



高盛土の常時及び地震時の安定化のための補強土工法の研究

沖村, 孝

(Citation)

科研報告書, 11650505

(Issue Date)

2001-03

(Resource Type)

research report

(Version)

Accepted Manuscript

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/K0001098>



高盛土の常時及び地震時の安定化のための
補強土工法の研究

課題番号11650505

平成11年度～平成12年度科学研究費補助金基盤研究(C)(2)研究成果報告書

平成13年3月

研究代表者 沖村 孝
(神戸大学都市安全研究センター教授)

はじめに

本研究は、高盛土の常時及び地震時の安定化の手法を得るため、盛土高さ 22.5m の試験盛土において、軟弱地盤の処理、常時及び地震時の斜面安定に及ぼす補強土工法であるジオテキスタイルの効果を評価するとともに、最適な盛土施工方法を求め、将来計画されている 30m 以上の高盛土斜面の安定検討の資料を提供する。

この目的を達成するため、本研究では試験盛土から得られる地盤および盛土の物性値、地下水位の変化および盛土の変形を計測する。さらに高密度電気探査、反射法地震探査等の物理探査、盛土の現位置土質試験および盛土材料の室内土質試験を実施し、ジオテキスタイルによる補強土工法が常時のみならず地震時の斜面安定に果たす役割を検討する。

研究組織

研究代表者：沖村 孝（神戸大学都市安全研究センター教授）

研究分担者：吉田信之（神戸大学都市安全研究センター助教授）

研究分担者：鳥居宣之（神戸大学都市安全研究センター助手）

研究経費

平成11年度 1, 200千円

平成12年度 900千円

合 計 2, 100千円

成果の発表

(論文)

- 沖村孝、鳥居宣之、中村勉：地盤比抵抗を用いた盛土施工管理手法に関する研究、建設工学研究所論文報告集、42-A、51-66、2000.11
- 沖村孝、鳥居宣之、綿健太郎：地震時の斜面における残留変位量簡易算定法の適用条件、建設工学研究所論文報告集、42-B、109-119、2000.11
- 沖村孝、鳥居宣之、村上岳彦、綿健太郎：斜面の残留変位量算定法に関する一考察、神戸大学都市安全研究センター研究報告、4、1-18、2000.3
- 沖村孝、鳥居宣之、中村勉：地盤抵抗分布を用いた盛土の品質管理に関する基礎的研究、神戸大学都市安全研究センター研究報告、4、39-52、2000.3

(発表)

- 沖村孝、鳥居宣之、村上岳彦、綿健太郎：提体における残量変形量と実際の被害との関係、土木学会関西支部年次学術講演会、III-55、1-2、1999.5.22
- Takashi OKIMURA: Method for Evaluating Earthquake Triggered Landslide used in Japan, Modeling a Comprehensive Scenario for a Seismic Event Based on Lessons from Recent Earthquakes in Italy and Japan, Milan, Italy, 1999.6.21~22
- 沖村孝、鳥居宣之、中村勉：地盤比抵抗分布を用いた地層構造の推定、日本地形学連合2000年春季研究発表会、2000.3.30
- 沖村孝、鳥居宣之、中村勉：地盤比抵抗を用いた盛土地盤の定量的評価に関する基礎的研究、平成12年度土木学会関西支部年次学術講演会、2000.6.5
- 綿健太郎、沖村孝、鳥居宣之、村上岳彦：地震応答解析による変位量と宅地変状被害との関係について、第35回地盤工学研究発表会、2000.6.13-15
- 若林亮、沖村孝、佐藤忠信、岸本英明、南部光広：地盤情報データベースを用いての神戸地域地盤特性分析、第35回地盤工学研究発表会、2000.6.13-15
- Okimura Takashi: The amplification characteristics with the ground information data "KOBE JIBANKUN", Seattle, 2001.1.8

目 次

1. はじめに	1
2. 造成地地区の地質概要	1
3. 造成のための調査方針	4
4. 盛土施工中に実施した観測結果	5
(1)調査方針	
(2)観測結果	
5. 盛土施工中に実施した現位置試験結果	12
—地盤比抵抗分布の変化を活用した盛土基盤の地盤改良効果判定—	
(1)試験盛土基盤の地盤改良	
(2)試験盛土の施工方法	
(3)高密度電気探査測線の設定	
(4)探査結果	
6. 盛土完了後に実施した現位置試験結果	45
7. FEM動的解析	52
8. 結論	54
謝辞	55
参考文献	56

1. はじめに

平成7年1月17日に兵庫県の阪神・淡路地区をおそったマグニチュード7.2の激しい地震は、死者6,432名にも達する被害を出し、近代的に発達した都市が地震により初めて大きな被害を被る結果となった。

この地震により、多くの建築構造物が被害を受けるとともに、都市のインフラストラクチャーが壊滅的な被害を受けた。一方、山地においても崩壊が750箇所近く発生するとともに、六甲山系の山麓では3,200箇所あまりの宅地が沈下、変形、崩壊等の被害を受け、自治体はこれらの宅地の安全を図るよう、関係者に勧告を行った。

今回の地震による被害は、コンクリート構造物に比して土構造物は比較的被害が少ないと言われているが、上述したように宅地、特に盛土においては大きな被害が発生した。盛土は、従来より豪雨時においても沈下や崩壊などが発生し、その安定を図るために締め固め、地下排水工等の対策が考えられてきた。しかし、土そのものの強度を補強するという観点から、近年は補強土工法が数多く採用されるようになってきた。ところが大震災後の調査の結果、補強土工法が採用されている場所では地震時にも大きな安定性を示したことが報告された。

神戸市内では既存の開発地に隣接する地区を対象として、開発地とする造成計画が進んでいた。しかし、そこでは40mにも及ぶ盛土工が予定されており、斜面の安定のために補強土工法を採用すること、ならびに斜面の常時及び地震時の安定対策が緊急を要する問題になってきた。この問題を解決する一手法として当該地近傍で試験盛土が施工されることになった。当然、この試験盛土においても補強土工法が採用された。

本研究では、試験盛土を通して、補強土工法が有する効果を検討するとともに、将来予想される地震時及び常時の盛土地盤及び盛土斜面の安定性を考察した。さらに、新しい調査手法である高密度電気探査手法を用いて、この試験盛土で施工された軟弱地盤改良の効果を把握する可能性について考察を行った。

2. 造成地地区の地質概要

土地造成が行われる地域は、神戸市街地中心部より西に約15kmに位置している（図一

1 参照) が、ここでは I 地区 (面積: 58ha) 及び F 地区 (面積: 22ha) の 2 地区に分かれています。地形的には段丘地形となっており、I 地区で標高 70m~120m、F 地区で標高 90m~140m となっている。

I 地区では 3 つの谷が北または北西方向に流下しており、F 地区では 2 つの谷が北または北北西に流下している。

地質は、主に未固結の大阪層群からなり、砂礫、砂、粘土が互層状にほぼ水平に分布している。谷部や池底では軟弱な沖積層が大阪層群を覆っている。以下に本地域に出現する地質の特徴を示す。

(1) 沖積層 (A)

粘性土は、造成地の北側を南西に流れる H 川等の沖積地およびこれに合流する支川の谷底平坦部や、池底ならびに谷部に分布する。比較的均質な粘性土だが、細砂を所々に挟在し、非常に緩いまたは軟弱な状態である。池底での層厚は 2~数 m 程度である。N 値は 0~2 と軟弱である。色調は、暗灰~青灰色を呈する。

崩積土は、丘陵部の表層付近に分布する。地質は大阪層群砂礫質土 (Og)、砂質土 (Os)、粘性土 (Oc) が二次堆積したもので、丘陵部の表層付近に分布する。

(2) 大阪層群粘性土 (Oc)

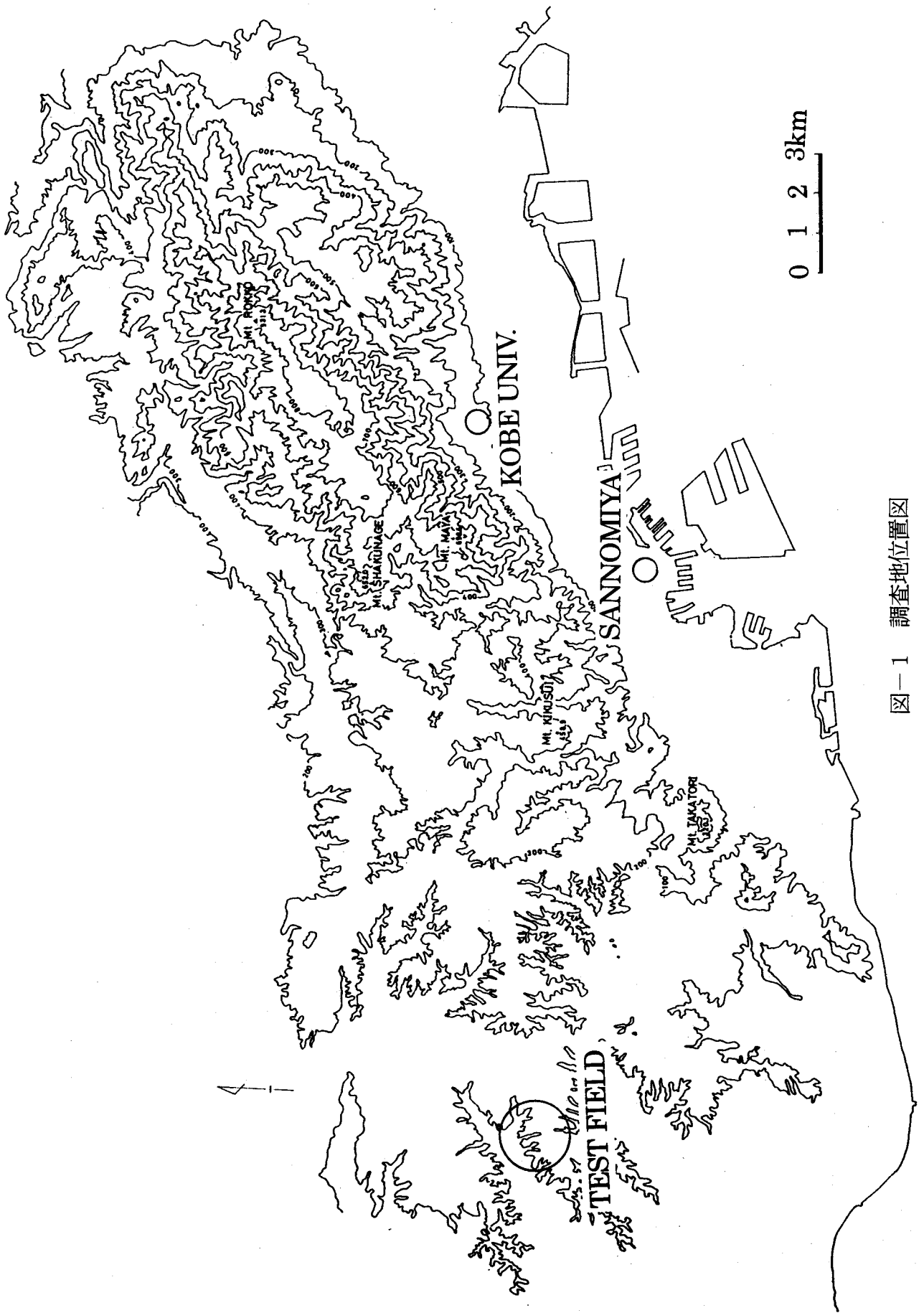
均質な粘性土である。色調は青灰色を呈する。丘陵部では概ね N 値 30 以上と硬く、固結している部分も見られるが、池底周辺では軟化しており N 値が 7~15 を示す。

(3) 大阪層群砂質土 (Os)

細砂~中砂を主体とし、少量の小礫を混入する。色調は灰褐~茶褐色を呈する。N 値は概ね 50 以上を示し、極めて密に締まっている。

(4) 大阪層群礫質土 (Og)

φ2~30mm 程度の垂円礫を多く混入し、マトリックスは細砂を主体とする。礫の最大径は φ50~80mm 程度である。全体に極めて密に締まっており、N 値は概ね 50 以上を示す。色調は茶褐色を呈する。



図一 調査地位置図

3. 造成のための調査方針

(1)造成上の課題

造成計画は、F地区が切土主体、I地区が盛土主体となっており、両地区で概ね切盛バランスをとる計画になっている。I地区の谷筋の盛土材料には大阪層群切土が用いられる予定であるが、その盛土高が最大で約40mに及ぶ高盛土となる箇所があり、このような高盛土の安定性、とくに兵庫県南部地震以降は地震時の安定性評価が問題となると長期的な安定、沈下等が主な課題として考えられていた。

この高盛土直背後の土地利用については、個人宅地が計画されているため、一定規模の地震時における法面安定性と降雨や地下水等に対する盛土の長期的な安定性の確保が特に必要とされていた。

高盛土の評価については、支持地盤の状況と盛土材について評価する必要がある。盛土材はF地区で切土した大阪層群であり、従来の施工実績により一定の知見は得られている。しかし、盛土体として地震時の安定性と変形を評価するには新たに動的解析手法による検討が必要となった。また高盛土であるため、盛土斜面の安定のためには補強土工法の考え方も導入されることになった。さらに、支持地盤すなわち盛土基盤については沖積層が堆積していることもあり、この基盤処理の方法も問題になっていた。これらを解決するために、試験盛土が計画された。

(2)調査方針

対象区域では、盛土基盤となる原地盤の地質的な特徴を把握するため、一次調査としてボーリング調査とPS検層、および高密度電気探査が行われた。

また、盛土材料の静的・動的特性を把握することを目的として、造成地内のJ池付近(図-2参照)で、計測工ならびに対策工を付加する形で試験盛土(面積:3.5ha)が実施され、盛土挙動の計測、初期地山応力状態および対策工の効果確認が行なわれた。

さらに解析にあたっては、盛土支持層となる沢部の軟弱層の把握ならびにこれを改良した場合の改良対象層の状況や地下水の状況を把握する必要があり、物理探査を用いてこれが確認された。

また、長期的な盛土の安定評価についても地盤改良に伴う土中水分が支配的な要素にな

ると考えられるので、盛土地盤の物性の変化を同じ測線で長期的な物理探査での観測によって評価できないかを確認するため、数回に分けて探査を実施した。

耐震設計方針の検討は、一次調査結果と試験盛土結果から得られた知見をもとに行われることとなった。

4. 盛土施工中に実施した観測結果

(1)調査方針

高盛土における解析条件を整理するとともに、対策工法の評価及び現場計測法の検討を行うことを目的として現事業区域のJ池付近で試験盛土（盛土高約25m）が実施された。

この試験盛土は、地震時の法面安定対策工の一つとして考えられるジオテキスタイルが敷設され、盛土の変形、地下水位の変動、ジオテキスタイルに作用する張力が測定された。この結果は、安定解析ならびに変形解析の結果と対比することにより、将来予定される拡張部の耐震設計方針の解析方法や土質定数の取り方について指針を与えることができる。

表－1に調査概要の一覧表を示し、図－2に盛土施工中・盛土完了後の調査位置を示す。

(2)観測結果

1)地下水位

A－A' 測線の法尻（標高66m）の地下水位観測結果によれば、地下水位は標高53m付近にあり、ほぼ一定している（図－3参照）。この水位は事前調査の現場透水試験で確認された平衡水位に近い値を示していた。また、他孔で観測されている地下水位も同様な傾向を示していた。これらの事実は、この地下水は降雨を直接の供給源としていないことが推定される。

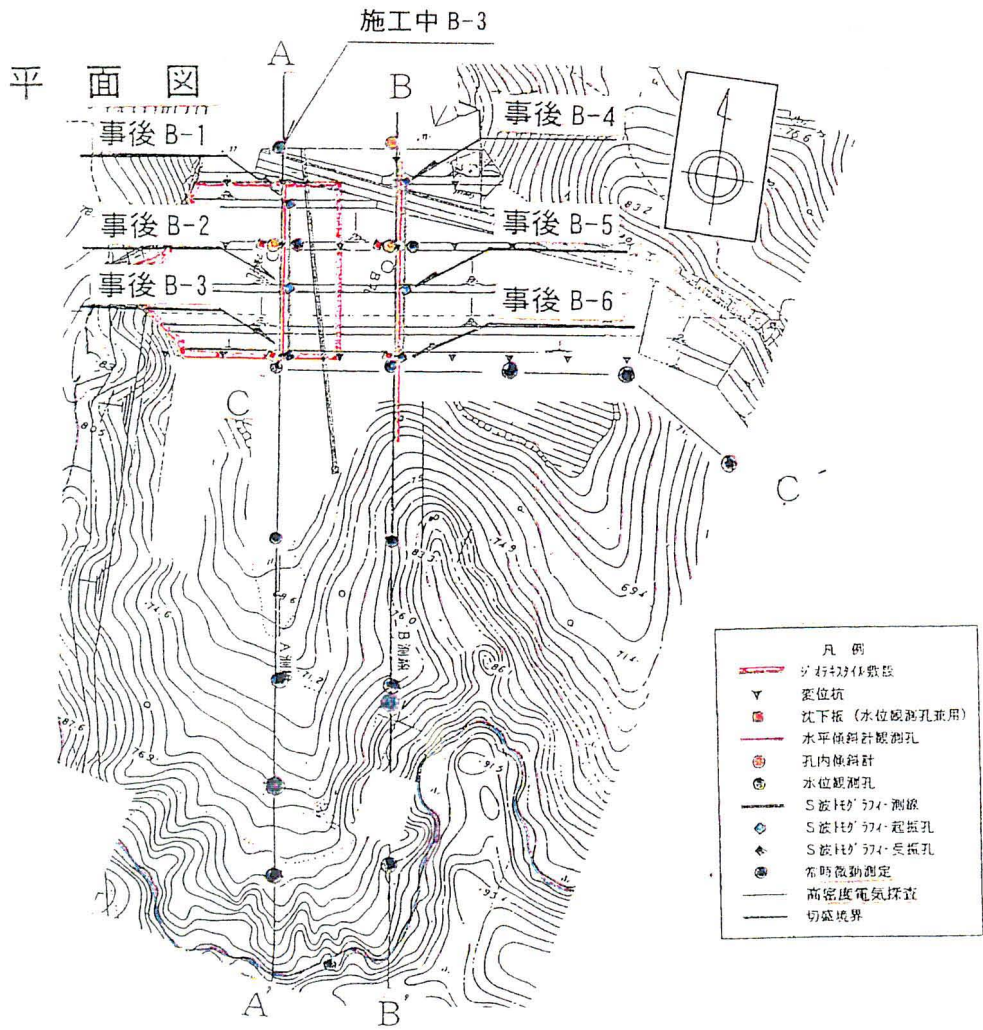
なお67.5m盤と75m盤に設置している沈下板は水位観測孔として併用しているが、各沈下板とも工事が終了した平成11年7月時点で地下水位は観測されておらず、盛土内には地下水位が生じていないことが確認された。

2)水平変位

75m盤より上の盛土に対して、盛土完了までの孔内傾斜計による水平変位は、標高60

表-1 高盛土設計・施工・管理上の問題点とその調査・解析計測一覧表

〈問題点・テーマ〉	〈解析・検討手法〉	〈必要調査・検討項目〉	〈調査・試験項目〉	〈動態観測・計測〉
①池底堆積物の改良 (トラフィカビリティの確保)		・池底堆積物の分布と強度 ・改良目標の設定	・ボーリング、サウンディング、 三軸圧縮試験(UU) ・配合試験	・高密度電気探査
②常時の法面安定	・円弧すべり解析 全応力法 有効応力法	・盛土の締固め・密度 ・盛土の強度 ・基盤の分布 ・基盤の強度 ・池底改良土の強度 ・地下水位・間隙水圧 ・ジオテキスタイルの引張力 ・盛土のすべり変形	・締固め試験、粒度試験、含水比試験 ・大型三軸圧縮試験(CD)、N値 ・ボーリング ・(N値からの推定) ・三軸圧縮試験(UU、CUbar) ・ボーリング ・引張試験	・現場密度試験 ・高密度電気探査 ・水位観測 ・ひずみ計による引張力測定 ・変位杭、沈下板、傾斜計、水平傾斜計
③地震時の法面安定	・地震時円弧すべり解析 全応力法	・盛土の動的強度 ・基盤の動的強度 ・改良土の動的強度 ・自然地下水位 ・ジオテキスタイルの引張力	・大型液状化試験 ・(N値、S波速度等から推定) ・液状化試験 ・現場透水試験 ・引張試験	・水位観測 ・ひずみ計による引張力測定 ジオテキ引抜き試験
④地震時の法面変形	・地震時変形解析(FEM) 全応力法 Super FLUSH-2D FLIP	・盛土の動的変形特性 ・基盤の動的変形特性 ・改良土の動的変形特性 ・地盤の震動特性	・大型動的変形特性試験 ・大型等方圧密試験、 ・PS検層 ・動的変形特性試験、PS検層 ・常時微動測定	・S波トモグラフィ
⑤長期安定		・盛土内地下水状態		・水位観測 ・高密度電気探査



