

地震時における砂質地盤の液状化危険度の検討

望月 利男* 小泉 敏一**

要 約

この報告は、主として筆者らが検討してきたべき関数型履歴モデルによる地盤の非線形地震応答計算法による砂質地盤の地震時液状化危険度を予測したものである。その事例として対象とした地域は札幌市の北部低地と東京都大田区の砂質地盤を主相とする低地である。すでに松田・望月・小泉(1979)に示したように砂質地盤の液状化危険度を予測する手法は、過去の震害の体験に基づく方法、例えば田治米・望月・松田(1977)、谷本、野田(1976)の手法、Seed, H. B. & Idriss, I. M. (1971)並びに鏡味・岡田(1979:簡易判定手法)の地盤の応答計算と土の動の実験に基づく手法等があるが、ここではそれらの手法による結果との比較も幾種かの地盤について行なっている。

1. はじめに

筆者らはすでにべき関数型履歴モデルを用いた地盤の非線形地震応答の計算手法の概要を報告している(望月ほか, 1979)。その手法は望月・北川ら(1976 a, 1976 b, 1977 など)が検討してきたべき関数型復元力モデルを Characteristics Method (Papadakis, 1973) に適用したものである。そこでは地層下端における境界条件を計算手法に導入した。したがって、基盤上部境界面における入射波、反射波をそれぞれ評価することが可能になった。

また、幾つかの砂質系地盤の液状化危険度判定手法については松田・望月・小泉(1979)にかなり詳しく説明している。ただ、この報告で主に検討するべき関数を用いる方法については、ほんのわずかしが触れていない。それ故、この手法について本文でやや詳しく説明する。さらに、この報告の事例研究の対象としている札幌市と大田区については、それぞれの地域で予測される地震入力レベルを考慮して液状化危険度を予測している。

結果として、この報告で主として検討しているべき関数型履歴復元力モデルを用いた Characteristics Method による動的解析法に比べ他の手法は液状化危険度を高く評価する側にある。

そして、最近の地震の事例からみれば、提案されている多くの液状化危険度判定手法は、その危険度を過大に評価する結果を与えるように思われる。それは、例えば過去の地震資料などを参照する場合、小規模な液状化と推測されるケース等も大規模な場合と同じ重みで用いられている、あるいは室内実験の限界等がその理由と思われる。

2. べき関数型履歴モデルによる液状化判定手法

手法の基本は、Characteristics Method に対するべき関数型復元力モデルの適用にある(以下CM法と呼ぶ)。土のひずみ γ -剛性比 G/G_0 の関係 (G_0 : 初期剛性, G : 非線形時剛性) については図-1(a), (b)に示す既往の研究成果を用いるが、これらの平均的な関係として、粘性土については石原ほか(1975)らの関数関係、砂質土については Yoshimi & Ohka (1973) らのそれを(1)~(4)式のように、本研究ではべき関数型で表現した(図-1(a), (b)は石原, 1976による)。

$$\left. \begin{array}{l} \text{砂 層} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{骨 曲 線 : } \tau/\tau_v = (\gamma/\gamma_v)^{0.968}, \gamma \geq 0.0092\% \\ \quad \text{の場合 : } \tau/\tau_v = 2.1(\gamma/\gamma_v)^{0.633} \quad (1) \\ \text{剛性-ひずみ : } G/G_0 = (\gamma/\gamma_v)^{-0.032}, \gamma \geq 0.0092 \\ \quad \text{\%の場合 : } 2.1(\gamma/\gamma_v)^{-0.367} \quad (2) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

* 東京都立大学都市研究センター・工学部

** 東京都立大学工学部

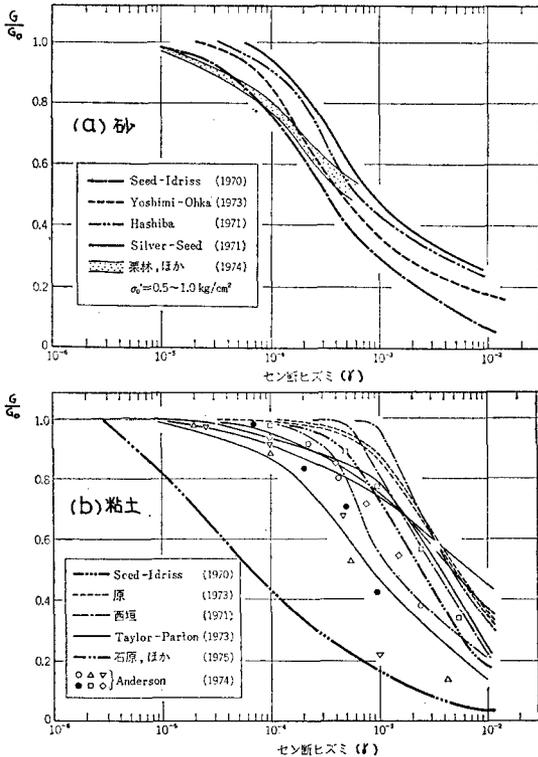


図1 動的実験による土の $G/G_0 - \gamma$ の関係 (石原, 1976による)

