

CPT 結果の設計への適用方法

Use of CPT Data for Structure Design

宮 坂 享 明 (みやさか たかあき)

(株)地盤試験所事業推進本部 本部長

梅 崎 健 夫 (うめざき たけお)

信州大学准教授 工学部

桑 原 文 夫 (くわばら ふみお)

日本工業大学教授 工学部

清 田 三四郎 (きよた さんしろう)

(株)鉄道建設・運輸施設整備支援機構

1. はじめに

CPT 結果は試験者の習熟度に関係なくバラツキが少ないことは周知である。また深度方向に連続した多くの地盤情報（先端抵抗、周面摩擦抵抗、間隙水圧など）が得られること、測定が自動化になっているためトレーサビリティが確保できることなどから、試験結果の品質が他の原位置試験（SPT や SWS など）に比べて高いことは言うまでもない。実務においても特にここ数年にわたって様々な技術改革がなされてきた。特筆すべきことは硬い中間層の貫通手法の併用や、サイズミックコーンによる弾性波速度の測定方法の改善、過剰間隙水圧の消散試験による透水性の把握などが精度よく実施できるようになってきていることである。また新鋭圧入兼貫入装置も初めて国内に導入され、CPT は実務に使える地盤調査手法として確立されつつあるといえる。

しかしながら国内においてはこの品質の良いデータを構造物の設計に活用する方法は未だに確立されていなく、CPT 普及の妨げとなっている。そこで近年、設計に直結する活用法の提案や設計パラメータ推定法のマニュアル作成、CPT を用いた設計実例集の整備、もしくは N 値への換算による従来の設計体系との連携確保を狙った試みなど様々な努力がなされている。特に性能設計への適用が大いに期待されており学会発表も毎年多く行われている。

本稿では、CPT 結果の設計への適用方法を確立することが急務であるという認識に立って、その適用し得る範囲を論ずるものである。なお、口絵写真—7 に CPT 結果を活用するためのフローチャートも添付しましたので、本文と照らし合わせて読まれるとより一層理解しやすいと思われる。

2. 三成分 CPT 結果の利用

三成分 CPT 結果として、深度方向に密な先端抵抗 q_c 、周面摩擦抵抗 f_s 、間隙水圧の三つのデータが得られる。 q_c はコーンの構造によって間隙水圧の影響を受けるため補正する必要がある。補正先端抵抗 q_t は先端コーン全体の断面積と間隙水圧測定用のフィルター部分を除いた有効断面積を用いて求められる。

2.1 土質性状分類 SBT

土質タイプ (SBT) の分類は、一般的に補正先端抵抗 q_t 、周面摩擦抵抗 f_s を利用して正規化先端抵抗 Q_t 、正規化周面摩擦比 F_r を求めてから、図—1 に示すような土質性状分類図を用いて行う。この際、正規化するために土の密度の仮定値を用いるが、最終的に分類された土のタイプと仮定した土の密度との整合性をチェックする必要がある。また正規化間隙水圧 B_q による土質タイプ (SBT) の分類チャートもあるが、間隙水圧測定値のばらつきを考慮して二次的に用いられることが多い。

2.2 換算 N 値 N_{60}

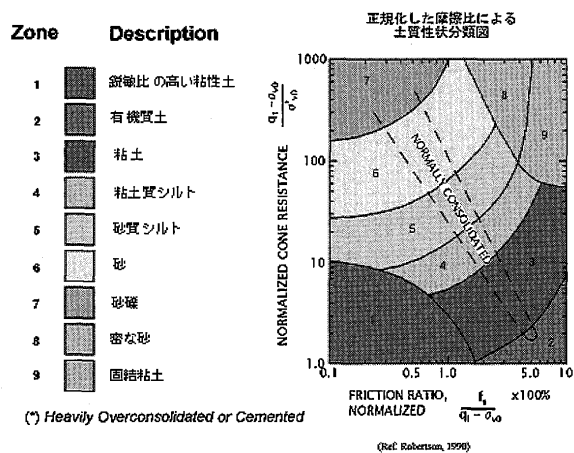
標準貫入試験との連携をつなげるため、CPT 結果から N 値への換算が行われている。Jefferies & Davies らは、まず正規化先端抵抗 Q_t 、正規化周面摩擦比 F_r を用いて、土質性状タイプ指標 I_c を求め、次に下記の式を用いて換算 N 値 N_{60} (標準貫入試験においてサンプラーに伝わる打撃エネルギーの 60% に対応する打撃回数) を算定する式を提案した。

$$I_c = ((3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2)^{0.5} \dots\dots\dots (1)$$

