

電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究 (その8:力学試験結果の評価)

電気式コーン貫入試験 斜め下方貫入 三軸圧縮試験

中央開発(株) 正会員 ○栗原朋之  
 (株)ダイヤコンサルタント 正会員 太田雅之  
 千葉エンジニアリング(株) 正会員 若月洋朗  
 (株)地盤試験所 正会員 高橋千代丸  
 中央大学 国際会員 斎藤邦夫  
 日揮(株) 国際会員 深沢 健

1. 概要

著者らは、電気式コーン貫入試験(以降、CPTUと記す)の既設構造物直下の調査等の新たな可能性を見出すことを目的とし、鉛直貫入が前提であるCPTUの斜め下方(75°, 60°, 45°)貫入の適用範囲や有用性について検証している。

本研究では、実験地で確認された粘性土層を対象に実施した三軸(UU)試験と一面せん断試験(再圧縮法)により得られた非排水せん断強度(以降、UU試験はCu, 一面せん断試験はSuと記す)と、CPTUより求めるコーン係数(Nkt)について、貫入角度毎に比較検討を行った。また、圧密試験結果による圧密降伏応力PcとCPTUより求める圧密コーン係数(k)について貫入角度毎に比較検討を行った結果について報告する。

2. 実験地の地盤状況

実験地の地盤状況及び土質試験内容を表-1に示す。本研究では、表層盛土、砂質土を除くGL-6.5~20.0m間の粘土質シルト(MC層)、粘土混りシルト(M-C層)、砂質シルト(MS層)を対象層とした。粘性土層の性状としては、塑性指数Ipが深度方向に小さくなる(シルト分が多くなる)傾向を示す。また、GL-14.5m以深では、細粒分含有率Fcが小さくなり、中間土の様相を呈する。

3. CPTUによる推定値と試験結果の比較

CPTUによる土質定数の推定値は、下記に示す既存の提案式<sup>1)</sup>から求めた。

$$C_u = (q_t - \sigma_v) / N_{kt} \quad (式1)$$

$$P_c = k (q_t - \sigma_v) \quad (式2)$$

ここに、qt; 補正先端抵抗(kPa), σv; 全応力(kPa),

Pc; 圧密降伏応力(kPa), Nkt; コーン係数, k; 圧密コーン係数

CPTUによる推定値と土質試験値の比較に際しては、土質試験値はサンプリング中心深度とし、CPTUから得られるqtはサンプリング区間の平均qtとして比較した。なお、斜め貫入時のデータ評価法については、今後の検討課題としているため、本研究では従来の鉛直貫入の評価法を準用した。

非排水せん断強度(Cu, Su)及び圧密降伏応力(Pc)の深度分布を図-1に示す。また、図-1(中央, 右)には、概略調査等で用いるコーン係数の一般値(Nkt=13.4<sup>2)</sup>, k=0.33より算出した貫入角度毎のCu, Pcを併記した。

図-1(左)は、土質試験結果Cu, Suと併せて強度増加率 m=0.34(Cu/σv)から求めた正規圧密状態のCu=0.34σvを示した。同図のCu, Suは、深度方向に漸増する傾向が見られる。ただし、GL-12.0m以深は、シルト分や砂分の混入量が多くなり、サンプリング後の応力解放の影響によりCuが過小に得られた可能性が考えられる。そのためCuは、実験地盤の圧密状態(過圧密状態)を踏まえ、Cu=0.34σv以下となる土質試験値を除外して、深度毎に代表値を設定した。一方、Suは、有効土被り圧(σv)で再圧縮することで応力解放の影響を解消しているため、信頼性が高いものと考え、土質試験値を深度毎に代表値として設置した(図-1(中央))。

Cu, Suの代表値と鉛直CPTUによるCuを比較して図-1(中央)に示す。GL-14.5m以浅の比較的均質な粘性土においては、試験値と推定値で概ね一致することが分かる。一方で、GL-14.5m以深の中間土では、部分的な砂の混入等によりCPTUによるCuのバラツキが大きくなる。特にGL-15.5m付近の低塑性シルトを呈する深度では、試験値とやや乖離する。この傾向は、図-1(右)に示す圧密降伏応力PcとCPTUによるPcの比較でも確認できる。よって、GL-15.5m付近は、応力解放の影響による強度低下が推察される。なお、その他の深度では、概ね強度を推定できていると示唆される。

