

地盤事故災害における法地盤工学の貢献

岩崎好規⁽¹⁾・三村衛⁽²⁾

(1) 一般財団法人 地域地盤環境研究所

(2) 京都大学大学院工学研究科

要 旨

本稿は、京大防災研究所によって採択され、2011年に設立された一般共同研究プログラム“地盤事故災害における法地盤工学研究会”(委員長 岩崎好規・幹事長 三村衛)の活動を報告するものである。研究会では、既往の事例を収集・整理し、問題点の指摘や今後のあり方を考究し、災害や事故の分析と事故防止・紛争改善のための現状の整理と提言を行うことを、目的としている。2011年度においては、2011年7月に法地盤工学国際シンポジウムを開催し、さらに、2012年1月に法地盤工学ワークショップを開催した。

キーワード：法地盤工学，現場観測工法，建築紛争

1. はじめに

建築建屋の不具合や、土木系崩壊事故に伴う紛争は、医事紛争と同様に、裁判官や弁護士だけでは、その解決が困難であるため、専門家の支援が求められている。地盤工学系専門家も、鑑定人や調停委員となって問題解決に努力している。ここでは、京大防災研究所によって採択され、2011年に設立された一般共同研究プログラム“地盤事故災害における法地盤工学研究会”(委員長 岩崎好規・幹事長 三村衛)の活動を報告する。研究会では、既往の事例を収集・整理し、問題点の指摘や今後のあり方を考究し、災害や事故の分析と事故防止・紛争改善のための現状の整理と提言を行うことを、目的としている。

2. 国際法地盤工学シンポジウム

平成 23 年 7 月、国際地盤工学会技術委員会である TC302 Forensic Geotechnical Engineering との共催で、国際シンポジウムを開催した。ここでは、遠心力載荷試験による香港の斜面崩壊機構の解明(ボルトン教授(英国ケンブリッジ大学))、シンガポールにおける地下鉄事故(石原研而(中央大学)、岩崎好規(地盤研)、リチャード・ホワン(台湾))、

ヴェトナムにおけるカントー橋事故(塩井幸武(八戸工業大学名誉教授))、問題となる特殊軟弱地盤の特性把握(浅岡顕名古屋大学名誉教授)などに象徴されているが、①現場における特殊地盤特性の把握、②現場観測工法の適用が、地盤崩壊事故回避のための重要な要素であることが指摘された。

これらの発表の中で興味深い指摘のあった事故などについて次に示す。

2.1 遠心力載荷試験による香港の斜面崩壊の解明 (Prof.M.Bolton, Cambridge Univ., U.K.)



Fig. 1 Sau Mau Ping slope failure: view behind Block 9 (Bolton, 2011)

香港で1976年8月25日に多発した豪雨斜面崩壊は、その後香港政庁地盤工学事務所 (Hong Kong Government Geotechnical Engineering Office (GEO)) が開設される直接的原因となったものであるが、盛土斜面の崩壊機構は豪雨による湿潤前線が斜面内に形成され、静的液状化によって崩壊すると推定されて、長らく定説となっていた。その典型例であるサウマウピン斜面崩壊をFig.1に示した。事故後15年の2002年香港政庁の地盤技師がケンブリッジ大学の遠心載荷装置で強風化マサ土で急斜面盛土の模型を作って試験したところ、降雨によって水締めで密度が増加したが、斜面崩壊は発生しなかった。

そこで次年度、Fig.2に示したような風化花崗岩斜面の表層部の透水層とその上に盛土層という層構造モデルで再挑戦した。

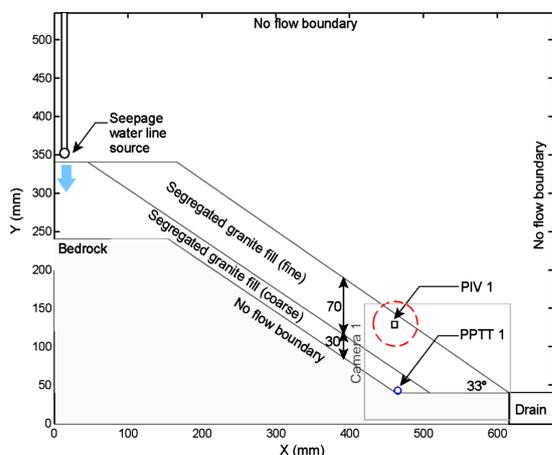


Fig. 2 Model of fill slope with interior drainage layer (Wong, 2003)

このモデルでは、斜面の下端部が盛土で被覆されていて、豪雨による伏水流が透水層を流下するが、直ちに斜面外に流出することはなく、過剰間隙水圧が形成されていき、一気に斜面下端部からの崩壊が見られた。

Fig.3にこの実験によって得られた斜面先端部分の地盤の動きを、PIV(Particle Image Velocimetry:粒子画像流速測定法)によって計測し、求められた変位ベクトルを示した。

この知見を基礎にして、豪雨時の斜面安定のために斜面下端部における排水能の向上のための構造を付加すべきことが追加されたのである。

このような遠心載荷実験による地盤工学事例検討は、伊藤和也によってもアースアンカーによる土留め崩壊の解析が報告されている。

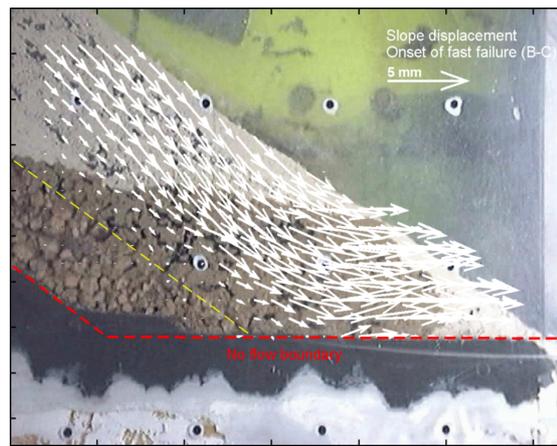


Fig. 3 Trapped water initiates slope failure in loose fill, viewed using PIV (Take et al, 2004)

2.2 シンガポールニコール高速道路崩壊事例

本崩壊は、2004年4月20日シンガポールの地下鉄開削工事において、土留め壁の崩壊が発生し、工事場所に近接していたニコール高速道路が崩壊し、死者3名が犠牲となった事故である。