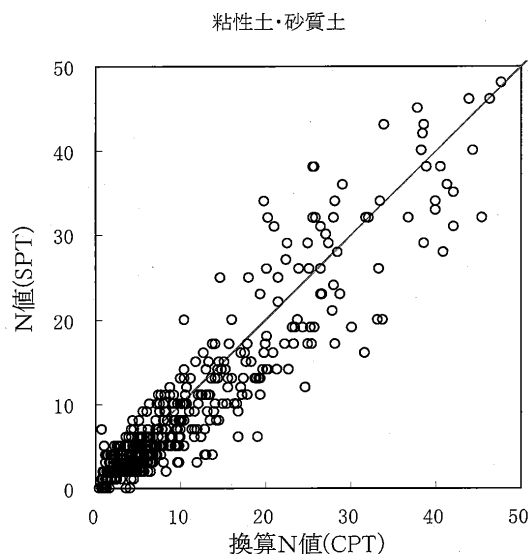
この算定式に基づき筆者らが近年国内で実施した 36 現場のデータを整理し、その結果を図—2 に示す。

2.3 内部摩擦角 ϕ'

多くの室内チャンバー試験の結果から、砂の内部摩擦角 ϕ' のピーク値と有効土被り圧で基準化したコーン先端抵抗の相関関係が得られている。この相関性を用いて内部摩擦角 ϕ' は $\tan \phi'$ の値として、先端抵抗と有効土



図—1 土質性状分類図

図-2 換算 N 値と N 値

被り圧から求められる。

2.4 非排水せん断強さ S_u

飽和した細粒土の非排水せん断強さは、先端抵抗、全土被り圧およびコーンファクター N_k によって求められる。

コーンファクター N_k は土質タイプや地域性によって決まる経験値である。欧州では Robertson らは通常 11～19 の範囲内であり、現場ベーンせん断試験を実施していない場合は $N_k=15$ の値を提案している。一方国内においては、田中ら¹⁴⁾は海成粘性土に対して、コーンファクターは 8～16 の範囲内であることを示している。筆者らは粘性土では 4～16、砂質土では 8～20 の広い範囲内に収まっている経験をしており、コーンファクター N_k のローカライゼーションの重要性を提起している。

2.5 有効内部摩擦角と非排水せん断強さの取扱い

設計に用いる土のせん断強度は、一般的に粒径の粗い材料が優位を占める土の場合は有効内部摩擦角で評価し、粒径の細かい材料が優位を占める土に対しては非排水せん断強さで評価する。CPT の結果から評価する場合、土質性状分類 SBT を利用して、砂および砂より粒径の粗い土に対しては有効内部摩擦角で評価し、粘土および粘土より粒径の細かい土に対しては非排水せん断強さで評価する。また、砂と粘土の間に分類される砂質シルト、粘土質シルトに対しては内部摩擦角と非排水せん断強さの両方で評価する。

2.6 過圧密比 OCR

過圧密比 OCR は本来土が過去に経験した最大有効土被り圧と現在の有効土被り圧の関係として表される。Mayne らは静水圧、過剰間隙水圧および有効土被り圧を用いて過圧密比 OCR との相関関係を求めた。この相関性を用いれば静水圧、間隙水圧測定値によって過圧密比 OCR が求められる。

2.7 液状化の判定

Robertson, Fear (1996) が提案した方法に基づき CPT の結果を用いた液状化の判定方法を示す。その方

法では液状化抵抗比 CRR と地震時繰返しせん断応力比 CRS の比を液状化安全率 F_L として求め、 F_L が 1 以上で液状化する可能性はないと判定する。

液状化抵抗比 CRR の算定は、まず CPT 結果から正規化コーン先端補正抵抗、土質性状タイプ指標式(1)を求め、細粒土含有率 (F_C) を計算する。次に F_C 値から正規化コーン先端補正抵抗の補正值を求めクリンサンドの正規化コーン先端補正抵抗を算定し、液状化抵抗比 CRR を求める。算定手順を次に示す。

a) 正規化コーン先端補正抵抗 (q_{c1N})

