

洋上CPTから換算した地盤物性値の一考察

応用地質(株) ○本島 一宏, 野中 健太, 平出 亜
 Orsted A/S Edward Charles George Molyneux
 東京電力リニューアブルパワー(株) 足立原 路雄

1. はじめに

我が国では再生可能エネルギーの開発に伴い、洋上風力発電事業の規模が急速に拡大しており、信頼性の高い設計を行うため、地盤調査技術の適用性を検証することが重要となっている。

電気式コーン貫入試験 (CPT) は、洋上での地盤調査において、ボーリングと並んで近年多くの地域で実施されている。CPT から得た指標から N 値や細粒分含有率 F_c 、強度定数 (非排水せん断強さ (粘着力) c 、せん断抵抗角 ϕ)、 S 波速度 V_s といった物性値の推定式が多く提案されている。

しかしながら、これらはいわゆる未固結土砂を想定したものが多数であり、固結した軟岩 (ここでは第三紀鮮新世の泥岩/砂岩) への適用は信頼性に劣る可能性がある。軟岩に適用した CPT のデータは多くなく、ボーリング調査、室内試験が同時に実施された CPT の事例はさらに少ない。軟岩の特性 (2章) より、既往の推定式では信頼性の高い物性値が得られない可能性が懸念される。

軟岩の分布域で標準貫入試験 (SPT)、CPT、室内土質・岩石試験を同時に実施した事例について、室内試験からの強度定数等を基準として、CPT より推定した物性値との相関から補正式を算出し、軟岩への適用性を検討した。

2. 軟岩の特徴

対象とした軟岩は太平洋に分布する上総層群に属する砂岩/泥岩である。日本の軟岩 (堆積軟岩) の一般的な特徴は以下のとおりである。

- ①硬岩よりは強度が低い、土よりも硬質な中間的な地盤材料を指す (一軸圧縮強度が1~20MPa 程度)。
- ②新第三紀以降の堆積岩軟岩が主である。
- ③土と比べて固結しており、硬岩と比較して間隙が大きいこと、岩石自体が物理化学的作用に弱いこと (サンプリング乱れ、膨潤性等) などがある。
- ④片理や節理が力学的性質に与える影響が小さく岩石試験結果と岩盤試験との相関性が高いとされ、物性値を室内試験により求めることが多い。

3. 物性値の推定

細粒分含有率 F_c 、非排水せん断強さ c 、せん断抵抗角 ϕ 、 S 波速度 V_s および N 値を対象として、主要な推定式による CPT 換算値と室内試験値または標準貫入試験 N 値の関係図を示した (図-1~図-5)。

F_c は試験値と比較して CPT 換算値が大幅に小さい (図

-1)。 c は CPT 換算値がやや小さい (図-2)。 ϕ は砂岩のみ対象であるがその対応は良好であった (図-3)。 V_s は PS 検層結果と比較して、特に泥岩が CPT 換算値の方が小さい (図-4)。換算 N 値は SPT N 値と比較して CPT 換算値が小さい (図-5)。

