

地盤基礎の研究開発と原位置検証

技術研究所 リサーチフェロー 桂 豊

1. はじめに

地下、基礎、地盤の分野では、地下や基礎の大型化対応技術、コストダウンや工期短縮に直接貢献できる技術、設計や施工に起因するトラブル防止技術、地震など自然現象への対応技術、環境問題への対応技術など、さまざまな目的の研究・開発を実施してきた。

大型化対応技術の代表的な工法として、1969年に全社プロジェクトとして開発を始めたRC地中連続壁工法（SSS工法）がある。1973年には構造壁および杭として日本建築センターの一般評定を取得した。その後、コンクリートの高強度化・大深度化・大壁厚化が図られ、LNG地下タンクや橋台基礎など大型の土木工事や、フコク生命本店、山王パークタワー、東京電力新豊洲変電所など、大規模な地下室がある建築物に採用されている。SSS工法と併行して関連する開発も行われ、数多くの成果をあげてきた。SSS壁溝掘削時に使用する安定液（泥水）の管理・処理システムやリユースシステム、泥水固化壁やセメント系地盤改良工法の開発などである。

このような全社プロジェクトによる開発は稀であり、多くの研究・開発は品質確保や生産性向上、トラブル防止、地震対応、環境問題対応など、その時々々の要請に応えるよう個別に取り組んできた。今回「地下・地盤技術」の小特集が組まれるに当たり、実工事に使われるという視点から、個別に対応してきた研究・開発のこれまでを振り返ってみたい。

以下では「地盤評価と地下・基礎工法」「地震と地盤・基礎」「地盤材料」と分け整理する。なお、当社の研究・開発のすべてを網羅しているわけではないことをご容赦いただきたい。

2. 地盤評価と地下・基礎工法

地下や基礎の設計・施工は、地盤の性能を考慮したうえで、基礎工法を適切に組合せて選定することが重要となる。その際、品質確保とコストダウンや省力化など生産性の向上との両立が強く求められる。

当社では、基礎の選定に関して苦い経験がある。長尺杭の施工が可能となった1970年代に、地盤沈下地域で支持杭を用いた建築物に不同沈下が生じ、竣工後約4年で取り壊さざるを得なくなった。当時種々の構造物で発生していた杭に作用する負の摩擦力による不同沈下障害である。負の摩擦力のメカニズムの研究²⁾や、対策の提案が行われたのは言うまでもない。この障害は支持杭万能主義に陥った反省となり、その後の建築業界をあげて推奨された、支持杭を用いない基礎（地盤性能に適合した基礎）の研究・開発のきっかけになった。

建物地下や基礎にかかわる研究・開発の方法には、原位置試験や実測に基づく知見の集約、地盤の構成則に基づく理論的検討、解析検証などがある。なかでも原位置試験や実測に基づく知見の集約は、設計の検証や施工時のトラブル防止および生産性向上に欠くことのできない方法である。当社では、調査法や計測手法を開発しながら知見の集約に努めてきた。大規模な地下工事が増えた1970年代後半には、開発した山留め計測システムにより地下工事管理と山留め構造の挙動分析・評価を始めている。超高層ビルの沈下が課題とされた1980年代には、開発した多段式層別沈下計（写真-1）による地盤のリバウンド・沈下量の実測と地盤剛性変化の詳細調査（写真-2）を行い、支持地盤の性能にかかわる多くの知見^{3),4)}を得ている。

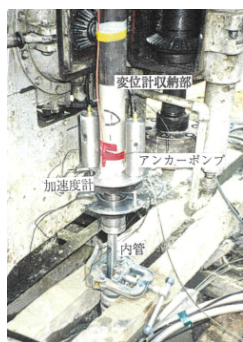


写真-1 層別沈下計と加速度計の設置



写真-2 板たたき法による地盤剛性の調査
（掘削深さごとに掘削底で調査）

設計や施工を検証するための原位置実測に基づく施工時解析は、1970年代後半から山留め工事で使われており、トラブル防止とコストダウンに貢献してきた。1990年代には高層ビル地下躯体構築時の挙動解析方法も開発⁵⁾し、実工事に展開されている(写真-3)。また、山留めについては、沖積粘性土地盤の側圧や洪積砂地盤の土圧⁶⁾の研究、地盤改良併用山留め⁷⁾の提案などがある。地盤改良併用山留め(図-1)は軟弱地盤における掘削工事で山留め壁の変形抑制に有効であり、切梁の削減や工期短縮にも効果があることから実績も多い。改良地盤の評価にかかわる研究も進められており、均質化法を用いた複合地盤の解析手法⁸⁾やセメント系固化材で改良した地盤の早期性能検証法 Vs-QUIC⁹⁾(図-2)などが開発されている。