鉛直と貫入角度毎のCPTUによるCuを比較して図-2に示す。同図は、鉛直貫入を横軸、斜め貫入を縦軸として示す。

表-1 室内土質試験結果

| 土質(記号)        | 深度 GL m | 試料名 | Fc (%) | Ip   | 力学試験(kPa) |        | 圧密試験(kPa) |     |
|---------------|---------|-----|--------|------|-----------|--------|-----------|-----|
|               |         |     |        |      | 三軸 UU     | 一面 せん断 | Pc        | Cc  |
| 粘土質シルト (MC)   | -7.5    | T1  | 96.5   | 32.6 | 34.1      |        | 94.3      | 0.5 |
|               | -8.5    | T2  | 98.2   | 73.2 |           | 32.5   |           |     |
|               | -9.5    | T3  | 91.2   | 83.3 | 37.1      |        | 86.2      | 1.3 |
|               | -10.5   | T4  | 94.3   | 75.3 |           | 38.4   |           |     |
| 粘土混りシルト (M-C) | -11.5   | T5  | 82.4   | 33.8 | 36.0      |        | 117.0     | 0.6 |
|               | -12.5   | T6  | 77.1   | 27.2 |           | 50.5   |           |     |
|               | -13.5   | T7  | 84.1   | 23.6 | 34.7      |        | 104.0     | 0.4 |
|               | -14.5   | T8  | 58.9   | 19.1 |           | 66.0   |           |     |
| 砂質シルト (MS)    | -15.5   | T9  | 57.8   | 11.5 | 48.1      |        | 136.6     | 0.3 |
|               | -16.5   | T10 | 61.9   | 20.1 |           | 80.6   |           |     |
|               | -17.5   | T11 | 64.9   | 19.2 | 53.0      |        | 232.0     | 0.4 |
|               | -18.5   | T12 | 72.4   | 17.7 |           | 71.9   |           |     |
|               | -19.5   | T13 | 81.5   | 21.3 | 58.0      |        | 203.6     | 0.4 |

※三軸UU試験は、φ=0法として供試体毎の圧縮強さの1/2から平均値を求めて設定。  
 ※一面せん断試験は、圧密応力=有効土被り圧σvとした試料のせん断強度を設定。