本件事故については、3つの論文が提出され、2人の発表があった。

地下鉄掘削箇所の地盤は、地表から約35m程度まで沖積層があり、層厚30m程度の標準貫入試験N=0の軟弱粘土層を含んでいる。

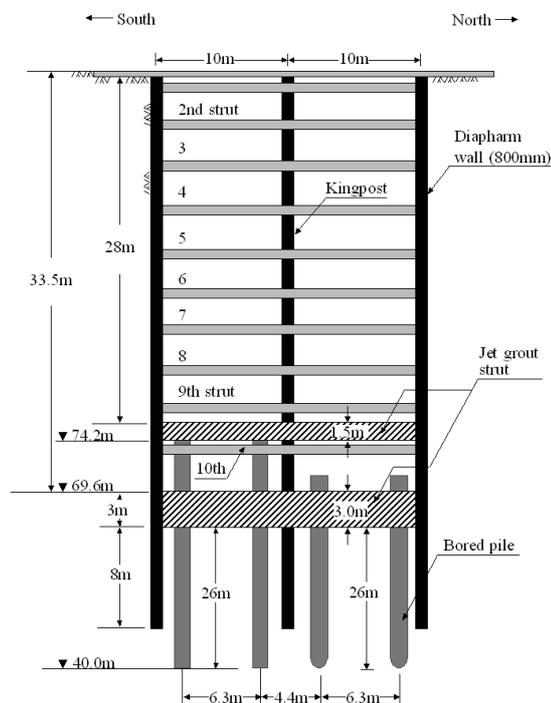


Fig. 4 A typical side view of the strutted system for the A-A' cross section

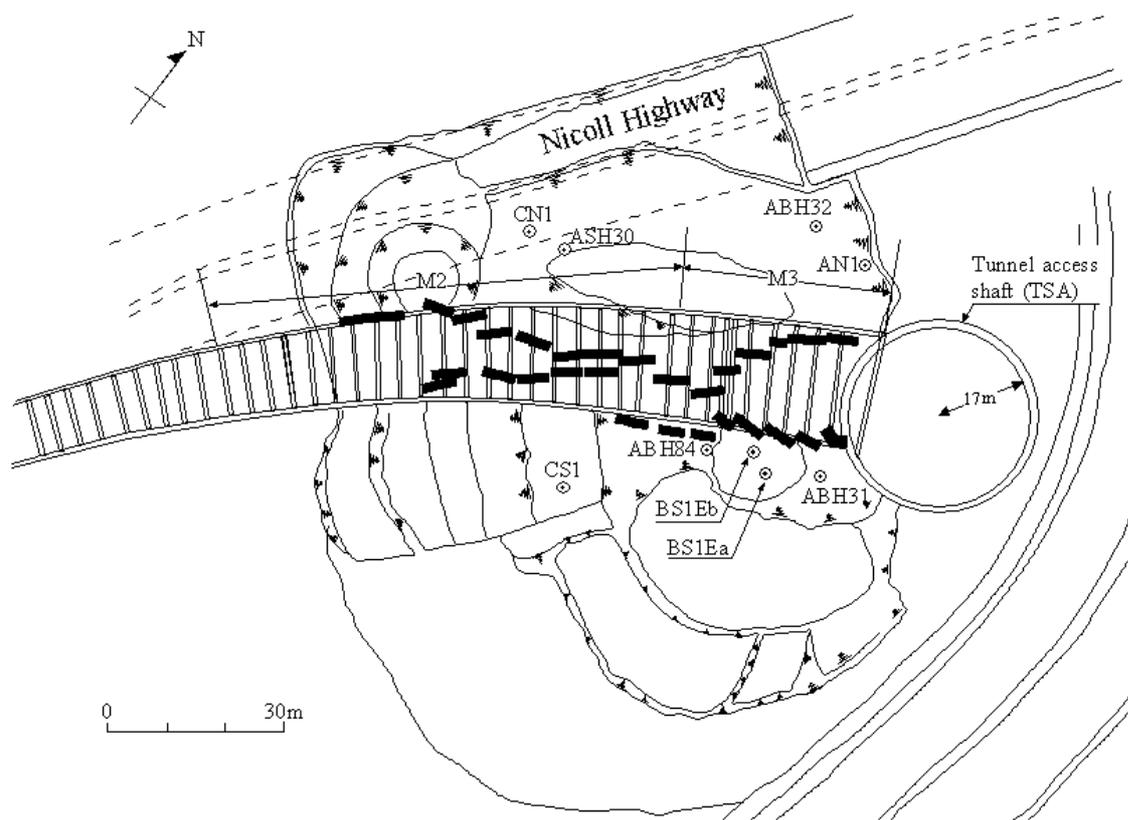


Fig.5 Plan view of the area of the failure and braced wall system.

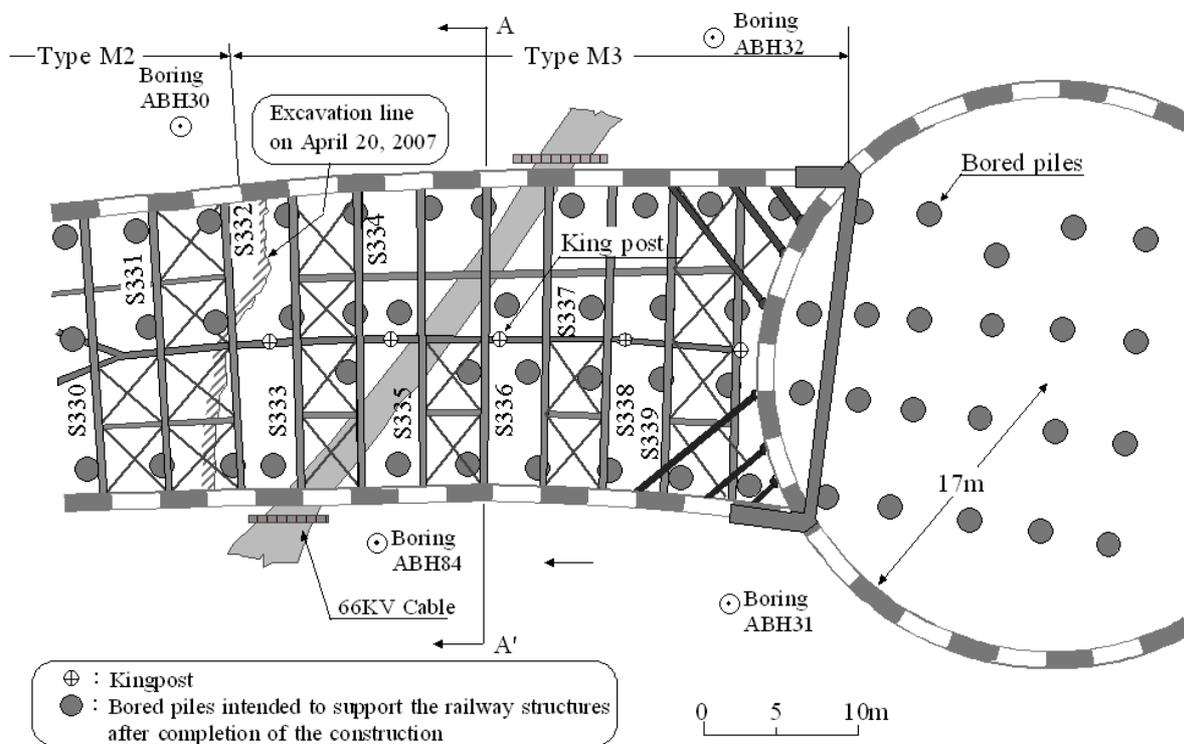


Fig. 6 Plan view of the Type M3 section due west of the access shaft

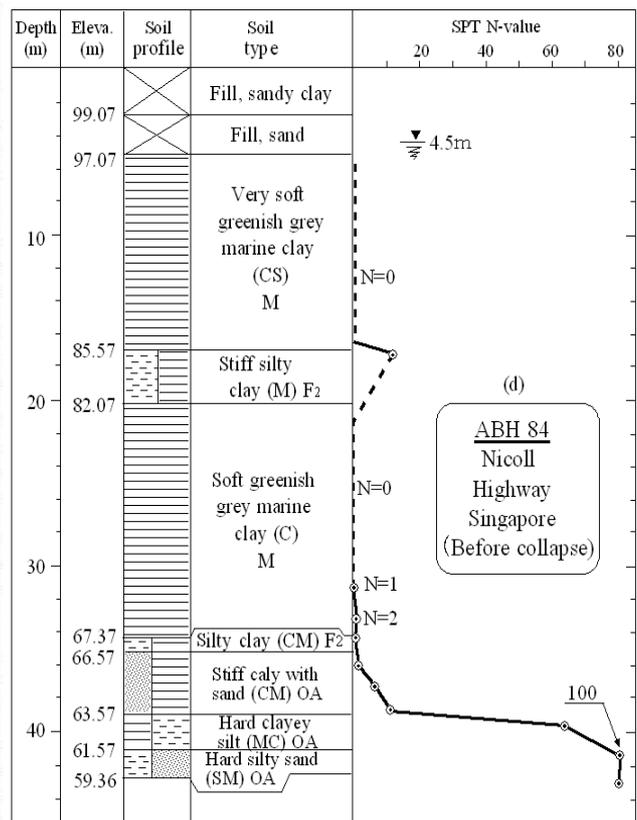
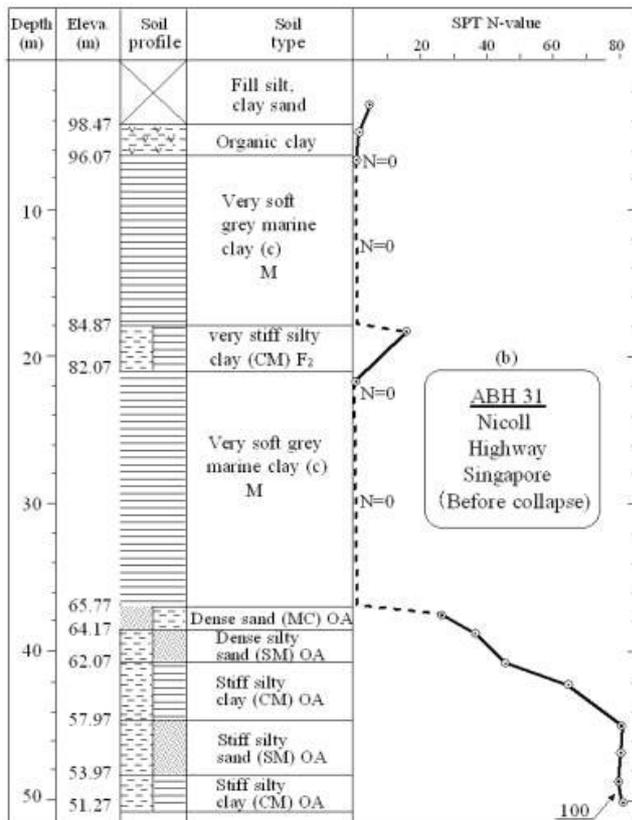
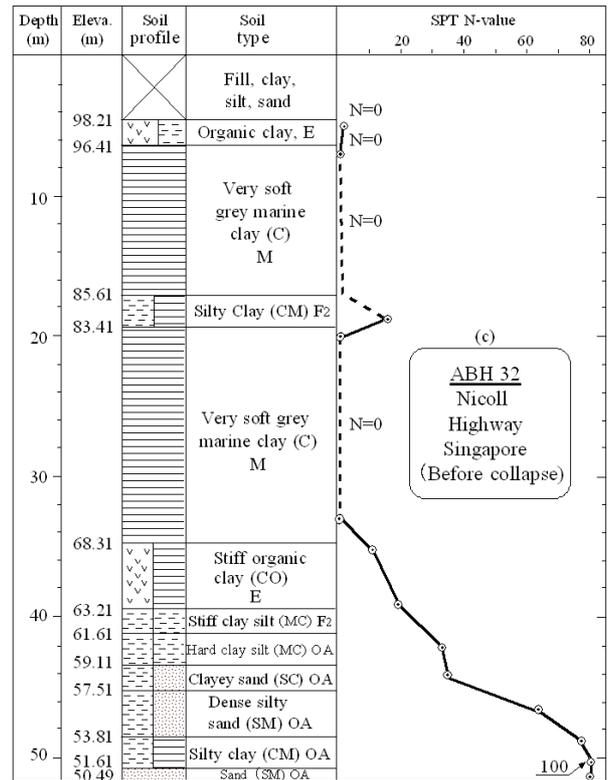
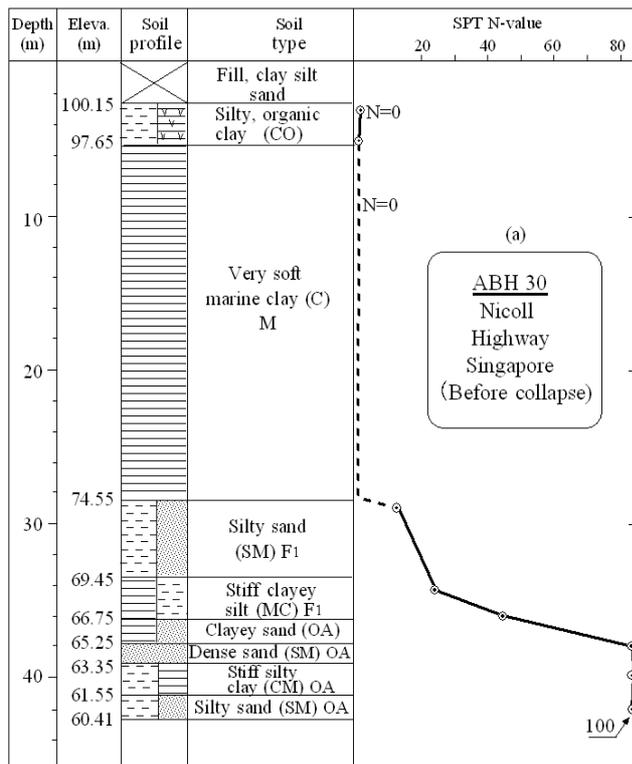