粘性土

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{骨 曲 線 : } \tau/\tau_y = (\gamma/\gamma_y)^{0.991}, \gamma \geq 0.0495\% \\ \text{の 場 合 : } \tau/\tau_y = 6.4(\gamma/\gamma_y)^{0.515} \quad (3) \\ \text{剛 性-ひずみ : } G/G_0 = (\gamma/\gamma_y)^{-0.009}, \gamma \geq 0.0495\% \\ \text{の 場 合 : } G/G_0 = 6.4(\gamma/\gamma_y)^{-0.485} \end{array} \right. \quad (4)$$

この(1)~(4)式を図示したものが図2(a), (b)である。この仮定の基にCM法を用いて地盤の応答計算を行うが、土のせん断応力 τ -ひずみ γ の関係を示すモデルとしては、次のべき関数型履歴モデルが用いられる。

骨曲線: $\frac{\tau}{\tau_y} = k \left(\frac{\gamma}{\gamma_y} \right)^\alpha \quad (5)$

履歴曲線: $\frac{\tau}{\tau_y} = \pm 2k \{ (\gamma_0 \pm \gamma) / 2\gamma_y \}^\alpha \mp k \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_y} \right)^\alpha \quad (6)$

ここに、 τ_y, γ_y は無次元化定数であるが、微小振動時の応力-ひずみ関係 (線形性が成立すると仮定) を満足する任意の値とする。 γ_0 はひずみ (履歴曲線) の折り返し点の値である。なお、 α, k は定数である必要はなく、室内実験等の結果の $\tau-\gamma$ 関係を最適に表わすように決定する。また(6)式の上下の符号は、それぞれ加力線、減力線に対応する。 α, k の最も一般性をもった表現は、次

式で与えられる。

$$\alpha = \frac{4f(\gamma') \cdot \gamma' - g(\gamma')}{4f(\gamma') \cdot \gamma' + g(\gamma')} \quad (7)$$

$$k = \frac{f(\gamma')}{\gamma'^\alpha} \quad (8)$$

ここに、 $\gamma' = \gamma/\gamma_y$ であり、 $f(\gamma'), g(\gamma')$ はそれぞれ $\tau-\gamma$ 関係の骨曲線、ループの囲む面積である。

すなわち、土の動的実験における $\tau-\gamma$ 関係の骨曲線、ループの囲む面積が、ひずみの任意の関数で近似できれば、 α, k は(7), (8)式で定められ、この α, k を用いた上記べき関数型復元力モデルは、実験結果を近似関数化したモデルと振動特性において等価であることは証明されている (望月・北川・1976a, b)。

しかし、土の動的パラメータを求めるために行われてきた実験の多くは、一般にその結果を $G/G_0 - \gamma, h$ (減衰定数) $-\gamma$ の型でまとめられている (例えば、原・清田, 1977)。そのような結果を利用する場合は、 $\tau = G(\gamma)\gamma$ として骨曲線を近似関数化することになろう。ループの面積 $g(\gamma)$ は、一般に表示されている

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta w}{w}$$

の関係、すなわち

$$h = g(\gamma) / (2\pi\tau\epsilon)$$

から近似関数化することになる。

いま、多層地盤中を、地震波が鉛直に伝播する場合を考え、CM法を用いて有限差分で解く。基盤層 ($j=n+1$) からの入射波は、図3の $z-t$ diagram (z : 深さ, t : 時刻歴) の記号を用い、下式のように表わせる。

$$\tau_P = \rho_B V_{SB} (2V_I - V_B)$$

$$V_P = V_B (t + \Delta) = \frac{1}{\rho_{j-1} V_{Sj-1} + \rho_B V_{SB}} [2\rho_B V_{SB} V_I (t + \Delta t) + \rho_{j-1} V_{Sj-1} V_A' - \tau_A' + \frac{\eta_{j-1}}{\Delta Z_{j-1}} \{ V_B(t) - V_A' \}] \quad (9)$$

中間層 ($j=2 \sim n$) のそれぞれの節点のせん断応力、S波速度振幅 V_P は (各時刻歴における)、

$$\tau_P = \frac{1}{\rho_{j-1} V_{Sj-1} + \rho_j V_{Sj}} \{ \rho_j V_{Sj} \tau_A' + \rho_{j-1} V_{Sj-1} \tau_B' - \rho_{j-1} V_{Sj-1} \rho_j V_{Sj} (V_A' - V_B') - (\rho_j V_{Sj} \eta_{j-1} + \rho_{j-1} V_{Sj-1} \eta_j) \cdot \frac{(V_B' - V_A')}{(\Delta Z'_{j-1} + \Delta Z'_j)} \} \quad (10)$$

$$V_P = \frac{1}{\rho_{j-1} V_{Sj-j} + \rho_j V_{Sj}} \{ \tau_B' - \tau_A' + \rho_{j-1} V_{Sj-1} V_A' + \rho_j V_{Sj} V_B + (\eta_{j-1} - \eta_j) \cdot \frac{(V_B' - V_A')}{(\Delta Z'_{j-1} + \Delta Z'_j)} \} \quad (11)$$

地表層 ($j=1$) での τ_P と V_P は

$$\tau_P = 0$$

$$V_P = V_B + \frac{1}{\rho_j V_{Sj}} \{ \tau_B' - \frac{\eta_j}{\Delta Z'_j} (V_B - V_C) \} \quad (12)$$