断面図

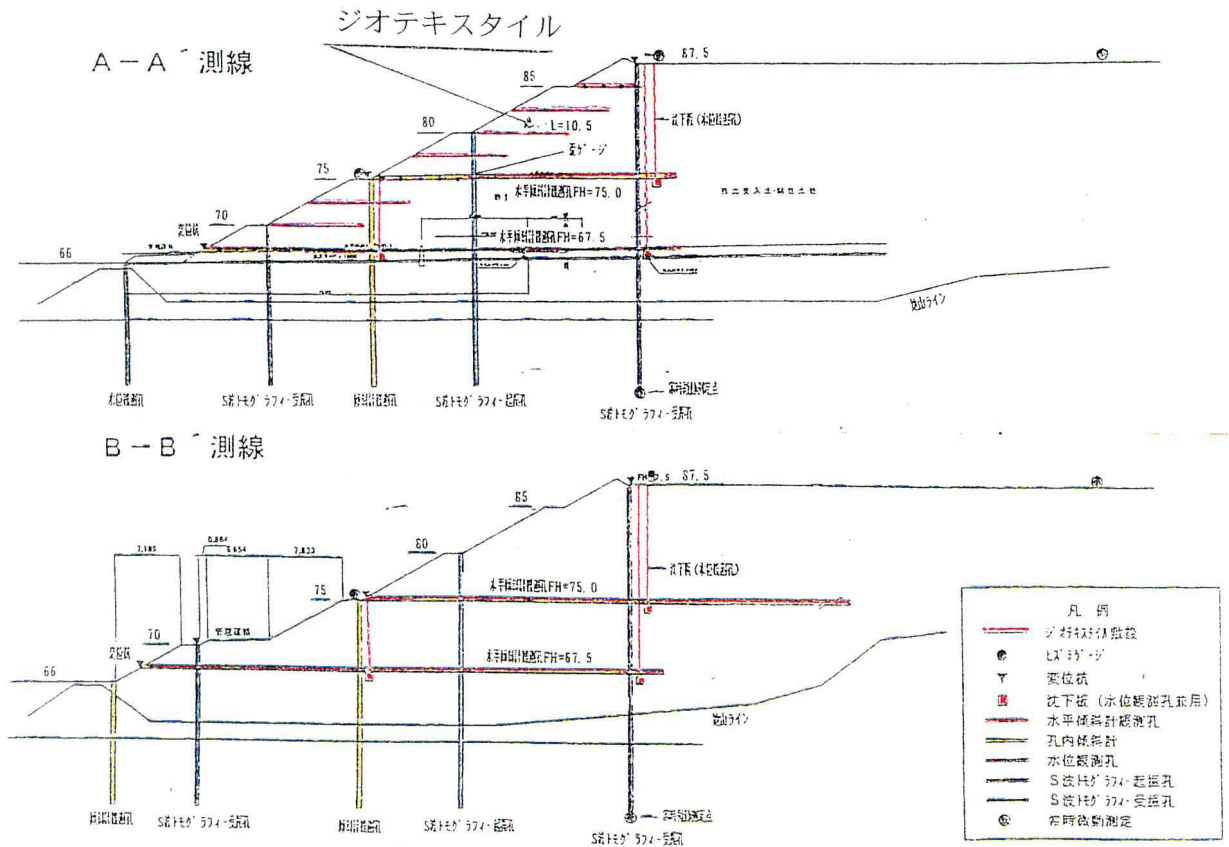


図-2 盛土施工中・完了後の調査位置図

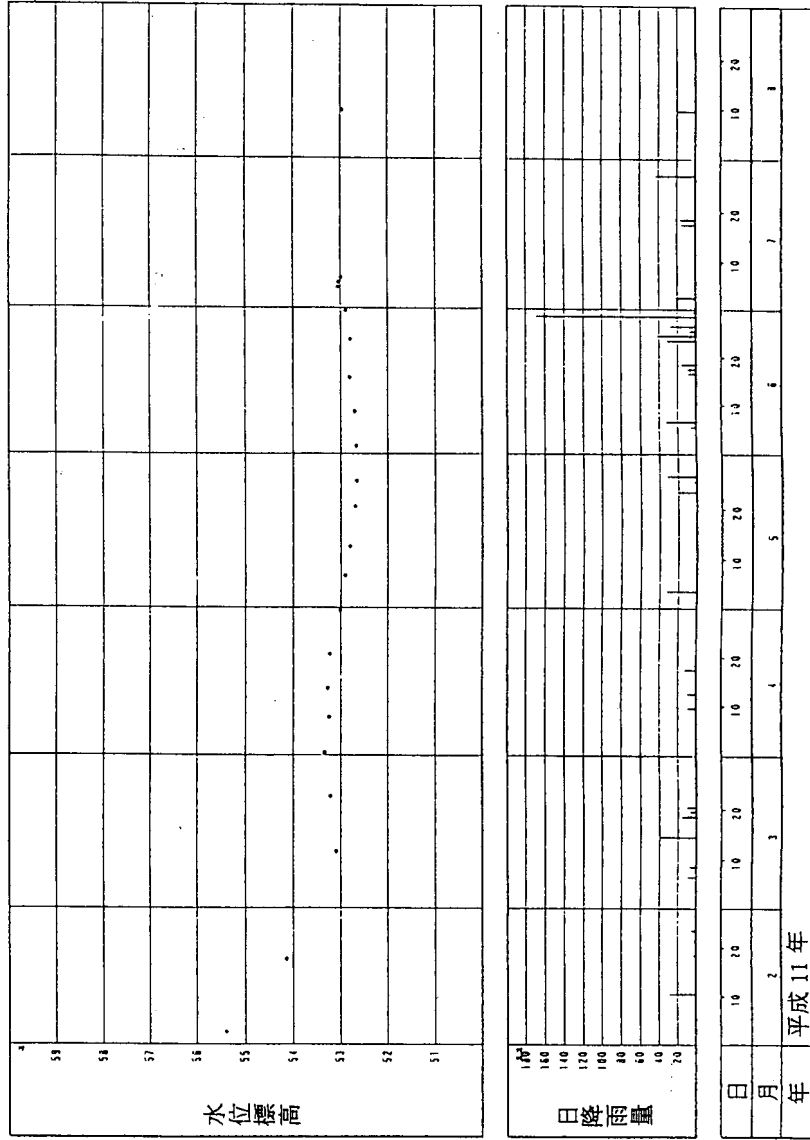


図-3 地下水水位観測結果 (A測線の法尻位置)

mから上で法面下方に向かって生じていた。75m盤の小段に設置している傾斜計では、標高 60m付近で最も水平変位が大きくなっており、その水平変位はA測線で 35mm程度、B測線で 40mm程度となっていた（図-4 上図参照）。

また、変位杭観測結果によれば、水平変位は法面下方に向かって生じており、法尻付近の変位はA-A' 測線で 30mm、B-B' 測線で 35mm 程度となっていた（図-4 下図参照）。

A-A' 測線ではジオテキスタイルを敷設していることを考えると、水平変位はジオテキスタイル敷設により変形抑制効果があったものと考えられる。

なお、2回の測定は2ヶ月の間をおいて行われたが、その間の水平変位量は大きく減少していることも明らかになった。

3)鉛直変位

75m盤により上の盛土に対して、盛土完了までの水平傾斜計による鉛直変位は、法面から法肩に向かって（盛土が厚くなるにしたがって）沈下する傾向にあった。A-A' 測線とB-B' 測線の沈下量を比較すると、B-B' 測線の方が大きい傾向にある。75m盤における最大沈下量は、A-A' 測線で 350mm程度、B-B' 測線で 400mm程度となっており。この最大沈下量はA-A' 測線、B-B' 測線ともに完成した盛土の法肩付近に急激に出現していることは興味のある現象である。この場所以外は斜面部で 100mm 程度で少ない。この急激な鉛直変位の出現は、今後解明する必要がある。A-A' 測線、B-B' 測線の違いを見ると、A-A' 測線の方が小さくなっており、これもジオテキスタイルによる効果があったものと見なせる（図-5 上図参照）。

また、変位杭観測結果によれば、鉛直変位は鉛直下方（沈下）生じており、75m盤の小段ではA-A' 測線で 49mm、B-B' 測線で 62mm程度となっていた（図-5 下図参照）。

これらよりA-A' 測線ではジオテキスタイルを敷設していることを考えると、ジオテキスタイル敷設により沈下抑制効果があったものと考えられる。上述した水平変位量と比較すると、鉛直変位量の違いの方が大きく、ジオテキスタイルは鉛直方向の沈下に対して効果が大きいことが確認された。

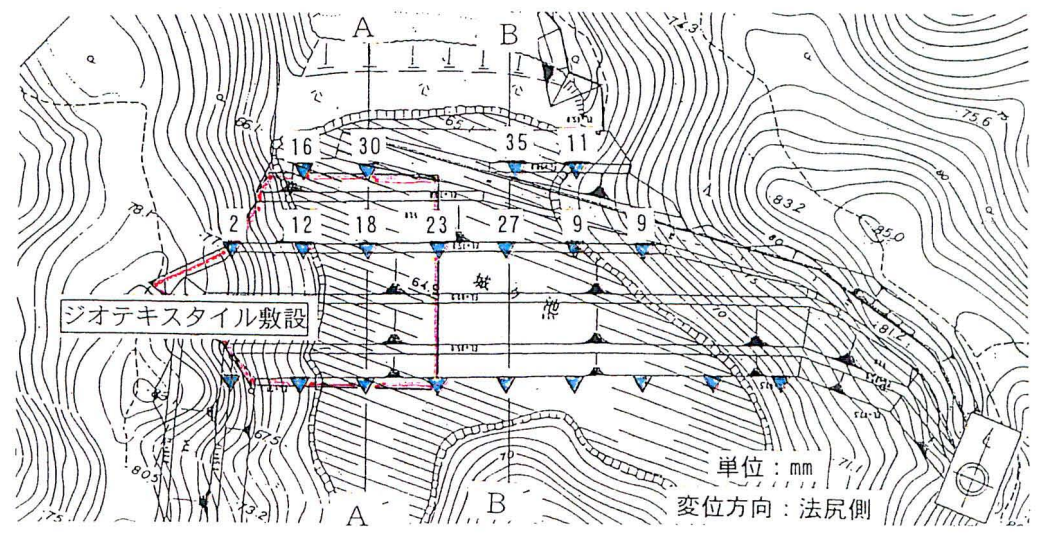
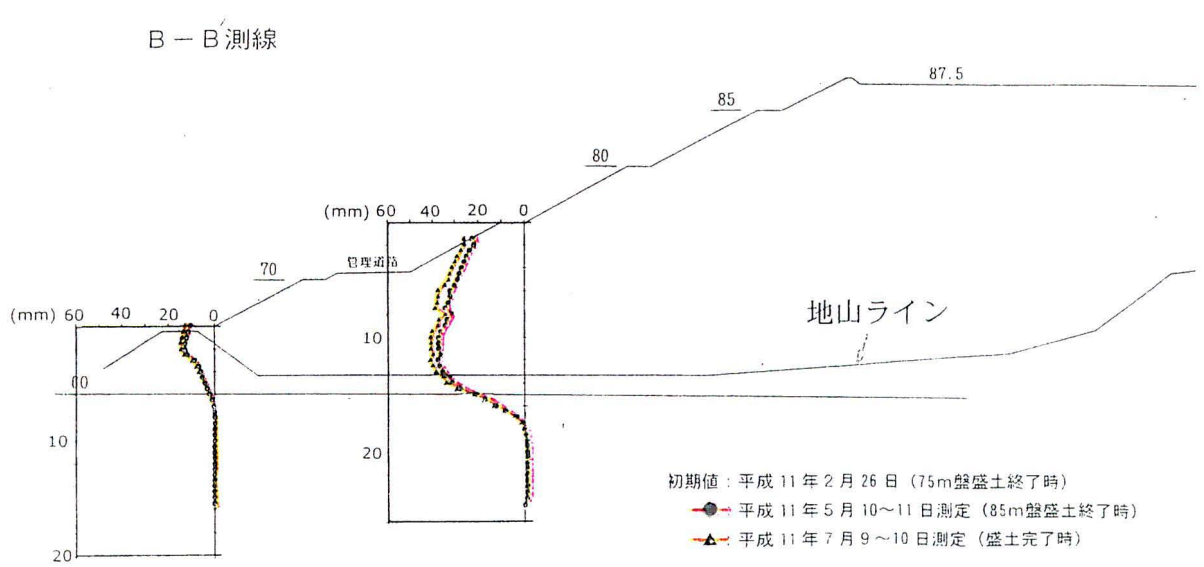
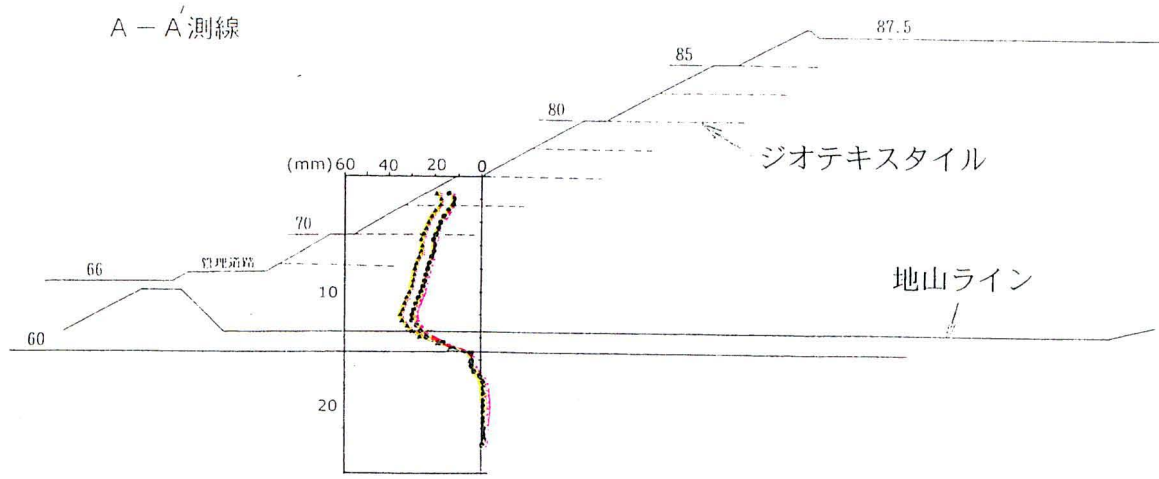
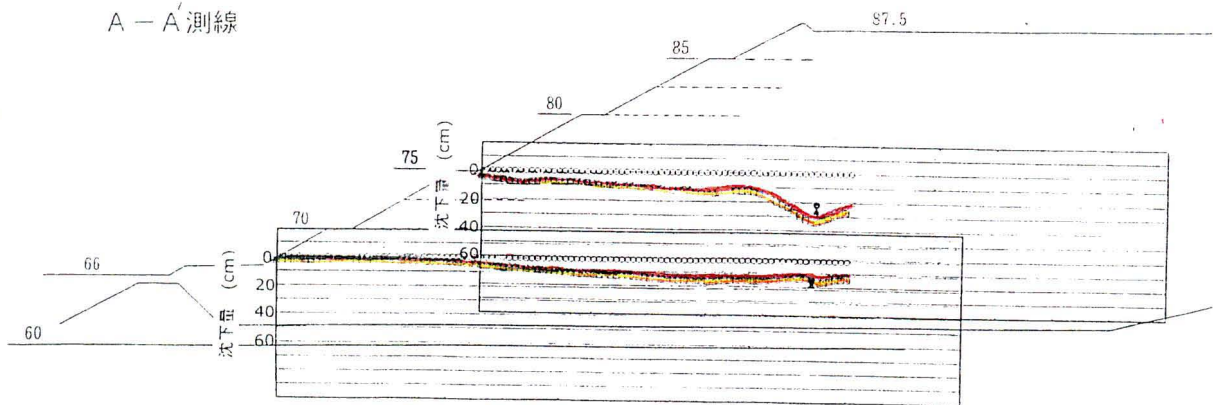
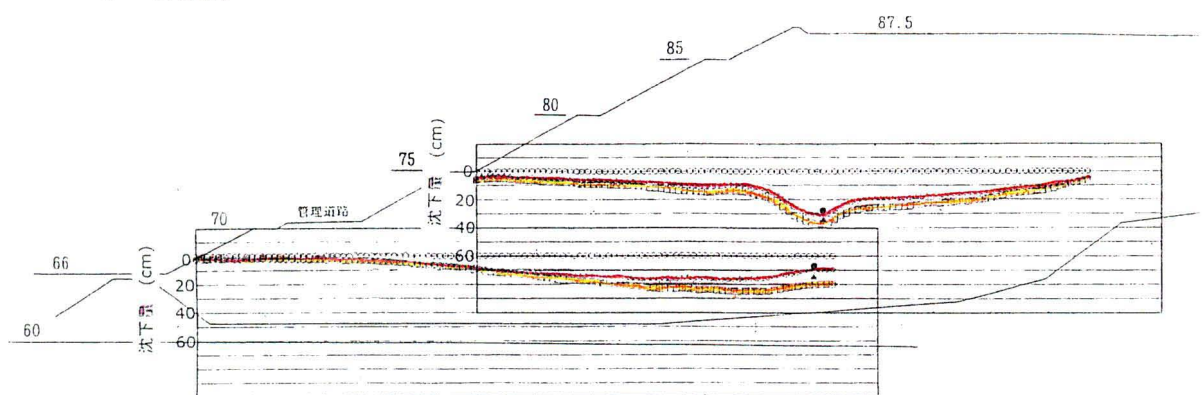


図-4 水平変位観測結果

A-A測線



B-B測線



- 初期値：平成 11 年 3 月 5 日 (75m 盤盛土終了時)
- ：平成 11 年 5 月 10～11 日測定 (85m 盤盛土終了時)
- ▲—：平成 11 年 7 月 9～10 日測定 (盛土完了時)
- ：平成 11 年 5 月 13 日 (85m 盤盛土終了時)
- ：平成 11 年 5 月 13 日 (85m 盤盛土終了時) における沈下板による沈下量
- ▲：平成 11 年 7 月 9 日 (盛土完了時) における沈下板による沈下量

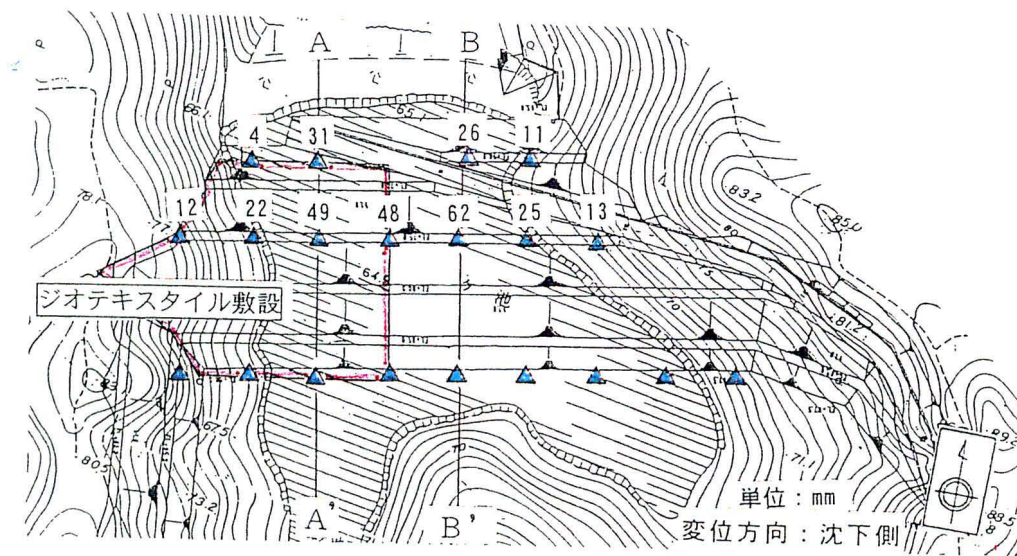


図-5 鉛直変位観測結果

4) ジオテキスタイルの張力

ジオテキスタイルの張力測定は、67m盤、75m盤、85m盤で実施された。各位置での最大引張応力を見ると、67m盤で 0.05 t f/m、75m盤で 0.06 t f/m、85m盤で 0.47 t f/m となっており、法肩に近い 85m盤が最も大きくなっている。これは地表に近いほど変形を大きく受けるためであると考えられる。しかし、ジオテキスタイルの引張強度のレベル（今回使用したジオテキスタイルは 3.5 t f/m）よりはるかに小さいことが確認され、将来の変形に対しても、大きな効果が期待できることが明らかになった。

5. 盛土施工中に実施した現位置試験結果

—地盤比抵抗分布の変化を活用した盛土基盤の地盤改良効果判定—

ここではまず、研究対象地である盛土造成地の原地盤に堆積している軟弱層の分布状況を高密度電気探査によって二次元的にどの程度、把握することが出来るかを検証する。次に、地盤改良に伴う盛土基盤の水分変化に着目して、比抵抗分布がどのように変化したかを盛土施工中及び盛土施工後の現位置調査を通して明らかし、地盤改良範囲の把握や改良効果の検討を試みることによって、高密度電気探査法の地盤改良への適用における有用性を検討する。

(1) 試験盛土基盤の地盤改良^{1) - 3)}

試験盛土が計画されている池内では、ボーリング調査、スウェーデン式サウンディング試験結果から、池底に軟弱な粘土層が分布していることが明らかになっている。その結果を図-6に示す。図より明らかなように池底堆積物である沖積粘土層が3～4mと厚く堆積しており、その下部に大阪層群の粘土層、礫層が堆積している。この沖積粘土層は後述するようにN値が1桁の軟弱層であるため、盛土施工の際、重機の使用に伴うトラフィカビリティーの確保と盛土支持地盤の強度を満足させるために地盤改良が行われた。地盤改良の範囲は、スウェーデン式サウンディング試験結果（表-2参照、測点は図-7参照）から N_{sw} 値 ≤ 30 を軟弱土層と定義した。 N_{sw} 値 ≤ 30 を示した沖積粘土層と大阪層群粘土層の一部を図-6に示す。地盤改良はこの軟弱土層を対象にして行われた。図-8に地盤改良の範囲を示す。これによると、沖積粘土層すべてと、大阪層群粘土層の一部がその対象になっ

