

11-3 液状化判定法の高度化に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 11～平 14

担当チーム：振動チーム

研究担当者：田村 敬一、佐々木哲也

【要旨】

平成7年兵庫県南部地震による広範な液状化の発生及びそれに伴う被害を踏まえ、道路橋示方書等種々の設計基準において液状化判定法の大幅な見直しがなされたが、これらの改訂は暫定的な部分も多く、液状化判定法の合理化が求められている。このため本研究では、液状化判定法の高度化を図ることを目的に、既往地震における液状化・非液状化事例のデータの収集を行い、原位置試験結果及び地震外力と実際の液状化事例との相関を検討することにより、液状化抵抗に及ぼす粒度特性および地震動特性の影響を検討した。

その結果、既往の地震における液状化・非液状化地点の地盤データを収集し、液状化事例データベースを作成した。データベースを分析することにより、動的せん断強度比と細粒分含有率および地震動特性にかかわるパラメータとの相関を明らかにするとともに、これらが液状化抵抗に及ぼす影響に関して新たな評価手法を提案した。
キーワード：被害事例、液状化、地震、細粒分含有率

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震による広範な液状化の発生及びそれに伴う被害を踏まえ、道路橋示方書¹⁾等種々の設計基準において液状化判定法の大幅な見直しがなされた。しかしながら、これらの改訂内容は暫定的な部分も多く、また、主に室内土質試験の結果に基づき提案された手法であり、室内試験の結果と実際の液状化発生との相関については、未解明な点が残されている。例えば、粒度特性の影響に関しては、液状化抵抗の評価として用いられている繰返し三軸試験によると、細粒分を多く含んだ地盤や粘性土地盤においても液状化が生じるとみなされる場合もあり、実際の液状化被害を説明することができない場合もある。また、地震動の不規則性の影響に関しては、不規則波を用いた室内土質試験の結果及び累積損傷度理論による検討結果等に基づき評価手法が提案されているものが多く、これらの手法の妥当性、実際の液状化被害事例との相関等については十分には検証がなされていない。

このため本研究では、液状化抵抗に及ぼす粒度特性の影響、地震動外力の影響等に関し、新たな液状化判定法を提案することを目的に、既往の地震における実際の液状化・非液状化事例を分析することにより、液状化抵抗に及ぼす粒度特性および地震動特性の影響を検討した。

2. 研究方法

2.1 液状化事例データベースの作成

既往の液状化被害地震についてボーリング資料、土質データ、地震動記録、液状化発生の有無等に関するデータの収集・整理を行い、これらの液状化・非液状化事例データのデータベースを作成した。

ボーリング資料の収集に際しては、以下の3条件を満たすデータを収集した。

- ①ボーリング位置が明らかであること
- ②ボーリング柱状図が備わっていること
- ③土質試験結果（特に粒度試験結果）が備わっていること

液状化発生の有無の判定はボーリング資料を抽出した文献に液状化発生の有無が明記されている場合については文献に従い、また、沈下等の被災状況が記してあるものについては被災状況によって液状化の有無を判定した。ボーリング資料を抽出した文献から液状化発生の判定ができないものについては、液状化分布が明示されている文献を参考にして液状化発生の有無を判定した。液状化の判定は液状化、非液状化、不明確の3分類とした。

2.2 液状化強度に及ぼす粒度特性および地震動特性の影響に関する検討

データベースを用いて、土質データ、地震動強度と液状化発生の有無について統計的に整理を行うことにより、動的せん断強度比に及ぼす、①粒度特性の影響、②地震および地震動特性の影響、について検討を行った。

液状化・非液状化地点の事例データにもとづき、地震時最大せん断応力比と換算 N 値の関係をプロットし、液状化と非液状化事例の境界線を求めた。換算 N 値は、文献 1) に従い N 値と有効上載圧より計算した。地震時最大せん断応力比の算出に必要な地表面最大加速度値は、基本的に強震記録に基づいて設定した。ただし、強震記録が多数の地点で得られ、地表面加速度分布図が作成されている場合には、その分布図をもとに設定した。

