

The Prediction of Soil Liquefaction in Hiroshima City

中 木 一 文 * (Kazufumi Nakagi)

古 川 智 ** (Satoshi Furukawa)

宮 越 一 郎 *** (Ichirou Miyakoshi)

向 井 雅 司 **** (Masashi Mukai)

キーワード：液状化／N値／地下水位／細粒分含有率／地表面最大加速度／想定地震動（IGC：D7）

1. まえがき

新潟地震以来、地盤の液状化は工学的問題として取り上げられ、液状化による被害も各地で多数報告されている。広島市でも、最近特に各地で頻繁に発生する大型地震の被害報告より、液状化危険分布図の作製が時代的要請としてわかにクローズアップされてきた。

一方、この地域は広島湾にのぞむ中国山地の縁辺をきざむ各河川の河口部に独立して形成された三角州低地群であり、各三角州低地の微地形構成は河道や海岸にそう微高所としての自然堤防と砂州、その間の浅所である湿地性堤間低地、汀線の停滞期に生成した微高地の浜堤、満潮時には海面となる平坦な潮汐平地、潮汐平地を人為的に陸地化した干拓地と埋立地などである。旧市内の地層は1 m前後の表土層の下に、7 m～10 mのN値20以下のゆるい砂層が堆積している。さらに臨海部ではこの砂層下部に粘土まじりのごく軟弱なシルト層がほぼ20 m以上の厚さで堆積しているが、この軟弱層は内陸部に向かって薄くなり、太田川河口の三角州の扇のかなめである戸坂付近では、殆ど消失して存在しない¹⁾。

このような地盤条件と地下水位が高い点を考慮すると、旧市内の大部分は液状化危険分布地帯であると考えられるが、本報告では以下の要領で広島市の液状化の予測について取りまとめた。まず第2章で液状化予測の定量的評価法の概要を述べ、いわゆる簡易判定手法のうち現在提唱されているSeed法、岩崎・龍岡法、時松・吉見法、柴田法、龍岡法の五手法について、主に液状化抵抗応力比に着目して各手法の比較検討を行った。第3章では、地震の規模として、芸予地震および再来年数200～500年程度の中・遠距離地震を想定し、市内の代表的2地点について、重複反射理論により地震応答計算を行い、地表面加速度を計算した。第4章では、市内を500 mピッチで分割し、ほぼ400点のボーリングデータより五手法を用い、各地区において液状化を生じる地表面最大加速度を算定し、液状化危険分布図を作製した。これと第3章の計算結果より、芸予級の地震（M=7.6）を想定すると、市内のどこで液状化の被害が発生してもおかしくないと考えられた。

2. 液状化予測手法

2.1 液状化予測の定量的評価法

1964年の新潟地震を契機に砂地盤の液状化可能性を多少なりとも定量的に評価しようという試みが数多く行われて来た。これらのうち近年研究分野で盛んに試みられている有効応力液状化解析法を別にすると、実用面で多く用いられる方法は、地震時に地盤中に生ずる応力（比）（繰返しせん断応力（比））を何らかの方法で推定し、これとは別に地盤土が液状化を生じない限界の応力（比）（液状化抵抗応力（比））を求めて、両者を比較し液状化の判定を行うものである。この場合、繰返しせん断応力（比）と液状化抵抗応力（比）の決定はいくつか

* 五洋建設（株）四国支店、 ** 中電技術コンサルタント（株）

*** 三菱重工業（株）広島研究所 **** 復建調査設計（株）

の異った手法が用いられているが、現在最も多く用いられている手法には次のようなものがある。

(1) 繰返しせん断応力(比)の決定法

- ① 簡易推定式による方法：ある深さに生ずるせん断応力を、地盤を剛体と考えたときに慣性力によって発生する応力から求める。(通常、地表面最大加速度より求める。)
- ② 応答解析による方法：不規則な地震入力に対する応答解析を行い、各深さにおける発生せん断応力を求める。(多く重複反射理論を用いた等価線形解析が用いられる。)

(2) 液状化抵抗応力(比)の決定法

- ① N値より推定する方法：従来の液状化記録や室内実験データに基づいて、N値より液状化抵抗応力(比)を求める。
- ② 室内液状化試験による方法：サンプリングによる不攪乱試料について繰返し載荷試験を行い、その結果から現位置における液状化抵抗応力(比)を求める。

通常多く用いられるのは、簡易推定式による繰返しせん断応力(比)とN値から推定した液状化抵抗応力(比)により判定を行う方法(いわゆる簡易判定手法)と、応答解析により得られる繰返しせん断応力(比)と室内液状化試験結果に基づいて算定した液状化抵抗応力(比)により判定を行うもの(いわゆる詳細判定手法)である。

簡易判定手法は比較的簡便に液状化の判定が行える方法であり、1) 土質調査結果のみから判定が下せるので広範囲の検討を行える、2) 標準貫入試験はサンプリングによる攪乱や、応力解放の影響を受ける室内液状化試験に比し、現位置での土の液状化強度を忠実に表し得る、3) 過去の液状化事例に基づくものが多く実用上の信頼性がある、等の優れた点がある。これらの長所を考慮すると、広島市の液状化検討には簡易判定手法が適当と考えられる。そこで、ここでは現在までに提案されている簡易判定手法の概要を示し、次いでその問題点などにつき主に液状化抵抗応力比の算定法に着目して述べることにする。

2.2 簡易判定手法

標準貫入試験の結果から液状化抵抗応力(比)を求める方法にもいくつかの提案があり、これらのうち Seed - Idriss²⁾の方法が最も古く多くの設計ルールにも紹介されている。一方わが国では岩崎-龍岡³⁾の方法が有名であり、道路橋示方書等に採用されている。その後これらの方法を補う形でいくつかの判定法が提案されているので、それらのうちの時松-吉見⁴⁾の方法、柴田⁵⁾の方法、および龍岡⁶⁾の方法についても触れることにする。

(1) Seedらの方法

この方法は当初 Seed - Idrissによって提案されたものであるが、平均粒径(D₅₀)の液状化抵抗応力比への影響を考慮するため、Seed et. al.⁷⁾によって修正されたものである。ここでは後者について説明する。

判定の手順は、図2-1のフローチャートに示す通りであり、その特長は次のようである。

- ① 繰返しせん断応力比は地表面最大加速度から推定するが、不規則な地震入力を等価な一様繰返し入力に置換えている。
- ② 液状化抵抗応力比はN値、マグニチュードから推定するが、これはN値と相対密度の関係をを用いて人工的に調整した試料の実験結果に基づいている。
- ③ ここで用いられているN値はプリー法によるものでわが国では自由落下法によるものより約2.7大きくなるといわれている。
- ④ 修正法によると、平均粒径が0.15mm未満のものは換

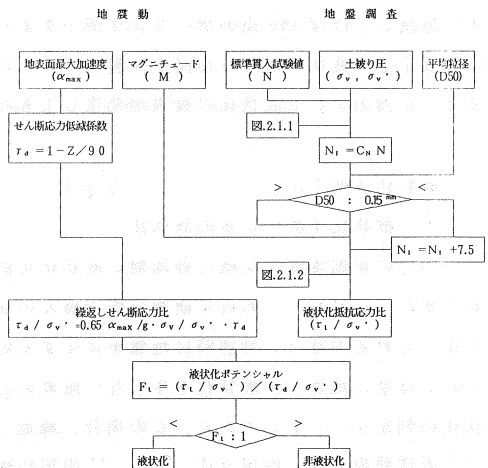


図2-1 Seed et. al.の方法

算N値を7.5大きくとり、液状化抵抗の増加を評価している。(粒径の影響を考慮していることになる。)