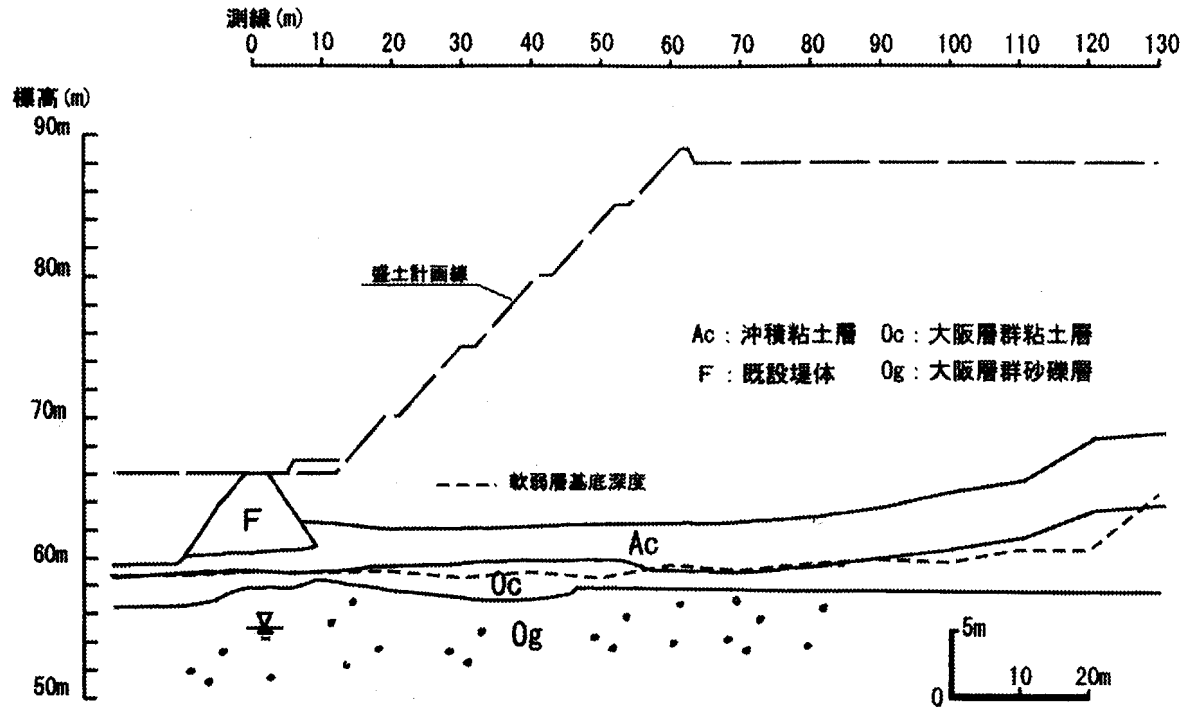
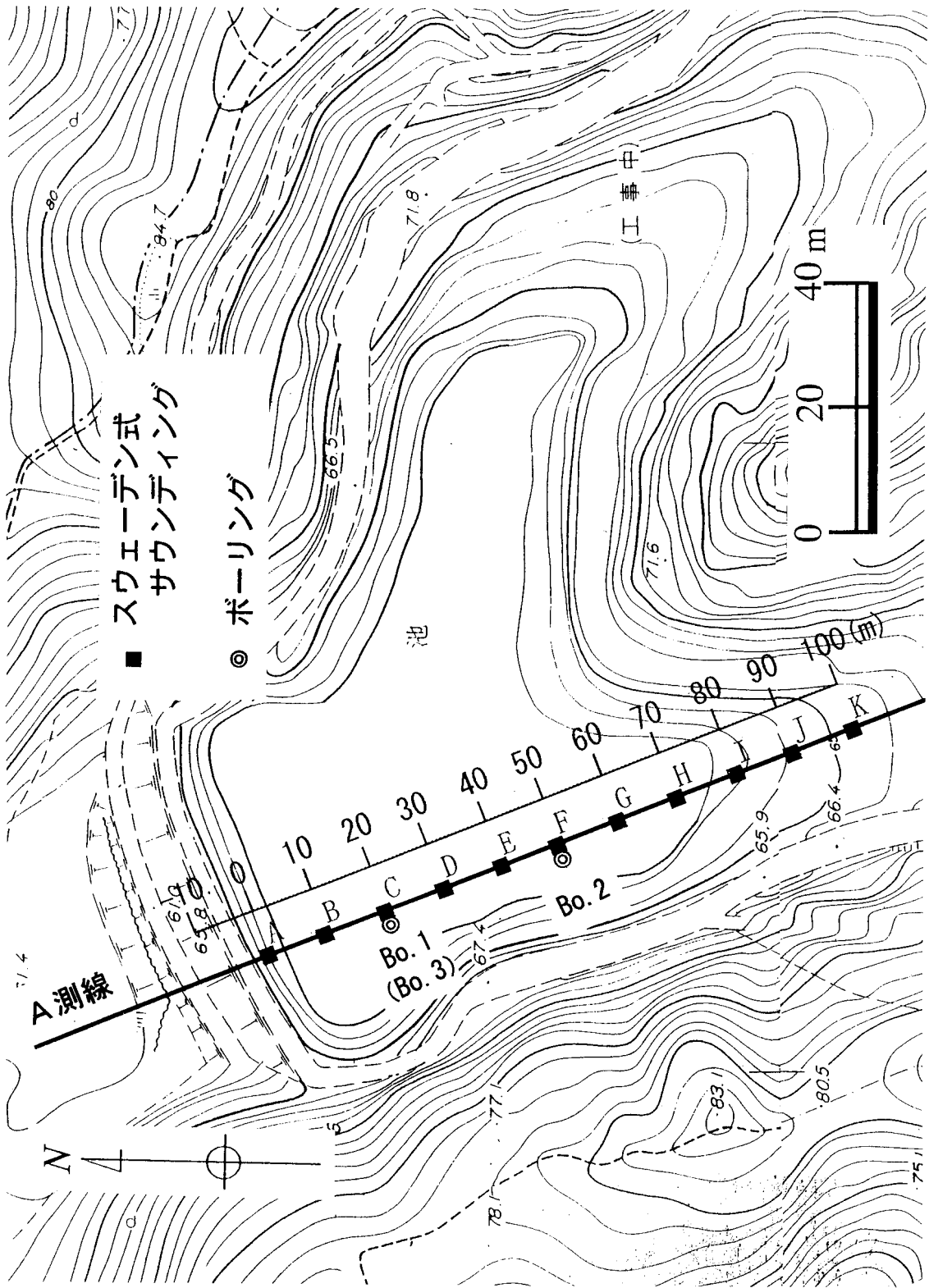


図-6 盛土基盤の地質分布図

表-2 スウェーデン式貫入試験結果

地点	地盤高 (m)	軟弱土層基底深度 (m) ($N_{sw} \leq 30$)	軟弱土の層厚 (m)
0m	62.66	58.91	3.75
10m	62.45	58.95	3.50
20m	62.45	58.95	3.50
30m	62.27	58.52	3.75
40m	62.49	58.99	3.50
50m	62.49	58.49	4.00
60m	62.69	59.34	3.35
70m	62.75	59.05	3.70
80m	63.20	59.45	3.75
90m	63.76	59.86	3.90
100m	64.84	59.59	5.25



図一七 測線及びボーリング、スウェーデン式貫入試験測点位置図

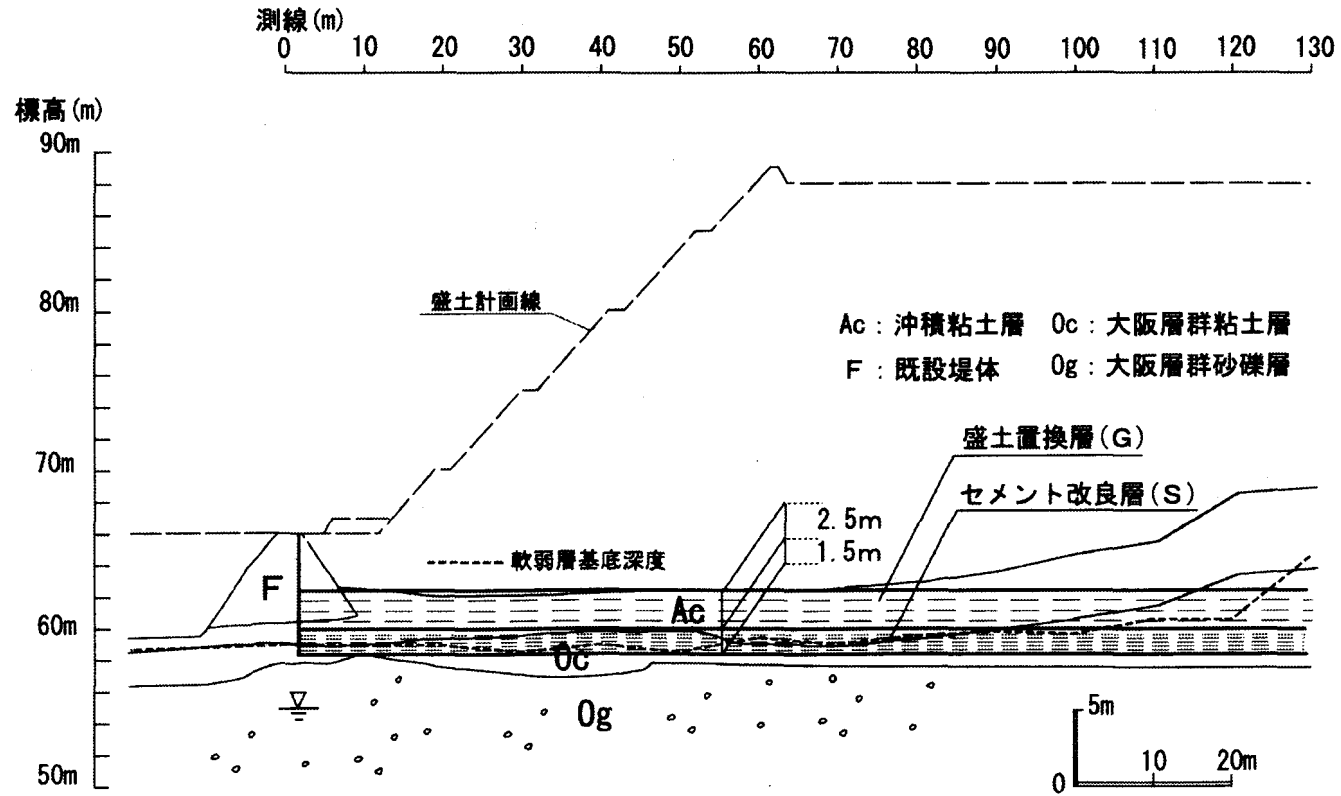


図-8 軟弱層の分布と地盤改良の範囲

ていることがわかる。

地盤改良はセメントを混入した土の地盤改良（以下、セメント改良）と盛土置換からなり、バックホーによる1回の改良深度が2.5mまでであるため、セメント改良は上部層と下部層の二回に分けて改良が行なわれた。上部層に関しては仮設のセメント改良後に盛土置換が行われた。以下に地盤改良の施工手順（図－9）を示す。

- ①上部層改良（仮設セメント改良）（図－9 (b) (c)）
- ②上部層掘削撤去（図－9 (d) (e)）
- ③下部層改良（セメント改良）（図－9 (f) (g)）
- ④上部層埋戻し（盛土置換）（図－9 (h)）

(2)試験盛土の施工方法

盛土材には主に現地造成区域内で発生する大阪層群の礫質土を使用し、現場密度は室内締固め試験から得られる最大乾燥密度の90%を基準値とし締固め管理を行っている。室内締固め試験は、造成区域内の土質の変状に対応するため基本的には10,000m³に一回の頻度で行われ、土取り場や土質の変化に応じて適宜に試験を追加している。表－3に室内締固め試験結果を示す。この表より、盛土材には、ほぼ均質な礫質土が使われているが、一部で異質な粘性土が使用されていることがわかる。現場密度試験に関しては、現場の密度が施工基準値を満足しているかを確認するために日常管理としてR I法、基準管理として砂置換法を用いている。測定の頻度については、R I計器による測定を3,000m³に一回の頻度で行い、砂置換法は10,000m³～15,000m³に一回とし、含水比測定も同時に実施している。また、R I法による密度測定に関しては、砂置換法および含水比測定結果をもとに測定結果のチェックを行うものとしている。

次に、盛土施工は、盛土材の最大粒径は10cm程度とし、まき出し厚は30cmとして重機（振動ローラー：重量10t、起振力20t）を用いて厚さ20cm以下になるまで転圧をおこない造成されている。表－4に池の部分で実施された現場密度試験結果を示す。この表より、各段階で測定された乾燥密度はすべて締固め度90%以上で行われていることがわかる。また、ほぼ均質な乾燥密度で締固められてはいるが、所々では1.6g/cm³～2.0g/cm³程度の密度差も生じている。

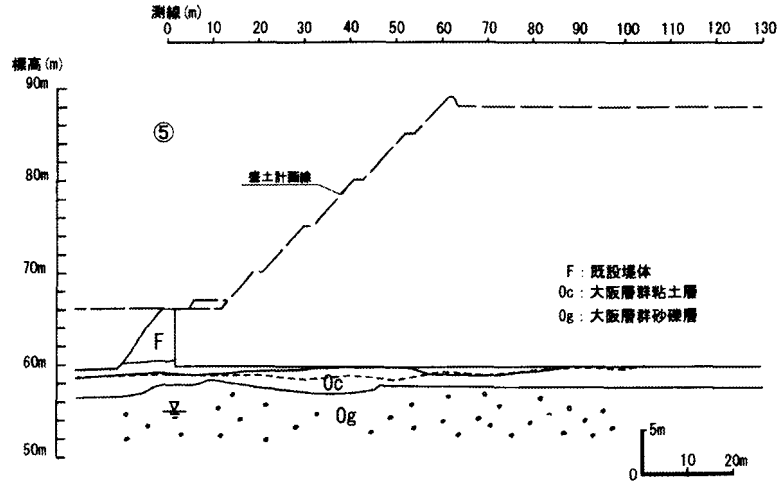


図-9 (e) 地盤改良の施工手順 ⑤

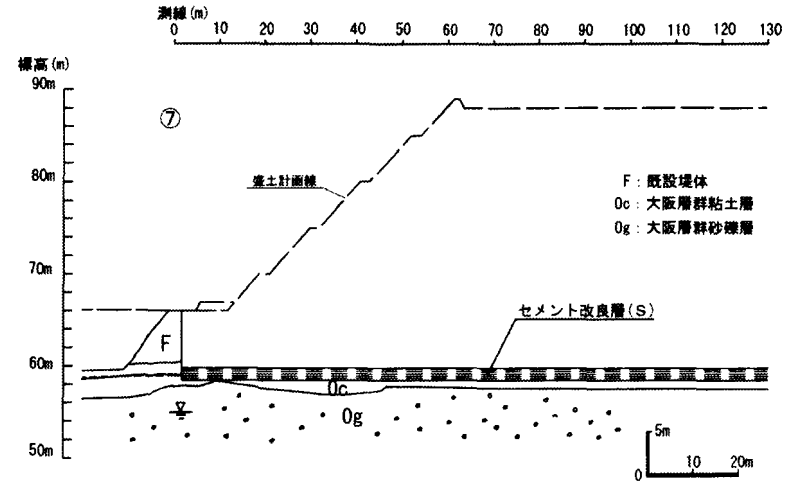


図-9 (g) 地盤改良の施工手順 ⑦

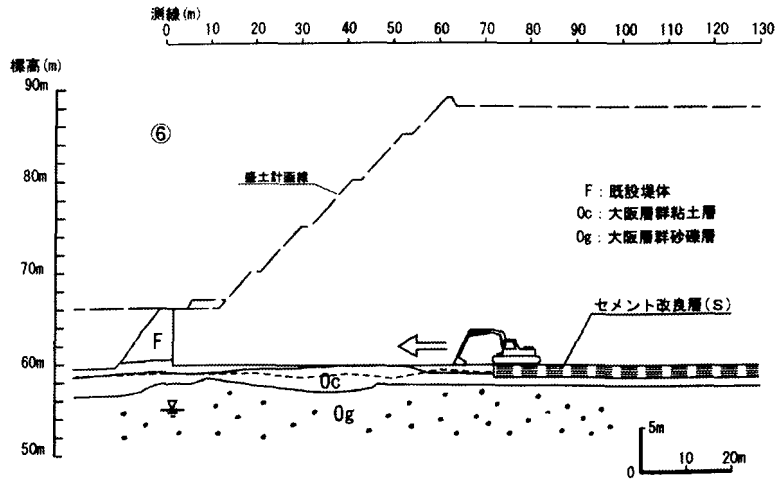


図-9 (f) 地盤改良の施工手順 ⑥

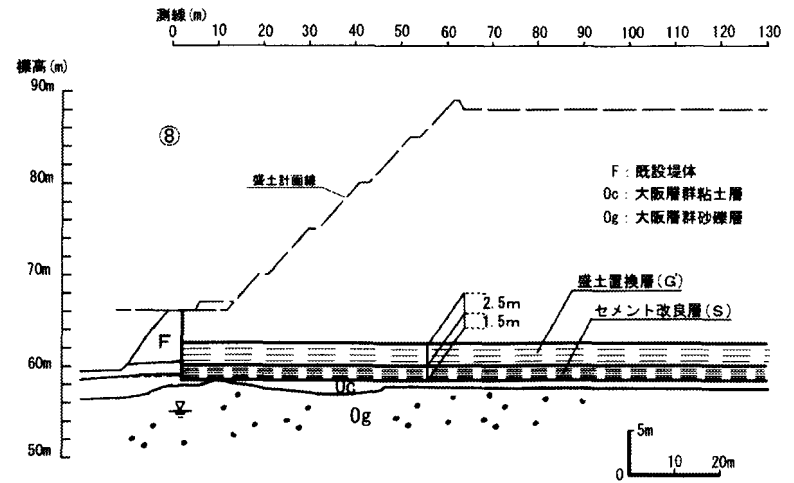


図-9 (h) 地盤改良の施工手順 ⑧

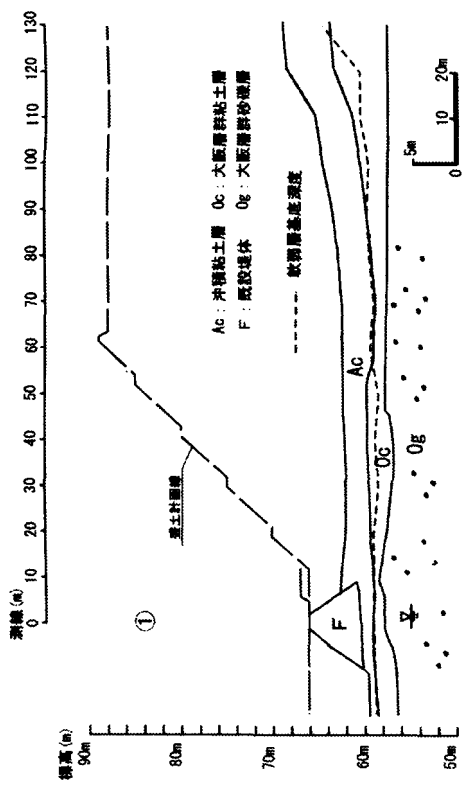


図-9 (a) 地盤改良の施工手順 ①

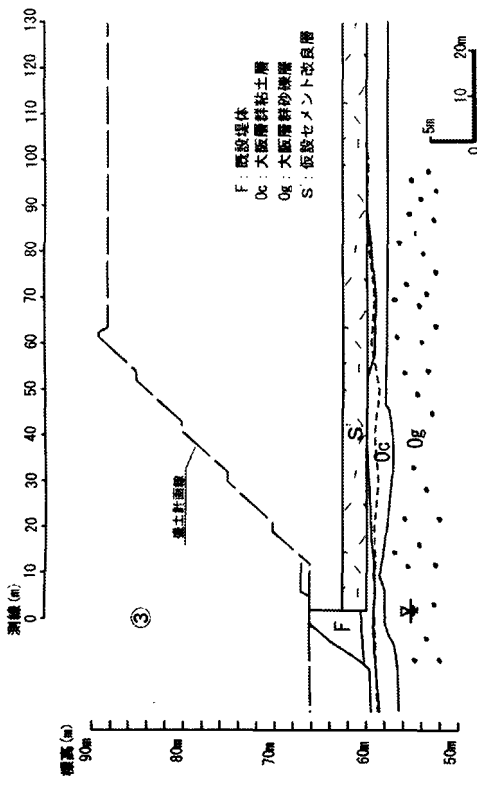


図-9 (c) 地盤改良の施工手順 ③

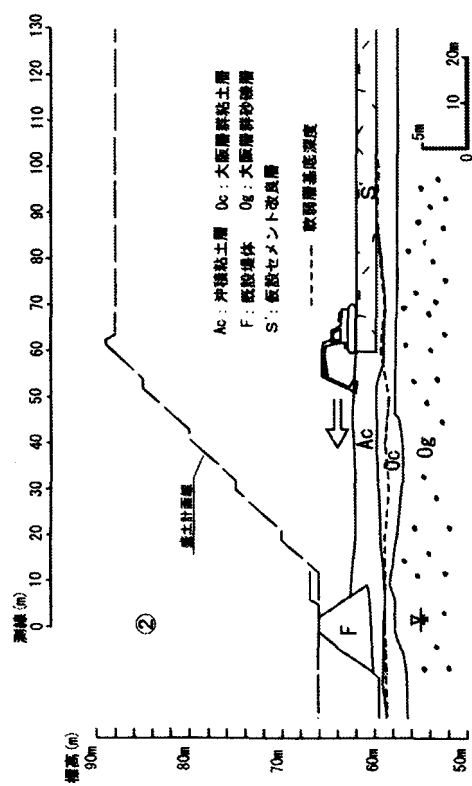


図-9 (b) 地盤改良の施工手順 ②

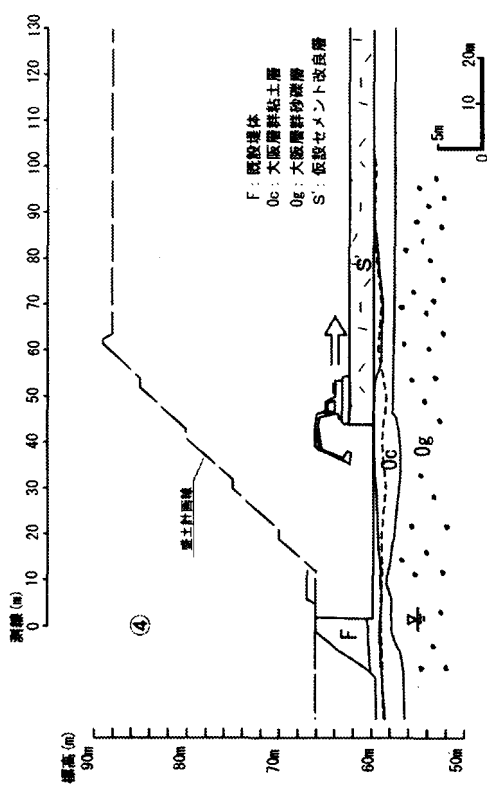


図-9 (d) 地盤改良の施工手順 ④

表-3 盛土材の室内締固め試験結果

盛土材料 No.	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	最適含水比 wopt(%)	土質	備考	盛土材料 No.	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	最適含水比 wopt(%)	土質	備考
A	1.914	12.0	礫質土		44	1.732	16.8	砂質土	
B	1.699	17.0	砂質土		45	1.979	9.6	礫質土	
1	1.960	10.2	礫混じり砂		46	1.908	11.6	礫混じり砂	
2	2.028	9.2	礫質土		47	1.773	15.3	砂質土	
3	1.973	9.2	礫質土		48	1.700	16.7	砂質土	
4	1.915	11.6	細粒分混じり砂		49	1.758	16.3	砂質土	
5	2.024	7.9	礫質土		50	1.812	13.5	砂	
6	1.713	18.4	砂質土		51	2.011	7.8	礫質土	
7	2.000	10.0	礫質土		52	2.015	7.8	礫質土	
8	1.761	14.9	砂質土		53	1.980	10.1	礫質土	
9	1.647	20.7	粘性土		54	1.956	10.6	礫質土	
10	1.692	16.2	砂質土		55	2.005	9.7	礫質土	
11	1.843	12.1	砂		56	1.983	9.8	礫質土	
12	1.566	22.8	粘性土		57	1.984	10.3	礫質土	
13	2.008	8.9	礫質土		58	1.995	9.5	礫質土	
補-1	1.735	16.9	礫混じり砂質粘土	土質が異なることによる確認試験	59	1.986	9.7	礫質土	
14	2.099	9.1	礫質土		60	1.991	10.5	礫質土	
15	1.948	11.9	粘土混じり砂礫		61	2.002	9.7	礫質土	
16	1.531	26.8	粘性土		62	2.040	9.8	礫質土	
17	1.527	24.1	粘性土	改良土をほぐしたもの	63	2.008	10.3	礫質土	
18	1.537	23.9	粘性土	改良土をほぐしたもの	64	2.028	9.9	礫質土	
19	2.085	8.6	礫質土		65	2.013	9.3	礫質土	
20	1.977	9.0	礫混じり砂		66	1.958	11.1	礫質土	
21	1.536	25.3	粘性土		67	1.828	13.1	砂	
22	1.964	11.1	礫混じり砂		68	2.004	8.8	礫質土	
23	1.925	10.9	礫混じり砂		69	2.043	8.9	礫質土	
24	2.018	8.8	礫質土		70	2.018	10.5	礫質土	
25	1.881	11.7	砂～礫混じり砂		71	2.018	9.6	礫質土	
26	1.937	10.7	礫混じり砂		72	2.024	9.8	礫質土	
27	1.921	10.3	礫混じり砂		73	2.028	9.6	礫質土	
28	1.936	9.7	礫混じり砂		74	2.089	8.7	礫質土	
29	1.774	16.7	砂質土		75	2.103	8.5	礫質土	
30	1.783	14.3	砂質土		76	2.001	9.6	礫質土	
31	1.919	11.1	礫混じり砂		77	2.011	9.2	礫質土	
32	1.932	11.3	礫混じり砂		78	2.019	9.4	礫質土	
33	1.561	21.8	粘性土		79	2.005	9.7	礫質土	
34	1.961	10.0	礫質土		80	1.994	10.1	礫質土	
35	1.943	10.2	礫質土						
36	1.998	9.5	礫質土						
37	1.997	10.1	礫質土						
38	1.964	10.2	礫質土						
39	1.974	10.0	礫質土						
40	1.923	11.7	礫混じり砂						
41	2.003	8.9	礫質土						
42	1.999	9.6	礫質土						
43	1.987	9.5	礫質土						

