

標準貫入試験結果による地這り機構の考察

正員 工学博士 村山 朔 郎*
 正員 赤井 浩 一**
 准員 柴田 徹***

A STUDY ON THE MECHANISM OF FLOW SLIDE BY MEANS OF THE STANDARD PENETRATION TEST

(JSCE Oct. 1955)

Dr. Eng., Sakurō Murayama, C.E. Member, Kōichi Akai, C.E. Member,
 Tōru Shibata, C.E. Assoc. Member

Synopsis In order to investigate the cause of the landslide which occurred on July 9, 1954 along the highway in Kishiwada City, Ōsaka Prefecture, three borings of 20 m depth with Raymond Sampler and four Shallow borings with soil auger have been performed in the slide area. According to the result of geological survey at the site and of boring data, the soil formation has been cleared. At the same time, the standard penetration test has been tried to discover the depth of slide plane on which the disturbance of soil stratum should be serious. Adding to the results of above-mentioned field investigations, a series of laboratory test including the tri-axial compression test has been performed with soil samples, and at last it has been inferred that this landslide was a "Flow Slide", which ensued from the partial liquefaction of sand layer by the sudden increase of the ground-water pressure in the confined formation.

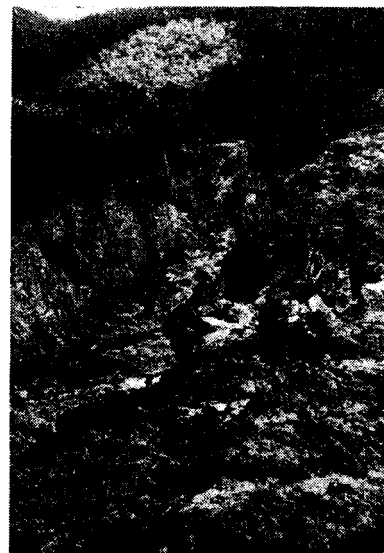
要旨 昭和 29 年 7 月に岸和田市内の府道沿いで発生した地這りの原因についての資料をうるため、地這り地域にレイモンド・サンプラーを用いた深さ約 20 m の 3 本の縦ボーリング、及び地這り地裾付近に深さ約 4 m の 4 本のオーガー・ボーリングを行った。現地の諸状況並びにボーリング結果より地這り地域の土質構成を知るとともに、標準貫入試験の結果から地層の攪乱度を調査して這り層の位置を発見することを試みた。またサンプラーにより採取した土試料に対する三軸圧縮試験の結果より、この地這りが被圧地下水の急激な増圧によつて不飽和砂層中に惹起した「流れ這り」に原因することを推論するとともに、限界密度の立場よりこのような不飽和状態にある砂質土に対する三軸圧縮試験の特性について検討を行った。

1. ま え が き

昭和 29 年 7 月 9 日未明、岸和田市土生滝（はぶたき）町において地這りが発生し、府道岸和田一塔原線を延長約 90 m にわたり閉塞した。これは 7 月 4 日及び 5 日の両日に約 170 mm の雨があつて以来、ほとんど連続的な降雨ののちに生じたもので、地這り地域の範囲は間口約 100 m、奥行約 150 m に及ぶものであるが、地這りの速度は非常に速く、夜半のごくわずか

の時間に一挙に全斜面が這り落ちたものようである。地這り後の地表の状況は写真—1に見られるようにとげとげした断崖状の起伏があり、また地表の亀裂の状態よりみて地這り地塊は一体になつて這り面上を這つたものでなく、むしろ上方地塊の重圧によつて斜面下部が強制的に押し下げられて生じた地這りであるとの感を抱かせた。また踏査及び後述のボーリングに