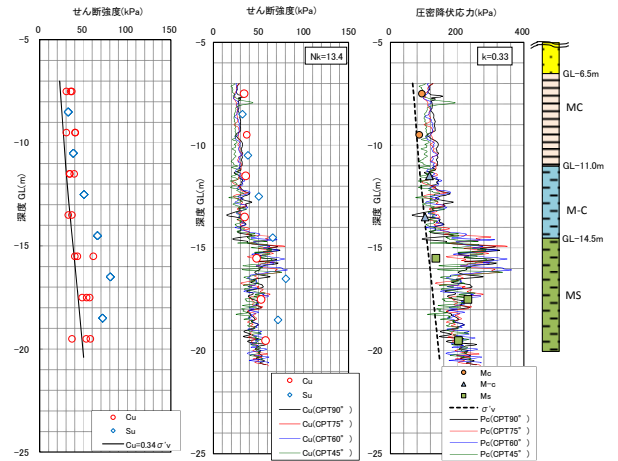


図-1 土質試験結果とCPTU推定値の深度分布

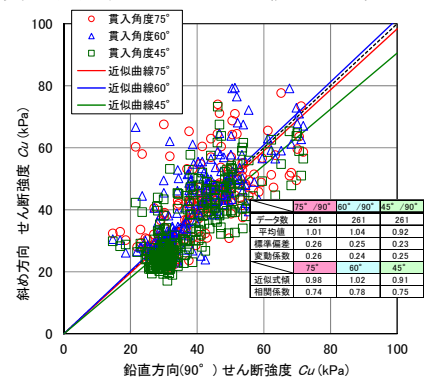


図-2 貫入角度とCuの関係

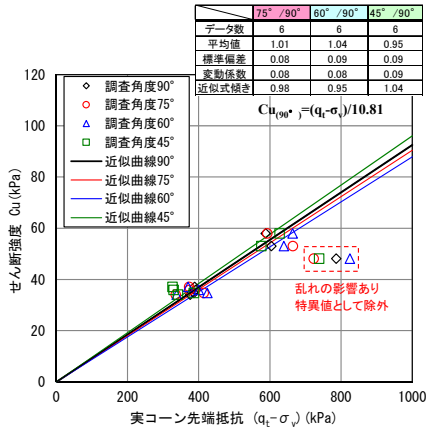


図-3  $C_u$  と  $q_t-\sigma_v$  の関係

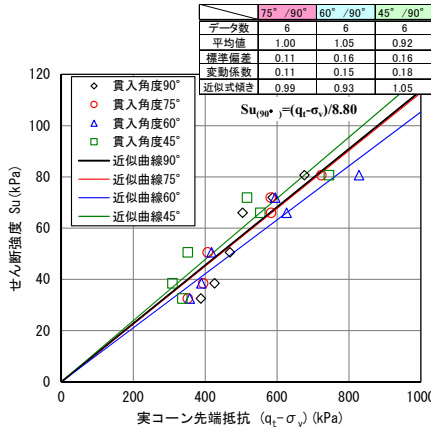


図-4  $S_u$  と  $q_t-\sigma_v$  の関係

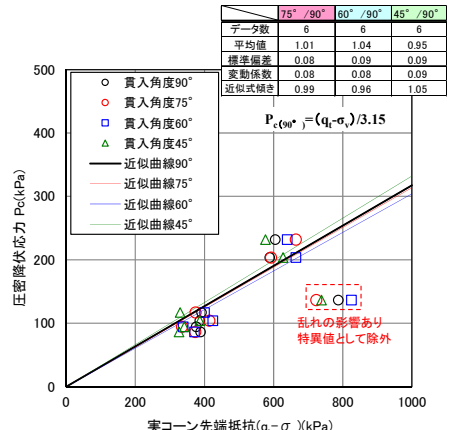


図-5  $P_c$  と  $q_t-\sigma_v$  の関係

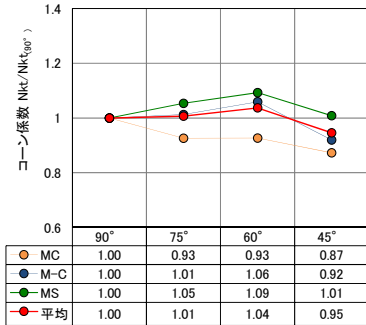


図-6  $C_u$  による  $N_{kt}$  の鉛直比

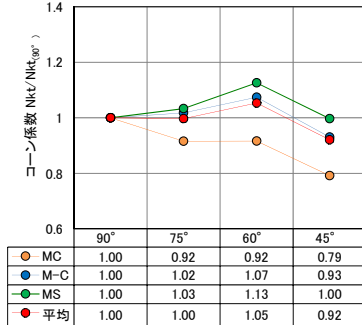


図-7  $S_u$  による  $N_{kt}$  の鉛直比

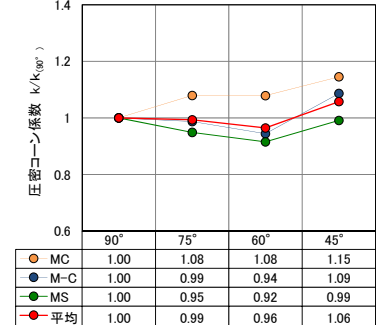


図-8  $P_c$  による  $k$  の鉛直比

鉛直貫入に対する貫入角度毎の  $C_u$  は、90° に対して貫入角度 75°、60° においてはほぼ同等の推定値となる。一方、貫入角度 45° の場合は、90° に対して 8~9% 程度小さい値となる。

#### 4. 土質試験結果と CPTU 結果の相関

土質試験値  $C_u$ 、 $S_u$ 、 $P_c$  と貫入角度毎の実コーン先端抵抗 ( $q_{net}=q_t-\sigma_v$ ) の関係を図-3~図-5 に示す。

深沢、日下部らによる既往研究<sup>2)</sup>では、国内外 26 箇所の粘性土地盤における  $q_u/2$ 、 $S_u$  と  $q_{net}$  の関係や  $\sigma'_p$  と  $q_{net}$  の関係について、 $q_u/2=q_{net}/13.4(N_{kt}=7.6\sim 19.2)$ 、 $S_u=q_{net}/11.52(N_{kt}=6.7\sim 16.4)$ 、 $P_c=q_{net}/3.44(N_{kt}=1.9\sim 5.0)$  となることが報告されている。