表-4 池部分で実施された現場密度試験結果

測定月日	標高(m)	乾燥密度(g/cm ³)	含水比(%)	締固め度(%)	盛土材料(No.)	測定月日	標高(m)	乾燥密度(g/cm ³)	含水比(%)	締固め度(%)	盛土材料(No.)
11月20日	65.00	1.909	8.1	99.1	23	1月30日	71.00	1.915	3.2	99.5	40
11月25日	65.00	1.816	8.8	96.5	25	1月30日	71.00	1.910	3.8	99.3	40
11月25日	65.00	1.836	8.3	97.6	25	2月1日	71.00	1.811	5.8	94.9	46
12月8日	67.00	1.839	3.1	94.9	28	2月22日	75.00	1.922	7.4	97.0	53
12月8日	67.00	1.872	5.6	97.5	31	2月22日	75.00	1.902	7.3	96.0	53
1月8日	67.50	1.835	7.6	93.5	34	2月22日	76.00	1.890	9.3	95.4	53
1月8日	67.50	1.841	7.4	93.8	34	2月22日	76.00	1.836	10.3	92.7	53
1月8日	67.50	1.850	7.7	94.3	34	2月23日	77.00	1.880	7.3	96.1	54
1月8日	67.50	1.912	7.3	97.5	34	2月23日	77.00	1.898	7.8	97.0	54
1月9日	68.00	1.848	8.6	95.1	35	3月2日	75.00	1.899	8.1	95.7	56
1月9日	68.00	1.880	9.0	96.7	35	3月2日	77.00	1.892	8.1	95.4	56
1月9日	68.00	1.965	6.7	101.1	35	3月2日	77.00	1.902	8.5	95.9	56
1月9日	68.00	1.899	7.7	97.7	35	3月2日	77.00	1.889	8.5	95.2	56
1月11日	68.50	1.874	8.2	93.7	36	3月6日	80.00	1.858	8.7	93.6	57
1月11日	68.50	1.862	8.8	93.1	36	3月6日	80.00	1.826	8.3	92.0	57
1月11日	68.50	1.822	7.3	91.1	36	3月24日	77.00	1.944	7.4	97.6	60
1月11日	68.50	1.877	7.5	93.9	36	3月29日	77.00	1.960	7.9	98.4	60
1月12日	68.50	1.938	7.4	97.0	37	3月29日	77.50	1.901	7.9	95.4	60
1月12日	68.50	1.883	7.2	94.2	37	4月27日	82.00	1.897	5.8	94.6	68
1月12日	68.50	1.844	7.9	92.3	37	4月27日	82.00	1.881	6.3	93.8	68
1月13日	69.00	1.934	7.4	98.4	38	4月27日	82.00	1.939	5.5	96.7	68
1月13日	69.00	1.917	7.9	97.6	38	4月27日	83.00	1.959	5.7	97.7	68
1月13日	69.00	1.877	7.4	95.5	38	4月30日	85.00	1.974	8.4	98.5	68
1月14日	69.00	1.799	8.9	91.1	39	4月30日	85.00	2.032	7.5	101.3	68
1月14日	69.00	1.827	8.2	92.5	39	4月30日	85.00	2.023	7.2	100.9	68
1月18日	69.50	1.872	6.5	97.3	40	5月17日	86.00	2.030	5.8	100.0	73
1月18日	69.50	1.881	6.8	97.8	40	5月19日	86.50	2.020	8.2	96.6	74
1月19日	69.50	1.831	8.6	91.4	41	5月19日	86.50	2.002	7.9	95.8	74
1月19日	69.50	1.874	8.1	93.5	41	5月21日	86.50	2.057	8.2	97.8	75
1月19日	69.50	1.872	6.9	93.4	41	5月26日	87.00	1.954	8.2	97.6	76
1月19日	69.50	1.822	8.8	90.9	41	5月28日	87.00	1.949	8.2	96.9	77
1月21日	70.00	1.822	8.6	91.1	42	5月31日	87.50	1.905	8.2	94.3	78
1月21日	70.00	1.817	8.1	90.8	42	6月2日	87.50	1.957	6.0	96.9	78
1月21日	70.00	1.911	7.0	95.5	42	6月5日	87.50	1.952	8.7	97.3	79
1月21日	70.00	1.912	7.7	95.6	42	6月7日	88.00	1.951	8.6	97.3	79
1月22日	70.00	1.909	7.6	96.0	43						
1月22日	70.00	1.866	7.1	94.9	43						
1月22日	70.00	1.866	8.0	93.9	43						
1月22日	70.00	1.938	6.8	97.5	43						
1月23日	70.00	1.846	12.7	95.9	40						
1月23日	70.00	1.724	18.9	99.5	44						
1月25日	70.50	1.581	24.7	91.2	44						
1月25日	70.50	1.652	19.7	95.3	44						
1月28日	70.50	1.884	7.9	95.1	45						
1月28日	70.50	1.897	8.2	95.8	45						
1月28日	70.54	1.873	7.3	94.6	45						

(3)高密度電気探査測線の設定

まず、軟弱な粘土層が分布している池内にある盛土基盤の地盤比抵抗値が地盤改良に伴って、どのように変化していくかを把握するため、前節の図-7に示した測線に沿って、盛土基盤の地盤改良前後において、以下のような高密度電気探査を実施した。なお、本研究では、二極法電極配置を用いて見掛け比抵抗分布を高密度に測定し、比抵抗映像法による非線形二次元インバージョン解析 (inversion analysis) ^{4) -6)} による最適化解析によって真の比抵抗分布を得た。以下に地盤改良の順序に従って実施した探査の概要を示す。

A) 地盤改良前の軟弱地盤における高密度電気探査 (以下, A 1 探査とする)

(図-10(a))

- ①測線：測線長56m, 電極数57点, 電極間隔1m, 探査深度15m, 測線座標-1mより測定開始
- ②対象地盤：沖積粘土層 (Ac), 大阪層群粘土 (Oc), 大阪層群砂礫層 (Og) と池外の既設堤体 (F)

B) 軟弱層上部仮設セメント改良後における高密度電気探査 (以下, A 2 探査とする)

(図-10(b))

- ①測線：測線長63m, 電極数64点, 電極間隔1m, 探査深度15m, 測線座標1m地点より測定開始
- ②対象地盤：仮設のセメント改良層 (S'), 未改良沖積粘土層 (Ac), 未改良大阪層群粘土層 (Oc), 大阪層群砂礫層 (Og)

C) 軟弱層上部仮設改良層掘削撤去, 軟弱層下部セメント改良後における高密度電気探査

(以下, A 3 探査とする) (図-10(c))

- ①測線：測線長63m, 電極数64点, 電極間隔1m, 探査深度15m, 測線座標1m地点より測定開始
- ②対象地盤：セメント改良層 (S), 未改良大阪層群粘土層 (Oc), 大阪層群砂礫層 (Og)

D) 盛土基盤地盤改良後3.5mの盛土造成時における高密度電気探査

(以下, A 4 探査とする) (図-10(d))

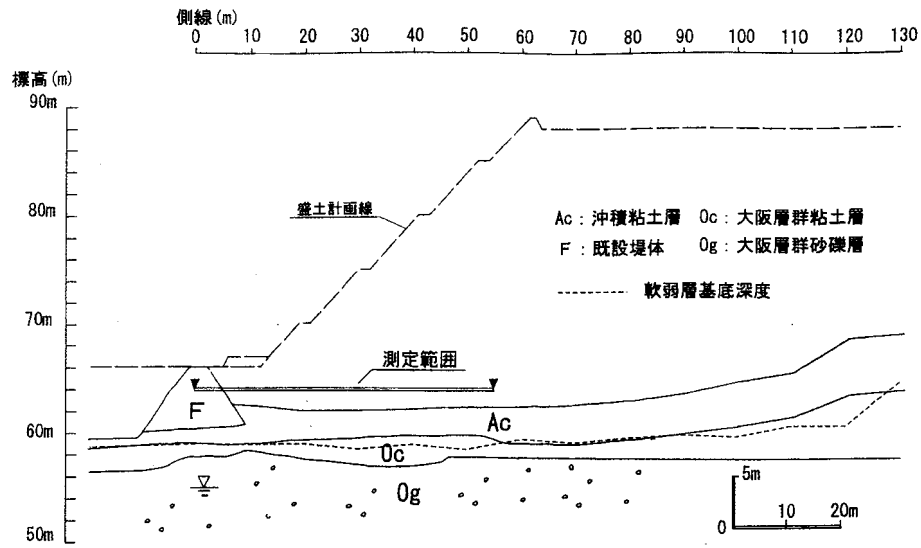


図-10 (a) A1 測線探索概要図

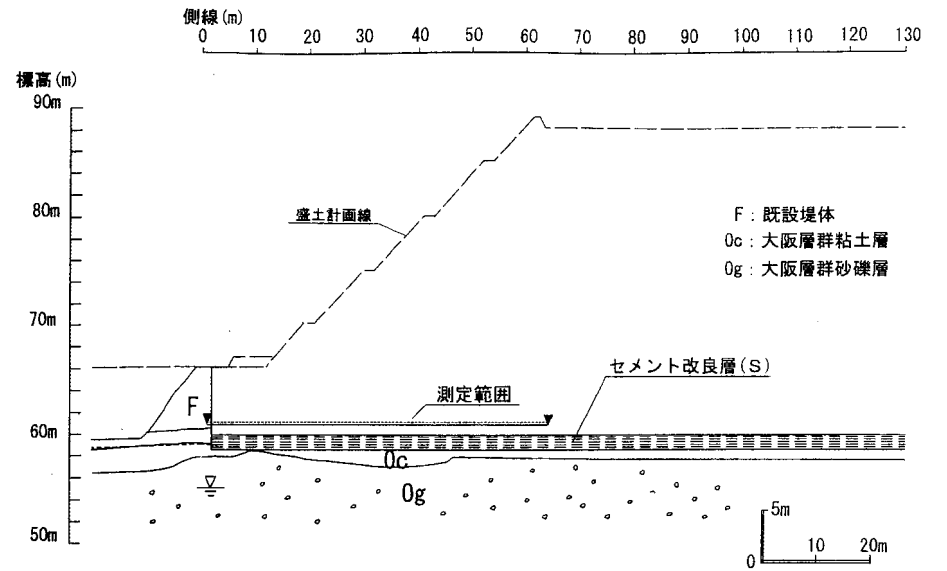


図-10 (c) A3 測線探索概要図

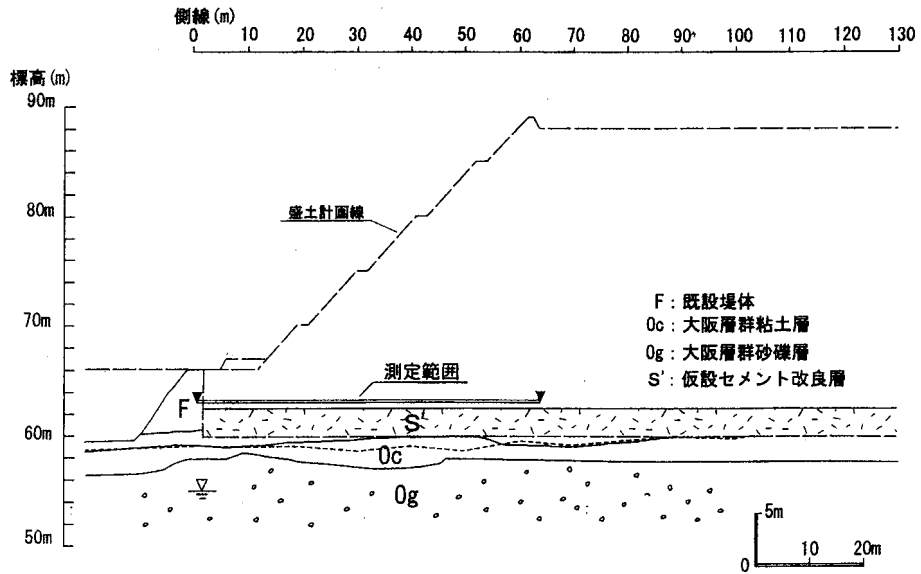


図-10 (b) A2 測線探索概要図

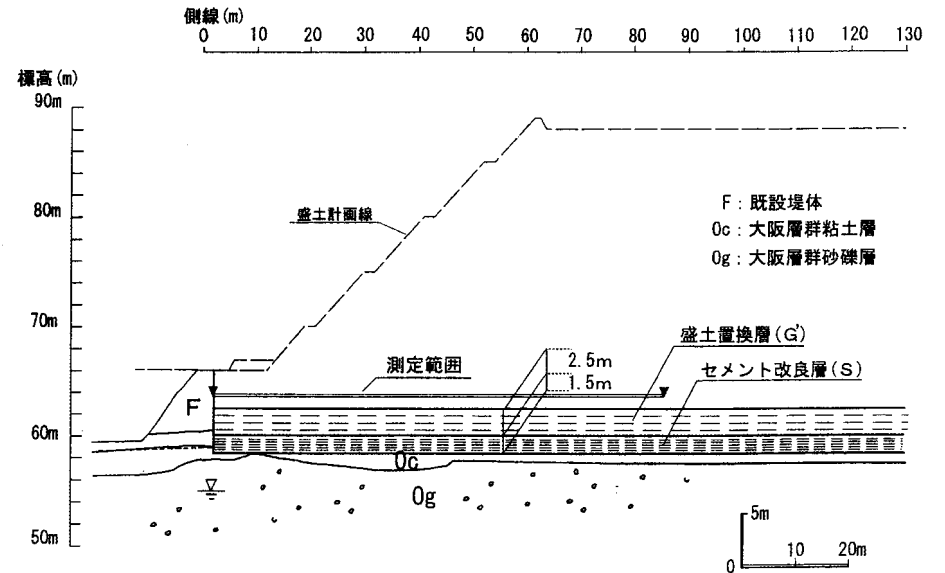


図-10 (d) A4 測線探索概要図

①測線：測線長84m，電極数51点，電極間隔1.5m，探査深度22.5m，測線2m地点より測定開始

②対象地盤：盛土層（B），盛土置換層（B'），セメント改良層（S），未改良大阪層群粘土層（Oc），大阪層群砂礫層（Og）

(4)探査結果

ここでは、各探査で得られた地盤比抵抗分布結果を用いて、比抵抗二次元分布断面図および比抵抗二次元分布コンター図を作成し、地下地盤の二次元的な比抵抗分布を把握する。また、より詳細に鉛直方向の地盤比抵抗分布の変化を把握するパラメータとして、深度方向（図-11）の比抵抗変化率を式(1)で定義し、各深度における比抵抗値の鉛直方向の変化の様子を検討した。

$$\Psi(z_n + \frac{z_{n+1} - z_n}{2}) = \frac{R(z_{n+1}) - R(z_n)}{R(z_n)} \quad (1)$$

ここで、 $\Psi(z_n + \frac{z_{n+1} - z_n}{2})$ ：深度 $z_n + \frac{z_{n+1} - z_n}{2}$ の比抵抗変化率

$R(z_n)$ ：深度 z_n の比抵抗値（ Ωm ）

A)A1探査結果

まず、盛土基盤を対象として地盤改良前の軟弱層が分布している、換言すれば施工前で行ったA1探査の測線配置状況を写真-1に示す。さらに得られた探査結果を用いて、A1探査の比抵抗二次元分布断面図を図-12(a)に、コンター図を図-12(b)に、比抵抗変化率図を図-13に示す。なお、図-12(a)中の地層境界線は、既存のボーリング調査やスウェーデン式サウンディング試験など各種調査結果から得られている情報を用いた。また、A1探査と同じ時期に測線上の20m、50m地点で行われたボーリング調査結果（ボーリング位置は図-7参照）と、同地点で求められた鉛直方向の比抵抗値と比抵抗変化率を図-14、15に示す。

図-12(a)を見ると、ボーリング結果のN値から軟弱と判定されたAc（沖積粘土）層は、比抵抗値が35 Ωm 以下の青色系統の色で示されることがわかる。加えて、このAc層は水平状に堆積していることが、比較的明瞭に把握でき、図-6に示したボーリングやスウェーデン式貫入試験結果によるものと大差ないことが確認できた。しかし、測線20m～40

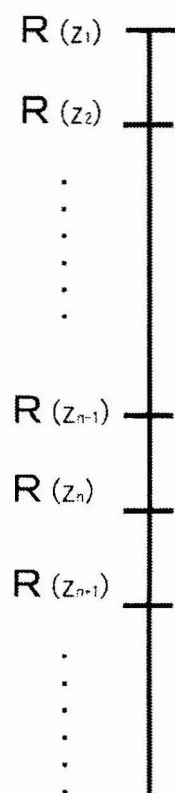


図-11 深度方向の比抵抗変化率の定義説明図



写真-1 A1 測線探索状況

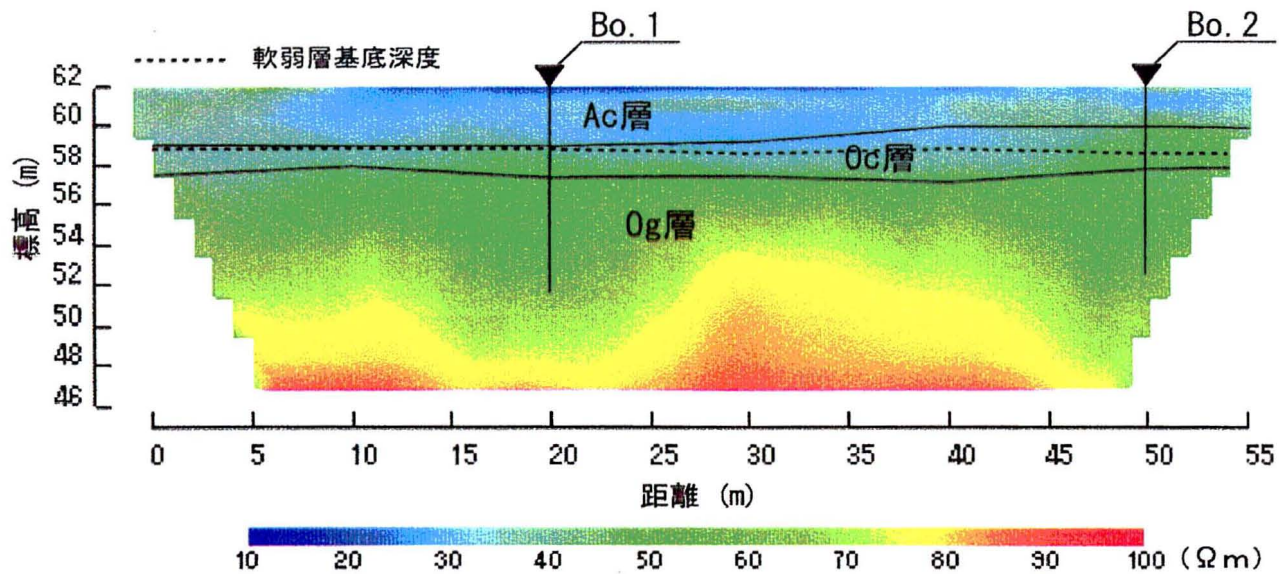


図-12 (a) 二次元比抵抗分布断面図 (A1 測線)

