

ISSN 0386—5878

土木研究所資料第2930号

001

土木研究所資料

軟岩切土のり面の劣化予測

平成3年3月

建設省土木研究所
地質化学部地質研究室

Copyright © (1991) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

軟岩切土のり面の劣化予測

地質研究室	室長	中村康夫
	主任研究員	平野 勇*
	研究員	佐々木 靖人
		阿部 昌彦**

要 旨

斐伊川放水路開削部に施工された新第三系中新統の軟質な細粒砂岩～シルト岩および第四系の砂礫層よりなる試験切土のり面において，風化・侵食状況を観測するとともに，風化・侵食の進行モデルを設定し，のり面の長期的な劣化の予測を行なった。

キーワード：軟岩，切土のり面，風化，侵食，劣化

* 現 中国地方建設局斐伊川・神戸川総合開発工事事務所 所長

** 現 中部地方建設局浜松工事事務所 調査第二課

目 次

は じ め に	1
1. 切土のり面の劣化予測に関する既往の研究	2
2. 調査地の概要	4
2.1 地 形	4
2.2 地 質	4
2.3 気 象	6
2.4 植 生	6
3. 試験のり面の状況	7
3.1 のり面の仕様	7
3.2 のり面の風化状況	10
3.3 のり面の侵食状況	19
3.4 のり面保護工の劣化状況	24
4. 劣化機構の検討	30
4.1 肉眼観察による岩盤性状の変化	30
4.2 物理工学性状の変化	30
4.3 岩石鉱物学的変化	35
5. 劣化のモデル化	39
6. 検 討	42
6.1 風化層厚の推定	42
6.2 のり面の安定性に関する検討	43
7. ま と め	46
お わ り に	47
参 考 文 献	49
巻 末 資 料	51

は じ め に

岩盤よりなる切土のり面は経時的に劣化する。一般に劣化は緩やかに進行し、のり面の安定に著しい影響を与えるまでには長い年月を要する。しかし軟岩よりなるのり面の中には、応力解放、凍結融解、乾燥湿潤等の影響により深部まで急速に劣化し、切土後、比較的短期間に不安定化する例がある。また、施工後長期間経過したのり面の中には、洗堀・パイピング・吹付工等のひび割れや剥落・はらみだし・擁壁工等のずれや開口・落石・小崩壊等の変状を生じているものもあるが、その原因はのり面工自体の老朽化よりもむしろ地山の風化あるいは侵食に起因することが多い。劣化しやすい地質から構成されるのり面については、切土直後の安定性のみならず長期的視点で設計施工ならびに維持管理を行なわなければならない。

のり面の設計においては従来、現場土木地質技術者がまず岩質を判断し、劣化が著しいと推定される軟岩については、①周辺の自然斜面を長期的な平衡状態とみなし自然斜面勾配に近いのり面勾配とする、②類似の既設のり面の実績から長期的に変状のない勾配を選定する、のどちらかの方法と、①～②が不可能な場合、③劣化の進行を抑制するのり面工あるいはアンカー工等の補強工法を用いる、等によってのり面勾配やのり面工の選定がなされている。これらはいずれも経験的な手法であり現場土木地質技術者の能力に負う所が大きい。しかし土木地質技術者の数的制約とのり面数の増加を考えると、経験の少ない技術者でも岩盤の長期的劣化を精度よく予測する手法を開発することが重要となる。例えば、のり面工の選定時に岩盤がどの程度の速さで強度低下（劣化）していくかをモデル化・シミュレートし、十数年～数十年後ののり面状況を予測してのり面工やのり面勾配を決定する方法、あるいは劣化予測を踏まえた効率的な維持管理手法の整備等が必要になろう。特に長大な軟岩のり面については、設計段階での合理的な劣化予測手法がきわめて重要である。本文はこのような試みの一つとして、斐伊川放水路開削予定部に施工された新第三系中新統の軟質な細粒砂岩～シルト岩よりなる試験切土のり面を対象に、風化・侵食状況を観測するとともに、風化・侵食の進行モデルを設定し長期的な劣化の予測を行なった結果を報告するものである。

本報告は、中国地方建設局出雲工事事務所より依頼された「斐伊川放水路開削部試験法面緑化調査」のなかで、昭和63年度から平成元年度の2ケ年に亘って行なわれた調査内容の一部を取りまとめたものである。調査では、(i)試験のり面の地山の劣化状況の観察や試験、(ii)のり面保護工の劣化観察と施工方法の検討、(iii)植生工の繁茂状況の推移観察による適合種子とその配合の検討、が行なわれたが、ここでは(i)の調査結果を主体として検討を行なった。

1. 切土のり面の劣化予測に関する既往の研究

軟岩切土のり面あるいは斜面の劣化に関する調査例は多く、調査対象としては、のり面・斜面表面の軟質化や剝離、リル (rill) の発生とガリー (gully) への発達、パイピング、落石や崩壊がある。また、これに相前後してのり面工も劣化する。現場で観察されるのり面工の劣化の多くは、のり面工自体の老朽化よりも地山の劣化に伴う二次的なものが多く、また、この種の劣化がのり面の安定にとっても重要である。のり面の不安定化を生じる地山の劣化として大きく、風化に起因するものと侵食に起因するものに分けられる。地山の劣化の調査例に比較すると劣化の予測手法に関する研究例は少ないが、次に主な例を述べる。

岩石の風化に関する研究は多く、風化速度や風化による強度低下の予測法に関しても、室内試験から予測する手法や現地調査から予測する手法が考案・利用されている。室内試験から風化し易さを推定するものとしては、スレーキング試験、凍結融解試験（土質工学会²⁾）などを用いたものがある。岡本 他³⁾ は、自然環境下における凍結融解日数および岩石の劣化と室内凍結融解試験による劣化を比較し、凍結融解試験は日本のような温帯の自然環境下における劣化を十数倍程度促進しているとし、また、地表から深部になるに従い、凍結融解日数及び岩の劣化が指数関係的に減少することを確認している。また、松岡⁴⁾ は、凍結破碎速度が主として岩石の空隙表面積と引張強度に依存すると述べており、風化前の岩石物性から岩石の劣化速度を推定出来る可能性を示唆している。これらの論文では劣化指標として破壊による重量損失あるいは弾性波速度の減少率を挙げているが強度低下についても類似の考え方が出来よう。しかし自然環境下における風化は複合的作用によるものであり、室内試験のみから風化による強度低下を予測するのは一般に誤差が大きく、現場での風化量と結び付ける適当な方法がないのも欠点である。一方、現地調査から劣化し易さを予測するものとしては、奥園⁵⁾ による表層軟化指数の測定などがある。これはハンマーや弾性波探査等で測定した軟化帯や低速度帯の厚さ d とのり面整形時点からの経過月数 T から、近似式 ($\alpha = d / \log T$) より表層軟化指数 α を求めるもので、 α が高いほど風化し易いと判定する。同論文によれば、1 サイクルの乾湿繰返しによる初期状態からの吸水率の増加率が高いものほど α も大きく、吸水率増加率20% がほぼ $\alpha = 10$ に相当するとしている。現地調査から風化予測を行なうのは現実的な手法であるが、長期の観測が必要であることと、ある現場の値をそのまま他の現場に適用出来ないこと、また、風化の進行を数値的にモデル化する必要があるため、予測値がモデルに大きく依存するという問題点を持つ。化学的風化については、反応が緩慢であるため、自然状態での風化を自然が行なった実験と見做しモデルを構築して反応速度等をシミュレートするナチュラル・アナログと称される手法（水谷⁶⁾）を用いることがある。この手法は現地調査と室内実験の両結果からモデルを構築することが多く両方の利点を兼ね備えた方法といえるが物理的風化に対する適用例は見られない。

一方、風化による岩の透水性の変化ものり面の安定性に関与する。しかし透水係数の変化を簡易に調べる指標に乏しいことなどから、幾つかの特定の岩種で記載を主体とした研究がなされているのみである。西田・青山⁷⁾ は風化による間隙径分布を測定し、風化に伴い間隙率は増加するが間隙径は全体に小さい方へ移ると述べている。松倉 他⁸⁾ によれば花崗岩においては風化により透水性は高くなるが、地表付近の強

風化部では逆に透水性が低くなる。また、田村・鈴木⁹⁾、山下・鈴木¹⁰⁾は風化による軟岩の間隙径分布の変化を調査し、風化の進行とともに間隙の全体量や大間隙の割合が多くなるが、表土に近くなると逆に間隙径は小さくなっていると述べ、この理由として風化初期では小間隙が次第に大きくなって隣接間隙と合体するためさらに大きな間隙になるが、表土付近では有機物等の細粒分が大きな間隙の間に集積するためであろうとしている。風化による透水性の変化は間隙率と間隙径分布、間隙の連結性等に支配されると考えられるが、予測を可能とするようなモデルは見当たらない。従って現状では調査対象とする岩の風化度と透水性の変化を現場あるいは室内促進試験により対応づけておく他に方法がない。

以上は、風化による劣化の予測手法についてであるが、のり面表面が軟質化して土に近くなると侵食や崩壊による劣化、すなわち面状侵食、リルやガリー、パイピング、肌落ち等が問題になる。侵食量の予測に関する研究はのり面よりむしろ自然斜面を対象になされており、以下も主に自然斜面を対象に行なった既往の研究について述べる。Holy¹¹⁾によると、面状侵食の場合の侵食速度に関しては Musgrave¹²⁾、Wischmeier and Smith¹³⁾ 等による経験的モデル、Holy *et al*¹⁴⁾ 等の概念的モデルがある。また、吉川¹⁵⁾ はダムの堆砂量等から日本の自然斜面の削剥速さ DR (m/year) と山地の平均高度 H (m) の間には $DR = 0.3031 \cdot 10^{-9} \cdot H^{2.1894}$ の関係があるとしている。しかし地表の植生や岩質についての補正は考慮していない。また、リルやガリーの発達を考慮した侵食量の算定モデルは見当たらない。一方、斜面におけるパイピングの形成過程については、安原 他¹⁶⁾ によると斜面の土壌が元々不均質であることを仮定しているもの (Parker¹⁷⁾、Jones¹⁸⁾、Stocking¹⁹⁾) が多く、杉井 他²⁰⁾ は土が均質であればパイピングの発生は Terzaghi の限界動水勾配が充分適用出来ると述べている。しかし実際ののり面では不飽和不均質状態で逐次破壊が進行しパイピングが生じると考えられるため、現実ののり面に適用出来る形でパイピングの形成予測を可能とする適当な方法は見当たらない。

最後に、のり面の劣化による崩壊の発生の予測については、従来の各種安定計算によって行なうことが一応可能である。しかし特に浅い滑り面を持つ崩壊 (肌落ち等) の場合は、風化部の粘着力、降雨の浸透過程等を精度良く推定しなければならない。風化部の粘着力や透水係数の変化は、前述した室内試験あるいは現地調査から予測する以外にない。ただしこれらの係数が予測可能であれば安定計算、室内実験、有限要素法等で安定解析を行うことが出来る。例えば、西垣・河野²¹⁾ は、表層部ほど透水性の高い風化切土のり面に近いモデルで降雨実験を行い、湿潤前線が不透水層 (= 堅岩部) に達する前にのり面表層部に飽和領域が発生する現象を再現しており、不飽和状態での安定性の検討の重要性を示唆している。斜面への降雨の浸透と安定性の解析法は主に土質地盤を対象とした各種のモデルが考案されているがここでは省略する。

以上を総合すると、のり面の劣化を予測する手法は確立されていないので、現状では、各のり面毎に、現地調査より、風化速度・風化による物性 (強度や透水性) 変化・侵食速度等を計測し、自然斜面の現況や室内試験結果等と整合性のある風化侵食の進行モデルを構築して切土のり面の長期の風化層厚や侵食量等を算定することが妥当な方法であると考えられる。したがって、本報告においても、①現地調査による調査による風化侵食速度の測定、②風化による物性変化の測定、③風化侵食モデルの構築、④長期経過後の風化層厚の算定、等を行ない、のり面の長期的な安定性について検討した。

2. 調査地の概要

2.1 地 形

調査位置と周辺の地質を図-1に示す。調査地は島根県出雲市上塩冶町に施工された試験のり面である。調査地周辺は中国山地北側周縁部の出雲平野南端部に位置し、東方1.5 kmに斐伊川を、西方3.5 kmに神戸川を望んでいる。

地形は標高20~50mの緩やかな丘陵地形で、出雲平野から中海にかけてみられる山廻丘陵と総称されている。その起源は隆起海食台であるとされ、斜面、谷地は田畑に利用され、人家も点在する。自然斜面の平均傾斜は15~30°程度で緩やかである。試験のり面周辺には、地すべり等の崩壊地形は見られない。

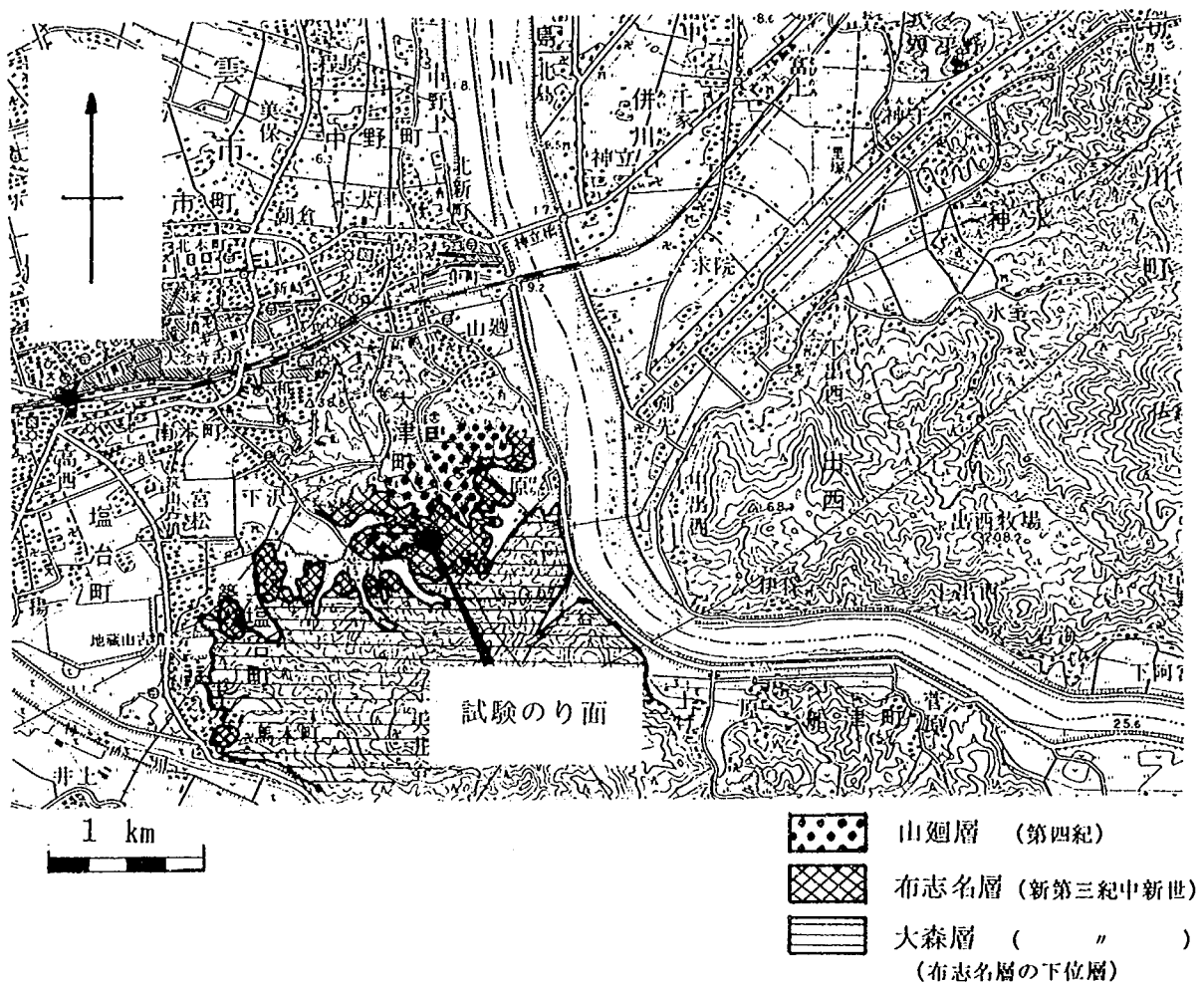


図-1 調査地周辺の地質

2.2 地 質

表-1に調査地周辺の地質層序を示す。調査地周辺の地質は、新第三系中新統に属する大森層およびこれに不整合で累重する中新統の布志名層（以上海成層）、また第四系更新統の山廻層（陸成層）および表土からなる。このうち、試験のり面には布志名層と山廻層が分布している。

表-1 試験のり面周辺の地質層序

時代	地層名	柱状図記号	おもな岩質	備考
第4紀 新世	山廻層 (段丘堆積層)	Y-tsi	凝灰質シルト層	白色～灰色呈す。砂層との互層部も認められる
		Y-sl	シルト層	灰白色を呈す。
		Y-sa	砂層(砂礫 薄層挟在)	円礫層を挟む。粗粒な砂を主体とする。
		Y-cg	礫層	φ5cm程度の円礫主体。礫種は、花崗岩質のものが多い。基質は、粗粒砂。
第3紀 新世	布志名層	F-tsl	凝灰質シルト岩	ハンマーの軽打、または指圧で潰せる程度の硬さ。風化石を含む。
		F-tsa	凝灰質細粒砂岩	薄層として一部分布。
		F-tf	凝灰岩	
		F-cg	礫岩	φ1～3cmの円礫主体。礫は硬質、基質はシルト。
	大森層	O-ba	玄武岩・安山岩	層理面にほぼ沿って貫入。周辺の地層は、この貫入岩により走向傾斜が乱れている。硬質岩
		O-ts	凝灰質砂岩	粗粒～中粒の砂主体。割れ目少ない。層理不明瞭。
		O-tsg	凝灰質砂岩 (含礫・含堅石)	φ1cm以下の礫堅石を含む。礫はやや丸みを帯びている。基質は、粗粒な砂を主体とする。
		O-pt	軽石凝灰岩	φ2～5cmの軽石を含む。軽石は黄色～黄白を呈し軟質。
		O-tm	凝灰質泥岩	粗粒緻密だが、層理面方向の割れ目多い。
		O-mt	泥質凝灰岩	炭化木片を含む。粗粒緻密だが、脆く、地表露頭では鱗片状のクラックが発達。
		O-mtp	含軽石泥質凝灰岩	軟質で吸水膨潤し易い。
		O-st	砂質凝灰岩	砂分に富む層と凝灰分に富む層が密互層している層が多い。
		O-lt	火山礫凝灰岩	1～2cmの安山岩礫を多く含む。
		O-tb	凝灰角礫岩	3～10cmの安山岩礫を多く含む。礫、基質とも硬質でハンマーの強打でやっと割れる硬さである。

大森層は凝灰質砂岩礫岩および凝灰質泥岩を主体とし、凝灰角礫岩、軽石質凝灰岩、玄武岩、安山岩等を挟在する。本層はいわゆるグリーンタフ堆積物であり全体に凝灰質で岩相変化が著しく多少変質している。軽石質凝灰岩、泥質凝灰岩等は吸水膨脹しやすいほか、凝灰質砂岩礫岩も風化して軟質化しやすい。一軸圧縮強度は50～700 kgf/cm² (平均約100 kgf/cm²程度)で岩質によって強度のばらつきが大きい。

布志名層は試験のり面の左岸全体および右岸中下部に分布しており、凝灰質細粒砂岩～シルト岩を主体とし、礫混じり砂岩、礫岩等を挟在するが、全体に岩相変化は大森層に比較して小さい。礫種はチャート、

花崗岩、安山岩、凝灰岩、砂岩等であり、礫径は最大 150 mm 程度である。布志名層の細粒砂岩～シルト岩は、新鮮な場合一軸圧縮強度 50 kgf/cm²～100 kgf/cm² 程度で比較的均一であるが、風化すると著しく強度低下を生じる。また、粒度が均質で淘汰が良く粘土分に乏しいため雨水によりリルを生じて侵食されやすい。

山廻層は布志名層に不整合で累重する未固結堆積物である。基底は礫であるが、全体としては礫混じりのシルトや砂の細互層状であり、段丘等非海成の堆積物である。

表土は、これらの地層上に厚さ約 20cm～80cm で被覆しており、炭質物を含み礫に乏しく、茶褐色に風化している。表土下の風化層は試験のり面においては尾根部で 2～3 m と厚いが、山腹部では一般に 30～70 cm 程度である。

2.3 気 象

当地域は湿帯性気候に属し、寒冷な日本海気候と温暖な瀬戸内気候の影響を受けている。松江における年間平均気温は 14.4℃（東京の平均気温より 0.9℃低い）で、1月の最低気温の平均は 0.7℃、8月の最高気温の平均は 30.9℃である。また、0℃未満の日数は年平均 35.1 日である。調査地周辺の月当たり降水量は 70～250 mm 程度で、2月頃が最も多い。積雪量は多い年で 50cm 程度で、一般に 10cm 前後である。なお当地域は、冬季日本海側特有の北西方向からの強い季節風が吹き、このため古い民家では家屋の西側と北側に防風のための松（築地松）を植えているのが特徴的である。

2.4 植 生

当地域の植生を分類すると、常緑広葉樹林帯に属し、一般的に関東以南の平地や丘陵地、低山地に見られるヤブツバキクラス域とも表現される。調査域周辺では、人為的操作が加えられた後の代償植生とされるコバノミツバツツジ・アカマツ群集として表現出来る。試験のり面は保水性に乏しく養分が少ない土壌環境下であり、土壌化の進行が緩慢であり乾燥環境に適した植生様相になると推定された。試験のり面を放置した場合に侵入すると予想される代表的な植生は、地衣類のほかススキ、ヤハズソウ、クズ、ヤシャブシ等が挙げられ、約 10 年間はこのような様相で冬期間の植生は休眠状態となり、その後、シイノキ、カシ、ソヨゴ、ヒサカキならびにシダあるいはササが侵入してくると考えられている。

3. 試験のり面の状況

3.1 のり面の仕様

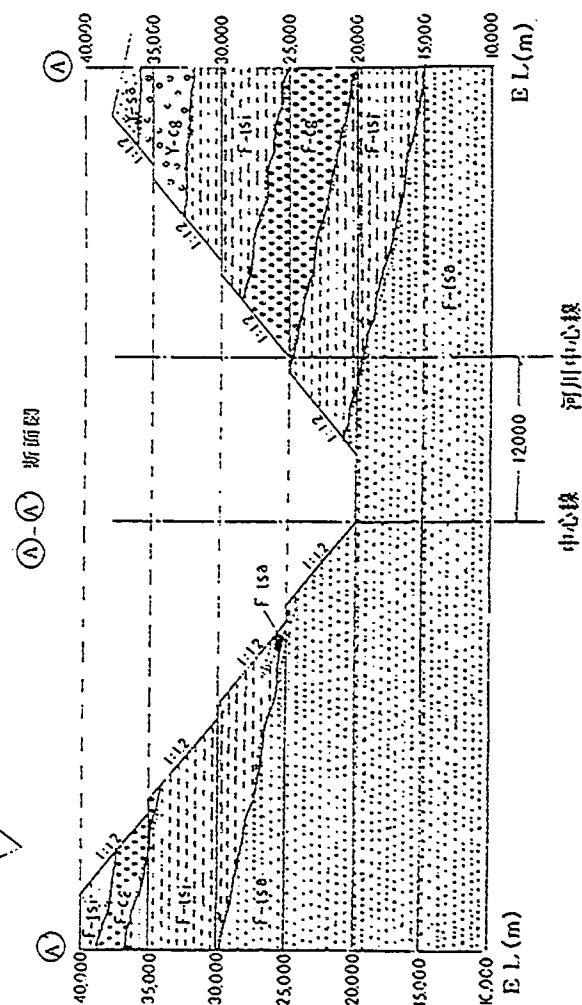
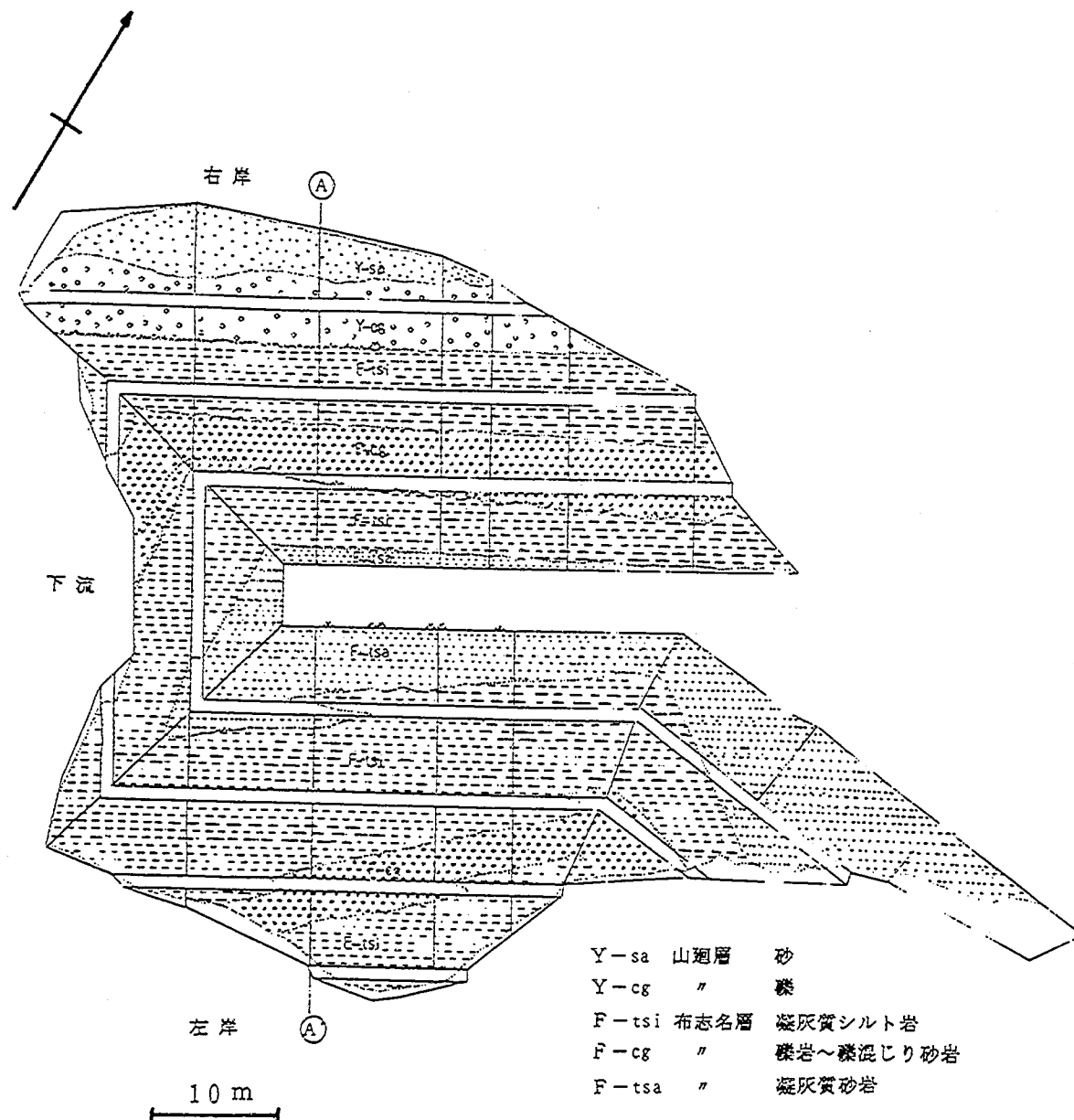
試験のり面の地質平面図および断面図を図-2に示す。試験のり面は東北東に開いた“コ”の字型に施工されており、開いた方向からの視点で、北北西側（南向き）を右岸側、南南東側（北向き）を左岸側、西南西側（東向き）を下流側と称している。のり面の高さは右岸側が約13m、左岸側が約22m、下流側が約8～14mで、5m毎に幅約1mの小段が設けてある。小段を除いた各段の勾配は全て1：1.2（約40°）であり、小段を含めた平均勾配は1：1.4（約35.5°）である。

試験のり面を構成する地質は布志名層と山廻層である。試験のり面に対して布志名層は左岸側と下流側の全面および右岸側の下部約12.5m付近までを占めている。地層は、下位から細粒砂岩、シルト岩～細粒砂岩（以降下部シルト岩と称す）、礫岩～礫混じり砂岩（以降礫岩と称す）、シルト岩～細粒砂岩（以降上部シルト岩と称す）の順に累重している。走向はほぼ東西で傾斜は30°程度であり、左岸側が見かけ傾斜約12～13°の流れ盤、右岸側が受け盤となっている。山廻層は右岸側上部に砂～シルト混じりの基底礫を伴い、布志名層に対し不整合で被覆している。山廻層は非常に傾斜が緩いが、広域的な分布を見ると、わずかに北方に傾斜している。

試験のり面の表面は幾つかのブロックに分けられており、未処理部を含め、軽量のり枠工、現場打のり枠工、コンクリート吹き付け工等の保護工表面に客土吹き付け工、厚層基材吹き付け工、等ののり面処理工が施されている（図-3）。また、植生工としてA配合（木と草）、B配合（花と草）、C配合（草のみ）で比較している。種子の配合は表-2の通りである。これら各種のり面工によって、表面の風化侵食の度合いが多少異なることが予想される。なお、試験のり面は昭和61年に掘削された後、昭和63年12月に未処理部を除いて表面約5～10cmを再掘削し弛みを除いた後に各種のり面工を施工している。このとき一部に洗堀が生じており深さ5～10cm以上のものもあったため、こ

表-2 植生工における種子配合

種 子 A		
ヤマハシノキ		889g/m ²
イタチハギ		71g/m ²
ヤマハギ		99g/m ²
メドハギ		91g/m ²
ススキ		35g/m ²
オーチャードグラス		249g/m ²
ケンクッキー31フェスク		551g/m ²
種 子 B		
松笠菊		1.0ml/m ²
大金鶏菊		3.0ml/m ²
虫取なでしこ		0.5ml/m ²
クリーピングレッドフェスク		346g/m ²
ケンクッキーブルーグラス		76g/m ²
種 子 C		
ケンクッキー31フェスク		551g/m ²
クリーピングレッドフェスク		231g/m ²
オーチャードグラス		249g/m ²
ベレニアルライグラス		454g/m ²
ホワイトクローバー		154g/m ²



図一 2 試験のり面の地質平面図および断面図

図-3 試験のり面ののり面工種

のような部分に限って埋め戻しを行なった部分もある。

3.2 のり面の風化状況

試験のり面にのり面工を施工する際に、布志名層を対象に肉眼観察を行なった。掘削時から観察時まで約2年経過しているため、その間に風化が進行し、強度が低下するとともに掘削時の地層の色調が灰色系統から淡黄色系統に変化している。最も新鮮なのは右岸の礫岩と上部シルト岩で、観察時点でも明灰色で硬質であった。ただし山廻層との層境付近は割れ目に沿って山廻層から滲出してきた酸化鉄の付着が見られ風化も多少進行している。下部シルト岩は黄灰色に風化しており、同じシルト岩でも差があることがわかる。一方左岸では細粒砂岩が新鮮であるが右岸の上部シルト岩や礫岩ほどではない。下部シルト岩および礫岩は黄灰色に風化している。上部シルト岩は山の尾根部にあるため風化が進行しており酸化鉄が脈状に入るとともに岩自体が著しく軟質化して、左岸とは対照的である。

掘削時における岩盤分類(図-4)によると、右岸においては礫混じり砂岩および上部シルト岩の大半がC級、下部シルト岩と細粒砂岩がおよび上部シルト岩の一部(山廻層との層境付近)がD級、山廻層はE級であった。一方、左岸側は尾根付近の上部シルト岩がE級でほかはD級であり、観察時点の風化状況と良く調和している。また、のり面工施工直前ののり面表層の山中式土壤硬度計による土壤硬度は図-5に示すように原地形面に近いほど軟質である。岩種による強度の相違は布志名層と山廻層では明瞭であるが、布志名層中の岩種による相違は小さくいずれも土壤硬度25~30mm程度(換算一軸圧縮強度14~38kgf/cm²程度)と、ボーリングコアによる新鮮部の一軸圧縮強度(50kgf/cm²~100kgf/cm²)の約半分以上となっている。なお、肉眼観察による試験のり面の岩盤の性状および風化状況は表-3のようにまとめられる。また、布志名層に限定して風化状況を区分すると、暗灰色で風化程度の低いもの(岩盤分類ではE)、淡黄色に風化しているもの(D)、岩片強度は低くないが酸化鉄が脈状に入っているもの(D)、淡黄色~淡褐色に風化し脈状に酸化鉄が入っているもの(E)、に分けられる。

表-3 肉眼観察による試験のり面の風化状況

岩 種		左 岸		右 岸	
		風 化 状 況	岩 級	風 化 状 況	岩 級
山廻層	砂 層			地表に近い部分は赤褐色化している。	E
	礫 層			鉄分の多い砂層を頻繁にはさみ、赤褐色である。	E
布志名層	上部シルト岩	尾根部にあり、脈状に酸化鉄が入るとともに、全体に赤褐色化が進んでいる。軟質で指でつぶせる。	E	山廻層との層境部付近は酸化鉄により赤褐色化し軟質だが、他は暗灰色で高強度を示す。	C (~D)
	礫岩～礫混じり砂岩	表面が黄色に風化し、軟質化している。	D	暗灰色で高強度。	C
	下部シルト岩	ほ ぼ 同 上	D	礫岩との層境部付近は、酸化鉄による汚染がみられる。全体に黄色に風化・軟質化している。	D
	細粒砂岩	表面は黄色に風化しているが、強度は比較的高い。	D	最下部にわずかに分布。風化程度は下部シルト岩よりやや良好で、強度も多少高い。	D

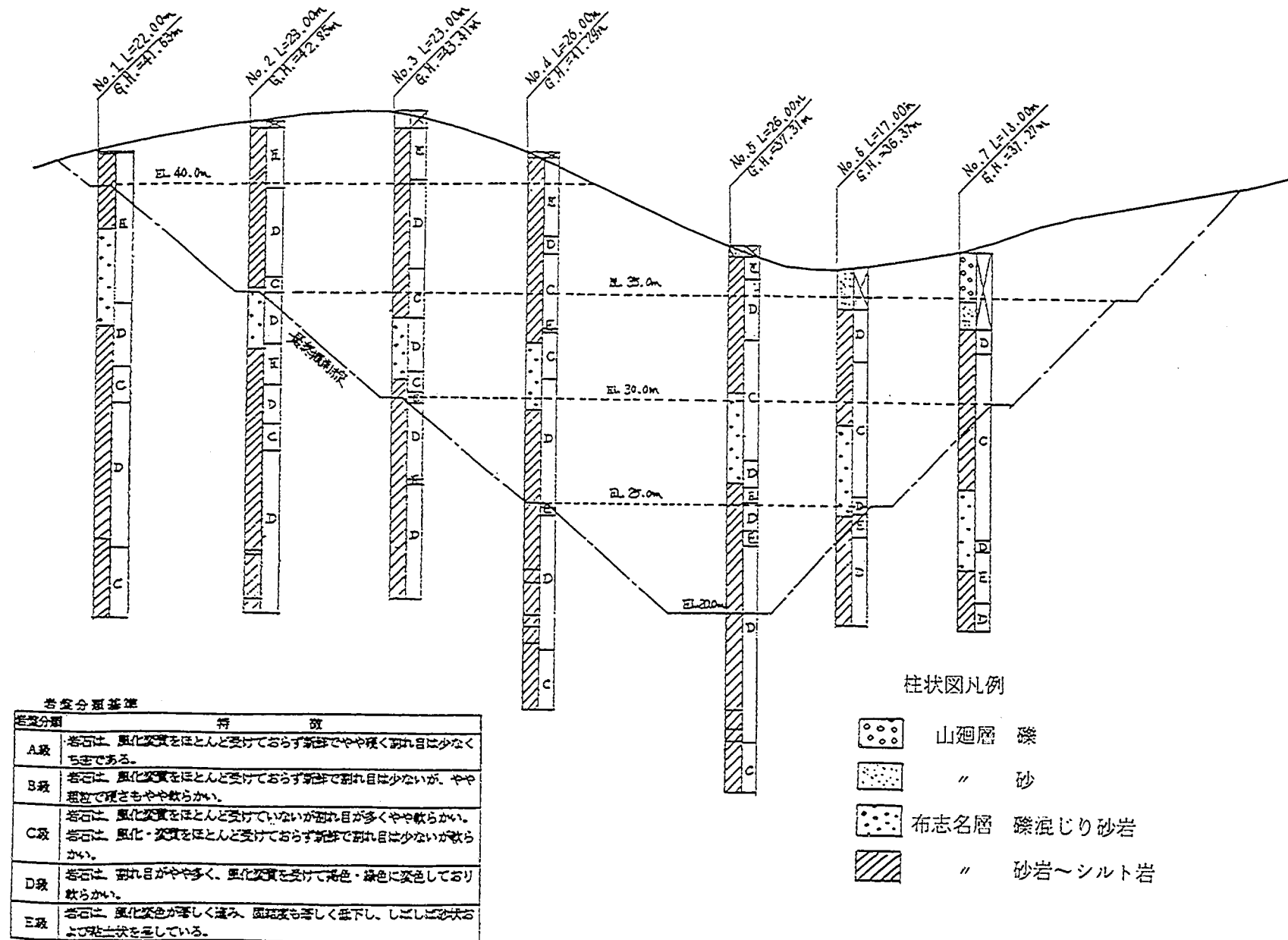


図-4 試験のり面掘削時における岩盤分類

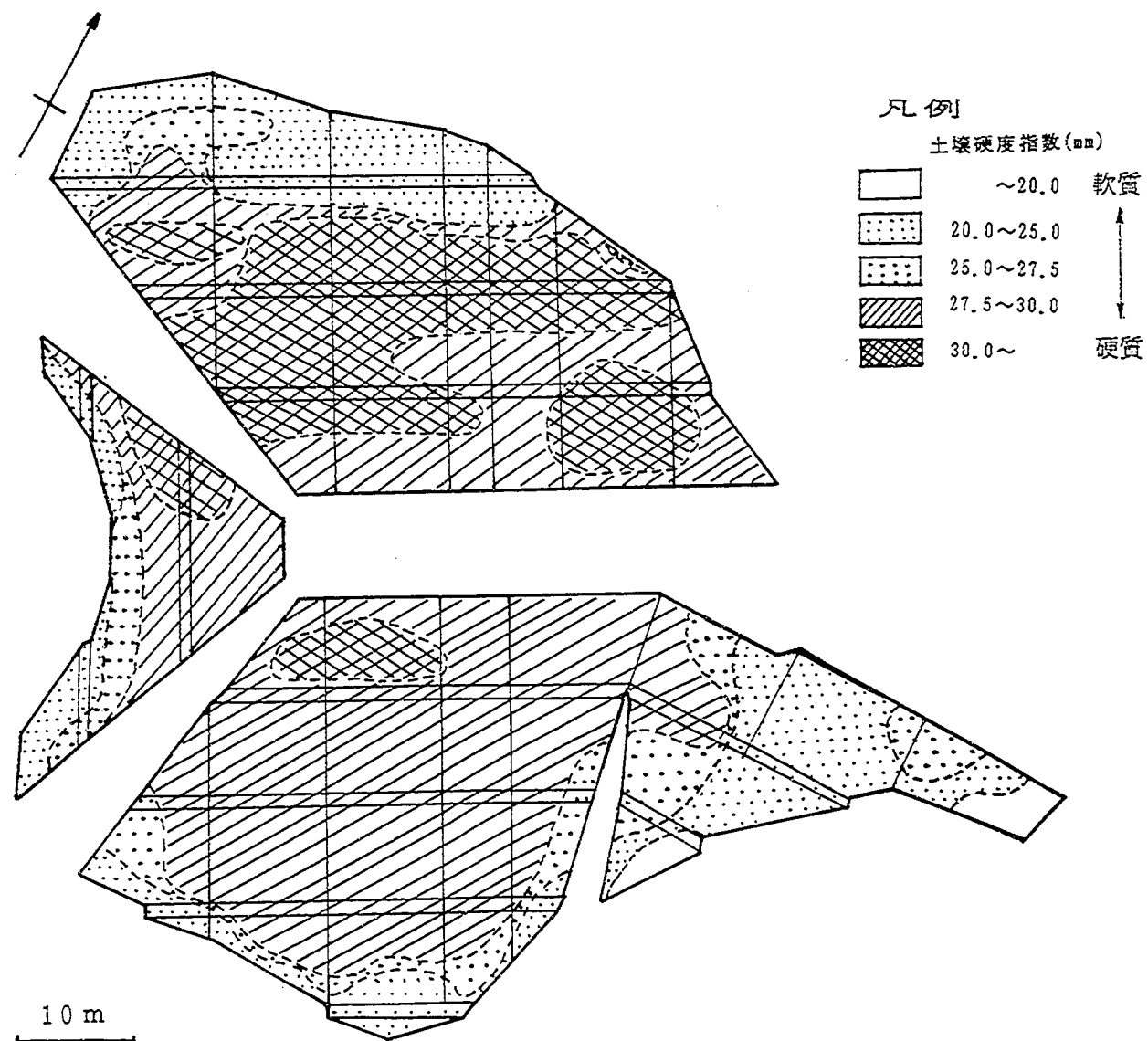


図-5 のり面工施工直前ののり面表面の土壌硬度分布

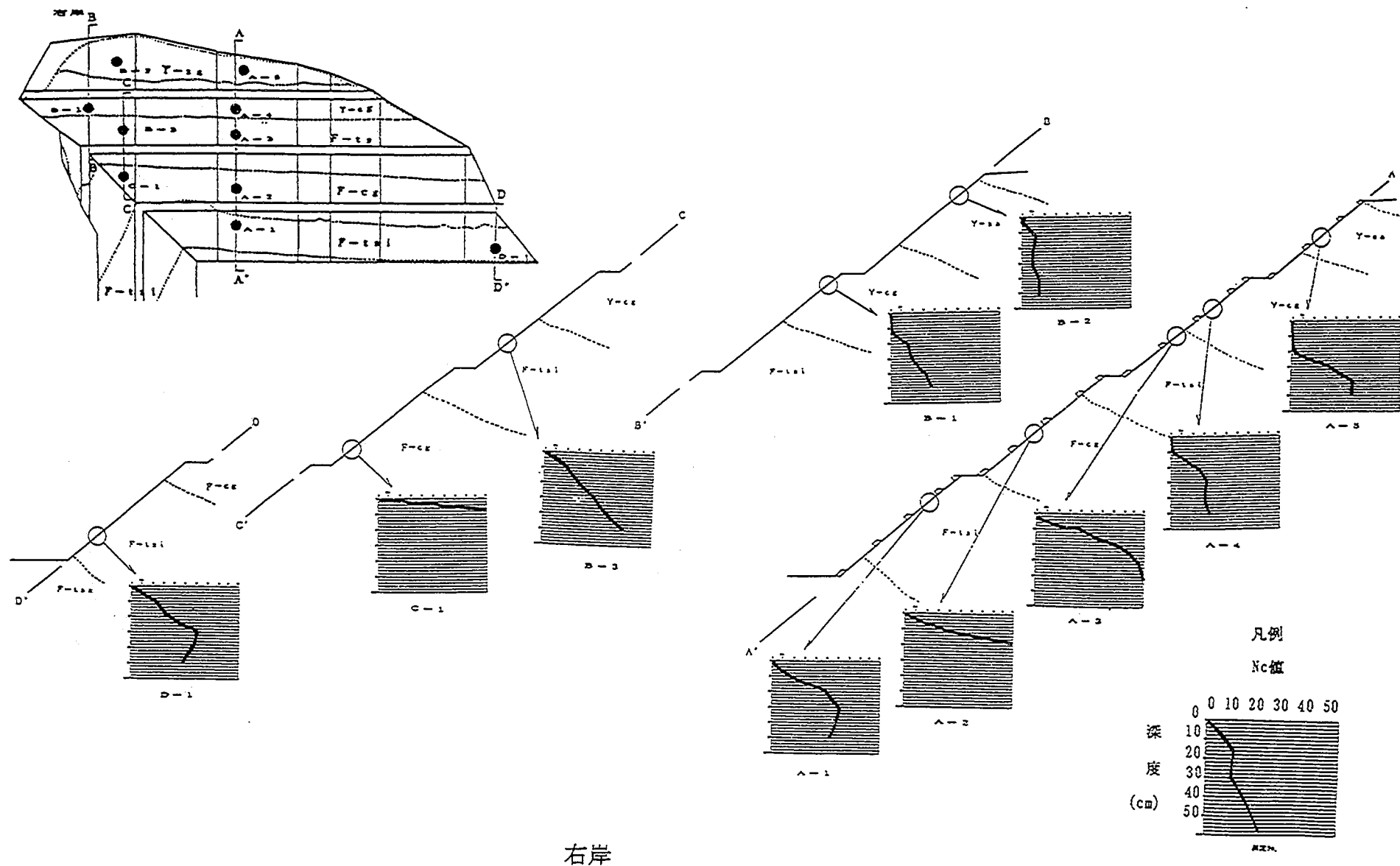


図-6 のり面工施工1年目の土研式簡易貫入試験結果(右岸)