本研究の鉛直 CPTU と土質試験結果は、強度特性で  $C_u=q_{net}/10.81$ 、 $S_u=q_{net}/8.80$ 、圧密特性で  $P_c=q_{net}/3.15$  が得られた。今回と既往研究<sup>2)</sup>で示したコーン係数の結果は、強度特性は提案値の範囲内の数値となり、圧密特性はほぼ同等の結果を得た。土質試験結果による  $C_u$ 、 $S_u$ 、 $P_c$  と CPTU による  $q_{net}$  の貫入角度毎の鉛直比(斜め/鉛直)は、75°、60°、45°のそれぞれにおいて、平均値で 1.00~1.01、1.04~1.05、0.92~0.95 となる(図-3~図-5 の上表参照)。各種土質試験値と貫入角度毎の  $q_{net}$  の関係には、同様の傾向が見られ、貫入角度 75°の場合に 90° と良く一致した。また、貫入角度 45°では、 $q_{net}$  が 5~8%程度、90° に対して小さい値が得られており、山本らの既往の報告<sup>3)</sup>による  $q_t$  の低下傾向と一致する。

#### 5. 鉛直 CPTU と斜め CPTU によるコーン係数の関係

ここでは、土質試験結果  $C_u$ 、 $S_u$ 、 $P_c$  と CPTU より得られる  $q_t$  から  $N_{kt}$  を算出し、貫入角度毎の  $N_{kt}$  を比較した。各種の土質試験値より求めた貫入角度毎のコーン係数 ( $N_{kt}$ 、 $k$ ) の鉛直比について、角度の違いによる分布を図-6~図-8 に示す。図に示すコーン係数は、土層毎のコーン係数の平均値を鉛直比(斜め/鉛直)として示した値である。

土質試験結果  $C_u$ 、 $S_u$  より求めたコーン係数  $N_{kt}$  は、90° に対して傾きを大きくすると、各層の  $N_{kt}$  のバラツキが大きくなる傾向を示す。貫入角度 45° の場合は、75°、60° に対して各層の  $N_{kt}$  が低下する傾向を示す(図-6、図-7 参照)。

また、 $P_c$  より求めた圧密コーン係数  $k$  は、90° に対して傾きを大きくすると、各層の  $k$  のバラツキが大きくなる傾向を示す。貫入角度 45° の場合は、 $k$  が増加する傾向を示す。各種試験によるコーン係数の貫入角度による変化は、前述した  $q_{net}$  の低下に起因する結果である。コーン係数の全層平均は、貫入角度 75° の場合に、90° と良く一致しており、貫入角度 60°、45° と、90° に対して傾きが大きくなるにつれて、差異も大きくなる。

#### 6. まとめ

鉛直 CPTU と斜め CPTU の比較により、以下の知見を得た。

- ・実コーン先端抵抗と土質試験結果の関係より、各種土質試験において既往研究<sup>2)</sup>で提案するコーン係数に近い値を得た。すなわち、コーン係数の一般値から大まかな土質定数の推定が可能であり、従来報告されている CPTU の有用性を確認した。ただし、貫入角度 45° の場合は、推定強度が 90° に対して 8~9% 小さい結果となった。
- ・土質試験結果  $C_u$ 、 $S_u$  による鉛直と斜め CPTU のコーン係数の比は、各種土質試験に係らず、貫入角度 75°、60°、45° のそれぞれで、平均 1.00~1.01、1.04~1.05、0.92~0.95 となり、 $P_c$  による圧密コーン係数の比は、平均 0.99、0.96、1.06 となった。以上の結果より、貫入角度が 75° の場合においては、ほぼ 90° と同等の値を得られることが分かった。また、貫入角度 45° の場合は、既往の報告<sup>3)</sup>において  $q_t$  の低下が報告されており、本研究においても  $q_t$  に起因する推定強度の低下が認められたことから、適用に当たっては、今後、補正方法等の検討が必要と考える。

#### 【参考文献】

- 1) 公益社団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp.366-403,2013
- 2) 深沢健，日下部治，粘性土地盤におけるコーン貫入試験の適用性，土木学会論文集 No.799/III-72，153-170，2005.9
- 3) 山本伊作，重富正幸，栗原朋之，久下信明，橋久生，佐渡耕一郎，大塚潤，深沢健，電気式コーン貫入試験の斜め下方への試み（その 3：電気式コーン貫入試験結果の評価），第 14 回地盤工学会関東支部発表会，2017.11