Fig. 7 Soil profiles at the sites near the excavation obtained before the collapse

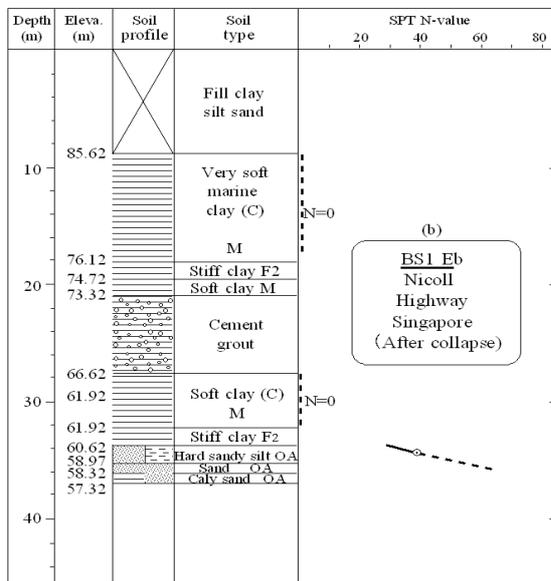
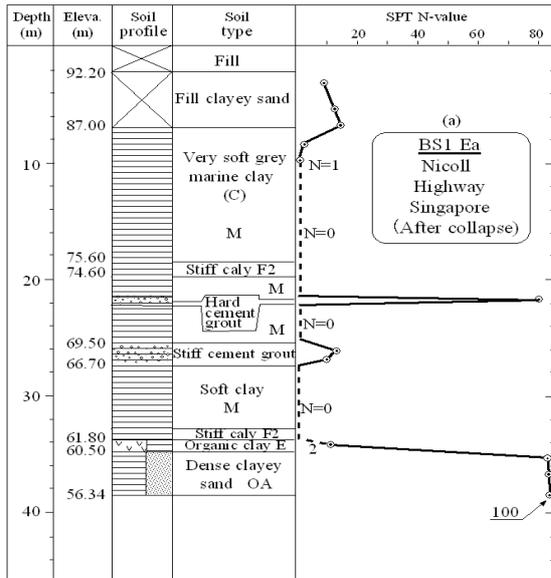


Fig. 8 Soil profiles just south of the collapsed diaphragm wall panels 8

施工断面をFig.4(Ishihara, 2011)に示し、地下鉄およびニコル高速道路の平面図をFig.5およびFig.6(Ishihara, 2011)に示した。土留め壁の崩壊は、M2およびM3工区の境界付近で発生した。Fig.4の施工断面は、TypeM3工区の標準断面で、10段切梁、掘削深さ33.5mであり、掘削前に、ジェットグラウトパイル工(JGP)により土中梁を2段に設置した。設計に使用された土質ボーリングはFig.7(Ishihara, 2011)に示した。これらのボーリング結果からさらに軟弱層の基底深度図をFig.8(Ishihara, 2011)に示した。

土留め壁の崩壊後、現場で地表面に露出している

状況は、把握されたが、事故原因の究明のための掘削などは実施されなかったが、崩壊後の状況を把握し、原因を探索するために、新たな土質ボーリングが土留め壁の南北背面側で実施され、ボーリング位置はFig.11(Ishihara, 2011)の平面図に示した。

さらに、磁力検層を北側では掘削背面位置から2m、南側では掘削背面位置から3m付近で、土留め壁に沿って2mピッチで実施された。磁力検層では磁性を有する材料、すなわち、腹起し、切梁、土留め壁などの鉄製材料の位置を探査し、Fig.12に崩壊による推定地盤変位を示した。

地盤状況は、Fig.7やFig.8の土質柱状図に示されているが、表土の下には、N=0を示す超軟弱海成粘土層(M層)が30-40mの層厚で存在している。その下位に古期沖積層(Old Alluvium)に属するOA層が土留め壁の支持地盤となっている。

Fig.9に設計時に想定されていたOA層の出現深度を示し、Fig.10に崩壊後の地盤調査にもとづく深度を示した。Strut 337~338付近の深度をみると、設計時の想定では+65~66mであるのに対して、崩壊後の調査結果では+60~61mと出現深度は約5mほど深くなっていることが分かる。

このOA層の上端レベルの設計時と崩壊後の深さを土留め壁の南側に沿ってFig.13(Ishihara, 2011)に比較して示してある。同図に併示してある土留め壁の下端深度とを比べると、M310~M306の間においては土留め壁下端とOA上端レベルがほぼ一致していて、土留め壁の根入れ深度がないことが分かる。

Ishihara(2011)は、地形的に溺れ谷になっているような箇所における精密な事前調査の必要性を強調した。

Iwasaki(2011)は、現場観測工法の観点から、事故に至る経緯を振り返っている。

本施工現場においては、多くの観測計器が設置されていて、崩壊域周辺においても、連続傾斜計や間隙水圧計が設置されていた。にそれらの設置位置をFig.14に示した。この図では、連続傾斜計I65(掘削北側)、I104(掘削南側)、沈下計L111、間隙水圧計(北側、掘削背面および掘削側)が示されている。

この工区の掘削は、2003年9月から開始され、連続傾斜計による土留め壁の水平変位の経時変化をFig.15およびFig.16に示した。

2003年10月から2004年2月末までに、掘削は5段目に入っているが、水平変位量は、設計許容値である $\delta=150\text{mm}$ に到達している。6段および7段掘削以降においては、北側の水平変位と南側の水平変位に大きな差が表れて、南側では崩壊の近い4月中旬においては $\delta=400\text{mm}$ に達していることが知られる。