地震時最大せん断応力比と換算 N 値の関係から求まる液状化と非液状化の境界線は、ある換算 N 値に対して液状化を生じさせるのに必要な最小の地震時最大せん断応力比を表しており、ここではこの曲線を、換算 N 値と動的せん断強度比関係と定義した。この曲線により求まる動的せん断強度比と、粒度特性および地震動特性に関するパラメータの関係を調べた。

さらに、液状化・非液状化事例に基づく換算 N 値

表-1 地震別ボーリング資料数

No.	地震名	マグニチュード	発生年月日	ボーリング数
1	新潟地震	7.5	1964/06/16	6
2	十勝沖地震	7.9	1968/05/16	2
3	宮城県沖地震	7.4	1978/06/12	1
4	日本海中部地震	7.7	1983/05/26	158
5	千葉県東方沖地震	6.7	1987/12/17	0
6	釧路沖地震	7.8	1993/01/15	77
7	北海道南西沖地震	7.8	1993/07/12	61
8	北海道東方沖地震	8.1	1994/10/04	3
9	三陸はるか沖地震	7.5	1994/12/28	91
10	兵庫県南部地震	7.2	1995/01/17	111
11	鹿児島	6.3	1997/05/13	165
12	岐阜	5.2	1998/04/22	43
13	鳥取県西部	7.3	2000/10/06	128
計				846

と動的せん断強度比関係と道路橋示方書¹⁾の手法を比較するとともに、液状化強度に及ぼす地震動特性の影響の評価手法について検討を行った。

3. 研究結果

3.1 データベースの作成

既往被害地震の液状化資料の収集を行った結果、846箇所 のボーリングデータが得られた。それらを地震毎にまとめたものを表-1に示す。得られたボーリングデータを整理し、既往の地震における液状化・非液状化事例データのデータベースを作成した。