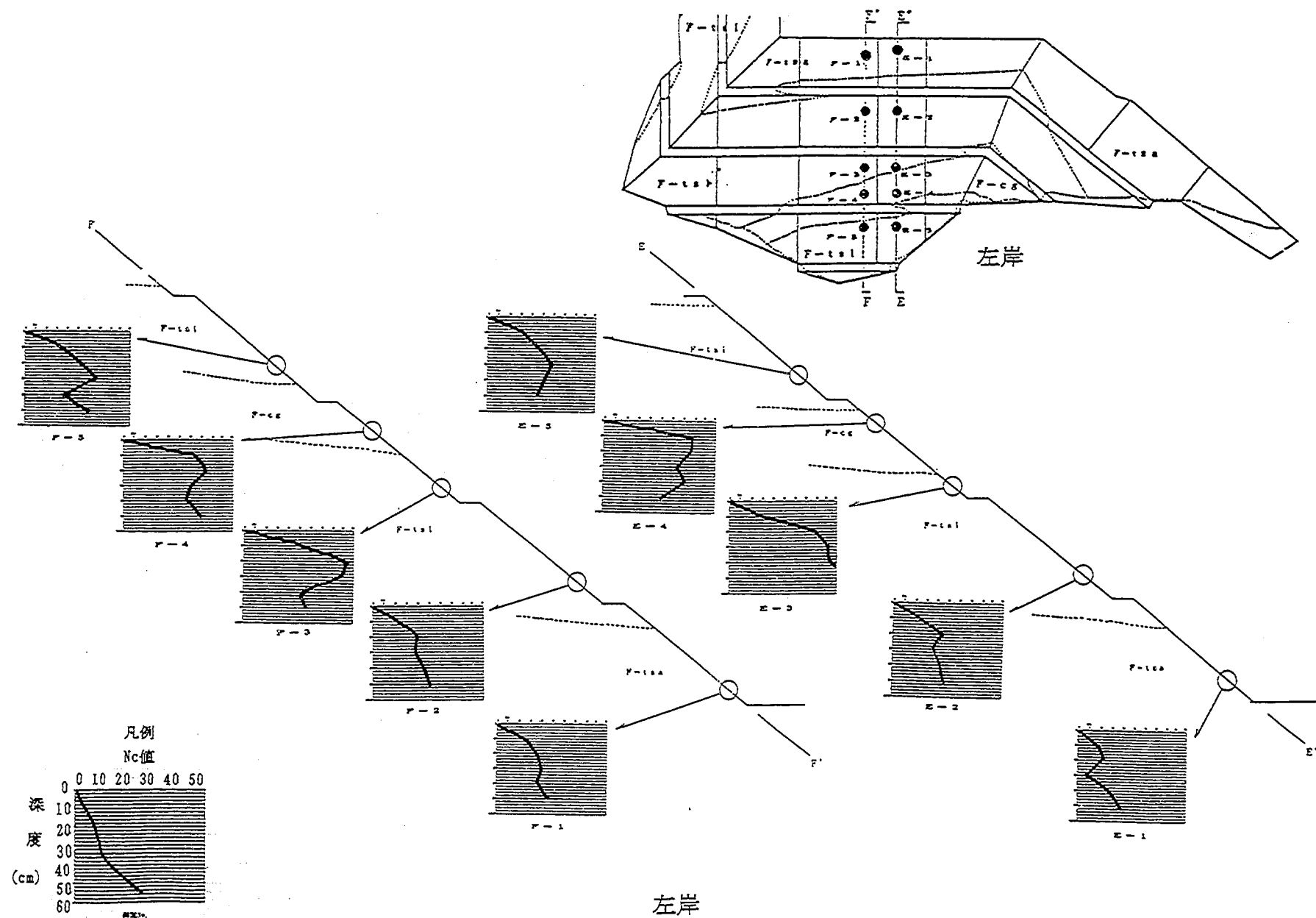


図-7 のり面工施工1年目の土研式簡易貫入試験結果(左岸)

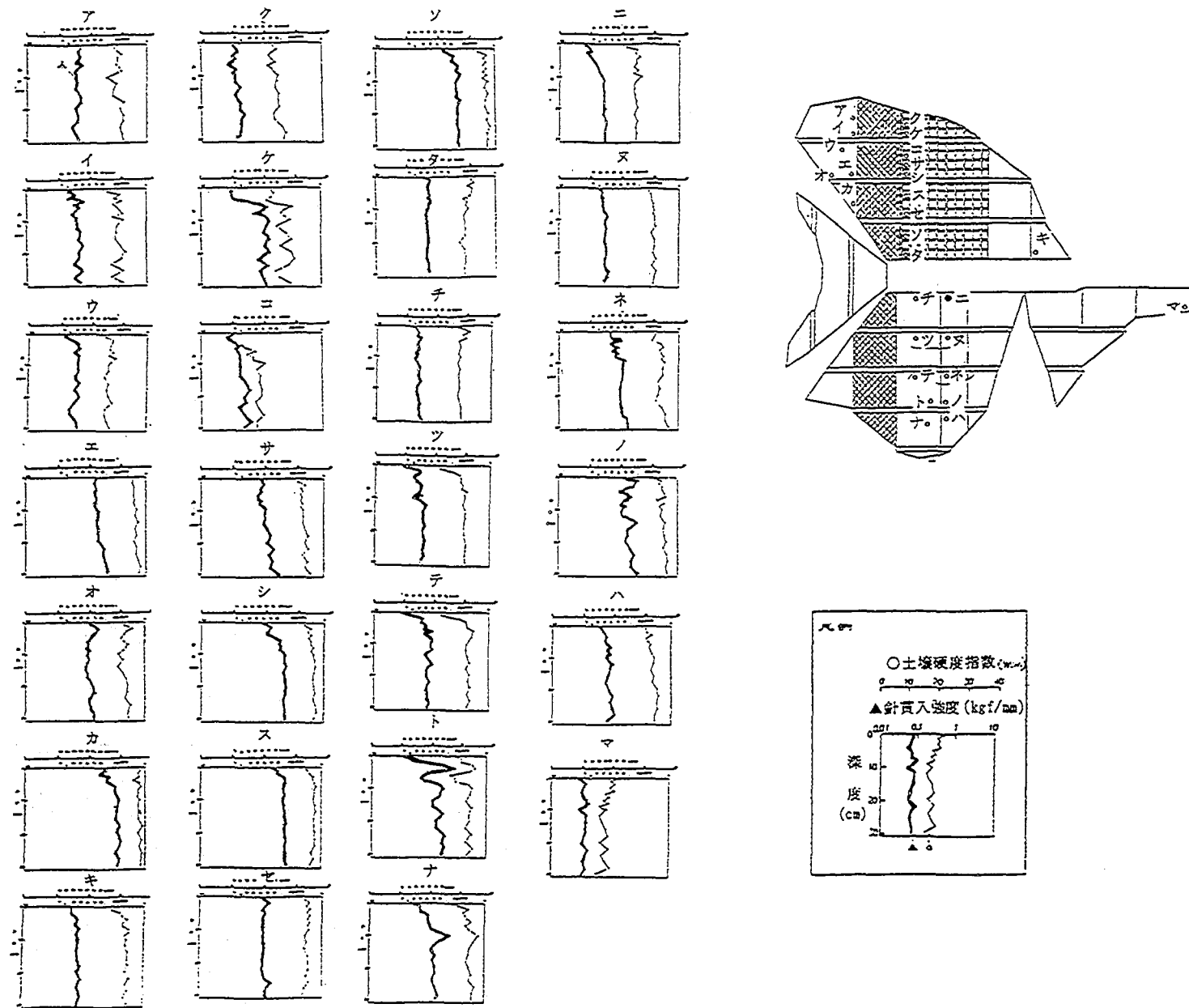


図-8 のり面工施工後4ヶ月での針貫入強度・土壌硬度の深度方向の変化

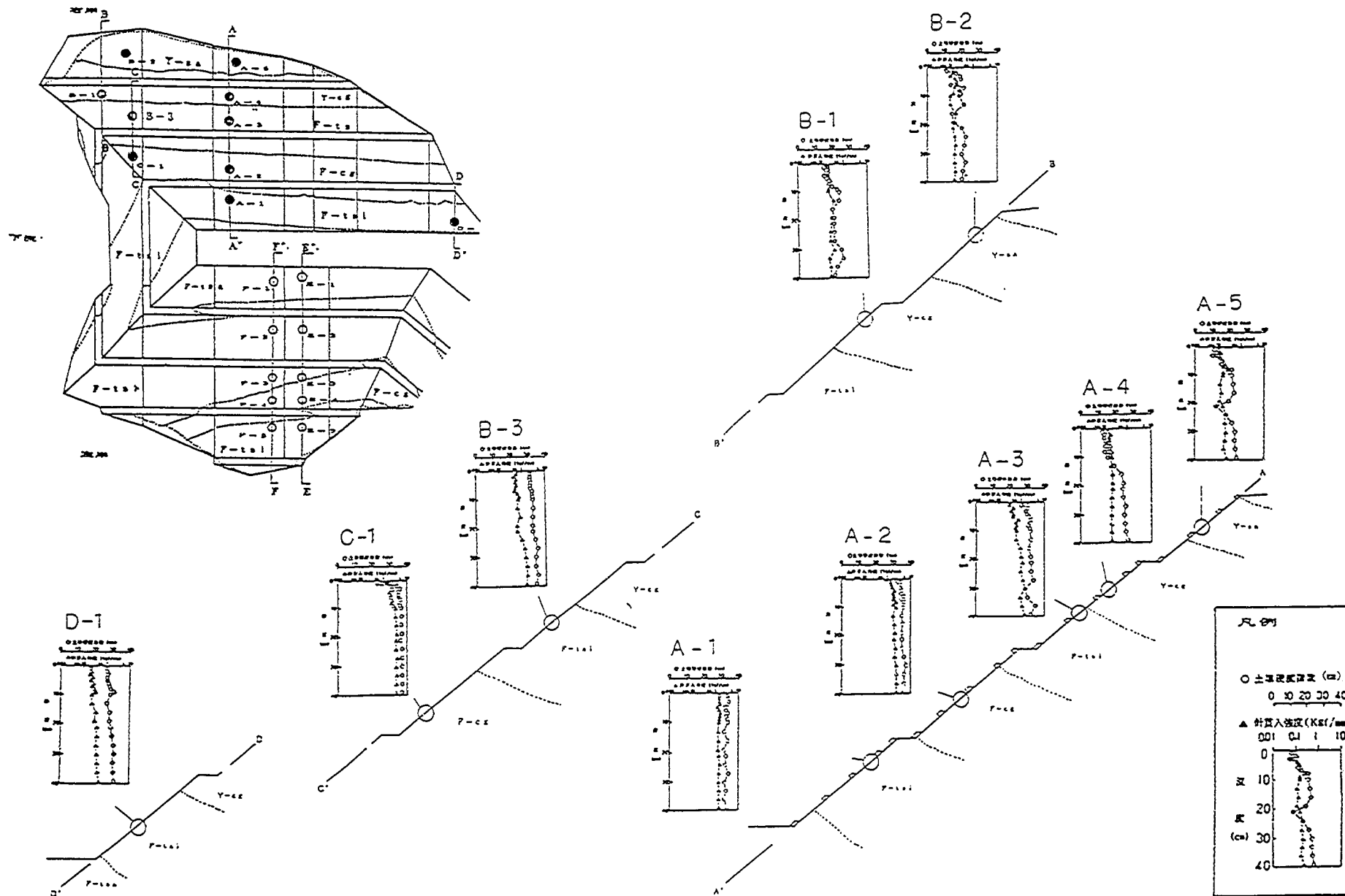


図-9 のり面工施工後1年での針貫入強度・土質硬度の深度方向の変化(右岸)

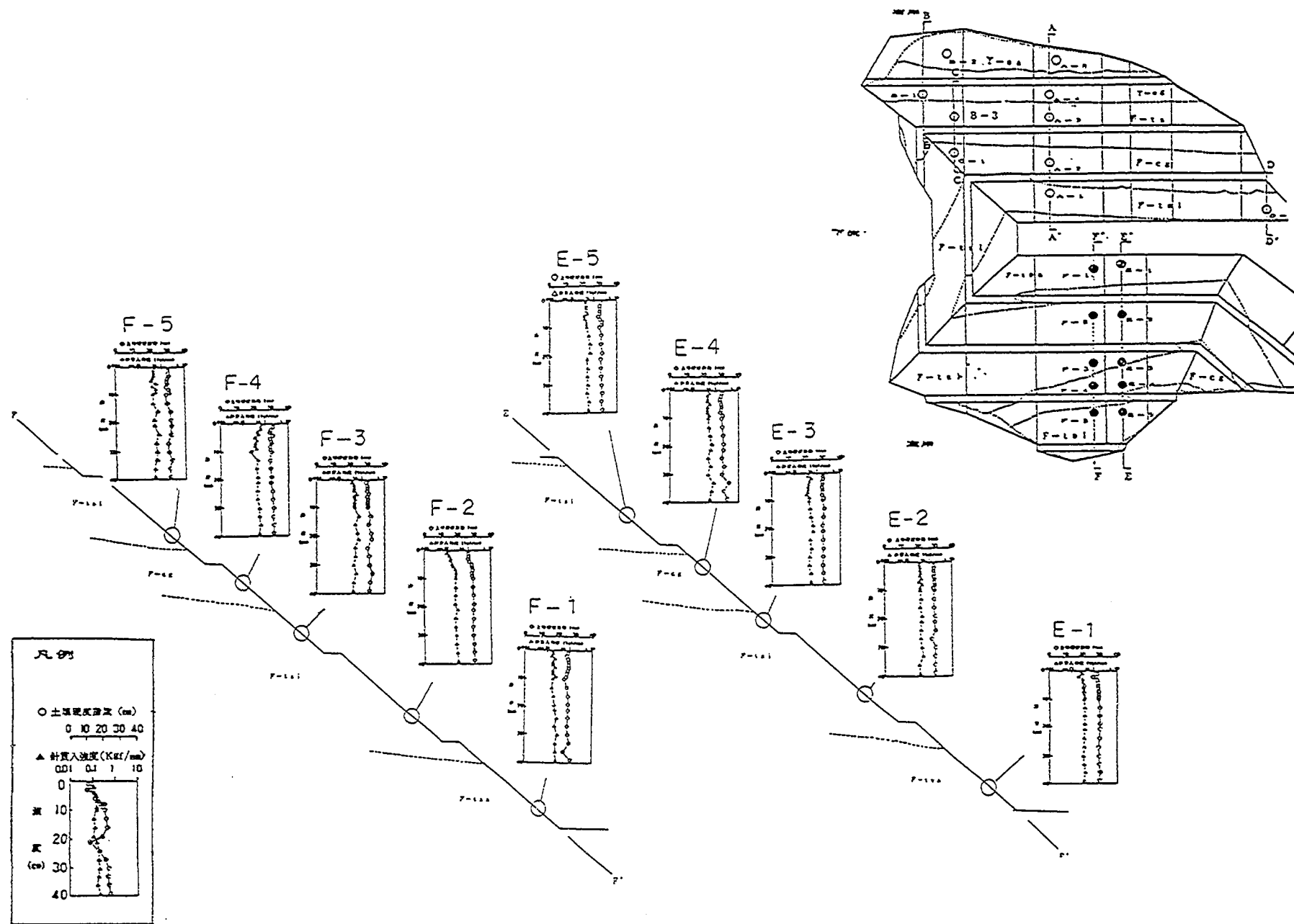


図-10 のり面施工後1年での針貫入強度・土質硬度の深度方向の変化(左岸)

表-4 のり面工施工後1年目の針貫入強度の深度変化

路面の位置	路面位置	層 質	試験区画		深 度 0 ~ 5 cm	深 度 5 ~ 10 cm	深 度 10 ~ 20 cm	深 度 20 ~ 30 cm	深 度 30 ~ 40 cm
			段	工法記号					
市 道	市 道	砂 層	4		0.10 ~ 0.16	0.12 ~ 0.22	0.10 ~ 0.18	0.12 ~ 0.16	0.14 ~ 0.18
		砂 層	3		0.20 ~ 0.24	0.20 ~ 0.28	0.22 ~ 0.32	0.24 ~ 0.28	0.20 ~ 0.32
		軽灰質シルト層	3		0.44 ~ 0.62	0.42 ~ 0.74	0.60 ~ 0.82	0.62 ~ 1.24	1.38 ~ 1.58
		凝 土 層	2		0.83 ~ 2.27	1.92 ~ 2.78	3.13 ~ 3.57	3.33 ~ 3.85	3.33 ~ 3.57
		軽灰質シルト層	1		0.18 ~ 0.22	0.20 ~ 0.30	0.22 ~ 0.32	0.34 ~ 0.36	0.36 ~ 0.46
	市道延長区間 に於ける市道 延長区間	砂 層	4	II-2-B	0.10 ~ 0.12	0.14 ~ 0.24	0.12 ~ 0.16	0.16 ~ 0.22	0.16 ~ 0.24
		砂 層	3	II-2-B	0.14 ~ 0.18	0.12 ~ 0.20	0.12 ~ 0.20	0.20 ~ 0.22	0.20
		軽灰質シルト層	3	II-2-B	0.30 ~ 0.44	0.56 ~ 0.74	0.20 ~ 0.98	0.96 ~ 1.38	0.90 ~ 1.36
		凝 土 層	2	II-1-A	0.90 ~ 1.96	1.82 ~ 2.30	1.68 ~ 2.20	1.94 ~ 2.35	2.02 ~ 2.42
		軽灰質シルト層	1	II-1-A	1.36 ~ 1.52	1.40 ~ 1.60	1.24 ~ 1.40	1.32 ~ 1.50	1.32 ~ 1.40
市 道	市 道	軽灰質シルト層	4		0.40 ~ 0.48	0.34 ~ 0.56	0.40 ~ 0.66	0.48 ~ 0.66	0.48 ~ 0.56
		凝 土 層	3		0.42 ~ 0.77	0.34 ~ 0.40	0.24 ~ 0.48	0.44 ~ 0.48	0.52 ~ 0.60
		軽灰質シルト層	3		0.30 ~ 0.40	0.40 ~ 0.56	0.46 ~ 0.64	0.50 ~ 0.70	0.40 ~ 0.52
		軽灰質シルト層	2		0.10 ~ 0.16	0.18 ~ 0.24	0.24 ~ 0.26	0.24 ~ 0.28	0.28 ~ 0.32
		軽灰質凝灰岩層	1		0.16 ~ 0.22	0.18 ~ 0.22	0.16 ~ 0.18	0.20 ~ 0.24	0.22 ~ 0.28
	市道延長区間 に於ける市道 延長区間	軽灰質シルト層	4	IV-1-B	0.40 ~ 0.46	0.36 ~ 0.54	0.48 ~ 0.64	0.50 ~ 0.52	0.46 ~ 0.58
		凝 土 層	3	IV-1-B	0.42 ~ 0.52	0.40 ~ 0.54	0.48 ~ 0.64	0.46 ~ 0.58	0.48 ~ 0.78
		軽灰質シルト層	3	IV-1-B	0.40 ~ 0.52	0.36 ~ 0.46	0.44 ~ 0.62	0.50 ~ 0.62	0.42 ~ 0.52
		軽灰質シルト層	2	IV-2-B	0.34 ~ 0.36	0.32 ~ 0.42	0.32 ~ 0.42	0.34 ~ 0.40	0.30 ~ 0.44
		軽灰質凝灰岩層	1	IV-2-B	0.20 ~ 0.30	0.32 ~ 0.36	0.34 ~ 0.38	0.34 ~ 0.36	0.32 ~ 0.40

のり面工施工後1年目におけるのり面表層の岩の硬さを大まかに把握するために左右岸において土研式簡易貫入試験を実施した結果(図-6, 7)によると, 山廻層は深度50~60cmまでN値5~15程度であり, 布志名層は, 風化の進んでいない礫岩部等では深度10~20cmでN値50以上になる場合が多く, シルト岩部では一般に深度10~30cm以深においてはほぼN値20~30で平衡に達している。ただし, シルト岩でも局部的にN値50以上になる場合もあり, 必ずしも一定しない。

のり面表層の岩の硬さの変化をより詳細に調査するために, のり面工施工後4ヶ月および1年経過後にのり面断面方向の岩の強度測定を行なった。強度試験法は, 微細な範囲で出来る試験として, 針貫入試験および山中式土壤硬度計を採用した。試験方法は, 施工後4ヶ月の場合はのり面に深さ30cm, 施工後1年の場合は40cmのピットを掘削し, 深度方向の強度分布を約1~3cm毎に測定した。測定は基本的には地山湿潤状態で行なったが, 乾燥硬化による試験値の変化を避けるため必要に応じて霧吹きで湿潤状態とした。試験結果を図-8~10に示す。同図によると, 針貫入強度(対数表示)と土壤硬度指数はほぼ類似した傾向を示している。4ヶ月経過後と1年経過後では必ずしも明瞭な差はみられないが, 全体としては, 表層数cm~十数cmに強度低下が認められる。また, 例えば無処理部の布志名層シルト岩に限定してやや詳しくみると, 4ヶ月経過後(図-8のツ, テ)は5~10cm以浅で急激な強度低下が認められるのに対し, 1年経過後(図-10のF-2, F-3)では表層数十cmでやや緩やかな強度低下となる傾向が認められる。これは, 風化が深部に進行するとともに強風化部と弱~未風化部の境界が不明瞭となっていく過程を示すものであろう。表-4はのり面表層の針貫入強度を, 地質およびのり面工種毎にまとめたものである。例えば同表より布志名層の凝灰質シルト岩について整理してみると, 施工後1年経過後にはのり面表層約30~40cmにおける針貫入強度は平均0.70 kgf/mm(換算一軸圧縮強度約30 kgf/cm²)であるが, のり面表層約0~5cmの針貫入強度は平均0.47 kgf/mm(換算一軸圧縮強度約16 kgf/cm²)と, 強度は半減しており, 全体でも, のり面表層約0~5cmと約30~40cmの針貫入強度の比は平均0.7程度となっている。また, 無処理部と厚層基材吹付部でも強度低下の程度は異なっており, のり面表層0~5cmとのり面表層約30~40cmの針貫入強度比は, 無処理部で平均0.64であるのに対し, 厚層基材吹付部では0.76であり, 厚層基材吹付工による風化抑制効果がわずかながら認められる。

3.3 のり面の侵食状況

のり面工施工直前の侵食状況を図-11, 写真-1~3に示す。侵食はガリー状に進行しており, 未固結の山廻層の侵食が最も著しい。一方布志名層中では, 風化の進んだもの, 強度の低いもの, あるいは細粒分の少ない均等粒径の岩(凝灰質シルト岩等)ほど侵食されやすく, 掘削時の岩級がC級の部分ではガリー状の洗堀部はほとんど見られないが, 風化の進んだD級の部分ではガリー状の溝や半球型の穴(礫の抜けたもの)が認められ, 深さ10cm以上の洗堀部も生じている。ガリー状の溝は小段と小段の間で発生しかつ消滅することが多く, 二段以上にまたがることは少ない。一般にのり面上部に比べ下部の方が流下する雨水の絶対量が増加するため洗堀が進んでいる。また, 地層の硬軟の差異に影響された差別侵食が認められる。左岸上部の下部シルト岩層では深さ20~30cmで幅約10mにわたって小崩壊(肌落ち)も生じた。湧水は右岸三段のり面の中央部で山廻層の下位および左岸最下段のり面ののり尻部で認められた。

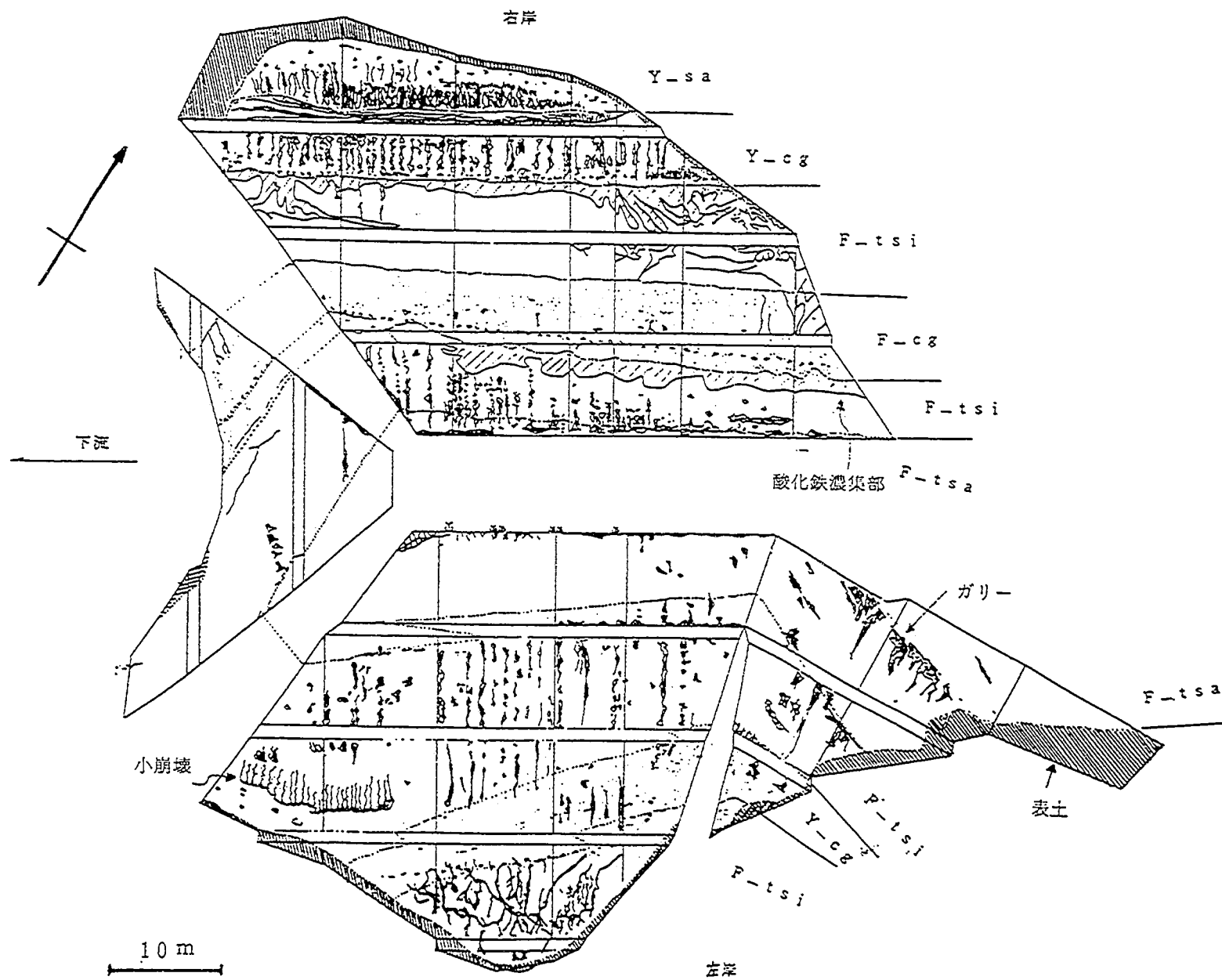


図-11 のり面工施工直前の侵食状況

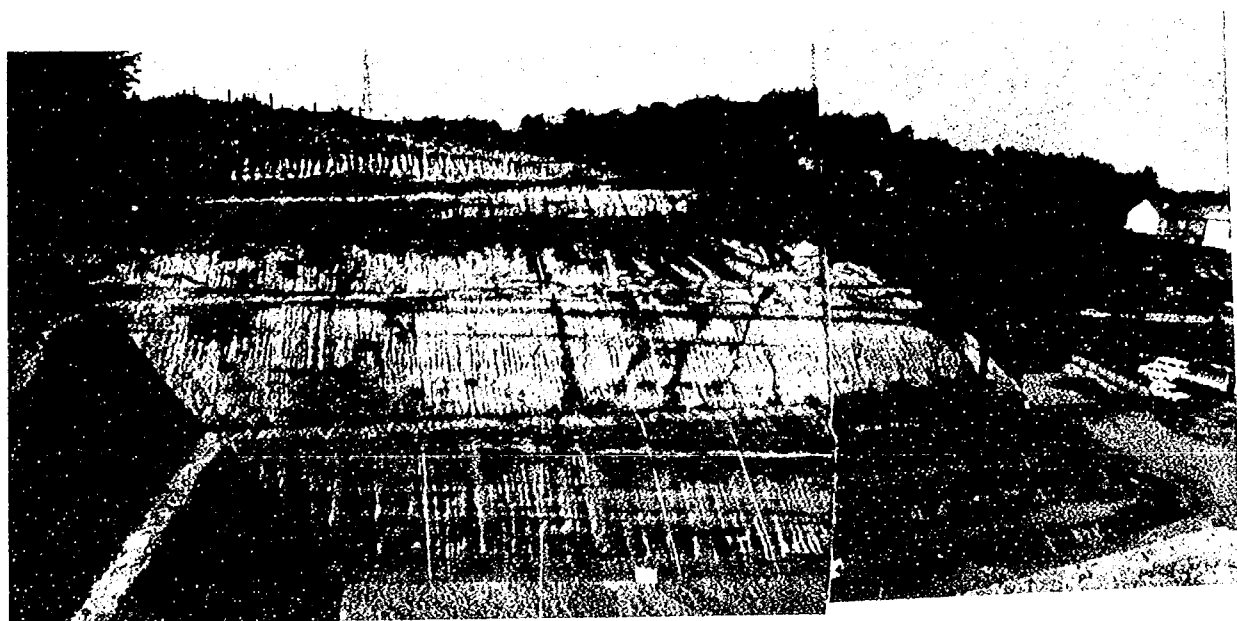


写真- 1 のり面工施工直前の試験のり面（右岸側）

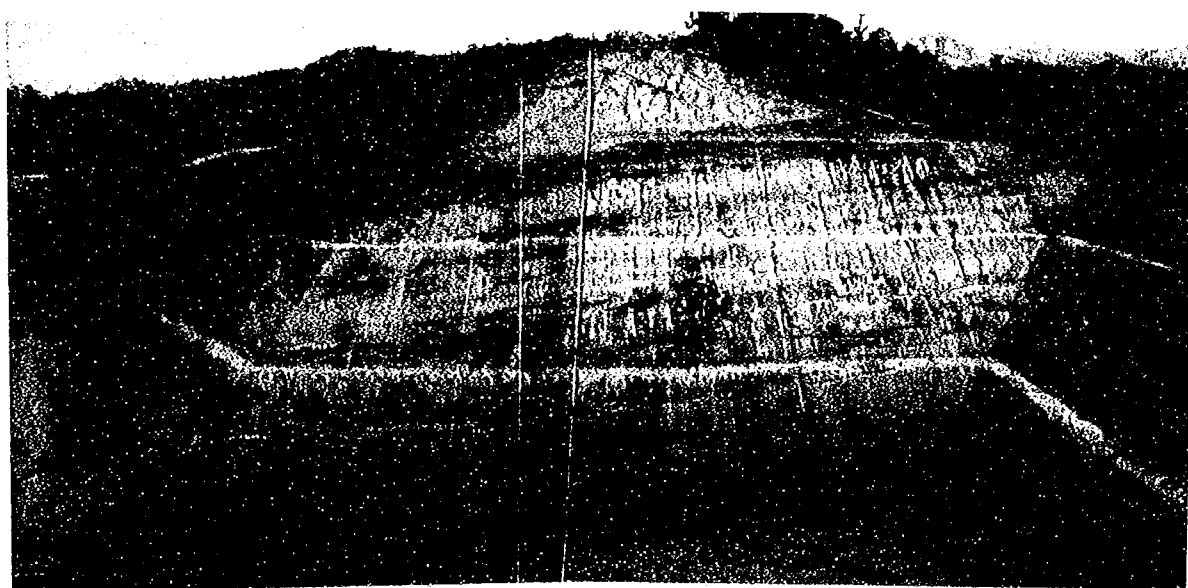


写真- 2 のり面工施工直前の試験のり面（左岸側）

図- 12および表- 5 は各種のり面工の施工直後から約 1 年にわたり侵食量の測定を実施した測定位置とその結果である。測定はのり面の横方向に地質毎に水系を張り、のり面表面と水系の距離を測定することによって求めた。同表は、計測開始（昭和63年12月）からの通算侵食（堆積）量を示している。のり肩直下では侵食が著しく、のり肩直上では堆積が生じるためばらつきが大きい。無処理部では平均 20.3 mm/年の侵食が認められ、場所によっては、ガリーによって 100 mm以上の侵食も生じている。のり面工を施工した箇所でも侵食が発生しているが、侵食跡がないことやのり面下部への堆積が乏しいことなどから、この大半は吹付基材自体の収縮によるものと思われる。

表-5 通算侵食量(12月がのり面施工後1年目)

		地 質	記 号	生着基盤	位置 (段)	3 月		9 月		1 0 月		1 1 月		1 2 月		備 考	
						平均 (mm)	最大浸食 (mm)	平均 (mm)	最大浸食 (mm)	平均 (mm)	最大浸食 (mm)	平均 (mm)	最大浸食 (mm)	平均 (mm)	最大浸食 (mm)		
右	無 処 理	砂 層	R-17		4、上	-2.2	-13.0	-28.0	-113	-30.3	-110	-31.0	-122	-31.6	-117		
		凝灰質シルト岩	R-16		4、下	-7.3	-45.0	-31.0	-121	-32.4	-124	-32.8	-126	-33.9	-126		
		凝灰岩	R-15		3、上	-8.8	-26.0	-14.9	-115	-16.7	-117	-16.9	-119	-18.0	-122		
		凝灰質シルト岩	R-14		3、下	-7.6	-27.0	-27.1	-96	-27.4	-97	-27.3	-96	-27.5	-97		
		凝灰質シルト岩+凝灰岩	R-13		2、上	-2.2	-7.0	-19.7	-46	-19.8	-46	-19.8	-47	-19.8	-46		
		凝灰岩	R-12		1、上	+0.7	-15.0	-17.2	-30	-19.0	-36	-21.0	-37	-22.5	-36		
		凝灰質シルト岩	R-18		1、下	+0.3	-9.0	-1.8	-15	-0.2	-3	-1.0	-5	+7.0	-5		
	軽 装 修 枠	砂 層+凝 灰 岩	R-12	厚層基材吹付	4、下	+01.0	-10.0	-2.6	-19	-2.4	-19	-2.0	-18	-2.0	-17		
		凝灰質シルト岩	R-11	厚層基材吹付	3、下	-6.3	-16.0	-1.4	-47	-1.7	-46	-1.6	-47	-1.8	-48		
		凝灰岩	R-10	厚層基材吹付	2、下	-5.8	-25.0	-0.6	-18	-0.1	-14	-1.0	-15	-2.1	-19		
		凝灰質シルト岩	R-9	厚層基材吹付	1、下	-24.6	-192.0	-18.7	-106	-19.2	-103	-20.1	-107	-20.7	-107		
	現場 打 設 枠	砂 層+凝 灰 岩	R-8	厚層基材吹付	4、下	+0.7	-11.0	+13.4	-19	+21.9	-20	+15.9	-20	+15.9	-21		
		凝灰質シルト岩	R-7	厚層基材吹付	3、下	-1.5	-17.0	-9.0	-24	-8.5	-26	-9.7	-27	-10.2	-27		
		凝灰岩	R-6	厚層基材吹付	2、下	-4.3	-19.0	-8.1	-33	-8.3	-33	-8.5	-34	-8.8	-34		
		凝灰質シルト岩	R-5	厚層基材吹付	1、下	-2.2	-20.0	-19.5	-68	-20.3	-68	-20.5	-68	-20.9	-68		
		砂 層+凝 灰 岩	R-4	客土吹付	4、下	-6.9	-10.0	-11.3	-16	-11.3	-18	-13.0	-20	-14.3	-20		
		凝灰質シルト岩	R-3	客土吹付	3、下	-1.5	-66.0	-9.2	-17	-10.3	-21	-10.9	-20	-11.7	-22		
		凝灰質シルト岩	R-2	客土吹付	2、下	-4.9	-43.0	-0.7	-11	-0.9	-12	-1.4	-11	-1.7	-12		
		凝灰岩	R-1	客土吹付	1、下	-2.9	-101.0	-8.1	-51	-7.4	-51	-6.6	-54	-6.1	-55		
左	無 処 理	凝灰質シルト岩	L-7		4、下	-5.7	-20.0	-30.5	-58	-31.0	-58	-31.6	-60	-32.1	-62		
		凝灰質シルト岩	L-6		3、下	-5.7	-82.0	-22.3	-96	-22.8	-100	-23.4	-100	-23.6	-100		
		凝灰質シルト岩	L-5		2、下	-5.3	-93.0	-30.1	-94	-30.5	-98	-29.6	-95	-29.9	-94		
		凝灰質細粒砂岩	L-4		1、下	-2.6	-15.0	-8.6	-6	+9.5	-6	+9.2	-5	+8.7	-5		
	軽 装 修 枠	凝灰質シルト岩	L-8	客土吹付	2、下	-3.0	-23.0	-6.5	-22	-5.7	-21	-6.5	-22	-6.8	-21		
		鋼 の み	凝灰質シルト岩(下流)	L-3	厚層基材吹付	2、下	-5.8	-65.0	-4.2	-35	-4.3	-35	-4.8	-36	-4.8	-37	
			凝灰質シルト岩(上流)	L-2	厚層基材吹付	2、下	-0.5	-38.0	-4.7	-45	-4.9	-46	-5.0	-45	-4.9	-45	
	凝灰質シルト細粒土	L-1	客土吹付	2、下	-1.7	-33.0	-2.7	-48	-2.5	-48	-3.0	-37	-2.4	-37			

3.4 のり面保護工の劣化状況

施工後1年程度であるので、のり面保護工自体の劣化はほとんど見られず、局所的な湧水により植生の生育不良が認められる程度である。しかし、布志名層中には局所的に pH が低い部分が認められたので、深度方向の pH の変化を調査するとともに、鉄筋杭の腐食および植生への影響について調査した。表-6 はのり面表層および深度方向の pH である。同表によると、布志名層中の右岸礫岩部で pH 3.46 と、強酸性を示している部分がある。しかし深度方向には次第に pH が高くなる傾向が認められる。強酸性を示す原因として酸性硫酸塩土壌²²⁾（岩石や土壌中の黄鉄鉱 FeS_2 等の硫化物が空気中にさらされて酸化を受け、その結果生じる硫酸等の強酸性物質によって著しく酸性化した土壌）が考えられ、この種の土壌ではのり面構造物の腐食や植生の生育不良等の可能性がある。佐々木²³⁾によると酸性硫酸塩土壌の判定法は pH が 3.5 以下で、王水可溶性硫黄が 400 mg/100 g 以上のものとされている。ここでは易酸化性硫黄（酸化剤 H_2O_2 によって溶解する硫黄量から、 H_2O によって溶解する硫黄量を差し引いたもので、黄鉄鉱等を構成する硫黄がこれに当たる。）が王水可溶性硫黄の 80% 以上を示す²³⁾ ことを目安として、易酸化性硫黄の量を測定して酸性硫酸塩土壌かどうか判定した。その結果、易酸化性硫黄は 139 mg / 100 g で、換算王水可溶性硫黄量は 174 mg / 100 g となった。そのときの最低 pH は 2.4 であった。したがって、本土壌は、厳密には酸性硫酸塩土壌とはいえないが、それに近い化学特性を持つことがわかった。そこで、図-13 に示す箇所で $\phi = 16\text{mm}$ 、 $l = 400\text{mm}$ の鉄筋棒を各地質に 10 本ずつ地山表面に頭部がわずかに出るように設置し、平成元年 9 月 15 日から約 90 日間に渡り腐食状況を調査した。表-7 は、各地質における鉄筋の重量損失を示

表-6 のり面表層および深度方向の pH

地質名 (段)		のり面無処理部前の 表層土壌の pH (H ₂ O)	無 処 理 部				法 面 処 理 部 (厚 層 基 材 吹 付)		
		0 ~ 5 c m	0~5cm 深	10~20cm深	30~40cm深	0~5cm 深	10~20cm深	30~40cm深	
右岸	山頂層 砂層 (4)	5.70	5.09	5.35	5.40	5.62	5.39	5.22	
	布志名層 礫層 (3)	5.54	5.56	5.59	5.51	6.12	6.67	6.56	
	布志名層 凝灰質シルト (3)	5.37	5.64	5.64	5.44	6.07	5.98	5.92	
	布志名層 礫岩 (2)	3.46	3.58	4.42	5.88	5.47	4.12	5.36	
	布志名層 凝灰質シルト (1)	5.55	6.34	6.17	6.29	7.31	7.06	6.33	
左岸	布志名層 凝灰質シルト (4)		6.29	6.17	5.77	6.11	5.89	5.48	
	布志名層 礫岩 (3)		6.31	6.39	6.28	5.99	6.07	6.08	
	布志名層 凝灰質シルト (2)		6.16	6.30	6.25	6.30	6.13	6.15	
	布志名層 凝灰質細粒 (1)		6.21	6.11	6.17	6.46	6.06	5.84	

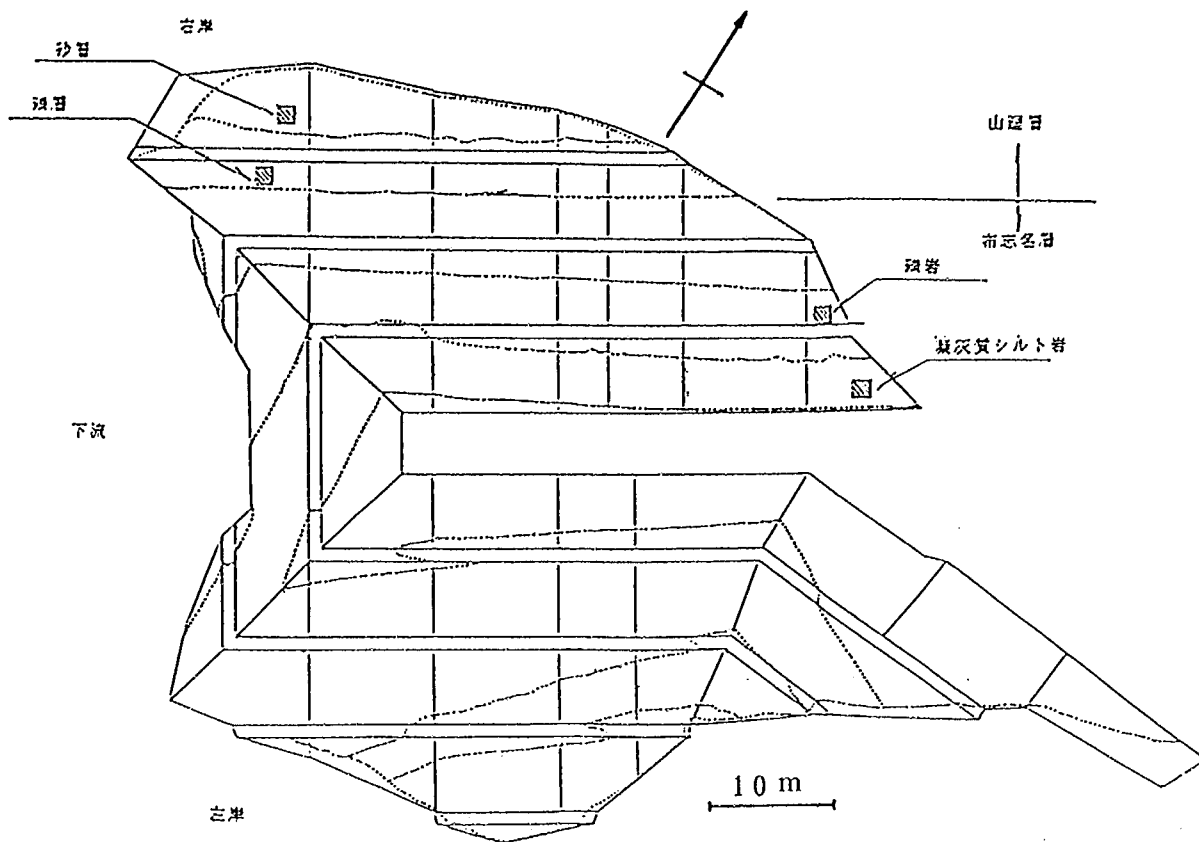


図-13 鉄筋設置位置

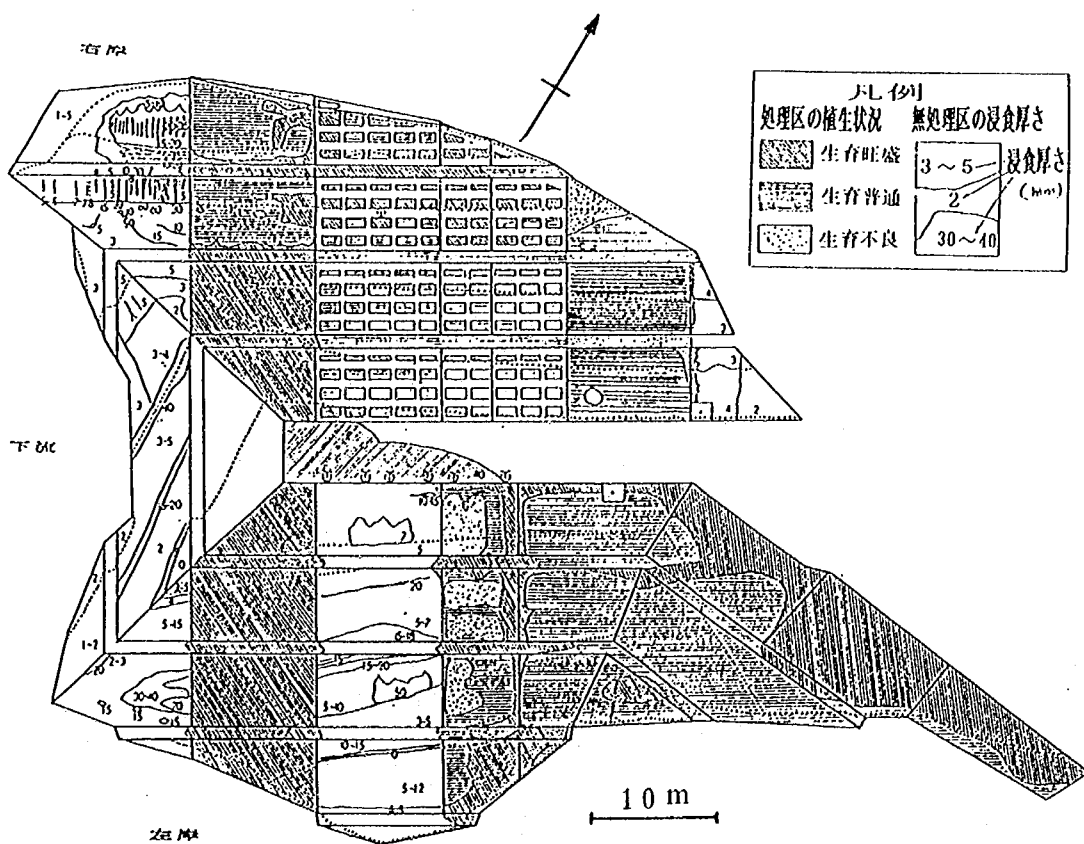


図-14 のり面工施工1年目の植生の繁茂状況

(埋設後90日目の、サビをとった重量/埋設前重量)