図3は、以上の関係を模式化したものでもある。図3でそれぞれの節点のせん断応力 τ_P を時刻歴で求め、その最大値を τ_{max} とし、各深さにおける有効せん断応力 $0.65\tau_{max}$ が、Seed & Idriss (1971) が実験的に求めた液状化臨界せん断応力 τ_{ln} を越えたとき液状化が発生したと判定する。なお、 τ_{ln} に関する詳細は松田・望月・小泉 (1979) にまとめている。

3. 札幌市北部低地地盤の液状化予測事例

札幌市に影響をおよぼす地震は1952年十勝沖地震 (M 8.1)、1968年十勝沖地震 (M 7.9) の2つのタイプの海洋型巨大地震と石狩湾に震源をもつM 7.0程度の地震と考えられている。前記2つの地震の震央距離は、いずれも大体 200km であり、石狩湾のそれは約 70km である。

それ故、この計算例でもM 8級 (震央距離 200km)、M 7級 (震央距離 70km) の2つのタイプの地震を想定し、総プロ「新耐震設計法 (案)」(1977) の最大水平方向加速度と震央距離の関係などを参考にし、基盤にM 8級で 40gal、M 7級では 50gal を入力することにした。基盤としてはS波速度がほぼ 600m/sec 程度と推定されている第三紀層の泥岩を採用している。なお、その単位体積重量 ρ は 2.2t/m^3 を仮定している。

表層地盤の V_s は鏡味 (1979) が札幌市の地盤の応答計算で用いた下式により決定した。

$$V_s = 85.01 \times H^{0.241} \times \left\{ \begin{array}{l} 1.000 \text{ (沖積層)} \\ 1.434 \text{ (洪積層)} \end{array} \right\} \times \left\{ \begin{array}{l} 1.000 \text{ (粘土)} \\ 1.240 \text{ (砂)} \\ 1.545 \text{ (砂礫)} \end{array} \right\} \text{ (m/s)} \quad (13)$$

また、 ρ (t/m^3) については、地表近くでは、1.7、深部では 1.9 (中間層 1.8) を仮定しており、減衰を表わすQ値も浅層で $Q=10$ 、深部では 15 (基盤も含む) と変

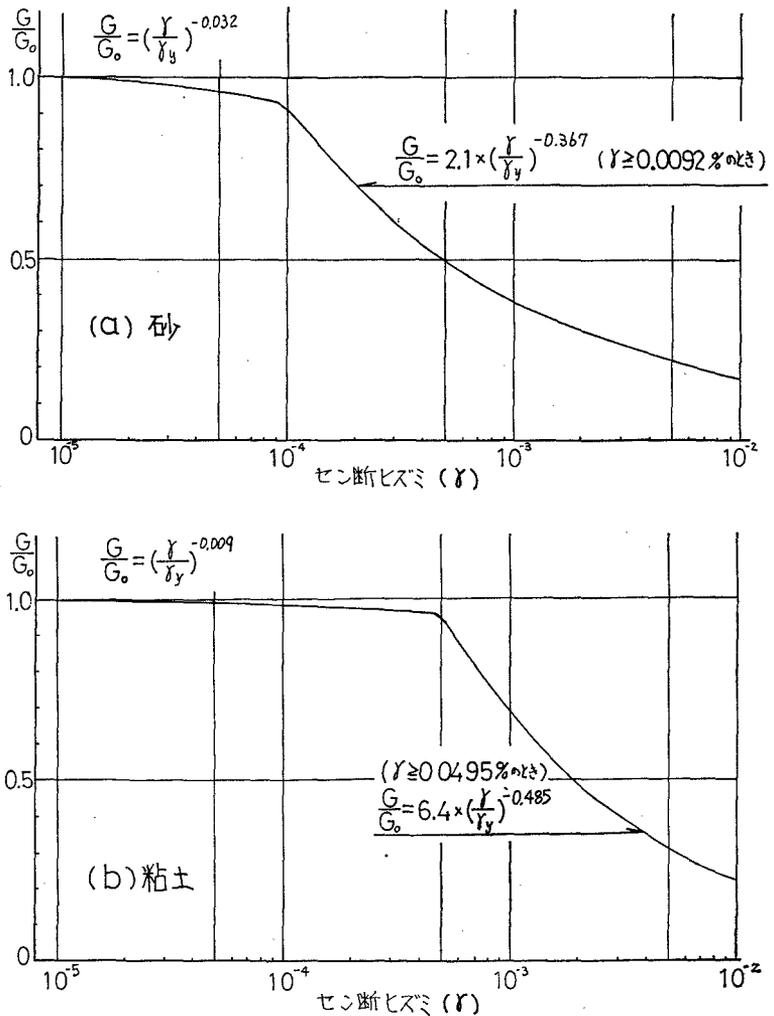


図2 図1の $G/G_0-\gamma$ 関係を平均化した関数

化させている (いずれも、鏡味, 1979が用いている値)。なお(13)式は、N値に無関係の式となっているが、それはN値の記載のない柱状図が少なからずあるためである (道立寒地建築研究所, 1970など)。

ところで、地盤への入力地震波は、図4に示すように地震規模を考慮し、M 7級では 0.3秒以上の長周期成分は周期に逆比例する特性をもたせており (より短周期側では一定)、継続時間も 10.24秒と、M 8級の 20.48秒の 1/2 を仮定している。なお、いずれも 10Hz 以上で短周期成分はカットしてあり、刻み時間 Δt は 0.01秒である。位相特性は正規乱数を用いており、振幅の増加、減少等のエンベロップは考えていない。したがって、上記継続時間は、全時刻歴にわたり主要動のそれということになる。