写真—1 地這りによる地表の亀裂



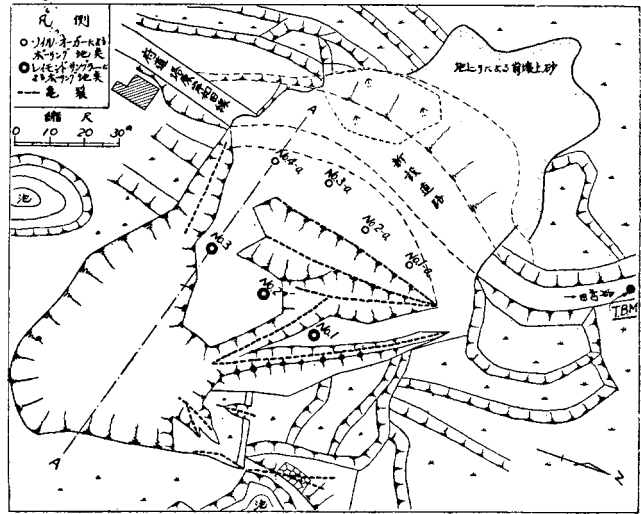
*京都大学教授，工学部土木工学教室

**京都大学助教授，防災研究所

***京都大学大学院工学研究科学生

より、この付近の地質は大坂層群下部に属し、シルト質ロームをところどころに含む砂礫層地帯であることが判明した。この地質状況と上記の地這り状況を考え合わせると、この地這りは砂層が地下水圧の急激な増加を受けて液状化(クイックサンド化)することに原因したのではないかと予想された。そこでレイモンド・サンプラーによるボーリングを行い、標準貫入試験によつて地層の相対密度を測定するとともに、地層の攪乱度の変化点を調査して這り層を発見しようと試みた。なおサンプラーより採取した土試料に対しては三軸圧縮試験を実施し、砂の限界密度の立場より地這り原因の究明を行うとともに、この種土質の試験法についても検討を行つた。

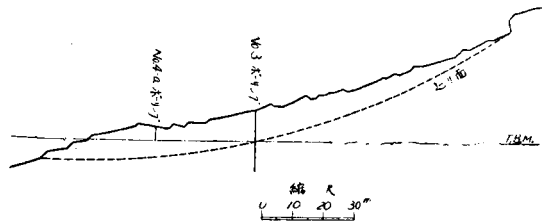
図-1 地這り地域平面図



2. ボーリングとその調査結果

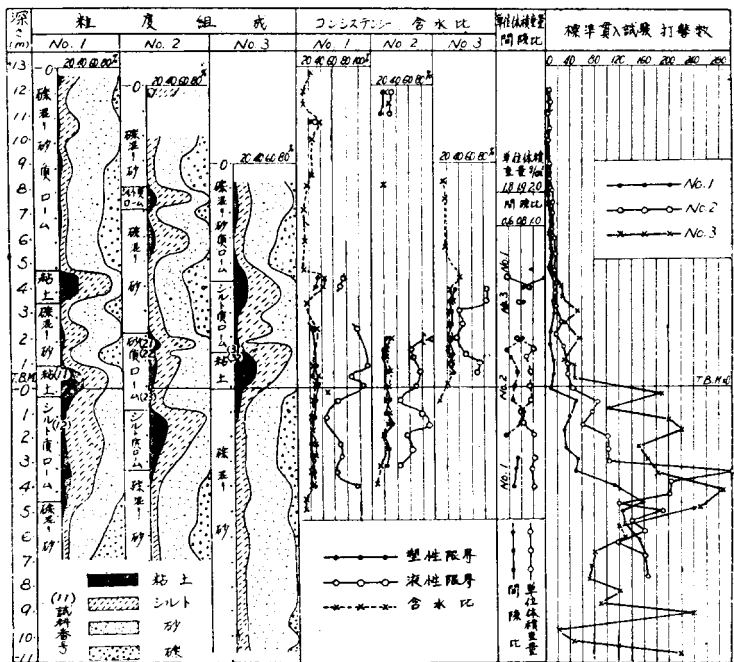
7月下旬に地這り地域内でレイモンド・サンプラーによる3本の縦ボーリングと、地這り地帯の旧道路側溝沿いにソイル・オーガーによる4本の浅いボーリングを行つた。前者のボーリングの位置は図-1の平面図に示すNo. 1, 2, 3であつて、それぞれ約20mの間隔にあり、

図-2 地這り斜面の縦断面



また図-2は図-1のA-Aに沿う地這り後の斜面方向の縦断面図で、No. 3の位置は地這り地域のほぼ中央に当り、地表より這り面までの深さが最も大きいと思われるところである。しかしここでも這り面の深さは地表より20m以内にあるとの見込みからボーリング深度は20mとし、サンプリング・スプーンによる試料採取と標準貫入試験とを行つた。