南側の最大水平変位が増大するに従って、許容値も引き上げられた。

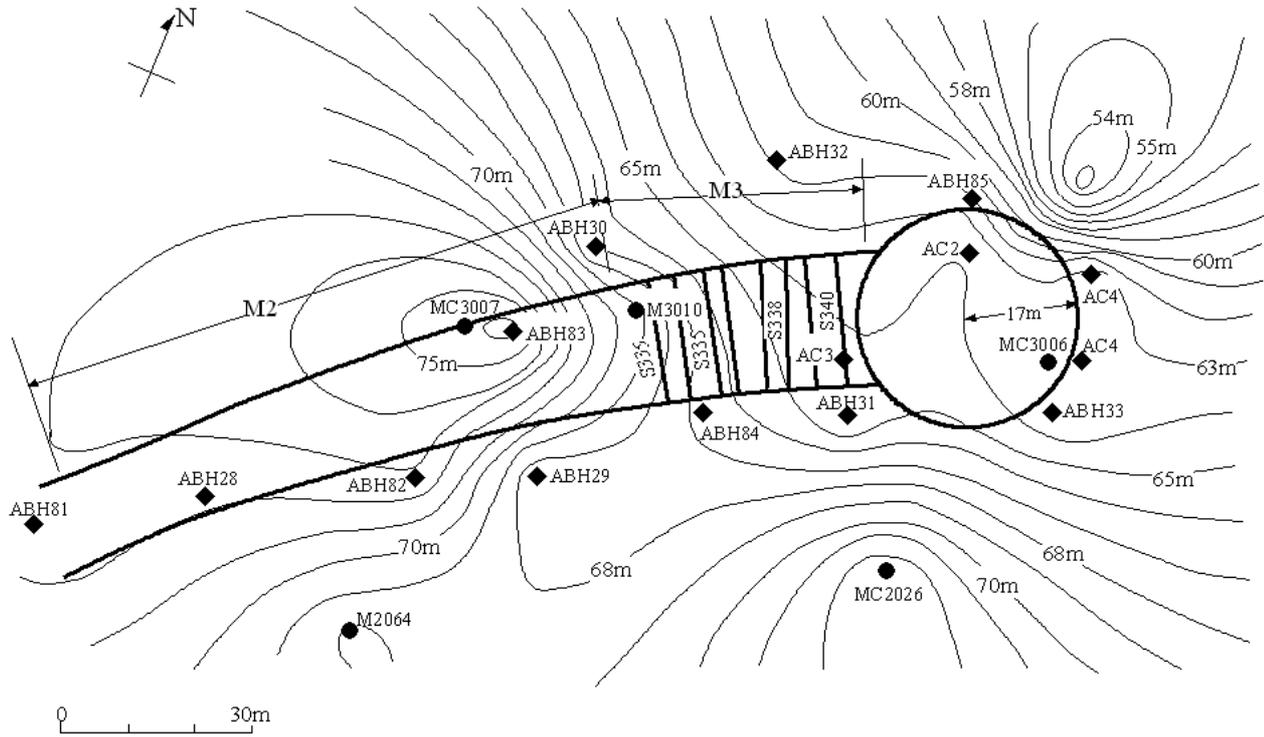


Fig.9 Contours of elevation at the top of the old alluvium (OA-layer) based on boring data at the design stage

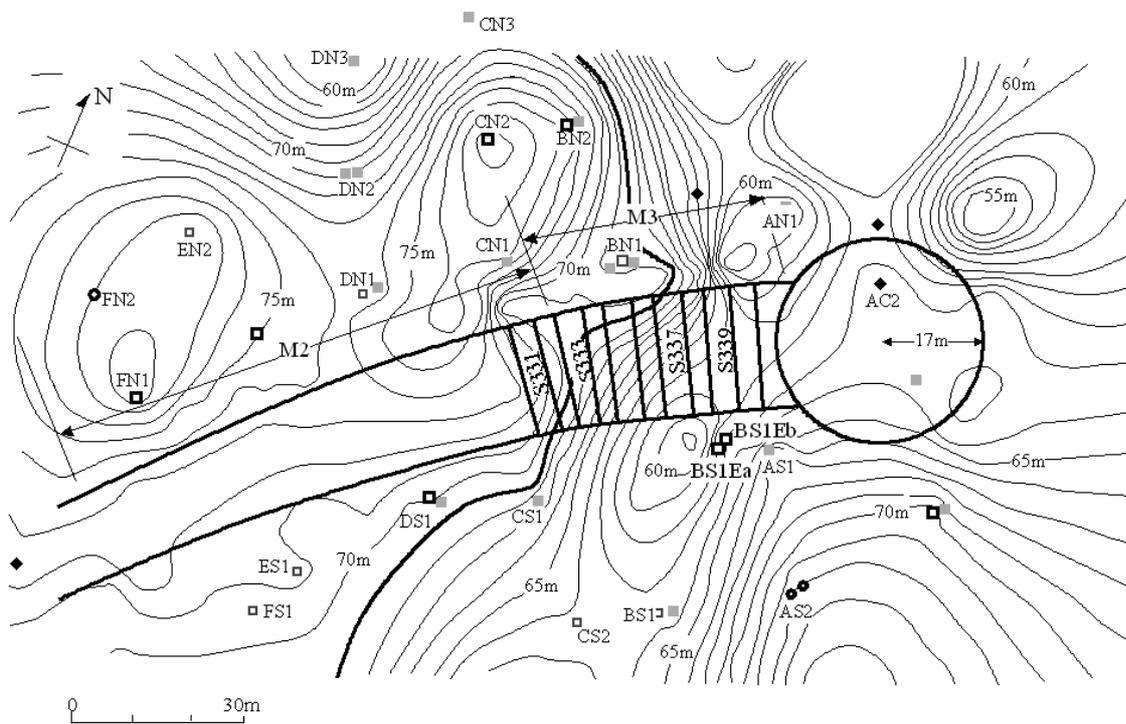


Fig.10 Counter of elevation at the top of the old alluvium (OA-layer) based on boring data after the collapse

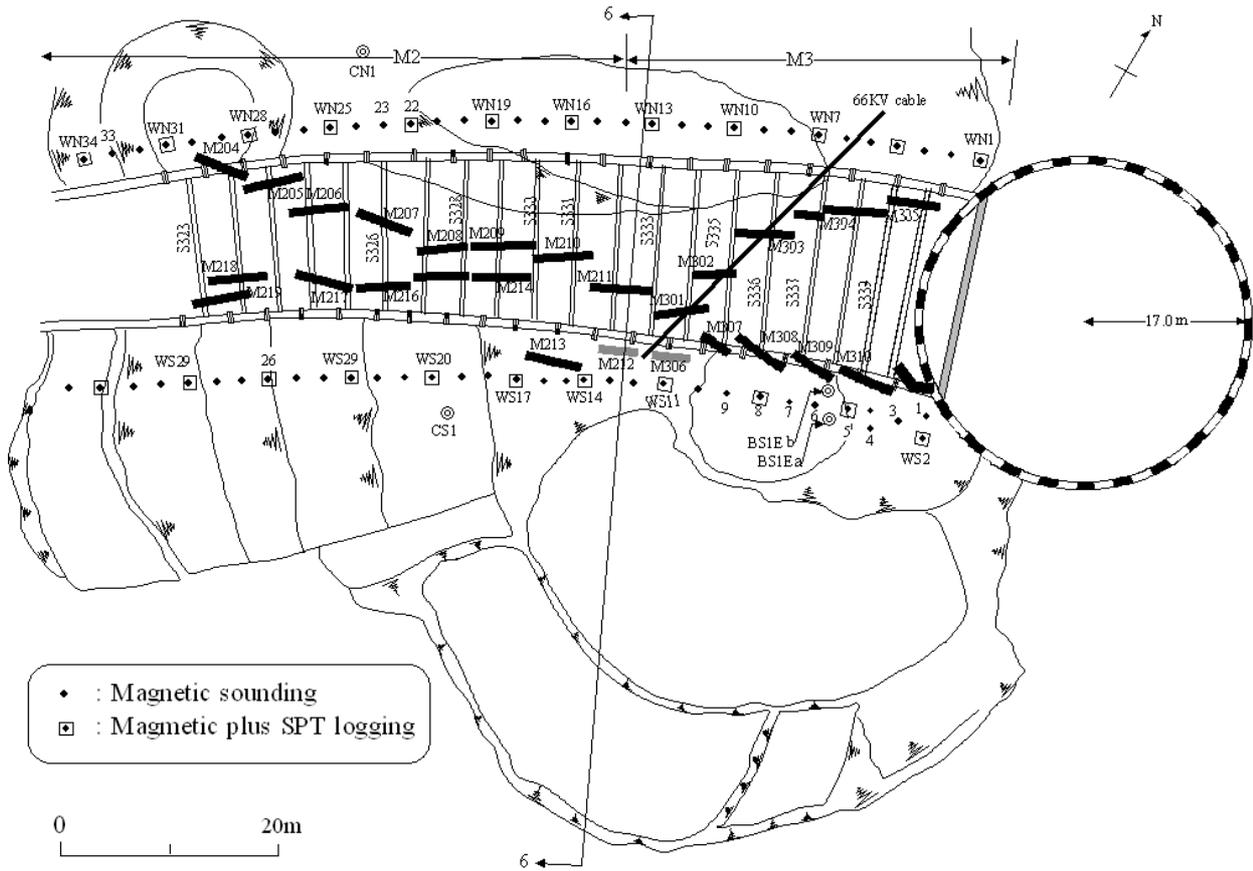


Fig.11 Locations of the magnetic sounding and boring conducted after the collapse