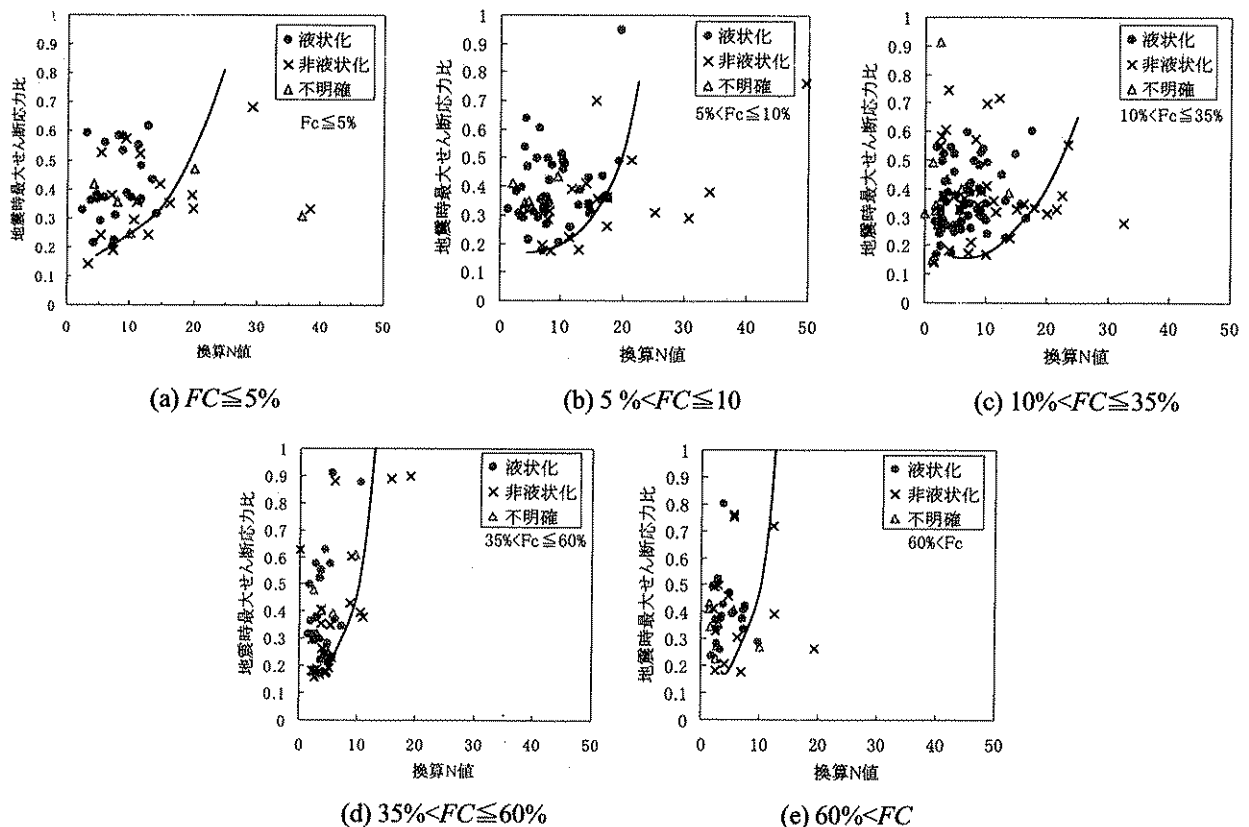


図-1 地震時最大せん断応力比と換算 N 値の関係 (FC 毎)

これらの液状化事例データを分析することにより、液状化抵抗に及ぼす粒度特性の影響および地震動特性の影響を検討した²⁾。

3.2 液状化強度に及ぼす粒度特性の影響

図-1に、地震時最大せん断応力比と換算 N 値の関係を示す。図は、全事例データを細粒分含有率 FC の量に応じて5つに区分して示している。図中の曲線は、プロットしたデータを基に決定した液状化・非液状化の境界線として定義した、換算 N 値-動的せん断強度比曲線である。これらより、細粒分含有率 FC により換算 N 値-動的せん断強度比曲線は大きく異なり、 FC が35%以上では、換算 N 値-動的せん断強度比曲線の傾きが大きくなっていることがわかる。

図-2に、細粒分含有率 FC と動的せん断強度比の関係を示す。図中には、図-1における換算 N 値 $N_1=10, 15, 20$ での動的せん断強度比を、各細粒分含有率範囲の平均値に対してプロットしている。これより、細粒分含有率 FC が35%以下の範囲では、 FC の増加に対して動的せん断強度比が減少していることがわかる。一方、 FC が35%以上の範囲では、動的せん断強度比が急激に増加していることがわかる。

3.3 液状化強度に及ぼす地震動特性の影響

次に、地震および地震動特性と動的せん断強度比の関係を検討する。図-3に、代表的な3地震について地震時最大せん断応力比と換算 N 値の関係を示す。なお、ここでは細粒分含有率 FC が35%以下の事例のみをプロットしている。また、図中の曲線は、プロットしたデータを基に決定した、液状化・非液状化の境界線として定義した、換算 N 値-動的せん断強度比曲線である。

