

サステナブルな生活環境整備のための地下環境における課題

Geo-Environmental Issues for Sustainable Development

小長井 一 男*

Kazuo KONAGAI

1. は じ め に

バブルの最中、大規模かつ大深度の地下空間の開発が注目を集めるようになった背景には、昭和61～62年ごろから始まった急激な地価高騰がある。また次第に重層化されていった都心の地下交通網の整備に対応すべく、深度30m～40mの地下駅の建設などが相次ぎ、地下空間構築の新技術が蓄積されていったことも、このような議論の前提となってきた。図1¹⁾は飯田橋の地下空間のイラストである。新たに建設されている都営地下鉄12号線は地下30～40mの位置にあり、この複雑に入り組んだ路線をつなぐ駅の工事を行うために、最も浅い所を走る東西線の箱型断面のトンネルは一時的に砂層から掘り出され、剥き出しになった。

－40～－50mを越える、東京でいえば東京礫層より深い、いわゆる大深度の地下開発はまだ未踏の領域で、それなりに重要な環境問題が顕在化してくるであろうが、ここではこれまで地下開発の進んできた沖積層内の地下の問題について“耐震環境”などに直接、間接に関わる問題に絞って論ずることとする。

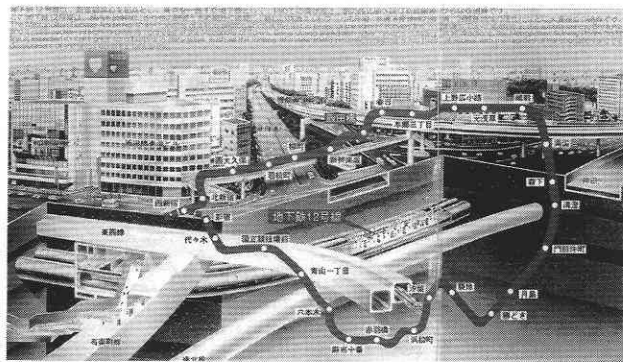


図1 飯田橋地下で輻輳するトンネル¹⁾

2. 過剰揚水と地盤沈下

図1のトンネル群が輻輳する飯田橋の地盤は江戸川砂層と東京層からなる。粒の揃った黄褐色の砂が主体である。これらの砂の乾燥比重は1.6程度になる。砂粒子そのものの比重は2.5程度あることから、これは砂の全体積の実に40%におよぶ間隙があり、この砂が地下水面下にある場合にはこの空隙がたっぷりと水を貯えることを意味している。東京の沖積平地には有楽町層と呼ばれる砂を主体とした透水性が良い堆積層があり、またこれらの層の下に多くの建設工事での支持基盤とされる東京礫層を挟んで、江戸川層が広がっていて、これらはいずれも東京の良質で豊富な地下水の“貯槽”であった。「であった」と過去形を用いたのは、第2次世界大戦後、経済の復興（神武景気など）とともに工場地帯での地下水利用量が増大し、過剰揚水により地下水位が大幅に低下した経緯があるからである。地下水位の低下はこれらの沖積層に挟在する粘土の圧密を促し、このため大正時代から問題になっていた地盤沈下がより顕著でかつ深刻な形で再発することになった。かつて地下水頭の低い地帯の中心は東京下町低地から埼玉県川口市にかけての地域で－60mに達したこともある。1971年以降、東京・神奈川東部・千葉湾岸部・埼玉南部では地下水の汲み上げが厳しく規制されるようになり、水頭が回復し地盤沈下も弱まってきた。地下水位が1m上昇すれば1m²あたり約1tfの荷重が除荷されるので、これによって地盤が弾性的反発で若干上昇（膨張）することもある。しかしながら地盤沈下の主たる変形は粘性土の非可逆的な圧密（塑性変形）によるもので、地下水頭が回復したとしても、ほとんど回復が不可能である。また複雑に地下に広がる地下空間の建設やその後の漏水で失われる地下水も適切な対応がなされないと地下水頭の回復をさらに遅延させる原因になる。注意深く施工されたトンネルでも平均漏水量は1日1kmあたりに換算すると84m³になるという調査もある²⁾。東京近郊で地下水の汲み上げが規制される一方で、

*東京大学生産技術研究所 第1部

埼玉, 栃木, 群馬, 茨城, 千葉の5県58市町村の年間揚水量は8~9億 m^3 にも達し, 地盤沈下や地下水頭の低い地域は次第に関東平野の北部に移っている(図2³⁾). こうして沈下した地盤は関東平野で5000 km^2 に広がり, 防災上の負の遺産として子々孫々に引き継がれていく.