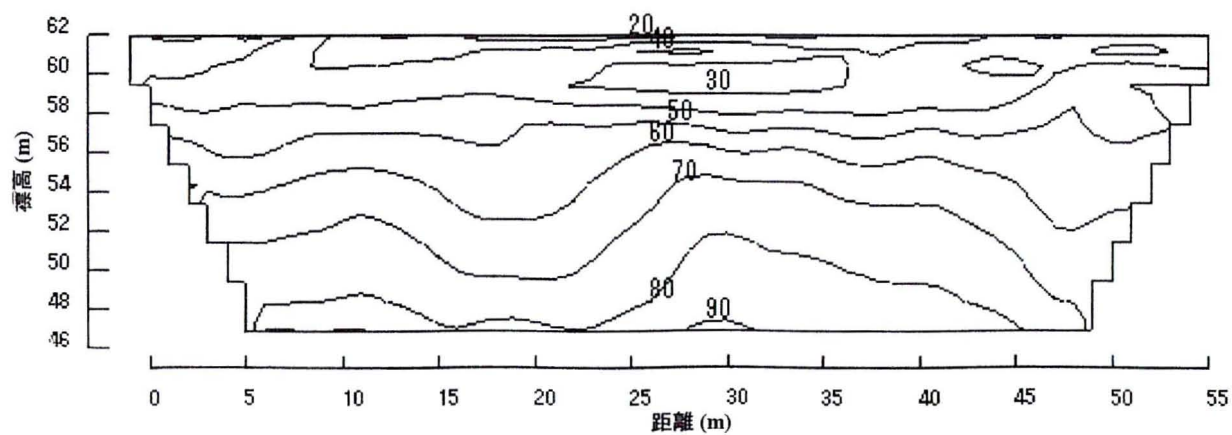


図-12 (b) 比抵抗値コンター図 (A1 測線)

m付近ではAc層の下部からOc層の上部にも青色系統の低い比抵抗分布が見られる。これは、図-12(b)のコンター図においても同様に、測線上25mから35mに比抵抗値30Ωm以下の低比抵抗分布として把握できる。図-14よりAc層は比抵抗値35Ωm前後であるため、この部分もOc層ではあるが、一部軟弱化しているものと推定される。なおこのOc層の一部分は地盤改良の範囲に入っている。このことより、比抵抗値は軟弱層の判定には活用できるが、物理的な調査から求められる土層区分とは関係がないことが推定できる。

また、図-12(a)ではOc層下部からOc層とOg層境界にかけて同じ緑色系統の色で表され、Oc層とOg層境界は比抵抗値では明確に把握することはできない。これは、図-12(b)のコンター図においても、Oc層とOg層境界よりも上部の標高58m~59mでコンター線が密になっていることから明らかである。一方、図-13の変化率図の比抵抗変化率においては、軟弱層境界が比抵抗変化率の非常に大きくなる点として把握されることが明らかになった。しかし、Ac層とOc層の境界と同様に、Oc、Og層の境界は判然としないことも図-13から明らかになった。

また、Og層内では比抵抗値が約50Ω~90Ωm程度で、深度が増すにつれ比抵抗値は高くなる傾向がある(図-14、15参照)。一方、地下水位との関係では、この場所ではOg層内に地下水位があるが、図-13の変化率図をみると地下水面上下では比抵抗値変化傾向に大きな異常は見られなかった。図-3に示したように、ボーリング孔1では、降雨量に関わらず孔内水位はほぼ一定であるため、ボーリング調査により求められた孔内水位は、実状を示したものであるかどうか疑わしい。

次に図-14、15において、測線20mと50m地点で得られたN値と比抵抗値および比抵抗変化率を比較する。これらの図では、N値が増すにつれて概して比抵抗値は高くなる傾向にあるが、N値と比抵抗値ではそれぞれの鉛直方向変化率の傾向が異なる。N値はOc、Og層の境界付近で急激に大きくなるに対し、比抵抗値は同じ粘土層内で正や負の大きな変化率を示し(図-13では軟弱層の境界で変化率が最大になる)ている。この理由は、N値は地盤の貫入抵抗として力学的に定義されるが、比抵抗値は地盤内の電気抵抗を示すため、土質、空隙率、土中の水質、含水状態の違いなど多くの状態要因に影響され、力学的な特性とは関係が密ではないためと考えられる。このため、比抵抗値の変化が地盤内の硬さを示すものではないと言える。

以上のことよりA1探査結果として得られたことを以下に列挙する。

①比抵抗値が35Ωm以下の低い比抵抗分布は軟弱なAc層を示し、これは、ほぼ水平に堆

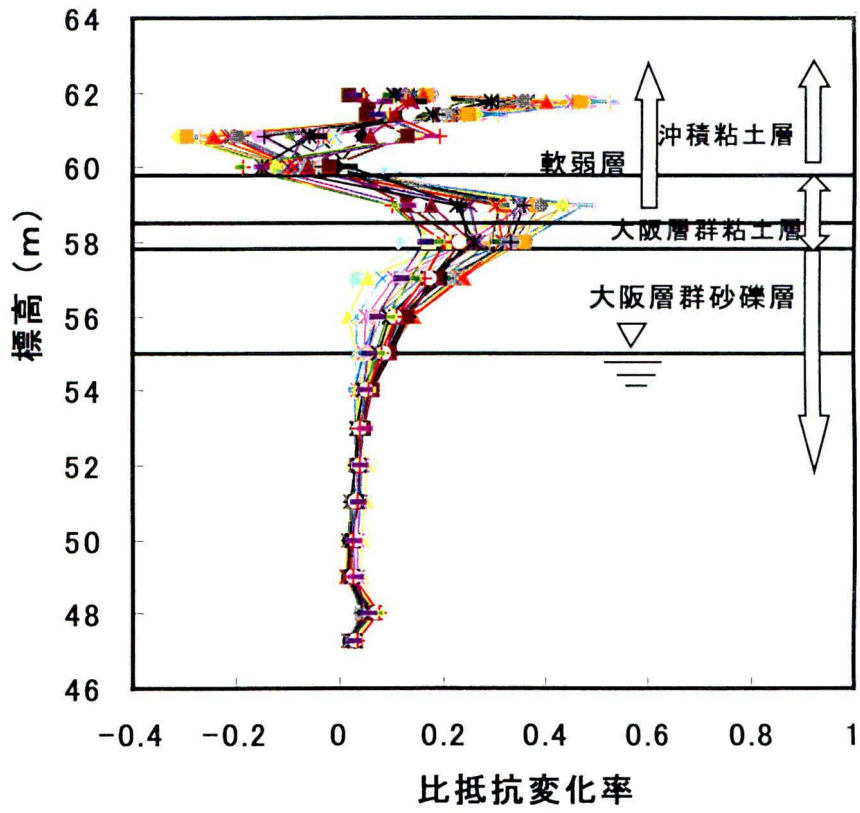


図-13 比抵抗変化率図 (A1 測線)

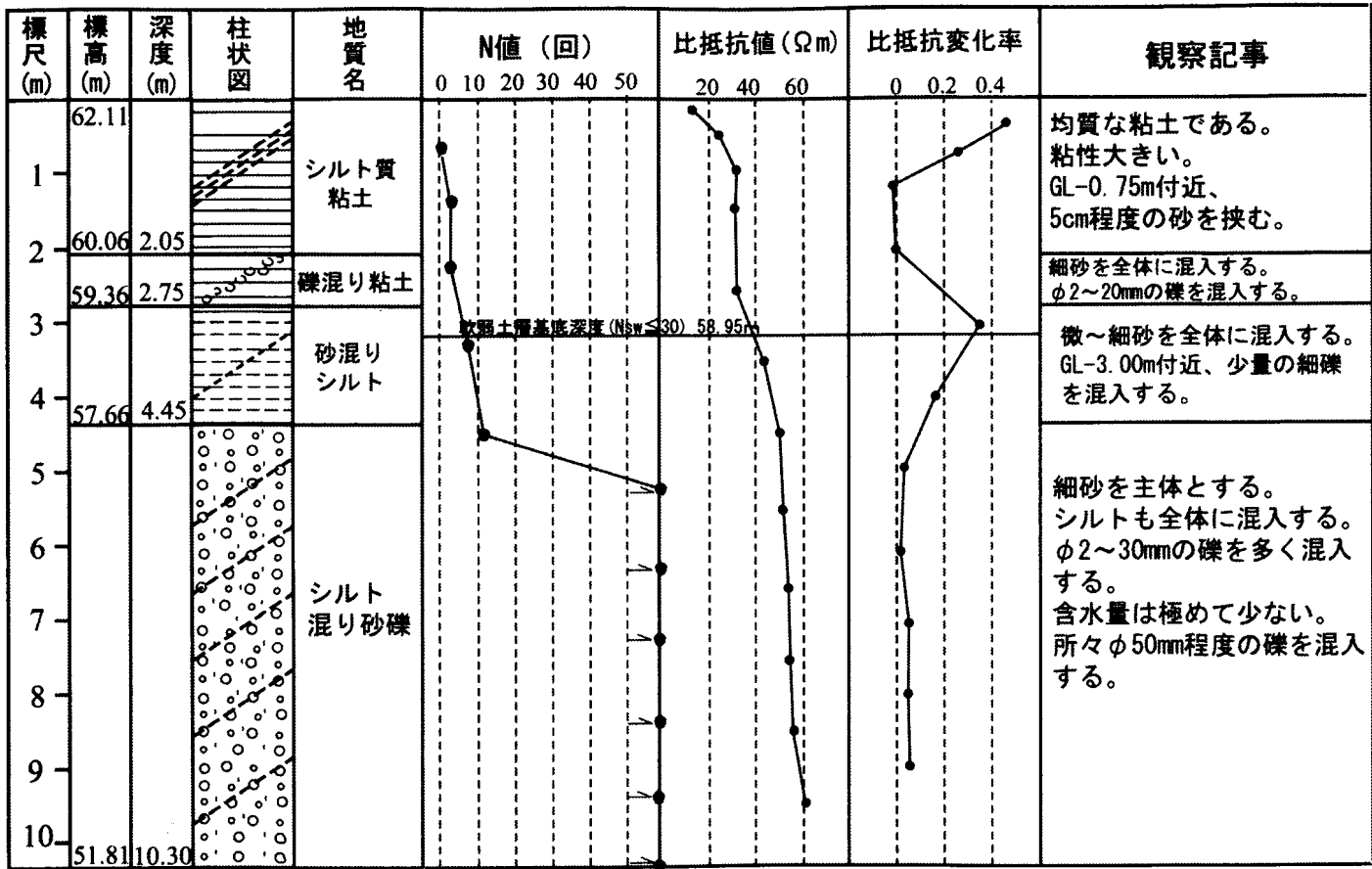


図-14 ボーリング柱状図 (Bo.1)

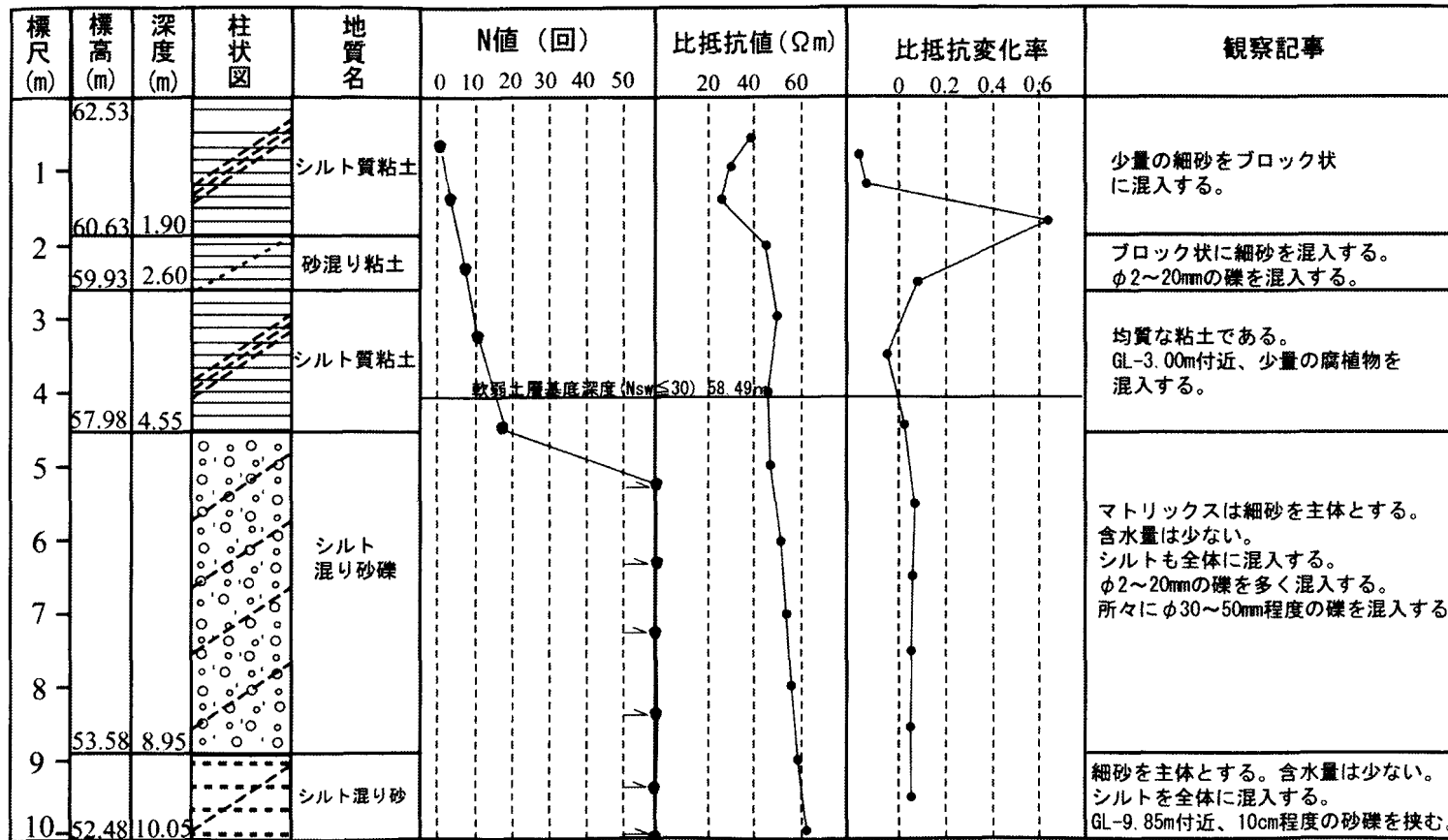


図-15 ボーリング柱状図 (Bo.2)

積していることが比抵抗値からも確認できた。

- ②測線20m～35m付近のAc層の下部からOc層の上部にわたって比抵抗値30Ωm以下の低い比抵抗分布が見られたが、これはボーリング調査やスウェーデン式貫入試験から求められた軟弱層のものと一致する。これより、比抵抗分布でも軟弱層の分布範囲が求められる可能性があることがわかった。
- ③ボーリング調査やスウェーデン式貫入試験から求められた地層境界は、比抵抗値やその変化とは関係がないことが明らかになった。
- ④Og層では比抵抗値が約50Ω～90Ωm程度で、深度が増すにつれ比抵抗値は高くなる傾向がある。
- ⑤地下水面下では比抵抗値変化傾向に大きな異常は見られずに、ほぼ一様な変化傾向を示していた。しかし、この地下水面が土中の自由水面を示しているか否かは不明である。
- ⑥N値が増すにつれ、比抵抗値は高くなる傾向にあるが、N値と比抵抗値では鉛直方向の変化の傾向が異なる。これは、比抵抗値の変化は地盤内の力学的な硬さを示すものではなく、地盤内の土質、空隙、水質、含水状況など多くの状態要因の影響を受けているためと考えられる。

B)A 2 探査結果

軟弱層の上部2.5mに仮設のセメント改良が行なわれた後に実施したA 2探査の測線配置状況を写真－2に示す。次に、A 2探査の比抵抗二次元分布断面図を図－16(a)に、コーナー図を図－16(b)に、比抵抗変化率図を図－17に示す。また、各探査時に採取した地表面の自然含水比を表－5に示す。

表－5より、A 2探査はA 1探査時に比べ地表面の含水比は大きく低下していることがわかる。しかし、A 2探査は仮設のセメント改良後に直ちに実施した探査であり、測線30m付近など所々で、高い含水比を示している。A 2探査時の状況を示した写真－3からもわかるように、この時点ではセメントがまだ完全には固化していない状態であることがわかる。一般に、高い含水比の粘土層にセメントを混入すると、セメントに含まれる電解質の溶出により、電気伝導度が増し比抵抗値は一時的に低下するが、セメントの固化に伴う含水比の低下により比抵抗値は次第に上昇すると考えられている。

図－16(a)によると仮設のセメント改良層(S'層)において、測線10m～40m付近で



写真-2 A2測線探査状況

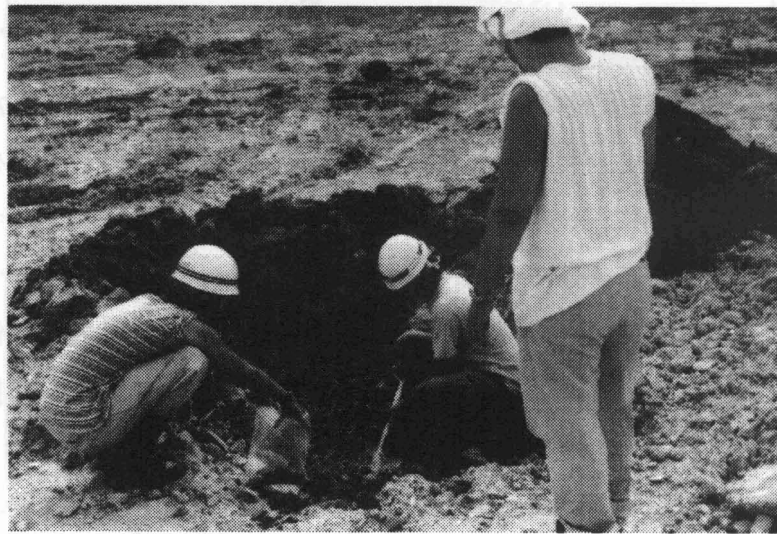


写真-3 セメント混入時の地盤の状況 (A2 探査時)

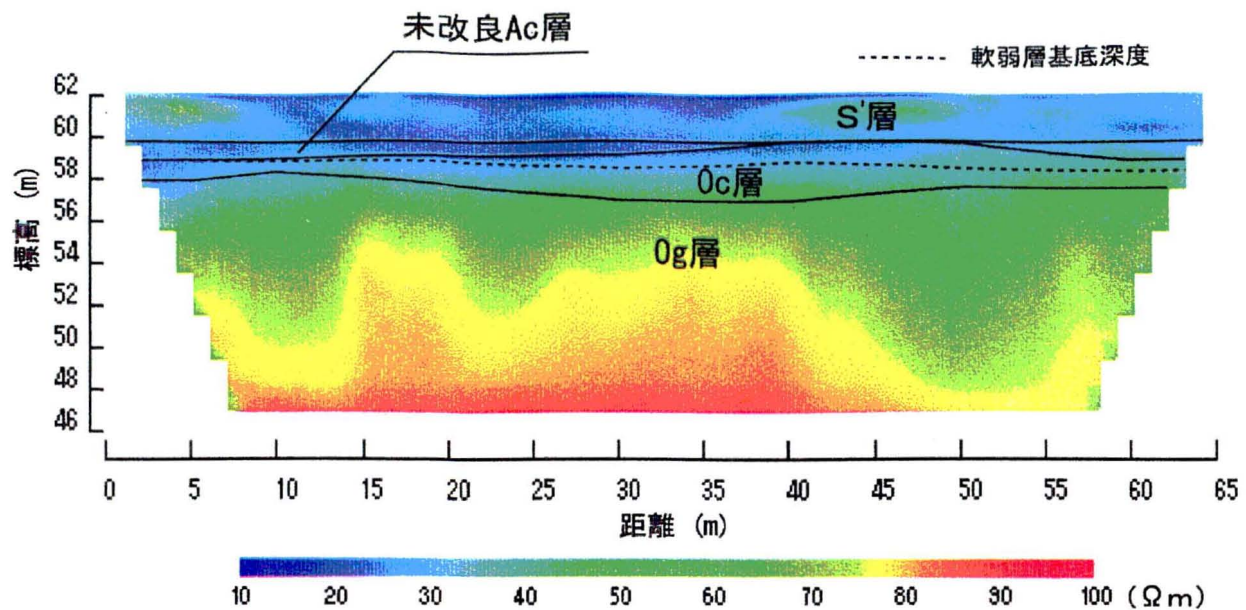


図-16 (a) 二次元比抵抗分布断面図 (A2 測線)

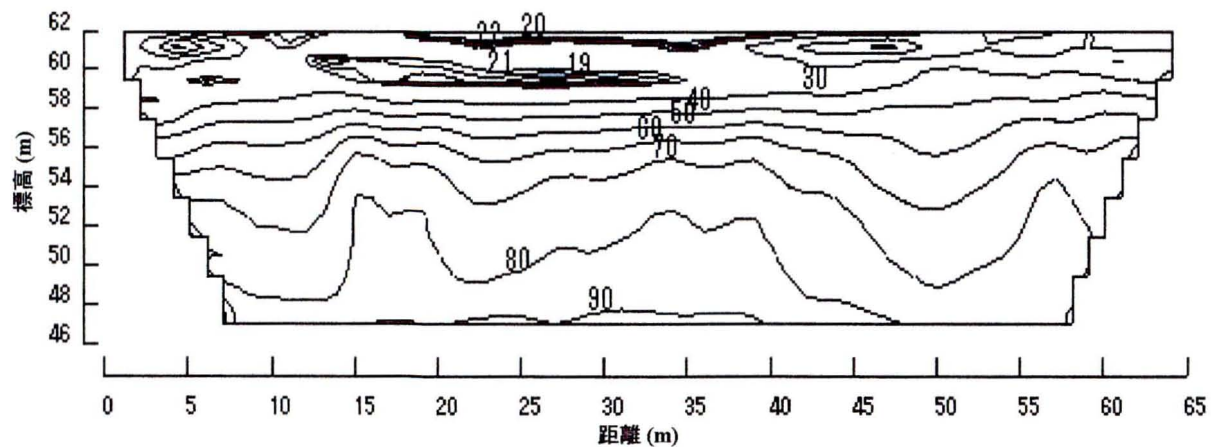


図-16 (b) 比抵抗値コンター図 (A2 測線)