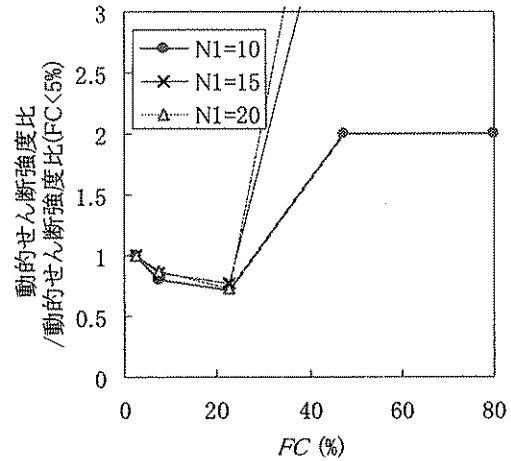


図-2 FC と動的せん断強度比の関係
断強度比曲線である。

図-4に地震のマグニチュードと動的せん断強度比の関係を示す。ここで、図-4(a)(b)(c)には、換算 N 値=10, 20の時の動的せん断強度比、および換算 N 値=10と20における動的せん断強度比の比(R_{20}/R_{10})をそれぞれ示している。これらより、地震のマグニチュードが大きいほど一般に動的せん断強度比が小さくなることがわかる。また、マグニチュードが小さい場合には、(R_{20}/R_{10})が大きくなっている。つまり、マグニチュードが小さい場合には、換算 N 値-動的せん断強度比曲線の立ち上がりが急になることがわかる。

図-5に地震動継続時間と動的せん断強度比および(R_{20}/R_{10})の関係を示す。ここで、地震動継続時間は、加速度パワーの累積値が全加速度パワーの5%から95%となるまでの時間と定義した。これより、地震動継続時間が長いほど動的せん断強度比は小さくなる傾向が見られる。また、地震動継続時間が短い場合は、(R_{20}/R_{10})が大きくなっている。つまり、地震動