3. 地盤沈下と地震被害

地盤の沈下は東京湾岸部のゼロメートル地帯のように, 地震や都市洪水時の広域冠水という災害の危険度を高めている. そのうえ不透水層の下に封じ込まれた被圧地下水が過剰にくみ上げられた場合には, 地表面の沈下は不透水層の上に存在する不圧地下水の水位を結果として沈下した地表に近づくことになり, 液状化の危険性も増加する. 液状化が発生すれば常時では沈下しない砂地盤まで大きく沈下するので地表面はさらに低くなる. 図3a, 3bは北海道南西沖地震で被害を受けた長万部町中の沢小学校の校舎の杭基礎に発生したせん断クラックである^{4,5)}. 液状化による地盤の沈下で杭が突出し, 支えを失った杭が上部構造物を載せたまま大きく揺すられた結果と思われる. この杭の突出は地震前からある程度進行していた可能性もある. このように地盤の沈下は, 上部構造物に比べてたわみやすい杭基礎を地上に突出させる. 本来この部分にあった土から期待できる水平方向剛性は, 基礎の半径に大きく依存せず, 深さ1mあたり土のせん断弾性係数のおよそ6倍になる. 杭が突出した分だけ, この土からの反力が期待できなくなり, 上部構造物の揺れは設計時の想定とは大きく異なることになる. かりに杭の突出が外から確認できなくても,

杭基礎頂部を覆うコンクリートフーチング基礎の下に隠れた空洞に杭が突出していることもある.

図4はTLEM (Konagai^{6,7)}, 1998) という相互作用解析プ



(a) 中ノ沢小学校校舎周辺の地盤の沈下状況



(b) 基礎杭の破壊

図3 中ノ沢小学校校舎周辺の地盤沈下と基礎杭の破壊状況
(写真撮影: 東京大学生産技術研究所中埜良昭助教授)

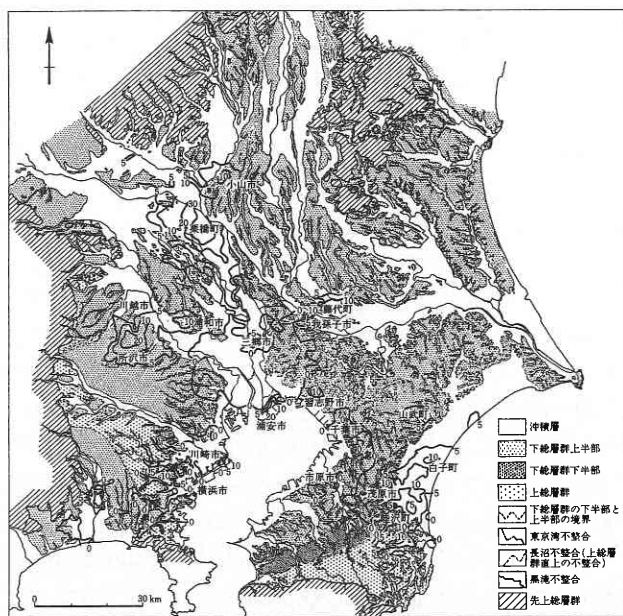


図2 南関東地方の地盤沈下累計分布
(1978年1月1日~1983年1月1日, 関東地方公害対策推進本部地盤沈下分科会資料)

