

山口県宇部市における液状化ハザードマップの試作

Liquefaction Hazard Map in Ube, Yamaguchi Prefecture

六信久美子 Kumiko MUTSUNOBU (山口大学大学院理工学研究科)
 鈴木素之 Motoyuki SUZUKI (山口大学大学院理工学研究科)
 山本哲朗 Tetsuro YAMAMOTO (山口大学大学院理工学研究科)

新潟県中越地震や福岡県西方沖地震において地盤の液状化による被害が多く見られたことは記憶に新しい。山口県は大規模な地震災害を経験していないが、宇部沖断層群の存在や今後30年以内に50%の確率で発生すると予想される南海地震に対して事前の地震防災対策が必要である。本研究では山口県宇部市主要部の市街地を対象として、既往の地質調査報告書をもとに F_L 法による液状化簡易判定を行い、液状化ハザードマップを試作した。また、液状化危険地域の土質・地質について考察した。本文では、液状化判定を行ったボーリングデータ100本のうち、液状化すると判定された土層がある64本はほぼ河川流域の沖積層に分布していたことを報告する。

キーワード：液状化、ハザードマップ、GIS、 F_L 法、液状化指数 P_L (IGC:C-9)

1. はじめに

2004年10月に発生した新潟県中越地震(M6.8)においては、兵庫県南部地震の地表水平加速度をはるかに上回る1529 galの強い地震動を記録し、また、震源深さが10数kmと浅いこともあり、住家、公共施設、道路・鉄道などに甚大な被害をもたらした。特に、地盤の液状化の被害としては小千谷市や長岡市などで噴砂やマンホールの浮き上がりなど広範囲にわたって発生したことが報告されている¹⁾。

一方、山口県には15本の活断層が存在している。このうち、県東部の岩国断層帯(甘木峠断層、岩国断層、小方尾瀬断層)、県西部の菊川断層帯(菊川断層)は地震調査研究推進本部が実施している全国98断層に含まれている。また、2005年7月に地震調査研究推進本部が調査対象断層として新たに追加した12断層には、海底活断層群である宇部沖断層群が含まれている。これまでに宇部沖断層群を震源とする地震は1991年に発生した周防灘地震(M6.0)があるが、大きな被害は報告されていない²⁾。今後、南海地震の発生が予測されるなか、大規模な地震が発生した場合には、宇部市においても液状化発生の可能性があり、事前にその危険箇所の所在を把握していくことが大切であると考えられる。

本研究の目的は山口県宇部市の公共工事に伴う既往の地質調査報告書に対して、 F_L 値および P_L 値を用いた簡易予測を行い、液状化危険地域を特定し、宇部市内の液状化ハザードマップを作成することである。宇部市の中心部は埋立地であり、土質構成は複雑ではないことから、 F_L 法による結果でも地盤の液状化可能性を判定する一つの指標に

なる。将来的には、現在、地理情報システム(GIS)を用いて個別に進めている山口県内の地質情報や植生分布情報などと重ね合わせるにより、総合的な環境地盤情報のデータベース化を行い、防災対策や各種公共事業の計画策定時の基礎資料として有効活用することを目指している。本文では宇部市内の主要部の液状化ハザードマップの試作と液状化の危険性がある地域の土質・地質について考察した結果について述べた。

2. 液状化判定方法

過去10年間の主な地震において記録された最大水平加速度は兵庫県南部地震で700~800 gal³⁾、鳥取県西部地震で400 gal³⁾、芸予地震で100~400 gal⁴⁾であり、通常判定で用いる設計水平加速度よりも非常に大きな値である。大規模な内陸直下型地震である兵庫県南部地震では多くの構造物が被害を受けたため、各機関で耐震設計方法の改訂が行われた。表-1に諸構造物の耐震設計指針の一覧を示す。液状化の判定は宇部市下水道部より提供された既往の地質調査報告書に対して、道路橋示方書・同解説V耐震設計編⁵⁾および建築基礎構造設計指針⁶⁾を併用して実施した。図-1に本研究における液状化判定のフローチャートを示す。今回使用した報告書は1978年から2003年までの宇部市内の下水道工事などに伴う地質調査報告書である。表-2に液状化判定が可能な報告書数と液状化判定したボーリングデータ数を示す。判定を行ったボーリングデータは土の単位体積重量が記載されていない。これより、 γ_t を16~18 kN/m³に変動させて判定を行ったところ、最終的な結