(2) 岩崎・龍岡の方法

判定の手順は図2-2のフローチャートに示す通りであり、以下の特長がある。

① 繰返しせん断応力比は地表面最大加速度から直接推定する。(入力波の不規則性に関する補正は、液状化抵抗応力比算定時に行う。)

② 液状化抵抗応力比は、N値と相対密度の関係を介して、多数の不攪乱試料に対する一様繰返しによる三軸液状化試験結果から求めている。(地震波の不規則性に関する補正係数(C1~C5)を乗ずる。)

③ 適用土質は正規圧密された埋立砂か沖積層の砂に限定されている。

④ 平均粒径の影響を考慮している。

(3) 時松・吉見の方法

判定手順のフローチャートは図2-3に示す通りであり、次の特長がある。

① 繰返しせん断応力比は地表面最大加速度とマグニチュードにより求めるが、不規則な入力に対する補正を行う。(一様繰返し入力に置換える。)

② 液状化抵抗応力比は、N値と相対密度の関係を介して、一様繰返しによる単純せん断液状化試験の結果から求める。

③ 液状化抵抗応力比は必要に応じせん断ひずみレベルに応じたものを算定できるので、急激なひずみの発生を示さない密な砂の液状化にも対応できる。

(4) 柴田の方法

判定手順のフローチャートを図2-4に示し、特長を以下に記す。

① 繰返しせん断応力比は、地表面最大加速度から求める。

② 液状化抵抗応力比は、既往の液状化事例に基づいてN値より直接求める。

③ 適用土質は細粒分を含まない砂質土であり、有効土被り圧が1.2kgf/cm以上では液状化事例がないとしている。

(5) 龍岡の方法

判定手順のフローチャートを図2-5に示し、特長を以下に述べる。

① 繰返しせん断応力比は、岩崎・龍岡法と全く同様に地表面最大加速度から直接推定する。

② 液状化抵抗応力比は、相対密度が60%以下の場合に岩崎・龍岡法によるものとし、それ以上の場合にはSeedが液状化事例に基づいて示した規準に平均粒径の補正項を付け加えて算定する。

2.3 各判定手法の比較

以上に述べた各判定手法はいずれも従来の液状化事例や、室内試験データに基づいているものが殆どである。

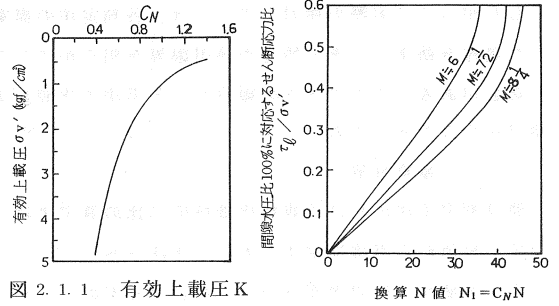


図 2.1.1 有効上載圧 K

換算 N 値 $N_i = C_N N$

図 2.1.2 限界 N 値

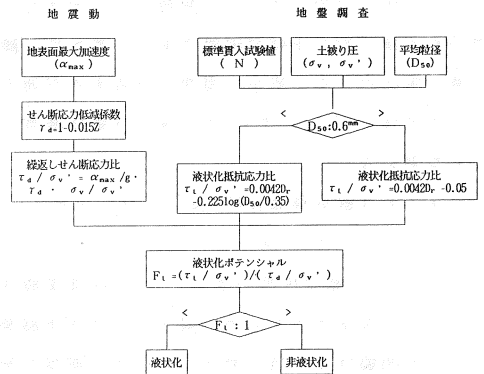


図 2-2 岩崎・龍岡の方法

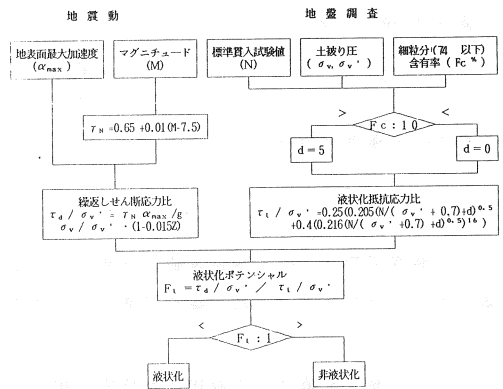


図 2-3 時松・吉見の方法

したがって、実際の検討に当たっては、各判定法の提案された過程を踏まえ、その特長や適用限界を明らかにしておく必要がある。ここではこの観点から各手法の比較および検討を行うことにする。

2.3.1 換算N値

簡易判定手法における液状化抵抗応力比の算定には、

- ① N値から直接推定するもの（A法）
- ② N値から相対密度を介して推定するもの（B法）

の2通りがある。これらを同一の尺度で比較しようとするとき、N値が有効土被り圧により影響を受けることと、相対密度がN値と有効土被り圧の関数として示されること等の理由から統一的な比較が困難である。そこで、種々の有効土被り圧におけるN値を、規準となるある有効土被り圧（ここでは 1 kgf/cm^2 とする）のときのN値に換算して表わすことを考える。

いまこのN値を換算N値 (N_1) と呼び次式で与える。

$$N_1 = C_N \cdot N \quad (2.1)$$

ここに、 C_N ：換算係数である。この換算係数は有効土被り圧により変化するもので、図2-6に示す提案がある。これらの曲線は、有効土被り圧の小さい範囲を除くとほぼ同様の結果を与えるので、ここでは古くから用いられているMeyerhofの与えた次式を用い、 $\sigma_v' = 1 \text{ kgf/cm}^2$ のときのN値を N_1 値とすると、

$$D_r = 20.5 \sqrt{\frac{N}{\sigma_v' + 0.7}} = 20.5 \sqrt{\frac{N_1}{1.7}} \quad (2.2)$$

となるので換算係数は次式で示される。

$$C_N = \frac{N_1}{N} = \frac{1.7}{\sigma_v' + 0.7} \quad (2.3)$$

この換算係数を用いて換算N値を定めることにより、N値や相対密度により示される液状化抵抗応力比を統一的に表すことができる。

2.3.2 換算N値による液状化抵抗応力比

各判定法における液状化抵抗応力の算定式を換算N値で表すことを考える。ただし、不規則载荷に対する補正を液状化抵抗応力化の算定の際に行っているもの（岩崎・龍岡法、柴田法および龍岡法）については、この補正を行わない様载荷に対するものとして表すことにする。また地震のマグニチュードの標準値として $M = 7.5$ を選ぶ

(1) Seedらの方法

$$\frac{\tau_l}{\sigma_v'} = 0.015 N_1 \quad (2.4)$$

ただし、 $\sigma_v' \leq 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ かつ $N \leq 30$