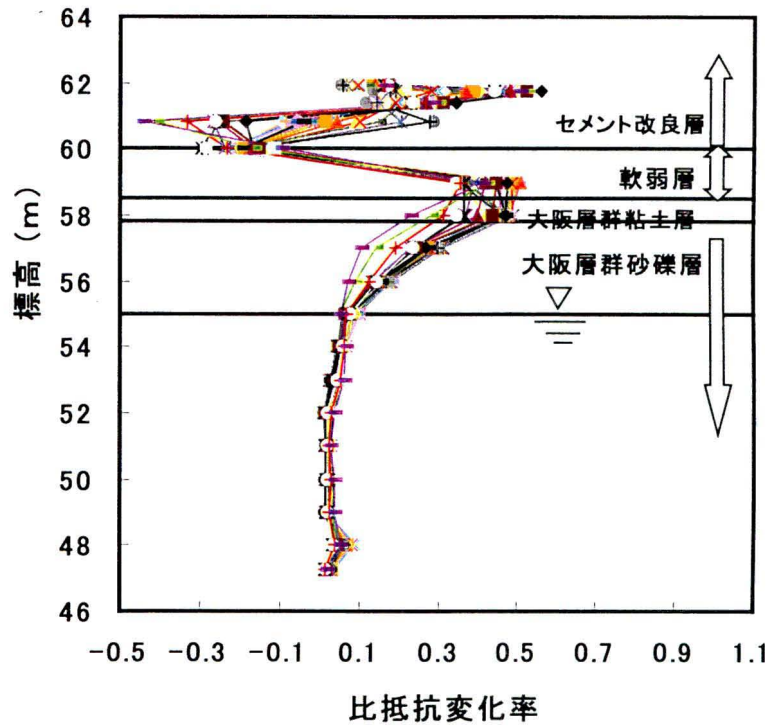


図-17 比抵抗変化率図 (A2 測線)

表-5 地表面の含水比測定結果

A1 探査	地点	0m	10m	20m	30m	40m	50m	57m
	含水比 w (%)	23.68	26.68	120.13	97.35	111.01	32.00	58.86
A2 探査	地点	7m	30m	60m				
	含水比 w (%)	18.48	42.16	33.06				
A3 探査	地点	19m	37m	65m				
	含水比 w (%)	31.88	32.28	32.78				
A4 探査	地点	15m	30m	45m	60m	75m		
	含水比 w (%)	11.55	7.64	11.12	9.09	9.77		

は含水比が高く、完全にセメントが固化していないと考えられる部分では、上述した理由により、比抵抗値が $20\Omega\text{m}$ と非常に低い値を示している。これは、A1 探査時のAc層の比抵抗値 ($35\Omega\text{m}$ 以下) よりも低い値となっている。また、この図よりS' 層と未改良の軟弱層の境界付近では、特に低い青色系統の比抵抗値が分布している。これは、図-16 (b) のコンター図においても、比抵抗値が $20\Omega\text{m}$ 以下の、特に低い比抵抗分布として確認できる。図-17 の変化率図でも同様に、S' 層と未改良の軟弱層の境界は負に大きな変化率、つまり比抵抗値が大きく低下する境界として明確に確認できる (これは軟弱層がまだ残っていることを示す)。また、未改良の軟弱層と改良を必要としない硬いOc層の境界で正に大きな変化率、つまり比抵抗値が大きく上昇する境界として把握される (これは軟弱層と非改良層の境界として判読できる)。このように、軟弱層の判定には、比抵抗値が活用できると考えられる。

Og層内では、A1 探査時とほぼ同様の比抵抗分布を示し、図-17 から地下水位下では、一定の変化率を示し、大きな変化は見られないことも明らかになった。

以上のことよりA2 探査結果として得られたことを以下に列挙する。

- ①S' 層で、完全にセメントが固化していない部分では、比抵抗値が $20\Omega\text{m}$ ほどの非常に低い値を示しており、A1 探査時のAc層の比抵抗値よりも低い値を示していた。
- ②S' 層と未改良の軟弱層の境界付近には、 $20\Omega\text{m}$ 以下の特に低い比抵抗分布が存在することが確認され、変化率図においても同様に、比抵抗値が大きく低下する境界として把握できる。このことより、A2 断面図内において、 $10\text{m}\sim 35\text{m}$ 付近に改良が必要な軟弱層が、まだS' 層の下に堆積していることが比抵抗値を用いて二次元的に確認できることが明らかになった。
- ③未改良の軟弱層と改良を必要としない境界ではA1 探査時と同様、正に大きな変化率、つまり比抵抗値が大きく上昇する境界として把握された。
- ④Og層内では、A1 探査時とほぼ同様の比抵抗分布を示し、地下水面下では、一定の変化率を示し、大きな変化は見られなかった。

C) A3 探査結果

仮設セメント改良層 (S' 層) を 2.5m 掘削し撤去した後、軟弱層の下部 1.5m を対象として実施されたセメント改良後のA3 探査の測線配置状況を写真-4に示す。A3 探査の比抵抗二次元分布断面図を図-18 (a)に、コンター図を図-18 (b)に、比抵抗変化率図

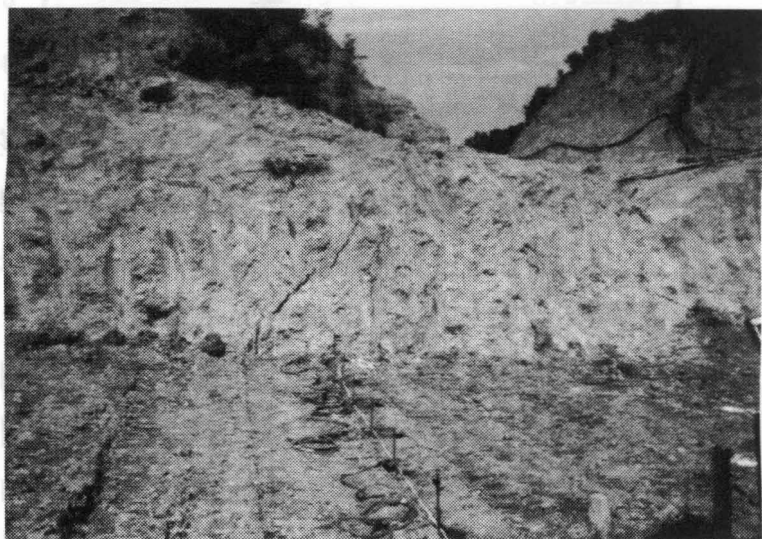


写真-4 A3 測線探査状況

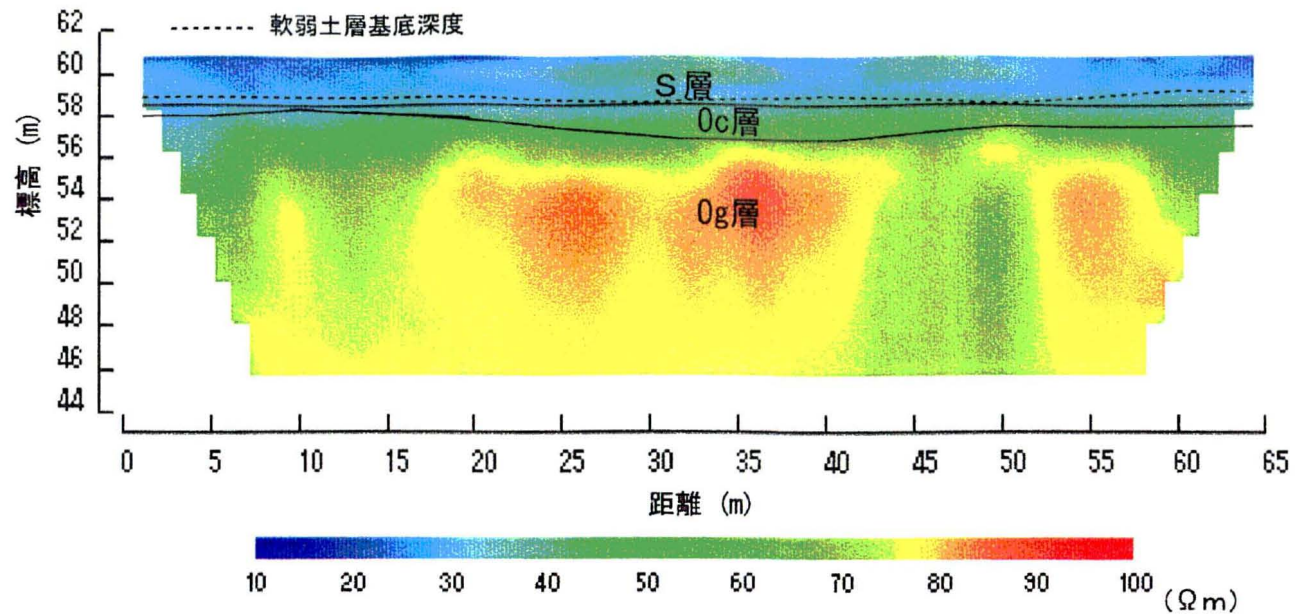


図-18 (a) 二次元比抵抗分布断面図 (A3 測線)

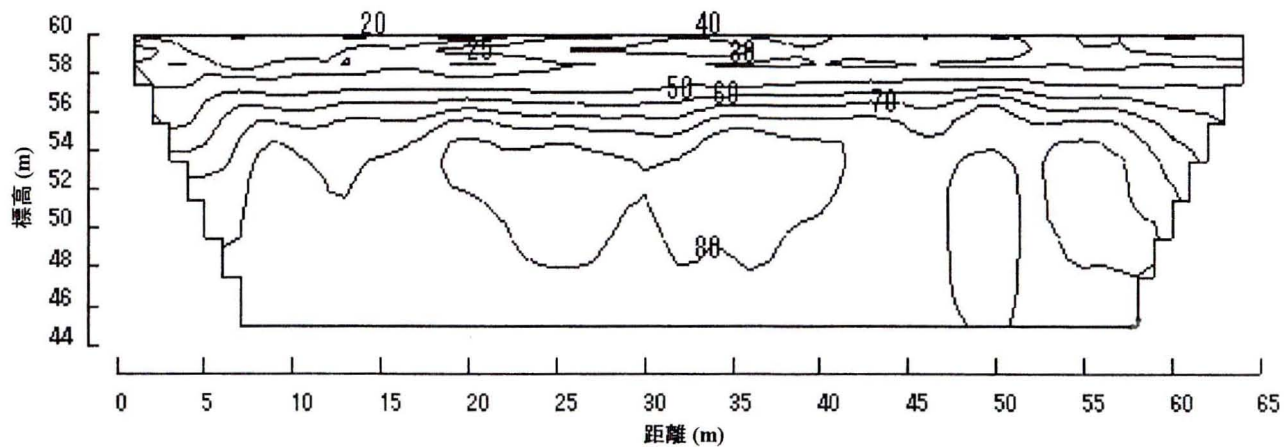


図-18 (b) 比抵抗値コンター図 (A3 測線)

を図-19に示す。また、A3探査はA2探査と同様にセメント改良後に直ちに実施した探査であり、探査時に採取した地表面の自然含水比（表-5）も、30%前後と高い含水比を示しており、調査時では、所々でセメントがまだ完全には固化していない状態であった。

図-18(a)ではセメント改良層（S層）で所々に青色系統の分布が認められ、比抵抗値が20Ωm程度を示しているが、測線25m～50mでは30Ωm～40Ωmなどの高い比抵抗値部分も存在する。また、未改良のOc層ではS層に比べ、幾分緑色も見られ、全体的に若干の高い比抵抗分布（40Ωm前後）を示している。しかし、図-18(b)のコンター図においてはS層と未改良のOc層と区別は明瞭には得られず、S層と未改良のOc層はほぼ同じ比抵抗値と見なせる。図-31の比抵抗変化図では左にピークが出現しており、軟弱層が依然残っているように見られる。

次にOg層では、S層や未改良のOg層の下部で急に比抵抗値は高くなっているが、これは図-30(b)のコンター図においても把握できる。Og層の比抵抗値は50Ωm～90Ωmであり、これはA1、A2探査時と同様の値である。ということはこのA3探査時では、セメントが固化していないこともあり、依然として軟弱層と基盤（Og層）とのコントラストが大きかったと言える。また、地下水面下においては、A1、A2探査時と同様に一定の変化率を示し、鉛直方向に大きな変化は見られない。

以上のことよりA3探査結果として得られたことを以下に列挙する。

- ①S層において所々で濃い青色系統の比抵抗値が20Ωm程度の低い部分が存在しているが、測線25m～50mなどには比抵抗値が30Ωm～40Ωmなどの高い部分も存在しているが全体的に低い値である。
- ②未改良のOc層ではS層に比べ、全体的には若干の高い比抵抗分布を示してはいるが、上位に出現するS層に比して大差はない。
- ③Og層では、S層や未改良のOc層の直下で急に比抵抗値は高くなり、比抵抗値が正に大きな変化率を示す。このことはOg層以上では、調査時点では依然として軟弱であることが推定された。
- ④Og層内では、A1、A2探査時とほぼ同様の比抵抗分布を示し、地下水面下では、一定の変化率を示し、鉛直方向に大きな変化は見られない。

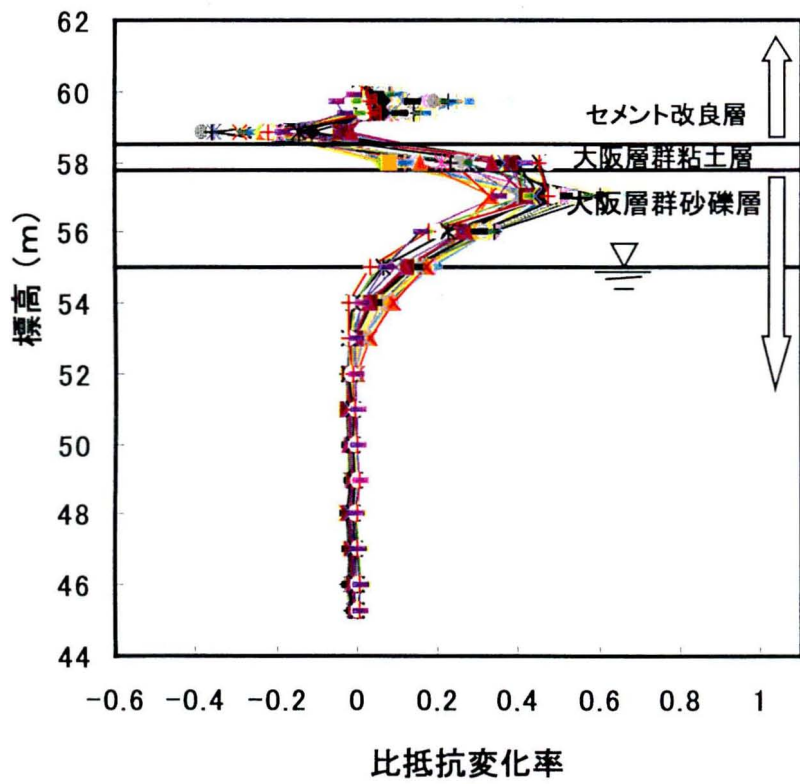


図-19 比抵抗変化率図 (A3 測線)

D)A 4 探査結果

4.0mの軟弱層を対象として、下部の1.5mはセメントによる地盤改良、その上部は2.5mの盛土を行った後、さらに3.5mの盛土を行った時点でA 4 探査を実施した。その時の測線配置状況を写真-5に示す。さらに、A 4 探査の比抵抗二次元分布断面図を図-20 (a)に、コンター図を図-20 (b)に、比抵抗変化率図を図-21に示す。また、A 4 探査後さらに2mの盛土が行われた時点で、測線上の20m地点でボーリング調査が実施された。その結果を図22に示す。この図には、同地点で得られた比抵抗値や比抵抗変化率も示した。

図-20 (a)において盛土層 (B層) は、比抵抗値 $100\Omega\text{m}$ 以上を示し、この断面図内で最も高い値となった。図-20 (b)のコンター図においても、盛土層と粘性土を主体とする盛土置換層 (B'層) との境界は明瞭である。また、S層に関してはA 3 探査時に比べ、高い比抵抗分布 ($50\text{-}60\Omega\text{m}$) に変化している。未改良のOc層はA 3 探査時の $40\Omega\text{m}$ に比して $50\Omega\text{m}$ と増大している。コンター図においてもS層はA 3 探査時に現れた $20\text{-}40\Omega\text{m}$ は見られず、増大していることがわかる。全体的にはS層は、改良層や基盤であるOg層と大差のない高い比抵抗分布を示している。また、図-21の変化率図ではB層とB'層との境界は負に大きな変化率を示す境界として顕著であるが、S層と未改良のOc層の境界に関しては右に大きなピークは出現せず、軟弱層の境界が消滅したことを暗示している。このことより、S層は、改良後ある程度時間が経過した時点で比抵抗値が増大するとともに、下部の未改良のOc層にまでセメント改良の影響が現れたものと推察された。このS層の比抵抗分布の変化はセメントの固化に伴う水分含有量の低下に大きく影響されたものと考えられ、ボーリングなどの直接的な現位置調査と併用することで、比抵抗値の上昇によって水分の変化から見た地盤改良効果の定性的な把握が二次元的に広範囲で可能になるのではないかと考えられる。

また、Og層内では、A 1～A 3 探査時とほぼ同様の比抵抗分布を示し、地下水面下では、一定の変化率を示し、鉛直方向に大きな変化は見られない。

次に、図-22のボーリング調査結果とA 4 探査結果を比較する。まず、N値と比抵抗値に関しては図-14、15と同様に、N値と比抵抗値との関係は認められない。この原因はA 1 探査結果で考察したように、比抵抗値の変化は地盤内の力学的な硬さを示すものではなく、地盤内の土質、空隙、水質、含水状況など多くの状態要因の影響を受けているためである。表-5からも明らかのように、盛土は含水比が低いことが明らかになっているため、高い比抵抗値が出現する。



写真－5 A4 測線探查状況

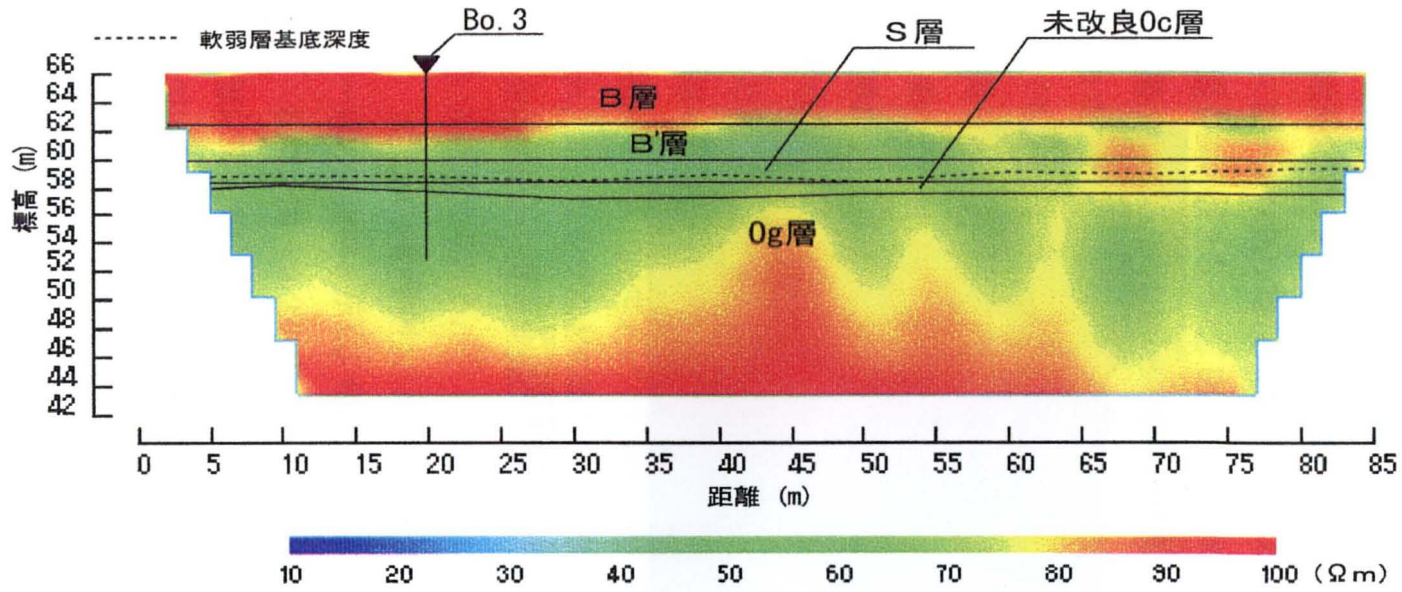


図-20 (a) 二次元比抵抗分布断面図 (A4 測線)

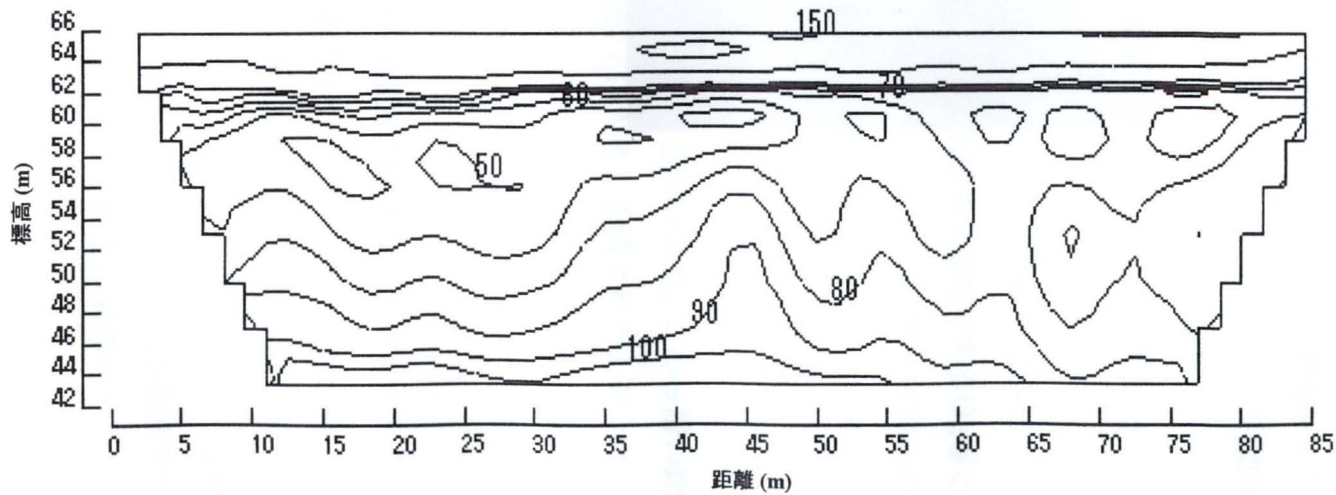


図-20 (b) 比抵抗値コンター図 (A4 測線)