この事例ではまず札幌市北部低地の液状化危険度を、

田治米・望月・松田 (1977) : A (手法) で判定し、4種の代表的な液状化危険度の高い柱状図を選定した。そして、B法 (谷本・野田, 1976), C法 (Seed & Idriss, 1971) 並びに2. で述べた手法 (D) の合計4種の手法を用いて、液状化危険度を予測するとともに4種の手法による結果を比較した。なお前述したように、A, B, Cの手法については、松田・望月・小泉 (1979) にまとめて示してある。また、いずれの地盤モデルとも、これらの地区の平均的な地下水位2.0mでを仮定しており、かつ、砂の粒径は0.2mmの細砂、相対密度は50%と考えている (C法, D法)。

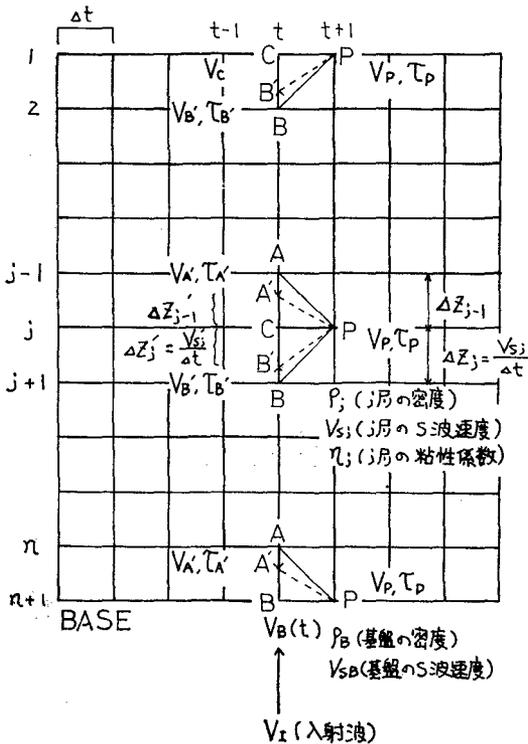


図3 CM法によるダイアグラム (図中のダッシュ、 V_{sj} , τ_A' 等は非線形化後に対応)

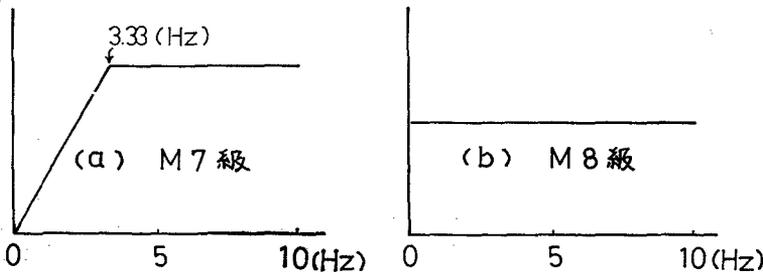


図4 基盤入射地震波のフーリエスペクトル

図5(a), (b), (c), (d)に4種の地盤のCM法による深さ方向の最大ひずみ, 最大加速度, 最大せん断応力を示した (最左端は、柱状図)。いずれの地盤ともひずみ, せん断応力はM8級 (十勝沖地震のタイプ) の方がかなり大きいことがわかる。すなわち、基盤での入力加速度は、M7級 (石狩湾地盤) の方が50galと、M8級のそれより10gal (25%) 大きいにもかかわらず、地震波の周波数特性 (図4) 並びに継続時間の効果が顕著に表われているといえる。なお、CM法による地表最大加速度をM7, 8級地震に対する4種の地盤について表1に示す。この結果はB, Cの手法で用いられる。

図6は、図5(b)の深さ7.9mの位置におけるせん断応力 τ (この場合、図7(b)に対応するように応力は応答応力に0.65を乗じた値) - ひずみ γ の地震応答時の関係为例として描いたものである。なお、地震レベルはM8級に対応するが、最大ひずみは0.05%程度であり、さほど大きくはないにもかかわらず明瞭なゼロ線移動 (非線形化増大によるフロー) が認められ、液状化へ移行を示している。

図7(a), (b), (c), (d)はそれぞれ4種の地盤のM7, M8級の地震入力に対する4種の液状化判定手法による結果である。各深さにおける○印は、液状化の発生を、×印は液状化が発生しないことを示す。4種の判定手法のうち、C, Dの手法は地震時地中せん断応力と実験室における砂の動的実験のくり返し応力 τ_{ln} (液状化限界応力, M7級: くり返し数, $n=10$, M8級: $n=30$) とを比較する方法であるから、深さ方向の各応力の分布状況も示してある (C, Dの応力が、それぞれ τ_{l10} , τ_{l30} を越えたとき、その深さで液状化発生と判定する)。

各柱状図が示すように砂層のN値はいずれも5程度でかなり低い。したがって、新潟地震など過去の地震における液状化の体験に基づく手法A, Bによれば、M7, M8のいずれの地震によっても、ほぼ全層にわたって液状化を生ずる (1964年新潟地震の最大観測加速度: 157gal)。またCの結果もそれに近い。これも地表加速度 (表1) が200gal内外を示すためと考えられる。