正規化コーン先端補正抵抗は、先端抵抗測定値と有効土被り圧、大気圧によって求められる。

b) 細粒分含有率 F_C

細粒分含有率 F_C は土質性状タイプ指標を用いて求められる。

c) 正規化コーン先端補正抵抗の補正值 Δq_{c1N}

正規化コーン先端補正抵抗の補正值 Δq_{c1N} は、細粒分含有率 F_C の値によって、以下のように 3 段階に分けて示される。

$$\begin{aligned} \Delta q_{c1N} &= 60 & F_C &\geq 35\% \\ \Delta q_{c1N} &= 2(F_C - 5) & 5\% < F_C < 35\% \\ \Delta q_{c1N} &= 0 & F_C &\leq 5\% \end{aligned}$$

d) クリンサンドの正規化コーン先端補正抵抗

クリンサンドの正規化コーン先端抵抗 (q_{c1N})_{CS} は正規化コーン先端補正抵抗と正規化コーン先端補正抵抗の補正值の和で与えられる。

e) 液状化抵抗比 CRR

地盤の液状化抵抗比は、クリンサンドの正規化コーン先端補正抵抗を用いて求められる。

地震時繰返しせん断応力比 CSR の算定は、建築基礎構造設計指針、道路橋標準示方書など国内の基準があり、液状化の検討を行う構造物によってそれぞれに則した基準により求めることができる。ここでは、Robertson らが提案した CSR の算定方法を示しておく。

Robertson らは全土被り圧、有効土被り圧に加え、想定マグニチュード、地表面最大加速度、重力加速度、深度方向低減係数を用いて地震時繰返しせん断応力比 CSR を求める。

2.8 液状化指数 P_L による液状化影響度の評価

道路橋示方書 (2002年3月) では、液状化指数 P_L による液状化影響度の評価を示している。液状化指数 P_L はある地点での液状化の可能性を総合的に評価するものであり、 F_L 値を深さ方向に重みを付けて足し合わせた値である。この P_L の値を利用して液状化の影響の程度を評価する。表-1 に P_L 値による評価をまとめて示す。

2.9 地表変位 D_{cy} による液状化影響度評価

建築基礎構造設計指針 (2001年) では、地表面変異 D_{cy} を指標とする液状化影響度の評価方法を示した。 D_{cy} は、深度、有効土被り圧、換算 N 値、細粒分含有率、液状化安全率によって求められる。

求められた地表面変位 D_{cy} を指標として液状化の程度が評価される。表-2 に D_{cy} による液状化影響度の評価

表一 P_L 値による評価

区分	液状化の影響の程度	P_L 値	
		レベル1 地震動	レベル2 地震動
(a)	液状化による影響 小さい	$0 \leq P_L \leq 5$	$0 \leq P_L \leq 5$
(b)	液状化による影響 大きい	$5 < P_L \leq 15$	$5 < P_L \leq 20$
(c)	液状化による影響 非常に大きい	$15 < P_L$	$20 < P_L$

表二 地表面変位 D_{cy} による液状化影響度の評価

D_{cy}	0	~5	5~10	10~20	20~40	40~
評価	なし	軽微	小	中	大	甚大

をまとめて示す。

宅盤においては地盤改良要否は、液状化指数 P_L による液状化影響度および地表変位 D_{cy} による液状化影響度を総合的に判断して決められる。

3. 過剰間隙水圧消散試験結果の利用

消散試験は CPT の途中でコーンプローブを所定深度に止めて、間隙水圧の時間変化を計測する。このとき発生した過剰間隙水圧は、一般的に粘性土であれば静水圧まで減少し、砂質土であれば一旦負圧を示すが静水圧まで上昇する。透水性の高い砂質土は大抵10分以内で静水圧に収束する。

消散試験から得られる静水位の結果から、調査地点における地下水位を推定することができる。また静水圧に対して50%消散時の経過時間を計測することによって地盤の圧密沈下の検討に必要な側方圧密係数、側方透水係数、体積圧縮係数が求められる。さらにこれらのパラメータを用いて圧密沈下量の算定など、圧密の影響に対する様々な検討が行われる。