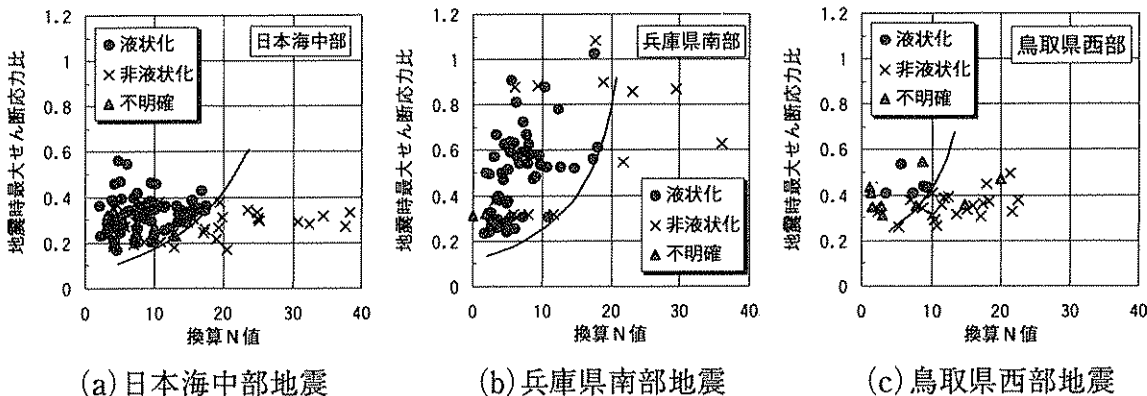


図-3 代表的な地震における地震時最大せん断応力比と換算 N 値の関係

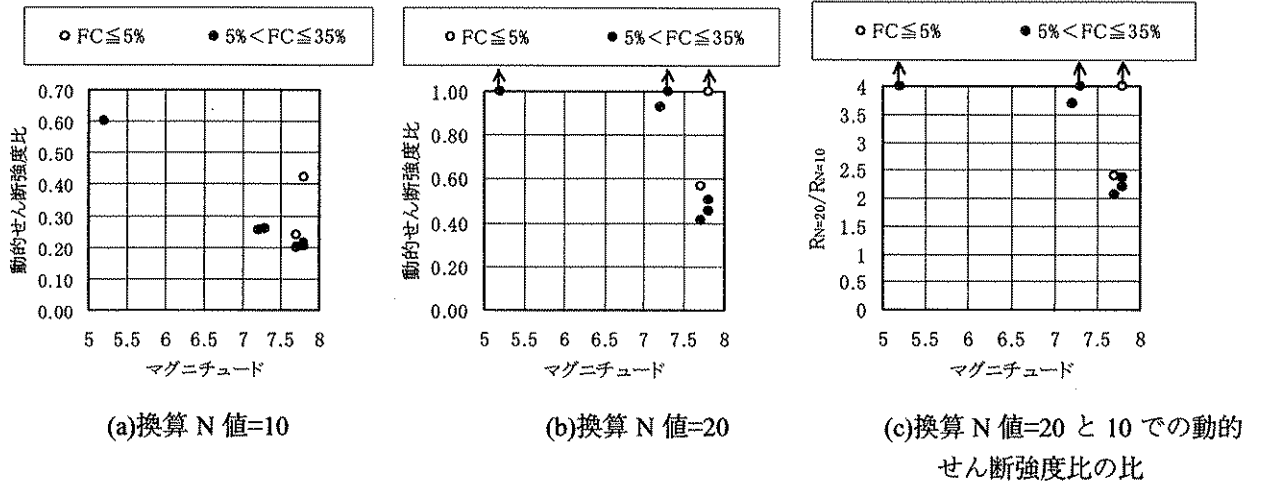


図-4 地震のマグニチュードと動的せん断強度比の関係

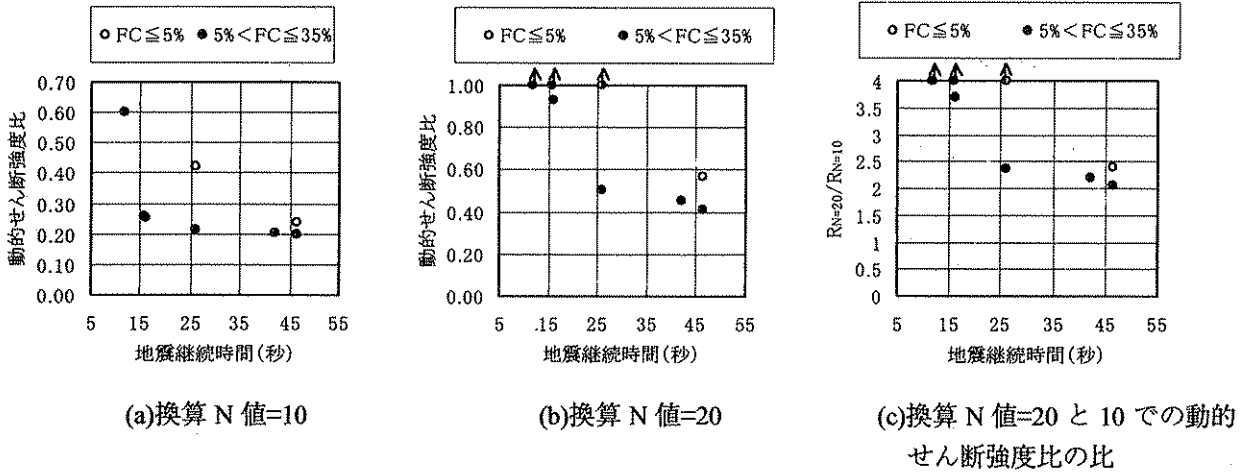


図-5 地震動継続時間と動的せん断強度比の関係

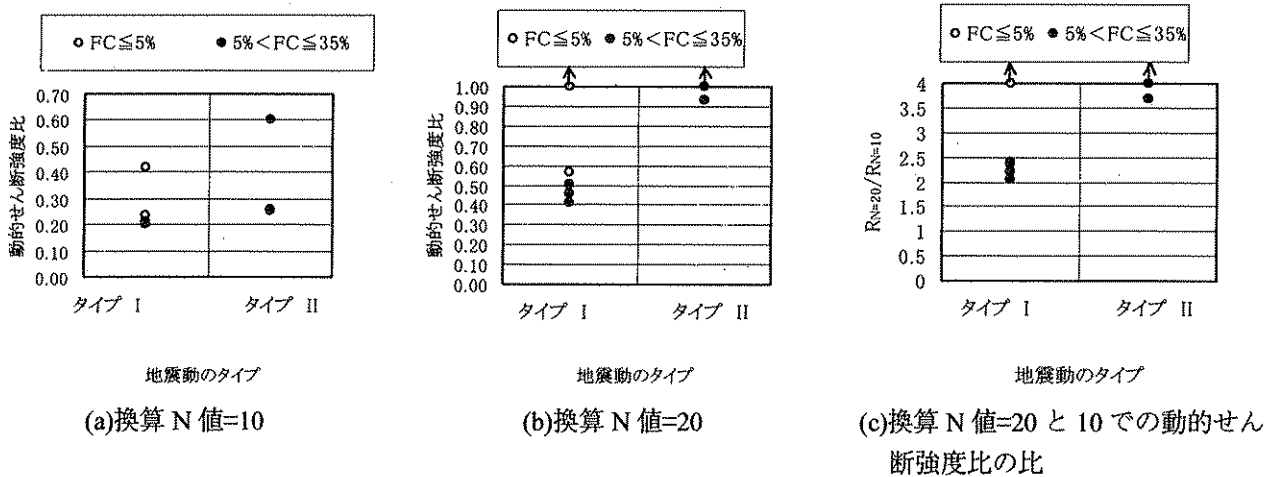


図-6 地震動のタイプと動的せん断強度比の関係

継続時間が短い場合は換算 N 値—動的せん断強度比曲線の立ち上がり急になることがわかる。

以上より、マグニチュードが大きく、継続時間が長いほど換算 N 値—動的せん断強度比曲線の立ち上がりが小さい、つまり、換算 N 値が大きくなっても

動的せん断強度比が大きくなることわがわかる。

図-6に地震動のタイプと動的せん断強度比および (R_{20}/R_{10}) の関係を示す。ここで、地震動のタイプは文献1)に従い、海洋プレート境界型地震による地震動をタイプ I、内陸型直下型地震による地震動をタイプ II とする。