一方、CM法によれば、M7級の地震を想定した場合、いずれの地盤のいずれの深さでも液状化は生じない

表1 地表面最大加速度

No.	M7級	M8級
(a)	183.0	195.8
(b)	246.8	192.9
(d)	201.6	239.9
(d)	196.1	186.9

(gal)

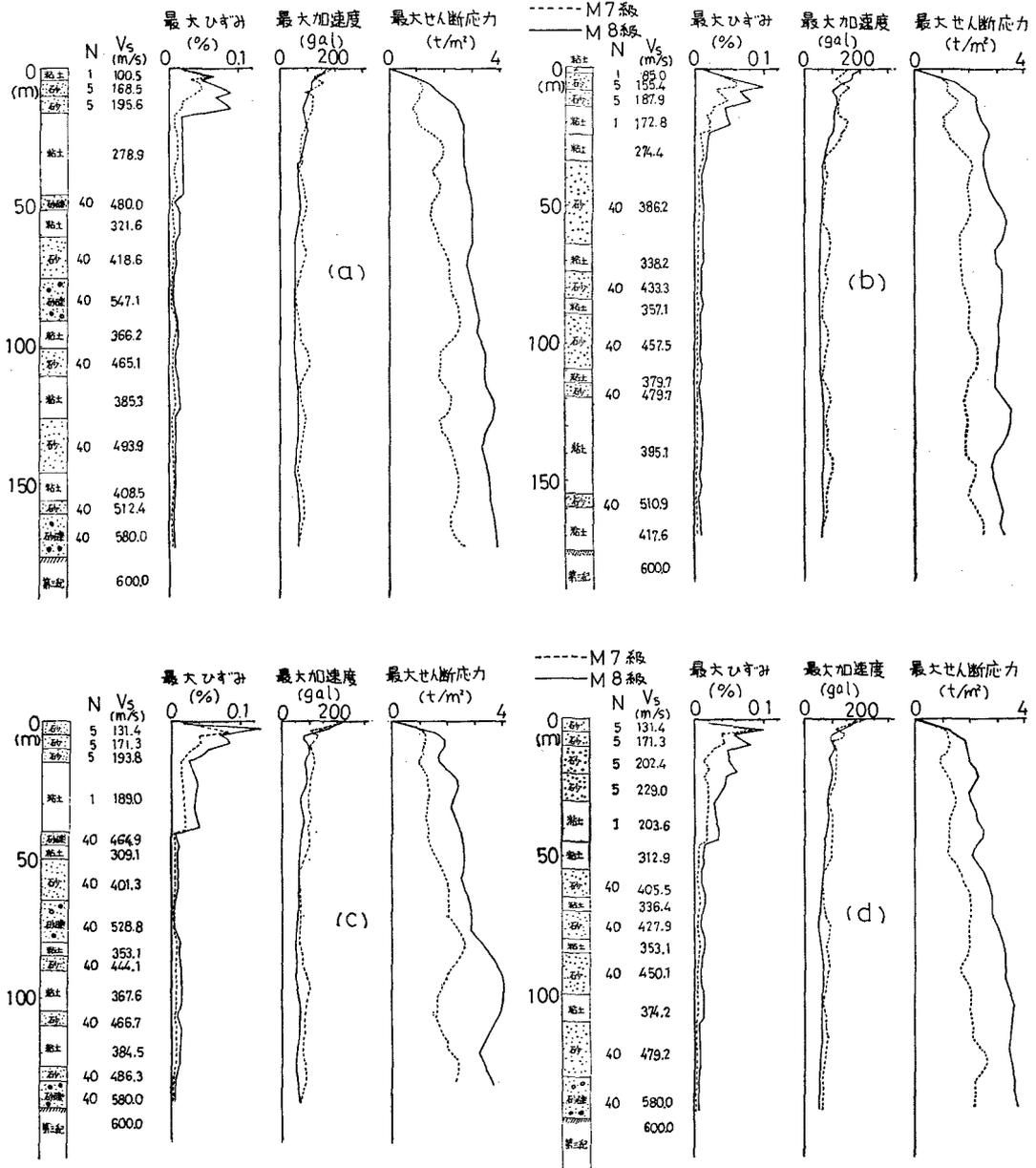


図5 札幌市液状化危険地域地盤の非線形地震応答解析例

結果が得られている。そしてM8級の地震ではいずれの地震も液状化は生じるが、その深さの方向の範囲（液状化発生区間）は、かなりせまい。このような結果が得られた最大の理由の一つは、例えN値が変化しなくともVsは深さの増加とともに増大する(4)式を適用したことにあると思われる。Vsは $V_s = \sqrt{G \cdot g / \rho}$ 、g:重力の加速度、の関係をもつからせん断剛性GはVsの2乗で

効く。また、(4)式はN値の項がないため、若干精度は低下していると考えられるが、大きな誤りがあるとは思われない。

したがって、筆者らは、CM法の結果が特異であるとは考えていない。すなわち、この札幌市の事例ではCM法のみが、大規模な液状化の生じない側の結果を与えているが、次に示す東京都大田区の計算例では、ほぼ妥当