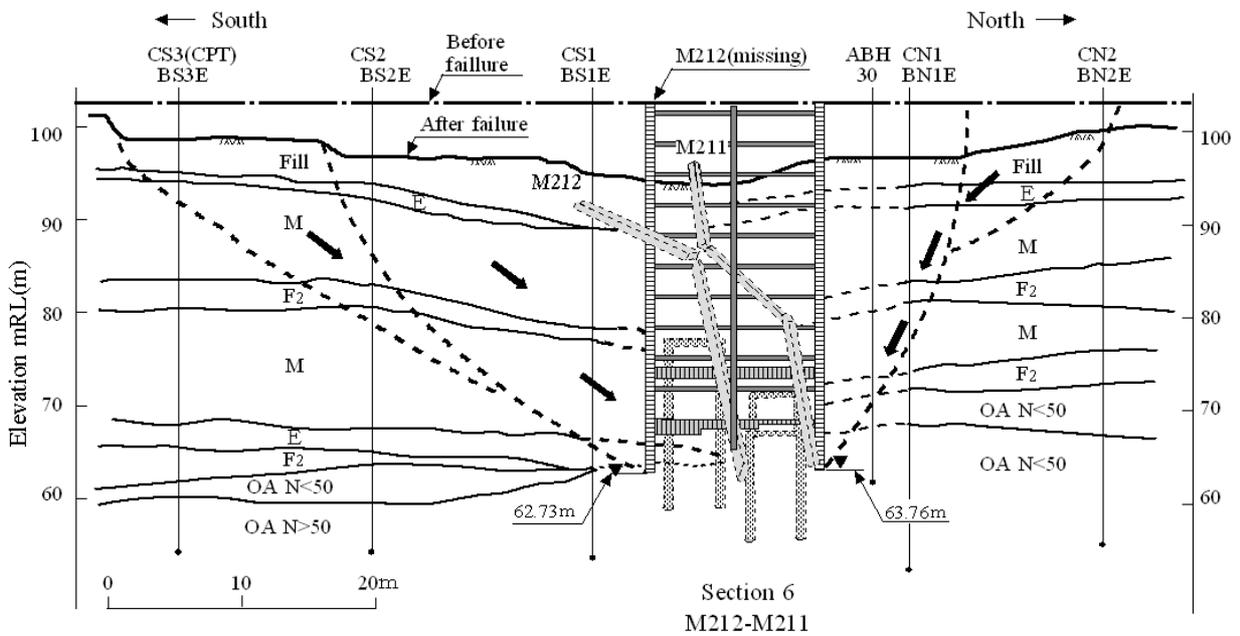


Fig.12 Features of the ground movements towards the excavated space accompanies by the subsidence

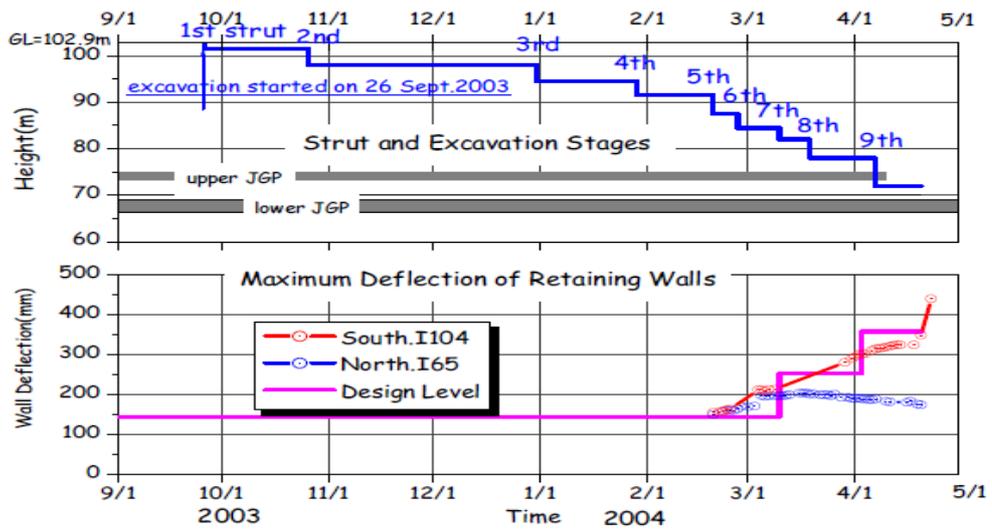


Fig.15 Change of Max. deflections with time

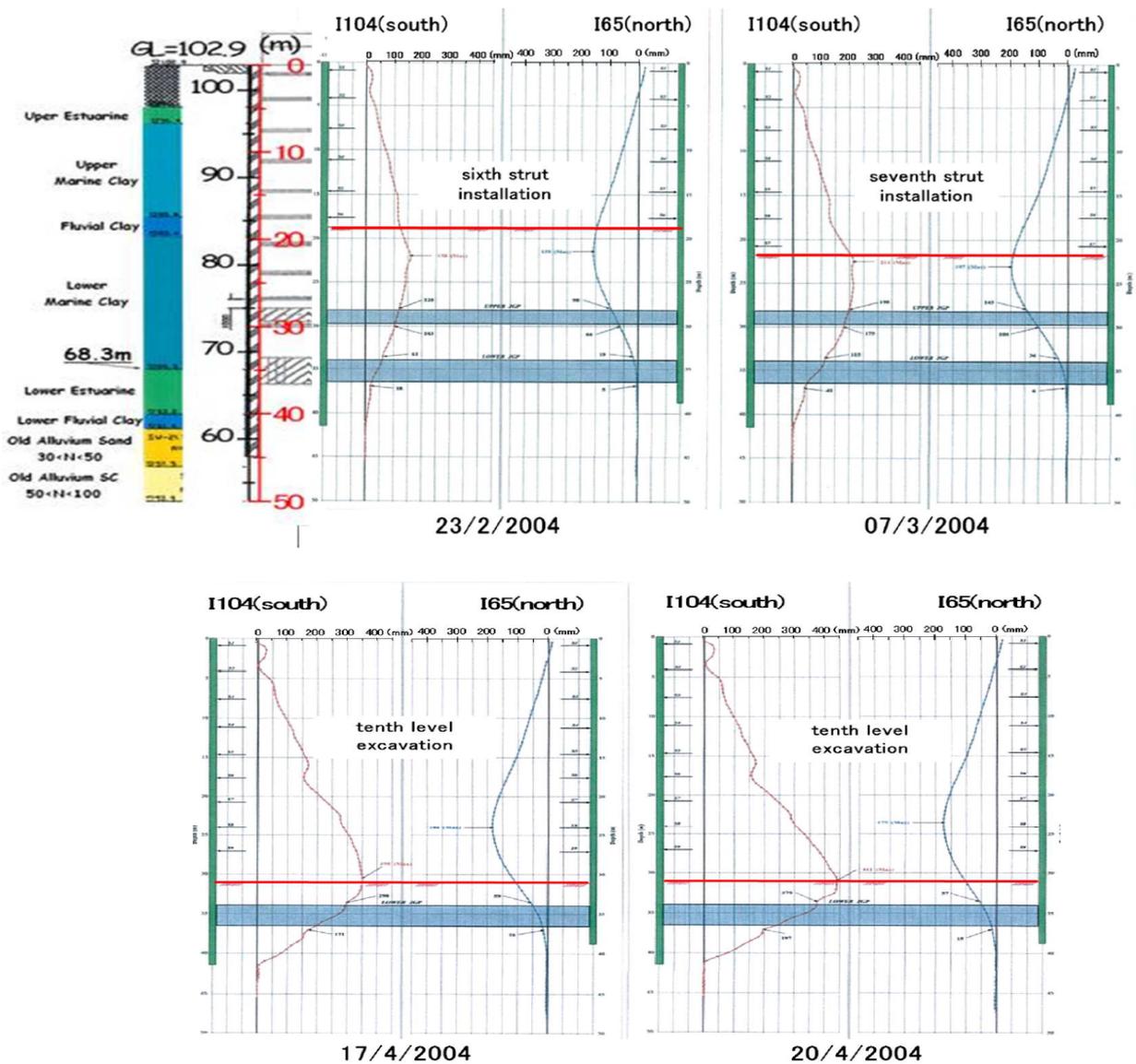


Fig.16 Deflection of Retaining Wall at 6th, 7th, and 10th excavation step

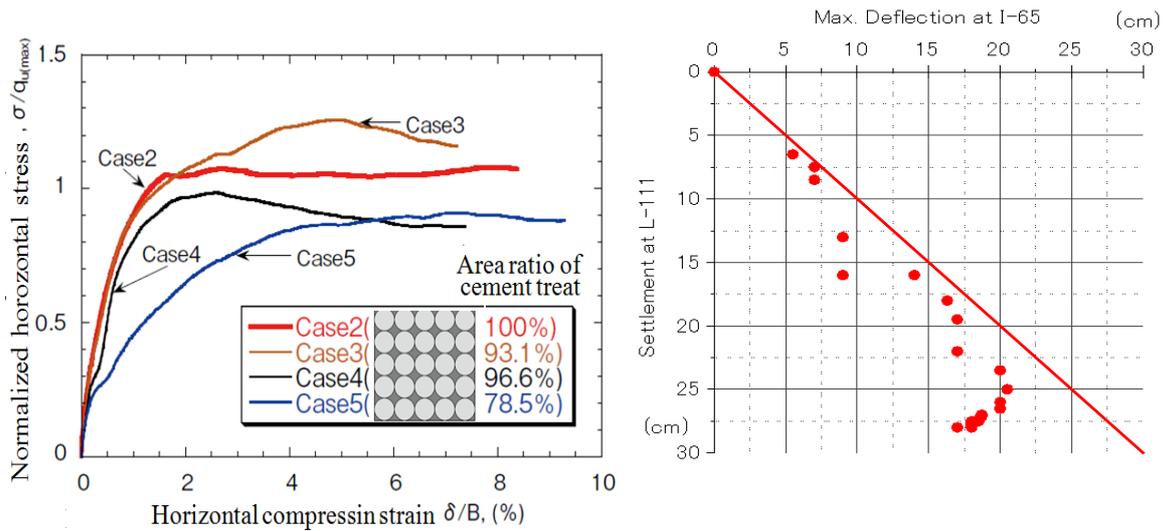


Fig.17 Horizontal Compression Test for JGP test pieces (Imamura, 2008)