表-8 施工工種、位置等による植生の繁茂状況の比較

— 26 —

したものである。同表によると、酸性度の高い礫岩の重量損失が最も大きい、その差は小さい。また、平成元年12月における植生の繁茂状況（図-14）と図-2を比較しても、礫岩部の生育は他の岩種と同程度である。ただし客土や厚層基材を通常よりやや厚めに吹付けていることにも起因するものと思われるので、さらに長期の観察を行なう必要がある。

植物生育の活力の程度について平成元年9月から12月まで調査した結果によると、湧水部や日陰部のケンタッキーブルーグラスがサビ病にかかり、また、コンクリート吹付工上に厚層基材を吹きつけた部分などで乾燥によって植生が衰退したが、特に大きな問題は見られなかった。図-15, 16は平成元年12月における植物種の優占度（①密度：単位面積における植生の本数、②被度：単位面積に占める各植物冠部の面積、③群度：植物の分布形態を示すもので、カーペット状・カーペットに穴のある状態・まだら状・小群状・単独などに区分したもの、④草丈：地面際から最先端の葉先までの平均長さ、において①～④各々の最高値を示す植物を100として他の植物の相対値を計算し、4つの値の平均値を各植物について求めたもの）の比を示したものである。全体としては、草本種子量がやや過剰の傾向にあり、A配合における樹木やB配合における花の生育がやや劣っていることがわかった。なお、施工工種、位置等による植生個々の繁茂状況は表-8に示す通りである。

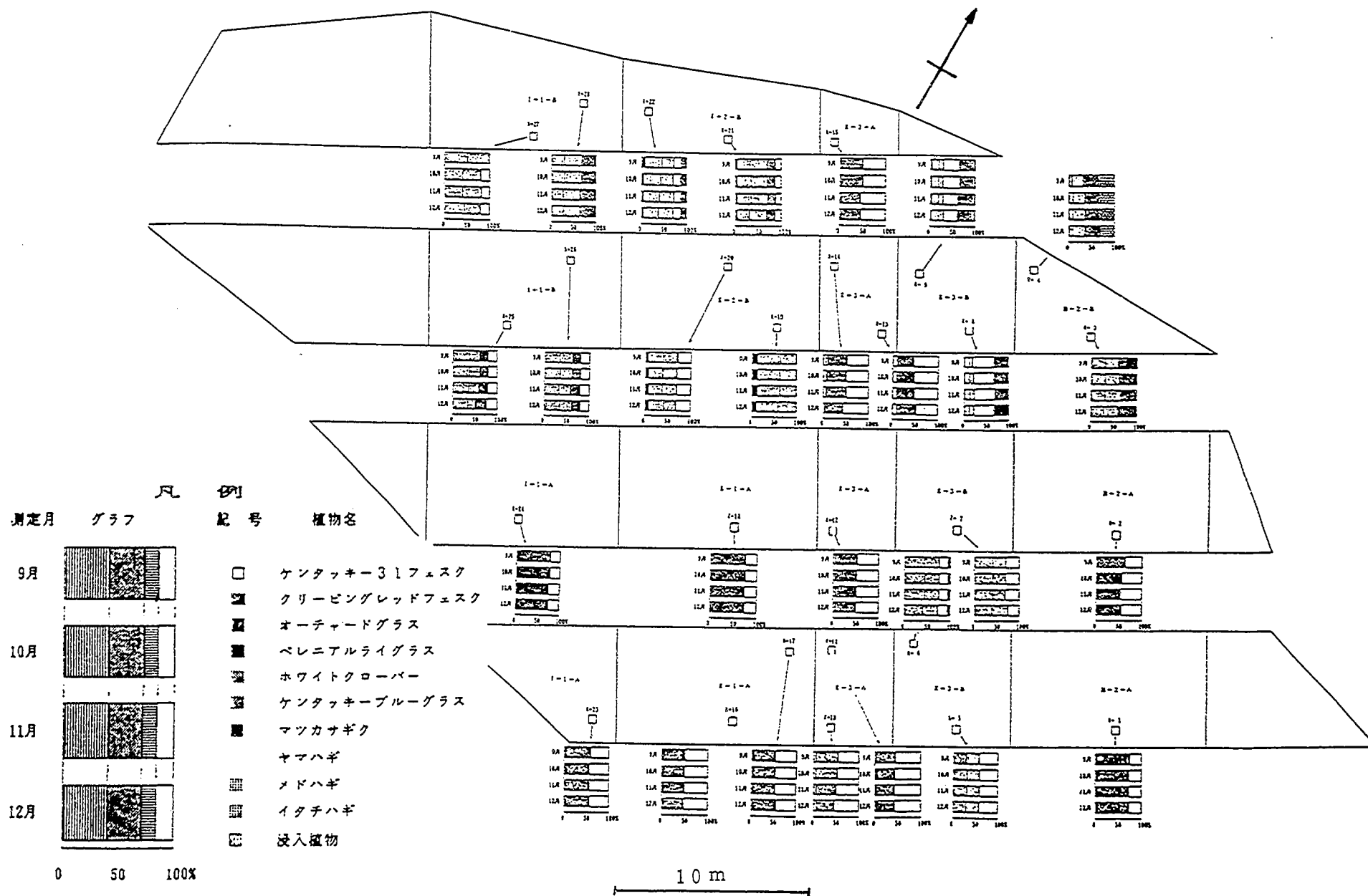


図-15 のり面工施工1年目の植生の優占度比 (右岸)

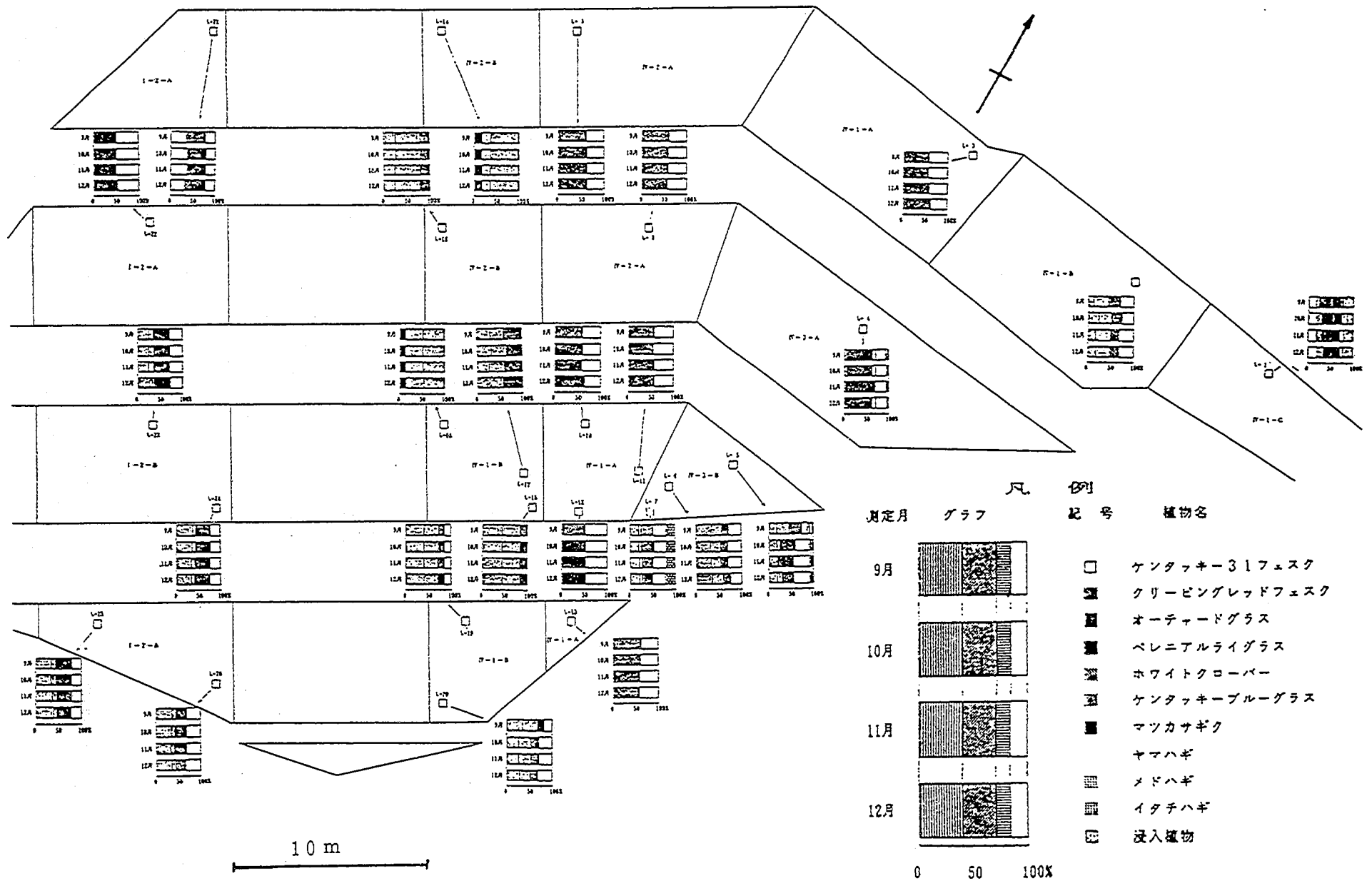


図-16 のり面工施工1年目の植生の優占度比(左岸)

4. 劣化機構の検討

3章において明らかになったように試験のり面の劣化は地山の風化・侵食とのり面工の劣化に大別される。のり面工の劣化は現状では特に問題とならないので、ここでは風化・侵食について検討する。

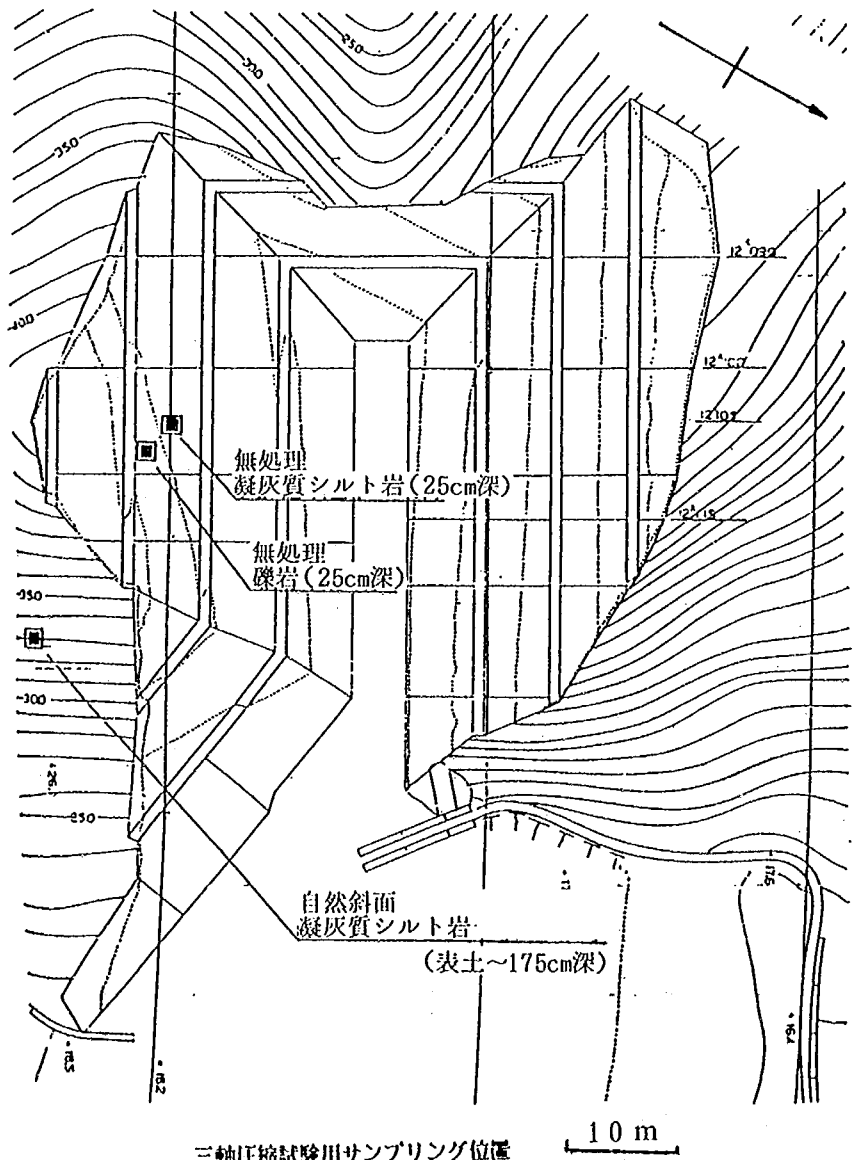
試験のり面の地質の中では、山廻層は元々未固結層であるため長期間経過後も強度は低い値で大きな変化はないが、布志名層は強度低下が著しいため、布志名層については掘削時の安定のみならず長期間経過後の安定性を検討する必要がある。本章では布志名層の中でも特に風化・侵食が著しい凝灰質シルト岩（以降、シルト岩と称する）をとりあげ、風化による各種性状の変化を調査し、風化機構について検討する。

4.1 肉眼観察による岩盤性状の変化

ボーリングコア、のり面表層、自然斜面等のシルト岩の肉眼観察によると、比較的新鮮なシルト岩は明灰色であるがやや風化するとレモン色～淡黄色となり（以降、これを風化初期とする）、さらに風化すると黄色～黄褐色になり指で簡単に粉々に崩れるようになる（これを風化中期とする）。自然斜面の表層部付近ではやや粘り気を持ち細粒分が多くなる（これを風化後期とする）。風化中期以降は、一度乾燥した試料を再び水浸すると砂泥状となるため、岩よりもむしろ土として取扱う必要がある。以下、風化層とは、一般に風化中期以降の土砂化した層を指すものとする。

4.2 物理工学性状の変化

図-17、18に示す地点で風化



三軸圧縮試験用サンプリング位置

図-17 三軸圧縮試験用サンプリング位置

程度の異なる不攪乱試料，計13試料を採取し， CU 法により三軸圧縮試験を実施した。図-19は，ボーリングコアを用いた既存の三軸圧縮試験結果（4試料）とともに有効応力表示による粘着力 c' と内部摩擦角 ϕ' の関係を示したものである。同図によると風化初期（図中◎）に急激な c' の低下があり，風化中期（図中○～△）は c' ， ϕ' ともに低下する。風化後期（図中▲～+）は中期より c' が低下し， c' と ϕ' はやや負の相関を持つ。図-20は前図と同一の供試体を用いて針貫入強度（ NP ）と土壌硬度（ X ）の関係をみたものである。同図によると，風化初期～中期（無処理のり面から自然斜面100 cm以深）の強度変化に対しては，針貫入強度の方が鋭敏に変化し，風化後期（自然斜面100 cm以浅）の強度変化に対しては，土壌硬度の方が鋭敏に変化する可能性が高い。ただしシルト岩の風化後期の強度変化は小さく，風

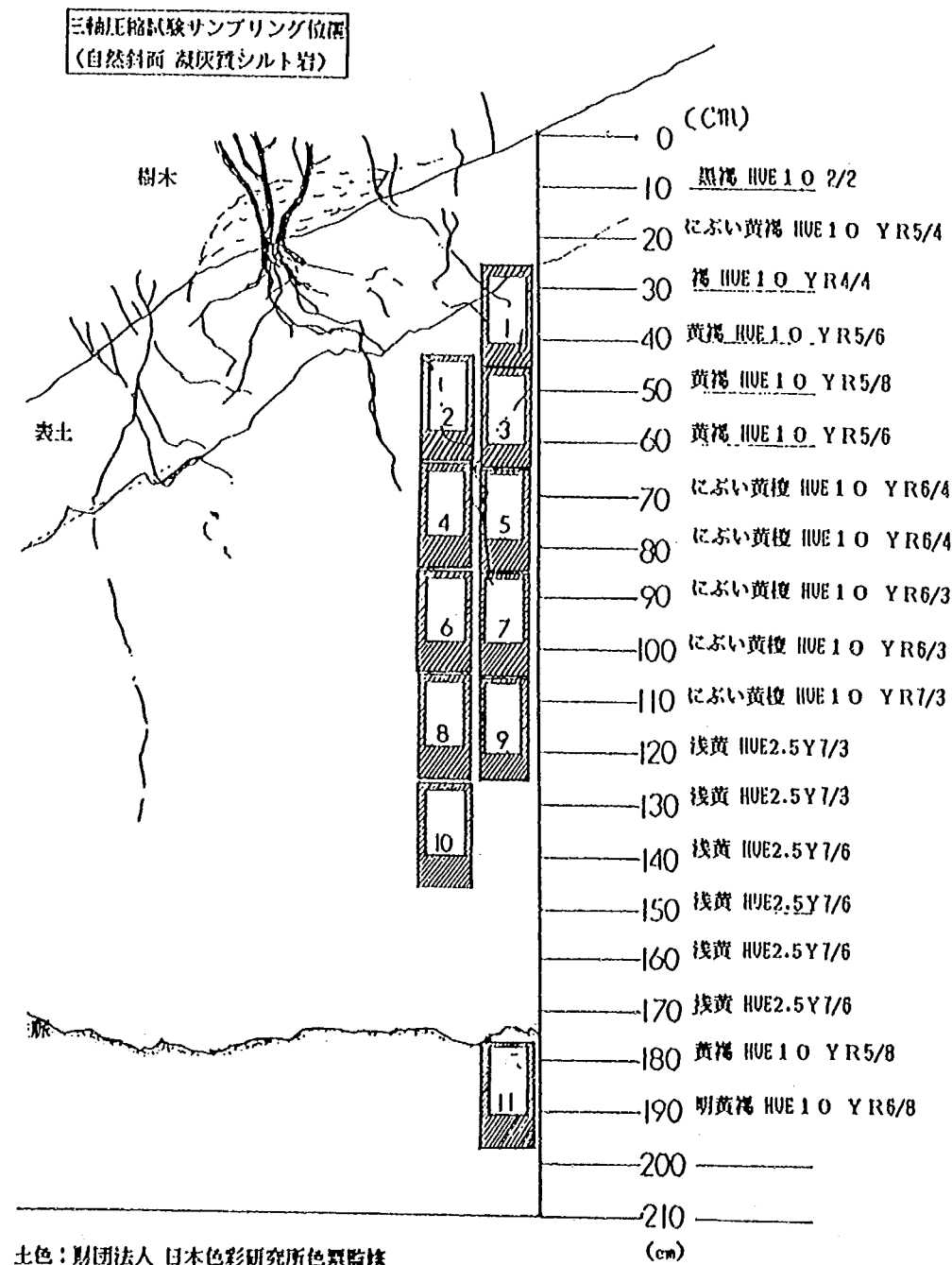


図-18 三軸圧縮試験用サンプリング位置（自然斜面）

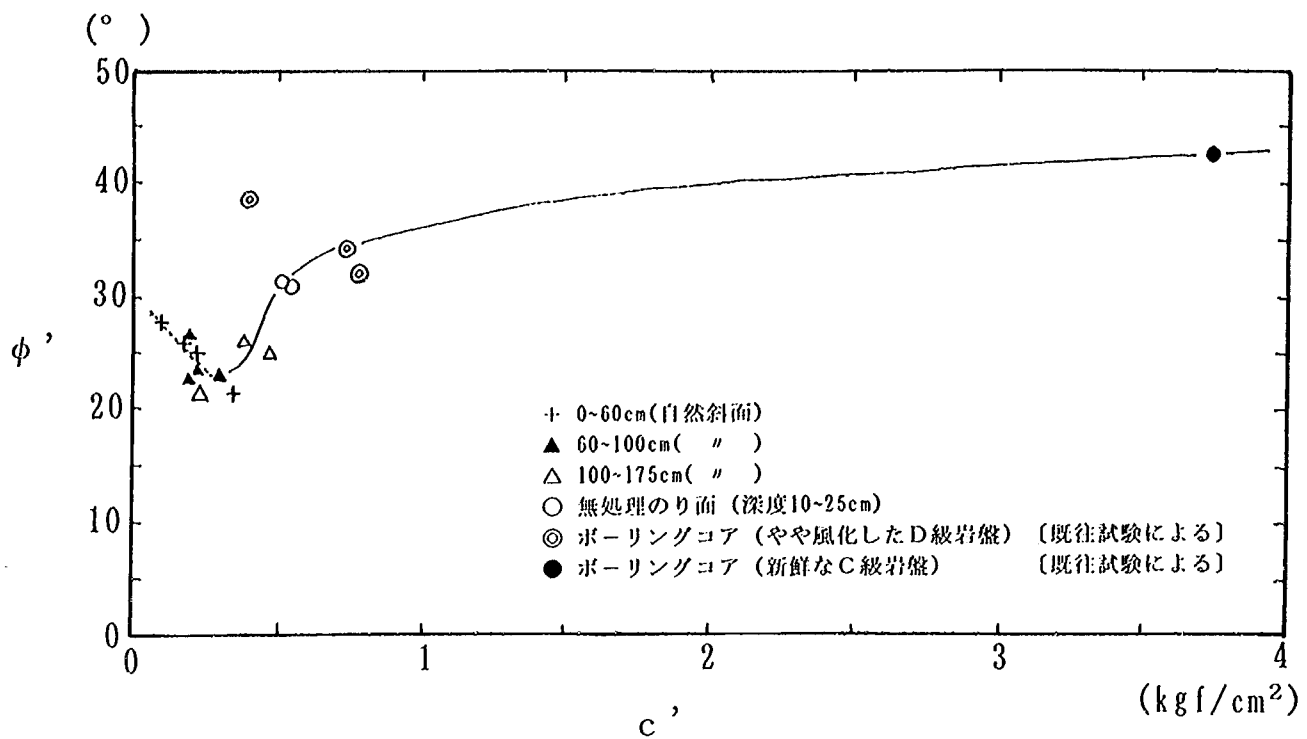


図-19 凝灰質シルト岩（布志名層）の粘着力 c' と内部摩擦角 ϕ' の関係

化初期～中期の大きな強度変化を精度良く判定出来る針貫入試験の方が、のり面表層の風化の判定に対して有効と考えられる。そこでのり面表層の微小領域での強度定数を推定するために、針貫入強度 NP と三軸圧縮試験における粘着力 c' および内部摩擦角 ϕ' の関係をみたのが図-21, 22である。同図によると針貫入強度は c' , ϕ' と相関が認められる。図-23はのり面工施工後1年経過時のシルト岩の深度方向の針貫入強度の変化であるが、のり面無処理部表層で針貫入強度は最低 0.1 kgf/mm^2 であるので、図-21, 22から $c' \div 0.46 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi' \div 28^\circ$ まで強度低下しており風化中期に相当することがわかる。

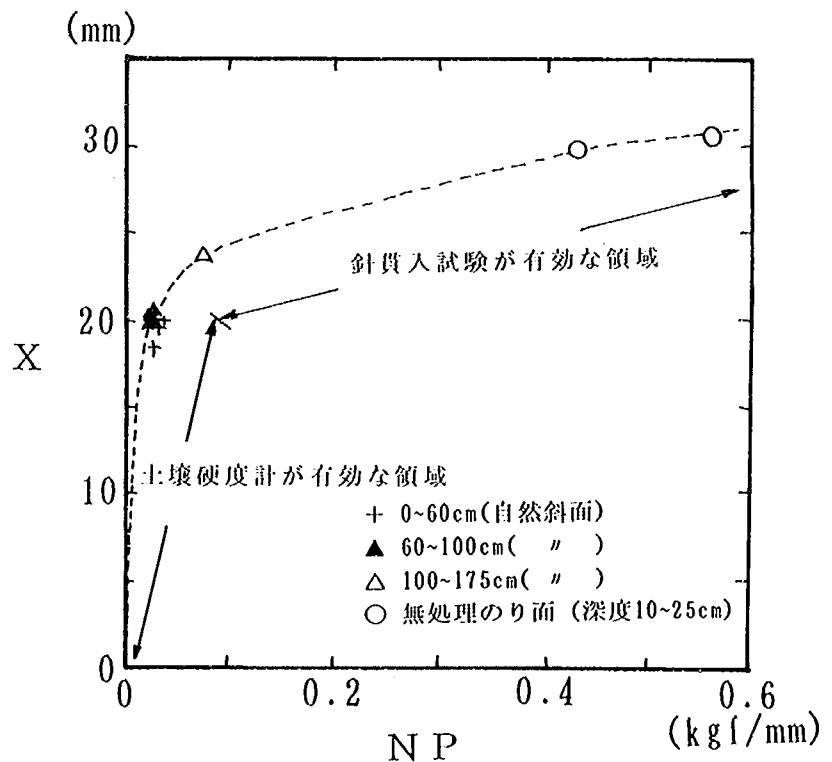


図-20 凝灰質シルト岩における針貫入強度 NP と土壌硬度 X の関係

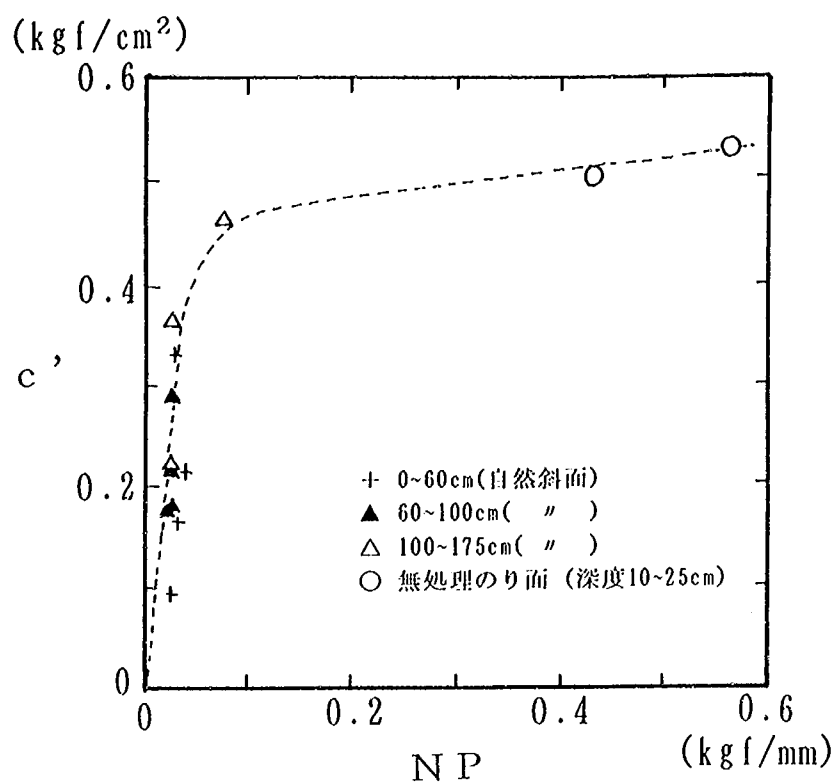


図-21 凝灰質シルト岩における針貫入強度 NP と粘着力 c' の関係

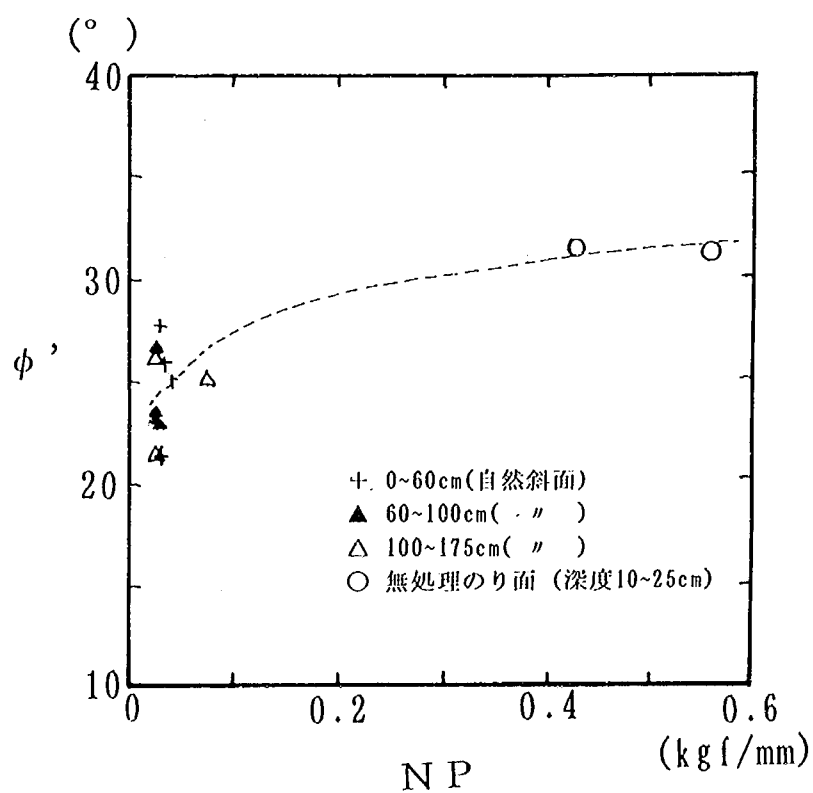


図-22 凝灰質シルト岩における針貫入強度 NP と内部摩擦角 ϕ' の関係

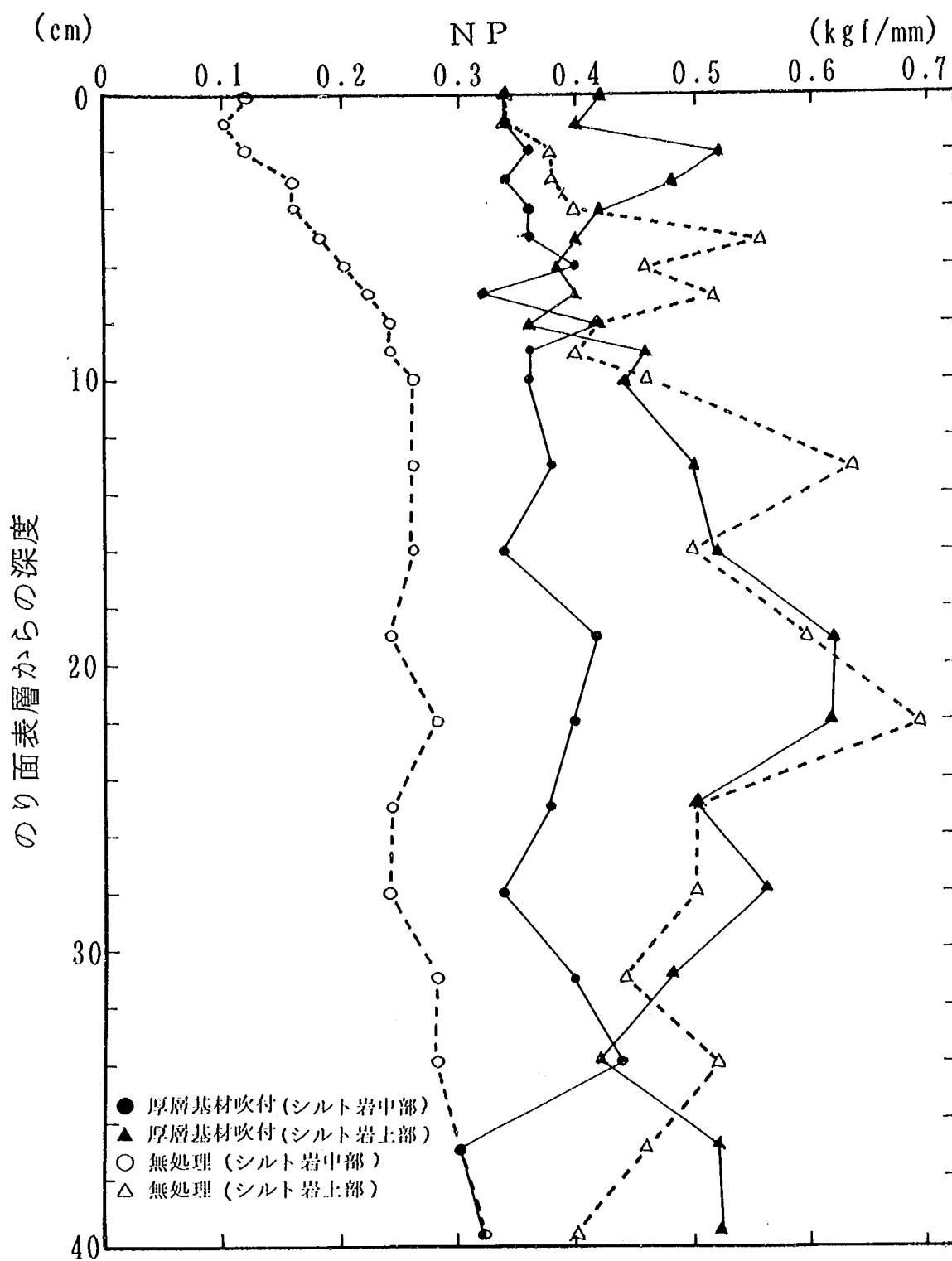


図-23 のり面工施工1年目の凝灰質シルト岩の針貫入強度NPの深度変化

4.2 物理工学性状の変化

図-24 は自然斜面の地表下10～190 cmのX線回折試験結果である。表層付近でモンモリロナイトが増加する他は鉱物組成に大きな変化はなく、また膨脹性の鉱物は初生的に少ない。図-25は自然斜面風化層の深度方向の三軸圧縮試験、土質試験、X線回折（モンモリロナイト/メタハロイサイト比）の結果をまとめたものである。同図によると深度15cm～35cmの浅部は土質がやや異なっている。例えば、浅部ではモンモリロナイト/メタハロイサイト比が急増しているが、シルト岩においてはモンモリロナイトは新鮮岩には乏しく、メタハロイサイトは新鮮岩でも普遍的かつ多量に含まれていることから、化学的風化によってモンモリロナイトが増加した可能性が高い。土質試験においても、例えば飽和度はモンモリロナイト/メタハロイサイト比と類似したパターンであるが、これはモンモリロナイトがメタハロイサイトに比べて自然状態において含水比の高い鉱物であること、あるいは、粘土分の相対的な増加に由来すると思われる。図-26は間隙に染料を充填した岩石薄片の観察結果およびシルト岩の模式構造図である。また、巻末資料-1は試料の偏光顕微鏡写真である。同図によると、風化に従い粒子間の距離が拡がり膠結部が分離していくこと、風化末期では間隙はむしろ閉塞していること等がわかる。

以上よりシルト岩の風化過程は次の様にまとめられる。すなわち風化初期は岩石を構成するシルト粒子間の膠結部の部分的分離が生じ粘着力は低下するが、全体としてはまだ岩の様相を呈している。風化中期は分離がさらに進み、岩から土砂へ様相が変化し間隙も拡大する。風化後期は拡大した間隙に、植物に起因する有機物や化学的風化によって生じた粘土鉱物等の細粒分が充填し粒子間の間隙は閉塞されるが、二次的に脈状～空洞状の大間隙が発生拡大する。風化後期に至るまでにはかなりの年数を要すると思われ、のり面の安定において問題となるのは風化中期までの強度低下、主に粘着力の低下に限定して良いであろう。また、のり面の断面観察によると風化は表層から深度方向に向かって面的に進行していることから、風化層は表層から面的に、次第に厚くなっていくものと考えられる。

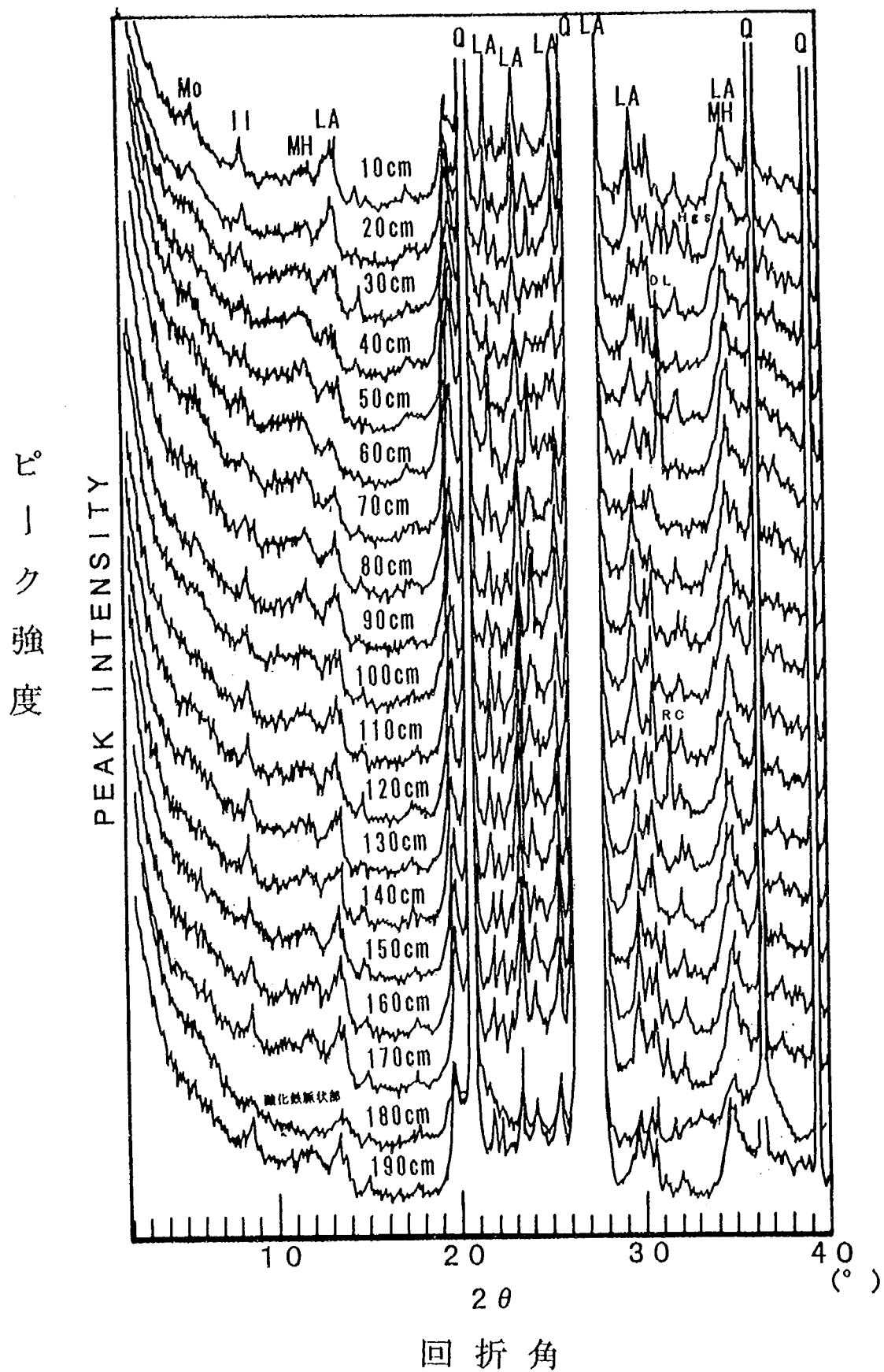


図-24 自然斜面における深度毎のX線回折試験結果

(Mo : モンモリロナイト, I : イライト, MH : メタハロイサイト,
LA : 斜長石, Q : 石英)

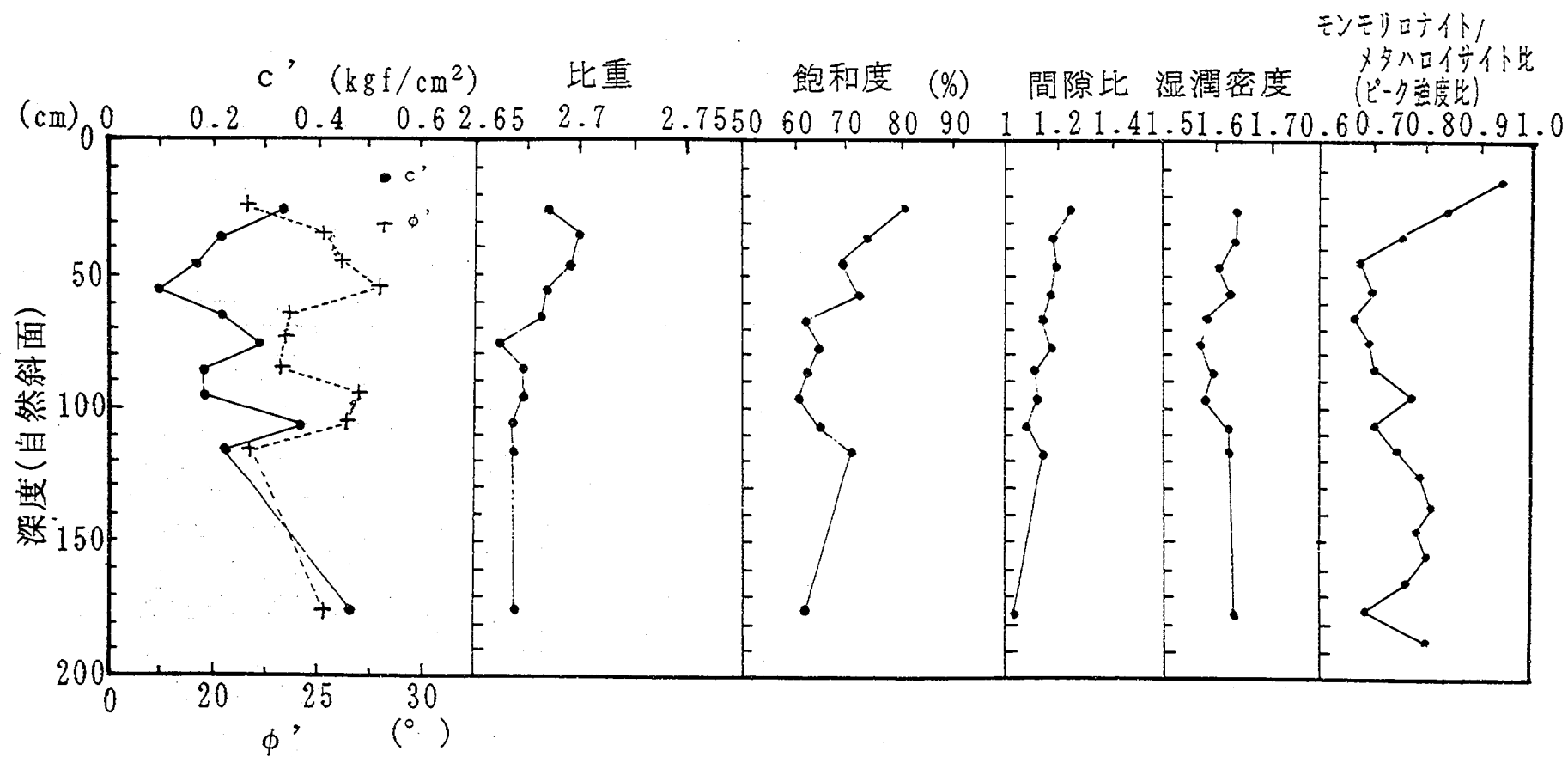


図-25 自然斜面における深度毎の三軸圧縮試験・土質試験・X線回折の結果

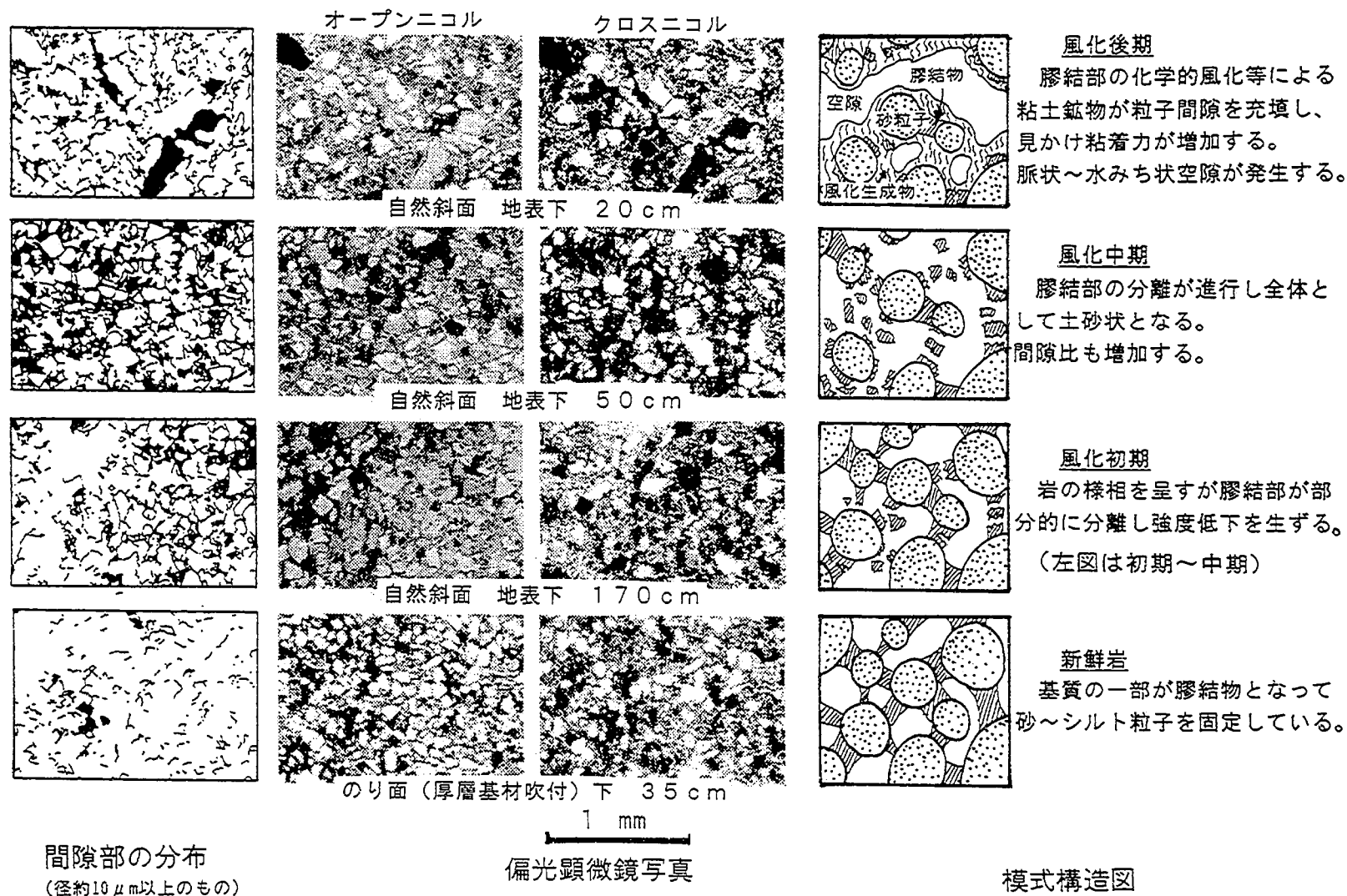


図-26 凝灰質シルト岩の間隙分布・顕微鏡写真・模式構造

5. 劣化のモデル化

本章では布志名層のシルト岩の風化・侵食についての簡単なモデルの構築を試みる。4章で明らかとなったように、シルト岩は風化によって特に粘着力が急激に低下し、のり面表層（無処理部）は現在 $c' \approx 0.46 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi' \approx 28^\circ$ 程度まで強度低下している。この風化層は表層から面的に、次第に厚くなっていくと考えられる。したがってのり面の長期的安定を考える上で、風化による地山の劣化速度のモデル化が重要である。一方、のり面表面では侵食が進行しており、のり面の洗掘・荒廃が予想されるだけでなく、風化は一般に地表面から深度方向に作用するので、侵食によるのり面の状況の変化は、風化層の形成速度にも影響する。以上より、侵食速度を考慮した地山の劣化速度についてモデル化する必要がある。