図-3 レイモンド・サンプラーによる土質柱状図



標準貫入試験はスプーンについたドリル・ロッドに沿わせて140lbの重錘を30inの高さから落下させ、ロッドの貫入量1ftを生ずるに必要な落下回数(打撃数)Nを測るものであつて、Nによつて粘性土にあつてはそのコンシステンス(柔軟性)、砂質土にあつてはその相

対密度（緊密性）を決定することができ、また N とその土の強度との関係も推定することができる²⁾。No. 1, 2, 3 のボーリングの結果は 図-3 であつて、その右欄は各層の N の値を示したものである。なお 図-2 及び 図-3 の水平基準面には地這り地域外に仮設

図-4 ソイル・オーガーによる土質柱状図

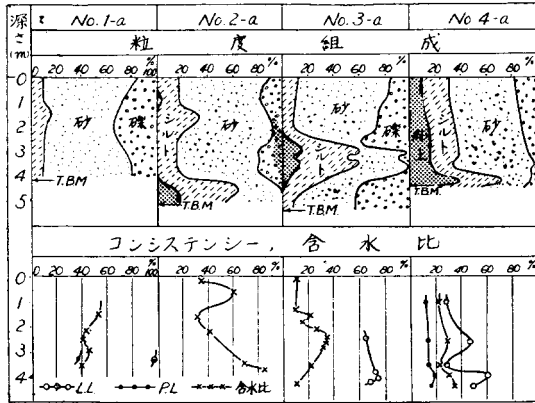
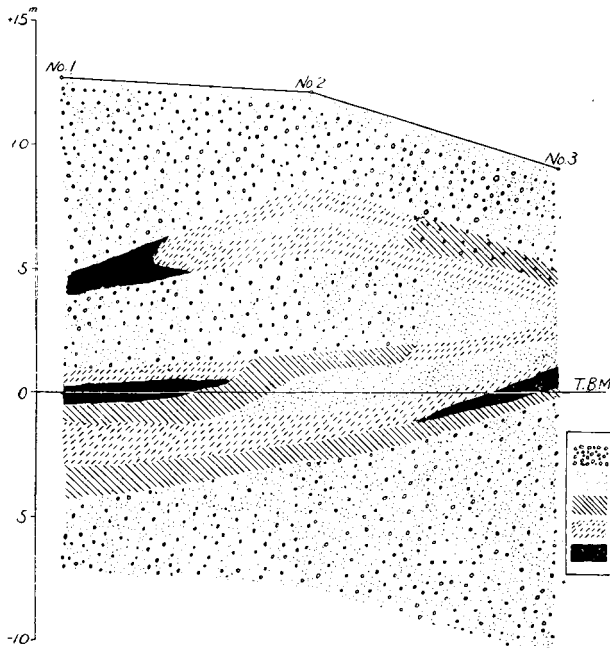
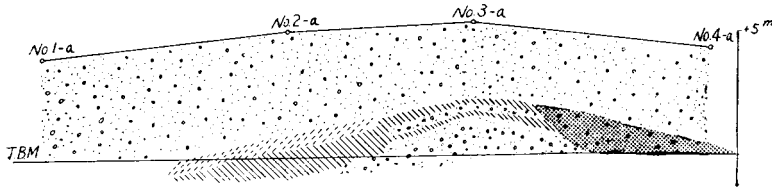


図-5 地這り地域の土質構成

(a) レイモンド・サンプラーによるもの



(b) ソイル・オーガーによるもの



した仮ベンチ (T.B.M., 図-1 参照) を標準とした。

図-3 の土質柱状図に示すごとく、この地這り地域の土質の特色としてはいずれのボーリングにおいても、普通の地這り地域に見られるような粘土層がほとんど見られないことと、地中の自然含水比がきわめて少なくほとんど土の塑性限界 (P.L.) に近いか、または P.L. 以下のものもあることである。従つてこの地域に存在する粘土質ローム、またはごく局部的に薄く出現する粘土は非常に硬くなつていて、 $q_u=1.7 \text{ kg/cm}^2$ 程度の大きい単軸圧縮強度を示すものさえあつた。