表-1 諸構造物の耐震設計指針

指針名	対象	判定法	液状化判定が必要な土層の条件
道路橋示方書・同解説(2002)	道路橋	F_L 法	$H_g \leq 10\text{m}$ かつ $Z \leq 20\text{m}$ の飽和土層 $F_c \leq 35\%$ または $F_c > 35\%$ で $I_p \leq 15$ $D_{50} \leq 10\text{mm}$ かつ $D_{10} \leq 1\text{mm}$
建築基礎構造設計指針(2001)	建築物	F_L 法	$Z \leq 20\text{m}$ の沖積飽和土層 $F_c \leq 35\%$
水道施設耐震工指針・解説(1997)	水道施設	F_L 法	$Z \leq 25\text{m}$ の飽和土層 $D_{50} \leq 10\text{mm}$ $F_c \leq 30\%$
下水道施設の耐対策指針と解説(1997)	下水道施設	F_L 法	$H_g \leq 10\text{m}$ かつ $Z \leq 20\text{m}$ の飽和土層 $F_c \leq 35\%$ または $F_c > 35\%$ で $I_p \leq 15$ $D_{50} \leq 10\text{mm}$ かつ $D_{10} \leq 1\text{mm}$

H_g : 地下水位, Z : 地表面からの深さ, F_c : 細粒分含有率, I_p : 塑性指数, D_{50} : 平均粒径, D_{10} : 10%粒径

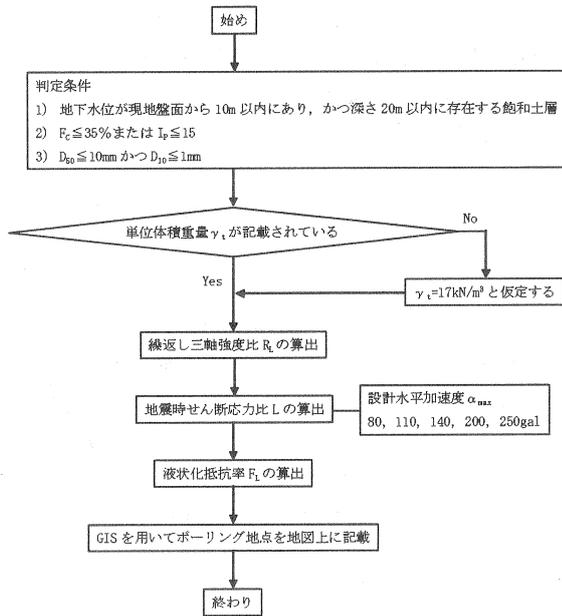


図-1 液状化判定フローチャート⁵⁾

果にほとんど影響はなかったことから、この場合には一律に $\gamma_t = 17 \text{ kN/m}^3$ に設定した。このように、液状化判定に必要な単位体積重量 γ_t 、平均粒径 D_{50} および細粒分含有率 F_c は概略設計等において既存資料を活用して判定せざるを得ない場合、土質分類から概略の値を推定することも可能である⁵⁾。ただし、今回の液状化判定に供した全報告書には各層の物理特性と N 値が記載されているので、上述の土質分類からの物理特性の推定は行っていない。

2.1 液状化判定の対象となる土層⁵⁾

沖積砂質土層で以下の3つの条件すべてに該当する場合には、地震時に橋に影響を与える液状化が生じる可能性があるため、2.2 によって液状化の判定を行わなければならない。

- 1) 地下水位が現地盤面から 10 m 以内にあり、かつ、現地盤面から 20 m 以内の深さに存在する飽和土層
- 2) 細粒分含有率 F_c が 35 % 以下の土層、又は、 F_c が 35 % を超えても塑性指数 I_p が 15 以下の土層