のり面の長期的安定に影響を及ぼすような変化は、粘着力の急激な減少であるので、ここでは粘着力の低下を物理的風化に起因する膠結部の分離によるものとして、劣化速度のモデル化および長期経過後の風化層厚の推定を試みる。物理的風化は岩石中に歪みを繰返し生じさせる作用であるので、ある膠結部の分離に要する時間は $S-N$ 線図（応力とその繰返し回数の関係）と同様に風化の強さ（以降これを風化力と称する）と風化サイクル数で整理出来る。膠結部の太さや構成鉱物は多様であり各膠結部毎に固有の $S-N$ 曲線が描けるであろう。しかし膠結部個々の $S-N$ 曲線を測定することは出来ないのここでは便宜的に風化力 F を風化サイクル数 N で積分したものを風化力積とし、ある風化力積 E_0 を受けると膠結部全体のある割合が分離し岩石は風化（土砂化）すると仮定する。すなわち、土砂化するまでの風化サイクル数 N は(1)式で示すものとする。

$$N = E_0 / F_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

F_0 は地表における風化力である。金属の疲労破壊については、 n は破壊までのサイクル数、 f は塑性歪み振幅、 e は定数として経験的に(2)式が得られており、

$$n \approx e / f^{1.2-3} \quad \dots\dots\dots (2)$$

f の指数はおおよそ2に近いとされている²⁴⁾。物理的風化による岩石内部の歪みが風化力に比例するとすれば、(2)式も適用可能であろう。しかし(1)式に比べ(2)式は弱い力の効果を相対的に小さく見積ることになり、以下に検討するモデルのように、地表付近の強い風化力によって発生した風化層厚から係数を算定して、深層での弱い風化力によって発生する風化層厚の増加を見積る場合には、(1)式の方が安全側の解を与える。金属と岩石の相違・劣化形態の相違等の不確定要素が多いことも考慮すると、安全側の式を用いる必要があるので、ここでは(1)式を採用する。

次に、風化力は岩石表面で1風化サイクル当たり F_0 の量を持ち、その力は深度方向に指数関数的に減少するものとする。このとき岩石表面から深度 L にある岩石が1風化サイクルの間に受ける風化力 $f(L)$ は次式で表わされる。

$$f(L) = F_0 \cdot \exp(-aL) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに a は係数であり、風化力が指数関数的に減少するという前提から、 $a > 0$ である。 N サイクルの風化作用の間に岩石表面から深度 L にある岩石が受ける風化力積 $E(N, L)$ は、(1)式と(3)式から導かれる。

$$E(N, L) = F_0 \cdot N \cdot \exp(-aL) \quad \dots\dots\dots (4)$$

したがって表面侵食が行なわれていない場合に、 N サイクル後に生じる風化層厚 L_0 は(1)式と(4)式から次式で表わせる。

$$L_0 = 1/a \cdot \ln(F_0 N / E_0) \quad \dots\dots\dots (5)$$

(5)式では $L_0 < 0$ の場合があるが、これは岩石表面においても風化層が形成されていないことを示している。

次に、表面侵食が生じている場合の風化について考える。最も単純な場合として、表面の風化状態に係わらず侵食が一定速度で行なわれると仮定し、1風化サイクルの間に生じる侵食量を ϵ_0 (const) で表わす。まず、 $N=0$ における地表面を基準として岩石中のある位置 d における岩石が受ける風化力積を考える。侵食によって(3)式の L が1風化サイクル当たり ϵ_0 の割合で減少していくから、 N サイクル後に d が受ける風化力 $f(N, d)$ は次式で表わされる。

$$f(N, d) = F_0 \cdot \exp(a\epsilon_0 N - ad) \quad \dots\dots\dots (6)$$

N サイクルまでに地点 d における岩石が受ける風化力積 $E(N, d)$ は(6)式を N について積分して次式のように表わされる。

$$E(N, d) = F_0 \cdot (\exp(a\epsilon_0 N) - 1) / a / \epsilon_0 / \exp(ad) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $N=0$ における地表面からの深さ d よりも、 N に係わらない地表面からの深さ x を基準にとる方が便利であるので、これを補正する。 N と d の関係は、

$$\alpha = x + \epsilon_0 N \quad \dots\dots\dots (8)$$

であるので、これを(7)式に代入して、

$$E(N, x) = F_0 \cdot \{1 - \exp(-a\epsilon_0 N)\} / a / \epsilon_0 / \exp(ax) \quad \dots\dots\dots (9)$$

が求まる。

これにより、表面侵食が行なわれている場合に、 N 風化サイクル後に生じる風化層厚 x は次式で表わされる。

$$x = 1/a \cdot \ln\{F_0 \cdot (1 - \exp(-a\epsilon_0 N)) / E_0 / a / \epsilon_0\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

また(10)式から無限時間経過後の風化層厚 $x(\infty)$ は近似的に次式で表わされる。

$$x(\infty) \doteq 1/a \cdot \ln\{F/E_0 / a / \epsilon_0\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

現地での長期計測あるいはダムの堆砂資料等より平均的な侵食量 ϵ_0 を測定することはある程度可能であり、また、一般的な山地の平均侵食量も算出されている²⁵⁾。また、斜面勾配が異なる時の侵食量 W は、

$$W = k \cdot Q^b \cdot \sin^D \theta \quad \dots\dots\dots (12)$$

に比例するといわれる。ここで K, b, D は係数、 Q は分水界からの距離、 θ は斜面勾配である。Culling²⁶⁾はソイルクリープによる侵食については、 $D \doteq 1$ であると述べている²⁷⁾。これを通常の侵食にも準用すると、表層状態が同一であれば、斜面勾配 θ_0 のときの侵食量が ϵ_0 として、斜面勾配が θ のときの侵食量 $\epsilon(\theta)$ は近似的に次式で表わせる。

$$\epsilon(\theta) = \epsilon_0 \cdot \sin \theta / \sin \theta_0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

これによって、勾配が異なる場合の侵食量が推定出来る。

以上のように、かなり大雑把ではあるが風化侵食の基本モデルが構築された。上の(10)式、(11)式および(13)式において不明な係数は a および F_0/E_0 (F_0/E_0 で一つの係数とみなす)である。 a は風化力の減衰

性に関する係数で、風化外力の種類毎(温度、乾湿、凍結融解等)および岩石の種類毎に異なる値を持つと考えられる。しかしここでは風化力として一括しているので、岩石固有の1つの値を持つと仮定する。また、 F_0 は風化力(外的環境に関する係数)、 E_0 は岩が土砂化するのに要する風化力積(岩石固有の係数)であるから、 F_0/E_0 は現場環境下での岩石の風化しやすさに関する係数と見なすことができる。したがって a および F_0/E_0 を求めることになって風化層の大まかな進行予測が可能となる。これらは連立方程式を解くことで求められる。例えば、のり面を N' 風化サイクルの間放置した状態で風化層厚を測定し同時にのり面の侵食量を測定して(10)式を、自然斜面の風化層厚を測定し(11)式をそれぞれ作ると a は次式の解となる。

$$\varepsilon \cdot \exp(a x(\infty)) - \varepsilon \cdot \exp[a(x(\infty) - \varepsilon' N')] - \varepsilon' \cdot \exp(ax') = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (14)$$

ここに ε は自然斜面の侵食速度、 $x(\infty)$ は自然斜面の風化層厚、 ε' はのり面の侵食速度、 x' はのり面の風化層厚、 N' は切土後の風化サイクル数である。また、 F_0/E_0 は次式より求まる。

$$F_0/E_0 = \varepsilon \cdot a \cdot \exp(ax(\infty)) \quad \cdots \cdots \cdots (15)$$

1 風化サイクルは、例えば1回の凍結融解あるいは乾燥湿潤等として設定出来るが、数値モデルの上からは、これらの複合的な風化作用でも、また、複数回の風化作用をまとめて1サイクルとしても構わない(もちろんそれぞれの場合で係数は異なるが)。現場での風化層厚の予測に関しては、1年を1サイクルとして設定するのが現実的であり、また、利用し易いであろう。

6. 検 討

6.1 風化層厚の推定

図-27は5章において得られたモデルより1風化サイクルを1年として無処理のり面の風化層 ($c' \doteq 0.5 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi' \doteq 30^\circ$ 未満) の厚さを算出したものである。侵食速度は日本の山地斜面の標高毎の平均的な侵食速度の算定¹⁵⁾ から $\epsilon \doteq 0.0001 \text{ (m/年)}$, 自然斜面の風化層厚は三軸圧縮試験を行なった自然斜面での風化層厚から $x(\infty) \doteq 2.0 \text{ (m)}$, シルト岩の侵食速度は無処理部の長期測定結果より $\epsilon' \doteq 0.023 \text{ (m/年)}$, のり面の風化層厚は無処理部の計測から $x' \doteq 0.06 \text{ (m)}$, 風化サイクル数はのり面無処理部が3年経過しているので $N' \doteq 3$ として各係数を設定し, $a \doteq 3.6$, $F_0/E_0 \doteq 0.47$ を算出して同図を求めた。例えば20年後の風化層厚は, 植生の回復が全く行なわれない場合で約0.43 (m), 切土直後から自然斜面の植生と同様の状態の場合で0.62 (m) となる。のり面は少なくとも数十年存在することや老朽化後の維持管理の手間等を考えると, 風化層厚が0.5~1 (m) に達する可能性を考慮してのり勾配やのり面工を決定するか, のり面保護工によって風化を抑制する方法を考えなければならない。この場合吹付の持つ a を測定する必要があるが, これは吹付を施工した部分と無処理の部分で風化層厚の比較を行なうことによって求められる。吹付の a は部材 (モルタル, 客土, 厚層基材等) 毎に大きく変化し, これによって地山の風化速度も影響を受けるので, 吹付部材の大まかな a を確認しておくことが重要であろう。なお, 厚層基材吹付厚さ10cmで a はシルト岩と同様と仮定して計算した場合の1年後の風化層厚は - 0.21 (m) すなわち風化層は生じないが, この結果は試験のり面の現況 (図-23の厚層基材吹付工部分の結果) と整合的である。図-8~10を見ると, 吹付工があってもある程度の強度低下は所々に認められていること, 客土や厚層基材は間隙率が高く地山よりも熱伝導率や透水係数が大きい (したがって a が大きい) 可能性があることなどから, 客土や厚層基材吹付による風化抑制効果にあまり期待すべきではないように思われる。

なお, 自然斜面の侵食速度 ϵ , 自然斜面の風化層厚 $x(\infty)$, のり面無処理部で測定された侵食速度 ϵ' , 3年間にのり面無処理部に生じた風化層厚 x' 等の測定・推定誤差によっ

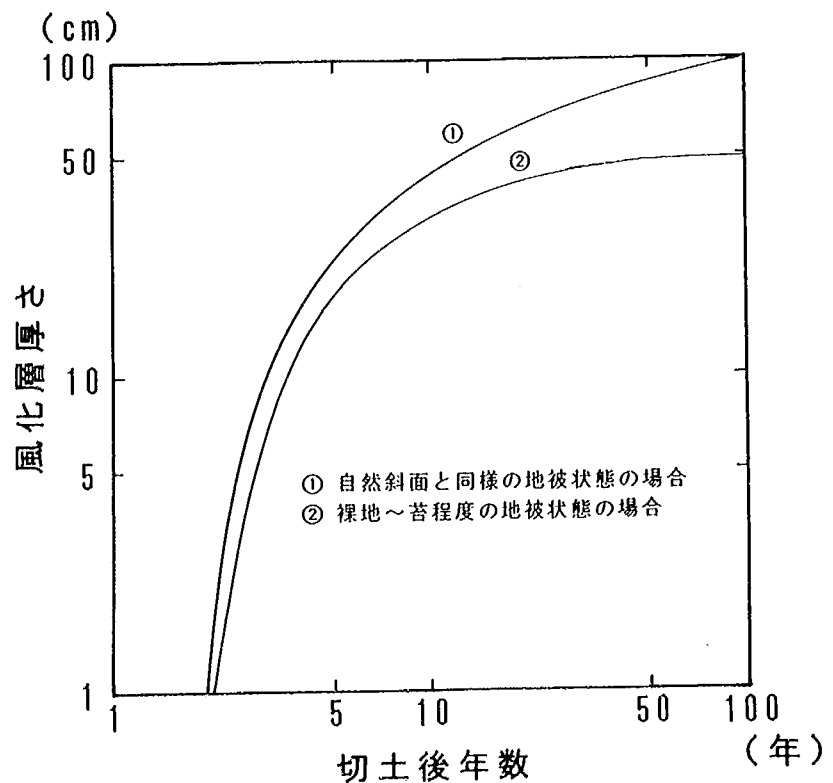


図-27 無処理のり面の風化層厚の予測計算結果

て a や D_0 / E_0 は変化し、長期経過後に発生すると予測される風化層厚も増減する。そこで ϵ , $x(\infty)$, ϵ' , x' 等の誤差によって切土後 100 年でののり面の風化層厚がどの程度変化するか計算したのが図-28 である。なお、同図では、のり面工施工後の侵食速度は自然斜面の侵食速度と同様に一律に 0.0001 m/年 と仮定しており、100 年後の予測風化層厚は 1.07 m である。同図によると自然斜面の風化層厚 $x(\infty)$ の測定誤差が 100 年後の風化層厚の増減に最も寄与することがわかる。自然斜面の風化層厚は調査部では 2 m 程度であるが、2 章 2 節で言及しているように、山腹部の比較的勾配が急な部分では $0.3 \sim 0.7 \text{ m}$ 、比較的勾配が緩い部分では約 2 m （したがって調査部の風化層厚は、斜面全体でみるとやや厚めである）、尾根付近では約 3 m である。自然斜面における風化層厚の差異は勾配（したがって侵食速度 c ）の違いに起因するものであり、斜面全体の平均としては実際にはこれほどの測定誤差は持ちえないと考えられるが、とりあえず $0.3 \sim 3 \text{ m}$ の誤差があると仮定すると、100 年後の予測風化層厚の範囲は 0.2 m （主に山腹部） $\sim 1.5 \text{ m}$ （主に尾根部）と推定される。一方、自然斜面の侵食速度 ϵ は日本における標高毎の平均的な侵食速度近似式から求められたものであり、誤差はかなり大きいと考える必要がある。仮に ± 1 オーダーの増減があると仮定すると、予測される風化層厚の範囲は $0.8 \sim 1.5 \text{ m}$ となる。 ϵ' や x' についてみると、これらの係数の誤差によって生じる予測風化層厚の誤差は前二者に比較すると比較的小さく、また、これらの係数は実際に測定したものであり測定誤差は数十％程度と考えられるので、予測風化層厚の範囲は $1.0 \sim 1.1 \text{ m}$ と、当初の予測風化層厚 1.07 m の $\pm 10\%$ 未満である。なお、侵食速度と風化層厚は一般に反比例的な関係にあるため、両方の誤差の相乗作用はあまり考慮する必要がないと考えられる。したがってここでは係数の誤差の相乗作用の影響として、 $x(\infty)$ と x' をともに小さく、あるいは大きく見積った場合や、 ϵ と ϵ' をともに小さく、あるいは大きく見積った場合を考えてみると、 $x(\infty)$ と x' の誤差の相乗作用による予測風化層厚の誤差範囲は $0.18 \sim 1.65 \text{ m}$ 程度、 ϵ と ϵ' の相乗作用では $0.72 \sim 1.65 \text{ m}$ 程度となる。以上より、100 年後の予測風化層厚として、平均 1 m 程度で誤差範囲は 0.2 m （主に山腹部） $\sim 1.7 \text{ m}$ （主に尾根部）程度となることを考慮して、のり面の長期安定性を検討する必要があることがわかった。

6.2 のり面の安定性に関する 検討

本節では長期経過後ののり面の安定性を検討対象とする崩壊は風化層

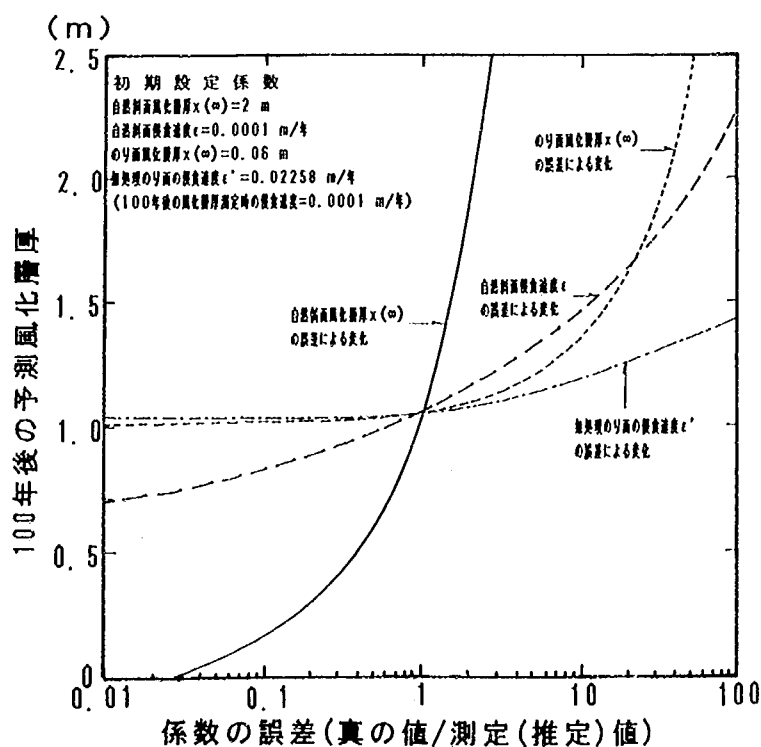


図-28 係数の測定（推定）誤差による
100 年後の予測風化層厚の変化

が崩落する表層崩壊で、崩壊厚さは1～2 m程度である。一般に表層崩壊の斜面安定については、すべり面の幅や長さが厚さに比べ大きいこと、すべり面は地表面に対し平行に近いこと等から、無限長斜面型の安定解析式がしばしば用いられる²⁸⁾。本調査地でも同様に無限長斜面を仮定し、自然斜面についての降雨時安全率に対するのり面の降雨時安全率の比を算定した。図-29は、斜面およびのり面が湿潤飽和し風化層基底面を滑り面とする崩壊が発生すると仮定したときの、自然斜面の安全率に対するのり面の安全率の比（以下、安全率比とする）を、のり面勾配と のり面の風化層厚（鉛直方向）の関係として示したものである。計算は、Simons²⁹⁾の無限長斜面安定解析式²⁸⁾から、影響の小さいと思われる部分あるいは影響が不明な部分（根系によるみかけの粘着力および植生による土載荷重）を削除し、(16)式により求めた。

$$F = \frac{[C_s + \{(\gamma_{sat} - \gamma_w)(h - Z) + \gamma_l(H - h)\} \cos^2 \beta \tan \phi]}{[(\gamma_{sat} - \gamma_l)(h - Z) + \gamma_l(H - h)] \sin \beta \cos \beta} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 C_s ：地下水位以下の土の粘着力、 ϕ ：土の内部摩擦角、 γ_{sat} ：土の飽和単位体積重量、 γ_w ：水の単位体積重量、 γ_l ：土の湿潤単位体積重量、 H ：基岩面からの表土層厚（鉛直方向）、 h ：基岩面からの地下水位、 Z ：基岩面からすべり面までの高さ、 β ：斜面勾配である。計算条件は、自然斜面の三軸圧縮試験結果および土質試験結果を用い、 $C_s = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\phi = 30^\circ$ 、 $\gamma_{sat} = 1.76 \text{ g/cm}^3$ 、 $\gamma_l = 1.6 \text{ g/cm}^3$ 、 $\gamma_w = 1 \text{ g/cm}^3$ とし、自然斜面においては、 $\beta = 22^\circ$ 、また、斜面が湿潤飽和しており、かつ滑り面が風化層基底面（基岩面）と同一という仮定から、 $H = h = 2 / \cos 22^\circ = 2.16 \text{ m}$ 、 $Z = 0$ とした。なお、自然斜面の安全率は、計算の結果0.996でほぼ1に近いので、安全率比を安全率としても大きな差はない。同図によると、勾配と風化層厚が安全率比に大きく寄与することがわかる。前節で、のり面勾配 40° の場合の長期経過後の風化層厚は調査部

で約1 m（鉛直方向では1.3 m）と推定されたので、同図に照らすと、自然斜面に対するのり面の安全率比は最低0.75となる可能性がある。既に試験のり面では、風化が厚いのり肩部分で、幅10 m程度・厚さ数十 cm ほどの小崩壊（肌落ち）が発生しているので、風化が進行すればのり肩以外の部分でも安全率が1未満となる可能性が高い。のり面は自然斜面と同程度かあるいはそれ以上の安全率にすべきなので、安全率比は、少なくとも1以上とする必要がある。したがって、現勾配よりものり面勾配を緩く設定するか、アンカー等の構造物によるのり面保護を行なう必

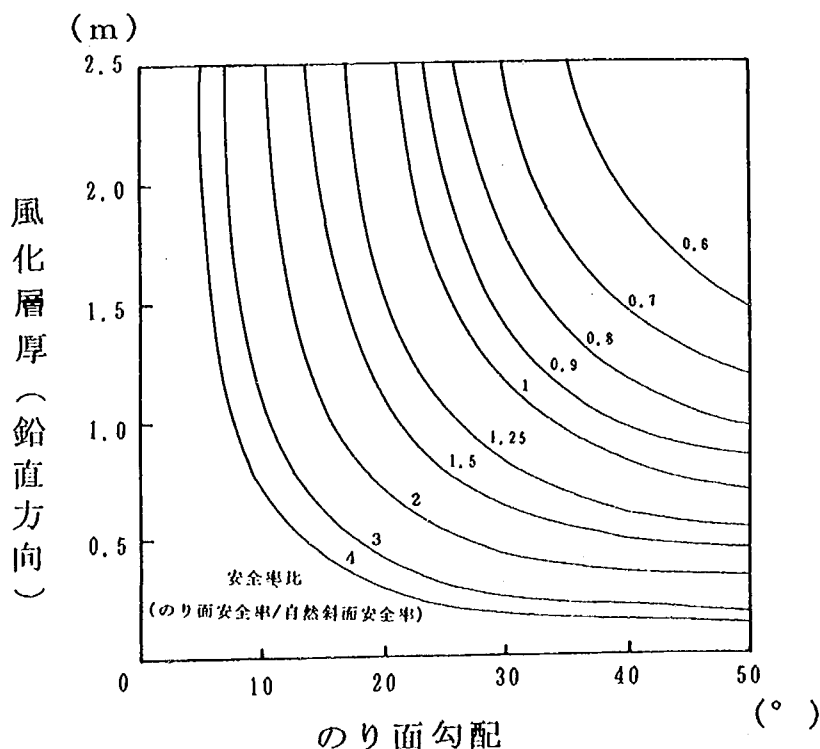


図-29 のり面勾配と のり面の風化層厚による安全率比（のり面の安全率 / 自然斜面安全率）の変化（無限長斜面安定解析式²⁹⁾による）

要がある。仮に表面を厚層基材等で被覆して侵食を抑制し、かつ安全率比を 1.0 以上とするためには、のり面の勾配は約 30° （約 1 : 1.7 ~ 1.8 程度）以下とする必要がある。また、のり肩部については、①既にかなり風化していること、②のり肩は他の部分よりも風化の進行が速いと考えられること、③尾根部における 100 年後の予測風化腐厚は前節の検討によると最大で約 1.7 m となる可能性があること（したがって安全率比 1 以上とするためにはのり面勾配約 1 : 2.0 以下とする必要があること）等から、ラウンディングを兼ねて、より低勾配とすることが有効となる。

7. ま と め

斐伊川放水路開削部に施工された新第三系中新統の軟質な細粒砂岩～凝灰質シルト岩よりなる試験のり面において風化・侵食状況を観測するとともに、風化・侵食の進行モデルを設定し、のり面の長期的な劣化の予測および斜面安定度を検討した。

調査結果をまとめると次の通りである。

- ① 試験のり面は風化や侵食が著しく、例えば新第三系中新統の布志名層の凝灰質シルト岩は切土前の粘着力 $c' = 3.7 \text{ kgf/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi' = 42^\circ$ であったが、切土後 2 ～ 3 年ののり面表面で、粘着力 $c' = 0.46 \text{ kgf/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi' = 28^\circ$ まで強度低下している。
- ② 侵食速度は、のり面無処理部で平均 20.28 mm/年 、特に凝灰質シルト岩の部分では 22.58 mm/年 に達している。侵食は山廻層が最も大きく、布志名層中では凝灰質シルト岩が大きい。
- ③ 客土吹付工や厚層基材吹付工を施すと侵食は抑制される。吹付工によって風化も抑制されるが、表層の風化層が侵食されなくなるので、風化層の増加に対する抑制効果は小さい。
- ④ 粘着力 $c' = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi' = 30^\circ$ 未満を風化層とした場合の風化層厚はのり面表面の被覆状況により異なり、計算の結果によると風化層厚は、のり面表面が裸地～苔程度の場合 20 年後で 0.4 m 、100 年後で 0.5 m 、自然斜面と同様の植生状態の場合はそれぞれ 0.6 m 、 1.0 m 程度となる。
- ⑤ 無限長斜面安定解析式によって表層崩壊に関するのり面の長期的安定性を計算した結果によると、のり面の風化層厚が約 1 m に達した場合に試験のり面横の自然斜面の安全率に対するのり面の安全率の比（安全率比）を 1.0 以上とするためには、のり面勾配は約 30° （約 $1 : 1.8 \sim 1.7$ ）以下とする必要がある。

お わ り に

本モデルによると切土のり面を構成する岩石の曝露調査（1年程度）および切土のり面周辺自然斜面の地形地質調査により、のり面の長期経過後の風化層厚が、大雑把にはあるが予測可能となる。しかし本モデルはかなり単純化されたものであり、モデルの形態やパラメーターの設定法および実際の現象との整合性等に検討の余地がある。特に、風化の進行が指数関数的であると仮定しているが、本来は風化のメカニズムや進行パターンを実験により確認し現実的なモデルにする作業を行なう必要があり、本検討ではこの作業が欠けている。風化については、例えば金属における擬弾性領域の存在と同様に、ある程度以下の強さの風化作用に対しては岩の劣化が進行しないような閾値が存在する可能性もある。閾値が存在すると、ある風化層厚以上にはならないか、少なくとも風化層厚の増加速度は急激に鈍化する。また、モデルでは単一の風化を仮定しているが、これは実際の現象と全く異なり、凍結融解や乾燥湿潤等の風化作用がそれぞれ岩の劣化にどのようなメカニズムで、どの程度影響しているのか、個別に検討する必要がある。さらに侵食についても、平面的に一定速度で侵食することを仮定しているが、実際には侵食は間欠的に、かつリル・ガリー状あるいは不飽和な流れ等によってパイプ状に進行する。軟岩切土のり面の長期的な安定度の予測のために風化侵食の予測は重要であるが、以上のような問題点を解決してモデルに導入出来なければ、十分な精度は期待出来ない。今後は、岩石の工学特性、特にS-N曲線と物理的風化の関係、風化のメカニズム等をさらに検討しモデルをより現実的なものとするとともに、風化促進試験より軟岩の劣化進行パターンを予測する手法、侵食速度や侵食形態を予測する手法、風化による透水性の変化を予測する手法についても検討する必要がある。また、化学的風化、特に粘土分の増加現象についても検討し、粘着力の低下のみならず内部摩擦角の低下についても検討して、精度の高い予測を可能とすることが求められる。

なお、今回は便宜上、数十年後にのり面の補修あるいは改修を行なうことを仮定して、切土後数十年（最大100年）までの風化層厚を算出した。のり面は切土前の自然斜面の安定度と同程度かそれ以上に安定にするのが原則であるので、メンテナンスフリーののり面を作るのであれば、自然斜面勾配以下にする必要がある（自然斜面も崩壊することを考えると、それでも完全にメンテナンスフリーとはならないであろう）。どのような岩盤でも長期的には劣化が進行するので、設計は維持管理と切り離して考えることは出来ない。経済的・行政的観点からは、メンテナンスフリーののり面を作るのか、それともある程度の時期に修繕・改修を行なうのか、その時期や規模はどの程度か、を設計時に検討し、必要とする仕様を決定することが今後求められるであろうし、また、そのような経済的・行政的要請に対して、対応出来る精度を持った劣化予測モデルを作ることが、地質技術者に与えられている大きなテーマの一つであろうと考えている。今後データの蓄積やモデルの修正・精密化が行なわれ、今回検討したような手法が、経験的手法を補助し得る有用な手法になることを期待している。そのためにも、本報告について、のり面の問題に携わっておられる技術者、専門家の方々の御批判とご助言を仰ぐ次第である。

最後に、研究に当たっては、土木研究所 市川 慧 地質官の御助言をいただいた。また、地質研究室の方々には御討議御協力いただいた。現場では出雲工事事務所の方々のお世話になった。現地調査およ

ひ室内試験の一部は日特建設(株)山本 富晴氏ほかの方々の手をわずらわせた。以上の方々に深く感謝いたします。

問い合わせ先

〒 305 茨城県つくば市大字旭 1 番地
建設省土木研究所地質研究室

NTT 0298 (64) 2211

内線 406

マイクロ 8-93-406

佐々木

引 用 文 献

- 1) 自然災害科学総合研究班 (1985) : 地盤の劣化とその地域特性を考慮した崩壊危険度の評価に関する研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究成果, No. A-60-2.
- 2) 土質工学会 (1989) : 岩の調査と試験, pp. 414-418, pp. 436-443.
- 3) 岡本隆一・中村康夫・加藤則男 (1979) : 岩石の劣化速度に関する考察, 土木技術資料, Vol. 21, No. 2, pp. 83-88.
- 4) 松岡憲知 (1986) : 凍結破碎速度に影響を与える岩石物性, 地形, Vol. 7, pp. 23-40.
- 5) 奥園誠之 (1985) : 切土のり面安定のための風化しやすさの判定法, 切土のり面および斜面の風化と安定に関するシンポジウム, pp. 55-60.
- 6) 水谷伸治郎 (1987) : 続成過程における物質変化について, 日本応用地質学会, 昭和62年度シンポジウム予稿集, pp. 29-34.
- 7) 西田一彦・青山千彰 (1979) : 花崗岩風化層の間隙径分布と水分吸着特性について, 応用地質, Vol. 20, No. 1, pp. 3-12.
- 8) 松倉公憲・前門晃・八田珠郎・谷津栄寿 (1983) : 稲田型花崗岩の風化による諸性質の変化, 地形, Vol. 4, No. 1, pp. 65-80.
- 9) 田村 仁・鈴木隆介 (1984) : 第三紀堆積岩の間隙径分布と他の物理的性質, 地形, Vol. 5, No. 4, pp. 311-328.
- 10) 山下伸太郎・鈴木隆介 (1986) : 風化による堆積岩の間隙径分布の変化とそれに伴う強度の低下, 地形, Vol. 7, No. 4, pp. 257-273.
- 11) Holy, M (1980) : Erosion and Environment, Pergamon Press Ltd, 岡村俊一・春山元寿訳, 侵食—理論と環境対策—, 森北出版(株).
- 12) Musgrave, G. W (1974) : Quantitative Evaluation of Factors in Water Erosion, Journ. Soil and Water Conservation 2.
- 13) Wischmeier, W.H. and Smith, D. D. (1965) : Predicting Rainfall - Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains, Agricultural Handbook, 282, Agric. Research Service, US Department of Agriculture.
- 14) Holy, M. *et al* (1975) : Building up of the Mathematical Model of Surface Runoff with Regard to its Erosion Effects, Report on Research Program, Prague.
- 15) 吉川虎雄 (1985) : 湿潤変動帯の地形学, 東京大学出版会, pp. 91-92.
- 16) 安原正也・田中 正・丸井敦尚 (1984) : 多摩丘陵の二つの源流域におけるパイプの形成とその水文学的環境, 地形, Vol. 5, No. 2, pp. 125-137.
- 17) Parker, G. G. (1963) : Piping, a geomorphic agent in landform development of the dry lands, Inter. Assoc. Sci. Hydrol., Publ., 65, pp. 103-113.

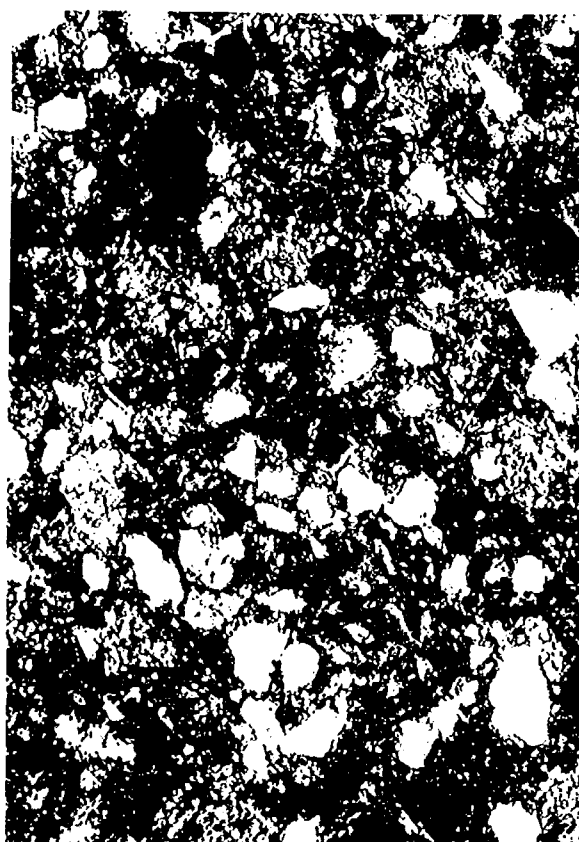
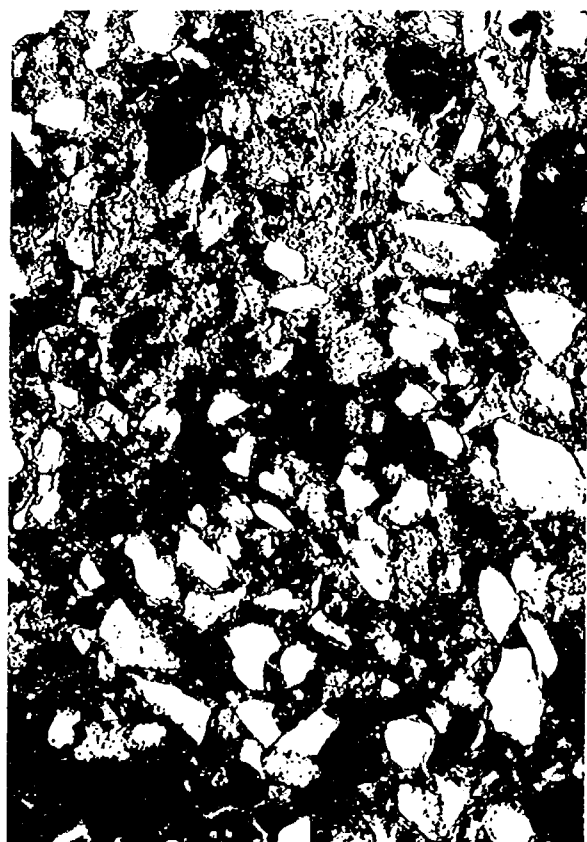
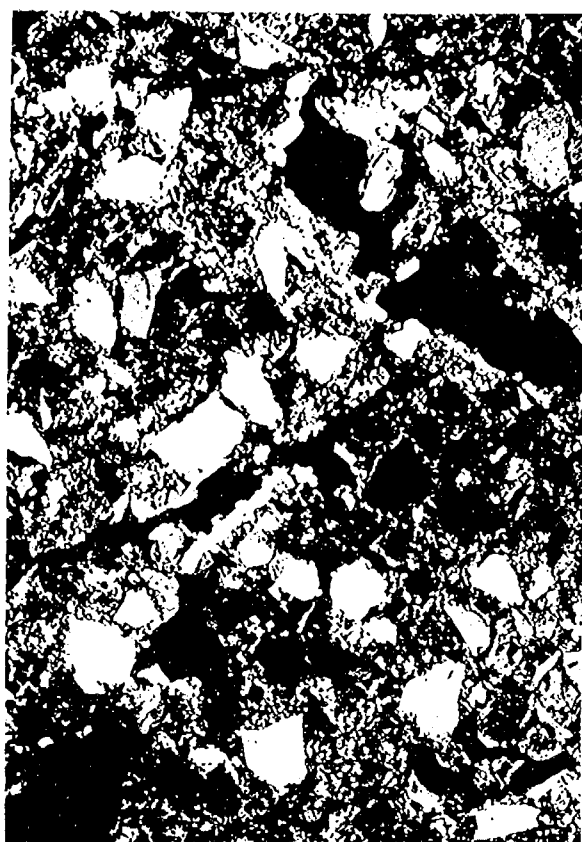
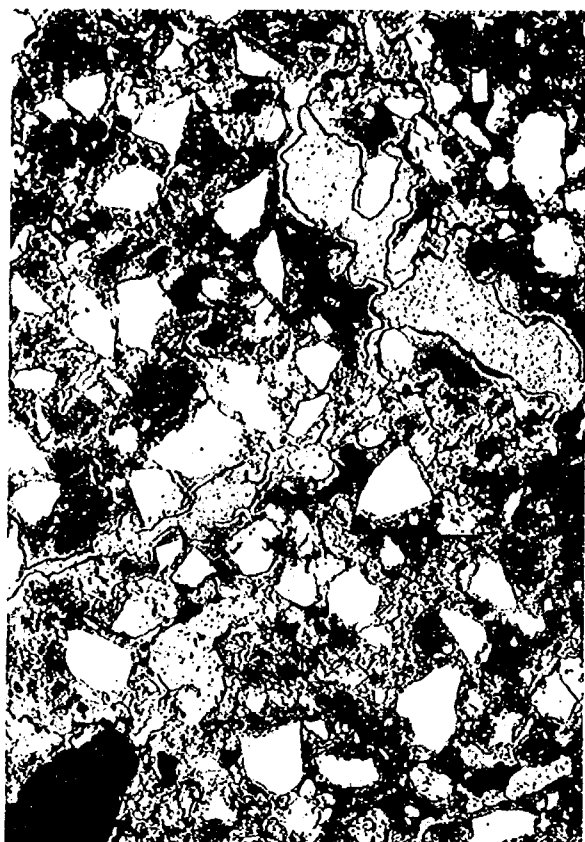
- 18) Jones, A. A. (1971) : Soil piping and stream channel initiation, Water Resour. Res., 7, pp. 602 - 610.
- 19) Stocking, M. (1981) : A model of piping in soils, Trans. Japan. Geomorph. Union, 2, pp. 263 - 278
- 20) 杉井俊夫・佐藤 健・宇野尚雄・山田謹吾 (1989) : 浸透破壊のプロセスと土の非均質性, 土と基礎, Vol.37, No.6, pp. 17 - 22.
- 21) 西垣 誠・河野伊一郎 (1984) : 降雨の斜面への浸透解析, 第21回自然災害総合シンポジウム, pp. 481 - 484.
- 22) 土壤物理性測定法委員会編 (1972) : 土壤物理性測定法, 養賢堂.
- 23) 佐々木信夫 (1977) : 新第三系強酸性硫酸塩土壌に関する研究, 岩手県立農試験報告, 第20号, pp. 23 - 54.
- 24) 日本材料学会 (1964) : 金属の疲労, 丸善閣, p. 29.
- 25) Ohmori (1978) : Relief structure of the Japanese mountains and their stages in geomorphic development, Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo, 10, pp. 31 - 85.
- 26) Culling, W. E. H (1963) : Soil creep and the development of hill - side slopes, Jour. Geol., 71, pp. 127 - 161.
- 27) 武居有垣・小橋澄治・中山政一・今村遼平・池谷 浩・平野昌繁・古谷尊彦・奥西一夫 (1980) : 地すべり・崩壊・土石流—予測と対策—, 鹿島出版会, pp. 149 - 150.
- 28) 沖村 孝 (1987) : 山地斜面の崩壊と対策, 地質と調査, Vol.33, No.3, pp. 22 - 28.
- 29) Simons, D. B., Li, M. M. and Ward, T. J. (1978) : Mapping of Potential Landslide Areas in terms of Slope Stability, USDA Forest Service Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 75 p.