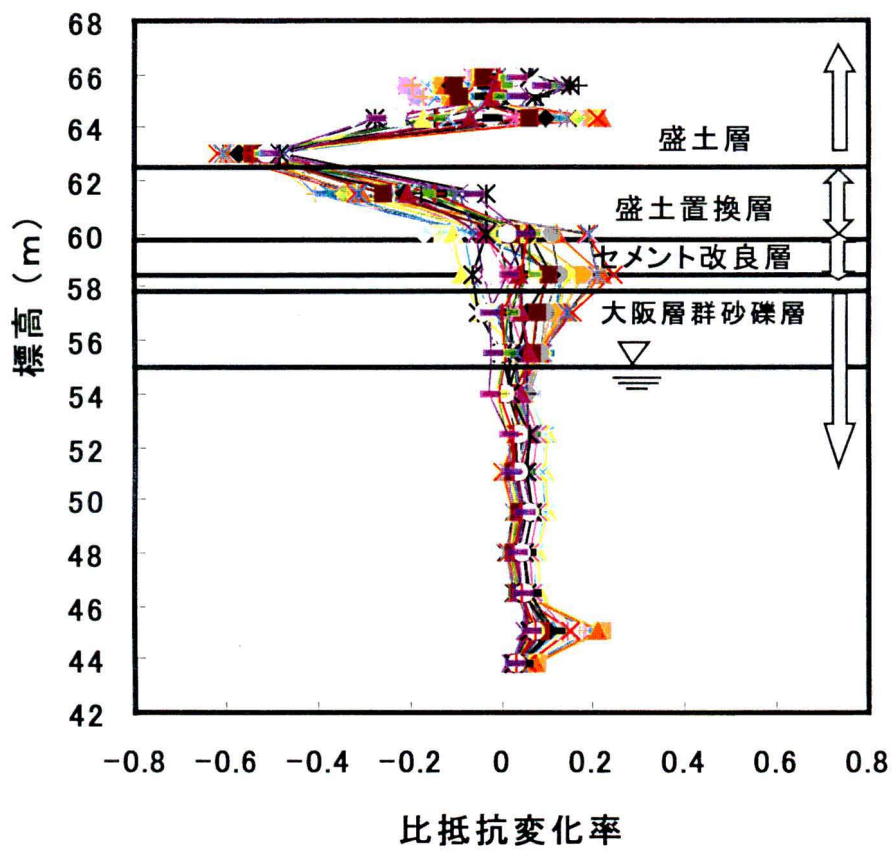


図-21 比抵抗変化率図 (A4 測線)

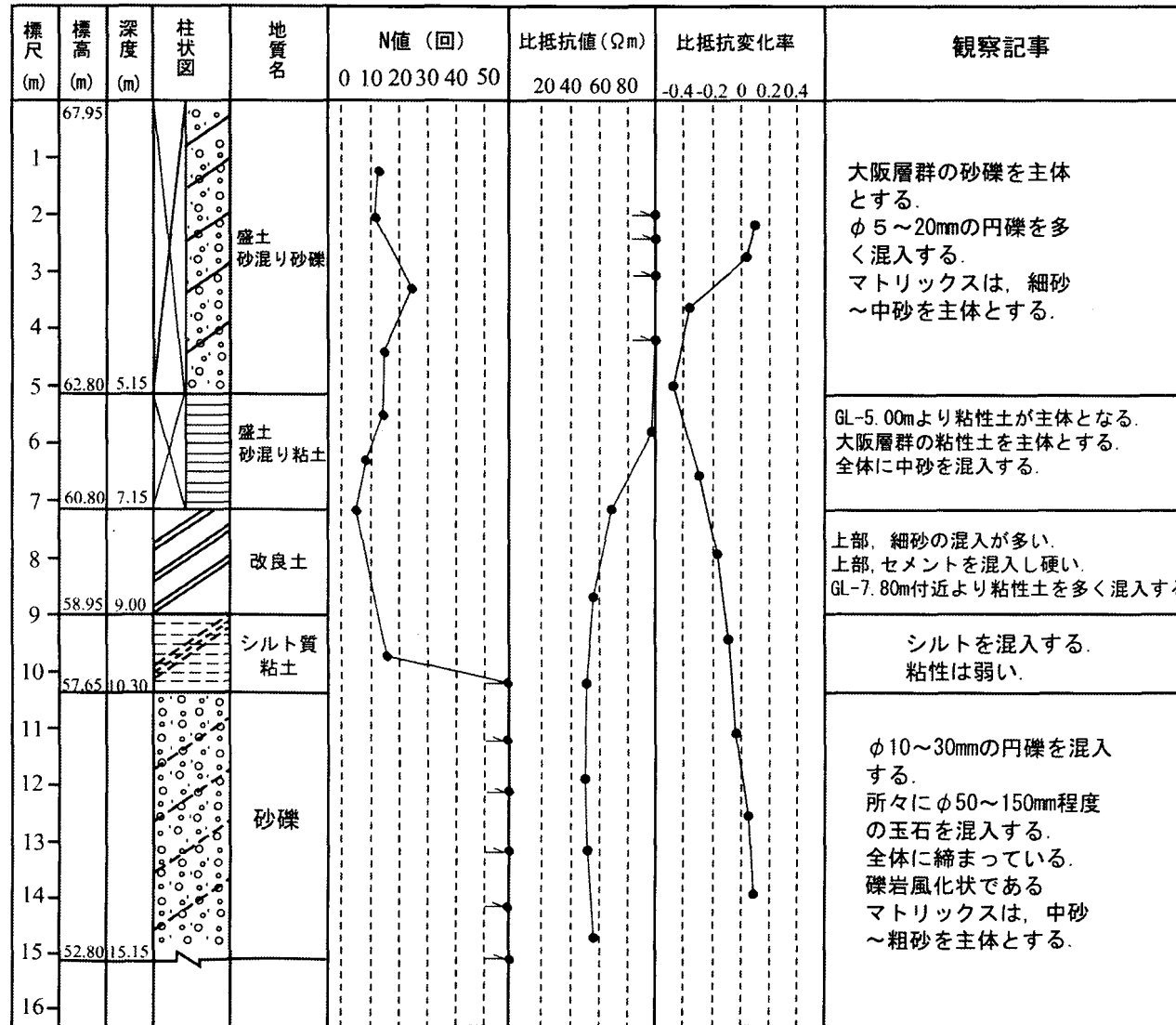


図-22 ボーリング柱状図 (Bo.3)

以上のことより A 4 探査結果として得られたことを以下に列挙する。

- ① B 層は含水比が低いため、比抵抗値は $100\Omega\text{m}$ 以上と高く、断面図内で最も高い分布を示す。このため、粘性土を主体とする B' 層との境界は明瞭に把握できる。
- ② S 層に関しては A 3 探査時点に比べ、高い比抵抗値を示し、B' 層や未改良の Oc 層とほぼ同様の値となっており、地盤改良後にある程度時間が経過した時点で比抵抗値が未改良の Oc 層とともに $50\text{--}60\Omega\text{m}$ にまで上昇していることが明らかになった。
- ③ ②の変化は S 層におけるセメントの固化に伴う水分含有量の低下によることに大きく影響されたものと考えられ、比抵抗値の上昇によって水分の変化から見た地盤改良効果の定性的な把握が二次元的に可能である。
- ④ Og 層内では、A 1～A 3 探査時とほぼ同様の比抵抗分布を示し、地下水下では、一定の変化率を示し、鉛直方向に大きな変化は見られない。
- ⑤ N 値と比抵抗値に関して、対象地盤の地質が多様であり、地盤内の変状など比抵抗値に影響を及ぼしている要素が多く存在することから、多層構造からなる地盤の N 値と比抵抗値の相関性を安易に検討することできない。
- ⑥ 比抵抗値と N 値の相関性を検討することはできないが、比抵抗値の変化傾向はボーリング調査等のほかの調査結果を参考にすると、地盤内の地盤内の土質、空隙、水質、含水状況等を検討するのに有効である。

6. 盛土完了後に実施した原位置試験結果

1) P S 検層結果

盛土の S 波速度は、表層部 (GL-2~3m) で $130\text{--}180\text{m/sec}$ 程度と小さな値を示しているが、それ以深は $230\text{--}320\text{m/sec}$ 程度と表層部より大きくなっている。また、改良土の S 波速度は 290m/sec 程度を示していた。

2) S 波トモグラフィ結果

盛土の S 波速度は A-A' 測線、B-B' 測線ともに法面表層から深くなるにつれて S 波速度が大きくなる傾向になる傾向にあった (図-23 参照)。P S 検層と同様な深度区分で見ると、表層部 (GL-3m 以浅) で 200m/sec 以下、それ以深は $200\text{--}360\text{m/sec}$ 程度と

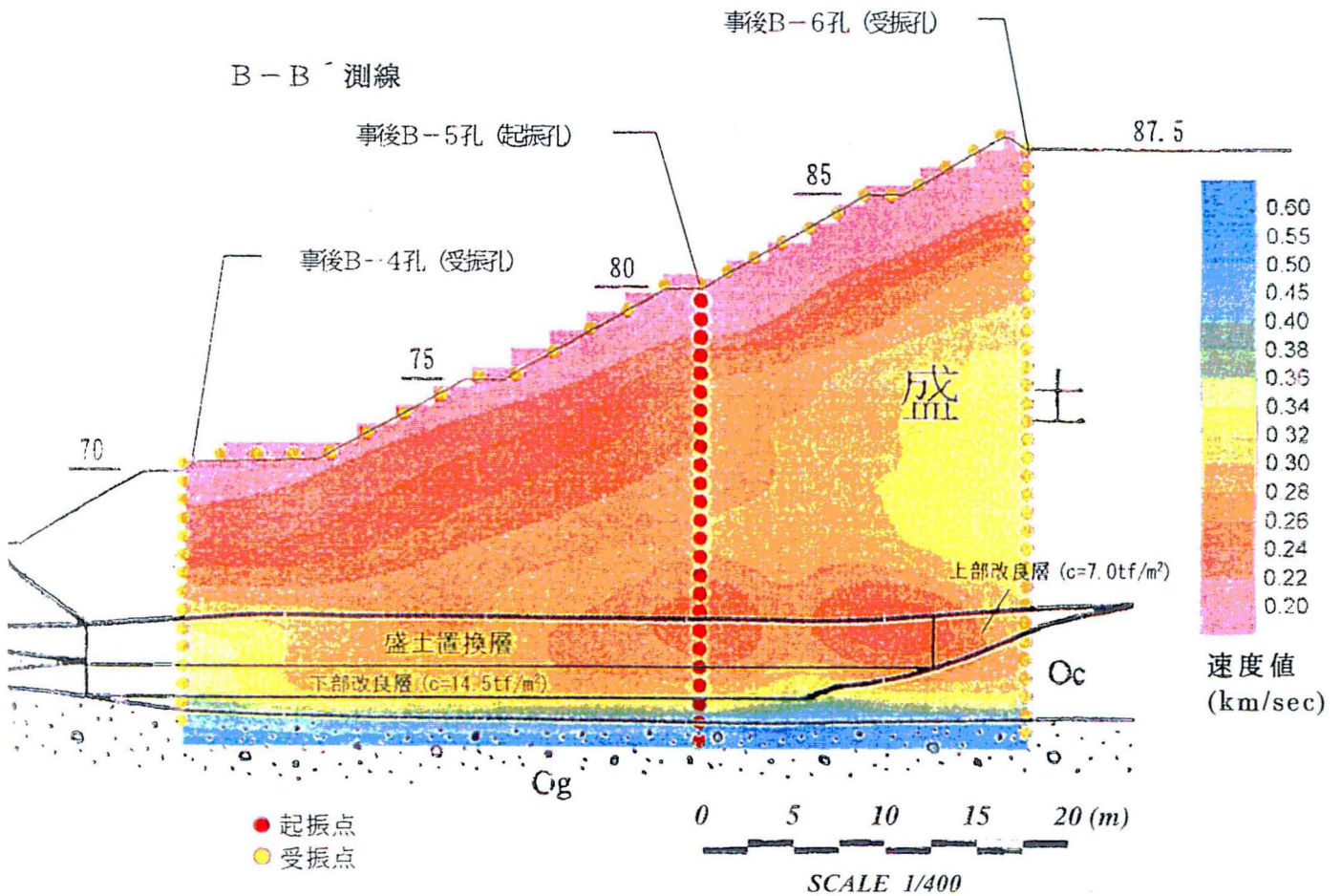
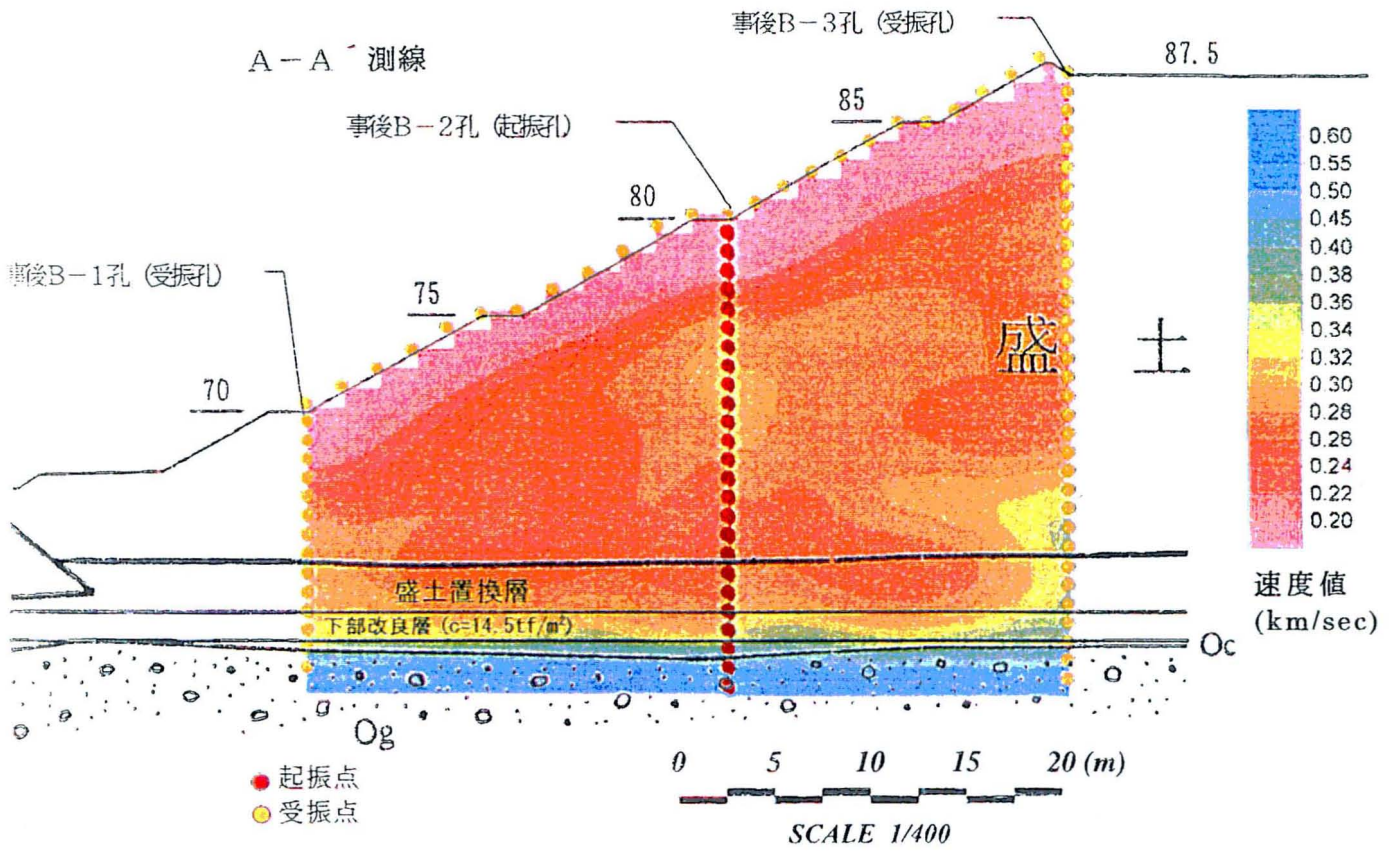


図-23 S波トモグラフィ解析結果

なっており、上述したP S検層結果とよく一致していた。ジオテキスタイルの有無の違いは、S波分布では出現せず、両断面ともにほぼ同じ分布を示していた。

動的解析においては、拘束圧依存性を設定するにあたってこの結果を参考にしながら検討する必要がある。

3)高密度電気探査結果

事前に行った探査結果とボーリング等の結果を対比し、A—A' 測線、B—B' 測線の地質断面図が作成された（図—24の事前調査参照）。

盛土施工中及び完了後の探査は、盛土基盤の地盤改良効果を把握するために実施し、継続的に測定を行った（図—24の事後調査参照）。これらの継続調査結果については4(3)に述べた。

盛土基盤について事前と盛土完了後を比較すると、盛土完了直後の比抵抗値は全体的に若干高い値を示し、比抵抗値のコントラストは比較的小さくなっていた。これは盛土基盤の軟弱層の処理が行われ、その結果水分量が減少するとともに、局所的な地盤水分の変化が少なくなっていたことが考えられる。

次に、図—25に示すA測線、B測線、P測線に沿って高密度電気探査を実施し、ジオテキスタイルの有無による盛土内の比抵抗分布の相違を検討した。測定結果を図—26～28に示す。これらの図より明らかになった点を以下に示す。

- ①図—26より盛土層は全般的に地山部や盛土基盤処理層よりも高比抵抗分布を示しており、地表面から5mまでは200Ωm前後の高い比抵抗分布が存在する。
- ②図—26～28より、ジオテキスタイルの敷設の有無による盛土内の比抵抗分布に著しい変化は見られない。
- ③図—27，28より、盛土完成後の比抵抗分布を見ると、地表面下2～3mまでは降雨の影響を受けるためか、高比抵抗分布が見られるが、それ以深では比抵抗分布の大きな変化は見られない。