表-2 ボーリングデータの収集状況

年度	判定可能報告書数	ボーリングデータ数	液状化と判定されたデータ数	軟弱土層と判定されたデータ数
1978年	1	1	1	—
1979年	0	0	0	—
1980年	0	0	0	—
1981年	0	0	0	—
1982年	0	0	0	—
1983年	0	0	0	—
1984年	0	0	0	—
1985年	1	3	0	—
1986年	1	5	1	—
1987年	1	1	1	—
1988年	0	0	0	—
1989年	0	0	0	—
1990年	2	2	1	—
1991年	1	1	1	—
1992年	1	1	1	—
1993年	2	4	4	—
1994年	2	3	3	—
1995年	1	2	2	—
1996年	2	3	3	—
1997年	1	1	1	—
1998年	9	29	21	—
1999年	1	1	0	—
2000年	5	6	3	1
2001年	5	18	11	0
2002年	4	6	0	0
2003年	6	13	10	0
合計	46	100	64	1

- 3) 平均粒径 D_{50} が 10 mm 以下で、かつ、10%粒径 D_{10} が 1 mm 以下である土層

2.2 液状化判定に用いた式⁵⁾

2.1 より液状化の判定を行う必要のある土層に対しては、液状化に対する抵抗率 F_L を式(1)により算出し、この値が 1.0 以下の土層については液状化するとみなすものとする。ただし、本判定ではレベル2地震動のタイプII地震動に対して判定を行うものとする。

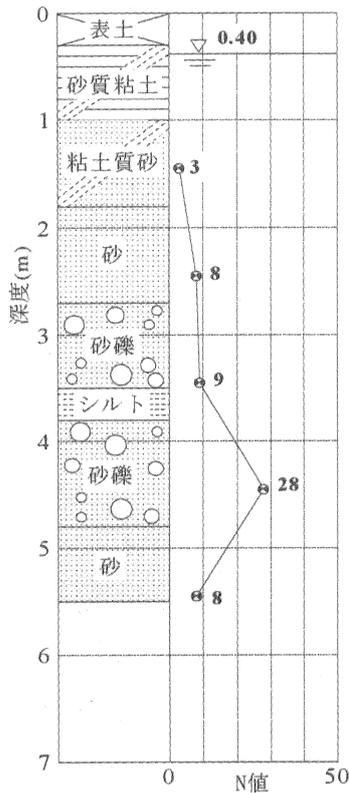
$$F_L = \frac{R}{L} \quad (1)$$

ここに、R: 動的せん断強度比, L: 地震時せん断応力比

地震時の液状化発生の予測については、1964年の新潟地震や1968年の十勝地震などの経験をもとに多くの判定法が研究・提案され、いくつかは諸構造物の耐震設計指針に取り入れられた。これらの判定法は、日本において多く発生する海溝型の地震を対象として過去の液状化事例のもとにその適用性が検討されたものであり、入力地震動としては地表最大加速度が 200~250 gal 程度の地震を仮定するものが多い⁷⁾。本判定は設計水平加速度 α_{max} を 80, 110, 140, 200 および 250 gal の 5 通りに変化させて行った。

2.3 地盤液状化指数 P_L

2.2 で算出した F_L 値はある深さの要素に対する液状化危



80gal			
	R	L	F _L
粘土質砂	0.2769	0.1359	2.038
砂	0.5714	0.1500	3.810
砂礫	0.3855	0.1563	2.466
砂礫	9.087	0.1600	56.78
砂	0.4346	0.1608	2.702
110gal			
	R	L	F _L
粘土質砂	0.2769	0.1868	1.482
砂	0.5714	0.2062	2.771
砂礫	0.3855	0.2149	1.793
砂礫	9.087	0.2201	41.29
砂	0.4346	0.2212	1.965
140gal			
	R	L	F _L
粘土質砂	0.2769	0.2378	1.165
砂	0.5714	0.2624	2.177
砂礫	0.3855	0.2736	1.409
砂礫	9.087	0.2801	32.44
砂	0.4346	0.2815	1.544
200gal			
	R	L	F _L
粘土質砂	0.2769	0.3397	0.8152
砂	0.5714	0.3749	1.524
砂礫	0.3855	0.3908	0.9863
砂礫	9.087	0.4001	22.71
砂	0.4346	0.4021	1.081
250gal			
	R	L	F _L
粘土質砂	0.2769	0.4246	0.6522
砂	0.5714	0.4686	1.219
砂礫	0.3855	0.4885	0.7891
砂礫	9.087	0.5001	18.17
砂	0.4346	0.5027	0.8646

