

(83) コーン貫入試験と強震記録に基づく液状化予測

鹿島技術研究所	正会員	○鈴木 康嗣
東京工業大学	同	時松 孝次
鹿島小堀研究室		古山田耕司
東京工業大学		田屋 裕司
東京ソイルリサーチ		窪田 洋司

1. はじめに

砂地盤の液状化強度を評価する手法として、標準貫入試験のN値が広く用いられている。一方、コーン貫入試験から液状化強度を評価する手法も幾つか提案されている（たとえば参考文献1), 2)）。筆者らは、コーン貫入試験の先端抵抗と原位置凍結サンプリング試料の液状化強度との関係について明らかにしてきた²⁾。原位置凍結サンプリング試料の液状化強度は三軸試験から求めるため、原位置の応力状態や地震外力の不規則性を必ずしも満足していない。この関係を明らかにするためには実際の液状化事例との対比が必要となる。そこで、平成5年釧路沖地震、平成5年北海道南西沖地震、平成6年北海道東方沖地震、および平成7年兵庫県南部地震により液状化が生じると共に強震記録が得られている地域においてコーン貫入試験を実施した。コーン貫入試験結果の各成分と強震記録から求めた地盤内の繰返しせん断応力比との関係を比較し、コーン貫入試験に基づく液状化判定法について検討した。

2. コーン貫入試験

平成5年釧路沖地震および平成6年北海道東方沖地震では釧路市で22地点、根室市で1地点、平成5年北海道南西沖地震では函館市・上磯町で8地点、森町で2地点、長万部町で7地点、平成7年兵庫県南部地震では神戸市で5地点、西宮市で1地点、尼崎市で1地点の合計47地点でコーン貫入試験を実施した。試験実施地点の概要を表-1に示す。コーン貫入試験は2cm/secの一定速度で貫入しながら先端抵抗 q_t 、周面摩擦 f_s 、間隙水圧 P_w を2.5cm間隔で測定した。また、コーン貫入試験の先端抵抗 q_t から下式の方法で有効上載圧 σ_v' の影響を換算した換算先端抵抗 q_{tl} を求め、地震外力と比較した。

$$q_{tl} = q_t / \sigma_v'^{0.5} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

3. 地震外力の設定

地震時に地盤内に生じる繰返しせん断応力比 (τ_d / σ_v') を次式³⁾で定義した。

$$\frac{\tau_d}{\sigma_v'} = r_n \frac{\alpha_{\max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \quad (1-0.015Z)$$

ただし、 r_n : 0.1(M-1)、M: 地震のマグニチュード、 $\alpha_{\max}$: 地表面最大加速度(gal)、 g : 重力加速度(gal)、 σ_v : 上載圧(kgf/cm²)、 σ_v' : 有効上載圧(kgf/cm²)、 Z : 地表からの深度(m)である。強震観測記録^{4)~7)}から繰返し回数とマグニチュードの関係を検討した結果、釧路沖地震に関して

表-1 調査地点

調査地域	調査地点	液状化地点
釧路市	22	8(6)*
根室市	1	1(1)*
函館市・上磯町	8	4
森町	2	1
長万部町	7	4
神戸市	5	5
西宮市	1	1
尼崎市	1	1

*: 釧路沖地震、括弧内は北海道東方沖地震

表-2 調査地点の地震外力

強震記録	マグニチュード	地域名	最大加速度(Gal)
釧路沖地震 ^{4),8)}	7.8 (6.8)*	釧路市	150~410
		根室市	155
北海道東方沖地震 ⁶⁾	8.1	釧路市	90~290
		根室市	360
北海道南西沖地震 ⁵⁾	7.8	函館市・上磯町	120
		森町	175
		長万部町	240
兵庫県南部地震 ⁷⁾	7.2	神戸市	400
		西宮市	350
		尼崎市	300

*: 繰返し回数補正後の換算値

はマグニチュードの割に継続時間が短く繰返し回数が少ないことが分かったので、釧路地方気象台および釧路港湾建設事務所で観測された加速度記録⁴⁾から繰返し回数を設定し r_n を決定した。

釧路沖地震における釧路市内の地表面最大加速度は、釧路港湾建設事務所における強震観測記録⁴⁾および飛田らが推定した釧路市内各所における地表面最大加速度⁸⁾を参考にして、また北海道東方沖地震に関しては釧路港湾建設事務所および震災予防協会ESG研究委員会による強震観測記録⁶⁾を参考にして、コーン貫入試験を実施した地点毎に設定した。釧路沖地震、北海道東方沖地震における根室市の地表面最大加速度は、花咲港現場詰所における強震観測記録^{4), 6)}を用いた。北海道南西沖地震における函館市・上磯町地域、森町および長万部町における地表面最大加速度は、函館港湾建設事務所、JR森駅およびJR長万部駅における強震観測記録⁵⁾を用いた。兵庫県南部地震に関しては、コーン貫入試験実施地点の地表面最大加速度を正確に推定することが現状では困難であるので、強震観測記録⁷⁾を参考にして神戸市内400gal、西宮市内350gal、尼崎市内300galと仮定した。なお、最大加速度は水平2成分の平均値を用いた。この結果も含めて地震外力の一覧を表-2に示す。この地震外力はあくまでも暫定値であり、強震観測記録のデジタルデータが公開された時点で見直しを行う予定である。