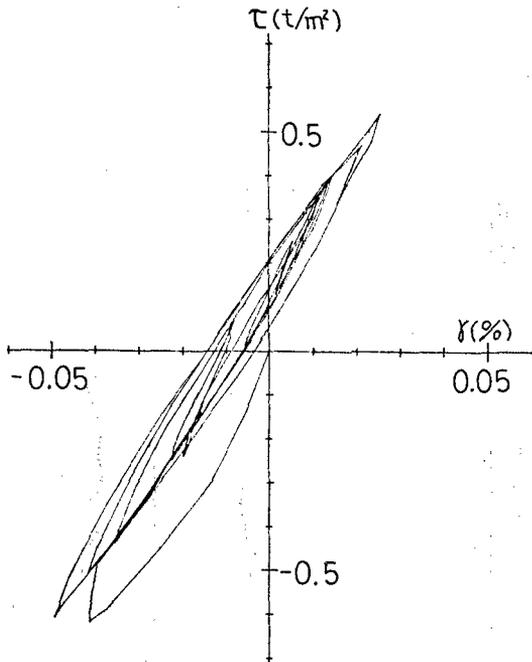


図6 τ - γ の地震応答ループ
(図5(b)の深さ7.9m)

と思われる結果が得られた。また、1952年、1968年の2つの十勝沖地震でも、これらの地区でA～Cの結果が示すほどの大規模(層厚の大きい)な液状化が生じたとの報告はない。

4. 東京都大田区の地盤の液状化予測事例

この事例研究は、松田・望月・小泉(1979)のサイスマック・マイクロゾーニングの研究の一部として行ったものである。基盤は三浦層群ないしそれに相当する地層($V_s=500\text{m/sec}$, $\rho=2.0\text{t/m}^3$)を採用している。また表層地盤の V_s は田治米・望月・松田(1977)の実験式から算定しており、Q値はいずれの地層とも20を仮定した。 ρ は建設省計画局他(1969):東京湾周辺地帯の地盤、都市地盤調査報告書、Vol. 17を参照して決定したが、それぞれ後述、図10の各図に例示してある。

想定地震は関東大地震M8級であり、基盤入力100galとした。すなわち、札幌市のその2.5倍の最大加速度を仮定したが、周波数特性、継続時間、時間刻み等は全く札幌市のM8級のそれと同一である。

図8は、各種応答の深さ方向の分布の一例である(羽田地区)。入力レベルが高いため、非線形化の度合いが大きく、地表応答最大加速度は、さほど大きくはない(264gal)。ただ、最大ひずみは0.4%を越えてお

り、大田区で行った31例の計算の中でも最も大きい級に属する。

図9は、このひずみが最大を示す深さ近傍の応答計算における応力(τ)-ひずみ(γ)の時刻歴に対応する挙動である(τ は、図6と同様の表現)。札幌市における計算例の一例として示した図6に比べ、ひずみは0.3%程度(深さGL-7.4m)と大きいため、軸ずれ(フロー)もかなり大きく進展していることがわかる。

図10(a)～(g)は、計算した31例から7例をピックアップし、CM法による各深さの有効(地震)応力 $\tau_D=0.65\tau_{max}$ と τ_{130} を比較したものであるが、 f を除き、ほぼ全砂層厚にわたり、 $\tau_D>\tau_{130}$ となっている。 f は地下水位が比較的深い(GL-4.9m)からであり、筆者らはこのようなケースの場合、大規模液状化はまず生じないと判定している。

例示した7ケースの地表最大加速度は、最大271.0gal(e)であり、最小は179.5gal(d)であるから、大きな非線形化のために、応答加速度はかなり小さくなっていることがわかる(札幌市・表1の応答倍率、入力40gal、M8級と比較すれば、よくわかる)。因みに、計算した31例のうちの最大地表応答加速度は404.3gal(大森西地区、液状化はほとんど生じない)。

ところで、図10(a)、(e)などの砂層のN値は、かなりの層厚にわたりかなり高い。しかし、結果的には基盤入力100galといった(大体関東大地震級を想定)といった大地震では大規模液状化を生ずる可能性が高いことを示す。なお、他の多くの手法によれば、より小さい入力でも液状化危険度の高い地域は広がる。しかし、関東大地震の諸記録からみる限り、筆者らのD法(CM法)による結果さえ、液状化危険地域を過大に評価している可能性があるようにも思われる。

5. おわりに

地盤液状化危険度を予測することは、大変困難な問題である。それは、液状化に寄与する要因が非常に多いということであり、また過去の地震記録でも液状化発生に関する記述は、あいまいであり、特にそれが被害にどの程度寄与したかの判断を下しえないケースがほとんどである(少くとも量的には)。したがって、過去の地震の液状化地点の地盤と地震規模(M、地表加速度の推定値)の関係などを統計的に処理した手法をそのまま用いることは危険であるし(液状化層厚の薄い小規模なものまで資料として採用されているように考えられる)、実験室における土の動的実験もケーススタディの域をでていないと考えられる。またどの程度それらの結果が自然状態の地層条件と、あるいは地震波の伝播を再現しているかも不確定である。