R：動的せん断強度比
L：地震時せん断応力比
F_L：液状化に対する抵抗率

図-2 ある地点における各土層の液状化判定結果の一例

陰予測であり、地盤全体の液状化の激しさや程度を予測することが難しい。そこで、地盤の液状化の激しさの程度を表す指標として、F_Lの値を深さ方向に積分した地盤液状化指数P_L値⁹⁾が用いられている

$$P_L = \int_0^{20} F \cdot w(z) dz \quad (2)$$

$$F = 1 - F_L \quad (3)$$

$$w(z) = 10 - 0.5z \quad (4)$$

P_L値による液状化判定結果は以下の4通りである。

- P_L=0：液状化危険度はかなり低い。液状化に関する詳細な調査は一般に不要。
- 0 < P_L ≤ 5：液状化危険度は低い。特に重要な構造物の設計に際しては、より詳細な調査が必要。
- 5 < P_L ≤ 15：液状化危険度は高い。重要な構造物に対して、より詳細な調査が必要。液状化対策が一般に必要。
- 15 < P_L：液状化危険度は極めて高い。液状化に関する詳細な調査と液状化対策は不可避。

2.4 耐震設計上ごく軟弱な土層の判定

一般に、一軸圧縮強さ q_u が 20 kPa 以下の粘性土およびシルト質土層は軟弱であるため、地震時に基礎を有効に支

持する効果は期待できない⁹⁾。本研究では既往の地質調査報告書に対して、現地盤面から3m以内にある粘性土層およびシルト質土層で q_u が 20 kPa 以下の土層から軟弱な土層の判定を行った。

3. 液状化判定結果

ある地点における液状化判定結果の一例を図-2に示す。液状化判定を行ったボーリング地点はGISを用いて宇部市(図-3)の地図上にプロットした。ここで、前述のように、ある地点においてF_Lが1.0以下となる土層が存在した場合、その土層については液状化するとみなした。液状化判定を行ったボーリングデータ100本のうち14地点は地図データが記載されていなかったため、地図上には86地点のボーリングデータをプロットしている。図-3にプロットされている地点はα_{max}=250galに設定した場合の液状化の判定結果である。図中の赤丸はF_Lが1以下の土層が存在したボーリング地点を、青丸はF_Lが1以下の土層が存在しなかったボーリング地点を示している。液状化判定地点の分布状況から、厚東川、真縮川の河川流域で地震発生時に液状化する可能性が高いことが推察される。宇部市の地層は下位より基盤岩をなす古生代・三郡変成岩類、それらを不整合に覆う新世代・古第三紀層に属する宇部層群、第四紀層の洪積層、沖積層の順に形成されている⁹⁾。