4. 地震外力と換算先端抵抗との比較

図-1に地震時に地盤内に生じる繰返しせん断応力比 τ_d/σ_v と同深度におけるコーン貫入試験結果の換算先端抵抗 q_{11} の関係を示す。図中の黒丸は液状化したと判断されたデータを、白丸は液状化していないと判断されたデータを、また白三角はどちらも判断出来ない中間領域のデータを示している。図-1の関係は液状化したと判断された黒丸のデータが左上に集中し大まかな傾向は捕らえているが、液状化・非液状化の境界線が曖昧になっている。これはN値に基づく液状化予測法に用いられている細粒分含有率FCあるいは平均粒径 D_{50} による影響を無視しているからと考えられる。

5. 摩擦比による地盤分類

図-2に細粒分含有率FCと摩擦比 R_f (周面摩擦 f_s と先端抵抗 q_t の比)の関係²⁾を示す。標準貫入試験のN値に基づく液状化予測法³⁾では、細粒分含有率FCにより土の種類の影響を補正している。図-2の関係より、細粒分含有率FCが増加すると摩擦比 R_f が大きくなる傾向があることから、細粒分含有率FCの代わりに摩擦比 R_f を用い、換算先端抵抗 q_{11} と組合わせることにより液状化予測が可能であると考えられる。

図-3には換算先端抵抗 q_{11} と摩擦比 R_f の関係を示す。図-3の関係では液状化・非液状化の境界線は不明確であるが、液状化したと判断された黒丸のデータは換算先端抵抗 q_{11} が150kgf/cm²以下で摩擦比 R_f が1.0%以下の領域に集中している。

図-3の関係で液状化・非液状化の境界線が不明確なのは、地震時の繰返しせん断応力比の異なったデータが

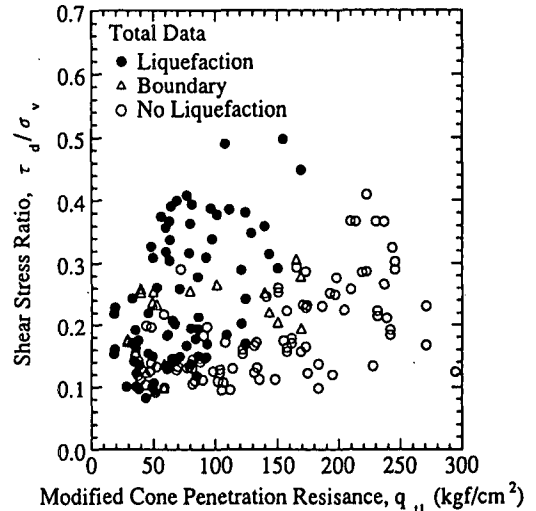


図-1 液状化強度と換算先端抵抗の関係

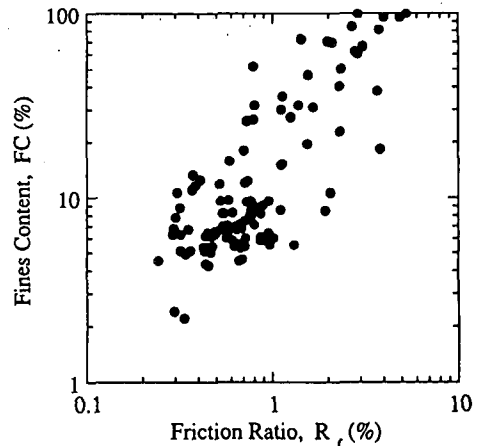


図-2 摩擦比と細粒分含有率の関係

含まれているからと考えられる。そこで、図-3のデータを繰返しせん断応力比毎に分けて図-4に示す。図-4(a)には繰返しせん断応力比が0.15以上で液状化が生じたデータと0.15以下で液状化が生じなかったデータを、図-4(b)には繰返しせん断応力比が0.25以上で液状化が生じたデータと0.25以下で液状化が生じなかったデータを示している。また、図中には大まかな境界線を引いている。図-4の関係から以下のことが指摘できる。