3.1 側方圧密係数 C_H

側方圧密係数は、消散試験で得られた50%消散時における経過時間、先端コーン半径、過剰間隙水圧50%消散時の理論時間ファクター（ ≈ 0.196 ）を用いて、算定される。

3.2 側方透水係数 K_H

側方透水係数 K_H は、側方圧密係数、水の密度、地盤拘束率によって求められる。地盤拘束率は、先端抵抗測定値と経験係数 α_m によって求められ、 α_m は1~8の範囲内にある。筆者らはこの経験係数 α_m についてもローカライゼーションの重要性を提起している。

3.3 圧密沈下量 S

圧密沈下量 S は、圧密検討対象土層の層厚、体積圧縮係数 m_v 、および上載圧によって求められる。体積圧縮係数 m_v は、圧密拘束率の逆数として与えられる。

圧密沈下量 S が得られれば、宅地における不同沈下量や地表傾斜度も算定でき、最終的には地盤改良要否の

検討も行える。

3.4 圧密必要時間 t

圧密必要時間 t は、最終沈下量を100%とした場合の、ある必要圧密度に達するのに必要となる時間であり、盛土の管理に重要なデータである。圧密必要時間 t は、理論時間ファクター、側方圧密係数、圧密層の排水距離、必要圧密度によって求められる。ここで、圧密層の排水距離は、圧密層の上位と下位に透水層が分布していれば層厚の1/2となり、上位または下位のみに透水層がある場合は層厚が排水距離となる。

4. SCPT（サイスミックコーン試験）結果の利用

SCPT においてサイスミックコーンを使用し、地上叩き方により各地層の S 波伝播速度 V_s 、P 波速度 V_p が得られる。SCPT 結果を利用して次の諸設計パラメータが得られる。

4.1 ポアソン比 ν

ポアソン比 ν は、S 波伝播速度 V_s 、P 波伝播速度 V_p によって求められる。

4.2 せん断弾性係数 G

せん断弾性係数 G は、湿潤密度 γ_t と S 波速度によって求められる。

4.3 変形係数 E_0

変形係数 E_0 は、換算 N 値を用い、ポアソン比とせん断弾性係数によって求められる。

4.4 地盤反力係数 k_h

地盤反力係数 k_h は、変形係数 E_0 を用いて求められる。上述の設計用諸パラメーターを用いれば、動的応答解析や安定解析などが行える。

5. 設計に直結する CPT 結果活用の課題

5.1 設計事例集の作成

現在 N 値主体となっている設計体系において、設計に用いられる土質定数などの設計パラメーターを CPT の結果から推定し、設計に用いてもらうための設計パラメーター推定法のマニュアル作成が必要と考える。さらに、この推定法に基づき求められたパラメーターを用いて設計事例集を作成し、従来法の設計との整合性を示すことも必要であろう。このことにより、 N 値による設計に慣れている発注者側の納得が得られやすい環境が形成されると考える。

5.2 行政認知への働きかけ

ここまで CPT 結果の設計への適用し得る範囲について述べてきた。土質パラメーターについては国内外の多くの研究によって精度の高い推定が得られてきている。しかし、いまだ設計体系は N 値が主体となっている。前述したとおり、換算 N 値の持つ整合性は高い。現在の設計体系の中で換算 N 値による設計の導入から、信頼性設計に向けて CPT の持つ精度の高いデータと土質パラメーターの推定を設計に活用する環境づくりを強力に推し進めていかなければならない。それには産学一体

となりこれまでの研究成果, 実績を踏まえて行政に働きかけていくことが必要であると思われる。

6. おわりに

CPT 結果およびその結果を利用した土質パラメータの推定の高い適用性について述べてきた。しかし, 現状では N 値主体の設計体系の壁を打ち破るに至っていない。この様な状況に対して前記したような設計パラメータの推定マニュアルおよび設計実例集などを作成し, これを活用して多くの情報を行政に伝えていくことが重要であることを指摘した。この活動を支えるためには産学一体となった体制が必要となってくる。実績 (実務) と研究の両輪がかみ合っこそ, N 値主体の設計体系という大きな壁を突き崩す力が発揮できると信じている。