プIIとした。これより、タイプIの地震動よりもタイプIIの地震動の方が、動的せん断強度比が大きくなっているとともに、 (R_{20}/R_{10}) が大きくなっている。つまり、タイプIIの地震動の方が、動的せん断強度比が大きくなるとともに、換算N値一動的せん断強度比曲線の立ち上がり急になることがわかる。

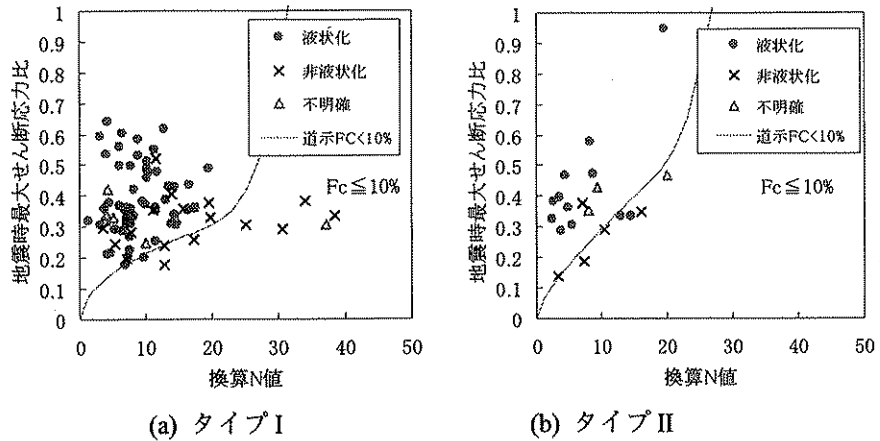


図-7 地震時最大せん断応力比と換算N値の関係(地震動のタイプ毎)

3.4 道路橋示方書との比較

次に、本研究で算出した換算N値一動的せん断強度比の関係と道路橋示方書の式を比較した。

図-7に、細粒分含有率FCが10%以下のデータについて地震時最大せん断応力比と換算N値の関係を示す。図は、地震のタイプに応じて2つに区分して示している。ここで、地震動のタイプは文献1)に従い、海洋プレート境界型地震による地震動をタイプI、内陸型直下型地震による地震動をタイプIIとした。図中には道路橋示方書¹⁾の換算N値一動的せん断強度比R関係もプロットしている。これらより、道路橋示方書の式は、液状化・非液状化の境界と全般的にはよく対応していることがわかる。ただし、タイプIの地震動については、N値の大きなところで安全側の評価となる傾向が見られる。