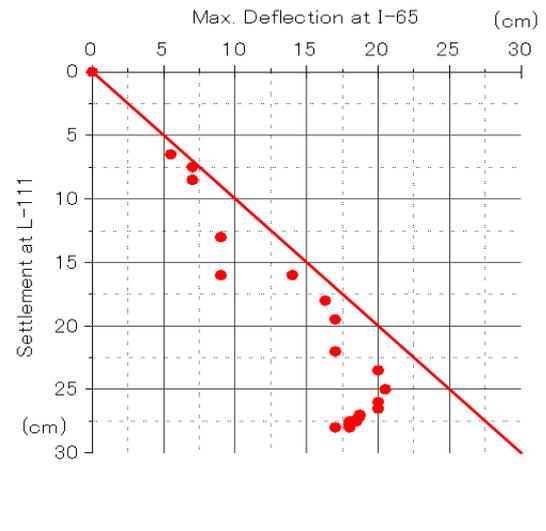


Fig.19 Settlement vs. Horizontal deflection (Iwasaki, 2011)

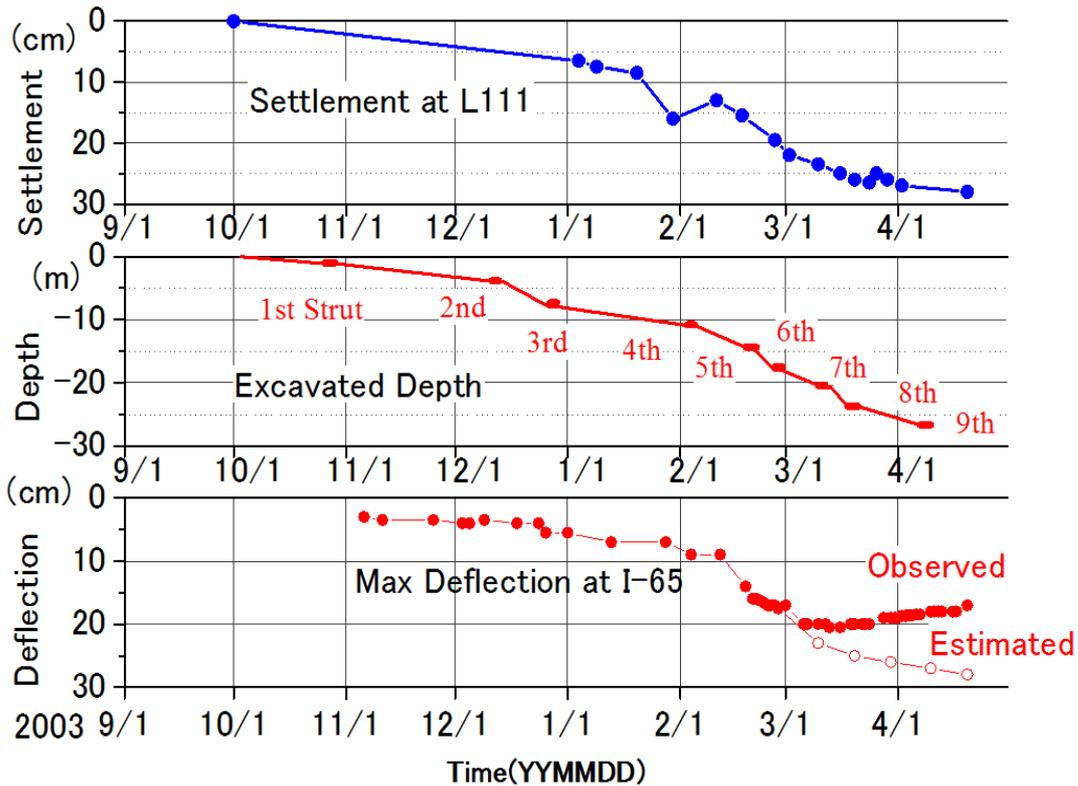


Fig.18 Settlement vs. Deflection

崩壊事故後に実施されたJGPの水平圧縮強度試験の結果を、Fig.17(Imamura, 2008)に示した。この水平圧縮試験からみると、水平破壊ひずみレベルはほぼ2%で、安全率をSF=2.0とすると、許容ひずみレベルとすると、 $\epsilon_{allowable} \leq 1\%$ である。掘削幅は $w=20m$ であるから、JGPの水平許容変位量は、南北両土留め間で20cm、片側だけでは、10cmが許容変位量となる。

北側の沈下と土留め壁北側の水平変位の経時変化をFig18およびFig.19(Iwasaki, 2011)に示した。水平変位の増大とともに、背面地盤表面の沈下が発生しているが、崩壊直前になると、北側土留め壁の変位は減少しているのに拘わらず、沈下量は増大している。異常事態が発生していると考えらるべきであろう。土留め壁の変位量を注視していることで、3月の始めの

時点で、変状異変に気付き、また、連続傾斜計の基底から、変計が生じていることから、連続傾斜計の基底は固定条件となっていないことが知られよう。

シンガポールのニコールハイウェイ崩落事故については、会場から多くの議論があり、5年が経過しているのにも関わらず、関心の高さを示していた。

原因の一つとして、高圧電線ケーブル直下では、事前のJGPの施工が不可能であったが、JGPの欠落の影響はないというわけではない。

しかしながら、古期沖積層OAの出現深度を5m浅く見ていたということが決定的であろう。土留め壁の設置時に、支持層の深度を確認しつつ施工を行うようなmonitoring during excavationなどという計測施工が導入されれば、はるかに安全な施工となるに違いない。

2.3 ベトナム・カントー橋橋桁崩落事故

ベトナム・カントー橋は、ベトナム南部のメコン河の支流であるハウ川にかかる橋で、ベトナムの首都ハノイからサイゴンに抜けるベトナム国道一号線を構成し、この橋ができるまではフェリーボートで車両を運んでいたが、2010年4月24日に完成し、全長2750m、東南アジアの中の斜長橋では最長である。

施工は、日本のODA（特別円借款事業）で大成・鹿島・新日鉄塘のJVで施工されていたが、落桁事故が、2008年9月26日に発生した。すなわち、まず、橋脚を施工し、その上に桁を持ち上げようとしていた（Fig.20に崩落前の建設状態を示す）が、コンクリート桁を持ち上げる途中の地上30mで橋桁は崩壊し（Fig.21に崩壊後の写真を示した。Fig.22 およびFig.23に崩壊前後の支柱の構造の概略を示した。）、事故が起こった時には250人の労働者が斜面で作業をしていた。翌27日には52人が死亡し、140人が怪我をしたと報告された。メコン河流域の軟弱地盤はいわゆるproblematic soilである。

Fig.24に地盤断面図を示した。厚いシルト層と砂礫層の互層で構成されているが、地表から約10mは緩い砂質(N<10)層であるが、その下に約20mの層厚の(N=0)の軟弱シルト層、さらにN=30程度の砂礫層がある。軟弱層の厚さは厚く、カントー橋の橋脚の基礎には、約70mの長さの杭が使用されている。Fig.22に仮設の支柱を示したが、桁を持ち上げる支柱の基礎となる仮設のベントは、幅4.5mx4.5m 厚さ1mのコンクリート製で、35mの長さの杭で支持されていたという。Fig.23に崩壊前後の様子を示した。

Fig.23上段には崩落直前の様子と下段には崩壊後の桁の状態を示している。Fig.25の右側にはベント基礎の傾斜の様子、左側にベントの不等沈下傾斜によ

る支保工の変形の初期の変形の様子を示した。

崩落は、支保工に座窟が発生し、倒壊したものである。

本事故に関しては、カントー橋崩落事故調査国家委員会が組織され、日本から塩井幸武八戸工業大学名誉教授が委員として参加している。2008年1月8日に事故調がベトナム政府に報告をしているが、最終結論には至っていないと報告されたという（ja.wikipedia.org/wiki/カントー橋）。

Shioi(2011)の報告によれば、橋桁を持ち上げる際にベント基礎に、不等沈下(4.5mの基礎幅に対して12mm)の不等沈下で傾斜し、この傾斜によって、支柱に曲げモーメントが発生したものであるという。

12mmの不等沈下は崩壊後の計測であるから、絶対沈下量は不明である。

報道(日刊ベトナムニュース2007/10/3)によれば、事故発生前に、ベント基礎の載荷実験を実施するようにと、エンジニアが要求していたなどと伝えられている。

ベント基礎の不等沈下の計測、不等沈下による支保工の傾斜や座窟などの事前検討、ならびに施工時の観測などが実施されていたとすれば、事故は防止できたのではないかとと思われる。

Shioi(2011)は、メコン河流域にある超軟弱シルトのクリープ的沈下変形特性の重要性を強調し、その計算手法を提言した。

シンガポールやカントー橋の崩落事故における、このような事故に至る状況を考察すると、いわゆる地盤計測工法が十分に適用されていないか、適用されていても、その十分な運用がなされていないものである場合が多い。地盤工事においては、地盤の不確かさをカバーするために、計測を実施し、事前想定と比較しながら、工事を進める必要がある。

3. 法地盤学大阪シンポジウム提言

本シンポジウムの閉会にあたり、地盤工事の災害を防止するための方策を提言として採択した。

事故の発生した地盤をみると、いわゆる教科書的な地盤ではない、いわゆるプロブレマティックソイルと呼ばれる問題地盤が多い。種々議論の上、次のような提言が採択された。

大阪シンポ提言

国際地盤工学会法地盤委員会 TC302 は、2011年7月14-15日大阪においてシンポジウムを開催し、法地盤工学的問題に関して議論した。地盤工事において事故の発生が起こる原因は設計における仮定と実際の乖離にある場合が大部分である。