今後、海外など未知の地盤における工事の増加も予測される。地盤性能の評価手法に磨きをかけ地盤性能に適合した基礎工法の開発や選定するとともに、実工事における検証が期待される。



写真-3 施工時解析を行った代表的な高層ビル

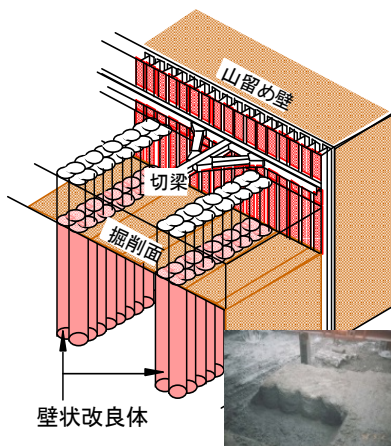


図-1 地盤改良併用山留め

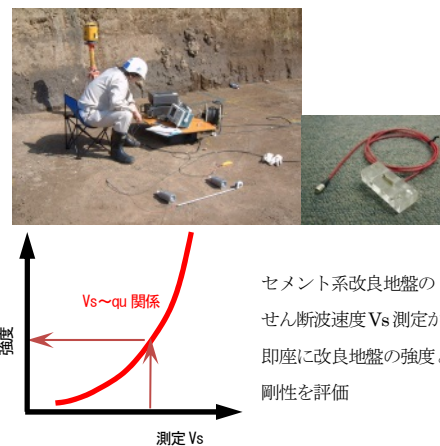


図-2 Vs-QUICによる性能検証

3. 地震と地盤・基礎

1964年の新潟地震以来、地震のたびに地盤の液状化による被害が報告されている。2018年北海道胆振東部地震における札幌市一部地域の住宅被害は記憶に新しいところである。特徴的な被害例としては、1995年の兵庫県南部地震で生じた護岸近傍での側方流動や護岸背面地盤の沈下(写真-4)、2011年東北地方太平洋沖地震で震源から遠く離れた東京湾沿岸でも生じた液状化被害(写真-5)などがある。



(a) 護岸近傍の側方流動



(b) 護岸背面地盤の沈下

写真-4 兵庫県南部地震で発生した液状化被害(1995年)



写真-5 浦安市の液状化(2011年)

液状化に起因する種々の現象の評価と対策は、原位置調査による現象確認、要素試験に基づく地盤の構成則の研究、解析手法の研究、遠心振動実験による評価手法の研究と検証など、多方面から取り組んでいる。

三次元液状化解析システム HiPER¹⁰⁾(図-3)は、地震時における液状化を含め地盤の揺れや構造物の損傷過程を精度よく解析する手法であり、最適な液状化や側方流動対策の検討に貢献している。HiPERは1991年の開発であり、地盤の構成則として新たに提案したおわんモデル¹¹⁾を使用している。その後も2009年ポスト液状化理論の反映、2014年大規模解析への拡張など深化している。また、ユニークな免震として地盤免震の提案¹²⁾も行っている(写真-6,図-4)。地盤免震は、地震被害調査時に液状化した地域の墓石が液状化しなかった地域の墓石に比べ転倒率が低いことから発想し(写真-7)、遠心振動実験とHiPERにて効果を確認し実現した。