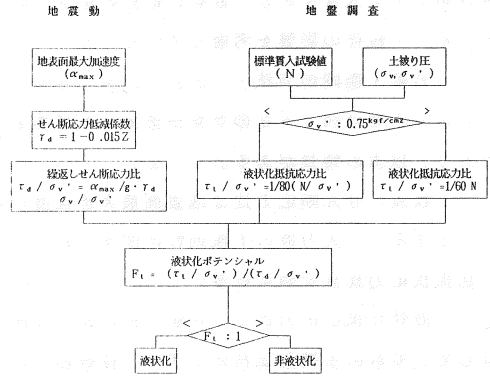


図2-4 柴田の方法

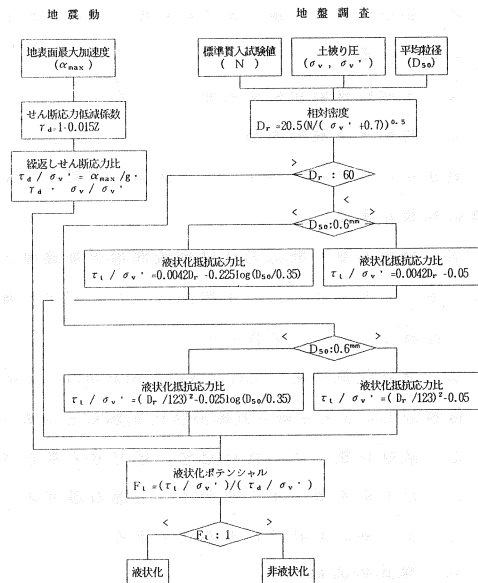


図2-5 龍岡の方法

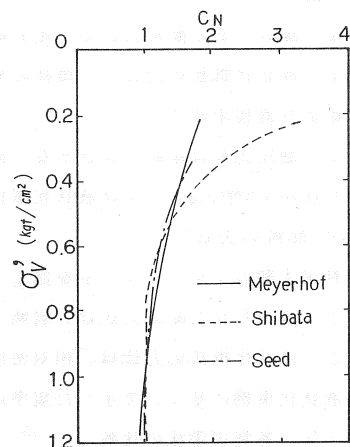


図2-6 換算係数 C_N

(2) 岩崎-龍岡の方法

$$\frac{\tau_{\ell}}{\sigma_{v'}} = 0.0573 \left[\sqrt{\frac{N_1}{1.7}} - f(D_{50}) \right] \quad (2.5)$$

ここに、 $f(D_{50})$ ：次式で与えられる平均粒径 (D_{50}) の関数

$$f(D_{50}) = \begin{cases} 2.55 \log(D_{50}/0.35) & (0.04 \leq D_{50} < 0.6 \text{ mm}) \\ 0.567 & (0.6 \leq D_{50} \leq 1.5 \text{ mm}) \end{cases} \quad (2.6)$$

ただし、 $0.2 \leq \sigma_{v'} \leq 1.7 \text{ kgf/cm}^2$

(3) 時松-吉見の方法

$$\frac{\tau_{\ell}}{\sigma_{v'}} = 0.25 \left\{ 0.205 \sqrt{\frac{N_1}{1.7} + d} + 0.4 \left(0.216 \sqrt{\frac{N_1}{1.7} + d} \right)^{16} \right\} \quad (2.7)$$

ただし、初期液状化時を考えるものとし、パラメータ d は細粒分含有率 (F_c) により次のように与えられる。

$$d = \begin{cases} 5 & (F_c \geq 10\%) \\ 0 & (F_c < 10\%) \end{cases} \quad (2.8)$$

(4) 柴田の方法

$$\frac{\tau_{\ell}}{\sigma_{v'}} = 0.0108 N_1 \quad (2.9)$$

(5) 龍岡の方法

換算 N 値が 14.6 以下では岩崎-龍岡法に準じ、14.6 以上に対しては次式による。

$$\frac{\tau_{\ell}}{\sigma_{v'}} = 0.0106 N_1 - g(D_{50}) \quad (2.10)$$

ここに、 $g(D_{50})$ ：次式で与えられる平均粒径 (D_{50}) の関数

$$g(D_{50}) = \begin{cases} 0.146 \log(D_{50}/0.35) & (0.04 \leq D_{50} < 0.6 \text{ mm}) \\ 0.325 & (0.6 \leq D_{50} < 1.5 \text{ mm}) \end{cases} \quad (2.11)$$

2.3.3 各判定手法の比較

以上に示した諸式を用いて、液状化抵抗応力比と換算 N 値の関係を比較したのが図 2-7 である。ただし同図を作成するに当たって設定した条件は次の通り、

- ① 地震のマグニチュード (M)：7.5
- ② 平均粒径 (D_{50})：0.35 mm (中砂相当)
- ③ 細粒分含有率：0%

表 2-1 に、図 2-7 の各曲線の比較に基づいて各判定手法の特長や適用上の注意点を示す。

以上現在用いられている簡易手法について、主に液状化抵抗応力比の算定を中心に比較したが、現状では時松-吉見の方法が最も合理的な判定法と言えそうである。その他、岩崎-龍岡の方法や Seed et. al. の方法も適用条件を規定することにより妥当な液状化抵抗応力比が算定されるようである。一方、柴田法は適用条件が極めて限定されるので、広範な地域での液状

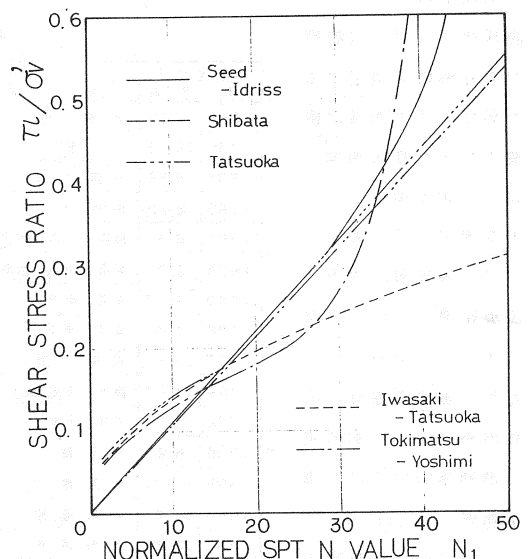


図 2-7 換算 N 値と液状化抵抗応力比

表 2-1 各判定手法の特長と適用上の注意点

判定手法	特 長	注 意 点
Seed et. al の方法	換算N値の小さいところ(土被り圧小)のデータが少なく、液状化抵抗を過小評価している可能性があるが、逆にN ₁ 値の大きい密な砂のダイレタンシー効果を評価する結果となっている。 粒径の影響は、D ₅₀ <0.15mmに対してのみ行っている。	土被り圧の小さいところで($\sigma_v' < 0.5^{kgf/cm^2}$)N値の換算係数がない。 N ₁ 値の大きいもの(N ₁ >40)に対する実測データが殆どない。 マグニチュードは5.25-8.5の範囲を想定している。
岩崎-龍岡の方法	粒径の影響を採り入れているが、対象が正規圧密された埋め立て砂および沖積砂であるので、それ以外の土質への適用には注意を要する。(N ₁ 値に上限を設けるのもひとつの方法であろう。) 粒径の影響を考慮できる範囲も限定される。	D ₅₀ が0.04-1.5mm以外の粒径については、液状化抵抗への粒径の影響を考慮できない。
時松-吉見の方法	細粒分の影響、密な砂のダイレタンシーを考慮している。 N ₁ が35より大きい範囲では最も大きな液状化抵抗を評価する。	特筆すべき注意点はない。
柴田の方法	N ₁ 値に比例する液状化抵抗を評価する。 粒径、その他の影響は考慮できず、適用は極めて限定される。	土被り圧の大きいところ($\sigma_v' > 1.2^{kgf/cm^2}$)で液状化の事例が殆どないとしている。(この範囲は適用不可とすべきだろう。)
龍岡の方法	Seed-Idrissの方法と岩崎-龍岡の方法を組み合わせたもの。相対密度により両者を使い分け、双方の欠点を補おうというもの。(N ₁ が14程度を境としている。)	相対密度が60以下の場合、粒径の影響を考慮できる条件は、岩崎-龍岡の方法と同様D ₅₀ が0.04-1.5mmの範囲である。

化を統一的に検討するには不向きであろう。

実際の液状化の判定では、換算N値が大きいところでの液状化発生はあまりないと考えられるので、例えば換算N値30程度までを考えるとすると、図2-7より、 $0 \leq N_1 \leq 13$ でSeed et. al.の方法、 $13 \leq N_1 \leq 30$ で時松・吉見の方法が最小の液状化抵抗を与えることから、安全側の液状化検討を行おうとすれば、これら2手法を組み合わせれば良いことになる。