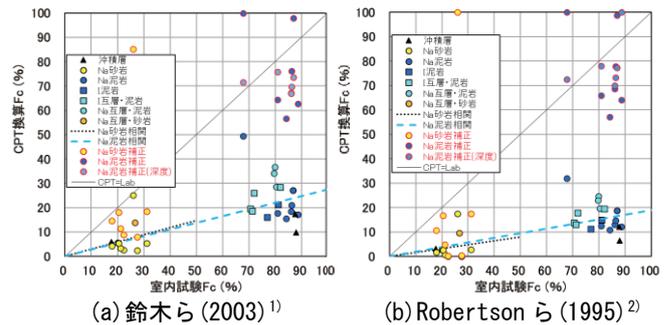


図-1 細粒分含有率 F_c

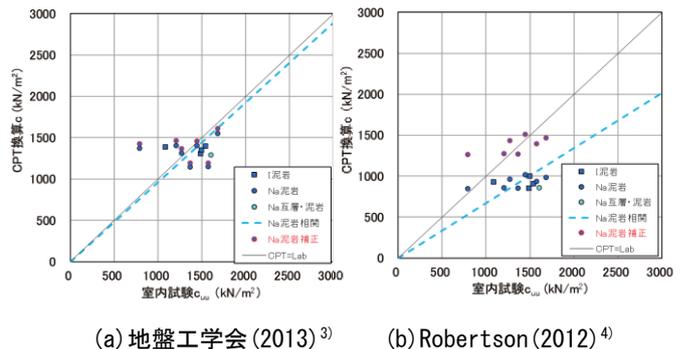


図-2 非排水せん断強さ c

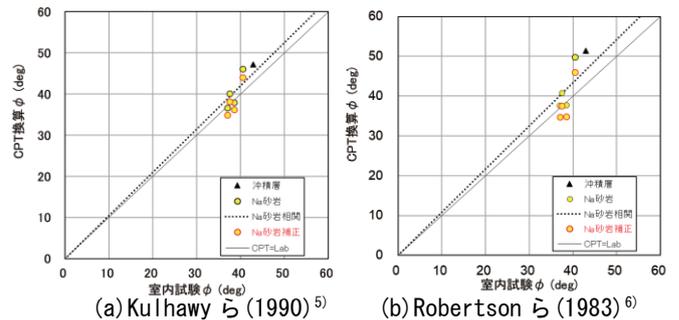


図-3 せん断抵抗角 ϕ

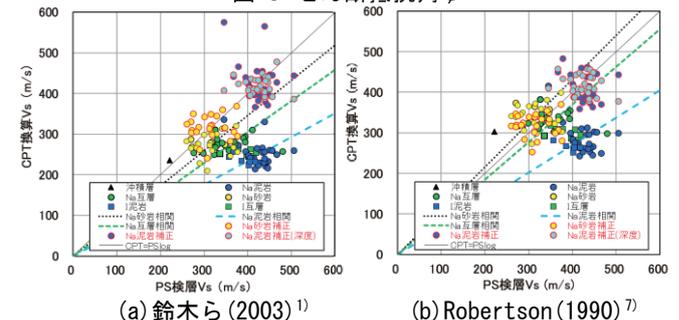


図-4 S 波速度 V_s

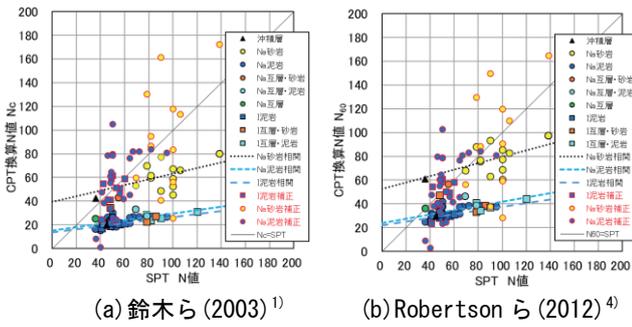


図-5 換算 N 値

Robertson(1990)⁷⁾ が提案した土質性状分類図を示す。CPTの基準化先端抵抗 Q_{tn} 、基準化周面摩擦比 F_r により土質性状を分類するものである。泥岩層が砂として分類されたものが多い。

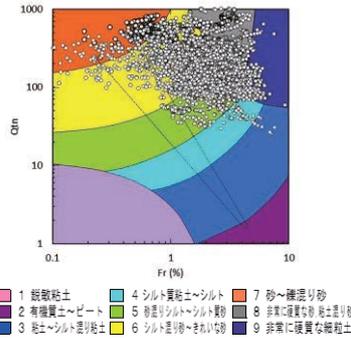


図-6 土質性状分類図 (Q_{tr} - F_r 関係図)

4. 相関式の検討

室内試験値および標準貫入試験と比較すると CPT 換算値は小さく、相関式(補正式)を求め(表-1)補正した。補正後の関係を図-1~図-5にあわせて示している。

表-1 得られた相関式(代表層)

	推定式	相関式(補正式)
F_c	鈴木ら(2003)	$F_c = 3.40 \times \text{換算 } F_c$ (砂岩) $F_c = 3.63 \times \text{換算 } F_c$ (泥岩) ※
	Robertson ら(1995)	$F_c = 6.35 \times \text{換算 } F_c$ (砂岩) $F_c = 5.28 \times \text{換算 } F_c$ (泥岩) ※
	地盤工学会(2013)	$c = 1.04 \times \text{換算 } c$ (泥岩)
c	Robertson(2012)	$c = 1.49 \times \text{換算 } c$ (泥岩)
	Kulhawy ら(1990)	$\phi = 0.953 \times \text{換算 } \phi$ (砂岩)
ϕ	Robertson ら(1983)	$\phi = 0.923 \times \text{換算 } \phi$ (砂岩)
	鈴木ら(2003)	$V_s = 1.15 \times \text{換算 } V_s$ (砂岩) $V_s = 1.71 \times \text{換算 } V_s$ (泥岩) ※
V_s	Robertson(1990)	$V_s = 0.93 \times \text{換算 } V_s$ (砂岩) $V_s = 1.48 \times \text{換算 } V_s$ (泥岩) ※
	鈴木ら(2003)	換算 $N_c = 0.239 \times N_{spt} + 39.23$ (砂岩) 換算 $N_c = 0.144 \times N_{spt} + 15.34$ (泥岩) ※
N_c	鈴木ら(2003)	換算 $N_c = 0.269 \times N_{spt} + 52.72$ (砂岩) 換算 $N_c = 0.180 \times N_{spt} + 23.71$ (泥岩) ※
N_{60}	Robertson(2012)	換算 $N_c = 0.269 \times N_{spt} + 52.72$ (砂岩) 換算 $N_c = 0.180 \times N_{spt} + 23.71$ (泥岩) ※