厚東川流域は上位より埋土、沖積層の砂質土・粘性土お

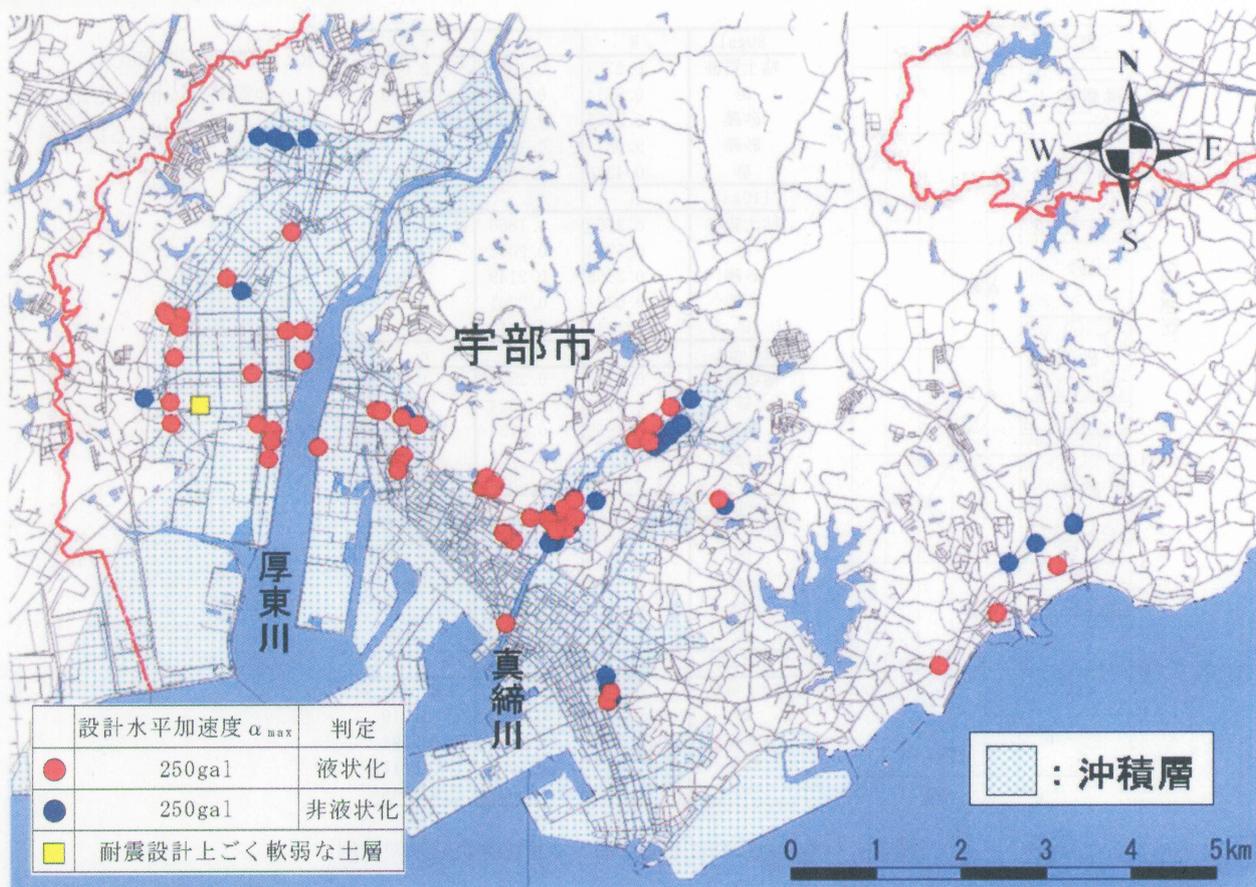


図-3 宇部市全体図と F_L が 1.0 以下の土層が存在した地点の分布図 (F_L 値による判定結果)

よび砂礫となり、最下位に宇部夾炭層となる地層構成である。沖積層の N 値は砂質土層では平均 2.1 であり、粘性土層においては平均値が 0.8 である。また、この地区の平均的な地下水位は地表面下 GL-0.70~2.00 m の範囲にある。この地域は、厚東川の堆積作用による三角州地帯で、その大半は藩政時代の干拓地および近年の埋立地であるため¹⁰⁾、軟弱地盤とみられ、地震発生時には液状化する可能性が高いと考えられる。

真締川流域は上位より粘土状のボタを主体とする埋土層、新世代・第四紀層の沖積層、最下位に基盤をなす三郡変成岩に属する片岩ならびにこれに貫入した蛇紋岩から成っている。沖積層の N 値は砂質土層では平均 2.1 であり、粘性土層においては平均値が 1.9 である。また、この地区の平均的な地下水位は地表面下 GL-0.40~2.70 m の範囲にある。

