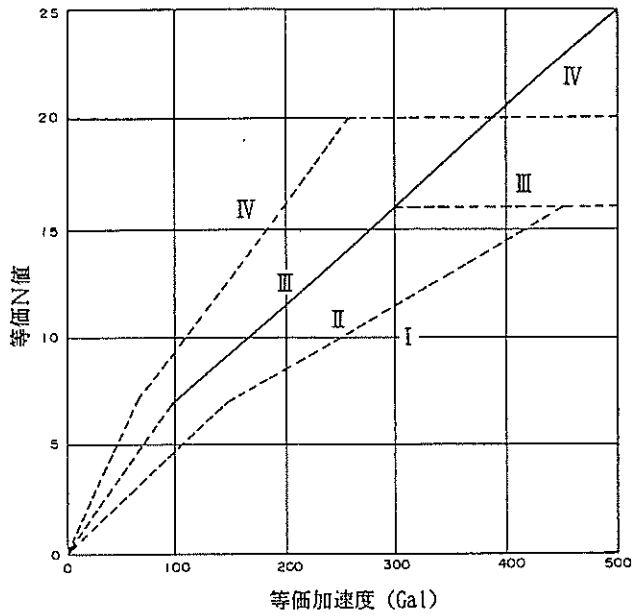
上に示した式(付.1)と式(付.2)による液状化安全率の定義の違いが、計算結果にどの程度の影響を及ぼすかについて検討を行った。対象範囲は、両式による定義が可能である等価加速度が100~300Gal(等価N値が7~16)の範囲とした。この結果を付図-2に示す。同図においては、等価N値が7、12、16の各地盤について、等価加速度が100、200、300Galの場合の、式(付.1)による液状化安全率(F_L)と(付.3)式による液状化安全率(F_L^*)の関係を示したものである。この図より、液状化による沈下量に影響すると考えられる $F_L=0.5\sim 2.0$ の範囲では、 $\pm 20\%$ の範囲で、両者は整合している。特に、 $F_L=1$ の周辺では、両者はほぼ一致している。また、全体的な傾向としては、本論文の液状化安全率の定義である式(付.1)による安全率は、 $F_L \geq 1$ の範囲では安全側の値を与え、 $F_L \leq 1$ の範囲では危険側の値を与えている。

次に、液状化安全率の定義の違いが、液状化沈下量に及ぼす影響を付図-3により評価する。同図は液状化安全率と体積ひずみの関係を示し、本文中の図-7および図-8をまとめたものである。この図によると、液状化安全率と液状化による発生する体積ひずみの関係は、地盤の相対密度に大きく依存していることがわかる。

算定する沈下量は、特に相対密度が小さい地盤(緩詰砂に相当)の影響を大きく受け、安全率の定義の違いによる影響が心配されるが、以下の理由のため、その影響は小さいことがわかる。同図によると、相対密度が小さい場合、例えば相対密度 $D_r^* < 50\%$ の場合、液状化安全率1を境に大きく体積ひずみが増加するが、安全率が1近傍では、安全率の定義の違いは小さいため、沈下量に及ぼす影響は小さい。さらに、安全率が1を下回る場合、体積ひずみは安全率の値に関係なく一定値となる。また、安全率が1より大きい場合、体積ひずみは安全率の変化に対して緩やかに変化する。従って、相対密度が小さい揺詰め地盤の場合、安全率の定義の違いが、算定する沈下量に大きな影響を及ぼさないことがわかる。

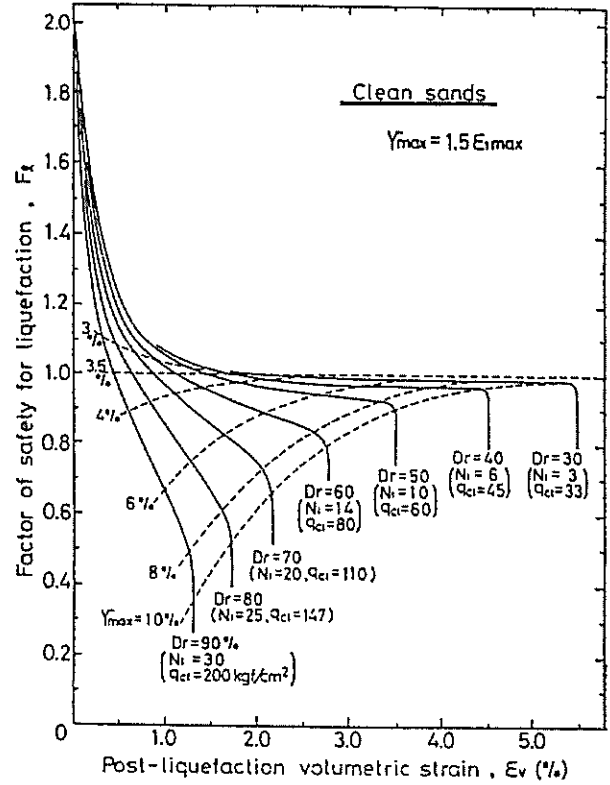
一方、相対密度が大きい地盤(密詰め砂に相当)の場合、液状化による沈下量は、相対密度が小さい地盤の沈下量に比べて基本的に小さくなる。また、液状化安全率の変化に対する体積ひずみの変化は非常に緩やかである。従って、相対密度が大きい地盤(密詰め砂に相当)の場合も、液状化安全率の違いが、沈下量算定に及ぼす影響は小さいと言える。

上の検討を踏まえると、式(付.1)および式(付.3)による液状化安全率の定義の違いは、沈下量の算定において、著しい支障を与えないものと考えられる。

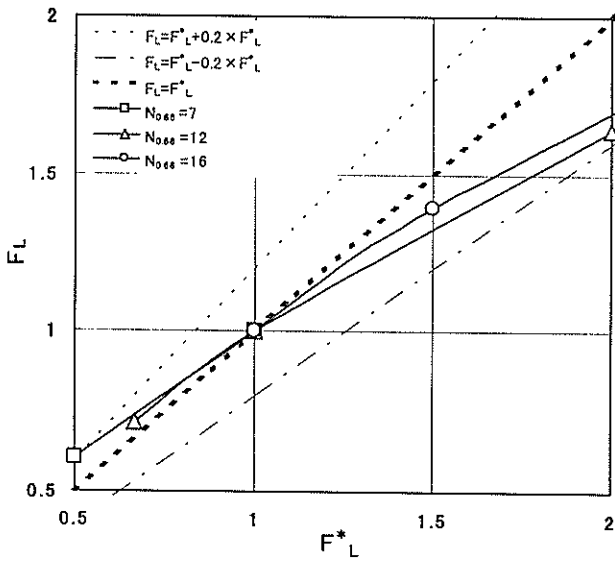


(a) 粒度範囲Aの土層に対するもの

付図-1 等価加速度と等価N値による液状化予測のための土層の分類³⁾ (図-5の再掲)
(粒度範囲Aの土層に対応するもの)



付図-3 液状化安全率と体積ひずみの関係



付図-2 液状化安定率 F_L と F_L^* の関係

港湾技研資料 No.908

1998.9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1998) by P.H.R.I

All right reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。