卷 末 資 料

1. のり面および斜面風化層の偏光顕微鏡写真
2. のり面および斜面風化層のX線回折試験結果
3. のり面および斜面風化層の三軸圧縮試験結果（CU法による）

卷末資料 1

のり面および斜面風化層の
偏光顕微鏡写真

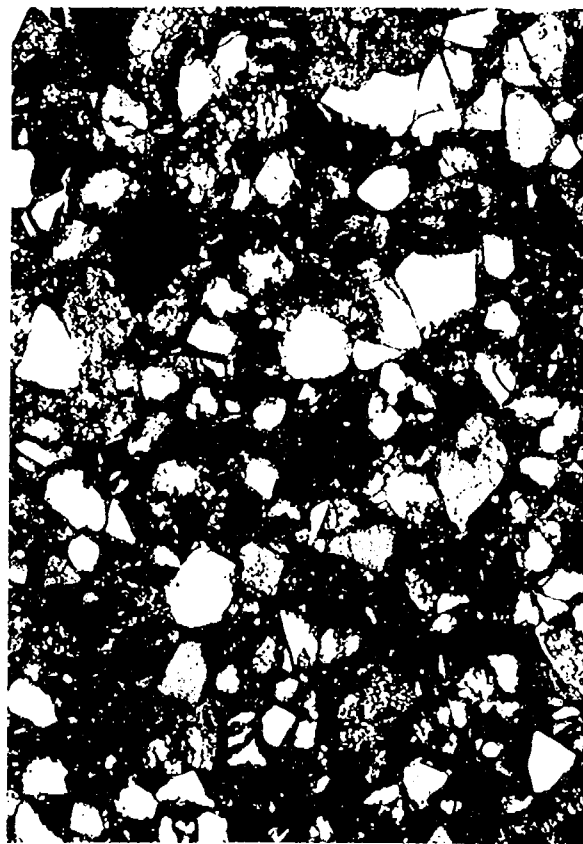
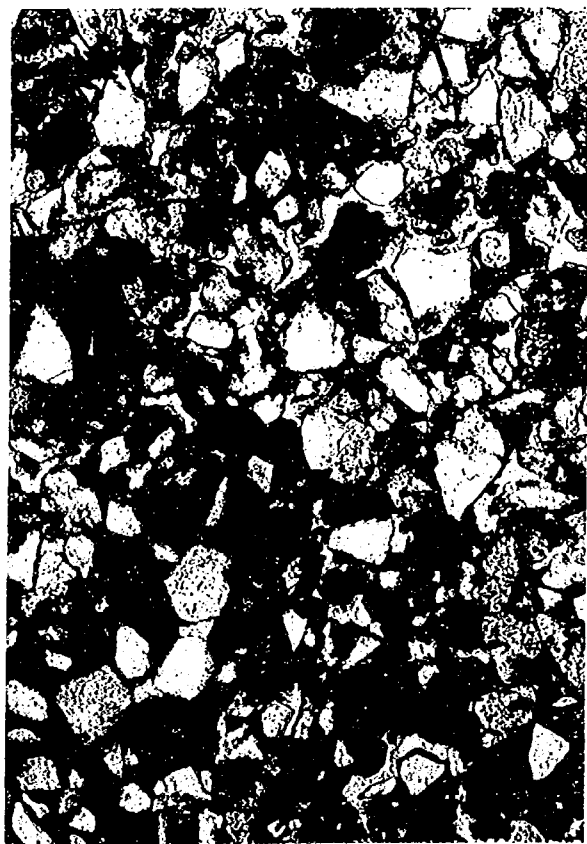
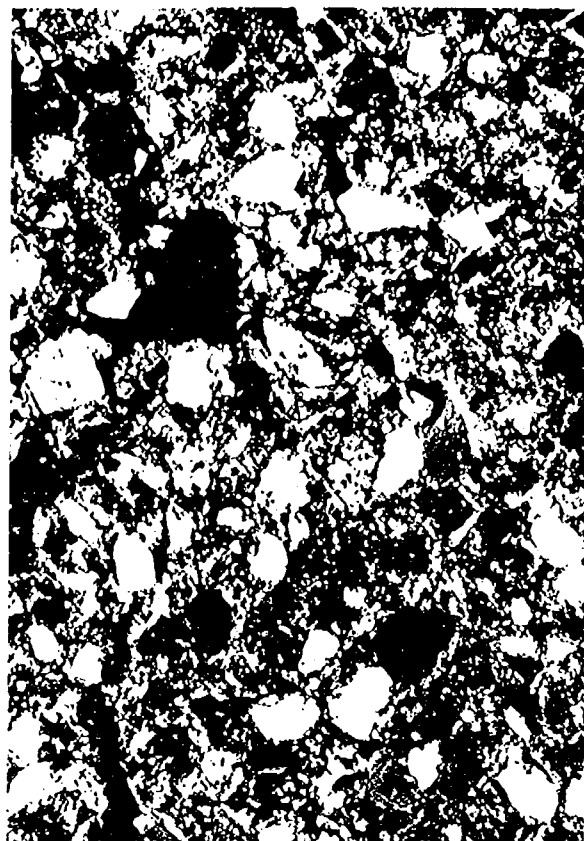


上：自然斜面 深度20cm (凝灰質シルト岩)

下：自然斜面 深度30cm (凝灰質シルト岩)

(左：オープンニコル, 右：クロスニコル)

0.5mm

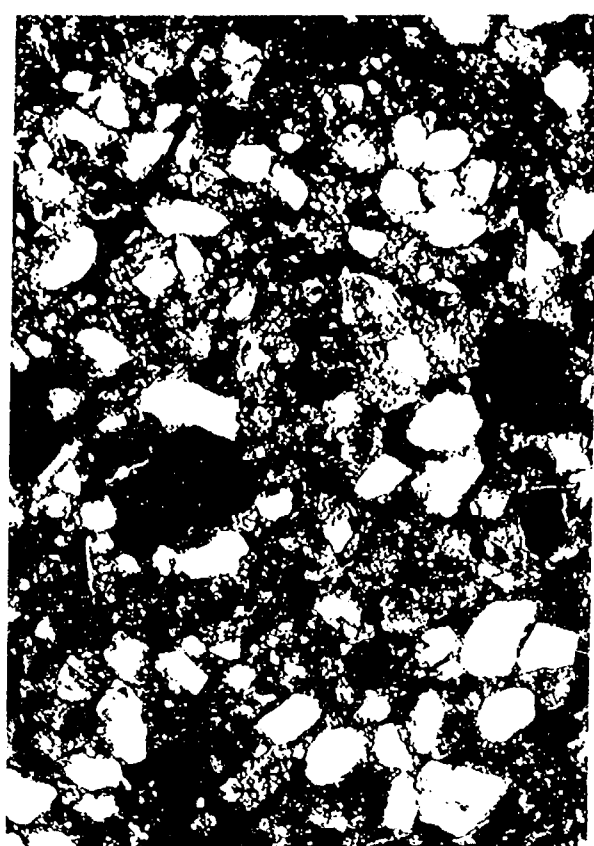
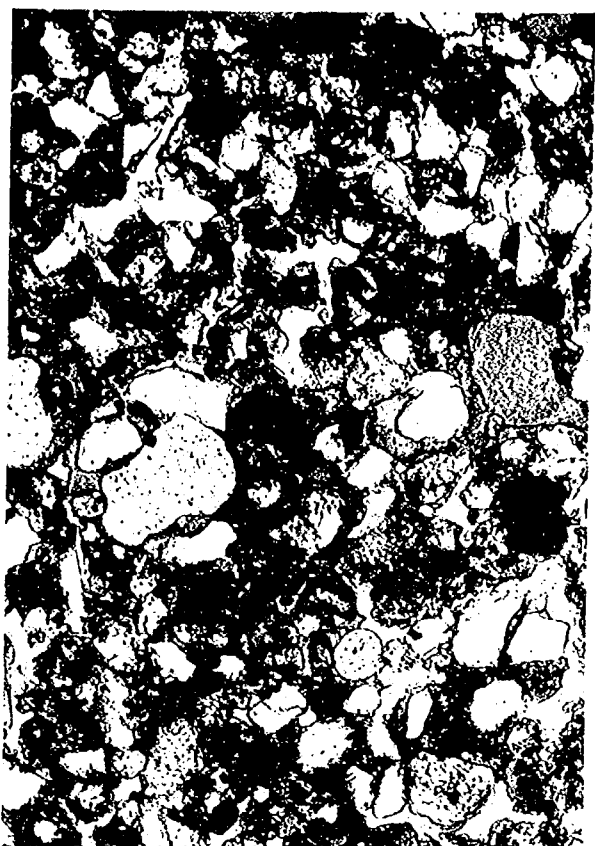


上：自然斜面 深度40cm (凝灰質シルト岩)

下：自然斜面 深度50cm (凝灰質シルト岩)

(左：オープンニコル, 右：クロスニコル)

0.5mm

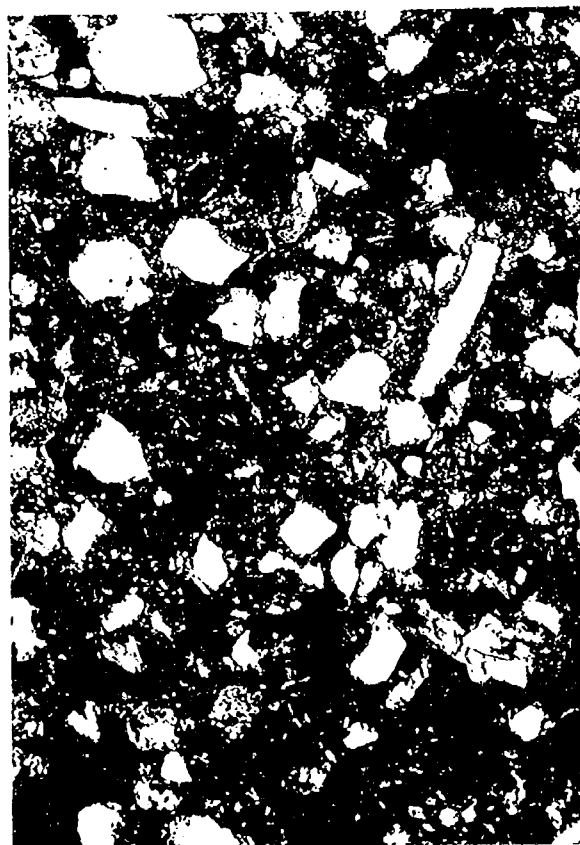
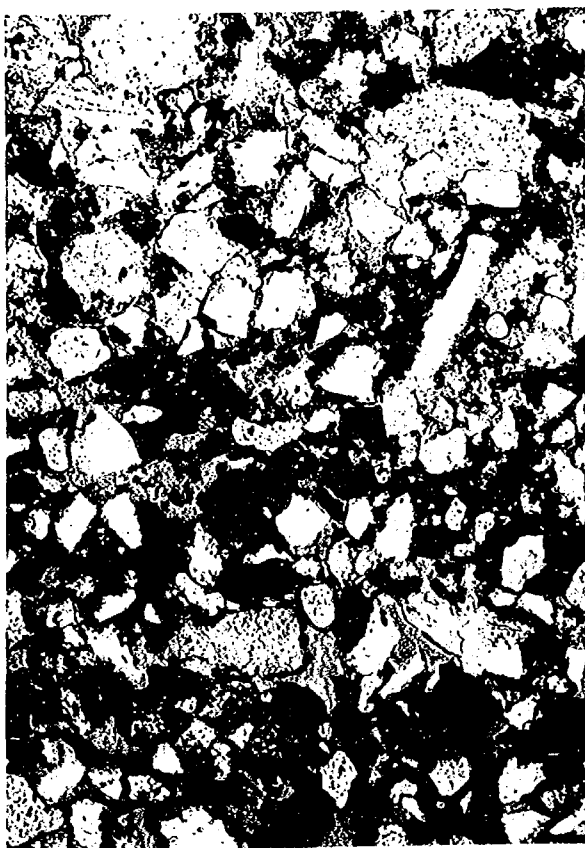
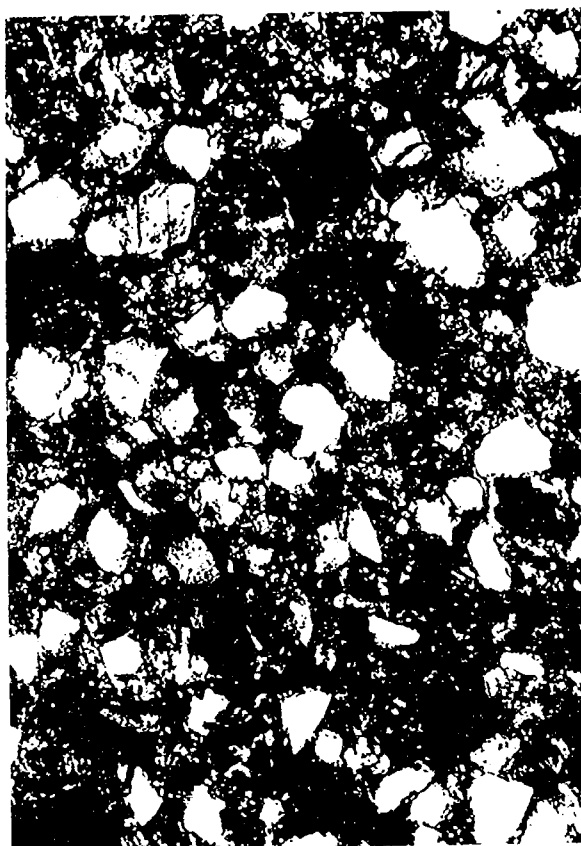
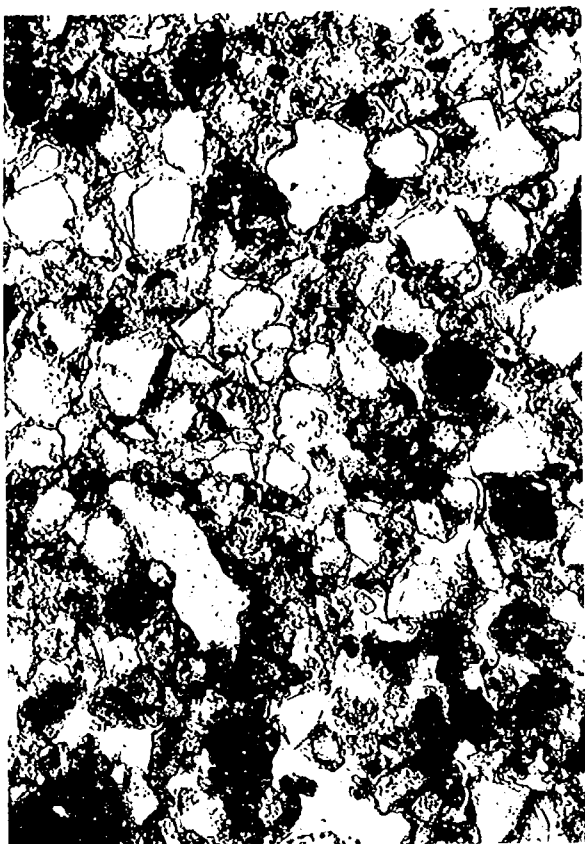


上：自然斜面 深度60cm (凝灰質シルト岩)

下：自然斜面 深度70cm (凝灰質シルト岩)

(左：オープンニコル, 右：クロスニコル)

0.5mm

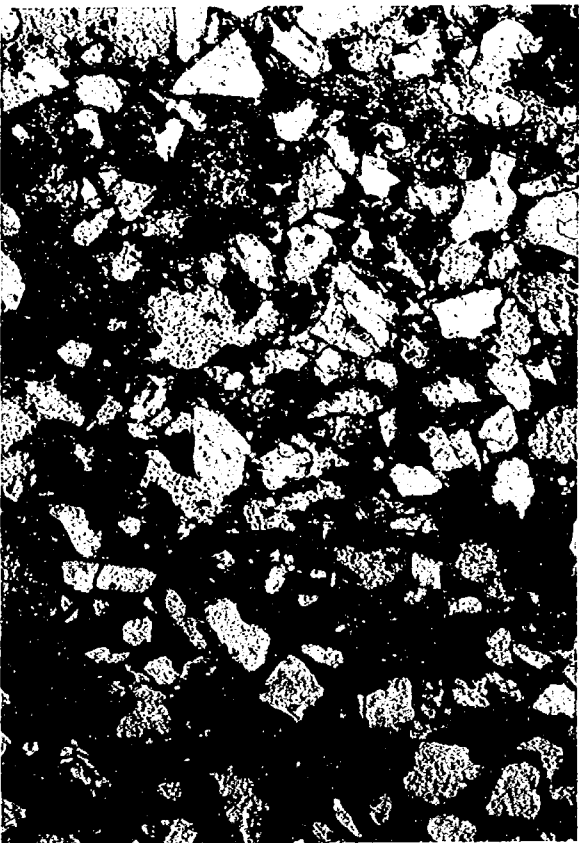
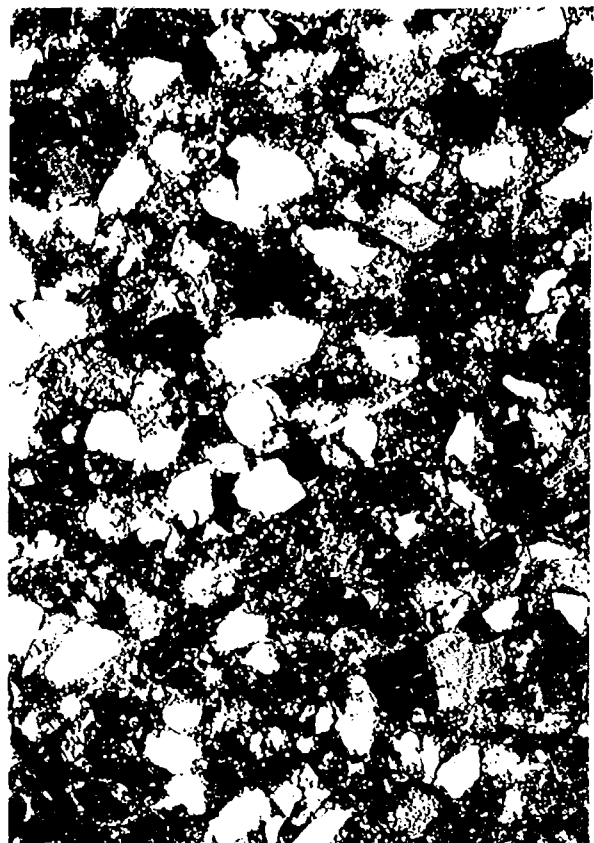
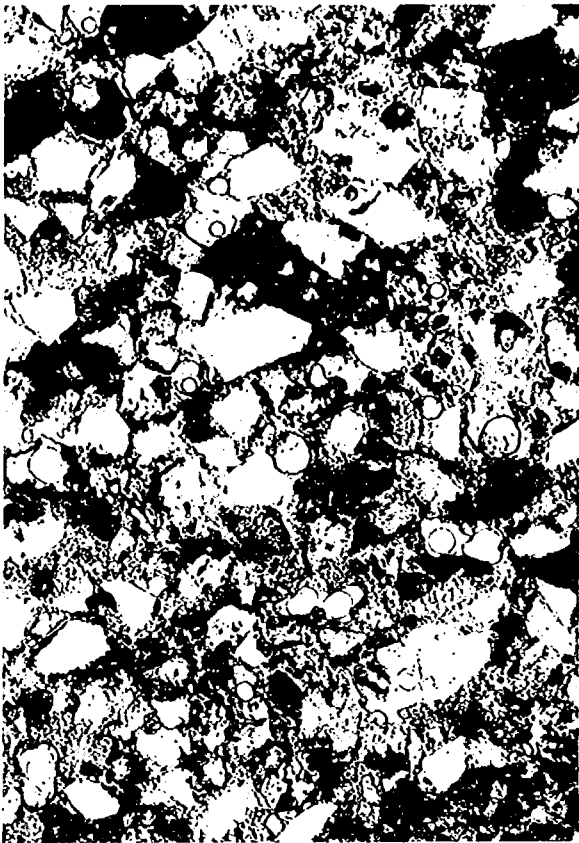


上：自然斜面 深度80cm（凝灰質シルト岩）

下：自然斜面 深度90cm（凝灰質シルト岩）

（左：オープンニコル，右：クロスニコル）

0.5mm

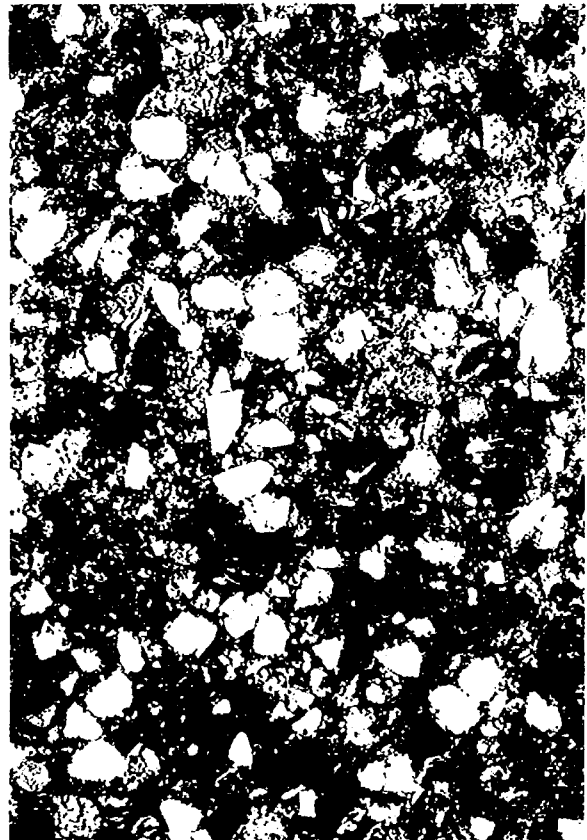
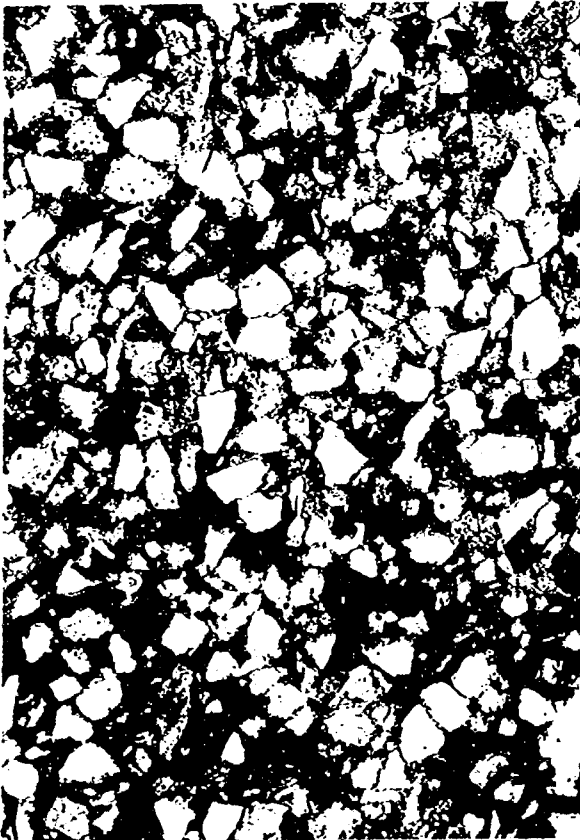
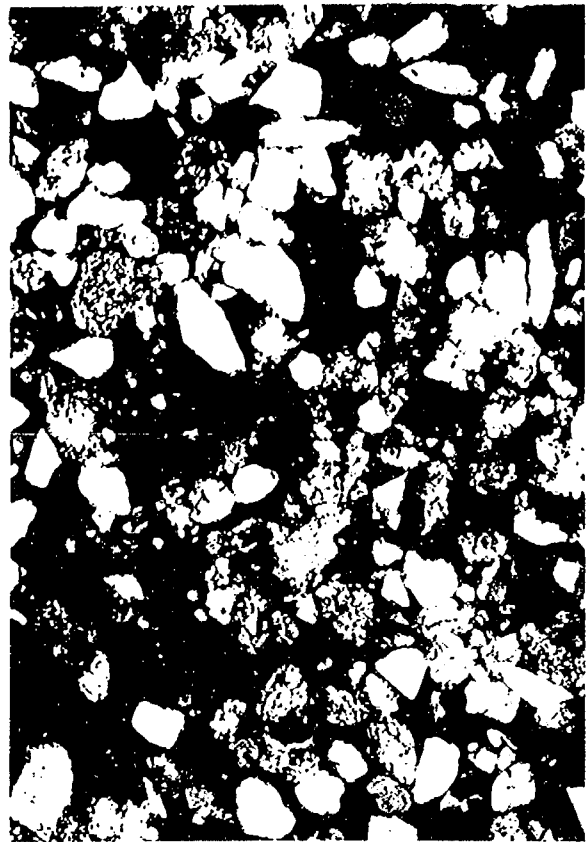
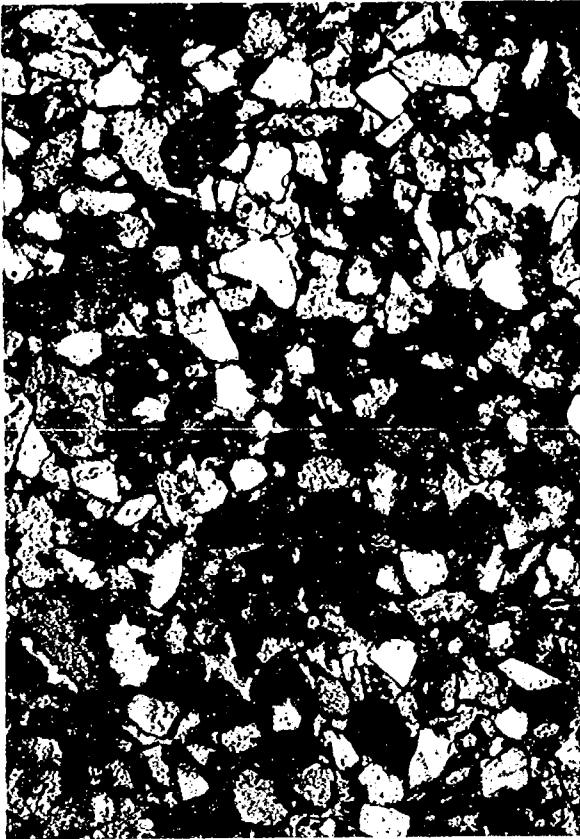


上：自然斜面 深度100cm（凝灰質シルト岩）

下：自然斜面 深度170cm（凝灰質シルト岩）

（左：オープンニコル，右：クロスニコル）

0.5mm

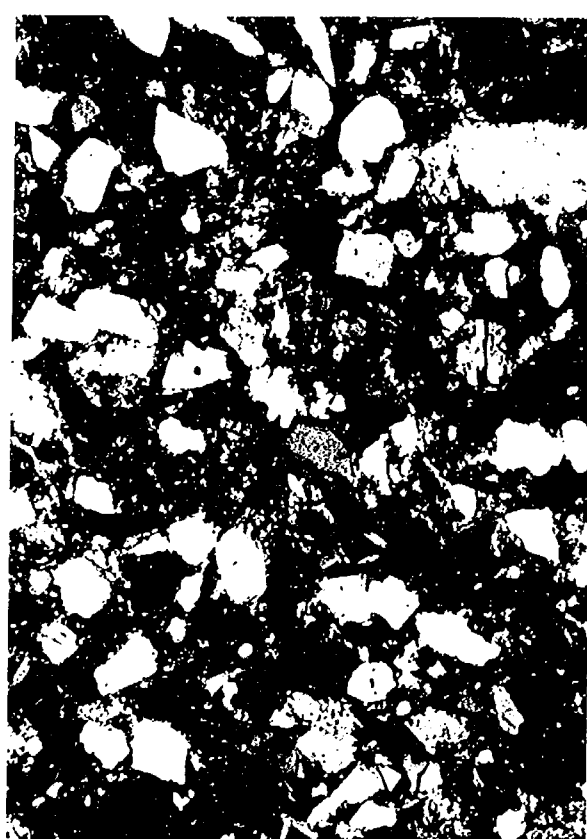
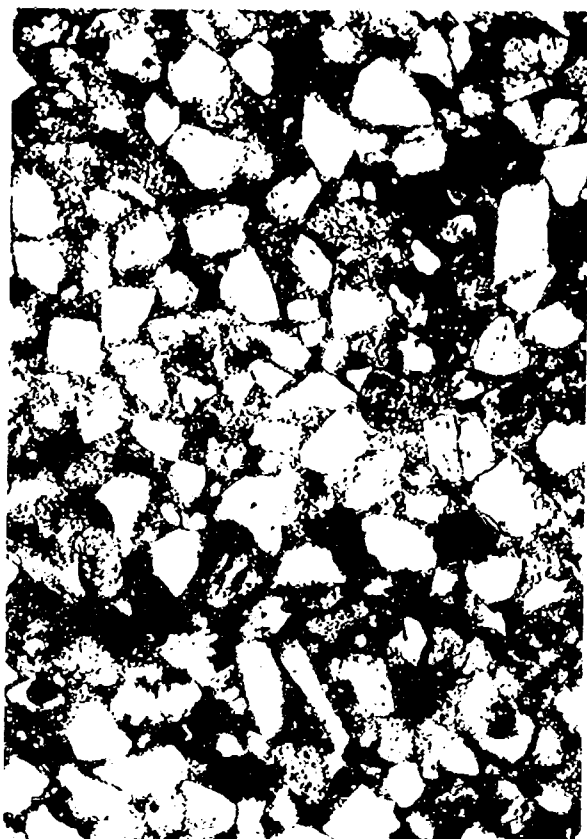


上：のり面 無処理部 深度15cm (凝灰質シルト岩)

下：のり面 のり砕・厚層基材吹付部 深度15cm (凝灰質シルト岩)

(左：オープンニコル, 右：クロスニコル)

0.5mm



上：のり面無処理部 深度15cm（礫混じり砂岩）

下：のり面 のり枠・厚層基材吹付部 深度15cm（礫混じり砂岩）

（左：オープンニコル，右：クロスニコル）

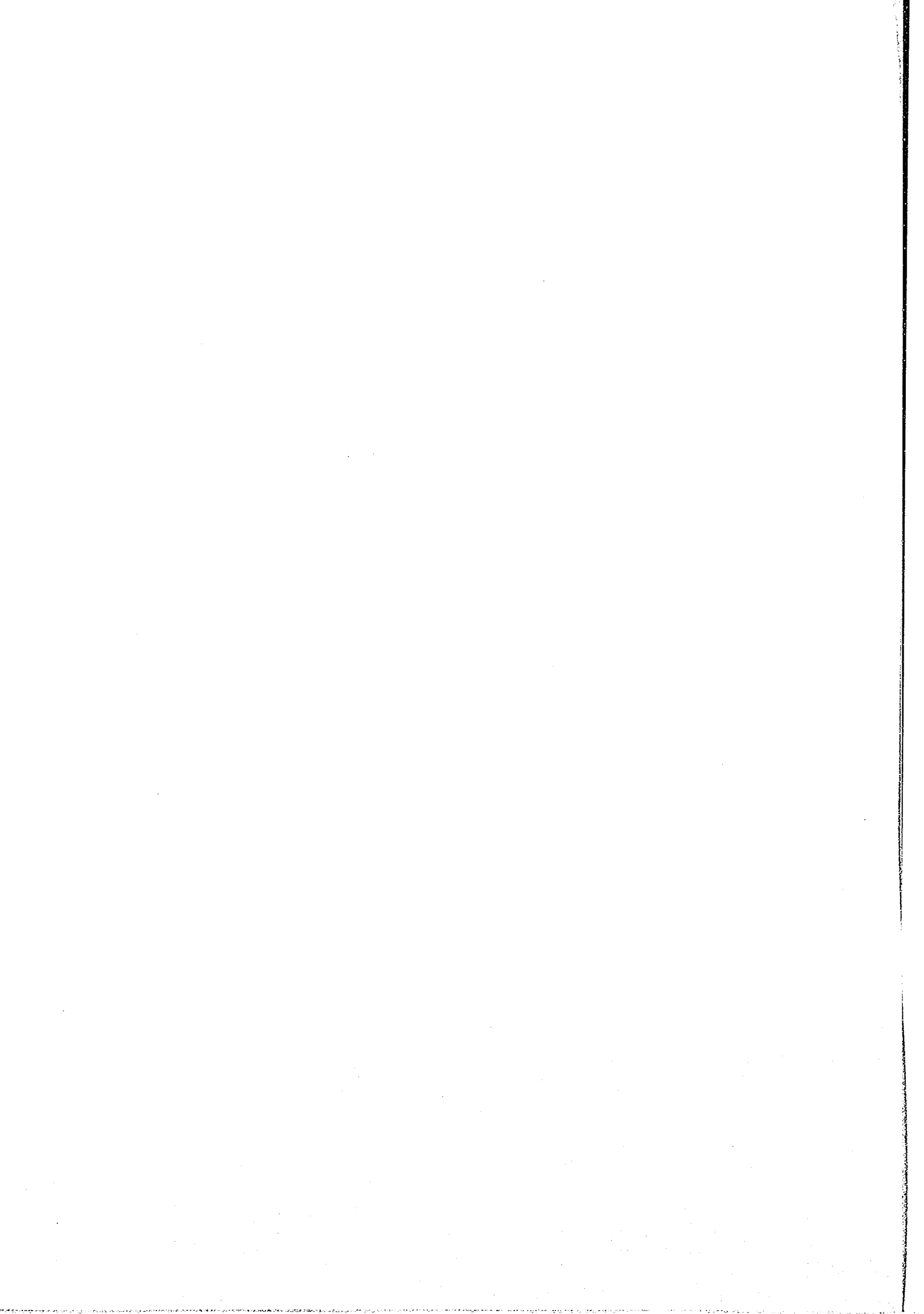
0.5mm

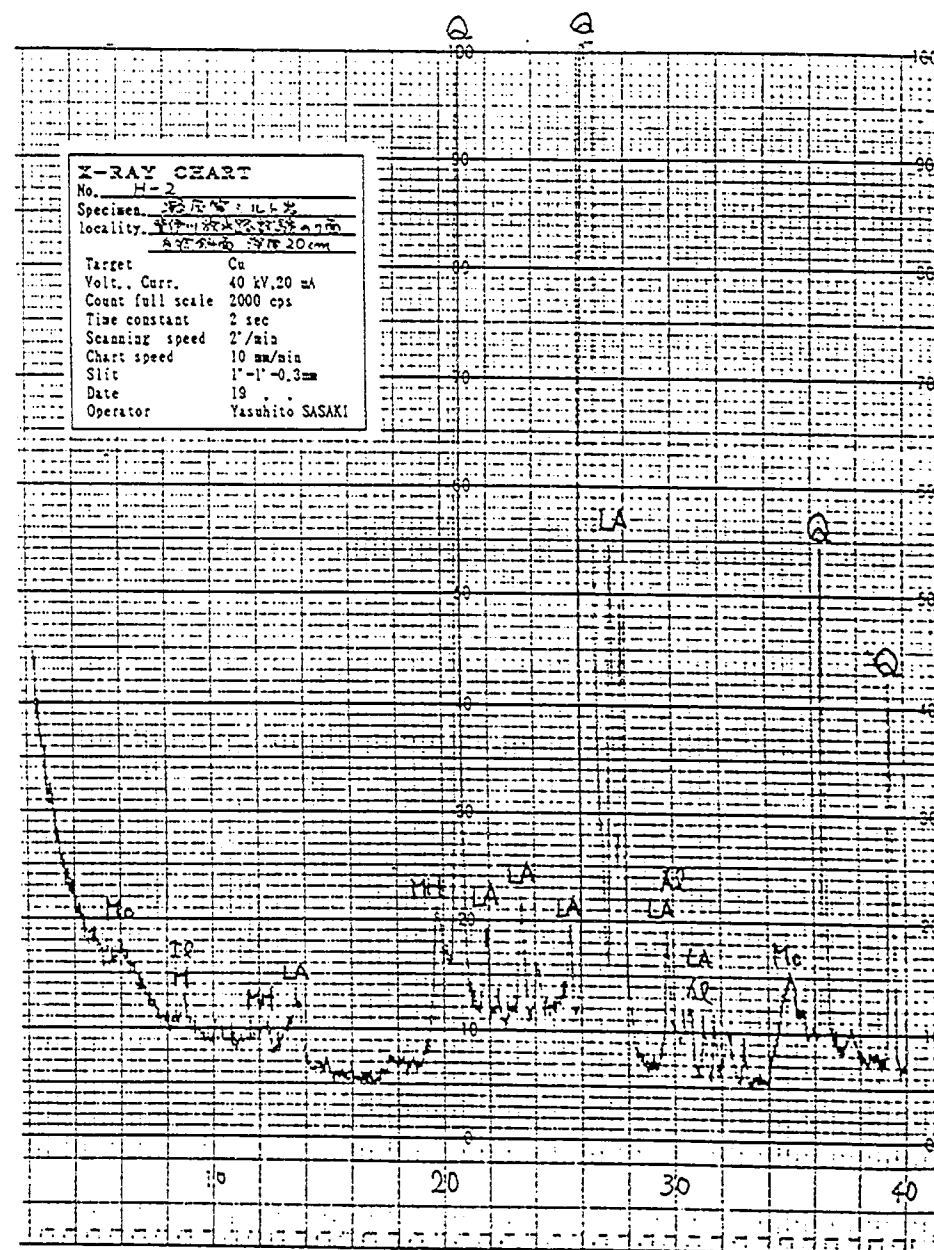
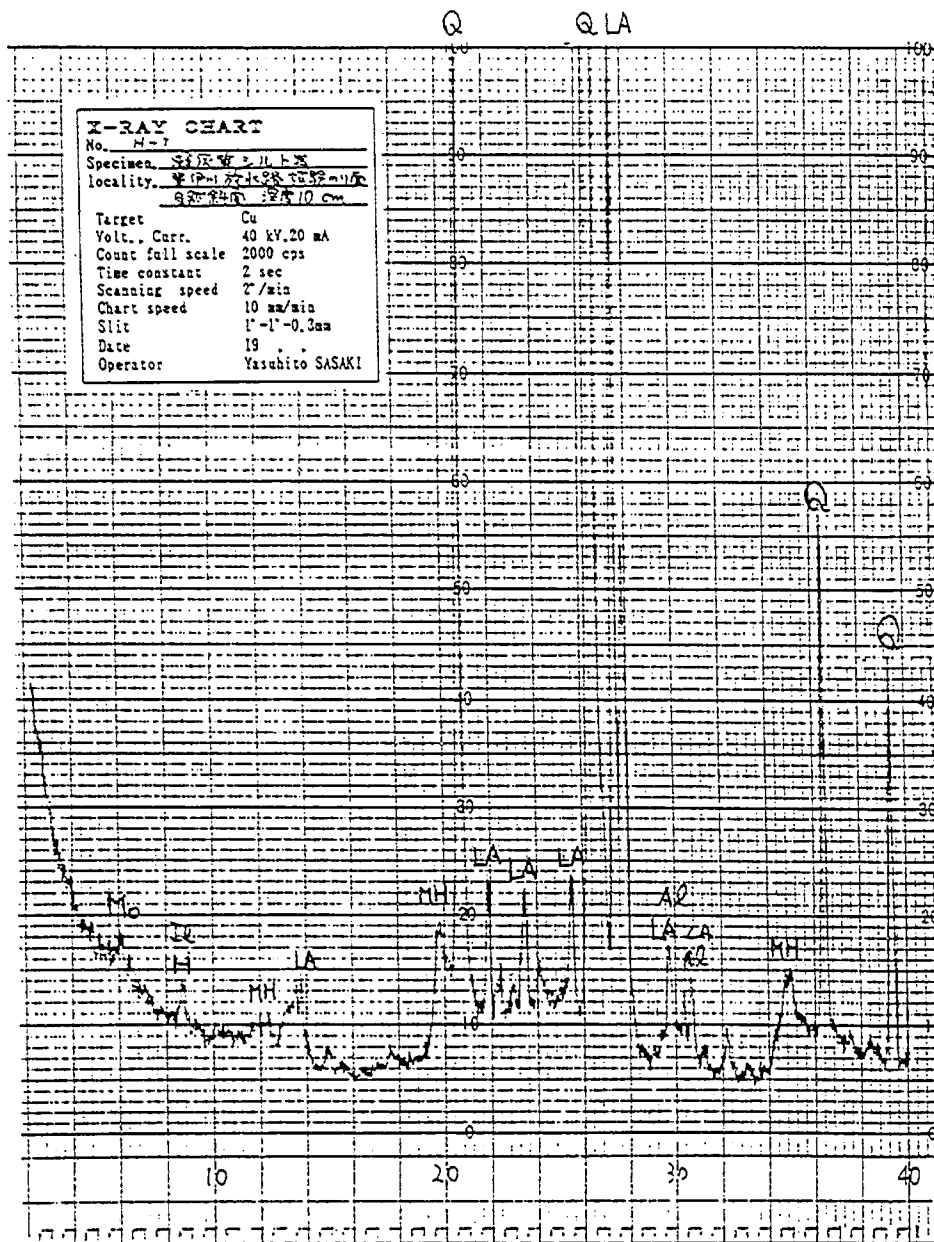
巻末資料 2

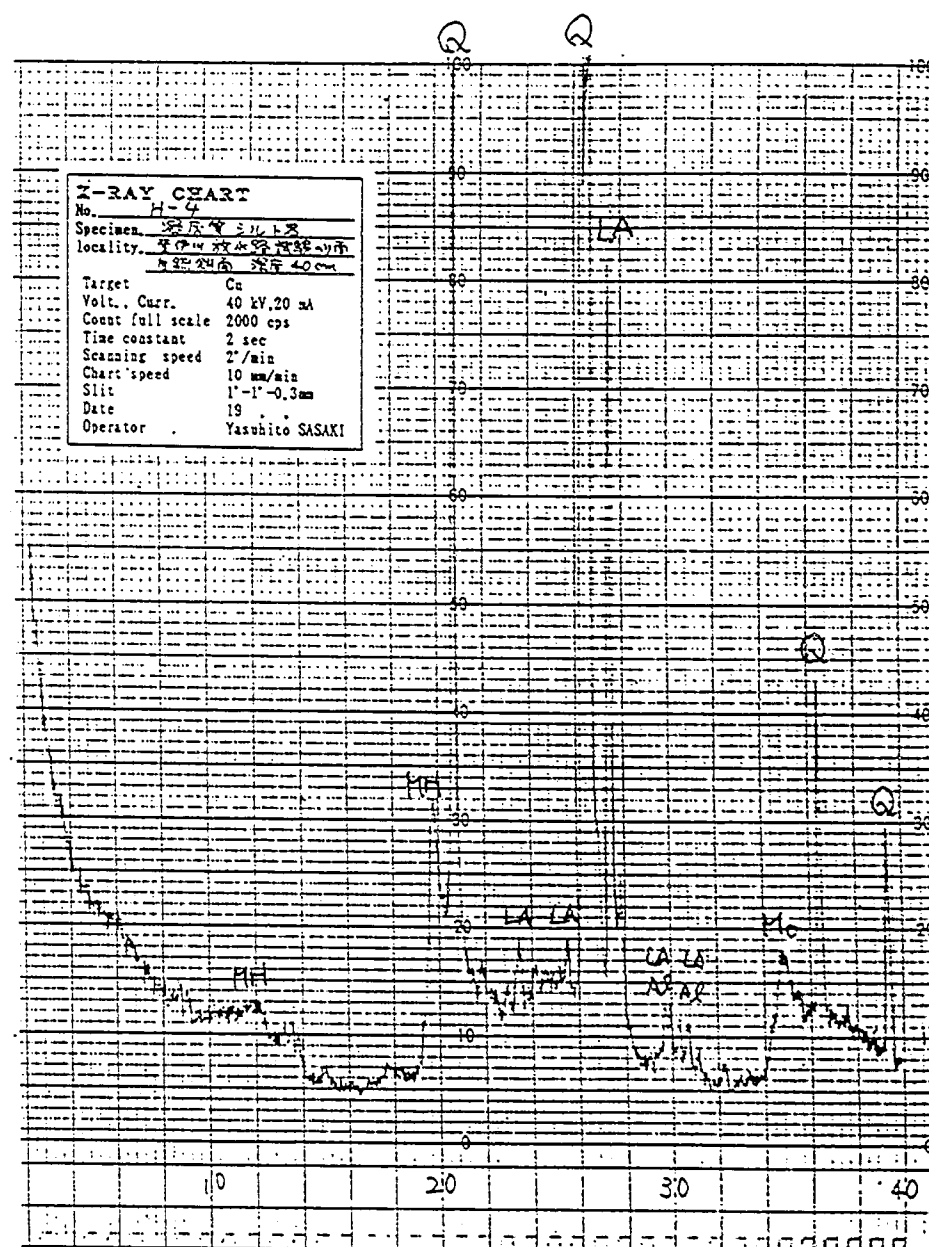
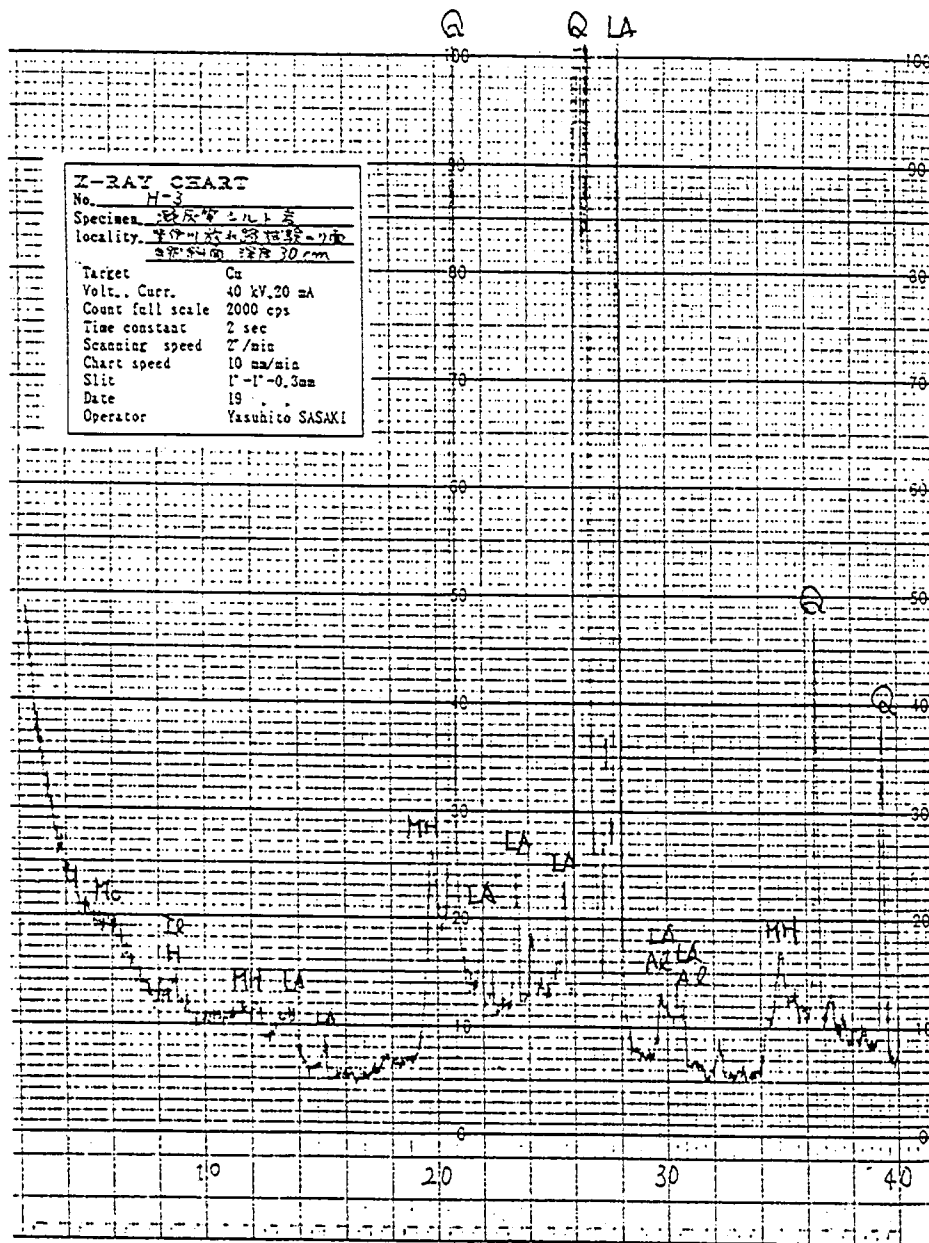
のり面および斜面風化層の X線回折試験結果