ソイル・オーガーによるボーリングは 図-1 に示すように、旧道路側溝沿いに No. 1-a ~ 4-a の 4 本を約 4m の深さまで行つた。これらに対する土質柱状図は 図-4 のごとくである。

なおいずれのボーリングにおいても地下水面は現われなかつたが、ボーリング No. 3 の地表より約 15m (T.B.M.-6m) 以下の土は水分がやや多いことが現場観察において認められたので、あるいはこのあたりに水みちがでやすく、調査当時はその飽和毛管水帯となつていたためではないかと推察された。

3. 地這り原因に対する考察

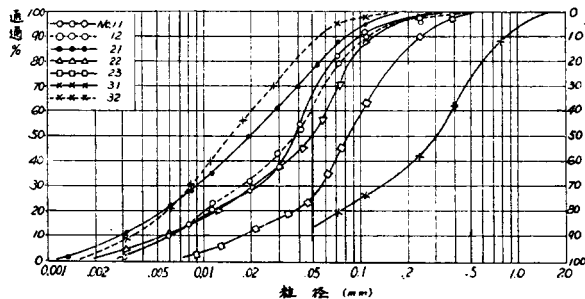
図-3 の土質柱状図から各号ボーリング地点を結ぶ鉛直面内の土質縦断図を画けば 図-5 (a) のごとくなり、同様に 図-4 から 図-5 (b) が求められる。これらよりみると、T.B.M.+5~7m に約 1.5~2m 厚さのシルト質ローム層があり、また T.B.M. 0m のあたりに粘土分のやや多い粘土質シルト層とローム層があるほかは礫混り砂層が大部分を占めており、全体として層の傾斜はあまりなくほぼ水平に近い状態である。

図-3 によると貫入試験の打撃数 N は T.B.M. 0m 付近を境としていちじるしい変化を示し、これより上部の層はきわめてゆるいのに反し、下部は $N > 100$ を示すほどの高緊密性を有している。また T.B.M. 0m の上下部では粒度組成の類似した層もあるが、サンプラーより抽出した試料を観察したところでは上部の試料には多数の亀裂が認められ、この部分は地這りによる攪乱の程度が激しかつたことを裏書きしている。地這り地域外の健全

な地域に標準貫入試験を行うことを略したため緻密な検討はできないが、T.B.M. 0 m 付近の N の急激な変化は地送りによる攪乱によつて、ここを境界として上部地層の相対密度の急減をきたしたものと考えられるから、図-5 (a) の断面における送り面は T. B. M. 0 m 付近に存在するものと推定することができる。これはボーリング地点の地表から約 9~13 m の深さで、ここを地送りの先端及び上端とを結ぶ平たい円弧をもつて送り面と仮定すれば、ほぼ図-2 の点線のごとくなる。

また各ボーリングによつて採取した土試料の粒度曲線を比較すれば、図-6 のごとく送り面付近の土はいずれも他層に比してより均等粒径に近いシルトまたは細砂であつて、滲透水圧を受けると液状化しやすい性質のものであることが明らかになつた。このような砂質またはシルト質の土は透水係数がそれほど小さくなく、土中の間隙圧はこれらの層中の水圧の変動に比較的速かに追隨してゆくものであるが、この地送り地域には図-3, 4 にみるごとく砂、シルト、粘土分を適当に含んだいわゆるローム質土がポケット状に薄く入り混つており、かつこれらがその薄層の上部の砂層またはシルト層と薄層下部の透水層との間を局部的に遮断しているような状態になつているので、この薄層直下の送り面付近の層に間隙圧が相当残留蓄積されたであろうということが後述の室内実験の結果から知られた。土中の間隙圧が増加すると土粒子相互間に受け渡される有効圧力が減るのでセン断抵抗は減少するが、この地送り地域において見出されるような粘着力が小で、内部摩擦角の割合大きい砂質土では特にこの傾向がいちじるしい。ゆえにこの地送りの原因は均等なシルトまたは細砂の層が降雨による大きい地下滲透水圧を受けて液化状態になり、「流れ送り」(Flow Slide)を生じたことにあると考えられるが、このことはさきに図-2 に記入した送り面の形状がほとんど直線に近いようなものとなつていることによつてもうなづかれるであらう³⁾。