3.5 液状化抵抗に及ぼす地震動特性の影響の定式化

次に、換算N値一動的せん断強度比曲線に及ぼす地震および地震動特性の影響の定式化を試みた。図8に、代表的な地震について地震時最大せん断応力比と換算N値の関係を示す。いずれもFCが35%以下のデータをプロットしたものである。図中には、図-7と同様に道路橋示方書の曲線も示している。また、図中には道路橋示方書の繰返し三軸強度比 R_L から、動的せん断強度比が式(1)で表されると仮定して求めた境界線も示している。

$$R = c_1 c_2 R_L \quad (1)$$

ここに、 R_L :道路橋示方書における繰返し三軸強度比、 c_1 :拘束圧に対する補正係数 $(= (1+2K_0)/3, K_0=0.5)$ とし

た)、 c_2 :地震波の不規則性に対する補正係数。ここでは、 c_2 は式(2)で表されると仮定した。

$$c_2 = aR_L + 1 \quad (2)$$

ここに、係数aは液状化・非液状化の境界にフィッティングすることにより求めた。

これらの図より、提案式の方が道路橋示方書の式よりも特にタイプIの地震動(日本海中部地震、釧路沖地震)に対しては液状化・非液状化の分離度がよくなっていることがわかる。道路橋示方書ではタイプIの地震動に対しては c_2 の値は R_L の値に拘わらず一定値であるが、 c_2 を R_L の関数として与えた方が事例とよく一致するものと考えられる。

図-9に係数aと地震のマグニチュード、地震のタイプおよび地震動継続時間の関係を示す。これらより、地震のマグニチュードが大きいほど、タイプIIの地震動よりもタイプIの地震動の方が、また、地震動継続時間の長い方が、係数aの値は小さい傾向があることがわかる。

4. まとめ

既往の地震における液状化・非液状化事例を収集・整理してデータベースを作成するとともに、液状化抵抗に及ぼす粒度特性および地震動特性の影響を検討した。結果をまとめると以下のとおりである。

(I) 液状化抵抗に及ぼす地震動特性の影響

①地震のマグニチュードが小さく、地震動の継続時間が短いほど、また、タイプIよりもタイプIIの地震動で、換算N値の増加に対する動的せん断強度比の増加が大きいことを明らかにした。