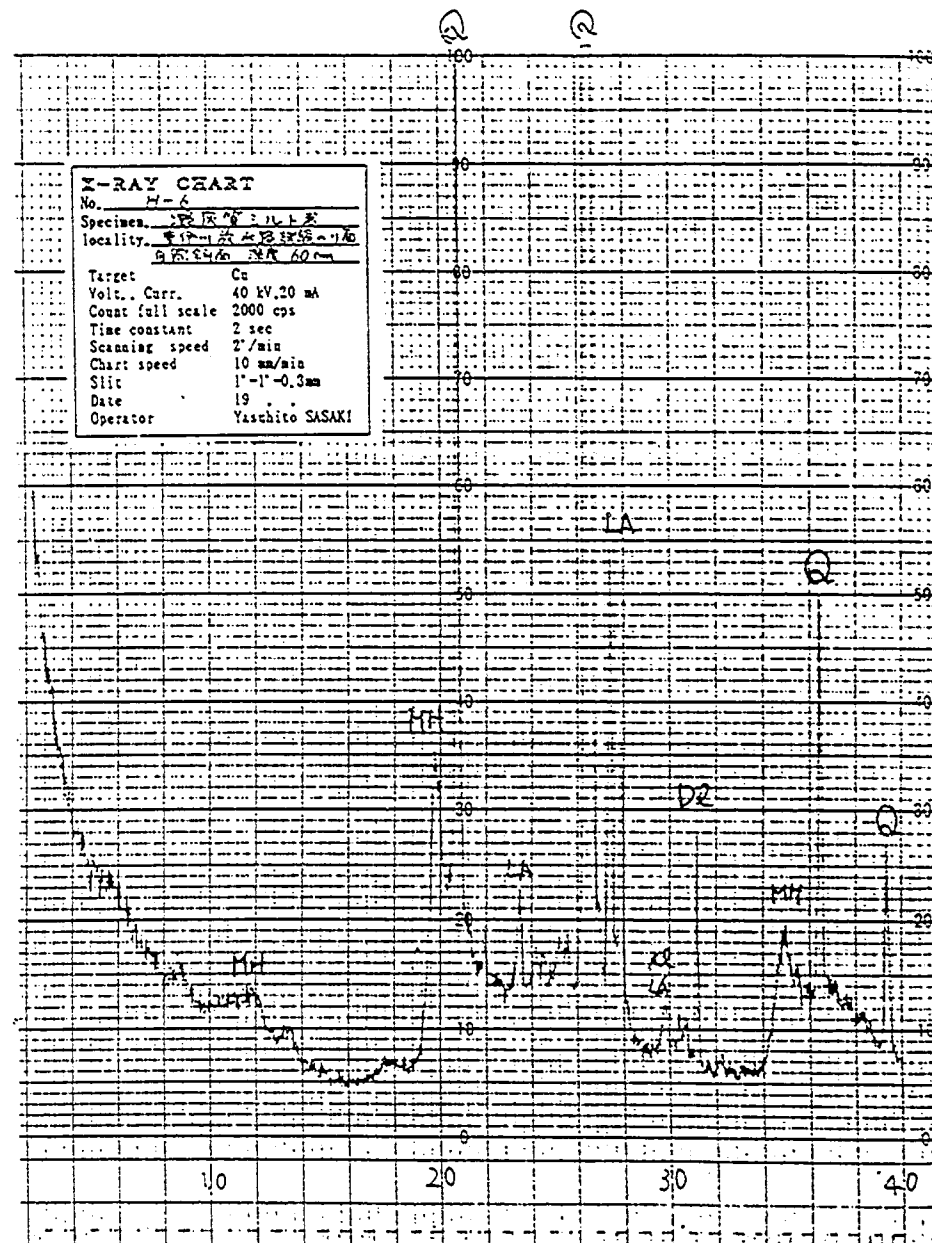
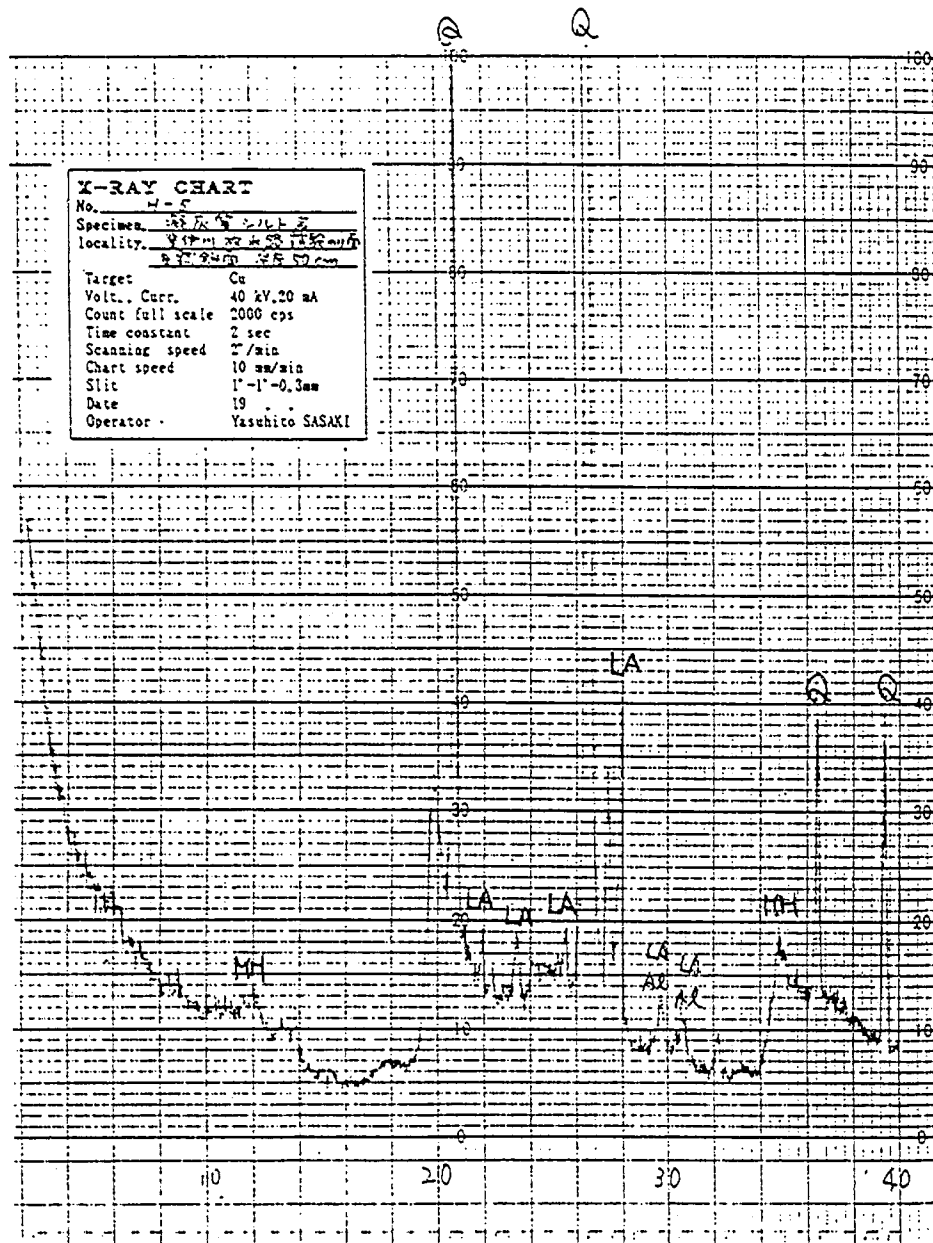
— 凡 例 —

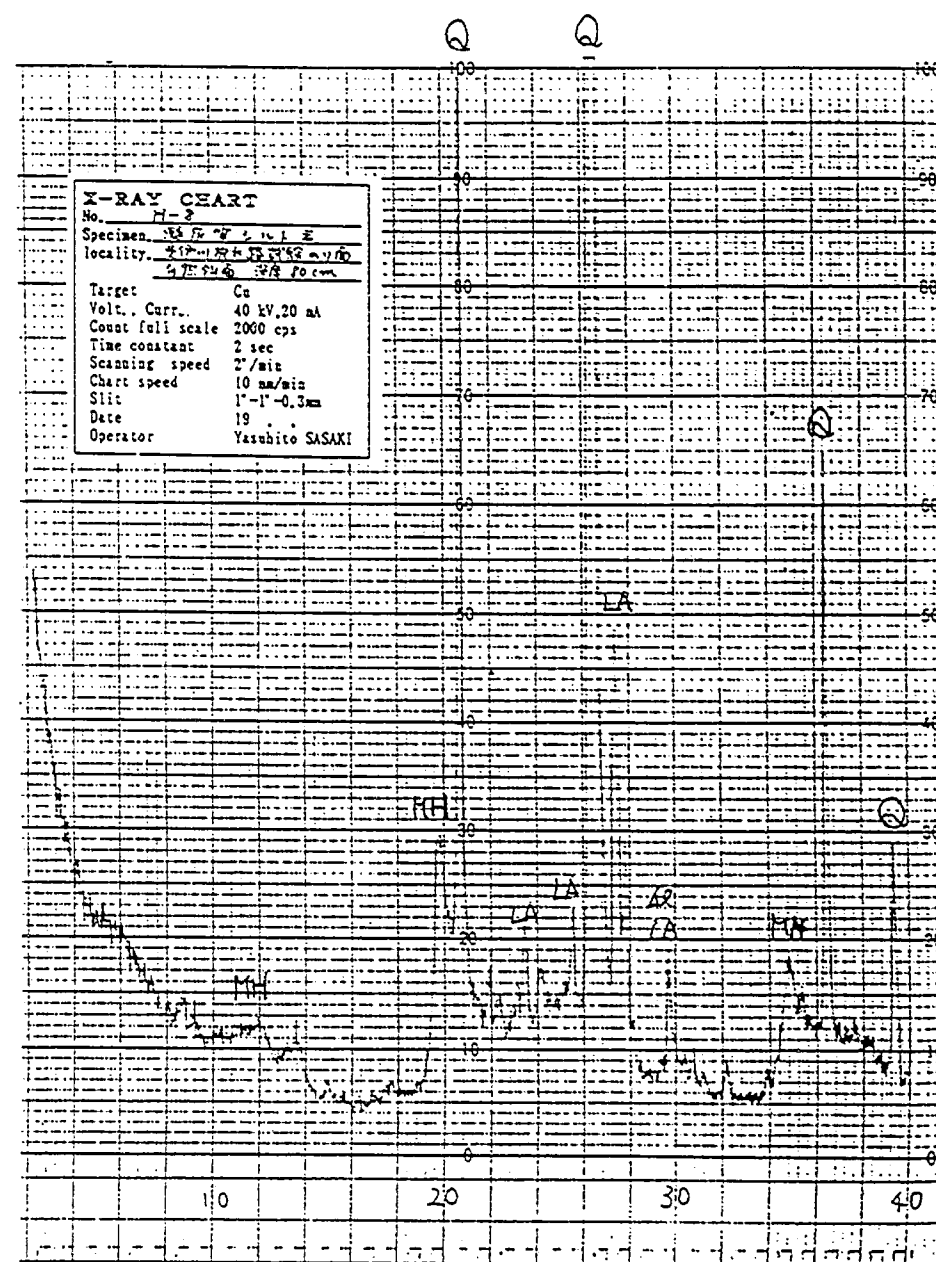
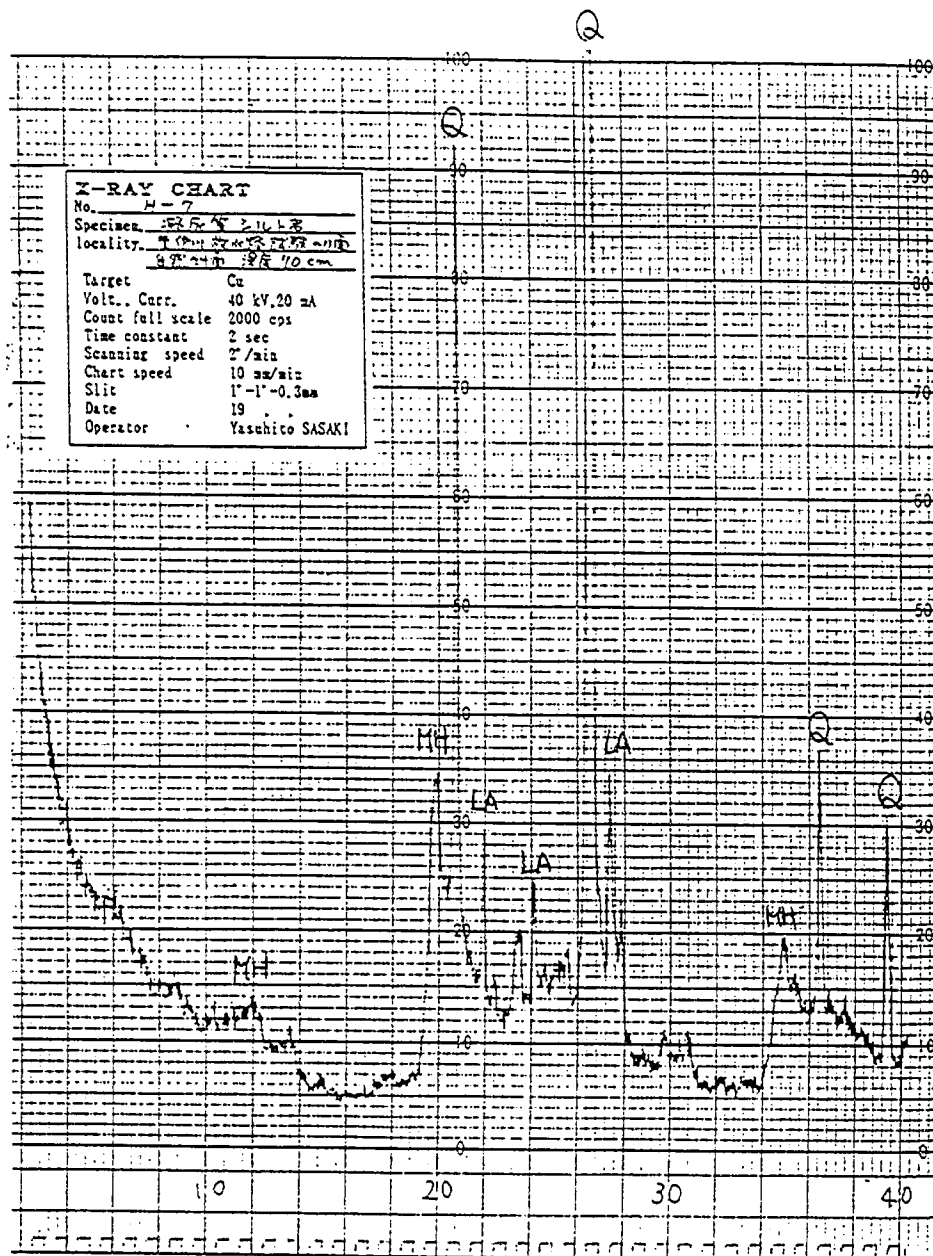
Q : 石英
L A : 斜長石
M H : メタハロイサイト
H : ハロイサイト
I I : イライト
M o : モンモリロナイト
A l : 明礬石
R c : 菱マンガン鉱
D l : ドロマイト
C p : クリノプチロライト

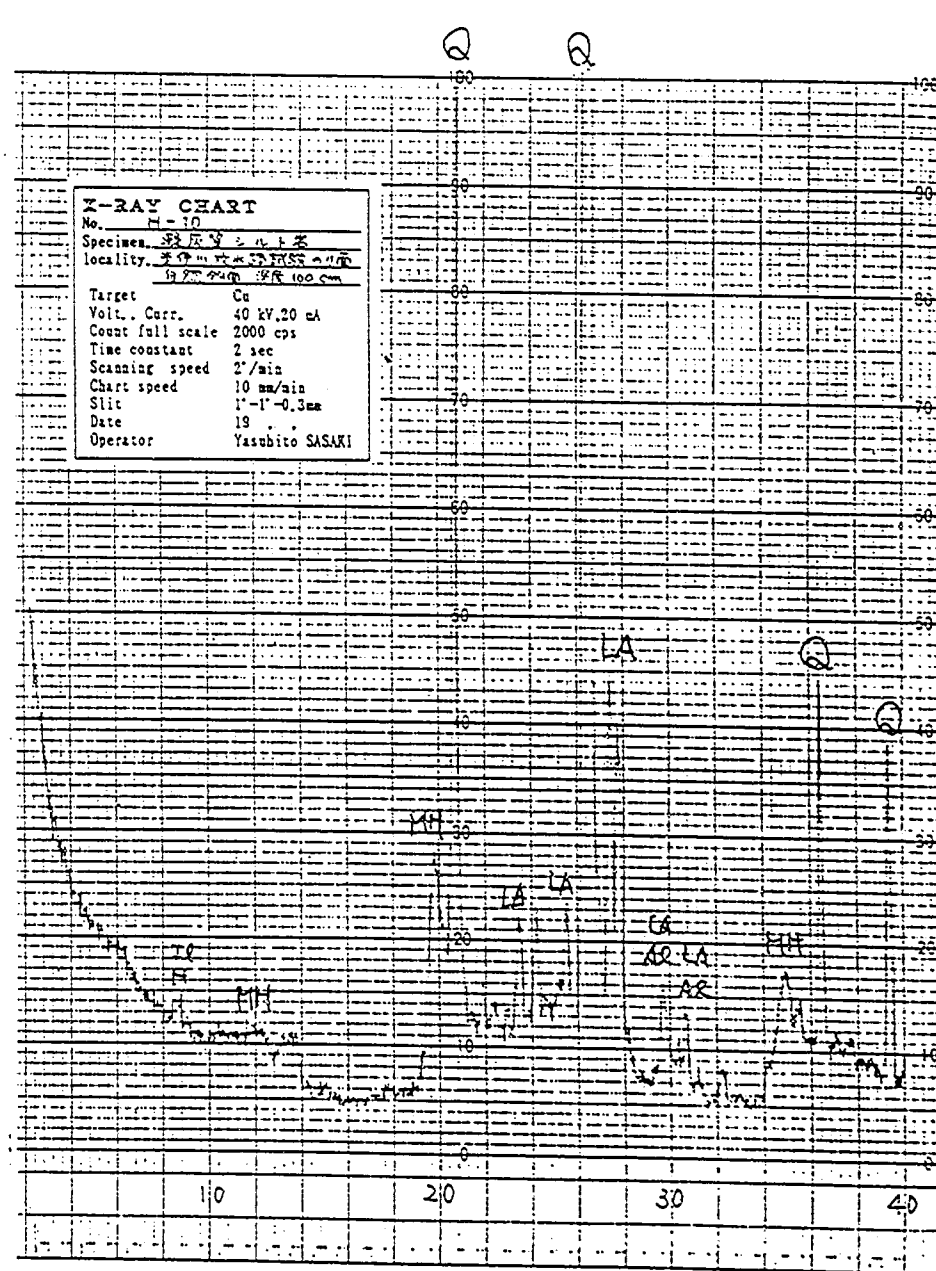
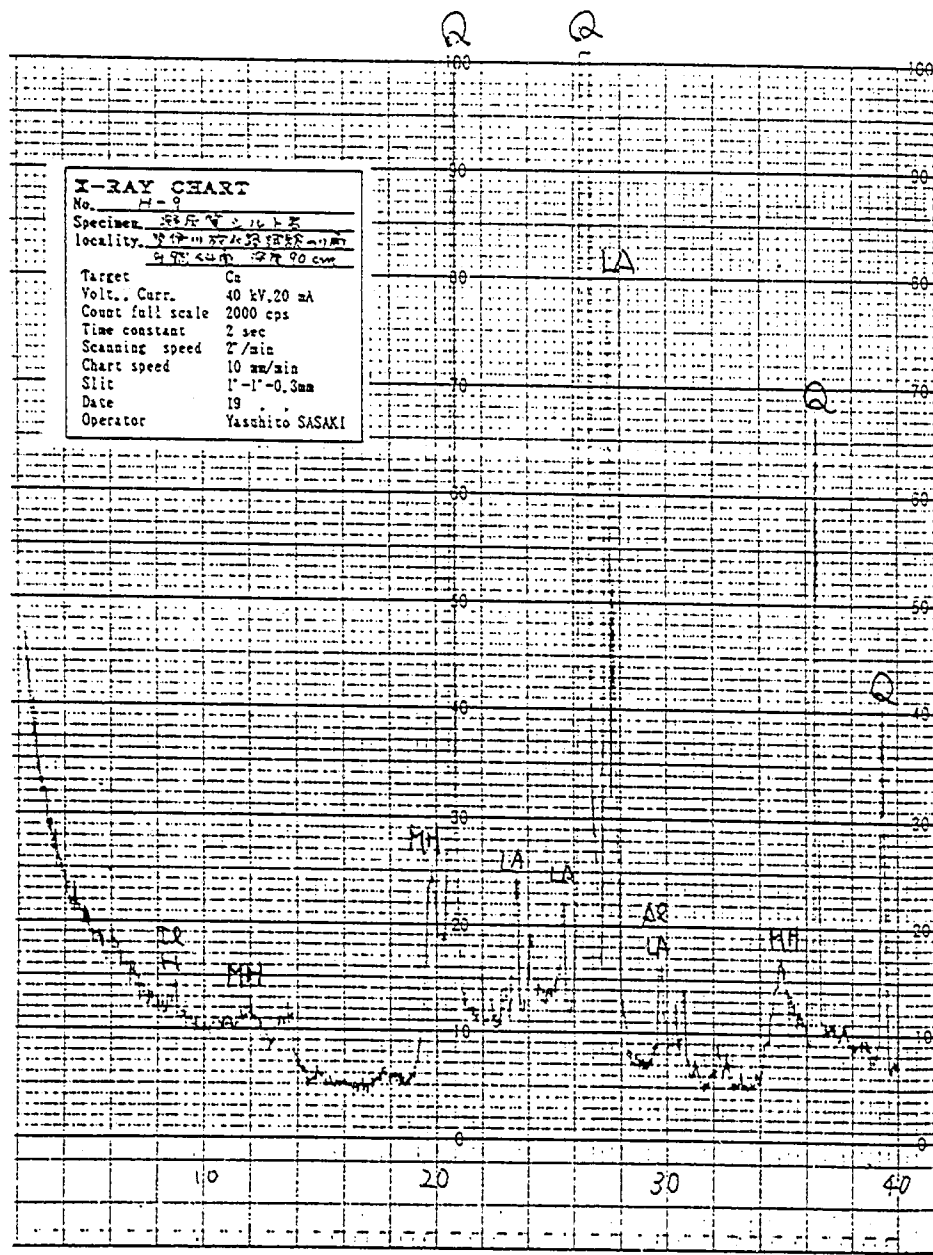






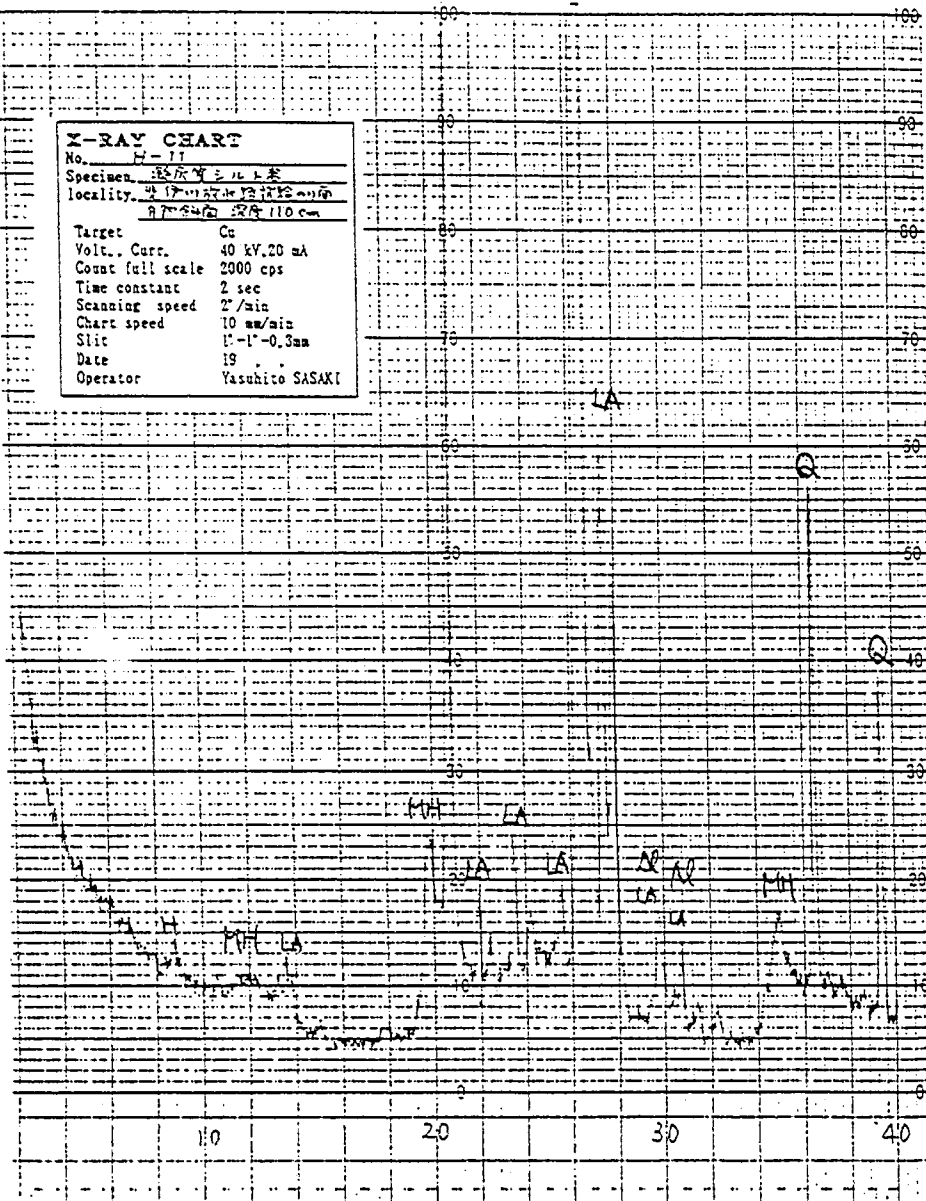






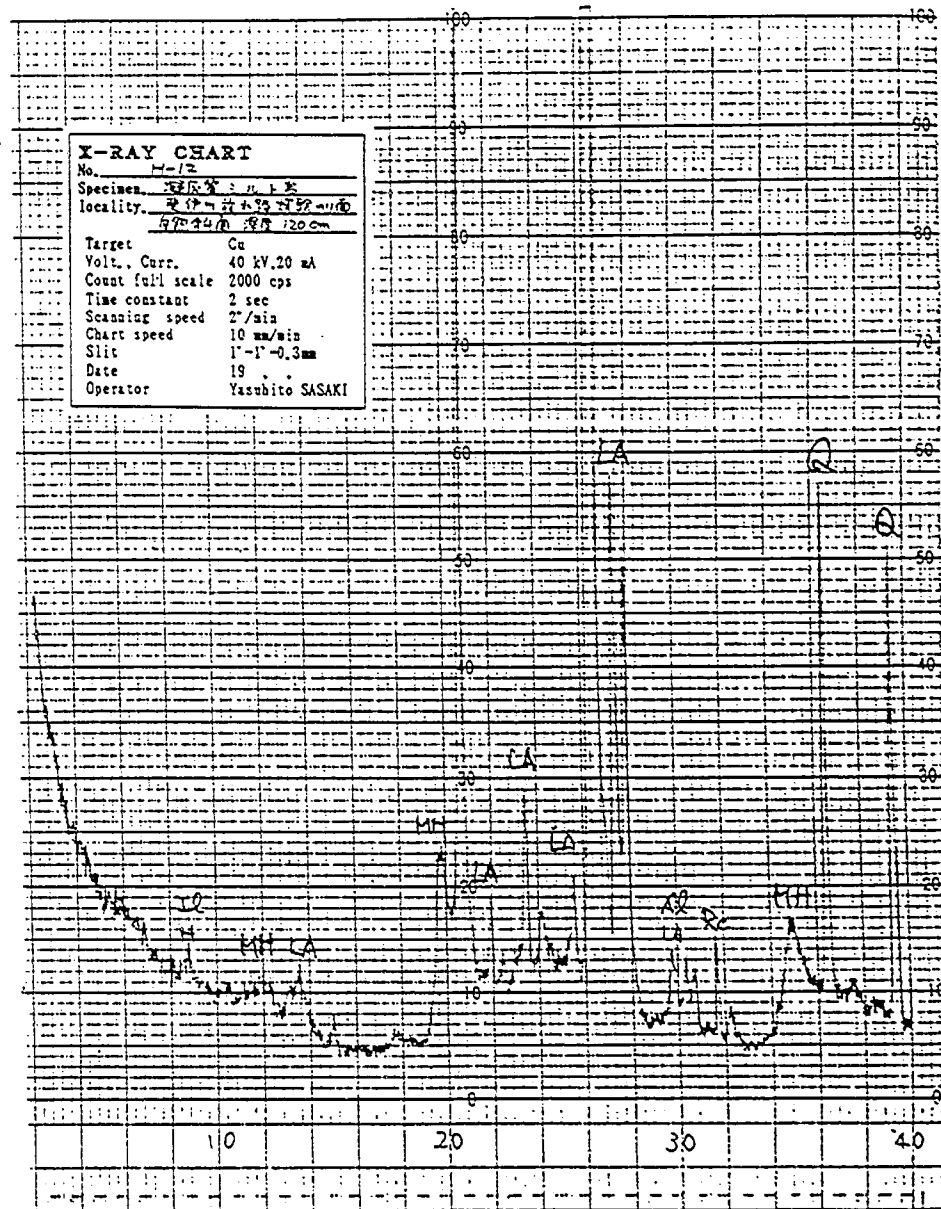
X-RAY CHART

No. H-11
 Specimen. 海産骨シロトネ
 locality. 岩手県大田郡大田町
 大田川 水深 110 cm
 Target Cu
 Volt., Curr. 40 kV. 20 mA
 Count full scale 2000 cps
 Time constant 2 sec
 Scanning speed 2"/min
 Chart speed 10 mm/min
 Slit 1"-1"-0.3mm
 Date 19
 Operator Yasuhito SASAKI

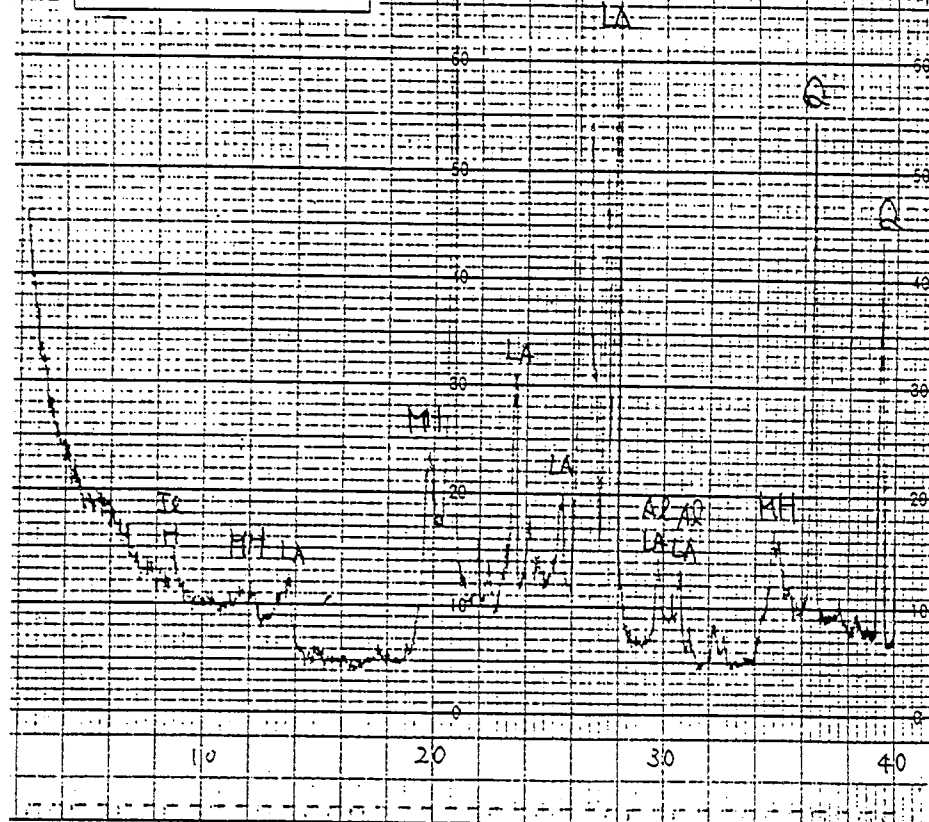


X-RAY CHART

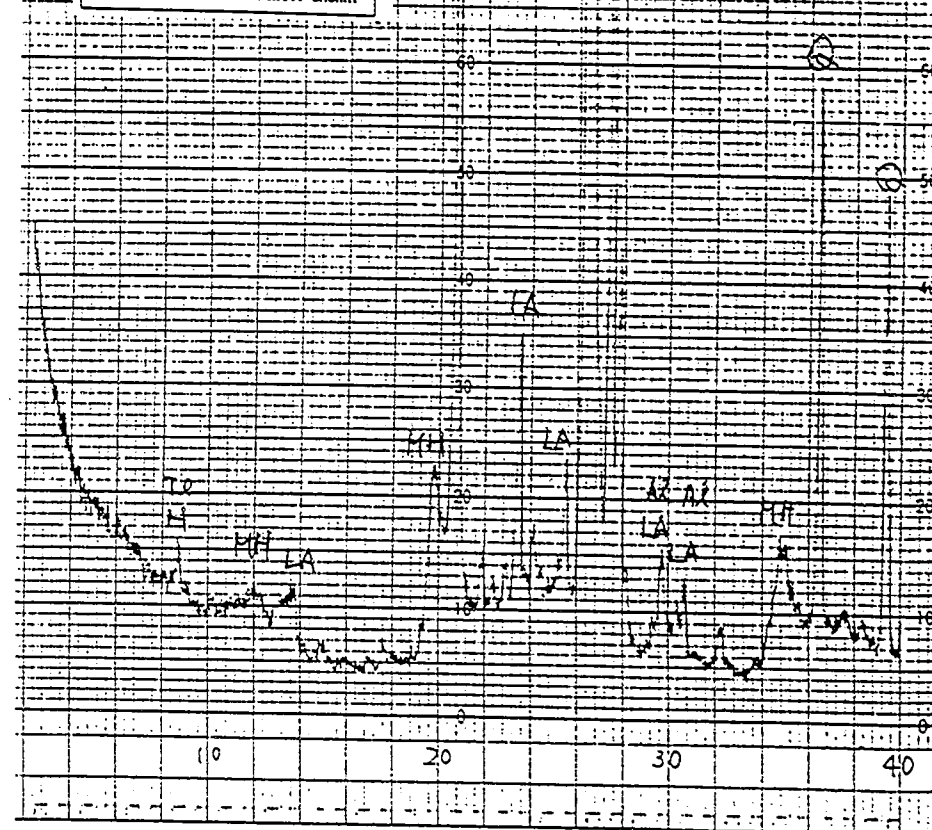
No. H-12
 Specimen. 海産骨シロトネ
 locality. 岩手県大田郡大田町
 大田川 水深 120 cm
 Target Cu
 Volt., Curr. 40 kV. 20 mA
 Count full scale 2000 cps
 Time constant 2 sec
 Scanning speed 2"/min
 Chart speed 10 mm/min
 Slit 1"-1"-0.3mm
 Date 19
 Operator Yasuhito SASAKI

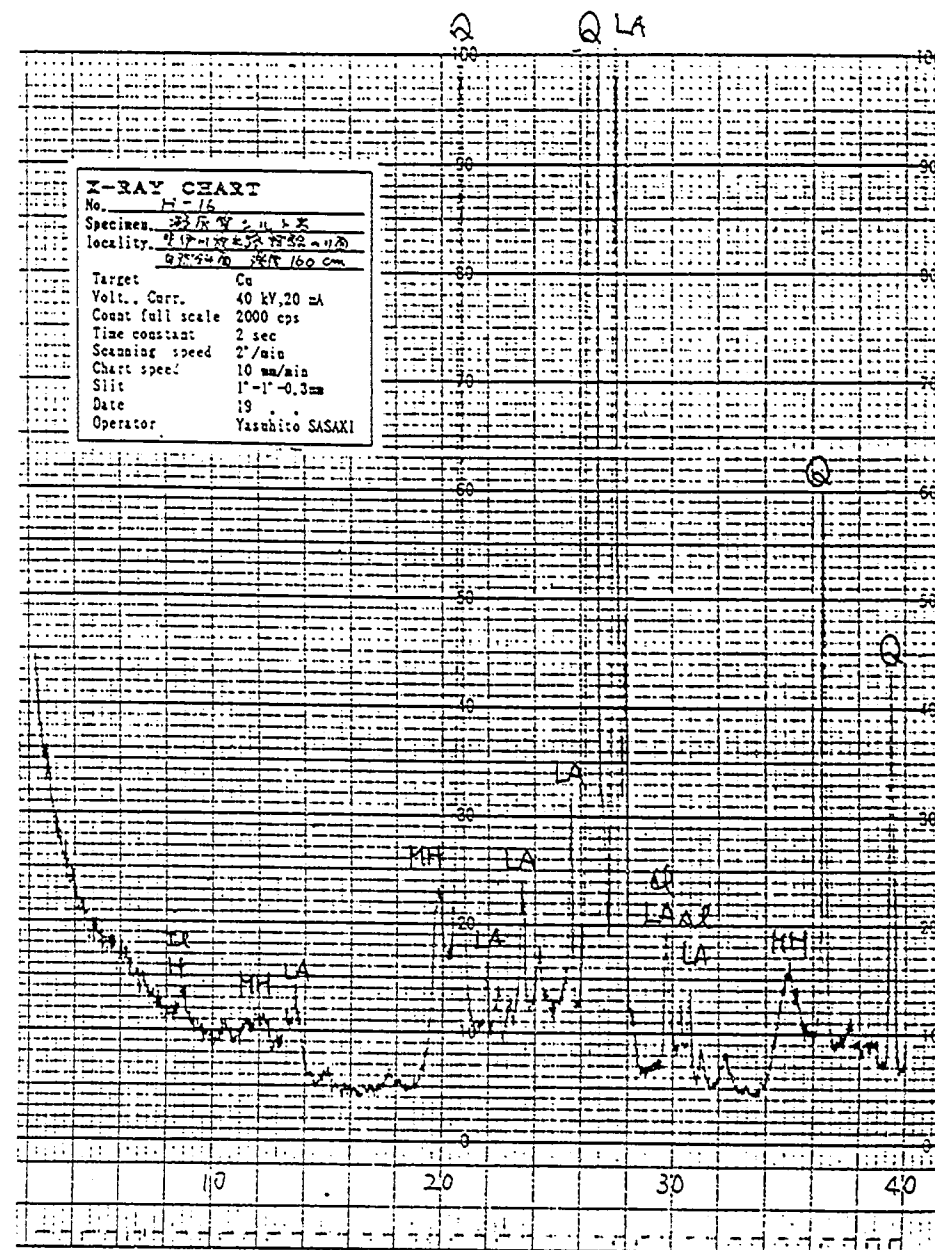
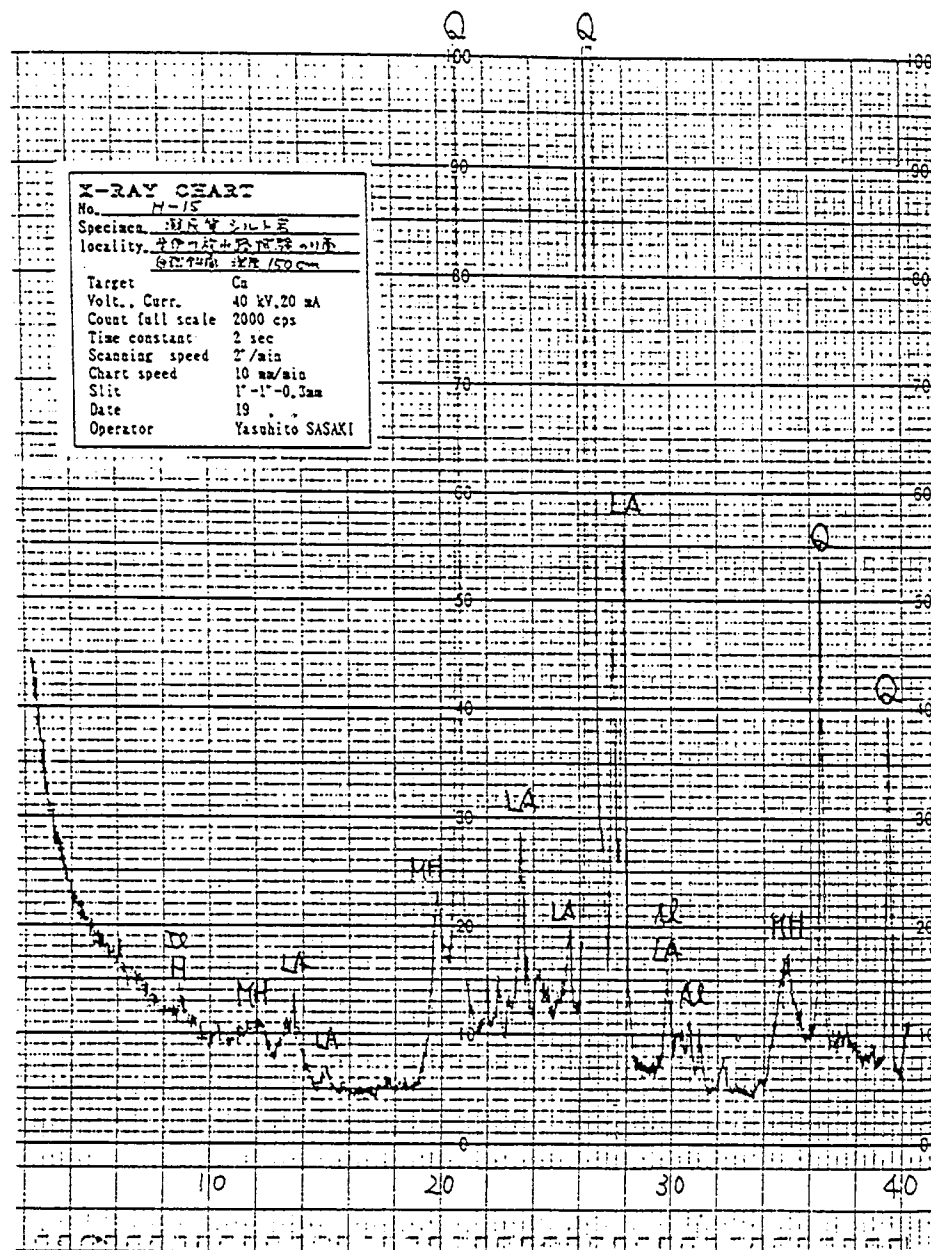


X-RAY CHART
 No. H-13
 Specimen. 銅板等シルト
 Locality. 日本国静岡県静岡市
97°54'N 129°00'E
 Target Cu
 Volt., Curr. 40 kV, 20 mA
 Count full scale 2000 cps
 Time constant 2 sec
 Scanning speed 2"/min
 Chart speed 10 mm/min
 Slit 1"-1"-0.3mm
 Date 19
 Operator Yasuhito SASAKI



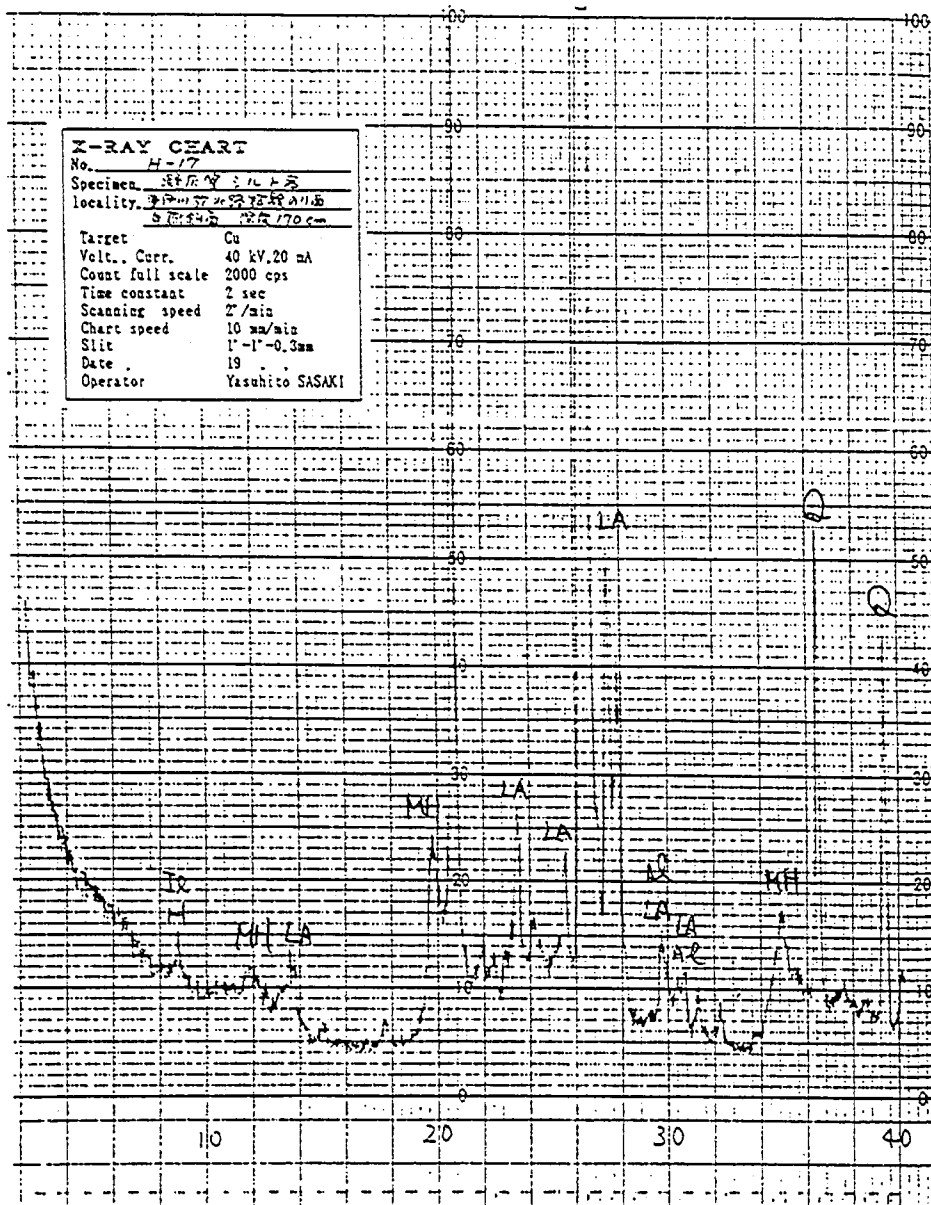
X-RAY CHART
 No. H-14
 Specimen. 銅板等シルト
 Locality. 日本国静岡県静岡市
97°54'N 129°00'E
 Target Cu
 Volt., Curr. 40 kV, 20 mA
 Count full scale 2000 cps
 Time constant 2 sec
 Scanning speed 2"/min
 Chart speed 10 mm/min
 Slit 1"-1"-0.3mm
 Date 19
 Operator Yasuhito SASAKI