図-6 送り面付近土質の粒度加積曲線



一方地送り後の地表の状態より判断すると、ボーリング No.3 及び No. 4-a が行われた南側は地表の崩土がなだらかであるのに反し、No. 1, 2 のような北側は地表がとげとげし、かつ図-1 に記入したごとき斜面を横に走る表面亀裂が多いこと、及び前述のごとく南側のボーリング下部の含水量がやや多いことなどよりして、「流れ送り」は後方の丘陵の尾根から長期に降雨による滲透水が、この No.3—No. 4-a の線の砂層を前に押しやつて生じたもので、他の部分はこれに引きずられて送つたものようである。特に No. 1 寄りの亀裂の様子は、何か送りに対して抵抗するような状態が、このあたりに存在しているかも知れないようにもうかがわれる。

4. 土の飽和度がセン断強度に及ぼす影響

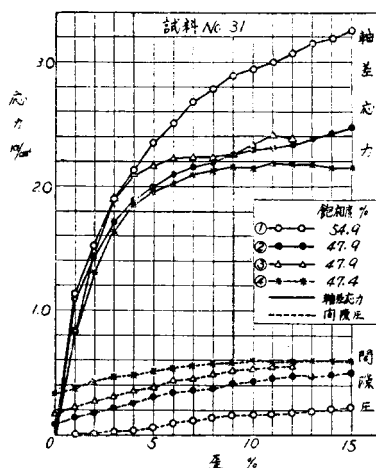
砂の液状化に対する締り度合の限界値を与えるために、A. Casagrande⁴⁾ は限界密度の概念を提案した。これは与えられた垂直荷重において砂の容積に変化を生ずることなくセン断される密度をいう。すなわち限界密度よりも大きい密度を持つ砂はセン断応力を受けると膨脹するから、砂が水で飽和していれば不飽和状態になるための抵抗も加わり破壊に対して強い抵抗を表わす。これに反して限界密度よりも緩い砂ではセン断応力を受けて容積が減少するから、もしこの場合砂が水で飽和していれば砂にかかる荷重の一部分が間隙水に負担される結果、セン断強度を減ずることになる。この限界密度の考え方はその後三軸圧縮試験法の発達とともに一般に認められ、その決定に対する種々の試験法が提案されてきた。しかしながらこの概念は均質な砂の三軸圧縮試験におけるごとく、試料をほとんど完全に水で飽和させることが容易な場合については上述の理論のとおりであるが、現地土の含水条件が不飽和の場合、例えば岸和田市の地送り地域において見られたような比較的透水性の低いローム層などが存在して、水で飽和させることが非常に困難なような状態にある土質の場合には、この限界密度の試験法はかえつて意味のない結果に終る可能性がある。このこと

はすでに 1938 年に Missouri 河の Fort Peck Dam で生じた地送りの報告に対して Gilboy⁵⁾ が指摘したところであつて、水締式ダムの心壁に近い遷移領域 (transition zone) については、この部分が半ば水の中、半ば水の外にあつて非常に取扱いが困難であつて、この部分に少しでも攪乱が起ると部分的液化状態 (partial liquefaction) になりやすいことと、及びこのような場合には限界密度試験は液化化現象の有無を決定できないことを討議している。

土の含水量がセン断強度を支配する一つの重要な因子であることは一般に認められているが、従来の研究は主として乾燥砂または完全に水で飽和した砂、シルト、粘土について行われたもので、その中間の不飽和の土についてはほとんど明らかにされていない。一方、岸和田市の地這りにおいては 3. に述べた理由により、不透水層下部の砂層やシルト層は地下滲透流の急速な水位上昇時には、たとえ深い下方の部分は水で飽和されても、不透水層直下の部分はほとんど水に浸されず、このような部分的な飽和のまま、かなりの量の空隙圧を受けたものと考えられる。このような不飽和土の空隙圧は相当長い間土中に保留されて残存するから、連続する降雨のたびごとにかかる空隙圧の蓄積が起り、他方雨水の滲透による土の単位体積重量の増加と相待つて、ついに斜面の釣合いの極限状態にまで到達し、一挙にして爆発的な地這りとなつて崩壊したものと考えられる。

