

(別紙 1)

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書概要版作成要領

(1)研究課題名=動的貫入試験による経済的で高精度な液状化調査法の研究開発

(2)研究期間 (元号) =平成 24 年-平成 25 年

(3)代表者 (所属機関・職名) =規矩大義 (関東学院大学・理工学部土木学系教授)

(4)研究代表者 (所属機関・職名) =規矩大義 (関東学院大学・理工学部土木学系教授)

(5)分担研究者 (所属機関・職名) =東畑郁生 (東京大学・大学院工学研究科教授), 澤田俊一 (応用地質株式会社エンジニアリング本部地盤解析部副部長), 藤井紀之 (応用地質株式会社エンジニアリング本部地盤解析部主任), 吉澤大造 (応用地質株式会社エンジニアリング本部地盤解析部主任), 三上武子 (応用地質株式会社エンジニアリング本部コアラボ試験センター専門職)

(6)補助金交付総額 (円) =18,800,000

(7)研究開発の目的=これまでの液状化検討 (調査、試験、予測) では、ボーリング孔を利用した標準貫入試験による N 値と室内試験による土の粒度特性を各種技術基準に適用して液状化強度を推定してきた。そのため、1 地点の液状化評価を行うにも費用と時間を要し、結果的に調査地点数が限定されるような事態にもなっている。本研究は、動的貫入試験から液状化強度の推定に必要とされる N 値と細粒分含有率 F_C を評価できるピエゾドライブコーンの技術を用いて、動的貫入試験のみで液状化強度を推定する液状化調査システムを構築することで液状化の調査に要する時間と費用の軽減を第一の目途とする。そして、この調査結果が各種技術基準に準拠した液状化判定と「同等」の評価を可能とすることを検証し、オーソライズされた液状化評価手法を確立することを最終目的とする。

(8)研究開発の内容と成果=地盤の間隙水圧を動的貫入試験で測定することで、液状化強度を動的貫入試験のみで評価することのできる試験法に「ピエゾドライブコーン (NETIS 登録 No.TH-100032-A)」がある。ピエゾドライブコーン (以降“PDC”という) は、動的貫入試験による 1 打撃毎の貫入量と過剰間隙水圧の計測により地盤の動的貫入抵抗 N_d 値 (推定 N 値) と細粒分含有率 F_C の評価が可能であることから、地下水位 GWL を設定することにより動的貫入試験のみで液状化強度 R_L を推定することができる。ただし、過剰間隙水圧比 u_R/σ'_v と細粒分含有率 F_C は非常に良い相関を確認しているが、両者の定式化に用いたデータには限りがあることから、現状では必ずしも十分な実用性を有するには至っていない。そこで、埋立地盤 (浚渫)、自然地盤 (三角州、中洲、砂丘) 等の堆積環境の異なる地盤で現場実験 (6 現場) を行い、液状化の検討に必要な地盤物性および PDC の計測データを取得し (160 データ)、両者の相関を精査した。その結果、過剰間隙水圧比 u_R/σ'_v と細粒分含有率 F_C はこれまで同様に原点を通る一次式で近似されることを確認するとともに、信頼性を表す決定係数 R^2 が向上した。また、間隙水圧の計測値 u_R から静水圧 u_0 を差し引いた過剰間隙水圧 Δu による新たな細粒分含有率 F_C の推定式を提案した。新推定式に用いることで、砂地盤の細粒分含有率の推定精度を更に向上させることができた。地盤の動的貫入抵抗 N_d 値については、一般に 10m より深度が深くなるとトルク補正を行っても標準貫入試験の N 値よりも大きめの値を示すことが比較的多く、このような場合は代表地点においてボーリングによる標準貫入試験と PDC を実施し、個別にトルク補正係数のキャリブレーションを行ってきた。PDC が標準仕様としている小型動的貫入試験装置 (以降“MRS”という) は、35 cm の高さから自由落下させた 30kg のハンマーとアンビル (ロッド頭部) に衝突する打撃エネルギーで先端コーンを地盤に貫入している。深度が深くなると、

当然ロッドの周面摩擦が大きく、また、ロッドも長尺となり撓みやすくなる。地盤の動的貫入抵抗 N_d 値の過大評価は、このロッドの周面摩擦やロッドの撓みによるエネルギー損失量の増加（先端コーンに伝達されるエネルギーの減少）が原因として考えられる。そこで、地盤の動的貫入抵抗 N_d 値のトルク補正に代わる方法として、新たにエネルギー効率による補正法を提案した。先端コーンに内蔵した荷重計で先端コーンに伝達されるエネルギー E_C を直接算出し、ハンマーの落下エネルギー Mgh に対するエネルギー比（エネルギー効率 $e_{PDC} = E_C / Mgh$ ）を用いて地盤の動的貫入抵抗 N_d 値を補正することで、10m 以深においても N 値に概ね一致する結果が得られることを現場実験により明らかにした。更に、既往の論文による標準貫入試験のエネルギー効率 e_{SPT} を考慮することで、更に N 値の推定精度が向上する方向性が示された。標準貫入試験のエネルギー計測は本研究でも試みたが、貫入量を正しく計測することができなかった。今年、再計測を計画している。また、PDC の計測値（貫入量 D 、ロッドのトルク M_v 、間隙水圧 u_R ）によるエネルギー効率 e_{PDC} の推定法を検討したが、両者の関係の定式化には至らなかった。