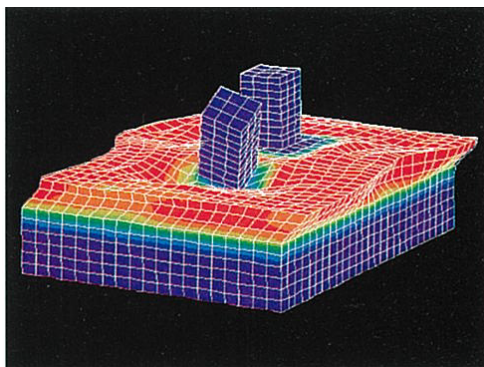
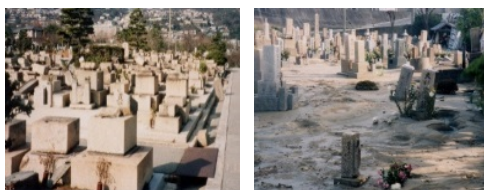


図-3 三次元液状化解析システム HiPER



写真-6 地盤免震を採用した石橋



(a) 液状化しなかった地盤 (b) 液状化した地盤

写真-7 墓石の転倒状況



図-4 石橋の地盤構造

ポスト液状化理論^{13),14)}は液状化した後の地盤性能を評価する方法である。この理論は、詳細な地震被害調査と、工夫した室内要素試験に基づき提案した。薄層の液状化層を含む地盤の基礎設計や液状化後の地盤挙動予測、対策工法の提案に用いられている。また、グラベルサポート工法(写真-8, 図-5)は、地表に礫を敷き、液状化層の水分のみ排出することにより構造物の沈下や傾斜を抑制する工法¹⁵⁾である。通常液状化防止対策が困難な既存および新築の小規模構造物や駐車場などに適した工法であり、2017年に日本建築学会技術賞を受賞した。

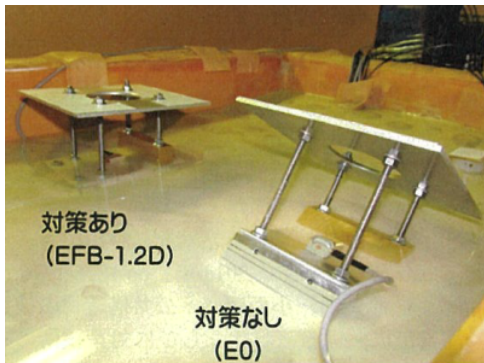


写真-8 遠心振動実験による効果確認

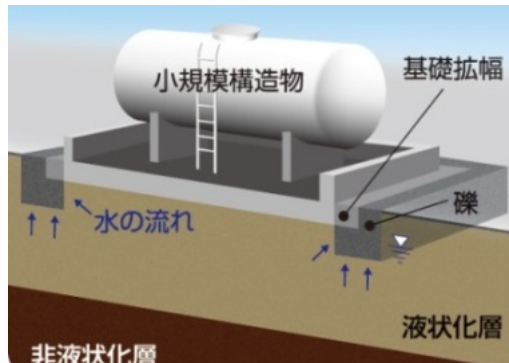


図-5 グラベルサポート工法の適用例

4. 地盤材料

地盤材料という視点からの検討は、SSS工法における安定液(泥水)処理問題がきっかけである。資源の有効利用や汚染物質の除去など、今日という地球環境問題への対応という視点からの取り組みである。

当社では、建設現場の基礎工法で発生した泥水の減容化やリサイクルに加え、石炭灰や製紙スラッジ焼却灰などの他産業廃棄物についても、微量重金属の制御を行いながら建設現場で積極的に活用するための資源化に取り組んできた。石炭灰については、1980年代にスラリー化して打設するなど施工法も提案し実工事¹⁶⁾(写真-9)で使用されるとともに、現在、継続研究も行われており各種の実用的な知見¹⁷⁾が得られている。

土壌汚染対策についての研究は、2003年土壌汚染対策法の施行以前から進めている。重金属による汚染土壌や有機系廃棄物による汚染土壌の浄化(写真-10)に各種の工法を提案している。また、最近では放射能を含んだ土壌の処理と再資源化にも取り組んでおり、その成果は実工事に反映されている。

地盤材料の研究・開発は国内外を問わず各種の法的規制を受ける。今後も法規制に則った臨機応変な対応が期待される。



写真-9 石炭灰による埋め立て



写真-10 有機系廃棄物の汚染対策

(ひまわりを用いた土壌浄化技術：タイ王国で実施)

5. おわりに

実工事に使われる研究・開発という視点から「地盤評価と地下・基礎工法」「地震と地盤・基礎」「地盤材料」と分け整理した。現在も使われているほとんどの技術は、原位置における現象把握からの発想と適用事例の分析による検証がなされたものであること、また、研究・開発の途上では、調査法や試験法など検討手法に独自の工夫があることを再認識させられた。

