

第8章 まとめ

8.1 本研究の成果

本研究は、低コスト・高精度な地盤調査法に基づく宅地の液状化被害予測手法の開発を行った。各検討項目に対する主な結論は以下の通りである。

(1) 宅地の液状化判定・被害予測の評価手法の検討（第2章）

まず、地震時に戸建住宅が地盤へ要求する性能（変形量、沈下量、傾斜角など）を調べ、液状化判定・被害の評価手法を既往の研究から検討した。その結果から、既存の地盤調査法（静的、動的サウンディング試験）から得られる地盤情報を再検討し、宅地の液状化判定に必要な地盤特性（地盤強度と土質を表す指標）をまとめた。その結論は以下のようにまとめられる。

宅地の性能評価は傾斜角で判定するのが基本で、傾斜角が 10/1000 を超えると健康障害が発生し、16.7/1000 を超えると建物に有害な沈下・変形が生じて修復不能な大規模半壊以上の被害となる。しかし、傾斜角を事前に予測するのは難しいので、それに相関する不同沈下量で判定することに置き換えることができ、80～100mm を超えないことが妥当と考えられる。ただし、不同沈下量も事前予測は難しいので、地表面沈下量を予測することにより、液状化被害予測を行うこととなる。

東日本大震災の液状化被害の規模から、宅地といえども液状化判定を目的とする宅地の調査深度は 10m までで、FL 法による液状化判定が必要である。宅地の液状化判定に必要な地盤特性として、地盤強度としての N 値（換算 N 値）、サンプリングした土試料（少なくとも 1m 間隔が望ましい）の細粒分含有率 F_c 、粘土分含有率又は塑性指数 I_p 、及び地下水位及び地盤内各層の単位体積重量の情報が必要である。

(2) 液状化判定可能な動的コーン貫入試験の開発（第3章）

液状化判定可能な大型、中型動的コーン貫入試験（SRS、MRS）の開発のために、9 地点・12 箇所現場実験を行い、地盤強度の高精度化と土質判定手法を検討した。その主たる結論は以下のようまとめられる。

ピエゾドライブコーン試験（PDC）の貫入抵抗 N_d 値は、深度 10m 付近までは N 値と良く一致した。PDC で推定される細粒分含有率 F_c は、粒度試験と概ね一致した。

SRS、MRS 試験実施後の試験孔を利用して、通電型水位計によって地下水位を精度よく測定できる。また、SRS 試験用の開閉式新型サンプラー、MRS 試験用として手動式バイブロサンプラーを用いれば、液状化判定のための土質判定として、精度よく細粒分含有率 F_c 値を測定できる。

SRS 試験でのトルク測定時のコーン周面と地盤の摩擦音から土質判定（粒度特性）を行うことを試み、摩擦音のスペクトル形状（スペクトル幅）から F_c 及び細粒分の塑性の有無を推定できる可能性を見出した。

標準貫入試験（SPT）と各種動的コーン貫入試験の打撃効率を測定した結果、一部を除けば、打撃効率は 60 % を超えること、クッション（緩衝材）が厚くなると、20% 程度減少すること、測定した打撃エネルギーと一打撃当たりの貫入量を用いて算定した動的コーン貫入抵抗は、静的コーン貫入試験コーン貫入抵抗と比較的良好一致を示すこと、などを明らかにできた。

SRS 従来機と自重低減機の N_d 値を比較した結果、打撃装置自重の影響は砂質土地盤では小さいが、粘性土地盤で大きく、特に軟弱な沖積粘土層に対する従来機による調査では地盤強度を過小評

価する可能性が高いと言える。

SRS 従来機・自重低減機の N_d 値と N 値を比較した結果、砂質土では $N_d \approx N$ となるが、粘性土では $N_d > N$ となった。土質によって N_d 値と N 値の関係が異なる理由は、中実コーンである SRS と中空サンプラーである SPT の貫入メカニズムの相違から説明することができた。

粘性土地盤を対象に、SRS 自重低減機の N_d 値と一軸圧縮強さ q_u 値を比較した結果、両者の相関性は高く、回帰式を用いれば、 N_d 値から非排水せん断強さを推定することが可能と考えられた。

MRS 従来補正、新補正と SRS 自重低減機の N_d 値を比較した結果、新補正の N_d 値は SRS 自重低減機と整合し、従来補正ではやや小さめの N_d 値を与えた。今後、SRS は自重低減機が標準的な試験機となるので、MRS の補正方法は新補正によるのが妥当と判断できた。