これからの活動を通じて行政が CPT に興味をもち, CPT を積極的に採用する環境が早い時期に訪れることを願う。

参 考 文 献

- 1) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説 第6編 サウンディング, pp. 243~337, 2004.
- 2) 岩崎公俊：地盤調査のブレイクスルー, 基礎工, Vol. 37, No. 1, pp. 98~103, 2009.
- 3) Torstensson, B-A: Pore Pressure Sounding Instrument, *ASCE Special Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties*, ASCE, 1975.
- 4) 室町忠彦・酒井幸雄・山口 弘：局部集面摩擦値と間隙水圧も測定するコーン貫入試験機の試作, 第16回土質工学研究発表会, pp. 65~68, 1981.
- 5) Campanella, R. G. and Weemee, I.: Development and Use of an Electrical Resistivity Cone for Groundwater Contamination Studies, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, No. 5, pp. 557~567, 1990.
- 6) 室町忠彦・酒井幸雄・酒井運雄：静的コーン貫入試験におけるコードレス化の試み, 第17回土質工学研究発表会, p. 1493~1496, 1982.
- 7) Campanella, R. G., Robertson, P. K. and Gillespie, D.: A Seismic Cone Penetrometer for offshore application, *Proc. Oceanology International '86, Int. Conf. Advances in Underwater Technology, Ocean Science and Offshore Engineering*, Brighton, UK, 6, Capter 51, 1986.
- 8) 酒井幸雄・土谷 尚・岩崎公俊・山本芳裕：水平土圧も測定する四成分コーン貫入試験機の試作, 第24回土質工学研究発表会, pp. 191~192, 1989.
- 9) 柴田 徹・三村 衛・ブラダン T.B.S.・延山政之：RI コーン貫入試験の開発について, 第26回土質工学研究発表会, pp. 89~92, 1991.
- 10) 渡部要一・土田 孝・織田幸伸・田中政典：地盤環境モニタリングコーンの開発, 基礎工, Vol. 34, No. 9, pp. 66~68, 2006.
- 11) 前田良刀・田上 裕・豊岡義則・坂手道明・立川日出男・酒井運雄：新しい (MST) コーン貫入試験による E, c, ϕ の測定, 土と基礎, Vol. 55, No. 11, pp. 23~25, 2007.
- 12) 小林泰三・落合英俊・安福規之・大嶺 聖・油野俊也・端野幸輔：周面側圧測定コーンの試作と強度定数推定法の提案, 第43回地盤工学研究発表会, pp. 235~236, 2008.
- 13) 澤田俊一・塚本良道・石原研而：間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その1 試験方法・装置—, 第39回地盤工学研究発表会, pp. 1927~1928, 2004.
- 14) 田中洋行ほか：我が国の正規圧密された海成粘土の静的コーン貫入試験から得られる特性, 港湾技術研究所報告, 第31巻第4号, 1992.
- 15) Robertson, P. K. and Campanella, R. G.: "Guidelines for using CPT, CPTU and Marchetti DMT for Geotechnical Design". Vol. II, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 1988.
- 16) Robertson, P. K.: "Soil Classification using the Cone Penetration Test" *Canadian Geotechnical Journal*, 27 (1), 151~8, 1990.
- 17) Jefferies, M. G. and Davies, M. P.: "Estimation of SPT N values from the CPT" ASTM, 1993.
- 18) Lunne, T., Robertson P. K. and Powell J. J. M.: "Cone Penetration Testing in Geotechnical Practices" p. 151, 1997.
- 19) Baligh, M. M. and Levadoux, J. N.: "Consolidation after Undrained Piezocone Penetration. II: Interpretation" *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 112 (7), 727~45, 1986.
- 20) "Use of In Situ Test in Geotechnical Engineering", S. P. Clemence, ed., Geotechnical Special Publications No. 6, *proceedings of In Situ '86 Conference*, sponsored by Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers, Blacksburg, VA, June 1986.
- 21) Robertson, P. K. and Fear C. E.: "Liquefaction of Sands and its Evaluation, IS TOKYO 95", *First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Keynote Lecture, 1995.
- 22) Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S., Marcuson III, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson P. K., Seed, R. and Stokoe, K. H. "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", ASCE, *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, pp. 817~833.
- 23) Robertson, P. K. and Cabal (Robertson), K. L.: "Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering", Greg Drilling & Testing, Inc, 2007.

(原稿受理 2009.5.19)