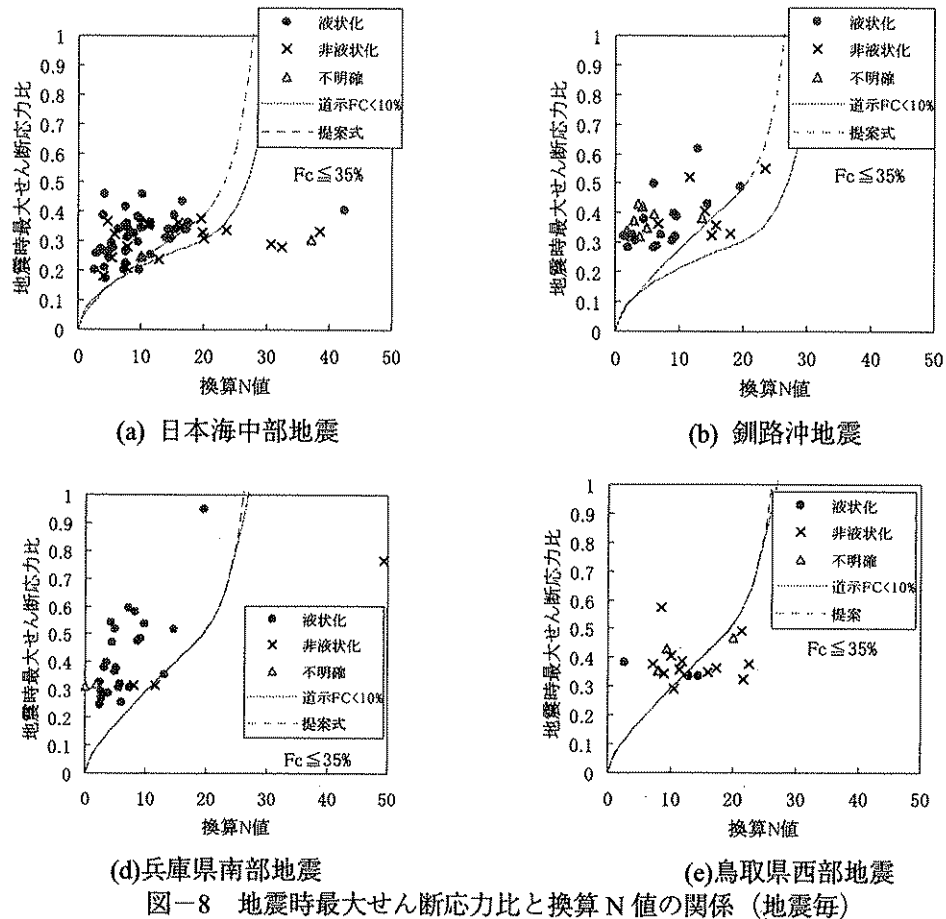


図-8 地震時最大せん断応力比と換算N値の関係(地震毎)

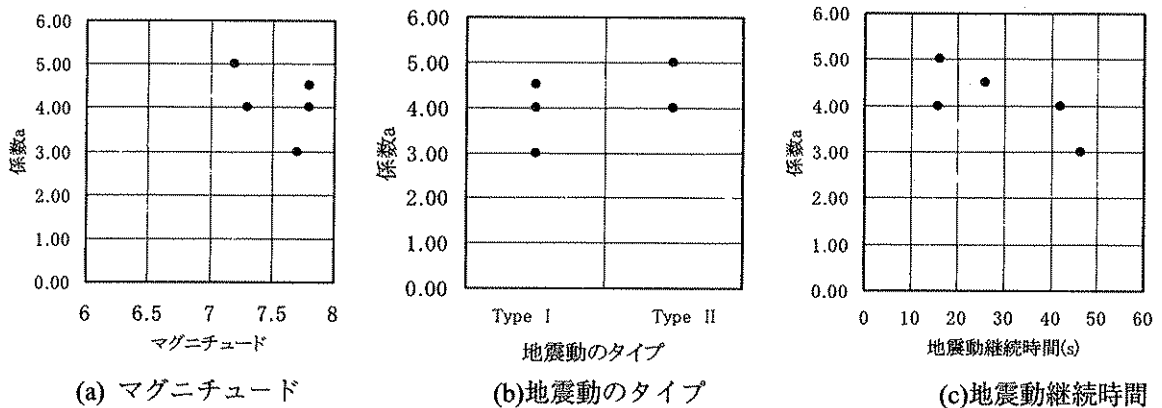


図-9 地震の特性と係数aの関係

②道路橋示方書の関係は、液状化・非液状化事例の境界と比較的よく対応しているが、タイプIの地震動については、N値の大きなところで安全側の評価となる傾向を明らかにした。

(2)液状化抵抗に及ぼす粒度特性の影響

動的せん断強度比は、細粒分含有率の増加に対して、細粒分含有率35%以下では減少し、細粒分含有率35%以上では急激に増加することを明らかにした。

(3) 新たな液状化判定法の提案

前述の(1)、(2)を総合して、液状化抵抗に及ぼす地震動特性の影響について、新たな評価手法を提案した。

今後は、データを蓄積するとともに、室内土質試験による検証等を行い、提案した手法の精度の向上を図る必要がある。

5. 参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書 (V耐震設計編)・同解説、丸善、2002.3.
- 2) Sasaki, T. and Tamura, K.: "Effects of ground motion characteristics and fines content on liquefaction resistance based on case histories", 8th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, 2002.