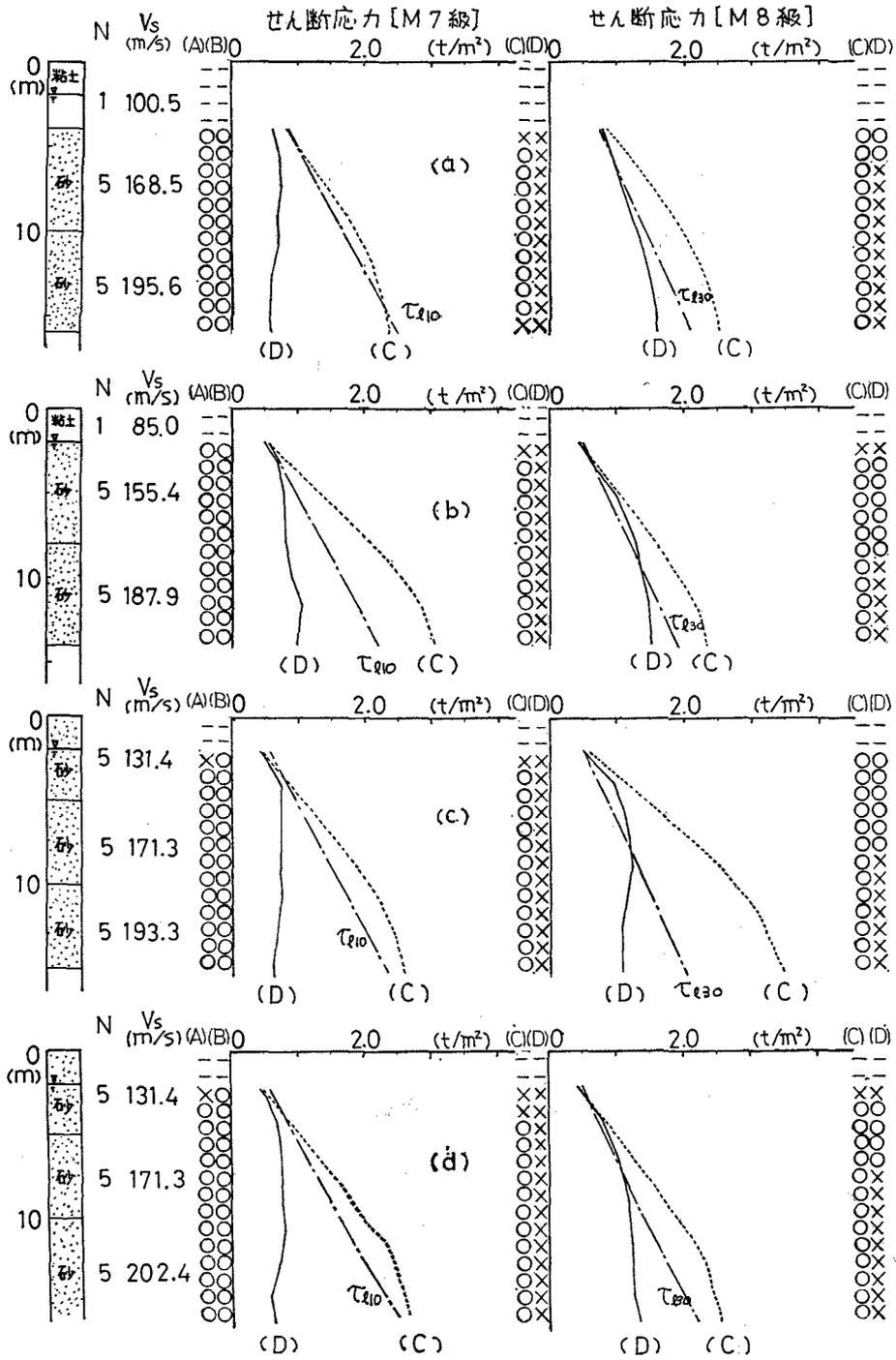


図7 4種の手法による液状化地盤判定

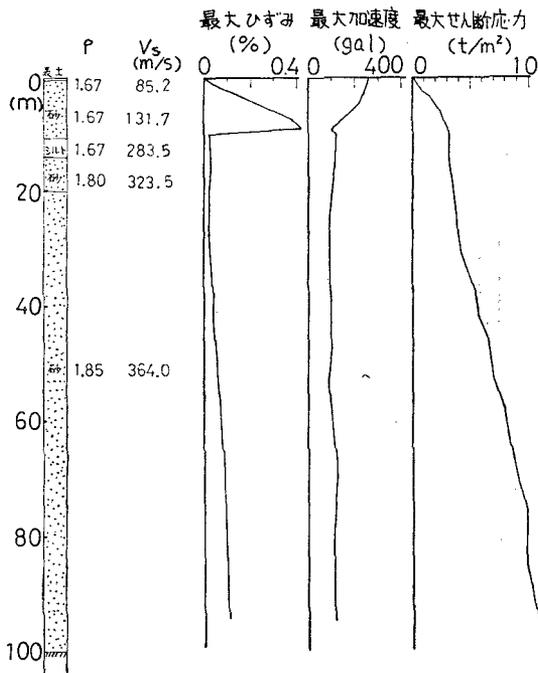


図 8 大田区(羽田1丁目)地盤の非線形応答解析例 (Amax=264.1gal)