3. 想定地震動

3.1 既応地震

地震の規模が大きくなれば、液状化が発生する地域⁸⁾の範囲は広がるが、栗林・龍岡⁸⁾らは、1872年~1968年に液状化を生じた地震のマグニチュードMと液状化が生じた地点の震央距離R(km)の関係を調べ、次の関係があることを示した。

$$\log_{10} R \leq 0.77 M - 3.6 \quad (M \leq 6) \quad (3.1)$$

広島市域で、将来、液状化の生ずる可能性がある地震を想定するために、この地域に影響を与えた既応地震⁹⁾から、上式を満足するものを選定した。表3-1に、各地震の震央、震央距離R(km)とマグニチュードMを示す。なお、震央距離は、広島市南区宇品にある第三港湾建設局広島工事事務所(34°21'N, 132°28'E)を観測点(以後、宇品観測点と

表 3-1 既応地震表

発生年月日 年 月 日	震 央		震央距離 Δ(Km)	マグニチュード M	震源域半径 r(Km)	実効距離 Δ'(Km)	最大加速度 Amax(gaL)	
	地 名	緯 度						経 度
684 11.29	土 佐 他	32.5	134.0	249.6	8.4	89.1	160.5	127
880 11.23	出 雲	35.4	133.2	133.5	7.4	28.2	105.3	110
887 8.26	五 畿 七 道	33.0	135.3	301.7	8.6	112.2	189.5	109
1099 2.22	南 海 道	33.0	135.5	317.9	8.0	56.2	261.7	47
1361 8.3	畿内、土佐、阿波	33.0	135.0	277.9	8.4	89.1	188.8	109
1605 2.3	東海、南海、西海諸道	33.0	134.9	270.2	7.9	50.1	220.1	62
1649 3.17	安芸、伊予	33.7	132.4	72.9	7.1	20.0	52.9	169
1686 1.4	安芸、伊予	34.	132.3	42.5	7.0	17.8	24.7	230
1707 10.28	五 畿 七 道	33.2	135.9	341.8	8.4	89.1	252.7	84
1854 12.24	畿内、東海他	33.0	135.0	277.9	8.4	89.1	188.8	109
Δ 1872 3.14	石見、出雲	34.9	132.0	74.8	7.1	20.0	54.8	159
◎ 1905 6.2	安芸灘	34.2	132.4	18.6	7.6	35.5	直下	400
◎ 1909 11.10	日向灘	32.0	132.5	261.1	7.9	50.1	211.0	66
◎ 1944 12.7	東 海 道 沖	33.7	136.2	351.3	8.0	56.2	295.1	34
○ 1946 12.21	南 海 道 沖	33.0	135.6	326.1	8.1	(85.0)	241.1	54

◎ 芸予地震 ○ 南海地震 Δ 浜田地震

呼ぶ)として計算した。図3-1には、式(3.1)と、これらの地震のM~R関係を示し、図3-2にその震央位置をプロットしてある。この図から、液状化の生ずる地震の分布として、鳥取と島根の県境、安芸灘、伊予灘、南海道沖を想定できる。

3.2 基盤での最大加速度

液状化の簡易判定手法では、せん断応力比を地表面最大加速度から算定する。最大加速度は、想定地震のマグニチュード、震央距離、検討地点の地盤条件との関係から求める方法が提案されている。しかし、広島市域のように軟弱な地盤においては、このような提案式を用いるより、まず基盤における最大加速度を推定し、地盤の地震応答解析によって地表面での値を求める方法が妥当であると思われる。

基盤における最大加速度は、野田・上部¹¹⁾らによる、マグニチュードと震源域から各地点までの距離(実効距離)に応じて求める推定法によった。この場合の震源域とは、マグニチュードで決まる球状の広がり仮定し、その半径r(km)は次式で表わされる。

$$\log_{10} r = 0.5 M - 2.25 \quad (3.2)$$

また、最大加速度とマグニチュード、実効距離の関係を図3-3に示す。表3-1の各地震による宇品観測点での基盤の最大加速度を、震源域半径、実効距離とともに同表に示した。

この結果、最も大きな最大加速度を与える地震は、観測点が震源域内となる1905年の芸予地震で、 $A_{max} = 400 \text{ gal}$ となり直下型地震に相当する。次に、1649年、1686年の安芸・伊予灘の地震、1872年の石見・出雲の地震が続き、広島市域から半径150km以内で発生した内陸部地震に相当する。南海道沖に集中して分布する $M > 8$ の海洋型の大地震は、震央距離が長くなり、684年の土佐地の地震での $A_{max} = 127 \text{ gal}$ が最大となる。

3.3 基盤加速度の再来年数

表3-1に示す基盤最大加速度を大きい方から順位をつけ、地震発生年の最古と最新の差を統計期間Y年とし、第N番目の加速度を A_{max} (gal)とする。横軸に $\log(A_{max})$ 、縦軸に $\log(Y/N)$ をとり、プロットする。この関係を求めると、再来年数Y/Nに対する期待値が求まる。結果を図3-4に示すが、100年期待値で $A_{max} = 70 \text{ gal}$ 、200年期待値で100galとなり、また、表3-1で示す地震で最も大きい加速度を与える芸予地震の再来年数は1262年で示され、その発生確率はかなり低くなる。

3.4 表層地盤の地震応答解析

本節では、前節までに得られた結果を基に、想定地震動として次のものを考え、広島市域の地表面での最大加速度を算出した。

- 1) 近距離地震(直下型)として、芸予地震による基盤最大加速

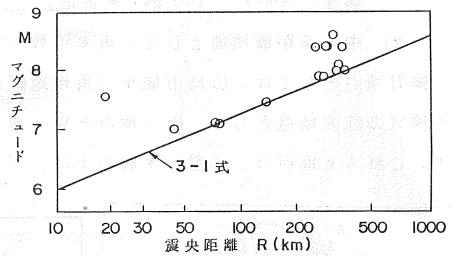


図3-1 M~R関係図

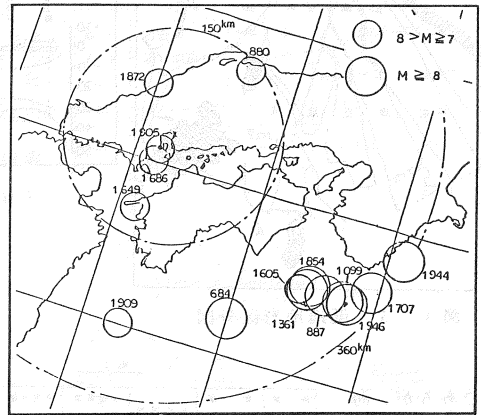


図3-2 震央位置

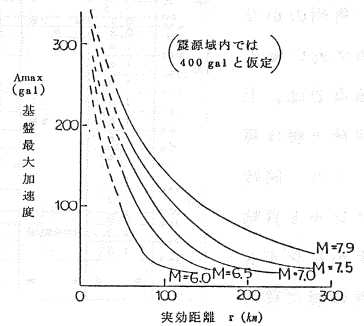


図3-3 $A_{max} \sim r$ 関係図

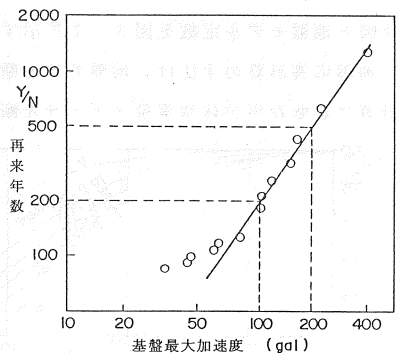


図3-4 再来年数と基盤最大加速度の関係

変形係数のひずみ依存性については、
 いろいろな試験データを整理して発表
 されている平均的なデータとして、図
 3-8, 3-9に示すものを用いる。
 また、使用する地震波形としては、有名
 地震波としてよく使用されている、
 E L C E N T R O N-S波を用い
 た。図3-10にその加速度時刻歴を、
 図3-11にフーリエスペクトルを示す。