※泥岩は換算値/試験値に深度方向依存性があるが省略

さらに、 N 値については地盤に SPT サンプラーが貫入する際の締めつけ(閉塞効果)で過大に N 値を評価している可能性があり、屈曲率の頻度分布より閉塞効果有無の閾値を決め N 値の補正を試みた(図-7)。

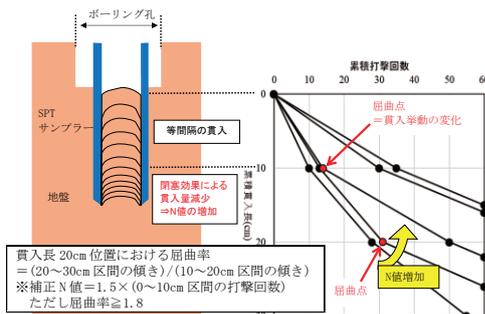


図-7 標準貫入試験での貫入挙動と補正方法

SPT N 値が小さくなり、CPT 換算値との対応が良好となり閉塞効果補正も有効であった(図-8、表-2)。

閉塞効果補正後も $N_c > 60$ では依然対応が悪く、深度補正も考慮した N_c 補正式も示した。

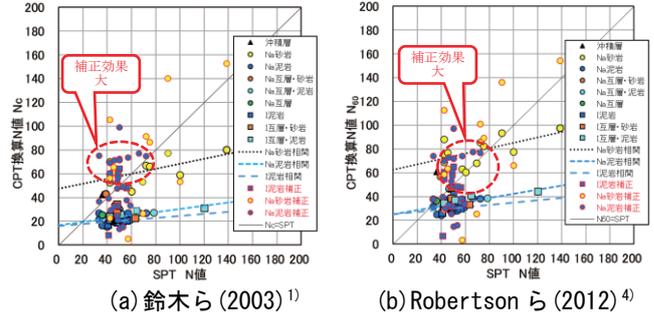


図-8 閉塞効果補正後の N 値比較

表-2 閉塞効果を考慮した相関式(代表層)

	推定式	相関式(補正式)
N_c	鈴木ら(2003)	換算 $N_c = 0.211 \times N_{spt} + 47.21$ (砂岩) 換算 $N_c = 0.136 \times N_{spt} + 16.590$ (泥岩)
	N_c 値	$N_c \leq 60$ $N_c = \text{換算 } N_c$ (砂岩)
		$N_c > 60$ $N_c = 4.75 \times \text{換算 } N_c - 224$
深度依存	$N_{spt} = \text{換算 } N_c / (0.411 - 0.00524 \times z)$ (z : GL 深度) (泥岩)	

5. おわりに(CPT 実施上の留意点)

CPT から物性値を推定し室内試験値および SPT N 値を基準とした相関式を求めた。軟岩の性質は調査地域(地盤条件が類似した地域)毎の違いが大きいと考えられ、ボーリング、CPT を近傍で実施し結果を突き合わせることで、CPT での物性値・ N 値推定が可能となる。

CPT はこれまでも信頼性の高い結果を得ており、洋上風力発電事業でも標準貫入試験が難しい水深にも適用可能な手法であり、軟岩分布域に対してはさらにデータを収集し検討することが必要である。

《引用・参考文献》

- 鈴木康嗣, 時松孝次, 實松俊明: コーン貫入試験結果と標準貫入試験から得られた地盤特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, 第566号, pp.73-80, 2003.4.
- Robertson, P. K. and Wride, C. E.: Evaluating Cyclic Liquefaction Potential using the CPT, Canadian Geotechnical Journal, Vol.35, No.3, 1998.
- 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 2013
- Robertson, P. K.: Interpretation of in-situ tests - some insights, Mitchell Lecture - ISC'4 Brazil, 2012.
- Kulhawy P. H. and Mayne P. H.: Manual on estimating soil properties for foundation design, Report EL-6800 Electric Power Research Institute, EPRI, 1990.
- Robertson, P. K. and Campanella, R. G.: Interpretation of cone penetrometer test: Part I: sand, Canadian Geotechnical Journal, Vol.20, No.4, pp.718-733, 1983.
- Robertson, P. K.: Soil classification using the cone penetration test, Canadian Geotechnical Journal, Vol.27, No.1, pp.151-158, 1990.