現在、地盤調査手法は調査会社、杭など基礎工法は専門工事業者による開発も盛んに進められている。また、環境上の制約条件や研究・開発に対するコンプライアンスは一段と厳しくなっている。このような社会変化のなかで時代の要請に応えるために、当社の地下、基礎、地盤の研究・開発は、真摯に現象と向き合い、正しい工学的判断のもとでの取り組みが期待されている。

<参考文献>

- 1) 井上嘉信, 小粥庸夫: 負の摩擦力による建物の不同沈下の経過とその考察, 清水建設研究所報, 第22号, pp.17-38, 1974
- 2) 井上嘉信, 小林幸男, 玉置克之: 杭に働く負の摩擦力の性状に関する考察, 清水建設研究所報, 第24号, pp.21-36, 1975
- 3) 玉置克之, 桂豊, 岸田了: 掘削および構築時の支持地盤のヤング係数の変化, 日本建築学会構造系論文報告集, 第446号, pp.73-80, 1993
- 4) Nishio, S. and Tamaoki, K.: Measurement of Shear Wave Velocities in Diluvial Gravel Samples under Triaxial Conditions, Soils and Foundations, Vol.28, No.2, pp.35-48, 1988
- 5) 堀田洋之, 中西啓二, 桂豊, 浅香美治, 西川裕: 加藤博巳: 山王パークタワー建設工事におけるリバウンド・沈下現象, 清水建設研究所報, 第72号, pp.9-20, 2000
- 6) 桂豊, 三田地利之: 山留め施工過程を考慮した室内試験による洪積砂地盤の土圧係数の検討, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.51-58, 1999
- 7) 内山伸, 桂豊, 嘉門雅史: 山留め変形抑制に用いる控え壁型地盤改良の概念とその効果, 土木学会論文集, No.624/III-47, pp.91-100, 1999
- 8) 石川明, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 社本康広: 複合地盤マルチスケール解析法の実験による検証と原位置問題への適用, 土木学会論文集C, Vol.66, No.2, pp.332-341, 2010
- 9) 浅香美治, 安部透, 桂豊, 杉本裕志, 辰己佳裕: ベンダーエレメントを用いたせん断波速度測定によるセメント系改良地盤の非破壊検査方法, 日本建築学会構造系論文集, 612号, pp.103-110, 2007
- 10) 大槻明, 福武毅芳, 藤川智, 佐藤正義: 液状化時群杭挙動の三次元有効応力解析, 土木学会論文集, No.495/I-28, pp.101-110, 1994
- 11) 福武毅芳, 松岡元: 任意方向繰返し単純せん断における応力・ひずみ関係, 土木学会論文集, No.463/III-22, pp.75-84, 1993
- 12) 福武毅芳, 長谷場良二, 山口弘信, 竹脇尚信, 吉原 進: 西田橋基礎の地震応答シミュレーション—沖積地盤上の石造アーチ橋の移設計画—, 第18回土木史研究発表会, pp.395-410, 1998
- 13) Shamoto, Y., J.M.Zhang and S.Goto: Mechanism of Large post-liquefaction deformation in saturated sand, Soils and Foundations, Vol.37, No.2, pp.71-80, 1997
- 14) Shamoto, Y., J.M.Zhang and K.Tokimatsu: Methods for predicting residual post-liquefaction ground settlements and horizontal displacement, Special Issue of Soils and Foundations, pp.69-83, 1998
- 15) 真野英之, 社本康広, 石川明, 吉成勝美: 構造物外周直下の礫置換による小規模構造物の液状化被害低減対策, 日本地震工学会論文集, 第16巻, 第1号(特集号), pp.59-69, 2016
- 16) H. Kawasaki, S. Horiuchi, M. Akatsuka, S. Sano.: Fly - Ash Slurry Island: II. Construction in Hakucho Ohashi Project, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.4, No.2, 1992
- 17) 浅田素之, 村田博一, 川口正人, 栃山広幸: エージング石炭灰を用いたリサイクル材としての力学特性, 清水建設研究所報, 第95号, pp.93-102, 2018