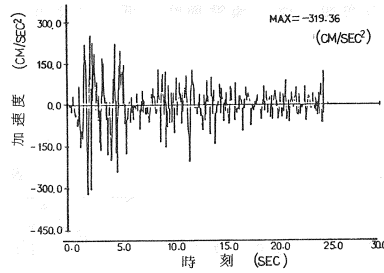


図3-10 加速度時刻歴図

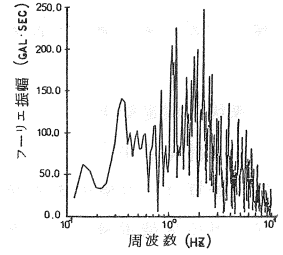


図3-11 フーリエ振幅スペクトル図

まず、再来年数200年期待値100 galを、2地点の基盤最大加
 速度として設定した場合を示す。地表面最大加速度の計算結果を、各
 層で生じたひずみのなかの最大ひずみとともに、表3-2に示す。
 表3-2には、応答計算で求めた周波数伝達関数から、地盤の固有
 振動数を示すピーク振動数と、変位振幅の増幅率を示すピーク値も
 示した。さらに、

表3-2 各地点の最大応答値

地点 番号	地表面 最大加速度	表層 最大歪	周波数伝達関数	
			固有振動数 (Hz)	増幅率
1	125	0.076	1.40	1.67
2	97	0.087	1.00	2.10

図3-12, 3-13
 に2地点の深度方
 向応答値分布を、
 各層の初期せん断
 剛性と土の種類に
 対応させて示す。
 これらの結果より
 2地点の地表面最
 大加速度は、表層
 地盤での増幅があ
 まりない結果とな
 った。これは、一
 般的な広島市域の
 地層構造が、基盤
 (洪積層)から、

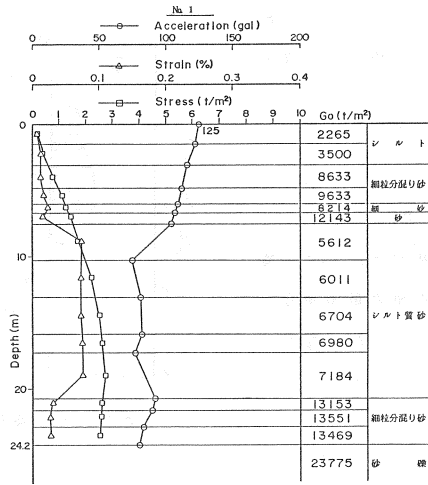


図3-12 深度方向応答値分布 (No.1地点)

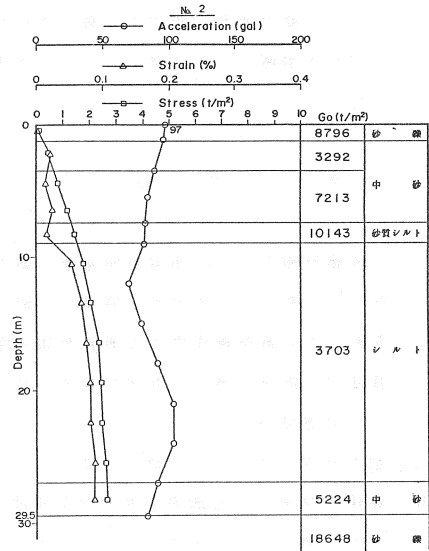


図3-12 深度方向応答値分布 (No.2地点)

下部砂層、粘土層、上部砂レキ層と続き、最も軟
 かい層(粘土層)を中間にはさむサンドイッチ構
 造となっているため、粘土層で加速度の増幅が抑
 制されることに起因していると考えられる。この
 ことは、No.1地点に比べ、No.2地点でその傾向が
 大きく表われていることからいえる。

表3-3 1地点の最大応答値

最大加速度 (gal)	
基盤	地表面
200	183
400	245

次に、No.1地点について、基盤最大加速度とし
 て、再来年数500年期待値200 galと、芸予地震級の400 galを設定した場合
 の地表面最大加速度の計算結果を表3-3に示す。さらに、同地点での基盤へ
 の各入力加速度に対する加速度応答倍率を示したものが図3-14である。これ
 より、入力加速度が大きくなるほど、加速度応答倍率が小さくなっていること

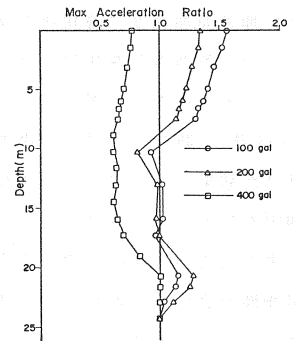


図3-14 加速度応答倍率

がわかるが、これは、入力レベルの増加に伴う地盤剛性の低下により、系の固有周期が長周期側に移行し、応答が減少するためと考えられる。

4. 液状化判定結果

4.1 計算手法

- (1) 計算は、N値のある深度で行う。
- (2) 単位体積重量 (γ)、平均粒径 (D_{50}) のデータの無いものは、参考文献¹²⁾によった。(表4-1参照)。なお、今回調査から得られた D_{50} は表4-1に示すとおりで、同文献に示される値に設定しても妥当であることが確認された。
- (3) 細粒分含有率のデータの無いものは、日本統一分類の値を参考に表4-1のように設定した。
- (4) 検討の最深度の標高は $GL-20m$ とした。
- (5) 液状化の判定方法は、繰返しせん断抵抗率 F_L

だけでは検討地点の液状化の激しさがわからないので、これを表わす指標として、図4-1に示す液状化指数 P_L を導入した¹⁵⁾。

$$P_L = \int_0^{20} F \cdot W(z) \cdot dz \quad \begin{cases} F = 1 - F_L & (F_L < 1) \\ F = 0 & (F_L \geq 1) \end{cases} \quad (4.1)$$

- (6) 各検討地点ごとに地表面加速度の値を段階的にかえて計算を行い、あらかじめ定めた限界 P_L 値になる地表面加速度を求め、この値を液状化する地表面加速度とみなした。なお、限界 P_L 値は、過去の事例を参考に $P_L = 15$ とした。

4.2 計算結果

上記の計算手法にて、広島市の約400点のボーリングデータより、液状化を発生する地表面加速度を前述の5手法で算定した。計算は全て電算で処理したが、その計算例を示したものが図4-2である。そして、各手法による広島市の液状化を発生する地表面加速度の分布、すなわち、液状化危険分布図を示したものが、図4-3~4-7である。

これらの各手法による結果を比較すると、Seed法、時松・吉見法が小さい地表面加速度で液状化を発生するという結果となっているようである。そこで、各地点で液状化を発生する最小の地表面加速度を与える手法についてまとめたものが図4-8である。同図に示すように、9割以上は、Seed法、時松・吉見法で決まっている。これは、2.3で述べた結果を裏付けた結果となっている。すなわち、広島市においても、安全側の液状化判定を行おうとすれば、この2手法を組み合わせればよいことになる。