土の飽和度がセン断強度に及ぼす影響を知るために、地這り地域内でサンプラーにより採取した試料について三軸圧縮試験を行つたが、この際試料の一端を水に接せしめ他端を真空にして、その真空度を変化させ、飽和度を変えたときの土のセン断強度の変化について考察した。一例として 図-7 に示すものは側圧を 1.5 kg/cm^2 に保つて三軸圧縮試験を行つた場合の軸差応力と圧縮ヒズミとの関係である。試料にはさきに推定した這り面付近の砂質試料 No. 31 を用い、試験前に直径 3.5 cm 、高さ 8.0 cm の型枠内で突き固めて 1.85 g/cm^3 程度の相当締つた状態にした。なおこの密度は別に実施した飽和状態の相馬標準砂の試験では十分限界密度以上であつた。砂質土の三軸圧縮試験においては、側圧室に試料を据えて所定の側圧を

図-7 飽和度とセン断強度の関係



かける前に、試料にある程度の真空をかけてその形を保たせるのであるが、前述の目的のため特にこの試験ではつぎのような強さで真空度を変化させた。すなわち

(1) では水銀柱で 20 in, (2) では 10 in, (3) では 5 in の真空をはじめ試料の下端より、つぎに上端よりそれぞれ 5 分間ずつ合計 10 分間作用させたのち、引き続き上端から真空をかけながら水頭 50 cm の水を試料の下端から 5 分間滲透させ、また (4) では全然試料に真空をかけることなく、ただちに同じ水頭の水を 15 分間かかつて試料の下端から滲透させた。その結果は 図-7 に示すように、最大軸差応力及び飽和度は (1), (2), (3), (4) の順、空隙圧は (4), (3), (2), (1) の順に大きいことが判明した。また特に飽和度の大きい (1) の場合には最大軸差応力が (4) の場合の約 1.5 倍にも大きく出ていることは、飽和度の大小が土のセン断強度に及ぼす影響の非常に大きいことを示すとともに、またこの土質は多少の真空を与えてもなかなか水で飽和することが困難であることを表わしており、この地這りが砂質土の部分的な飽和による内部空隙圧の増大によつて生じたとする推論にきわめて有利な資料となるものと考えられる。

5. あとがき

本文においては昭和 29 年 7 月、岸和田市内に発生した地這りの原因を調査するために、標準貫入試験を併用した縦ボーリングによつて這り層を見出すとともに現地の土質構成を知り、この地這りは砂層が被圧地下水の急激な増圧によつて部分的飽和状態となり、層中の空隙圧が増加していわゆる「流れ這り」を起したものであることを一連の室内実験によつて確かめることができた。この種の地這りによる法面崩壊機構の解明のために引き続き模型実験を行つているが、一応現在までの調査によつて大きい被圧地下水の作用を受けおそれのあるような場所では、砂礫層といえども地這りの被害をうけることがあるので、層中の空隙圧の逸散をはかる適当な予備工法をとらねばならないことが明らかとなつた。

終りにこの調査にあつて、大阪府土木部道路課長辻川秀夫氏及び岸和田土木出張所長武田政幸氏より多大の便宜を与えられたこと、並びに文部省科学研究費の補助を受けたことを付記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) K. Terzaghi & R.B. Peck : Soil Mechanics in Engineering Practice, 1948, pp. 31, 294, 300.
- 2) 村山朔郎・赤井浩一ほか：標準貫入試験と地盤の支持力について、「土と基礎」2巻5号, 1954, pp. 12-18
- 3) G.P. Tschebotarioff : Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures, 1953, pp.183-189.
- 4) A. Casagrande : Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills, J.Boston Soc. C.E., 1936, p.13.
- 5) Discussion by G. Gilboy of "Fort Peck Slide", by T.A. Middlebrooks, Trans. A.S. C.E., Vol. 170, 1942, pp. 723-764

(昭.30.4.8)