- ①地震時の繰返しせん断応力比によって分けて考えると、液状化・非液状化の境界線が明確になる。
- ②境界線の換算先端抵抗は摩擦比 R_f が0.5%以下では摩擦比にほとんど依存しないが、0.5%以上では強く依存する。
- ③摩擦比 R_f が一定値を越えると、ある繰返しせん断応力比に対して液状化が生じない限界値が存在すると推測される。
- ④繰返しせん断応力比が大きくなると液状化・非液状化の境界線が右上方向へ移動する。

図-4の関係は、N値に基づく液状化予測法³⁾において、細粒分含有率 F_C が5%以下では補正を行わないが、5%以上では細粒分含有率 F_C に応じて換算N値 N_1 をさらに補正して液状化強度を求めることに対応しているものと考えられる。この様に、液状化・非液状化の境界線の換算先端抵抗は摩擦比 R_f の影響を強く受けることが分かった。

6. コーン貫入試験結果に基づく液状化判定法

図-1に示した繰返しせん断応力比 τ_d/σ'_v と換算先端抵抗 q_{t1} との関係を摩擦比 R_f が(a)0.5%以下、(b)0.5%~1.0%、(c)1.0%以上に分けて図-5に示す。図-5(a), (b)には、凍結サンプリング試料の液状化強度($DA=5\%$, $N_c=15$ 回)と換算先端抵抗 q_{t1} との関係から細粒分含有率 F_C 毎に得られた相関曲線を併記している⁹⁾。図-5の関係から以下のことが指摘できる。

- ①同一の換算先端抵抗 q_{t1} に対して摩擦比 R_f が大きいほど液状化強度が大きくなる。
- ②摩擦比 R_f で分けると液状化・非液状化の境界線が明瞭に示される。
- ③②で示した境界は細粒分含有率 F_C で分けた凍結サンプリング試料の液状化強度と換算先端抵抗 q_{t1} との関係に概ね一致する。

図-5の関係はコーン貫入試験の先端抵抗と周面摩擦

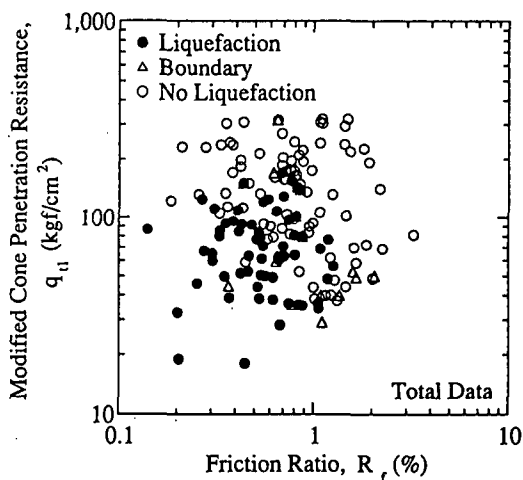


図-3 換算先端抵抗と摩擦比の関係

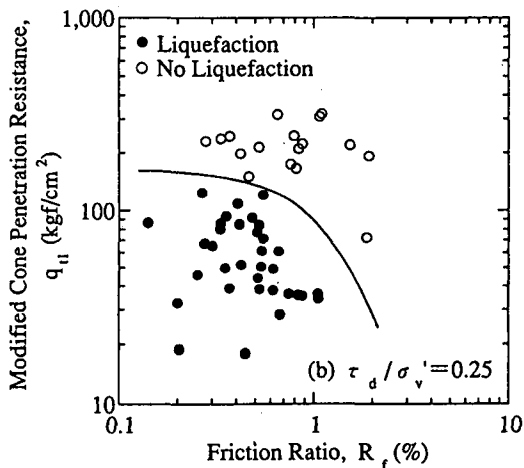
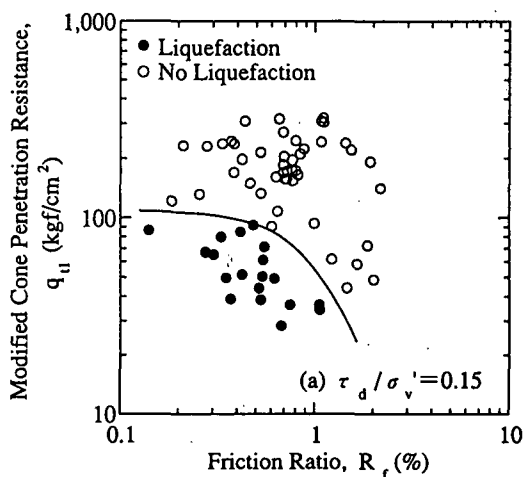


図-4 摩擦比で分けた換算先端抵抗と摩擦比の関係

から得られ、他の物理試験結果等を必要としない。したがって、コーン貫入試験のみで液状化強度が推定できることになる。

7. まとめ

最新の強震記録と液状化事例がそろっている北海道の5地域および兵庫県南部地震により液状化が発生した地域でコーン貫入試験を実施した。液状化事例を繰返しせん断応力比とコーン貫入試験の換算先端抵抗および摩擦比との関係で整理した。その結果、以下の知見を得た。