また、この2手法と他の手法を地形で比較してみると、一般に液状化の可能性が高いといわれている埋立地・干拓地で、その違いが顕著に表われているようである。

次に、3で検討した代表2地点での応答計算結果より得られた地表面最

表4-1 土質分類と物性値

土質分類	道路橋示方指V耐震設計編			今回調査結果	日本統一分類
	γ_{L2} (t/m^3)	γ_{L1} (t/m^3)	D_{50} (mm)		細粒分含有率 (%)
灰上	1.7	1.5	0.02	-	0
シルト	1.75	1.55	0.025	0.019	100
砂質シルト	1.8	1.6	0.04	0.028	30
シルト質細砂	1.8	1.6	0.07	0.21	10
微細砂	1.85	1.65	0.1	0.045	0
細砂	1.95	1.75	0.15	0.27	0
中砂	2.0	1.8	0.35	0.42	0
粗砂	2.0	1.8	0.6	0.7	0
砂礫	2.1	1.9	2.0	1.03	0

注) γ_{L1} : 地下水位面下の単位体積重量
 γ_{L2} : 地下水位面上の単位体積重量

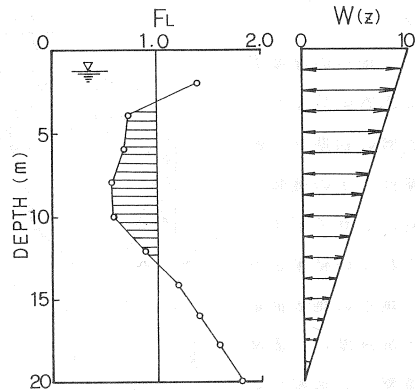


図4-1 液状化指数 P_L

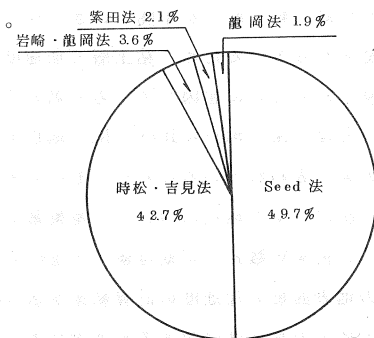


図4-8 最小地表面加速度を与える手法

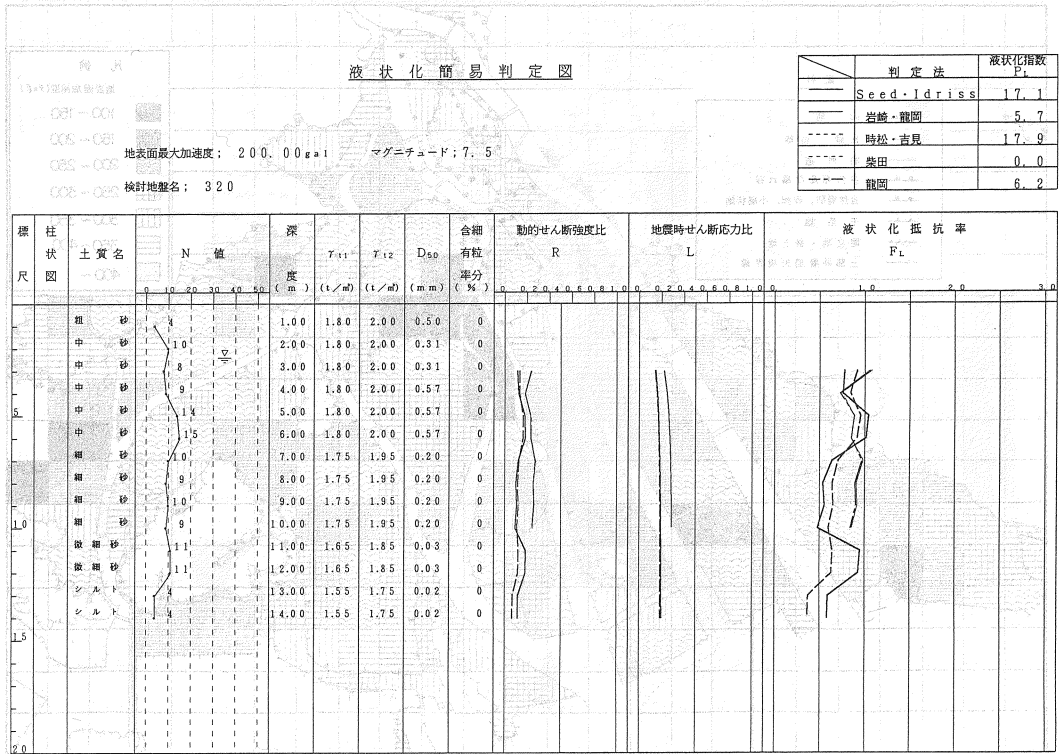


図 4-2 液状化簡易判定計算結果図

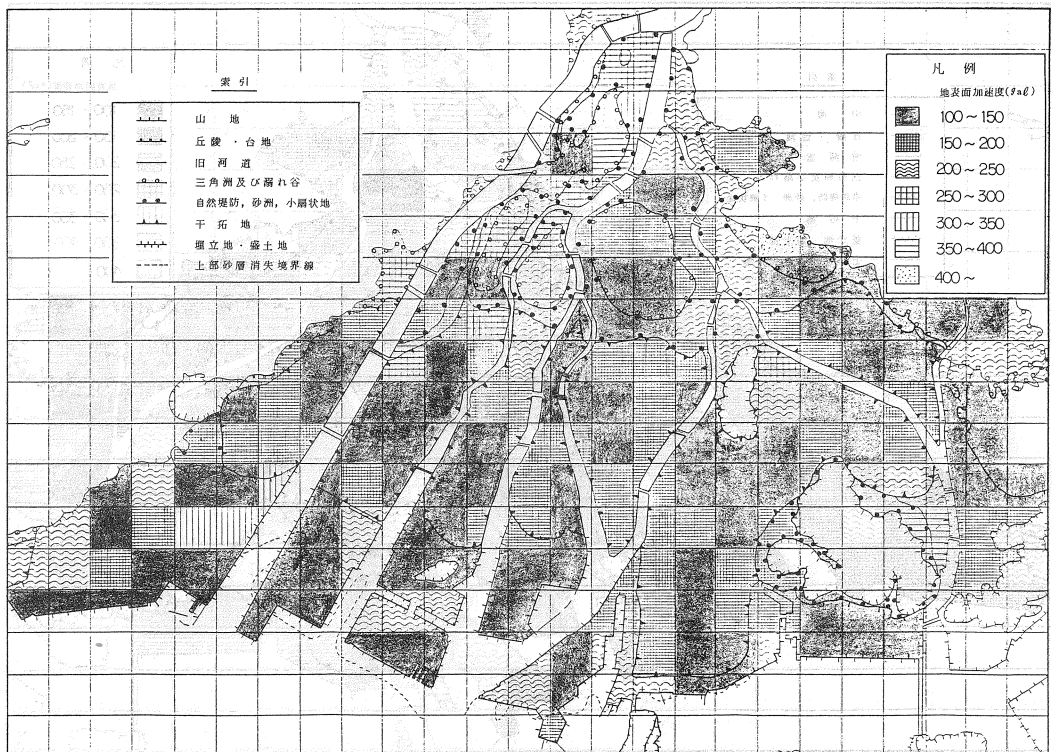


図 4-3 液状化危険分布図 (Seed 法)