図-3 より、 F_L が 1 以下となる土層が存在したボーリング地点はいずれも宇部市内の第四紀の沖積層¹¹⁾の領域に分布している。また、耐震設計上ごく軟弱な土層と判定された地点は 1 地点である。

次に、 F_L が 1 以下の土層が存在するボーリング地点を設計水平加速度別にプロットしたものを図-4 に示す。 $\alpha_{max}=80$ gal 以上で液状化すると判定された土層がある地点は 19 地点と最も多く、集中的に分布している。

次に、 P_L 値による液状化判定の結果を図-5 に示す。地図上にプロットされている地点は $\alpha_{max}=250$ gal に設定した場合の液状化危険度が極めて高い ($15 < P_L$) と判定された地点であり、地図データがないものを除くとその数は 52 地点である。 F_L 値による判定結果と比較すると、液状化危険地点数は少なくなったが、分布範囲に大きな違いは見られなかった。

4. 地震時せん断応力比と動的せん断強度比の関係

図-6 にボーリングデータより算出した各ボーリング地点の判定対象土層の地震時せん断応力比 L と動的せん断強度比 R の関係を示す。 F_L は式(1)で与えられ、図中の $R=L$ 線より右下にプロットされた土層は液状化する可能性が高いことを示す。総データ数は 100 であり、 α_{max} 別にプロットしている。その結果、 α_{max} が 200 gal 以上から各地点における判定対象土層で液状化する可能性が高くなる。 $R=0.45$ 以上の土層では $\alpha_{max}=250$ gal としても $R < L$ とならず液状化するとは判定されないが、兵庫県南部地震のような地表水平加速度が 600 gal を越えるような非常に強い地震動が発生した場合には液状化する可能性は十分あるものと考えられる。