Fig.20 Construction view before collapse (Shioi, 2011)



Fig.21 Collapsed concrete girder (Shioi 2011)

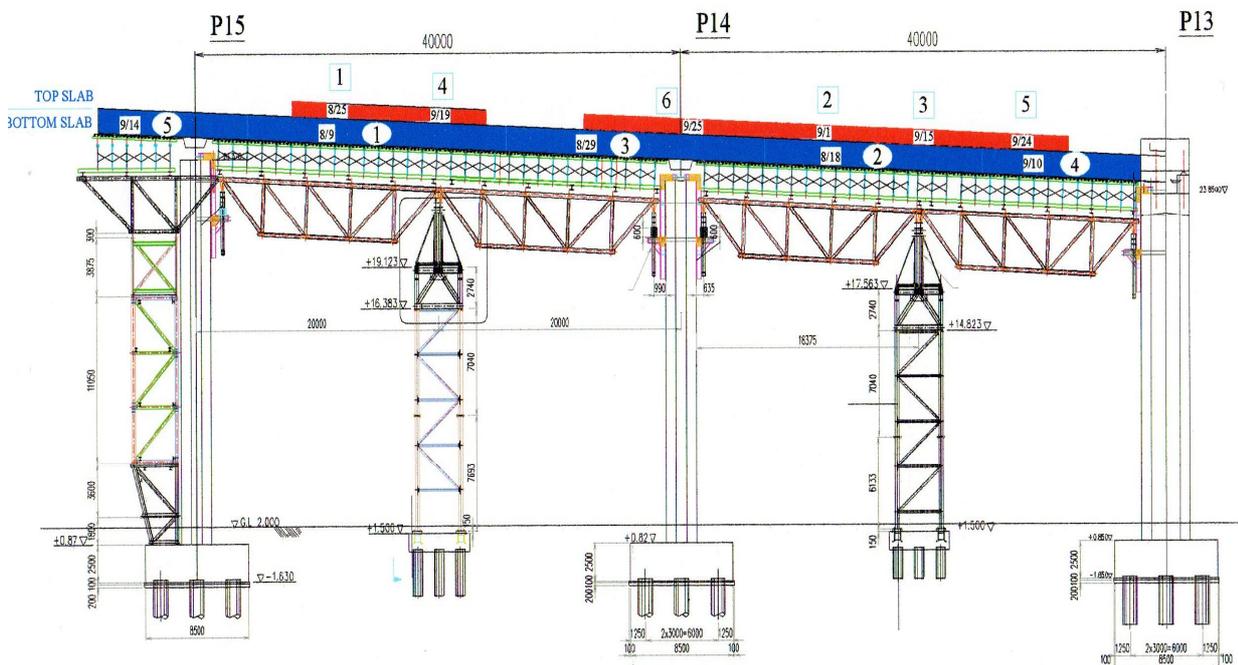


Fig.22 Scaffoldings and bents for prestressed concrete girder and order of segments to cast in (Shioi 2011)

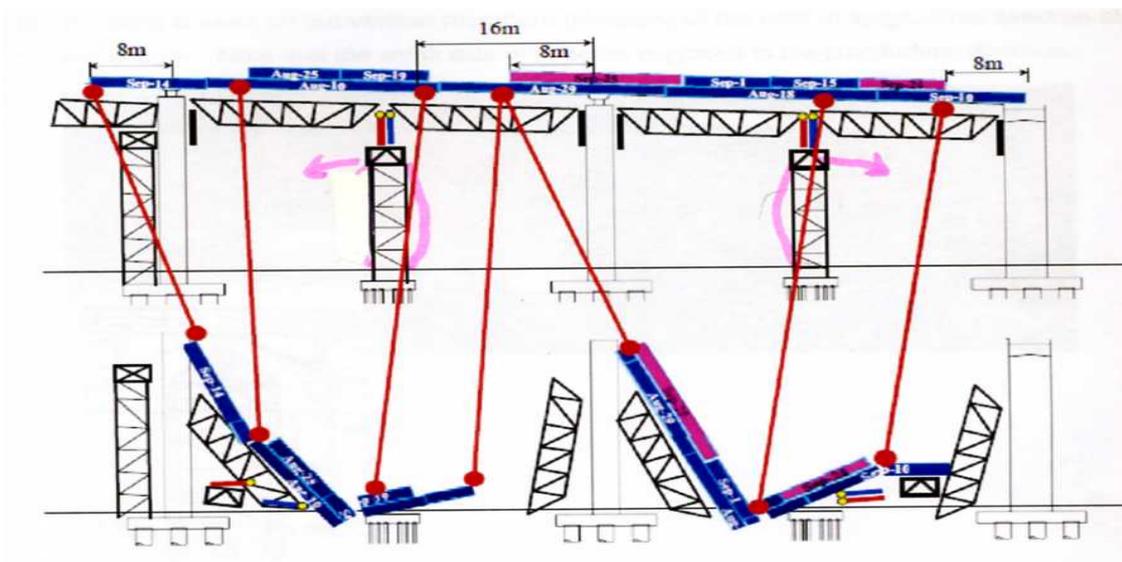


Fig.23 Collapsed concrete segments, scaffoldings and others (Shoi,2011)