4)常時微動測定結果

事前解析で設定した盛土の応答特性について重複反射理論により常時微動測定地点の伝達関数を求め、常時微動測定結果のフーリエ振幅スペクトルが比較された。

解析で求めた伝達関数をみると、3Hz付近にピークが見られ、法肩から盛土奥にいくに

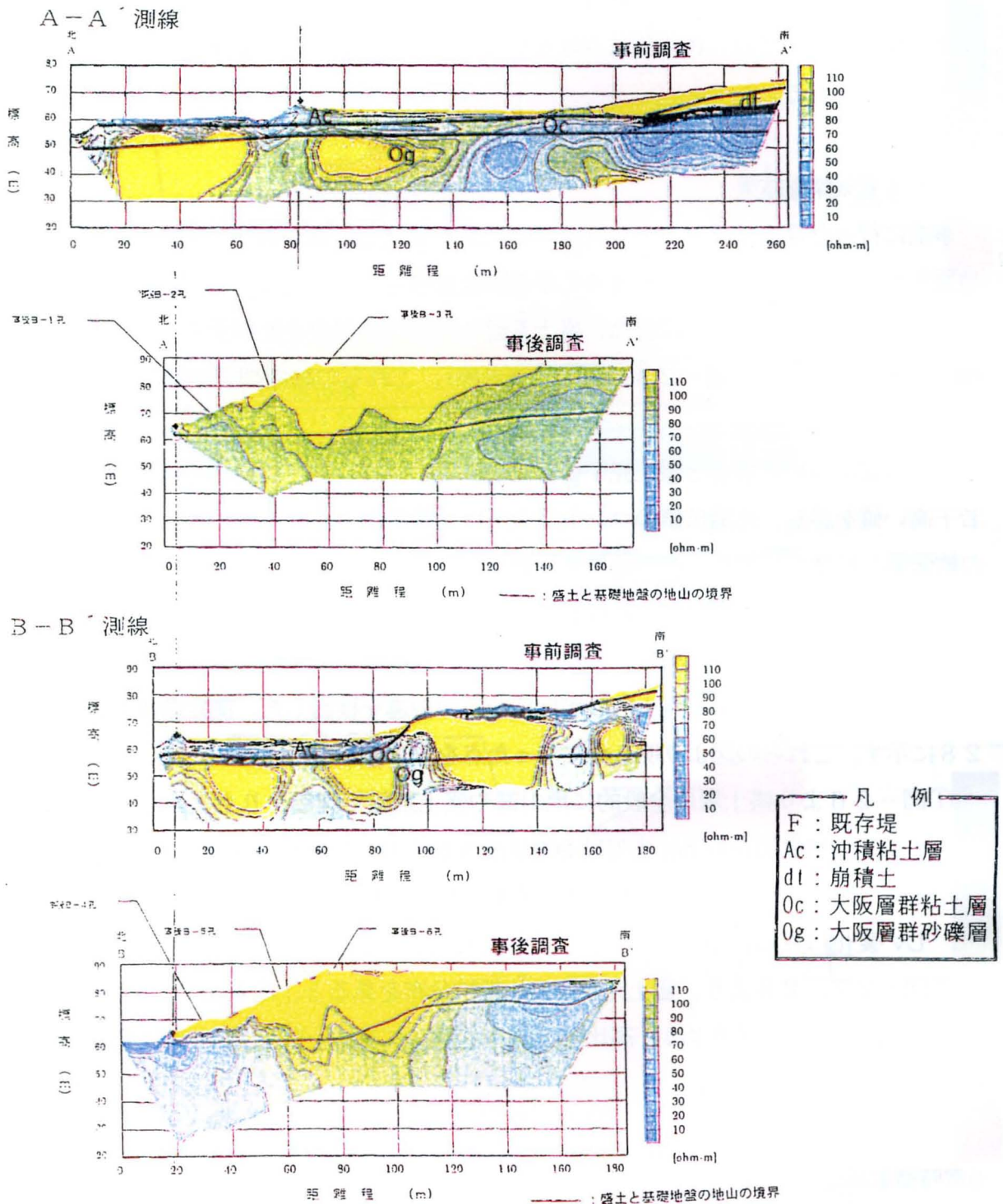


図-24 高密度電気探査解析結果

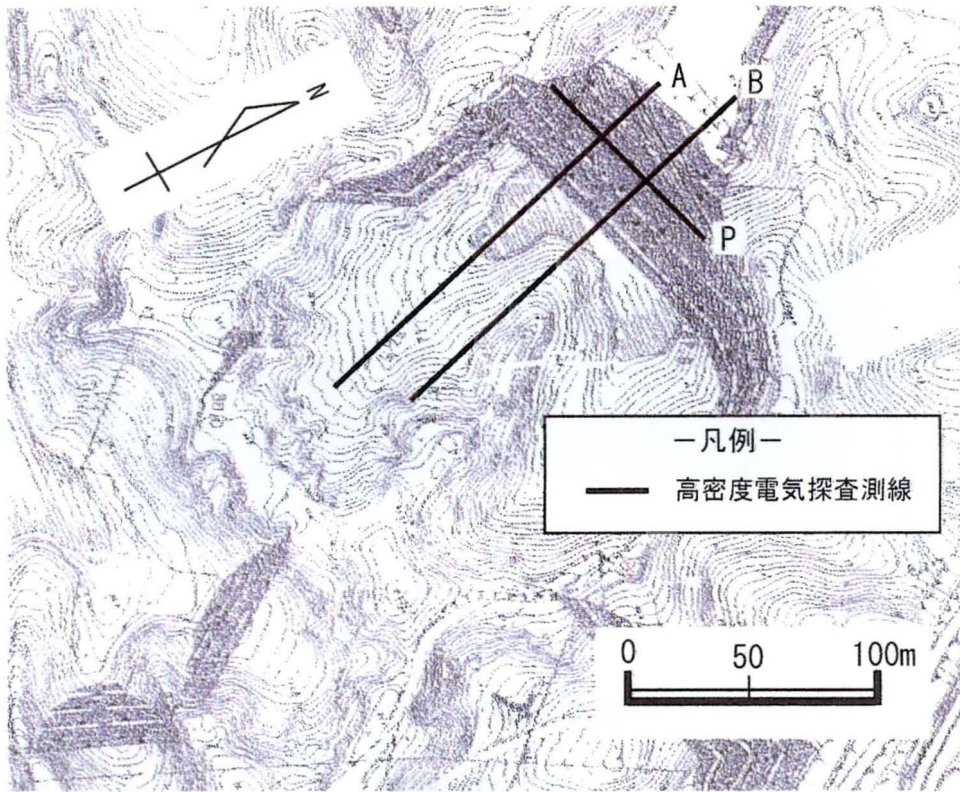


図-25 盛土完成後の高密度電気探査測線位置図

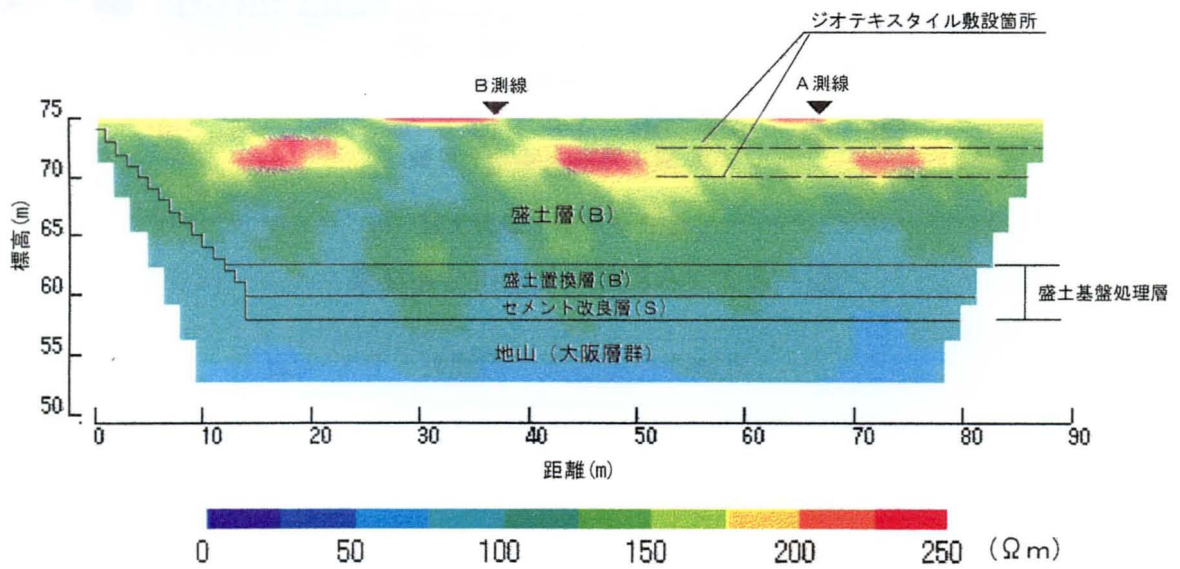
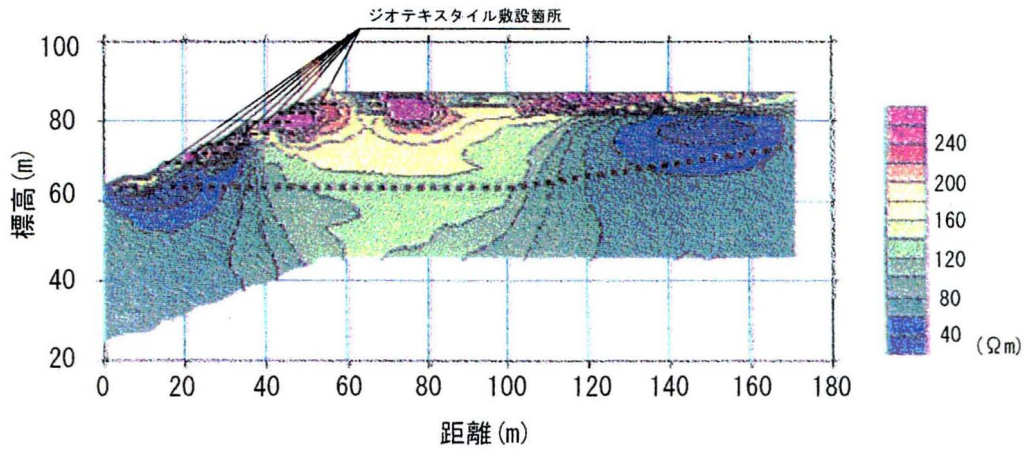
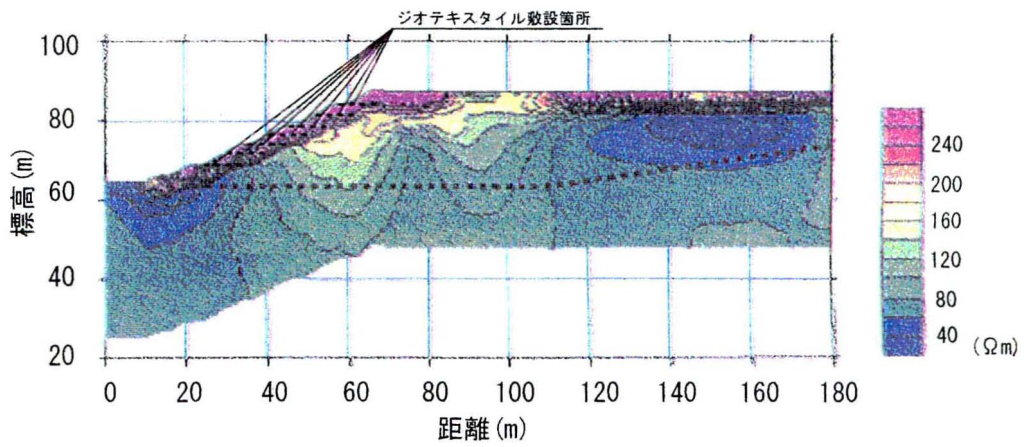


図-26 P測線の比抵抗分布結果

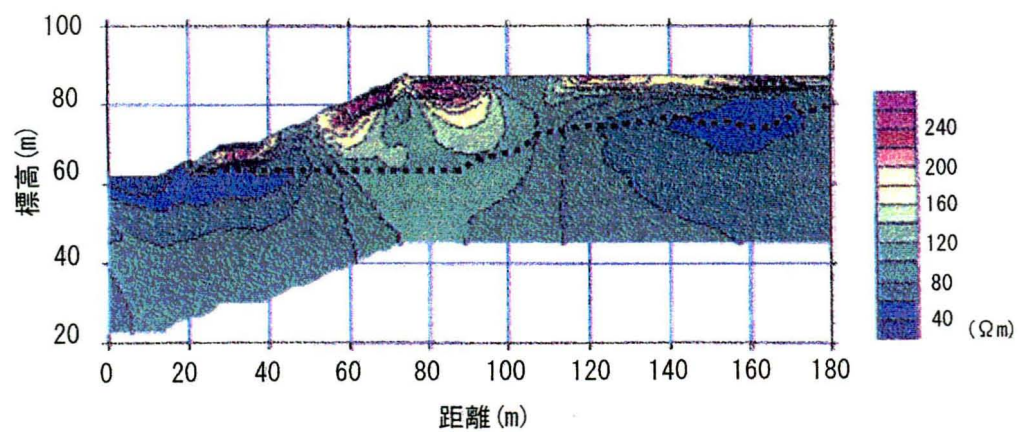


(a) 盛土完成 3 ヶ月後

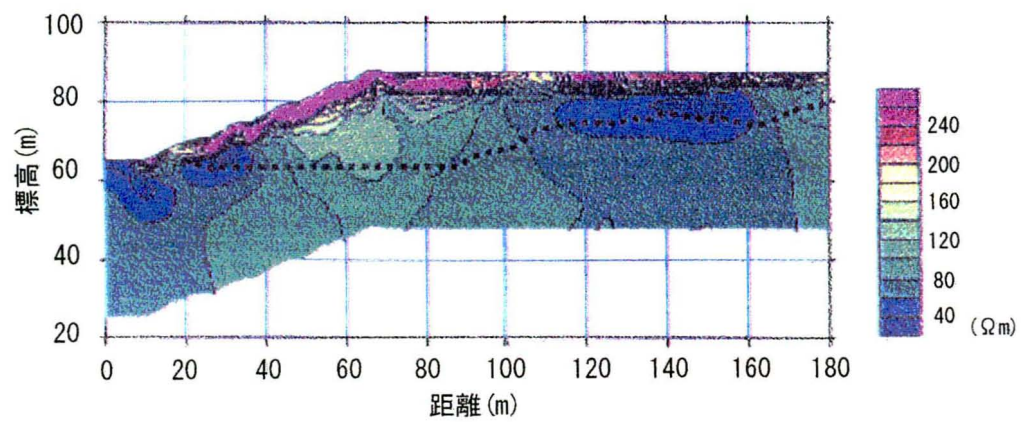


(b) 盛土完成 1 年 4 ヶ月後

図-27 A測線の比抵抗分布結果



(a) 盛土完成 3 ヶ月後



(b) 盛土完成 1 年 4 ヶ月後

図-28 B測線の比抵抗分布結果

したがって、卓越周波数が高くなる傾向が見られる。これらの特徴は観測されたピークの特徴と良く対応しており、微小ひずみ領域における振動に対しては、設定した解析モデルは適応していると考えられる。

7. FEM 動的解析

拡張区域で予定されている 40mクラスの盛土の耐震設計方針立案を目的として、試験盛土に対する事前の動的解析が行なわれた。

モデル断面は、A—A' 断面が用いられた（図—2 参照）。

入力地震後の設定については、当該地の地震環境の分析、各種基準における設定の考え方を整理した上で、海洋型および内陸型の 2 種類の波形を選定し、従来の設計基準レベルに相当する最大加速度振幅および既往最大クラスの加速度振幅として、海洋型 2 種類（100gal、300gal）、内陸型 2 種類（200gal、700gal）の最大加速度振幅を設定することとされた。また、波形モデルとしては、海洋型は「修正開北橋」（道路橋示方書から引用）、内陸型は「兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測された波形」が用いられた。

解析は等価線形化法による動的解析と非線形動的解析の 2 種類の方法により行われたが、非線形動的解析による結果（図—2 9 参照）において、残留変形やジオテキスタイルの効果が顕著に現れた。以下にこの解析における要点を示す。

①最大加速度の増幅率は小さい。

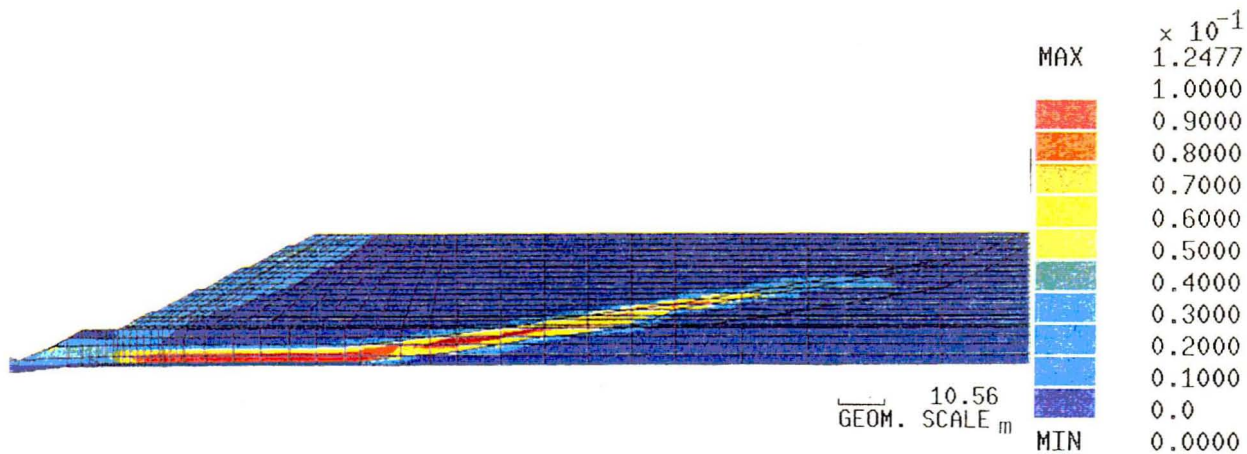
強振動に対する盛土法肩の加速度応答倍率は 1 倍程度かそれ以下の値であり、盛土が地震動の加速度を大きく増幅する恐れはない。

②地震後の残留変位（水平移動、沈下、傾斜）あまり大きくない。

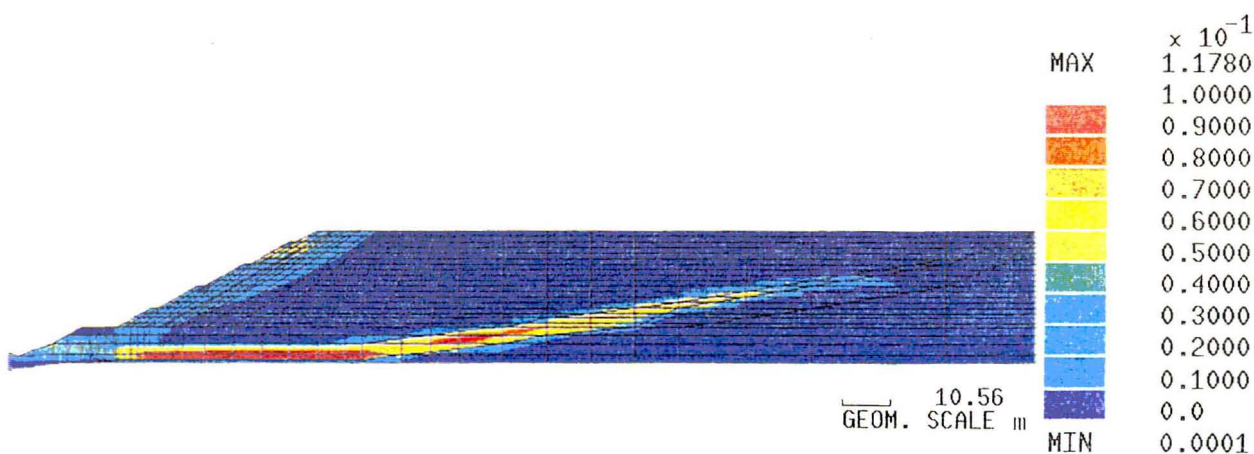
盛土は強震時に法面前方へはらみだしと沈下を漸増させながら振動しており、地震終了時もこれらの変位の大部分が残留するが、法肩部の水平と鉛直方向の残留変位は盛土高さのそれぞれ 2%、1%程度かそれ以下であり、盛土表面の傾斜角も 1/80 ~1/100 程度以内に収まっている。これは盛土基盤が傾斜していないことが、その理由の一つとして考えられる。

③盛土底部の改良層に大きなせん断変形（ひずみ）が発生する。

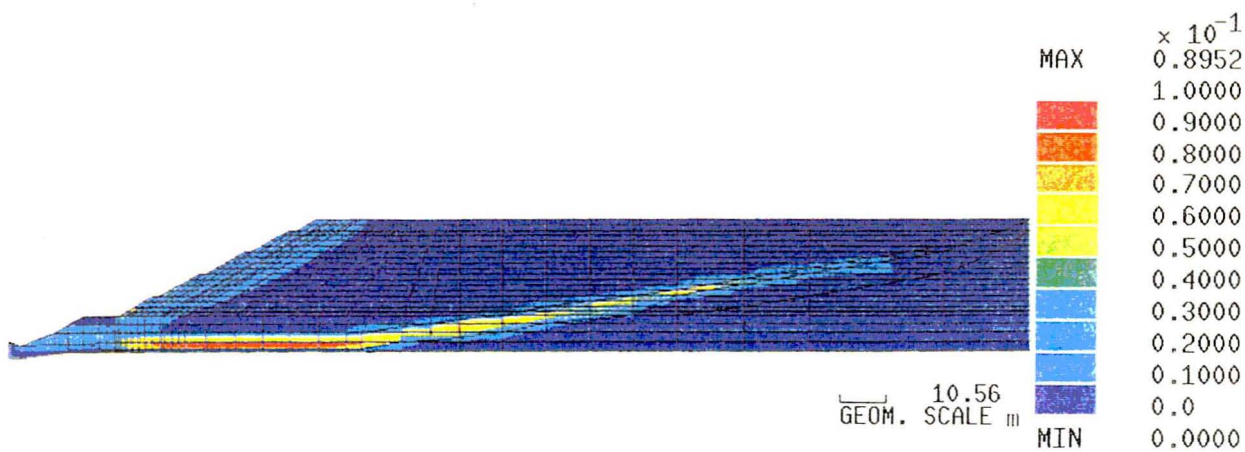
盛土は盛土底部の下部改良層と表層改良層が大きくせん断変形を生じることにより、



海洋型 300gal ジオテキ有



海洋型 300gal ジオテキ無



内陸型 700gal ジオテキ有

図-29 動的解析結果

全体的に法面前方にはらみだし、沈下している。すなわち、盛土底部の下部改良層と表層改良に大きなせん断ひずみが発生している。このような箇所が、地下水位下になると液状化の可能性が高いため、長期にわたる排水機能の確保が特に重要と考えられる。

④盛土の耐震性は法面前方への最大応答時で決まる。

⑤ジオテキスタイルの効果

盛土全体の応答性状に与える影響は少ないが、法肩部をはじめとする法表面のせん断ひずみが低減し、変位を抑制する効果が確認された。このために兵庫県南部地震の際でも、補強土施工箇所の被害が少なかったものと推定される。

8. 結論

本研究では高盛土の安定のために補強土工法としてジオテキスタイルを用いた場合の安定性に寄与する効果、ならびに盛土施工に伴う盛土基盤軟弱層の地盤改良範囲及びその効果を高密度電気探査手法で評価できるか否かについて検討を行った。これらは神戸市内で行われた試験盛土（盛土高さ：約 25m）を活用することによって行った。

調査及び解析によって得られた結論を以下に示す。

- 1)試験盛土後の当該地の地下水位は降雨によって変動を示すことなく、ほぼ一定値を示していた。これより、当該地では降雨に起因する地下水の処理が計画通り行われていることが推定された。
- 2)盛土の変位計測を水平方向、鉛直方向に分けて実施した。その結果、水平変位は盛土基盤上位で最大値が出現したが、その値はジオテキスタイルのある斜面がない斜面に比して施工中で 5mm 小さくなることが明らかになった。また鉛直方向の変位量は盛土完成後ののり面の法肩付近で急激な沈下が見られた。この原因については今後究明する必要がある。
- 3)ジオテキスタイルの張力を測定したところ、ジオテキスタイルの引張強度より小さな値が測定され、将来の変形に対しても大きな効果が期待できる。
- 4)軟弱地盤の広がり の把握には、高密度電気探査手法が有用であることが明らかになった。しかし、ボーリング調査やスウェーデン式サウンディングにより得られる地層境界と測

定比抵抗値との間には、何の相関もないことが明らかになった。

- 5) 軟弱地盤改良法としてセメント改良が行われた場合、セメントの固化のプロセスは、高密度電気探査より得られる比抵抗値によりほぼ明らかになること、これにより改良層の分布の把握もある程度把握できることが明らかになった。
- 6) 上述した結果は、高密度電気探査結果のみでは不可能で、ほかの手法と併用することで可能となる。しかし、広がり of 把握のためには高密度電気探査は有用である。
- 7) 高密度電気探査により、盛土完成後は降雨の影響は地表面下 2~3m まで受けるが、それ以上深では比抵抗分布の大きな違いは認められず、降雨の影響が土中深部にまで及んでいないことが確認された。
- 8) 動的解析の結果、ジオテキスタイルの効果は、盛土全体の応答性状に与える影響は少ないが、法肩部をはじめとする法表面のせん断ひずみの低減に寄与し、変位を抑制する効果が確認された。

謝辞

本研究を遂行するに際しては、フィールドの提供を神戸市港湾整備局新都市整備本部から受けることができた。また、一部の観測・解析結果を新都市整備本部防災研究会の資料より使わせて頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。また、高密度電気探査の測定には、神戸大学大学院自然科学研究科院生 中村勉君ならびに神戸大学工学部建設学科学学生 沖川良太君を始め、神戸大学都市安全研究センター所属の院生、学生諸君の多大の協力を得たことを記し、ここに厚く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 神戸市港湾整備局新都市整備本部：新都市整備本部防災研究会 報告書（西神住宅第2 団地防災編）（平成 11 年 3 月），1999.
- 2) 鴻池組，関西建設特定建設工事共同企業体，応用地質株式会社：西神住宅第 2 団地粗造 成工事（その 12）事前地質調査中間報告資料（平成 10 年 7 月），1998.
- 3) （株）応用地質：（仮称）西神南地区法面安定解析業務施工計画書（平成10年2月），1998
- 4) 島裕雅・梶間和彦・神谷英樹：建設・防災・環境のための新しい電気探査法 比抵抗映 像法，古今書院，pp. - ，1995.
- 5) 島裕雅：二極法電極配置データを用いた実用的な二次元比抵抗自動解析法—比抵抗映像 法の解析法と適用例—，物理探査，Vol.45，No.3，pp.204-223，1992.
- 6) 島裕雅：比抵抗二次元簡易解析法と適用例，物理探査学会第 82 回学術講演会論文集， No.81，pp.361-364，1990.