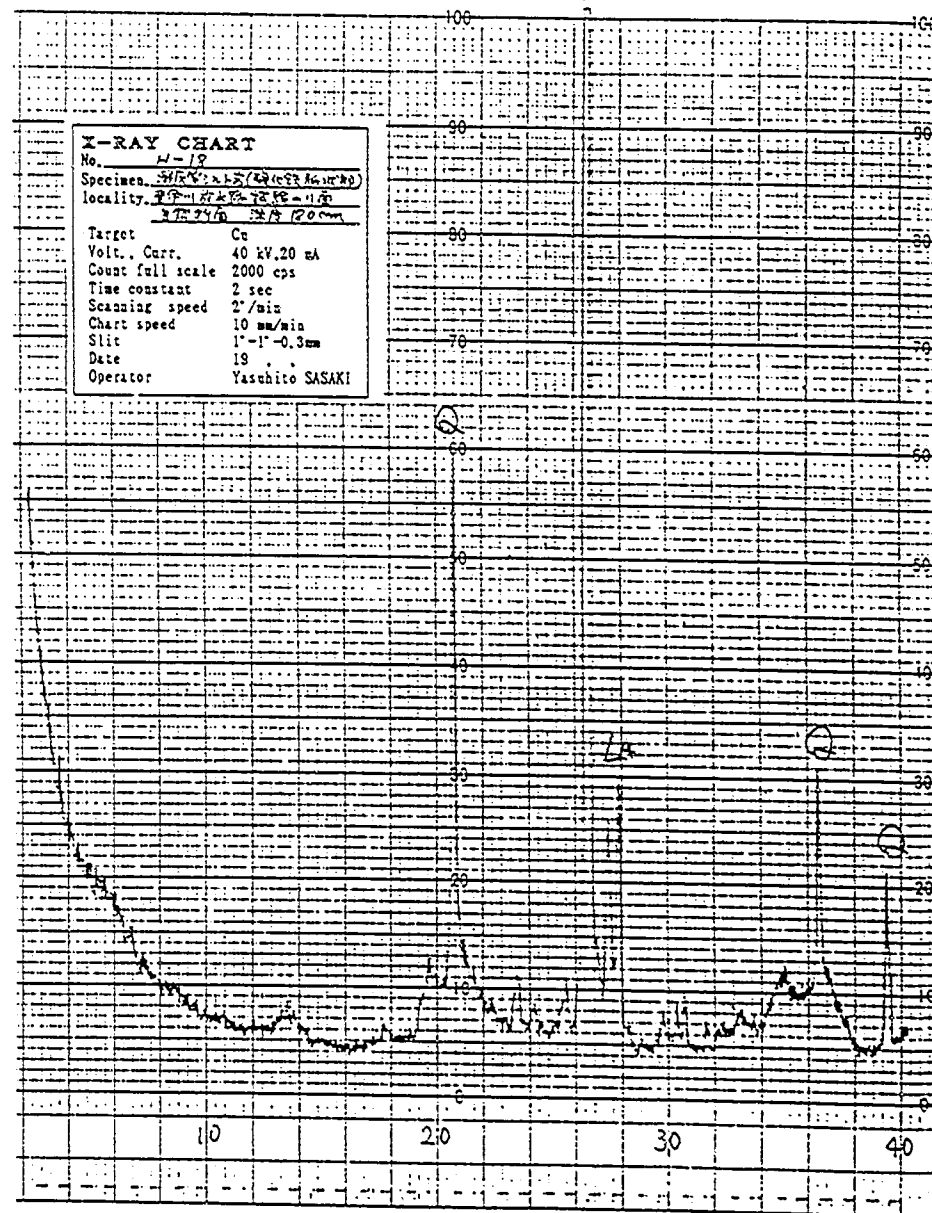
X-RAY CHART

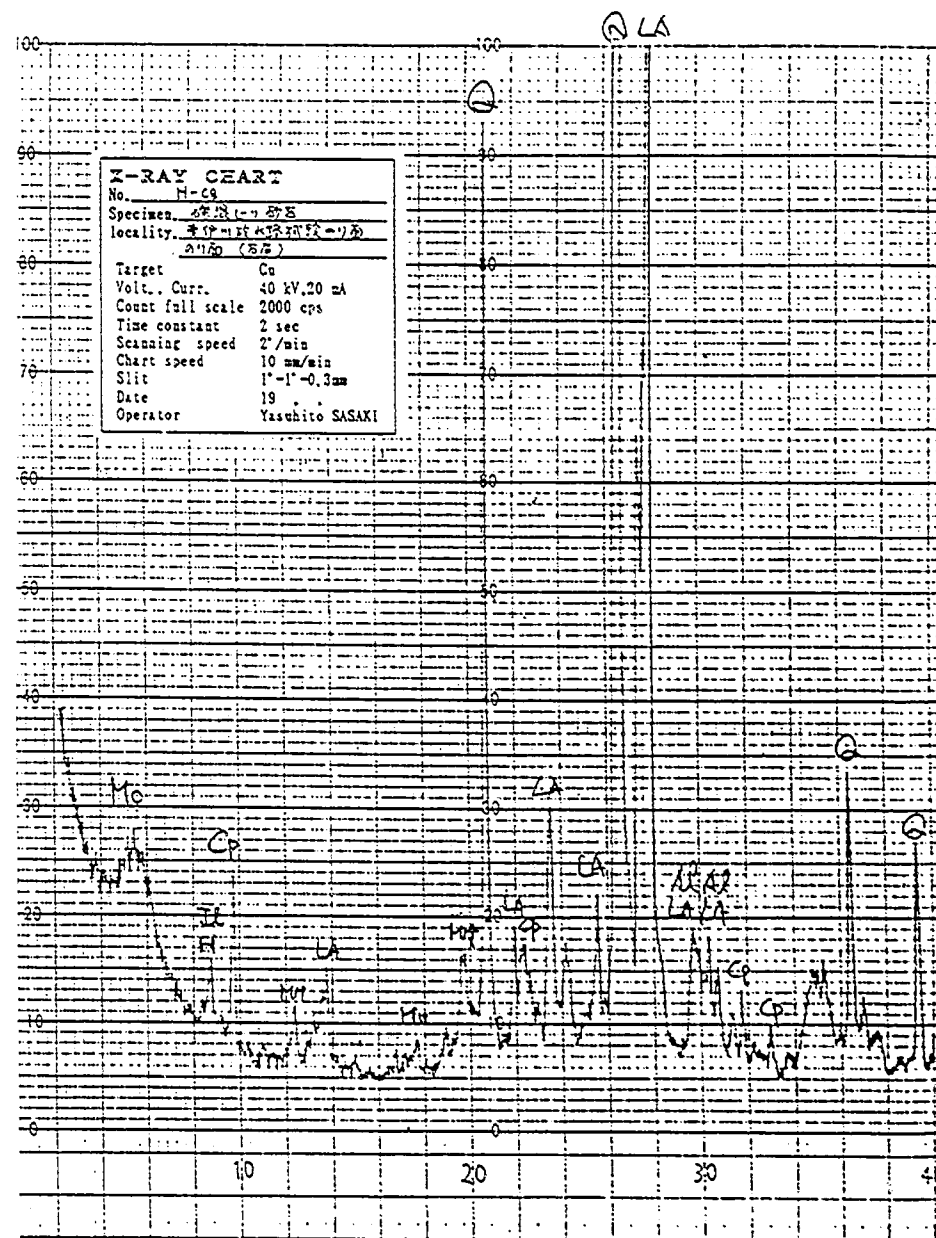
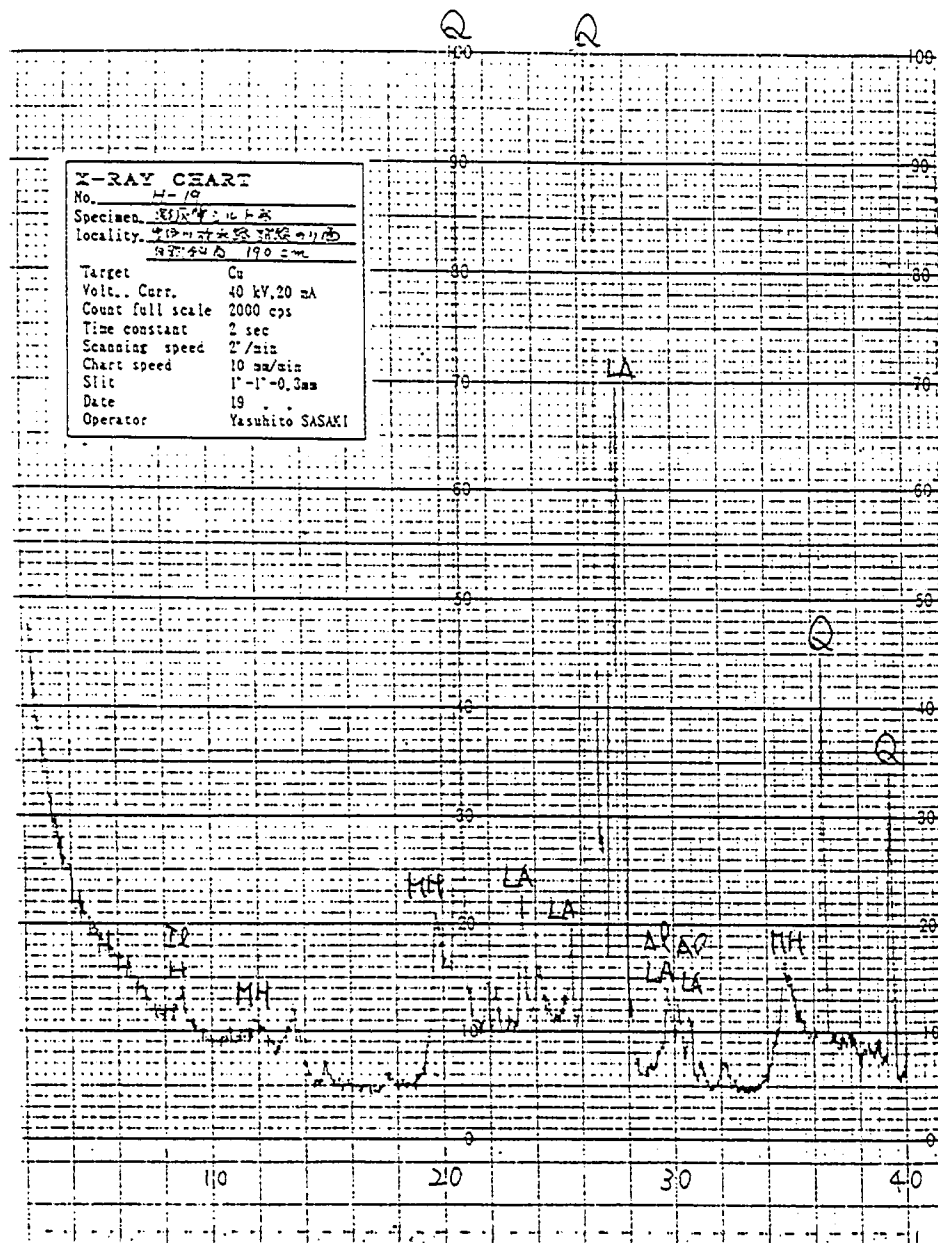
No. H-17
 Specimen. 鉄鋼 (鋼) 11.5
 locality. 日本 大阪府 大阪市 東淀川区 11.5
 5.15.54.5 12.5 170 cm
 Target Cu
 Volt., Curr. 40 kV. 20 mA
 Count full scale 2000 cps
 Time constant 2 sec
 Scanning speed 2"/min
 Chart speed 10 mm/min
 Slit 1"-1'-0.3mm
 Date 19
 Operator Yasuhito SASAKI

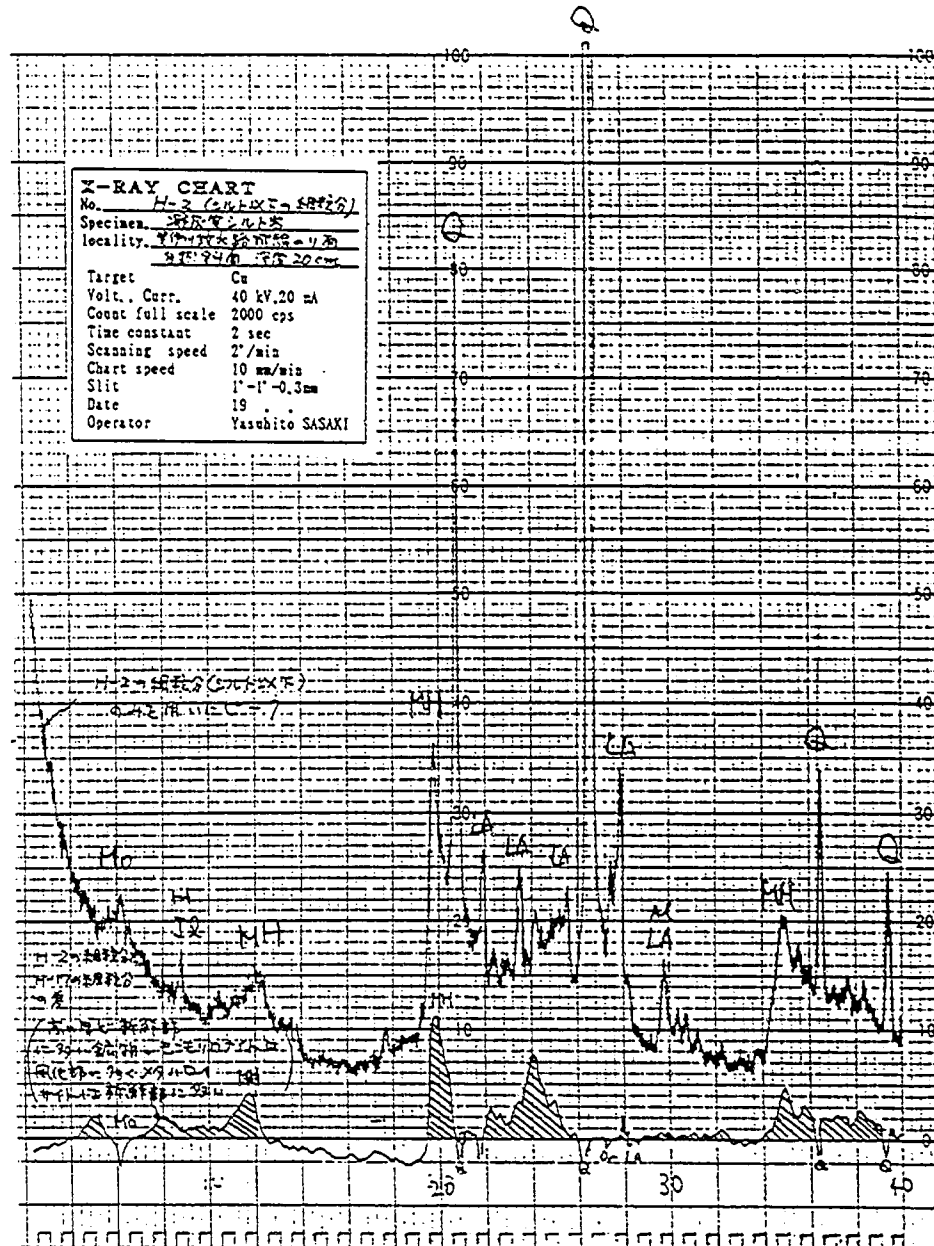
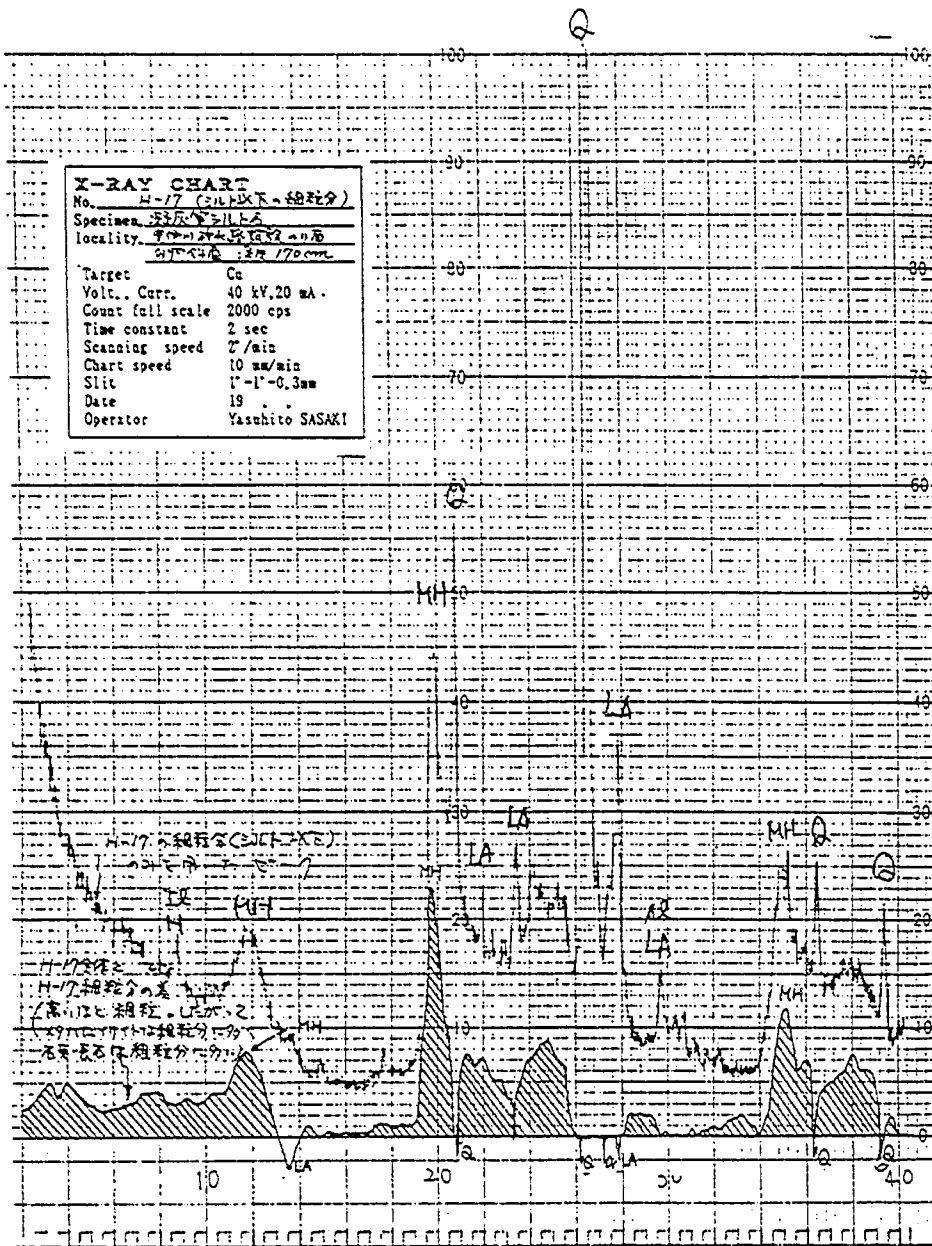


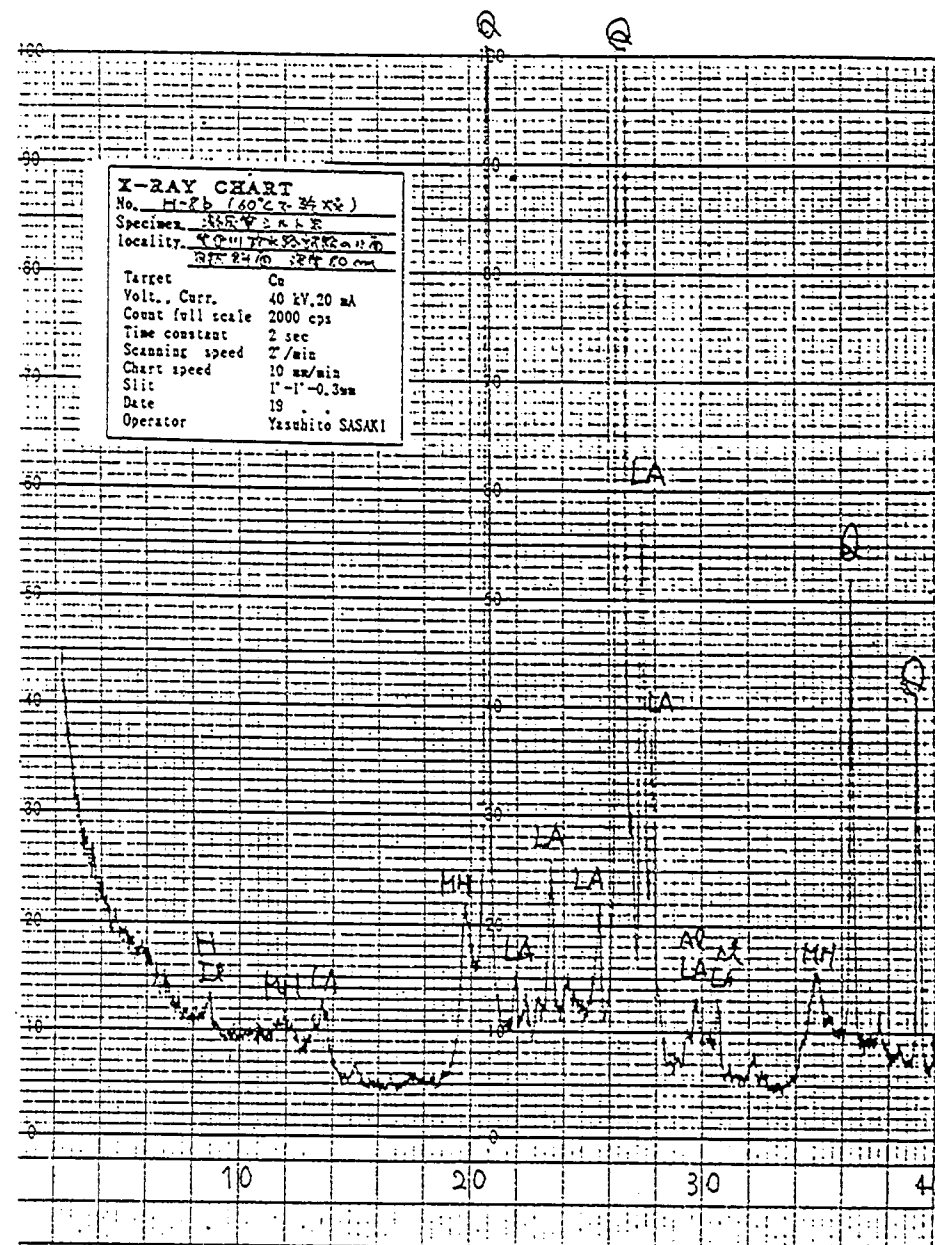
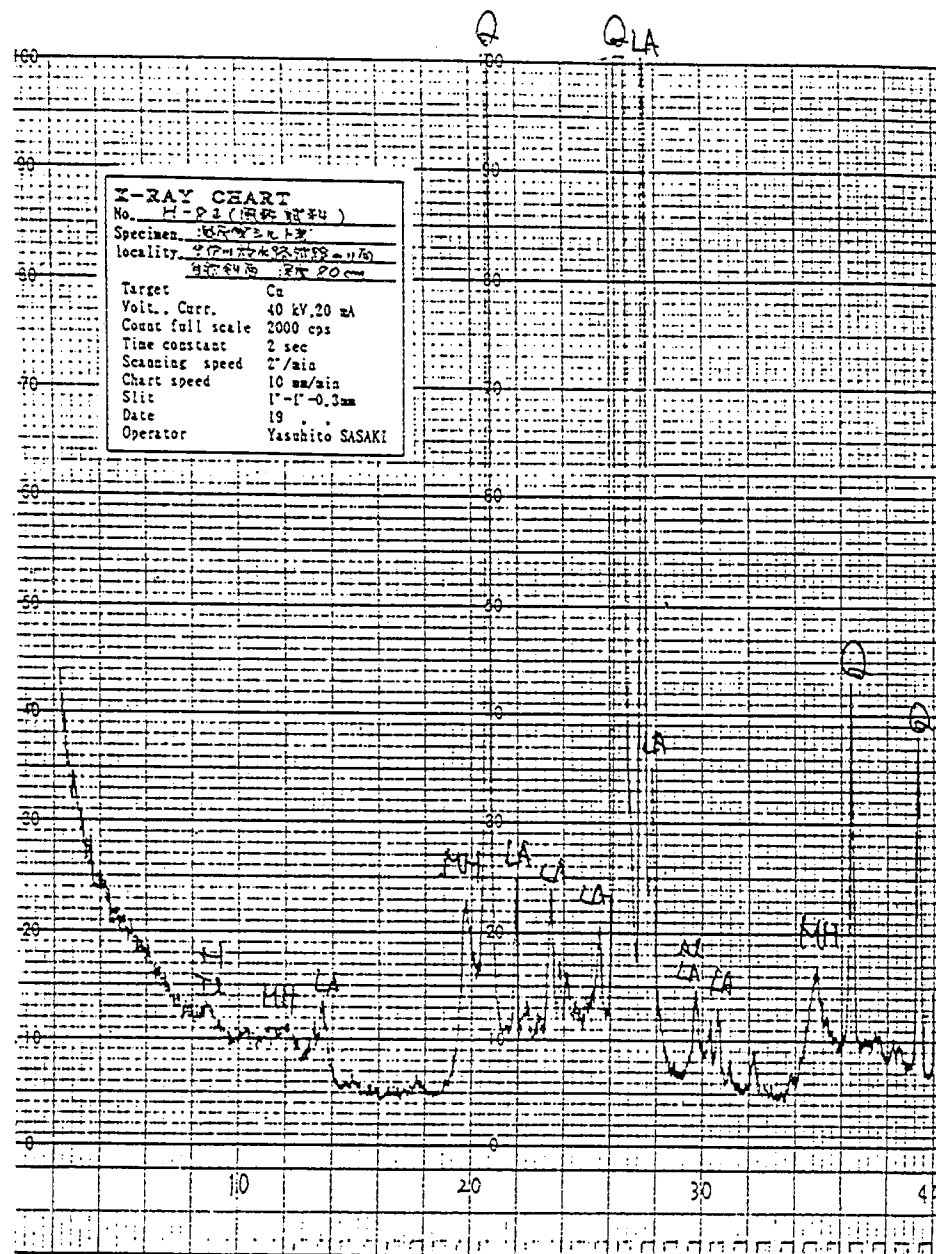
X-RAY CHART

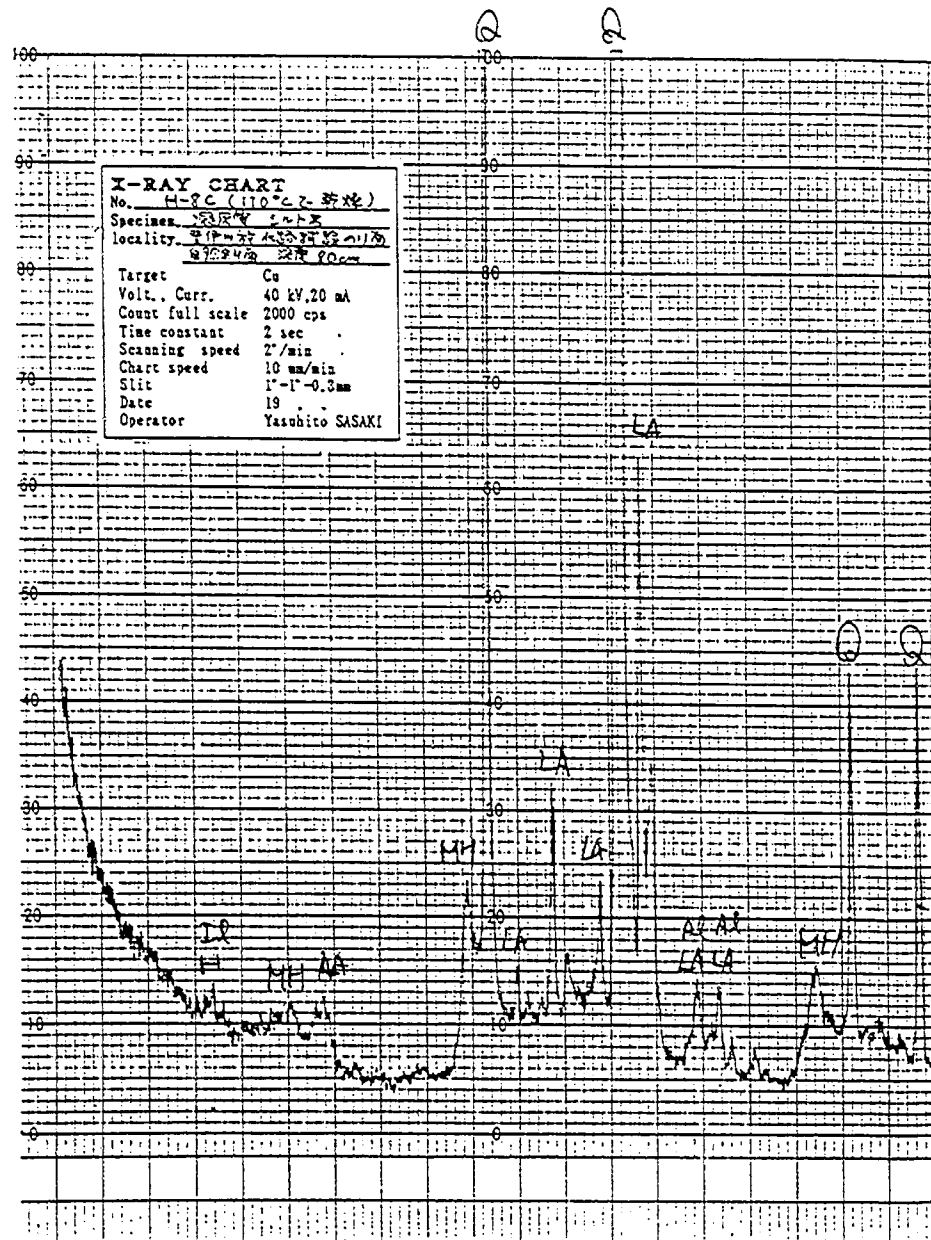
No. H-18
 Specimen. 鉄鋼 (鋼) 11.5 (鋼) 11.5
 locality. 日本 大阪府 大阪市 東淀川区 11.5
 5.15.54.5 12.5 170 cm
 Target Cu
 Volt., Curr. 40 kV. 20 mA
 Count full scale 2000 cps
 Time constant 2 sec
 Scanning speed 2"/min
 Chart speed 10 mm/min
 Slit 1"-1'-0.3mm
 Date 19
 Operator Yasuhito SASAKI







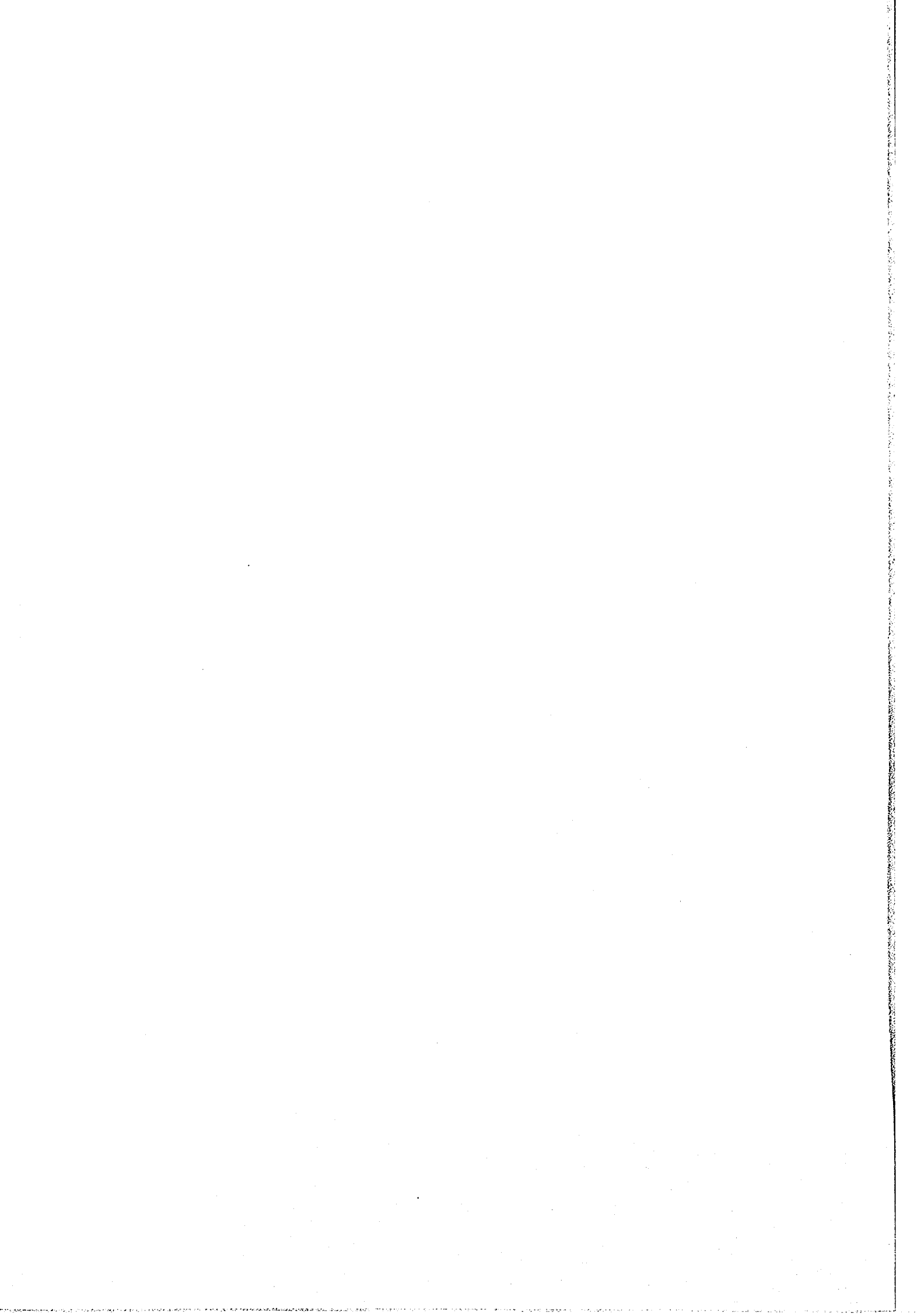




卷 末 資 料 3

斜面風化層の三軸圧縮試験結果

(CU法による)



試 料 : No. 1 サンプル位置 : 左岸自然斜面 25 cm 深
試料の状態 : 乱さない 圧室中の排水条件 : 両面、ペーパードレーン併用
供試体の寸法 : 高さ (L) 15.00 cm 直径 7.50 cm 体積 (V₀) 662.68 cm³
土粒子の比重 : 2.683 平均含水量 : 37.5 % 平均密度 : 1.640 g/cm³

準拠 井 番号	N o	1 - 1	1 - 2	1 - 3				
側 圧 σ_s	kgf/cm ²	0.50	1.00	2.00				
初 期 測 定 同	重 量 m_0	g	1079.47	1088.30	1090.47			
	密 度 ρ_0	g/cm ³	1.630	1.643	1.646			
	含水量 w_0	%	36.8	36.7	38.9			
	同隙比 e_0		1.252	1.232	1.264			
	飽和度 S_{r0}	%	78.9	79.9	82.6			
バックプレッシャ-		kgf/cm ²	0.13	0.13	0.13			
体積圧縮量	体積圧縮量 ΔV	ml	6.12	7.95	9.25			
	高 さ L_c	cm	14.954	14.940	14.930			
最 大 荷 重		kgf	73	76	134			
主 応 力 差		kgf/cm ²						
同 隙 水 圧		kgf/cm ²						
圧 縮 経 程 (三 相) 試 験 (バイロレット)	初 期 補 正 値		11.02	11.65	11.00			
	経過時間 :	0	10.00	圧密量	10.00	圧密量	10.00	圧密量
	6 秒後 :	0.1	11.35	0.33	11.91	0.26	11.70	0.70
	15 :	0.25	.50	0.48	12.06	0.41	12.15	1.15
	30 :	0.5	.70	0.68	.20	0.55	.61	1.61
	1 分後 :	1	.98	0.96	.47	0.82	13.30	2.30
	2 :	2	12.12	1.10	.81	1.16	14.63	3.63
	4 :	4	.34	1.32	13.35	1.70	15.00	4.00
	8 :	8	.70	1.68	14.00	2.35	.87	4.87
	15 :	15	.89	1.87	.68	3.03	16.50	5.50
	30 :	30	13.30	2.28	15.70	4.05	17.37	6.37
	50 :	50	14.45	3.43	16.73	5.08	18.27	7.27
	80 :	80	15.53	4.51	17.90	6.25	19.11	8.11
	2 時間後 :	120	16.35	5.33	18.83	7.18	19.33	8.33
	3 :	180	17.14	6.12	19.60	7.95	20.25	9.25

初期補正値 = 15秒 × 2 - 1分 圧密量 = ビューレットの読み - 初期補正値

$L_c = [1 - (\Delta V / V_0)] \cdot L_0$

試 験 : No. 2 サンプル位置 : 左岸自然斜面 35 cm 深
試料の性状 : 砂質ない 圧密中の排水条件 : 両面、ペーパードレーン使用
供試体の寸法 : 高さ (L) 15.00 cm 直径 7.50 cm 体積 (V₀) 662.68 cm³
土粒子の比重 : 2.698 平均含水量 : 32.4 % 平均密度 : 1.637 g/cm³

試体番号 No		2 - 1		2 - 2		2 - 3	
側 圧 σ_s kgf/cm ²		0.50		1.00		2.00	
初 期 状態	重 量 m_0 g	1059.96		1099.35		1094.41	
	密 度 ρ_0 g/cm ³	1.600		1.660		1.652	
	含水量 w_0 %	31.6		33.1		32.5	
	間隙比 e_0	1.219		1.163		1.164	
	飽和度 S_{r0} %	69.9		76.8		75.3	
バックプレッシャー kgf/cm ²		0.13		0.13		0.13	
圧 縮 状態	体積圧縮量 ΔV ml	4.58		4.85		5.30	
	高 さ l_c cm	14.965		14.963		14.960	
最 大 荷 重 kgf		56		89		131	
主 応 力 差 kgf/cm ²							
間 隙 水 圧 kgf/cm ²							
圧 縮 履歴 (ユニフォームロード法)	初 期 補 正 値	11.51		11.44		10.80	
	経過時間 0	10.00	圧 密 量	10.00	圧 密 量	10.00	圧 密 量
	6 秒後 0.1	11.78	0.27	11.55	0.11	11.00	0.20
	15 : 0.25	12.00	0.49	.92	0.48	.35	0.55
	30 : 0.5	.18	0.67	12.15	0.71	.70	0.90
	1 分後 1	.49	0.98	.40	0.96	.90	1.10
	2 : 2	.70	1.19	.70	1.26	12.12	1.32
	4 : 4	13.03	1.52	13.00	1.56	.37	1.57
	8 : 8	.31	1.80	40	1.96	.71	1.91
	15 : 15	.73	2.22	.80	2.36	13.00	2.20
	30 : 30	14.25	2.74	14.20	2.76	14.12	3.32
	50 : 50	.83	3.32	.71	3.27	.60	3.80
	80 : 80	15.50	3.99	15.50	4.06	15.28	4.48
	2 時間後 120	.83	4.32	.94	4.50	.76	4.95
3 : 180	15.09	4.58	16.29	4.85	16.10	5.30	

初期補正値 = 15秒 × 2 - 1分 圧密量 = ビューレットの読み - 初期補正値

$l_c = \{ 1 - (\Delta V / 3V_0) \} \cdot l_0$

試 料 : No 3 サンプル位置 : 左岸自然斜面 45cm 深
 試料の状態 : 乱さない 圧密中の排水条件 : 両面、ペーパードレーン併用
 供試体の寸法 : 高さ (L₀) 15.00 cm 直径 7.50 cm 体積 (V₀) 662.68 cm³
 土粒子の比重 : 2.694 平均含水量 : 30.7 % 平均密度 : 1.604 g/cm³

供試体番号 No		3 - 1		3 - 2		3 - 3	
側 圧 σ_v kgf/cm ²		0.50		1.00		2.00	
初 期 状 態	重 量 m_0 g	1091.68		1027.42		1067.88	
	密 度 ρ_0 g/cm ³	1.648		1.551		1.612	
	含水量 w_0 %	33.0		30.3		28.9	
	間隙比 e_0	1.174		1.263		1.154	
	飽和度 S_{ro} %	75.7		64.6		67.5	
バックプレッシャ- kgf/cm ²		0.13		0.13		0.13	
圧 密 後	体積圧縮量 ΔV ml	4.15		6.80		8.84	
	高 さ L_c cm	14.969		14.949		14.933	
最 大 荷 重 kgf		64		69		142	
主 応 力 差 kgf/cm ²							
間 隙 水 圧 kgf/cm ²							
圧 密 過 程 (ユーレットの読み)	初 期 補 正 値	11.25		11.10		12.66	
	経 過 時 間 0	10.00	圧 密 量	10.00	圧 密 量	10.00	圧 密 量
	6 秒 後 0.1	11.55	0.30	10.50		12.20	
	15 秒 0.25	.72	0.47	11.75	0.65	.97	0.31
	30 秒 0.5	.92	0.67	12.30	1.20	13.18	0.52
	1 分 後 1	12.19	0.94	.40	1.30	.28	0.62
	2 分 2	.52	1.27	.75	1.65	.38	0.72
	4 分 4	.78	1.53	13.22	2.12	.70	1.04
	8 分 8	13.10	1.85	.93	2.83	14.37	1.71
	15 分 15	.99	2.74	14.45	3.35	15.06	2.40
	30 分 30	14.59	3.34	15.20	4.10	16.40	3.74
	50 分 50	.82	3.57	16.00	4.90	17.70	5.04
	80 分 80	15.13	3.88	.70	5.60	19.00	6.34
	2 時 間 後 120	.30	4.05	17.17	6.07	.80	7.14
	3 分 180	.40	4.15	.90	6.80	21.50	8.84

初期補正值 = 15 秒 $\times$ 2 - 1 分 圧密量 = ユーレットの読み - 初期補正值

$L_c = [1 - (\Delta V / V_0)] \cdot L_0$

試 料 : No 4 サンプル位置 : 左岸自然斜面 55cm 深
 試料の状態 : 乱さない 圧密中の排水条件 : 両面、ペーパードレーン併用
 供試体の寸法 : 高さ (L₀) 15.00 cm 直径 7.50 cm 体積 (V₀) 662.68 cm³
 土粒子の比重 : 2.683 平均含水量 : 31.6 % 平均密度 : 1.626 g/cm³

供試体番号 No		4-1	4-2	4-3
側 圧 σ_v kgf/cm ²		0.50	1.00	2.00
初 期 状 態	重 量 m_0 g	1079.67	1051.16	1076.85
	密 度 ρ_0 g/cm ³	1.630	1.587	1.662
	含水量 w_0 %	32.9	28.8	33.1
	間隙比 e_0	1.186	1.178	1.149
	飽和度 S_{r0} %	74.4	65.6	77.3
バックプレッシャ- kgf/cm ²		0.13	0.13	0.13
圧 密 後	体積圧縮量 ΔV ml	0.84	3.25	9.53
	高 さ L_c cm	14.994	14.975	14.928
最 大 荷 重 kgf		50	77	113
主 応 力 差 kgf/cm ²				
間 隙 水 圧 kgf/cm ²				
圧 密 過 程 (ユーレットの読み)	初 期 補 正 値	11.60	10.32	10.60
	経過時間 0	10.00	圧密量 10.00	圧密量 10.00
	6 秒後 0.1	11.45	0.19	11.40 0.80
	15 秒 0.25	.70	0.10 .60	0.28 12.30 1.70
	30 秒 0.5	.79	0.19 .71	0.39 13.00 2.40
	1 分後 1	.80	0.20 .88	0.56 14.00 3.40
	2 分 2	.83	0.23 11.08	0.76 15.10 4.50
	4 分 4	.84	0.24 .25	0.93 16.08 5.48
	8 分 8	.85	0.25 .42	1.10 .90 6.30
	15 分 15	.90	0.30 .55	1.23 17.45 6.85
	30 分 30	.98	0.38 .83	1.51 18.02 7.42
	50 分 50	12.05	0.45 12.20	1.88 .42 7.82
	80 分 80	.14	0.54 .70	2.38 .93 8.33
	2 時間後 120	.25	0.65 13.12	2.80 19.50 8.90
	3 分 180	.44	0.84 .57	3.25 20.15 9.53

初期補正值 = 15 秒 × 2 - 1 分

圧密量 = ユーレットの読み - 初期補正值

$$L_c = [1 - (\Delta V / V_0)] \cdot L_0$$

試 料 : No 5 サンプル位置 : 左岸自然斜面 65 cm 深
 試料の状態 : 乱さない 圧密中の排水条件 : 両面、ペーパードレーン併用
 供試体の寸法 : 高さ (l_0) 15.00 cm 直径 7.50 cm 体積 (V_0) 662.68 cm³
 土粒子の比重 : 2.681 平均含水量 : 26.8 % 平均密度 : 1.582 g/cm³

供試体番号 No		5 - 1	5 - 2	5 - 3
側 圧 σ , kgf/cm ²		0.50	1.00	2.00
初 期 形 態	重 量 m_0 , g	1040.26	1039.98	1063.18
	密 度 ρ_0 , g/cm ³	1.571	1.570	1.605
	含水量 w_0 , %	26.6	27.0	26.8
	間隙比 e_0	1.161	1.169	1.118
	飽和度 S_{r0} , %	61.4	61.9	64.3
バックプレッシャ- kgf/cm ²		0.12	0.12	0.13
圧 密 高	体積圧縮量 ΔV , ml	0.89	1.60	2.50
	高 さ l_c , cm	14.993	14.988	14.981
最 大 荷 重, kgf		55	93	125
主 応 力 差, kgf/cm ²				
間 隙 水 圧, kgf/cm ²				
圧 密 高 程 (ユーレット)	初期補正值	12.96	10.33	11.75
	経過時間 0	10.00	圧密量 10.00	圧密量 10.00
	6 秒後 0.1	12.00	.35	0.02
	15 " 0.25	.96	.37	0.04
	30 " 0.5	.96	.39	0.06
	1 分後 1	.96	.41	0.08
	2 " 2	.97	0.01	.43
	4 " 4	13.08	0.12	.47
	8 " 8	.18	0.22	.60
	15 " 15	.23	0.27	.77
	30 " 30	.42	0.46	11.00
	50 " 50	.54	0.58	.16
	80 " 80	.64	0.68	.43
	2 時間後 120	.72	0.75	.68
	3 " 180	.85	0.89	.93
			1.60	14.25
				2.50