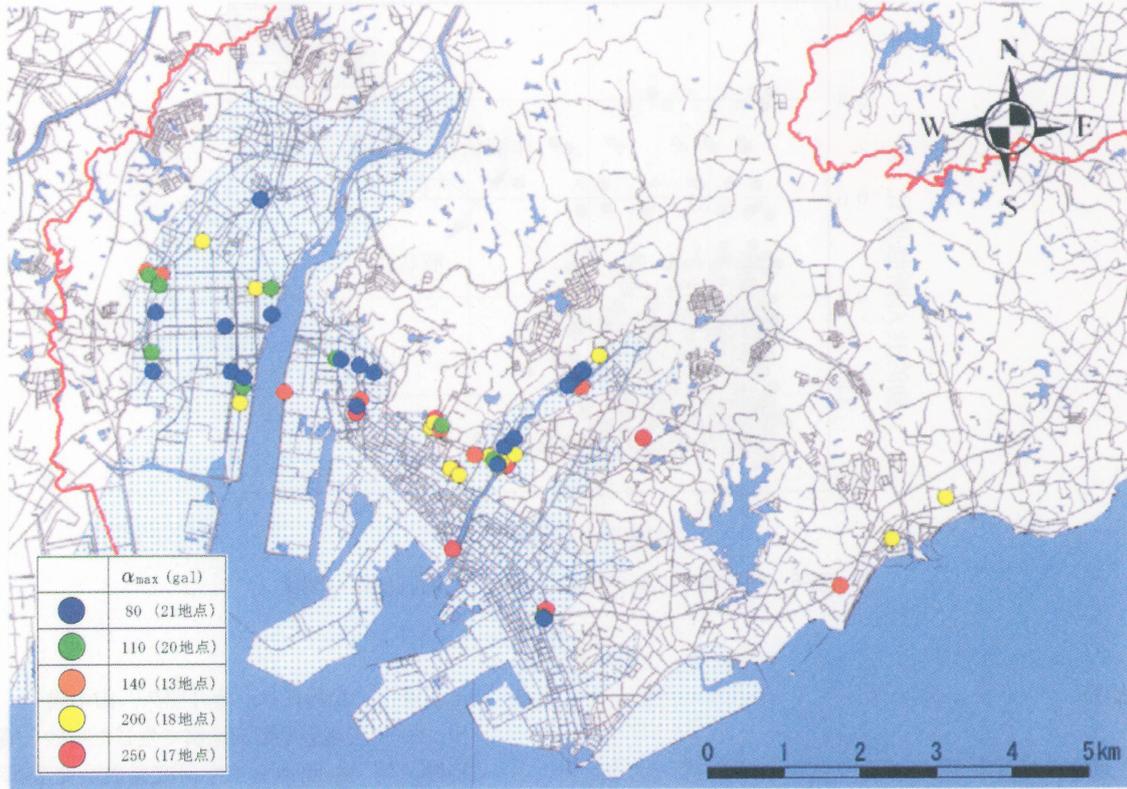


図-4 設計水平加速度ごとの F_L が 1.0 以下の土層が存在した地点 (F_L 値による判定結果)