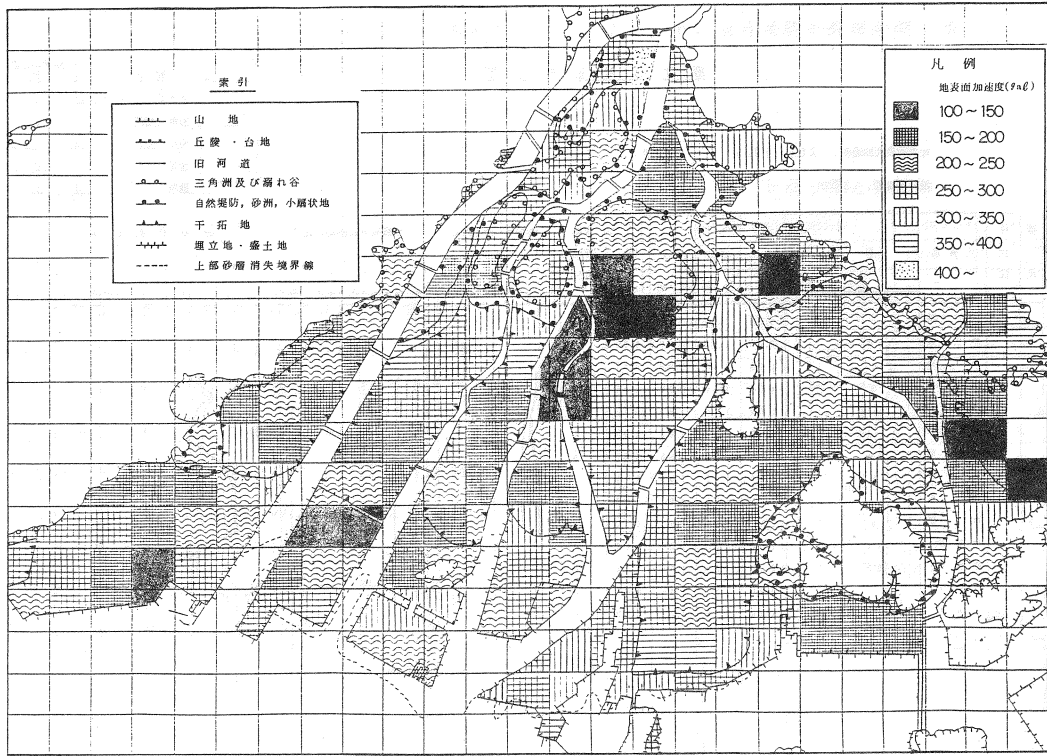


图 4 - 4 液化化危険分布图 (岩崎・龍岡法)

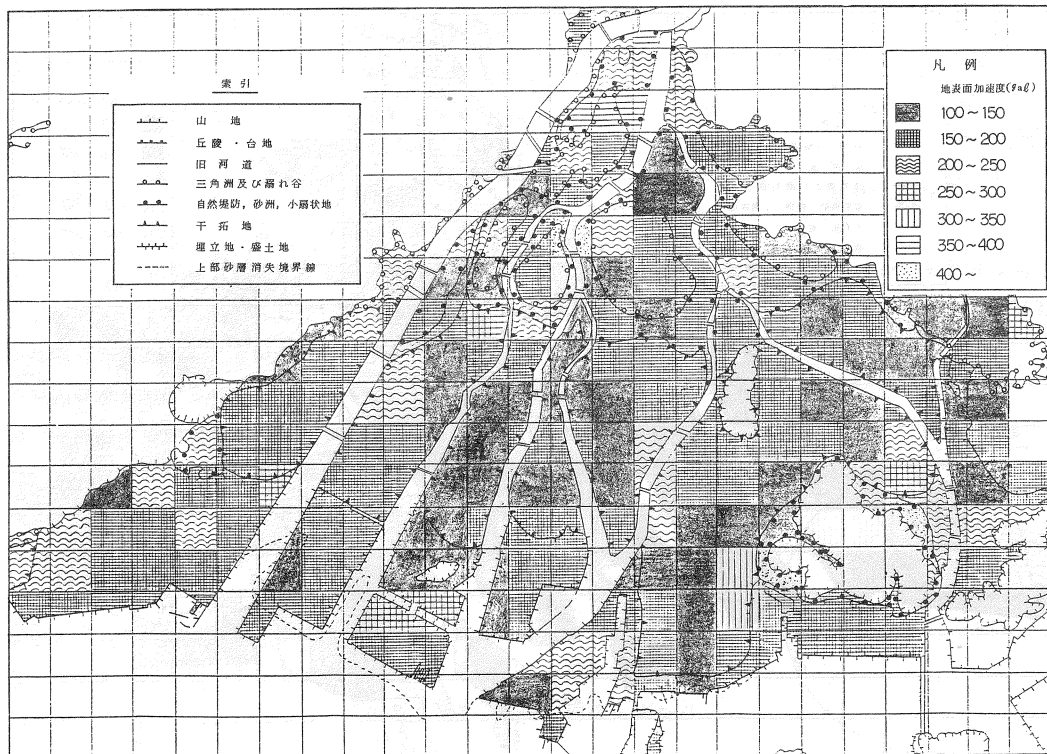


图 4 - 5 液化化危険分布图 (時松・吉見法)