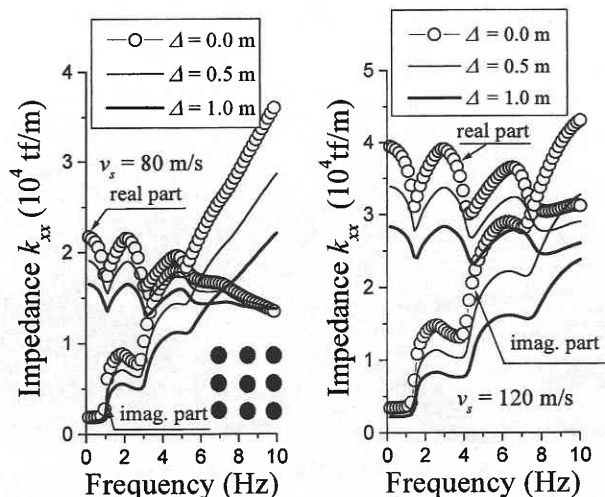
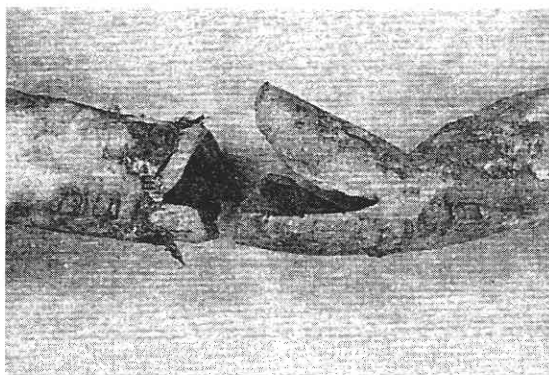


図4 3×3鋼管杭基礎上部の水平方向剛性の周波数依存性



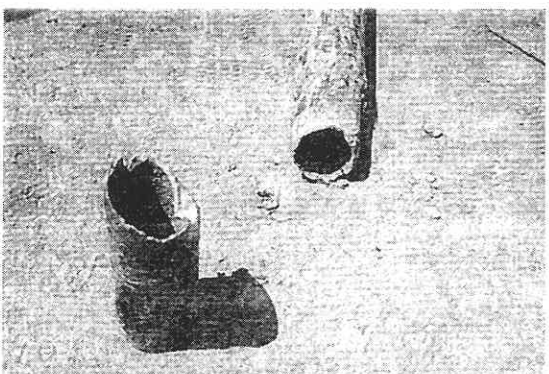
(c) 破断し、食い込み合い、座屈変形した鋼管



(d) 座屈した上引き裂けた鋼管



(e) 破断した上、互いに食い込んだ鋼管溶接部



(f) 互いにぶつかり合った痕跡を残す鋼管（溶接部）の破断面

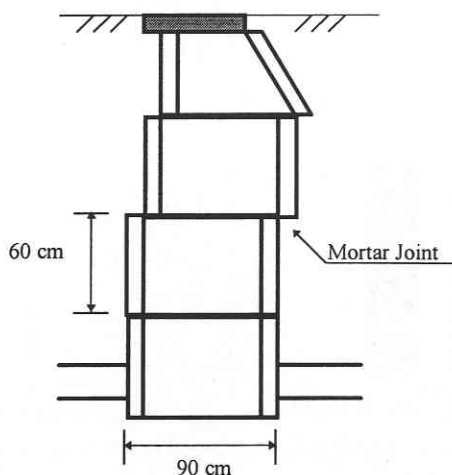
図5 日本海中部地震における埋設管被害の様相（西尾）

ログラムで得られた群杭（鋼管杭）基礎頂部の水平方向剛性の周波数依存性を示したものである。50～100 cm の杭の突出があったものとする、その静的な剛性は図に示すように 80～70%，また剛性の虚数部が示す減衰も 60% 程度までに減少する。