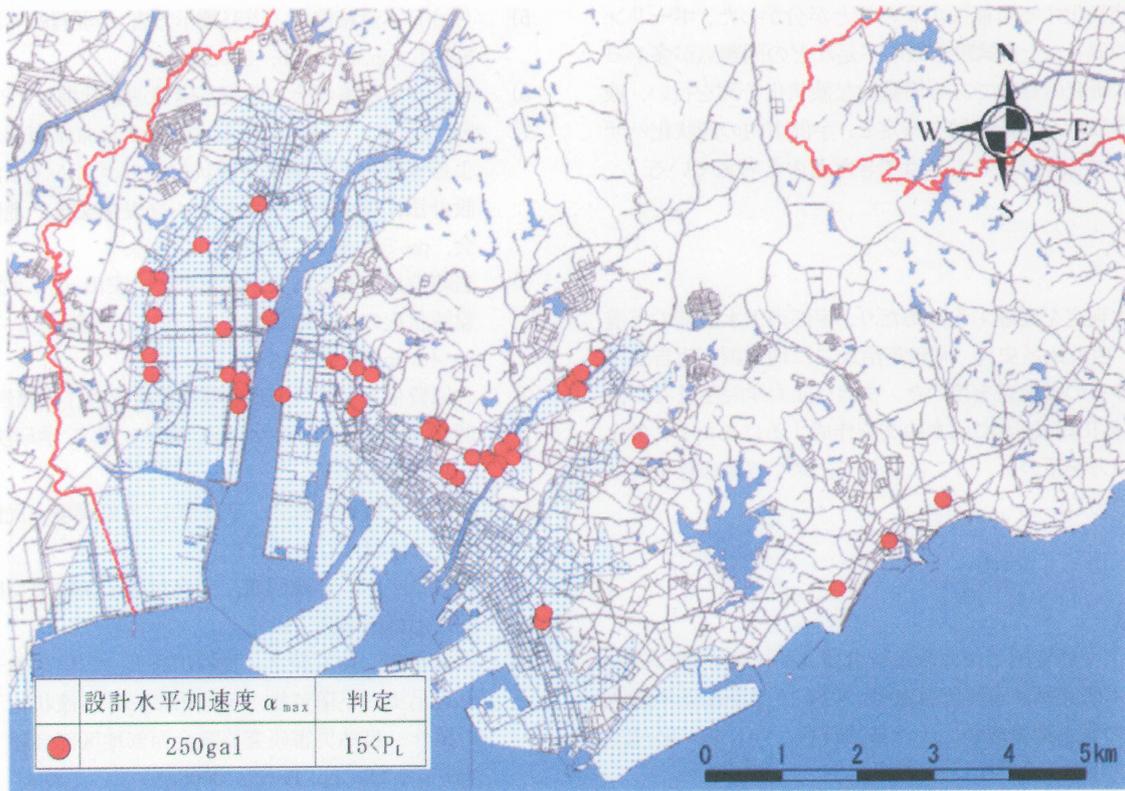


図-5 P_L 値による液状化危険地点

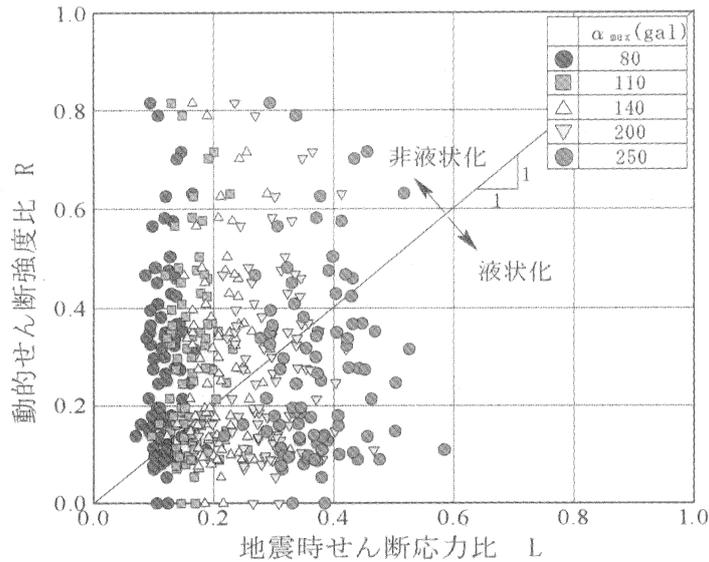


図-6 地震時せん断応力比と動的せん断強度比の関係

5. まとめ

今回、既往の地質調査報告書より液状化判定を行った結果、判定を行ったボーリングデータ 100 本中、 F_L が 1.0 以下となる土層が存在したボーリングデータは 64 本であった。また、液状化危険箇所はほぼ河川沿いの沖積層に分布していることが確認された。 $\alpha_{max}=200$ gal 以上から各判定土層で液状化する可能性が高いことが分かった。ボーリング地点の偏り、土質試験結果の不足などの問題点が多かったが、本研究の目的である簡易的な液状化予測を行い、液状化の危険性がある地域を特定し、宇部市内の液状化ハザードマップを試作することはできたものと考えている。

謝辞

液状化判定を実施するにあたり、宇部市下水道部の下道英雄氏、西丸比呂史氏、岡田英治氏には地質調査報告書の提供で多くの御配慮を頂いた。また、元大学院生長谷川秀人氏(現益田市役所)には本論文を作成するにあたり、多大なるご助力を頂いた。ここに記して、深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

1) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所合同緊急調査団：平成 16 年新潟県中越地震の緊急調査速報，土木技術資料，Vol. 46，No. 12，pp. 10-15，2004。
 2) 金折裕司：山口県の活断層-地震災害の減災をめざして-，近未来社，pp. 72-91，2005。

3) 吉本憲正，兵動正幸，藤井照久，山本陽一，伊東周作：2000 年鳥取県西部地震で生じた噴砂・噴泥の諸特性，第 36 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 2139-2140，2001。
 4) 森 伸一郎，門脇慶典：2001 年芸予地震における液状化調査，第 37 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1957-1958，2002。
 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説(v 耐震設計編)，pp. 120-126，2002。
 6) (社)日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001。
 7) 岡 二三生，三村 守，山本浩司：兵庫県南部地震による液状化と判定法，液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp. 511-516，1999。
 8) 岩崎敏男，龍岡文夫，常田賢一，安田 進：地震時地盤液状化の程度の予測について，土と基礎，Vol. 28，No. 4，pp. 23-29，1980。
 9) 大原資生：宇部市床波地域地盤状況図作成報告書 宇部市地盤図，山口大学工学部土質工学研究室，pp. 3-9，1980。
 10) 宇部市史編纂委員会：宇部市史(自然環境・民俗方言篇)，pp. 21-22，1963。
 11) 西村祐二郎，今岡照喜，宇多村讓：新編山口県地質図，山口地学会，1995。
 12) 山本哲朗，鈴木素之，長谷川秀人，六信久美子，西丸比呂史，下道英雄：宇部市における液状化予測図の試作，自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集，Vol. 29，pp. 49-52，2005。

(2006 年 6 月 30 日 受付)