(3) 液状化判定可能なスウェーデン式サウンディング試験の開発（第 4 章）

液状化判定可能なスウェーデン式サウンディング（SWS）試験の開発のために、9 地点・12 箇所で行った現場実験を行い、地盤強度の高精度化と土質判定手法を検討した。その主たる結論は以下のよう

にまとめられる。

SWS 試験実施後の試験孔を利用し、有孔管（中空ロッド）を挿入して交流式比抵抗水位計で地下水位を計測する手法は精度が高く、ボーリングでの地下水位と概ね一致した。また、測定棒を挿入してそのぬれ具合から地下水位を測定する方法でも測定精度は問題ないと判断された。

土試料の簡易サンプラーとして、SWS 試験と併用して別孔で削孔する自動式バイプロサンプリング機による試料採取は SPT 試料の結果と概ね一致し、実用的なサンプリング方法であることがわかった。一方、SWS 試験孔を利用した簡易サンプラーとして、ドリル式、開閉式、開閉貫入式を比較し、ドリル式はロームなどを対象とする場合は、簡便であり比較的精度が高いこと、開閉式と開閉貫入式は地下水位以深でも土の試料採取が可能であった。

二重管のロッド形式とした DT-SWS と通常の SWS の結果を比較し、ロッドと地盤との周面摩擦の影響を検討した。粘性土では二重管によってロッドの周面摩擦が低減されることが確認できた。また、貫入後ロッドを 1cm 引き上げて測定したロッドの回転トルク M_t によって貫入抵抗を補正する方法を提案した。

電気式静的コーン貫入試験（CPT）によって SWS 試験結果を解釈することを試み、CPT の先端抵抗 q_t と SWS の先端反力 q_{sw} には自沈層では相関があり、それにより SWS の自沈層や回転層となることが説明できること、その関係式を用いると N 値と N_{sw} の関係を表した稲田式の検討も可能になること、などを新たな知見として見出すことができた。

SWS 試験による W_{sw} 、 N_{sw} と N 値の関係を再検討した結果、砂質土では、かなり大きくばらつくが、稲田式は平均的な関係を表していることがわかった。その理由は、SWS は静的貫入と回転貫入という異なるメカニズムの貫入方式を採り、基本的に排水条件での試験であるのに対し、単純な動的貫入である SPT は非排水条件での試験であるためと考えられた。

一方、粘性土を対象に、 W_{sw} 、 N_{sw} と q_u 値の関係を検討した結果、10m 以浅の $q_u < 100 \text{ kN/m}^2$ 程度で自沈となる可能性があること、稲田式は下限値を示すことが見出された。

(4) 数値解析による液状化判定・被害予測の検証（第 5 章）

液状化による沈下量の簡易推定式を求めることを目的とし、多重せん断ばねモデルを基本とするカクテルグラスモデルを構成則として採用した有効応力解析法（液状化による過剰間隙水圧の消散

による沈下についても計算することができる)を用いて、本研究で実施したボーリング4地点に対して1次元の有限要素解析を行った。その主たる結論は以下のようにまとめられる。

まず、浦安市高洲における沈下量の推定を行うため、ボーリングデータと要素試験結果から解析パラメータを決定した。解析地点の入力加速度記録としては K-NET(CHB008)で得られた記録を GL-20m の地点に入力した。この入力に対し、実測沈下量に近い約 30cm の沈下量が計算された。また、非液状化層厚と液状化層厚をパラメータとして変化させた場合について振動数 1Hz、継続時間 10 秒の正弦波入力に対する計算を行い、その結果を既往の沈下量推定式と比較したところ、沈下量 30cm 程度までは良い一致を示すが、それ以上ではばらつきが大きくなる結果となった。

次に、4 地点を対象に解析を行い、既往の推定式では考慮されていない、表層の非液状化層厚の影響を考慮した沈下量推定式を提案した。パラメータとして非液状化層だけではなく、簡易試験で得られる地下水位を用いて地下水位以浅と以深の層厚を考慮した推定式を提案し、同式が解析結果 (=この場合の真値) と良い一致を示すことが確認できた。

(5) 宅地地盤情報データベースの開発 (第6章)

既存の宅地地盤情報及び新たな地盤調査法による調査情報を統合化するための宅地地盤情報データベースの基本設計を行い、その基礎部分となるシステム機能の提案と検証構築(試作)を行い、この検証構築を通して提案するシステムの実現化の第一歩を示した。その主たる結論は以下のよう