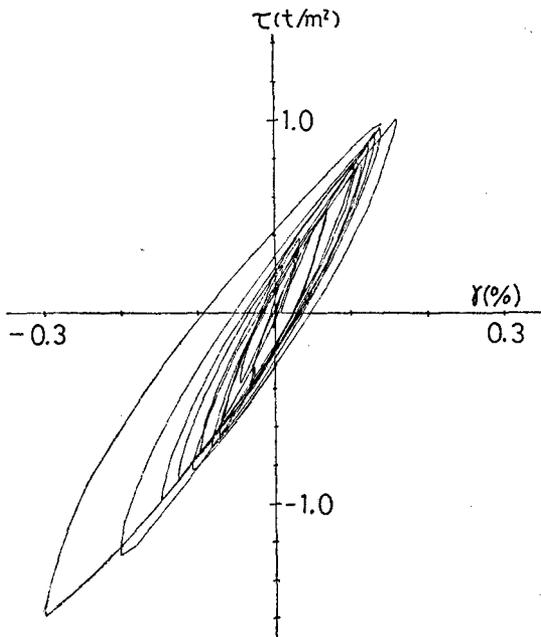


図 9 τ - γ の地震応答ループ(図-8地盤の深さ7.4m)

したがって、液状化危険度の予測精度は、いずれの手法(少なからず提案されている)によっても、現状では大きな限界があり、その可能性のあり、なし、あるいは可能性のある場合の程度の目安が与えられるに過ぎないと解すべきであろう。そのような意味では、ここに提案し、事例研究を行ったCM法は土質実験結果を忠実に反映した動的解析法であり、土の挙動に関する実験資料等が精度よく与えられれば、十分実用性をもっていると考えている。またこの報告で示した事例もほぼ妥当な結果を与えていると思われる(他の手法の多くは危険度について過大評価する傾向がある)。

末尾ながら、この研究において地盤モデルの選定でご協力いただいた本学都市研究センター(理学部)、松田磐余、田村俊和の両先生に厚くお礼申し上げます。また、札幌市の入力地震動、地盤定数等でご教授いただいた北大理学部田治米鏡二、太田 裕両先生ほかに感謝いたします。さらに大田区の地盤資料の提供、同資料の整理等で協力いただいた大田区役所建築部指導課市街地防災係並びに万建築設計事務所(所長木村秀雄氏)に厚く御礼申し上げます。

文 献 一 覧

石原研而
 1976 『土質動力学の基礎』鹿島出版会。
 石原研而・根井基雄・上田 茂・竹原有二
 1975 「地震時における埋立軟弱地盤の応答解析」『第4回日本地震工学シンポジウム講演集』。
 鏡味洋史
 1979 「地表の地震動に与える地盤の影響についての一考察」『北海道大学工学部研究報告』第92号。
 鏡味洋史・岡田成幸
 1979 「地震時液状化危険度の簡易判定法の構成」『日本建築学会大会学術講演梗概集』。
 建築省建築研究所
 1977 「総プロ(耐震設計法)研究報告“新耐震設計法(案)”」『建築研究報告』。No. 79。
 田治米辰雄・望月利男・松田磐余
 1977 『地盤と震害—地域防災研究からのアプローチ』棋書店。
 谷本喜一・野田 耕
 1976 「地震時における砂質地盤の液状化の総計的方法による予測」『土木学会論文報告集』。No. 256。
 原 昭夫・清田芳治
 1977 「Dynamic Shear Tests of Soils for Seismic

- Analyses」『Proc. 9th, ICSMFE』.
- 北海道立寒地建築研究所
1970 『札幌市の地盤資料』その1, その2。
松田磐余・望月利男・小泉敏一
1979 「地盤構造にもとづくサイスミック・マイクロゾーニングについて—東京都大田区を例として—」『総合都市研究』第8号。
- 望月利男・北川 博
1976a 「一般履歴系の復元力モデルについて, その1, 履歴系の震動特性と履歴曲線の幾何学的形状との関係について」『日本建築学会関東支部研究報告』。
1976b 「一般履歴系の復元力モデルについて, その2, 復元力モデル化の幾何学的条件とその置換法について」『日本建築学会関東支部研究報告』。
1977 「履歴系の復元力モデルについて, その3, べて関数型履歴系の地震応答解析法」『日本建築学会論文報告集』第256号。
望月利男・大波正行・原 昭夫・山田隆夫
1979 「べき関数型履歴モデルによる地盤の非線形地震応答計算」『日本建築学会大会学術講演梗概集』。
- Papadis, C. N.
1973 「Soil Transients by Characteristics Method」『A Dissertation for the Degree of Philosophy, Michigan Univ.』.
- Seed, H. B. & Idriss, I. M.
1971 「Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential」『Proc. of ASCE』 Vol. 97, SM 9.
- Yoshimi, Y. & Ohoka, H.
1973 「A Ring Torsion Apparatus for Simple Shear Tests」『Proc. 8th ICSMFE』 Vol. 1.

INVESTIGATION ON SANDY SOILS PRONE TO LIQUEFACTION RESULTING FROM EARTHQUAKE

Toshio Mochizuki* and Toshikazu Koizumi**

Comprehensive Urban Studies, No. 11, 1980, pp. 117—126

This paper investigates the estimation of sandy soils prone to liquefaction during an earthquake with the calculations of nonlinear earthquake response of the ground. The calculations were made using the characteristics method and the nonlinearity of soils applying a model expressed in terms of power function.

As examples, an areas Ota-ku (ward), Tokyo and Sapporo, Hokkaido were chosen as subjects in the investigation. These results were then compared with other methods results obtained for same purpose.

* Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University

** Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University