- ①液状化・非液状化の境界線の換算先端抵抗は摩擦比 R_f が0.5%以下では摩擦比にほとんど依存しないが、0.5%以上では強く依存する。
- ②摩擦比で分けると液状化・非液状化の境界線が明確に示される。
- ③この境界線は凍結サンプリング試料の液状化強度とコーン貫入試験の換算先端抵抗との相関曲線と良い対応を示す。

以上の結果より、コーン貫入試験のみから液状化強度が推定できる可能性が示された。

<謝辞> 調査にご協力頂いた関係各位に感謝致します。

<参考文献>

- 1) Shibata, T. et al. (1988): Evaluation of Liquefaction Potentials of Soils Using Cone Penetration Tests, Soils and Foundations, Vol.28, No.2, pp.49-60
- 2) 鈴木他 (1994): コーン貫入試験結果と原位置凍結サンプリング試料の動的特性との関係、第9回日本地震工学シンポジウム、pp.841-846
- 3) Tokimatsu, K. et al. (1983): Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, Soils and Foundations, Vol.23, No.4, pp.56-74
- 4) 防災科学技術研究所 (1993): 強震速報、No.41
- 5) 防災科学技術研究所 (1993): 強震速報、No.43
- 6) 防災科学技術研究所 (1994): 強震速報、No.44
- 7) 防災科学技術研究所 (1995): 強震速報、No.46
- 8) 飛田他 (1994): 釧路地方気象台および釧路市内の地震動特性における表層地盤の特性、1993年釧路沖地震に関するシンポジウム、pp.59-64
- 9) 鈴木他 (1995): コーン貫入試験及び標準貫入試験結果と原位置凍結試料の液状化強度との関係、第30回土質工学研究発表会、投稿

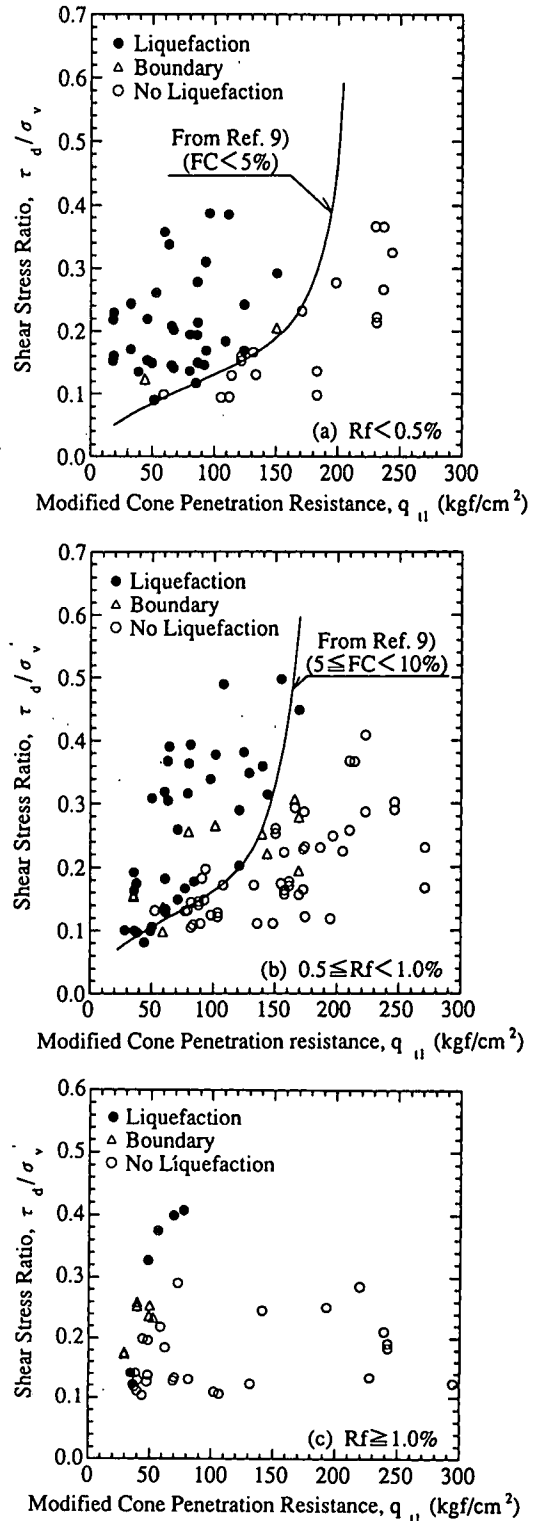


図-5 摩擦比で分けた液状化強度と換算先端抵抗の関係