杭基礎から吊り下がっている地盤は杭に下向きの力を加える（negative skin friction）ことも忘れてはいけない問題である。杭は上部構造物の自重に加えてぶら下がる土の重みも支えているのである。このような沈下などによる常時からの力は杭などの地中の構造部材に限らず、ガス、水道、電気、通信など様々な埋設管にも作用する。地盤の変形は地表に近いほど大きいので、地表に近い管路ほどより大きな地盤の変形に引きずられ、かりに伸縮継手や可撓性継ぎ手が使われていても、これらは吸収し尽くせる変位をこえて目いっぱい引っ張られ、常時から切断や引き抜けなどの被害が現れることもある。地表部分はこの沈下による変形が最も顕著に現れるのみならず、地震による動きも地中深くに比べて大きく増幅される。このため、これらの構造については静的にかなりの力が加わった状態での動的挙動を検討する必要がある。

図5は日本海中部地震での埋設ガスの被害である。西尾⁸⁾はこれらのガス管が継ぎ手部で一旦引きちぎられた後、再び衝突して食い込んだ痕跡に着目し、地表面付近でかなり大きな振動変位が現れたと推測している。

兵庫県南部地震によるマンホールの被害は、地表面の振動の激しさを示唆する事例と考えられる^{9,10)}。典型的なマンホールは図6に示すように直径 90 cm、高さ 60 cm のコンクリートのリングを接合面にモルタルを塗って鉛直に積み上げただけのものである。したがって地盤の変形に容易に追従し、その結果、地盤の残留変形は接合面のずれとして残される。図7は東灘区の住吉川付近の新天井川下水幹線添いのマンホールリングのずれの生じた深さとその程

図6 マンホールの構造^{9,10)}

度,そして代表的な地質柱状図を併記したものである。ずれの生じた深さは60 cmのものが圧倒的に多い,これは表面の舗装の影響もあるものの80 cm以下は礫層で,変形がその上の砂層に集中したためと考えられる。常時の地下水面は礫層上面に一致し,したがって降雨がなかった地震時には大きな変形は地下水面以上で生じたものと推察される。

図8は横倒しになった阪神高速道路の近く(深江地区)のマンホールリングのずれの生じた深さとその程度,そして地質柱状図を併記したものである。ずれの生じた深さは地表から2リングめ,120 cmのものが圧倒的に多い。ここには10~30 cmほどの厚さの砂層が挟在しており,この部分が大きく変形したものと推測される。この砂層も常時の地下水面より上に位置していることは留意すべきことである。この深さでのマンホールのずれは最大45 cmにも達するが,この薄い砂層がこれだけせん断されたとなると,地上と地下を結ぶ都市のライフラインの機能損失に直接関わる深刻な問題となる。

4. さらに複合した災害

埋設管路が破断するとガスの漏出や地下水の汚染が起こる。ガスの漏出はこれが地下空間に充満すると,かつて静岡のゴールデン地下街で起こったガス爆発のような惨事に

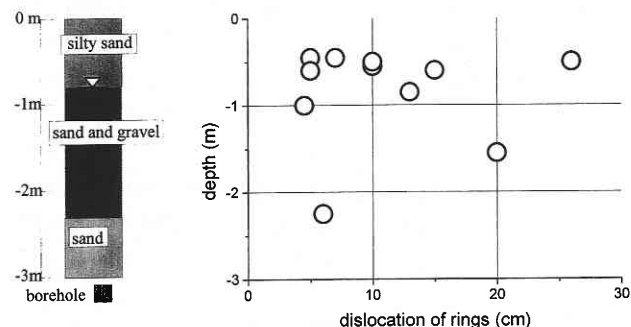


図7 マンホールのリングにずれが生じた深さ(右)と地質柱状図(左)^{9,10)}
(新天井川雨水幹線)

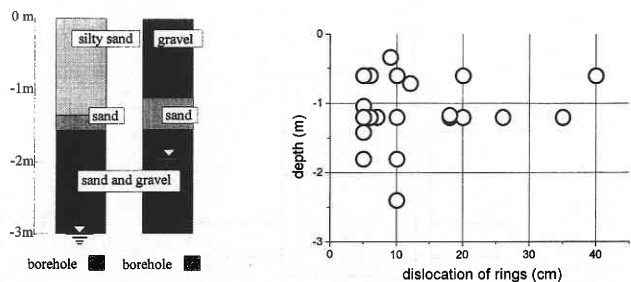


図8 マンホールのリングにずれが生じた深さ(右)と地質柱状図(左)^{9,10)}
(東灘区深江)