にまとめられる。

将来的に構築の最終段階となる「統合型データベース」へ移行する時点において、あるいは前もって、インデックス型データベースに保存された原本の地盤調査データを数値デジタル化することも、逐次、進める必要がある。本研究では、これを第二段階の構築と称した。このような数値化は宅地個々の情報を扱う上では必ずしも必須事項ではないと考えられるが、たとえば地震防災検討の中で、宅地の液状化リスクを広域的に評価するためには必須の事項である。そのため、今後の課題として、規格統一されていないサウンディング調査法およびそのデータの整理方法について検討し、データ引き渡しのための XML フォーマット等を提示する必要がある。

データベースの構築と活用の成否は、現実的に確実なデータベース化の手法を迫及することにある。データベースを構築するための体系的な技術、活用するための通信手段等の運用技術は、現在、非常に高度化されている。その上にいかに適切かつ確実に、そして永続性をもって情報の蓄積を行うかが、真の意味でのデータベース構築と位置づけられる。

(6) 低コスト・高精度な宅地の液状化被害予測手法の開発 (第7章)

まず、第3章の動的コーン貫入試験 (SRS、MRS) と第4章のスウェーデン式サウンディング試験 (SWS) によって測定した地盤強度 (換算 N 値) と簡易サンプラーによる土試料採取による土質判定 (細粒分含有率 F_c) を用いて、液状化判定した結果の比較を示した。その結果、SRS、MRS、SWS による換算 N 値と簡易サンプラー試料による F_c を併用すれば、液状化判定は十分可能と考えられた。ただし、簡易サンプラーの機構にはまだ改良の余地があり、深度 10m まで少なくとも 1m 間隔で採取することが必要である。

次に、その液状化判定結果に基づいて、液状化被害の予測手法を示した。被害予測は地盤の沈下量を予測し、それから住宅の傾斜角を予測する手法を提案した。また、本研究による地盤調査手法の導入効果についても言及した。

最後に、「低コスト・高精度な地盤調査法に基づく宅地の液状化被害予測手法」に基づく実施マニュアルをまとめた。

8.2 今後の課題

本研究は、2年の研究期間で実施したものであるが、まだ検討時間が不足しており、様々な課題が残されている。以下に主な課題を挙げる。

- 1) SRS 試験は自重低減機が開発されたが、まだ実施した現場が少なく(7地点)、特に粘性土地盤と対象としたデータの蓄積(N 値や q_u 値との相関)が必要である。
- 2) MRS 試験の新補正については、SRS 試験との対応を今後とも検討する必要がある。
- 3) PDC 試験では、10m以深の N_d 値が N 値よりも大きくなることを改良する必要があること、砂分を多く混入する砂質シルトや同じ細粒分でも粘土分・シルト分に応じて正しく F_c を推定する必要があること、などが今後の課題として挙げられる。
- 4) SRS 試験での音測定による土質判定は、まだ F_c 値を推定する手法には達していない。今後さらにデータを蓄積し、粒度(F_c 値)と相関する新たな指標を見出す必要がある。
- 5) SWS 試験では、 W_{sw} 、 N_{sw} と N 値及び q_u 値の関係はばらつきが大きいので、さらにデータを蓄積する必要がある。ただし、その相関性には周面摩擦の補正を取り入れる、又はCPTの先端抵抗との相関性を見出すなどの検討も必要である。
- 6) SRS、MRS、SWSと併用する簡易サンプラーの機構にはまだ不十分な点があり、今後ともさらなる改良が必要と考えられる。また、深度10mまで連続採取が望ましいが、少なくとも1m間隔で採取することが必要である。
- 7) 数値解析による液状化による沈下量の簡易推定式を提案したが、今回は解析値を真値として回帰式を求めており、本来であれば実測沈下量を真値として回帰分析を行うべきである。回帰式の適用に当たっては、まず実測値との厳密な比較検証が必要であり、それに応じて適宜修正がなされなければならない。
- 8) 宅地地盤の地盤調査データは個人情報的な制約から共有化が遅れているが、今後、既往の自然地盤情報のデータベースや地図情報等とのリンクを図り、宅地の地盤調査と液状化判定・被害予測が可能となる宅地地盤情報データベースの構築が必要となる。
- 9) 東日本大震災では海溝型地震特有の継続時間の長い地震動の影響が大きかったこと、液状化は人工の埋立地盤で発生し、自然地盤ではほとんど発生していないことから、今後、液状化判定手法には地震の継続時間の影響と地盤生成の年代効果を考慮すべきと考えられる。
- 10) 液状化被害の評価指標となる液状化指標 P_L 値と地表変位 D_{cy} 値の相互関係がまだはっきりしていないので、両者の関係を明確にすることが重要と考えられる。特に、 P_L 値は元々道路橋示方書によって算定された F_L 値に基づくものであるため、建築基礎設計指針による F_L 値から求められる P_L 値の位置づけを明確にする必要があると考えられる。