地下水位については、砂地盤に対しては打撃後 0.18sec~0.19sec の圧力センサの応答値を地下水位の指標値として用いているが、砂分を多く含む地盤や粘土地盤への適用性は低い。そこで、圧力センサの応答値の最大値に着目する等、視点を変えて砂分を多く含む地盤や粘土地盤にも適用可能な地下水位の指標値の抽出を行った。その結果、均質な砂より成る自然地盤ではこれまでと同様に打撃後 0.18sec~0.19sec の圧力センサの応答値 u_R と打撃直前の圧力 u_s が地下水位の指標値として抽出された。一方、砂質土と粘性土が混在する不均質な埋立地盤では最大圧力比 u_{max} / σ_v が地下水位の指標値として抽出された。地盤性状により地下水位の指標値が異なる結果となり、今後も更なるデータの蓄積が必要である。なお、液状化の検討が必要となる地盤は、比較的浅い深度に地下水位が分布しており、試験後に試験孔を用いた孔内水位の測定が可能である。現状では、試験孔の孔内水位測定を併用する方法を別途提案した。

次に、PDC の動的貫入抵抗 N_d 値、細粒分含有率 F_C 、地下水位 GWL を用いて道路橋示方書・同解説の方法より算出した液状化強度 R_L と、ボーリングによる乱れの少ないサンプリング試料を用いて液状化試験により直接求めた液状化強度 R_{L20} の比較検討を行い、PDC による液状化強度 R_L の推定法を確立した。

最後に、道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編（平成 24 年）および建築基礎構造設計指針（平成 13 年版）に準拠した PDC の液状化調査システムを構築し、液状化判定結果（液状化抵抗率 F_L 値）について、ボーリングおよび粒度試験による方法と比較検討を行った。PDC による液状化判定結果は、動的貫入抵抗 N_d 値と細粒分含有率 F_C を適正に評価することでボーリングおよび粒度試験による判定結果と概ね整合した。以上の検討により、PDC による液状化調査システムの妥当性を確認し、ボーリングによる標準貫入試験と粒度試験による各種技術基準による液状化判定と「同等」の評価が可能であることを検証した。

PDC の更なる高度化に向けた課題としては、細粒分含有率 F_C が 50% 以上で塑性指数 I_p が 15 以下となる低塑性の地盤材料の評価、PDC による動的貫入抵抗 N_d 値のエネルギー効率による補正が挙げられる。PDC では細粒分含有率 F_C が 50% 以上の土層は液状化の検討対象外と判定しているが、各種技術基準では細粒分含有率 F_C が 50% 以上であっても塑性指数 I_p が 15 以下となる低塑性の地盤材料は液状化の検討対象となる。地盤の貫入抵抗 N_d 値については、エネルギー効率 e_{PDC} による補正法を提案したが、PDC の計測値（貫入量 D 、ロッドのトルク M_v 、間隙水圧 u_R ）とエネルギー効率 e_{PDC} の定式化には至らなかった。今後は、更なるデータの蓄積により検討を行うとともに、PDC 先端コーンに荷重計を追加した間隙水圧と荷重を計測する 2 成分動的コーン貫入試験装置を開発する。

(9)研究成果の刊行に関する一覧表=滋賀県守山市における地盤調査一斉試験(その 5 PDC)、平成 25 年 7 月 23 日、第 48 回地盤工学研究発表会、山口 恵美
ピエゾドライブコーンによる細粒分含有率の推定に関する現場実験、平成 25 年 7 月 23 日、

第 48 回地盤工学研究発表会、馬場香奈江

ピエゾドライブコーンによる N 値の推定精度に関する現場実験、平成 25 年 7 月 23 日、第 48 回地盤工学研究発表会、西山備

間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その 16 過剰間隙水圧に着目した F_c の推定-、平成 25 年 7 月 23 日、第 48 回地盤工学研究発表会、藤井 紀之

小型動的貫入試験（ミニラム）のエネルギー効率測定、平成 25 年 7 月 23 日、第 48 回地盤工学研究発表会、北野真司

打撃エネルギーの計測によるミニラムの Nd 値推定についての一考察、平成 25 年 7 月 23 日、第 48 回地盤工学研究発表会、吉澤大造

ピエゾドライブコーンから得られる地盤物性が液状化予測に与える影響、平成 26 年 7 月 16 日、第 49 回地盤工学研究発表会、馬場香奈江

間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その 17 iPDC による打撃エネルギーと間隙水圧の計測-、平成 26 年 7 月 16 日、第 49 回地盤工学研究発表会、植村一瑛

間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その 18 iPDC による打撃エネルギー補正-、平成 26 年 7 月 16 日、第 49 回地盤工学研究発表会、吉澤大造

(10)研究成果による知的財産権の出願・取得状況=打撃貫入時の過剰間隙水圧測定による地盤調査方法及び装置、特許 4458465 号、平成 16 年 2 月 17 日、平成 22 年 4 月 28 日、応用地質株式会社

(11)成果の実用化の見通し=ピエゾドライブコーンは、平成 24 年 4 月に全国地質調査業協会の「新マーケット創出・提案型事業」のスキームを活用して、全地連会員企業によるコンソーシアムを設立した。現在は 23 社の企業がコンソーシアムに参加されている。会員企業はピエゾドライブコーン計測機器を購入あるいはレンタルすることで試験を実施することができる。