繋がる。ロマプリータ地震¹¹⁾では潟(lagoon)を埋め立てて造成されたマリナー地区で火災が発生した。液状化に伴う地盤の不等沈下で12インチの高圧ガス管が破断し可燃物が発生したこと,1920年代に建てられた1階部にガレージを持つ木造家屋の倒壊,これに加えて消防水利の機能停止が被害を大きくした。地下管路の破損により通常の給水システムのみならず消防専用の高圧補助給水システム(Auxiliary Water Supply System)までが機能しなくなってしまったからである。それでも火災が数平方ブロックにひろがる大火にならなかったのは,消防艇とこれをつなぐ携帯式の消火ポンプが重層化(冗長化)された水の供給システムの一つとして機能しえたからであり,徹底したリダンダンシーの考え方を垣間見ることができる。

5. ま と め

地盤は土粒子のみならず,その中で比較的大きな体積を占める間隙に貯えられた水から成っている。都市化した地域に必要な水はまず手近な足元の地盤深層の帯水層に求められ,その結果広域で地盤沈下が進行した。深層の被圧地下水の水頭が低下した一方で,浅層の不圧地下水面は地盤の沈下のためかえって地表面に近づき,液状化の危険性を増すことにも繋がった。基礎は地盤から突出し上部構造はさらに揺れやすくなり,加えて都市のライフラインたる埋設管路も破断の危険にさらされている。広域冠水に備え堤防の嵩上げや水門の建設も必要である。つい先日の高知の水害で猛毒の青酸ナトリウムが大量に流れ出したというニュースも脳裏をかすめる。こうした高い代価を払いながら,それは地下水の値段には跳ね返ってこない。そして公共支出という地域住民には切迫感の伴わない形で財政を圧迫している。

(1998年10月1日受理)

参 考 文 献

- 1) 地下鉄12号線環状部飯田橋駅(仮称)工区建設工事,東京都地下鉄建設株式会社,1998.
- 2) 陶野郁雄:大深度地下開発と地下環境,表6-3昭和63年の地下鉄トンネル内の漏水量(帝都高速度交通営団資料に基づく),p.161,鹿島出版会,1990.
- 3) 大森,端山,堀口:関東地方,日本の地質3,図5.8南関東地方の地盤沈下累計分布(1978年1月1日~1983年1月1日,関東地方公害対策推進本部地盤沈下分科会資料),p.252,1991.
- 4) 小長井,三神,片桐:1993年北海道南西沖地震被害調査速報,小長井研究室,pp.19-21,1993.
- 5) 1993年北海道南西沖地震災害調査報告,日本建築学会,1994.
- 6) Konagai, K.: Guide to "TLEM", program manual No. 5, Konagai Lab., IIS, Univ. of Tokyo, June, 1998.
- 7) Konagai, K.: An Upright Single Beam Equivalent to Grouped Piles,生産研究,50(9),pp.13-16,1998.

- 8) 西尾宣明：埋設管の地震被害率予測法に関する研究，東北大学学位論文，1989.
- 9) Konagai, K. T. Matsushima and A. Mikami: Deformation build up within a granular assemblage during an intense earthquake, *International Journal of Earthquake Engineering*, 2(3), 419-441, 1998.
- 10) Konagai, K. X., Luo and A. Nishimura: Displacements Built up in Soils in Recent Intense Earthquakes, *Proc., 2nd JapanUK Workshop on Implication of Recent Earthquakes on Seismic Risk*, Ferrite Hall, Tokyo Institute of Technology, Japan, April. 6-8, 1998.
- 11) 小林：サンフランシスコ市の地震火災とその都市の安全設計の歴史，「1989年ロマプリエタ地震によるサンフランシスコ湾岸地域の被害に関する調査研究」，文部省科学研究費（No. 01102044）総合研究（A）突発災害研究成果重点領域「自然災害」総合研究班，No. B-1-3，研究代表者 亀田弘行，1990.