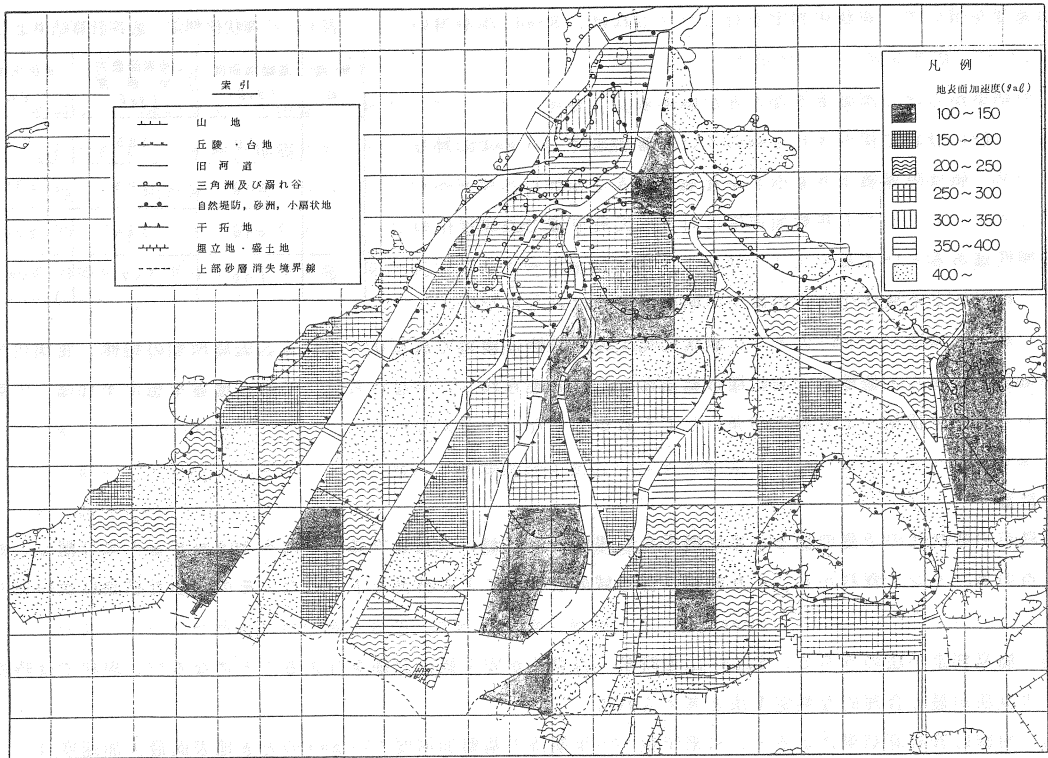


図 4 - 6 液状化危険分布図（柴田法）

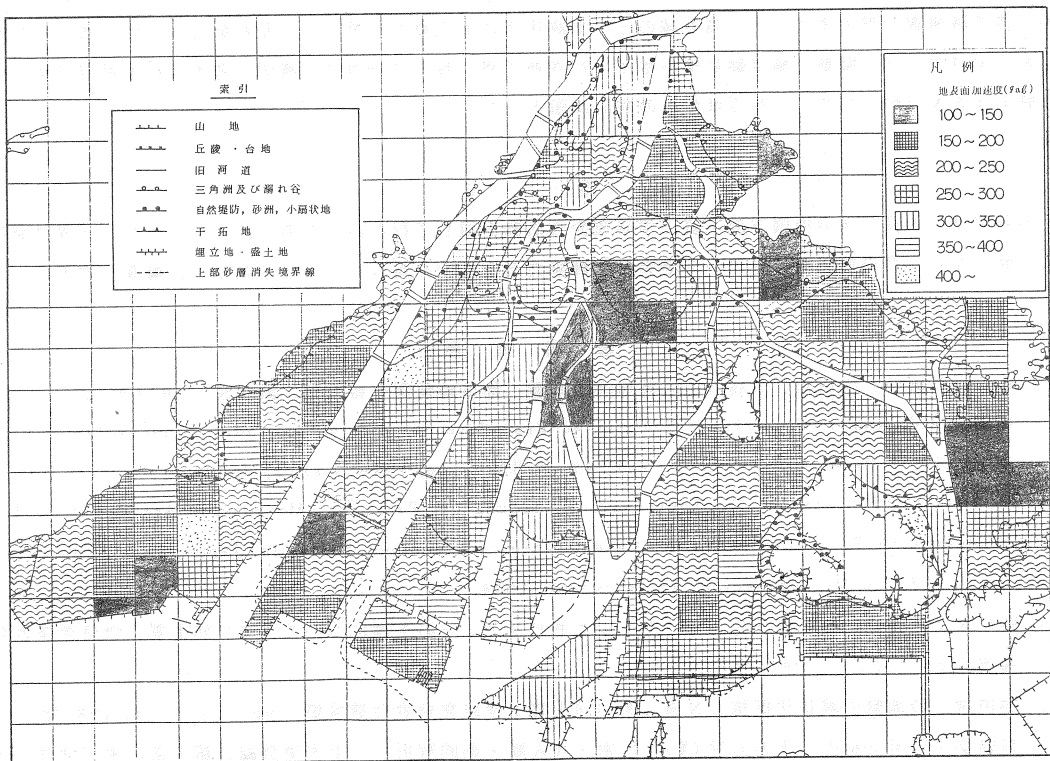


図 4 - 7 液状化危険分布図（龍岡法）

大加速度を用いて、液状化判定を行った。これは、Seed 法を用いて行ったが、結果を表 4-2 に示す。

表 4-2 液状化判定(応答計算結果より)

地点 No	基盤加速度 (gal)	地表面最大 加 速 度 (gal)	液状化指数 PL
1	100	125	3.1
	200	183	13.5
	400	245	23.4
2	100	97	5.2

この結果からは、次のようなことがいえる。

- ① 一般に設計で採用される例の多い基盤加速度 100 gal に対して、PL 値は限界値よりも小さくなっている。しかし、 $FL < 1$ となる層はあり、この基盤加速度に対して広島市域での液状化の可能性はあるといえる。
- ② 地形による液状化発生の確率の明確な相違はみられない。
- ③ 基盤加速度 400 gal のとき、液状化発生の危険性は極めて高くなっている。広島地盤の特性、液状化危険分布図、等から、他地点でも同様の結果になると考えられる。すなわち、芸予級の地震を想定すれば、広島市域のどこで液状化による被害が発生してもおかしくないと考えられる。

5. 結論

広島市の液状化の予測の例としては網干らの報告⁽⁶⁾があるが、本論文では、市内を 500 m ピッチに分割し、約 400 点のボーリング資料から、より詳細に各地域の液状化による被害を予測した。その主要な結論は次の通りである。

- (1) 簡易判定手法のうちで、Seed 法と時松・吉見法が安全側の評価を与えることになるが、現状では時松・吉見法が最も合理的な判定手法と考えられる。
 - (2) 地震応答計算結果によると、再来年数 200 年期待の基盤加速度 100 gal のとき地表面最大加速度は、100 ~ 130 gal となり、表層での増幅があまりない結果となった。
 - (3) 基盤加速度 100 gal を想定した場合、広島市域での液状化の可能性はあると考えられる。
 - (4) 芸予級地震を想定すると、広島市域のどこで液状化による被害が発生してもおかしくないと考えられる。
- なお、本研究では、振動三軸試験結果を踏まえた詳細予測、および当地区で適切と考えられる対策工法についての提案はできなかったが、これらは今後の検討課題としたい。

謝 辞

この研究は、土質工学会中国支部土質工学研究会の活動を通じて行われたものである。ボーリング資料提供、討議、助言など、当研究会会員諸兄から絶大な御協力と御援助を賜った。ここに記して、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 建設省計画局，広島県，広島市；広島地区の地盤，都市地盤調査報告書，第 5 巻，1964 年
- 2) H. B. Seed and I. M. Idriss ; Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential , Proc. A. S. C. E. , Vol. 97, No. SM9, pp. 1249 ~ 1273, 1971
- 3) T. Iwasaki, F. Tatsuoka, K. Tokita and S. Yasuda ; A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at various Sites in Japan, Proc. 2nd Int. Conf. on Microzonation, pp. 885 ~ 896, 1978.
- 4) 時松孝次，吉見吉昭；液状化とサイクリックモビリティの予測について，第 17 回土質工学研究発表会講演集，pp. 1925 ~ 1928，1982 年
- 5) 柴田徹；砂地盤の液状化抵抗と N 値，第 16 回土質工学研究発表会講演集，pp. 621 ~ 624，1981 年
- 6) 龍岡文夫，足立紀尚；土の力学(Ⅱ)－圧密・せん断・動的解析－，土木学会編，新大系土木工学 18，技報堂出版，pp. 294 ~ 302，1981 年

- 7) H. B. Seed and I. M. Idriss ; Ground Motions and Soil Liquefaction during Earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
- 8) 栗林栄一, 龍岡文夫, 吉田精一 ; 明治以降の本邦の地盤液状化履歴, 土木研究所報告No.30, 1974年
- 9) 宇佐美龍夫 ; 日本被害地震総覧, 東京大学出版会, 1975年
- 10) 川島一彦, 相沢興, 高橋和之 ; 強震記録の重回帰分析による地震動の最大加速度・最大速度および最大変位の推定式, 土木技術資料第26巻3月号, 1984年
- 11) 野田節男, 上部達生, 千葉忠樹 ; 重力式岸壁の震度と地盤加速度, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, 1975年12月
- 12) 日本道路協会編 ; 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 1980年5月
- 13) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 高木義和, 吉田精一 ; 土の変形特性の非線型性と地盤の振動特性, 土木技術資料第19巻1月号, 1977年
- 14) 国生剛治, 吉田保夫, 西好一, 江刺靖行 ; 沖積粘性土の広いひずみ範囲での動的物性, 電力中央研究所報告, 研究報告 381027
- 15) 渡辺, 他 ; 簡易式を用いた静岡県液状化予測, 第15回土質工学研究発表会講演集, pp.1345~1348, 1980年
- 16) 広島市 ; 広島市地震被害想定調査報告(昭和58年度「概要」), 昭和59年3月