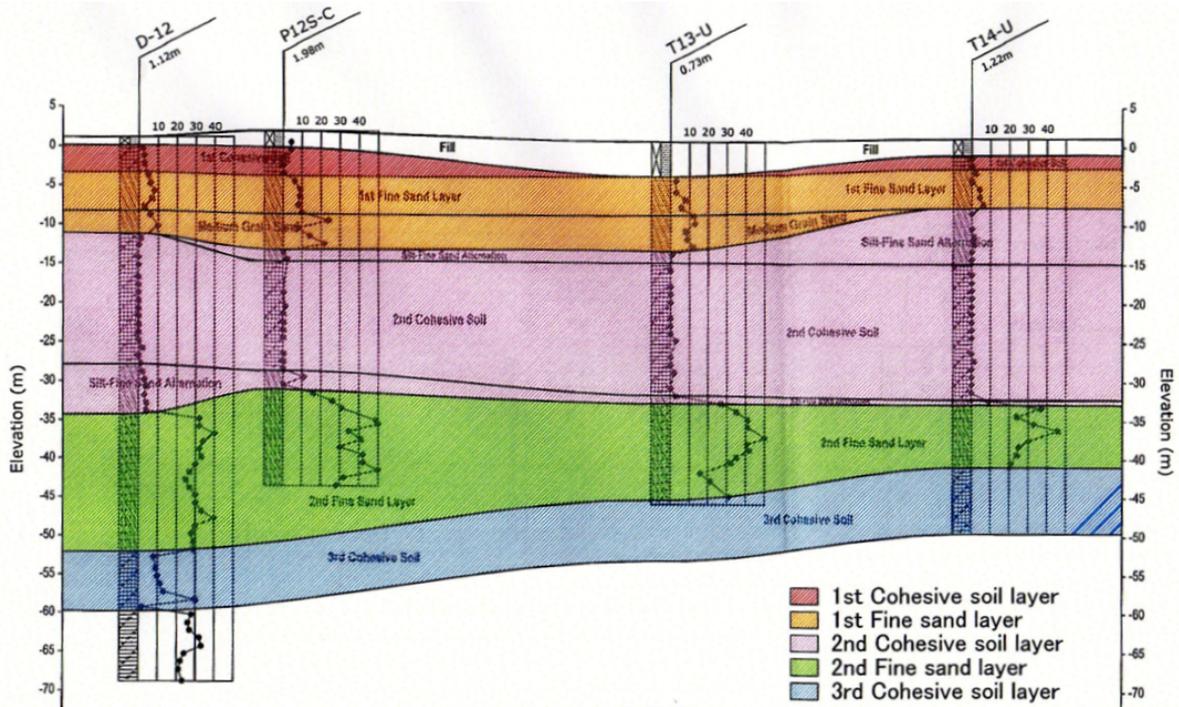


Fig.24 Geotechnical Section under Can tho Bridge

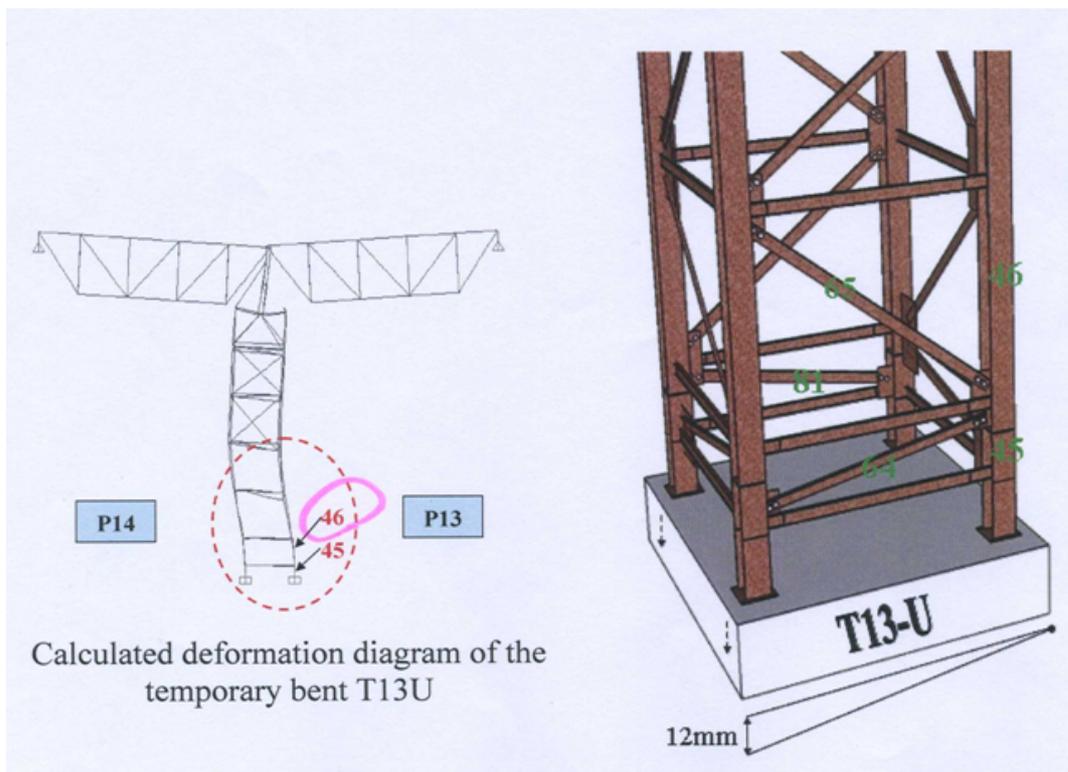


Fig.25 Buckled vertical members and differential settlement of base of bent-13

特殊土と称される地盤；荷重によって長期の沈下が継続する超軟弱鋭敏粘土地盤とか，圧力水圧下で特殊土と称される地盤；荷重によって長期の沈

下が継続する超軟弱鋭敏粘土地盤とか，圧力水圧下で発生するパイピング破壊が見られるシルト質砂地盤などが，堰堤や掘削工事などでの重要な要素であ

ることが指摘され討議された。

遠心力載荷試験による斜面崩壊実験などによって教科書的ではない地盤崩壊事例が示され、擁壁の崩壊や、地盤の変状機構などがすべて予測できるわけではないことが示された。

現場観測工法こそが、建設の費用を抑えつつ、しかも、地盤工事における安全と作業効率を維持するための要であることに同意した。

建設工事に伴って各種の計測を実施することは常態となりつつあるが、計測データは必ずしも、解釈されることなく、このことが、事故を招いている場合が少なくない。

事故が発生するのは、設計者が、予測される地盤挙動とか、変位の適正な警戒レベルを明示しないで施工が進む場合などである。

また、計測機器が十分に設置されていない場合や、建設の重要段階にあって能力のある地盤技術者が現場にいない場合にも事故の発生につながる。

観測工法の不正確な適用が法地盤工学にも関与することから、TC302 委員会は、観測工法に関心のある他の委員会との共同活動を提案したい。

TC302 の規約にも入れることを視野において、TC206(現場挙動にもとづく地盤設計法(Interactive Geotechnical Design))や TC304(リスク予測と管理)と共同し、共同報告書などが作成できればよいと考える。他の TC 委員会との共同シンポジウムを開催すれば、既知の情報を伝えつつ、国際地盤工学会員からの最新の技術提供を得ることができよう。

<Resolution of TC302 Osaka Symposium>

TC302 conducted an International Symposium in Osaka on July 14-15, 2011 and discussed the emerging topic of forensic geotechnical engineering. The main causes which trigger failure in geotechnical constructions were recognized as differences between design assumptions and reality.

Peculiar soils like very soft sensitive clays which can exhibit prolonged settlements due to changes of load, and silty sands which can exhibit piping failure under hydraulic gradients, were discussed as important factors in embankment and excavation works respectively.

Unusual slope failure mechanisms were identified from centrifuge model tests, and the forensic examination of a variety of earth retention failures in the field indicated that ground distortion mechanisms could not always be predicted.

The Observational Method was identified as a key tool for reducing construction costs whilst maintaining

safety and serviceability in geotechnical design. The installation of measuring devices for construction monitoring has become common but the monitored data are not always interpreted, and this has sometimes led to failures. This can arise when the designer does not clearly specify the expected ground deformation mechanism, or does not set appropriate alarm levels. Other possible reasons are the inadequate installation of instruments, or the lack of a capable geotechnical engineer on site during crucial stages of construction.

Since its incorrect application can result in the necessary application of Forensic Engineering, TC302 proposes to work with other interested parties to clarify and refine best practice in the use of the Observational Method in geotechnical engineering. We therefore seek to include this activity in the terms of reference of TC302, and we will invite TC 206 (Interactive Geotechnical Design) and TC304 (Engineering Practice of Risk Assessment and Management) to do likewise, so that a joint report can be produced. It is proposed that a symposium be jointly organised to disseminate findings, and to seek contributions from ISSMGE members that demonstrate the state of the art.

4. 法地盤工学ワークショップ

平成 24 年 1 月 13 日-14 日に実施したワークショップにおいては、シンポジウムで議論された現場観測工法および最近多発している上町断層にかかわる建築紛争についての話題を中心に、地盤学、地形学、地質学、建築学、弁護士、さらに紛争の渦中にある一般市民なども出席した。

都市圏活断層図の作成やその利活用(岡田篤正(京都大学名誉教授))断層や地盤情報の公開による地盤や断層情報の透明性の必要性(佃栄吉 産総研地質分野副統括)、活断層紛争事例紹介(中川康一大阪市大名誉教授・針原祥次弁護士・水口哲也弁護士)、フランスにおける現場観測工法(清水正喜鳥取大学教授)などの発表があった。

謝 辞

本稿は、平成23年度から2年間にわたる研究委員会活動の一部を報告した。法地盤工学委員会のメンバー委員ならびに、防災研究所担当事務の方々に感謝する。

参考文献

- 今村 眞一郎, 佐藤 靖彦, 宮崎 啓一, 萩原 敏行, 平岡 博明 (2008): 山留め支保工における地盤改良地中梁の水平方向変形特性, 西松建設技報, pp7-12
- Bolton, M. (2011): Learning from Reality: Lessons from Centrifuge Models, Proc Proceedings of the TC302 Symposium in Osaka pp.1-12
- Itoh, K, Kikkawa, N., and Toyosawa, Y.(2011): Failure mechanism of anchored retaining wall due to the anchor head itself being broken, Proc Proceedings of the TC302 Symposium in Osaka, pp.13-18.
- Ishihara, K.(2011): Collapse of Braced Excavation in Singapore Proc Proceedings of the TC302 Symposium in Osaka, pp.35-50.
- Iwasaki, Y.(2011): An Alternative Approach as Observational Method Inferred from Monitored Data to Avoid the Failure of the Geotechnical Excavation in Singapore, Proc Proceedings of the TC302 Symposium in Osaka, pp.185-193.
- Richard N. Hwang, R.N., Duann, S.W., Chen, C.H.(2011): Damages to Metro Tunnels due to Adjacent Excavations, Proc Proceedings of the TC302 Symposium in Osaka, pp83-88
- Shioi, Y.(2011): Importance of Taking Deformation of Substructure into Account for Bridge Design, Proc Proceedings of the TC302 Symposium in Osaka, pp.51-62.
- Take, W.A., Bolton, M.D., Wong, P.C.P. and Yeung, F.J. (2004) "Evaluation of landslide triggering mechanisms in model fill slopes", *Landslides*, Springer, 1 (3), 173-184.
- Wong, P.K.P (2003) "Centrifugal modelling of liquefaction failure of loose granitic fill slopes", MPhil Thesis, Cambridge University

(論文受理日 : 2012年6月8日)

Contribution of Forensic Geotechnical Engineering in the Ground Disaster and Accident

Yoshinori IWASAKI⁽¹⁾ and Mamoru MIMURA⁽²⁾

(1) Geo Research Institute,
(2) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

This paper describes the activity of the general cooperative research program "Research Committee on Forensic Geotechnical Engineering" (chair Y. Iwasaki and manager M. Mimura), which was funded by Disaster Prevention Research Institute from 2011 to 2012.

In 2011, we have organized an international symposium in Osaka and adapted a Resolution. The topics of the symposium cover various such accidents as slope failure by heavy rain, and failure of retaining wall. Special attentions are paid to "Rain induced slope failure," "Nicole's Highways Collapse in Singapore," and Failure of bridge girder at Can Tho Bridge, Vietnam.

The Research committee aims to collect case histories of the forensic geotechnical engineering and summarize the cases and proposes the direction to go in the future. At the symposium, a recommendation was adapted to cooperate with technical committees under the international society of soil mechanics and geotechnical engineering.

At present, we have concluded that the most of the failed case did not use observational method. Monitoring was not properly fed back into the running field conditions.

In January 2012, we have organized a workshop on forensic geotechnical problem and construction dispute. Citizens who are in active for legal attempt to construction of a housing structures on an active faults have joined the workshop as well as layers.

keywords: forensic geotechnical engineering, observational method, construction dispute