初期補正值 = 15秒 × 2 - 1分 圧密量 = ユーレットの読み - 初期補正值
 $l_c = [1 - (\Delta V / 3V_0)] \cdot l_0$

試 料 : No 6 サンプル位置 : 左岸自然斜面 75 cm 深
 試料の状態 : 乱さない 圧密中の排水条件 : 両面、ペーパードレーン併用
 供試体の寸法 : 高さ (l_0) 15.00 cm 直径 7.50 cm 体積 (V_0) 662.68 cm³
 土粒子の比重 : 2.660 平均含水量 : 28.3 % 平均密度 : 1.570 g/cm³

供試体番号 No		6 - 1	6 - 2	6 - 3
側 圧 σ , kgf/cm ²		0.50	1.00	2.00
初 期 形 態	重 量 m_0 , g	1046.49	1048.57	1025.45
	密 度 ρ_0 , g/cm ³	1.580	1.583	1.548
	含水量 w_0 , %	28.6	28.9	27.4
	間隙比 e_0	1.165	1.166	1.189
	飽和度 S_{r0} , %	65.3	65.9	61.3
バックプレッシャ- kgf/cm ²		0.13	0.13	0.13
圧 密 高	体積圧縮量 ΔV , ml	0.90	1.33	2.05
	高 さ l_c , cm	14.993	14.990	14.985
最 大 荷 重, kgf		66	95	147
主 応 力 差, kgf/cm ²				
間 隙 水 圧, kgf/cm ²				
圧 密 高 程 (ユーレット)	初期補正值	10.53	11.52	10.40
	経過時間 0	10.00	圧密量 10.00	圧密量 10.00
	6 秒後 0.1	.50	11.55	0.03
	15 " 0.25	.55	.59	0.07
	30 " 0.5	.56	.64	0.12
	1 分後 1	.57	.66	0.14
	2 " 2	.64	0.11	.68
	4 " 4	.68	0.15	.71
	8 " 8	.70	0.17	.74
	15 " 15	.81	0.28	.81
	30 " 30	.94	0.41	.91
	50 " 50	11.10	0.57	12.18
	80 " 80	.25	0.72	.42
	2 時間後 120	.36	0.83	.64
	3 " 180	.43	0.90	.85
			1.33	.45
				2.05

初期補正值 = 15秒 × 2 - 1分 圧密量 = ユーレットの読み - 初期補正值
 $l_c = [1 - (\Delta V / 3V_0)] \cdot l_0$

— 84 —

試 料 : No. 8 サンプル位置 : 左岸自然露面 95 cm 深
試料の状態 : 乱さない 圧室中の排水条件 : 両面、ベーパードレーン併用
供試体の寸法 : 高さ (L) 15.00 cm 直径 7.50 cm 体積 (V₀) 652.68 cm³
土粒子の比重 : 2.673 平均含水量 : 25.5 % 平均密度 : 1.581 g/cm³

供試体番号 No.		8 - 1	8 - 2	8 - 3			
調 圧 σ , kgf/cm ²		0.50	1.00	2.00			
初 期 荷 重 切 断	重 量 m , g	1050.01	1049.44	1041.66			
	密 度 ρ , g/cm ³	1.585	1.584	1.573			
	含水量 w , %	24.4	25.9	26.3			
	間隙比 e_0	1.098	1.125	1.146			
	飽和度 S_r , %	59.4	61.5	61.3			
バックプレッシャー- kgf/cm ²		0.13	0.13	0.13			
田 浦 式	体積圧縮量 ΔV , ml	2.50	3.11	4.61			
	高 さ l_c , cm	14.981	14.977	14.965			
表 大 荷 重 kgf		80	80	165			
主 応 力 差 kgf/cm ²							
間 隙 水 圧 kgf/cm ²							
田 浦 式 過 程 (田 浦 式 の プレージューレット)	初 期 補 正 値	11.82	10.57	13.65			
	経 過 時 間 0	10.00	圧 密 量 10.00	圧 密 量 10.00	圧 密 量 10.00		
	6 秒 後 0.1	11.87	0.05	10.63	0.06	13.80	0.15
	15 " 0.25	.90	0.08	.72	0.15	.85	0.20
	30 " 0.5	.93	0.11	.79	0.22	.88	0.23
	1 分 後 1	.98	0.16	.87	0.30	14.05	0.40
	2 " 2	12.19	0.37	11.09	0.52	.35	0.70
	4 " 4	.43	0.61	.38	0.81	.65	1.00
	8 " 8	.77	0.95	.75	1.18	.95	1.30
	15 " 15	13.00	1.18	12.23	1.66	15.66	2.01
	30 " 30	.51	1.69	.94	2.37	17.02	3.37
	50 " 50	.88	2.06	13.25	2.68	.81	4.16
	80 " 80	14.12	2.30	.54	2.97	18.13	4.48
2 時 間 後 120	.26	2.44	.63	3.05	.21	4.56	
3 " 180	.32	2.50	.68	3.11	.25	4.61	

初期補正值 = 15秒 + 2 - 1 分 圧密量 = ビューレットの読み - 初期補正值

$$l_c = \left[\frac{1}{\rho} - \left(\frac{\Delta V}{3V_0} \right) \right] \cdot l_0$$

試 料 : No 9 サンプル位置 : 左岸自然斜面 105 cm 深
 試料の状態 : 乱さない 圧密中の排水条件 : 両面, ペーパードレーン併用
 供試体の寸法 : 高さ (L) 15.00 cm 直径 7.50 cm 体積 (V₀) 662.68 cm³
 土粒子の比重 : 2.668 平均含水量 : 26.2 % 平均密度 : 1.621 g/cm³

供試体番号 No		9 - 1	9 - 2	9 - 3
側 圧 σ , kgf/cm ²		0.50	1.00	2.00
初 期 状 態	重 量 m_0 , g	1074.81	1073.35	1071.59
	密 度 ρ_0 , g/cm ³	1.623	1.621	1.618
	含水量 w_0 , %	26.2	26.1	26.2
	間隙比 e_0	1.075	1.075	1.081
飽和度 S_r , %		65.0	64.8	64.7
バックプレッシャー- kgf/cm ²		0.13	0.13	0.13
圧 密 状 態	体積圧縮量 ΔV , ml	0.41	0.75	2.83
	高 さ L_c , cm	14.997	14.994	14.979
最 大 荷 重, kgf		121	152	224
主 応 力 差, kgf/cm ²				
間 隙 水 圧, kgf/cm ²				
(圧 密 時 間 経 過)	初 期 補 正 値	10.97	10.32	10.94
	経 過 時 間 : 0	10.00	10.00	10.00
	6 秒 後 : 0.1	.95	10.30	11.00
	15 " : 0.25	.97	.33	.01
	30 " : 0.5	.97	.34	.02
	1 分 後 : 1	.97	.34	.02
	2 " : 2	.98	0.01	.37
	4 " : 4	.99	0.02	.38
	8 " : 8	11.00	0.03	.46
	15 " : 15	.02	0.05	.48
	30 " : 30	.05	0.08	.54
	50 " : 50	.15	0.16	.60
	80 " : 80	.21	0.24	.77
	2 時 間 後 : 120	.31	0.34	.94
	3 " : 180	.38	0.41	11.07
初期補正値 = 1.5 秒 $\times$ 2 - 1 分 圧密量 = ビューレットの読み - 初期補正値 $L_c = [1 - (\Delta V / 3V_0)] \cdot L_0$				

試 料 : No 10 サンプル位置 : 左岸自然斜面 115 cm 深
 試料の状態 : 乱さない 圧密中の排水条件 : 両面, ペーパードレーン併用
 供試体の寸法 : 高さ (L) 15.00 cm 直径 7.50 cm 体積 (V₀) 662.68 cm³
 土粒子の比重 : 2.668 平均含水量 : 30.3 % 平均密度 : 1.624 g/cm³

供試体番号 No		10 - 1	10 - 2	10 - 3
側 圧 σ , kgf/cm ²		0.50	1.00	2.00
初 期 状 態	重 量 m_0 , g	1060.55	1085.87	1081.39
	密 度 ρ_0 , g/cm ³	1.601	1.639	1.633
	含水量 w_0 , %	27.2	33.1	30.5
	間隙比 e_0	1.120	1.167	1.132
飽和度 S_r , %		64.8	75.7	71.9
バックプレッシャー- kgf/cm ²		0.13	0.12	0.12
圧 密 状 態	体積圧縮量 ΔV , ml	2.40	2.78	4.92
	高 さ L_c , cm	14.982	14.979	14.963
最 大 荷 重, kgf		57	62	91
主 応 力 差, kgf/cm ²				
間 隙 水 圧, kgf/cm ²				
(圧 密 時 間 経 過)	初 期 補 正 値	10.00	12.39	12.13
	経 過 時 間 : 0	10.00	10.00	10.00
	6 秒 後 : 0.1	.18	0.18	12.45
	15 " : 0.25	.25	0.25	.65
	30 " : 0.5	.35	0.35	.78
	1 分 後 : 1	.50	0.50	.91
	2 " : 2	.69	0.69	13.10
	4 " : 4	.81	0.81	.17
	8 " : 8	11.08	1.08	.34
	15 " : 15	.19	1.19	.54
	30 " : 30	.65	1.65	.92
	50 " : 50	.87	1.67	14.23
	80 " : 80	12.10	2.10	.60
	2 時 間 後 : 120	.30	2.30	.87
	3 " : 180	.40	2.40	15.17
初期補正値 = 1.5 秒 $\times$ 2 - 1 分 圧密量 = ビューレットの読み - 初期補正値 $L_c = [1 - (\Delta V / 3V_0)] \cdot L_0$				

— 86 —

試 料 : No. 12 サンプル位置 : 左草のり面(着 10~25 cm 深)
試料の形状 : 円形ない 圧着中の排水条件 : 両面、ヘーバードレーン併用
供試体の寸法 : 高さ (L) 15.00 cm 直径 7.50 cm 体積 (V₀) 662.68 cm³
土粒子の比重 : 2.667 平均含水量 : 17.7 % 平均密度 : 1.838 g/cm³

供試体番号	No	12 - 1	12 - 2	12 - 3			
側 圧 σ , kgf/cm ²		0.50	1.00	2.00			
初 期 状態	重量 m , g	1222.75	1215.85	1214.23			
	密度 ρ , g/cm ³	1.846	1.836	1.833			
	含水量 w , %	17.3	17.8	18.0			
	間隙比 e_0	0.695	0.711	0.717			
	飽和度 S_r , %	66.4	66.8	67.0			
バックプレッシャー- kgf/cm ²		0.12	0.13	0.13			
圧 縮 後	体積圧縮量 ΔV , ml	3.16	4.71	5.70			
	高 さ h , cm	14.976	14.964	14.957			
最大 荷 重 kgf		219	262	413			
主 応 力 差 kgf/cm ²							
間 隙 水 圧 kgf/cm ²							
圧 縮 施 理 後 (ビューレットの読み)	初 期 補 正 値	11.83	10.66	12.32			
	経過時間 0	10.00	圧密度	10.00	圧密度	10.00	圧密度
	6 秒後 0.1	12.40	0.52	10.95	0.29	12.77	0.45
	15 " 0.25	.70	0.82	11.12	0.46	13.00	0.68
	30 " 0.5	13.10	1.22	.28	0.62	.60	1.28
	1 分後 1	.52	1.64	.58	0.92	.66	1.36
	2 " 2	.95	2.07	.97	1.31	14.09	1.77
	4 " 4	14.20	2.32	12.40	1.74	.58	2.26
	8 " 8	.50	2.62	.67	2.21	15.39	3.07
	15 " 15	.58	2.70	13.42	2.76	16.10	3.78
	30 " 30	.62	2.74	14.08	3.42	.85	4.57
	50 " 50	.72	2.84	.52	3.86	17.30	4.96
	80 " 80	.85	2.97	.86	4.20	.52	5.30
	2 時間後 120	.90	3.02	15.13	4.47	.79	5.47
3 " 180	15.04	3.16	.37	4.71	13.02	5.70	

初期補正値 = 1.5秒 × 2 - 1分 圧密度 = ビューレットの読み - 初期補正値
 $h = \{ (1 - \Delta V / V_0) \} \cdot h_0$

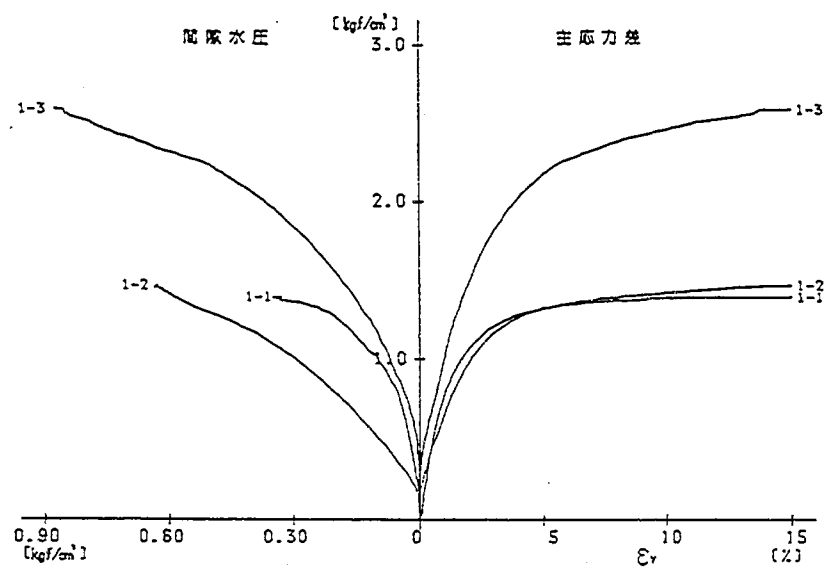
試 料 : No 13 サンプル位置: 左岸のり面凝灰質シルト岩 10~25 cm 深
 試料の状態 : 乱さない 圧密中の排水条件 : 両面, ペーパードレーン併用
 供試体の寸法 : 高さ (L_0) 15.00 cm 直径 7.50 cm 体積 (V_0) 662.68 cm³
 土粒子の比重 : 2.622 平均含水量 : 19.5 % 平均密度 : 1.808 g/cm³

供試体番号 No		13 - 1	13 - 2	13 - 3			
固 圧 σ_v kgf/cm ²		0.50	1.00	2.00			
初 期 調 査	質量 m_0 g	1189.49	1203.34	1199.58			
	密度 ρ_0 g/cm ³	1.796	1.817	1.811			
	含水量 w_0 %	19.4	19.8	19.4			
	空隙比 e_0	0.743	0.729	0.729			
	飽和度 S_{r0} %	68.5	71.2	69.8			
バックプレッシャー- kgf/cm ²		0.13	0.13	0.13			
圧 密 時	圧密圧縮量 ΔV ml	1.40	2.71	4.94			
	高 さ L_c cm	14.989	14.980	14.963			
最大荷重 kgf		200	291	411			
主 応 力 差 kgf/cm ²							
固 隙 水 圧 kgf/cm ²							
(ユニバーサル法) 圧密時間	初期補正值	10.77	11.22	11.86			
	経過時間 0	10.00	圧密量 10.00	圧密量 10.00	圧密量		
	0 秒後 0.1	.70	11.35	0.13	12.38	0.52	
	1.5 " 0.25	.85	0.08	.63	0.41	13.00	1.14
	3.0 " 0.5	.90	0.13	.91	0.69	.60	1.74
	1 分後 1	.93	0.16	12.04	0.82	14.14	2.28
	2 " 2	.96	0.19	.23	1.01	.71	2.85
	4 " 4	11.04	0.27	.29	1.07	15.09	3.23
	8 " 8	.07	0.30	.54	1.32	.39	3.53
	15 " 15	.13	0.33	.72	1.50	.88	4.02
	30 " 30	.16	0.39	13.04	1.82	16.21	4.35
	50 " 50	.40	0.63	.37	2.15	.48	4.62
	80 " 80	.64	0.87	.60	2.38	.61	4.75
	2 時間後 120	12.00	1.23	.77	2.55	.70	4.84
	3 " 180	.17	1.40	.93	2.71	.80	4.94

初期補正值 = 1.5 秒・2 - 1 分 圧密量 - ビューレットの読み - 初期補正值
 $L_c = \{ 1 - (\Delta V / 3V_0) \} L_0$

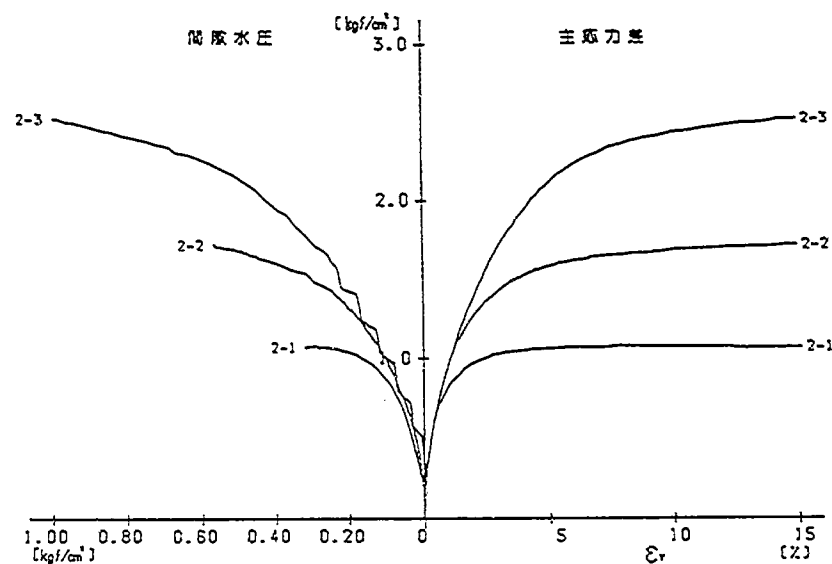
試料 No. 1
試験過程 CU'

供試体 No	側圧 σ_3 kgf/cm ²	最大主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²	間隙水圧 u_f kgf/cm ²	密度 ρ g/cm ³
1-1	0.50	1.395	0.328	1.626
1-2	1.00	1.468	0.624	1.638
1-3	2.00	2.584	0.856	1.640



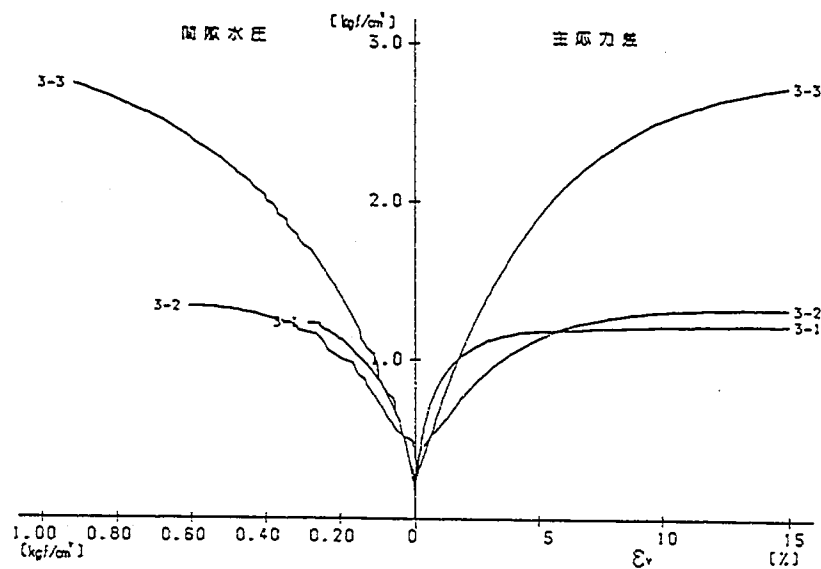
試料 No. 2
試験過程 CU'

供試体 No	側圧 σ_3 kgf/cm ²	最大主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²	間隙水圧 u_f kgf/cm ²	密度 ρ g/cm ³
2-1	0.50	1.079	0.284	1.597
2-2	1.00	1.714	0.565	1.657
2-3	2.00	2.520	0.992	1.649



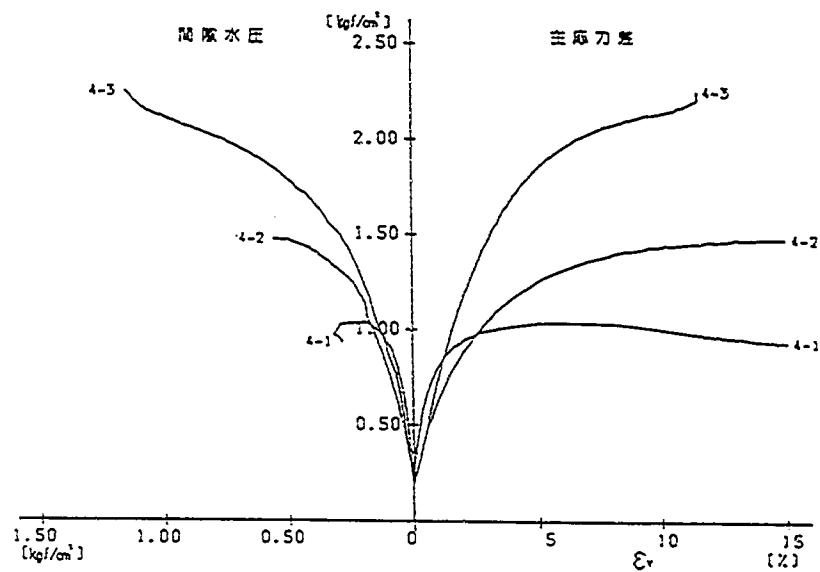
試料 No. 3
試験過程 CU'

供試体 No	側圧 σ_3 kgf/cm ²	最大主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²	間隙水圧 u_f kgf/cm ²	密度 ρ g/cm ³
3-1	0.50	1.232	0.252	1.645
3-2	1.00	1.336	0.567	1.546
3-3	2.00	2.733	0.915	1.606



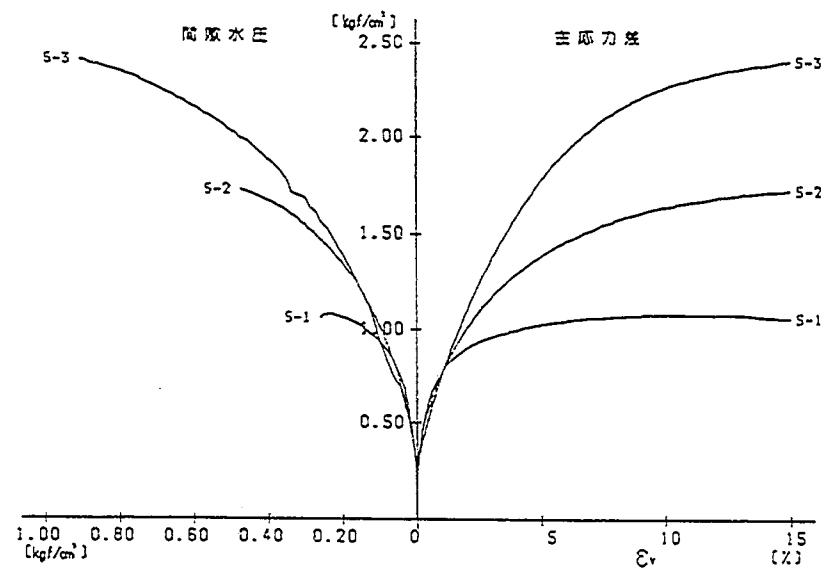
試料 No. 4
試験過程 CU'

供試体 No	側圧 σ_3 kgf/cm ²	最大主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²	間隙水圧 u_f kgf/cm ²	密度 ρ g/cm ³
4-1	0.50	1.039	0.184	1.629
4-2	1.00	1.477	0.547	1.585
4-3	2.00	2.252	1.154	1.619



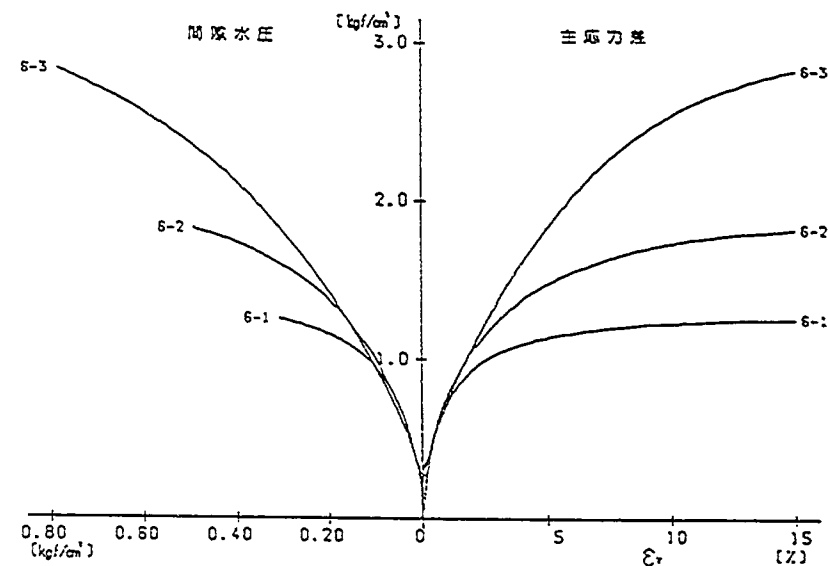
試料 No 5
試驗過程 CU'

供試體 No	側 壓 σ_3 kgf/cm ²	最大主應力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²	間 隙 水 壓 u_f kgf/cm ²	密 度 ρ g/cm ³
5-1	0.50	1.081	0.235	1.570
5-2	1.00	1.723	0.472	1.569
5-3	2.00	2.408	0.903	1.603



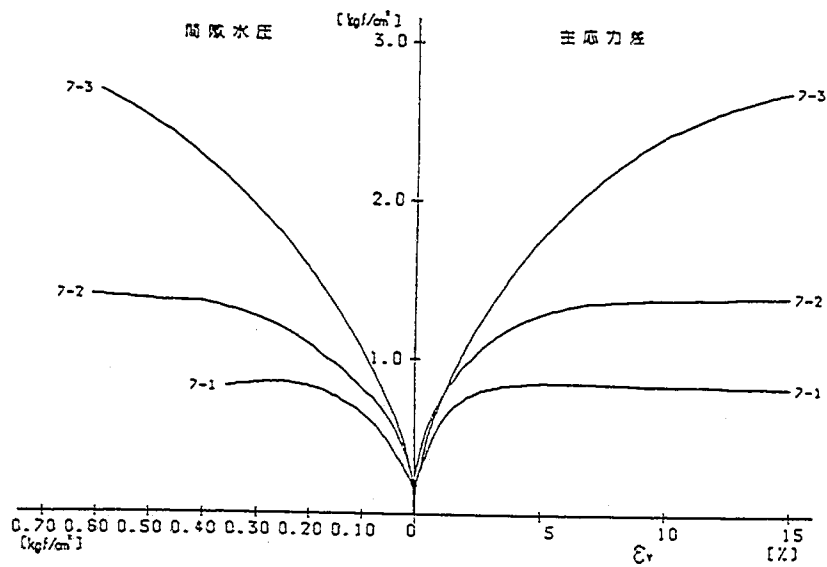
試料 No 6
試驗過程 CU'

供試體 No	側 壓 σ_3 kgf/cm ²	最大主應力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²	間 隙 水 壓 u_f kgf/cm ²	密 度 ρ g/cm ³
6-1	0.50	1.262	0.306	1.579
6-2	1.00	1.826	0.490	1.582
6-3	2.00	2.820	0.784	1.547



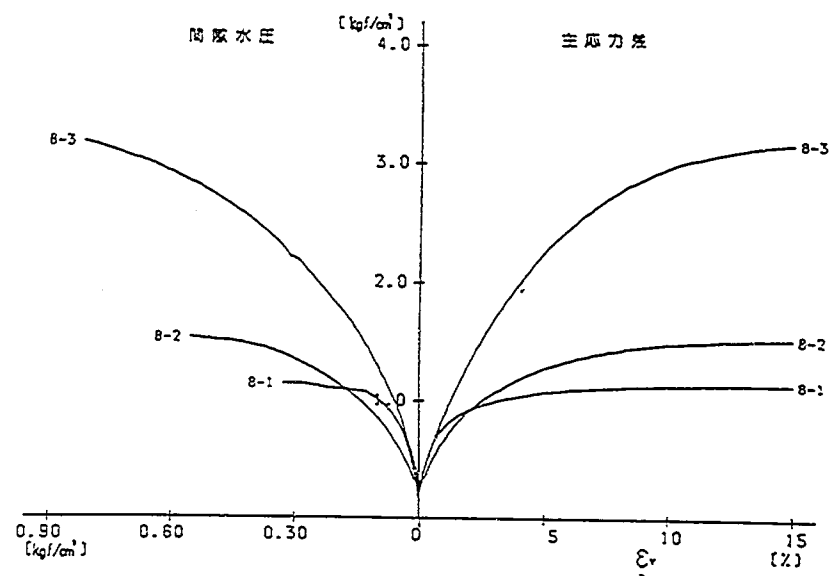
試料 No. 7
試験過程 CU'

供試体 No	側圧 σ_3 kgf/cm ²	最大主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²	間隙水圧 u_f kgf/cm ²	密度 ρ g/cm ³
7-1	0.50	0.857	0.248	1.617
7-2	1.00	1.391	0.604	1.608
7-3	2.00	2.686	0.591	1.548



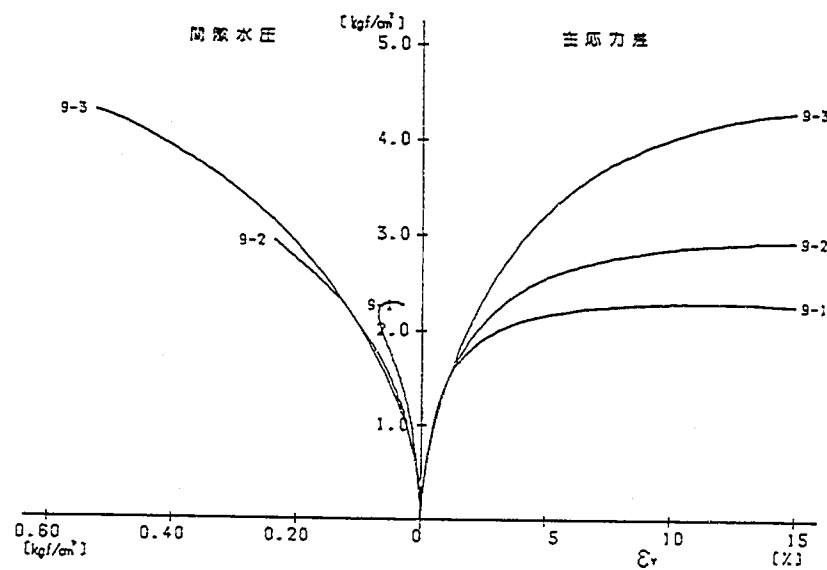
試料 No. 8
試験過程 CU'

供試体 No	側圧 σ_3 kgf/cm ²	最大主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²	間隙水圧 u_f kgf/cm ²	密度 ρ g/cm ³
8-1	0.50	1.158	0.322	1.584
8-2	1.00	1.537	0.550	1.582
8-3	2.00	3.172	0.807	1.569



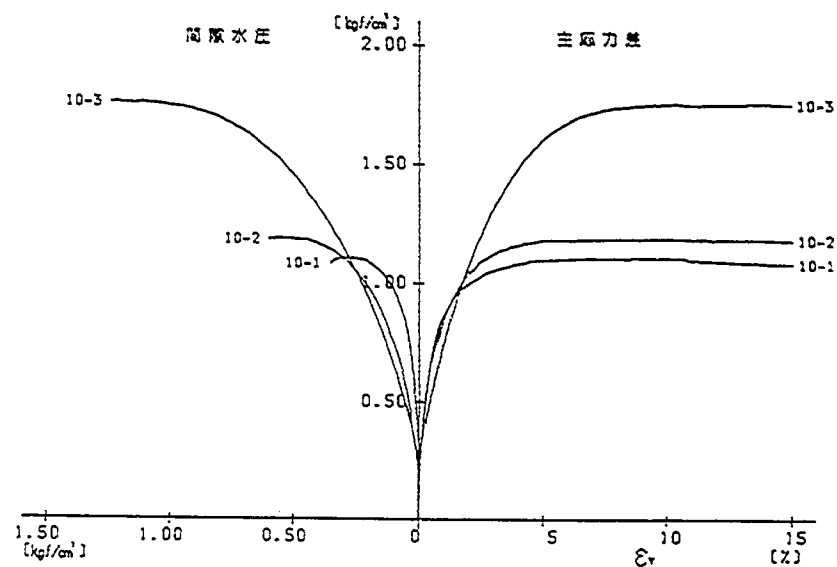
試料 No 9
試驗過程 CU'

供試体 No	側 圧 σ_3 kgf/cm ²	最大主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²	間 隙 水 圧 u_f kgf/cm ²	密 度 ρ g/cm ³
9-1	0.50	2.296	0.050	1.625
9-2	1.00	2.931	0.237	1.620
9-3	2.00	4.297	0.524	1.616



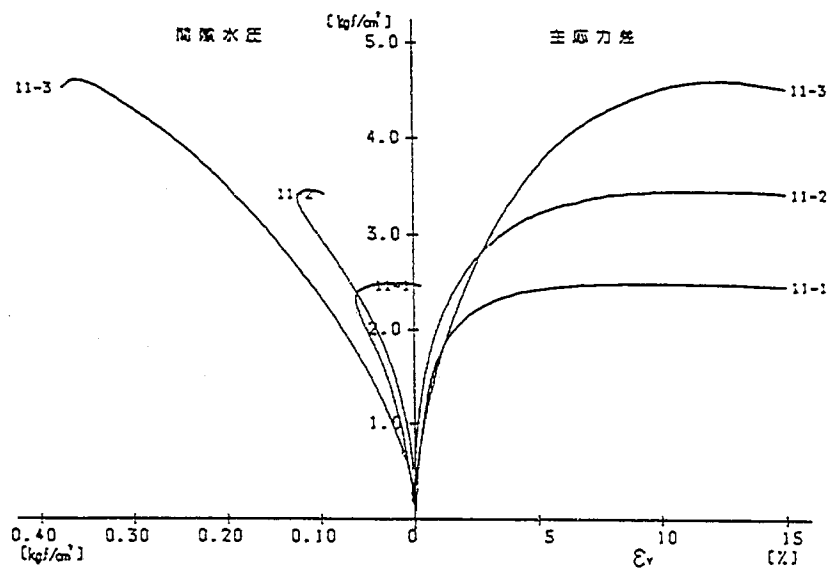
試料 No 10
試驗過程 CU'

供試体 No	側 圧 σ_3 kgf/cm ²	最大主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²	間 隙 水 圧 u_f kgf/cm ²	密 度 ρ g/cm ³
10-1	0.50	1.110	0.264	1.600
10-2	1.00	1.192	0.573	1.638
10-3	2.00	1.760	1.228	1.629



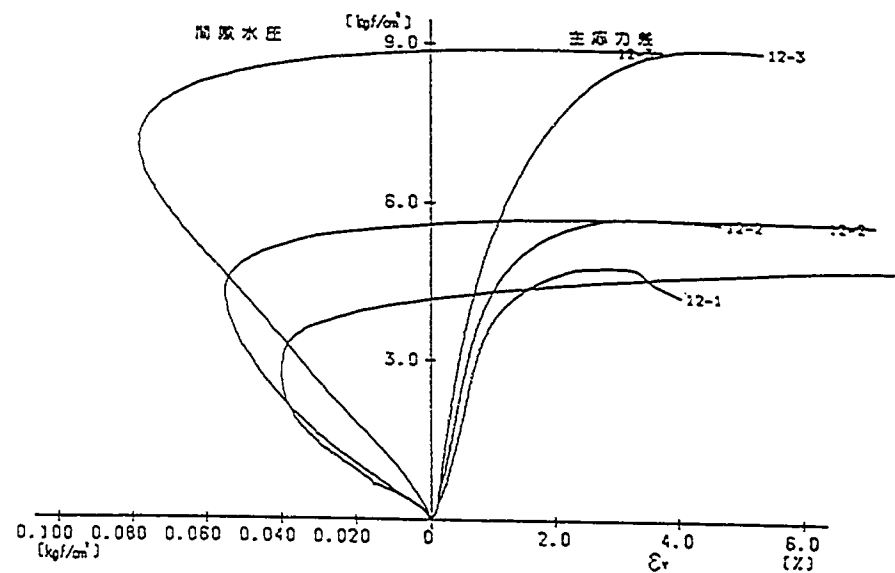
試料 No. 11
試験過程 CU'

供試体 No	側圧 σ_3 kgf/cm ²	最大主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²	間隙水圧 u_f kgf/cm ²	密度 ρ g/cm ³
11-1	0.50	2.500	0.028	1.650
11-2	1.00	3.455	0.113	1.625
11-3	2.00	4.605	0.360	1.615



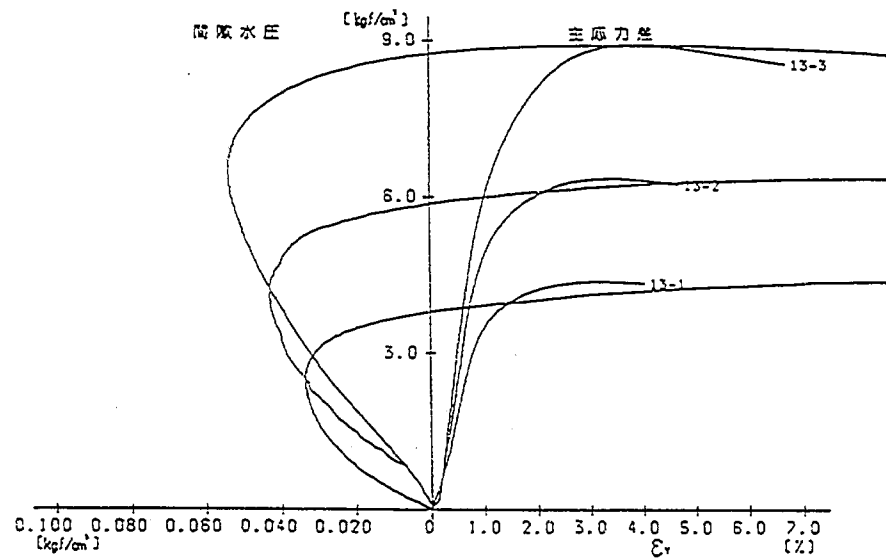
試料 No. 12
試験過程 CU'

供試体 No	側圧 σ_3 kgf/cm ²	最大主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²	間隙水圧 u_f kgf/cm ²	密度 ρ g/cm ³
12-1	0.50	4.798	-0.152	1.844
12-2	1.00	5.705	-0.044	1.833
12-3	2.00	8.892	-0.023	1.828



試料 No. 13
試験過程 CU'

供試体 No	側圧 σ_3 kgf/cm ²	最大主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²	間隙水圧 u_f kgf/cm ²	密度 ρ g/cm ³
13-1	0.50	4.384	-0.118	1.795
13-2	1.00	6.347	-0.122	1.815
13-3	2.00	8.908	-0.043	1.808



三軸圧縮試験 CU 強度定数の決定

CU試験結果より強度定数の求め方は、有効応力法とモール円法（4通り）の整理方法がある。今回は、5通りの方法よりそれぞれ得られた数値を用いて最小二乗法により強度定数を決定した。

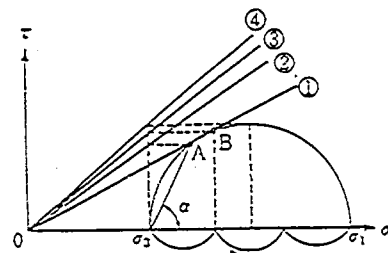
有効応力法： 側圧（ σ_3 ）に対する最大主応力差（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ）と、そのときの間隙水圧（ u_f ）を用いて下記の計算式より求めた。

$$X_{\text{軸}} = [(\sigma_3 - u_f) \cdot 2 + (\sigma_1 - \sigma_3)] \div 2$$

$$Y_{\text{軸}} = (\sigma_1 - \sigma_3) \div 2$$

モール円法： 土質工学会 土質試験法 第4章三軸圧縮試験 4.3.7(3)参照

- ① 法 モール円の包絡線を引く。
- ② 法 モール円上のすべり面を表す点を、圧密応力 σ_3 の真上に持ってきて、これを連ねた線を引く。
- ③ 法 モール円の直径（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ）max を3等分し、頂点に近い3等分点の真上の点Bを σ_3 の真上に持ってきて、これを連ねて線を引く。
- ④ 法 モール円の頂点の縦距、すなわち $u_f/2$ を σ_3 の上にとり、これを連ねて線を引く。



CU試験結果の4通りの整理方法

調査孔： No. 1 サンプル位置： 左岸自然斜面 25 cm 深

供 試 体 No		1	2	3	強度定数			
側 圧 σ_3 , kgf/cm ²		0.50	1.00	2.00				
主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$, kgf/cm ²		1.395	1.468	2.584	C	ϕ	勾 配	
間隙水圧 u_f , kgf/cm ²		0.328	0.624	0.856	kgf/cm ²	度		
整 理 方 法	有効応力法	X 軸	0.870	1.110	2.436	0.329	21.5	0.394
		Y 軸	0.698	0.734	1.292			
	モール円法	①				0.28	17.8	0.322
		②	0.55	0.68	1.16	0.310	22.6	0.417
		③	0.64	0.69	1.20	0.385	21.4	0.393
		④	0.698	0.734	1.292	0.419	22.7	0.419

調査孔： No. 2 サンプル位置： 左岸自然斜面 35 cm 深

供 試 体		No	1	2	3	強 度 定 数		
側 圧 σ_3		kgf/cm ²	0.50	1.00	2.00			
主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$		kgf/cm ²	1.079	1.714	2.520	C	ϕ	勾 配
間隙水圧 u_f		kgf/cm ²	0.284	0.565	0.992	kgf/cm ²	度	
整 理 方 法	有効応力法	X 軸	0.755	1.292	2.256	0.212	25.1	0.468
		Y 軸	0.540	0.857	1.260			
	モール円法	①				0.200	18.0	0.341
		②	0.43	0.74	1.14	0.230	24.0	0.463
		③	0.50	0.79	1.17	0.300	20.6	0.437
		④	0.540	0.857	1.260	0.336	25.1	0.468

調査孔 : No 3 サンプル位置 : 左岸自然斜面 45 cm 深

供 試 体		No	1	2	3	強 度 定 数		
側 圧 σ_v		kgf/cm ²	0.50	1.00	2.00			
主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$		kgf/cm ²	1.232	1.335	2.733	C	ϕ	勾 配
間隙水圧 u_f		kgf/cm ²	0.252	0.567	0.915	kgf/cm ²	度	
整 理 方 法	有効応力法	X 粒	0.854	1.101	2.452	0.165	26.0	0.488
		Y 粒	0.616	0.668	1.367			
	モール目法	①				0.140	21.1	0.385
		②	0.47	0.62	1.20	0.180	26.6	0.500
		③	0.56	0.63	1.26	0.245	26.1	0.490
		④	0.616	0.668	1.367	0.267	27.9	0.529

調査孔 : No 5 サンプル位置 : 左岸自然斜面 65 cm 深

供 試 体 No		1	2	3	強 度 定 数			
側 圧 σ_3 kgf/cm ²		0.50	1.00	2.00				
主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²		1.081	1.723	2.406	C	ϕ	勾 配	
間隙水圧 uf kgf/cm ²		0.235	0.472	0.903	kgf/cm ²	度		
整 理 方 法	有効応力法	X 粒	0.806	1.390	2.301	0.213	23.6	0.437
		Y 粒	0.541	0.862	1.204			
	モール目法	①				0.280	16.4	0.295
		②	0.47	0.73	1.08	0.295	21.7	0.399
		③	0.50	0.78	1.11	0.335	21.6	0.396
		④	0.541	0.862	1.204	0.370	23.2	0.428

調査孔 : No 4 サンプル位置 : 左岸自然斜面 55 cm 深

供 試 体 No		1	2	3	強 度 定 数			
側 圧 σ_v kgf/cm ²		0.50	1.00	2.00				
主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²		1.039	1.477	2.252	C	ϕ	勾 配	
間隙水圧 uf kgf/cm ²		0.184	0.547	1.154	kgf/cm ²	度		
整 理 方 法	有効応力法	X 粒	0.835	1.192	1.972	0.092	27.8	0.527
		Y 粒	0.520	0.739	1.126			
	モール目法	①				0.240	16.2	0.290
		②	0.42	0.64	1.03	0.225	22.0	0.404
		③	0.48	0.67	1.04	0.305	20.2	0.357
		④	0.520	0.739	1.126	0.327	21.6	0.402

調査孔 : No 6 サンプル位置 : 左岸自然斜面 75 cm 深

供 試 体 No		1	2	3	強 度 定 数			
側 圧 σ_v kgf/cm ²		0.50	1.00	2.00				
主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²		1.252	1.825	2.820	C	ϕ	勾 配	
間隙水圧 u_f kgf/cm ²		0.306	0.490	0.784	kgf/cm ²	度		
整 理 方 法	有効応力法	X 粒	0.825	1.423	2.625	0.286	23.3	0.431
		Y 粒	0.631	0.913	1.410			
	モール目法	①				0.240	19.6	0.360
		②	0.52	0.75	1.25	0.270	25.3	0.494
		③	0.57	0.84	1.31	0.335	25.1	0.490
		④	0.631	0.913	1.410	0.383	27.2	0.515

調査孔 : No 7 サンプル位置 : 左岸自然斜面 85 cm 深

供 試 体		No	1	2	3	強 度 定 数		
围 圧 σ_3		kgf/cm ²	0.50	1.00	2.00			
主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$		kgf/cm ²	0.857	1.391	2.686	C	ϕ	勾 配
間隙水圧 u_f		kgf/cm ²	0.246	0.604	0.591	kgf/cm ²	炭	
整 理 方 法	有効応力法	X 粒	0.681	1.092	2.752	0.179	23.1	0.427
		Y 粒	0.429	0.696	1.343			
	モール円法	①				0.080	21.9	0.402
		②	0.37	0.61	1.20	0.075	29.2	0.559
		③	0.41	0.63	1.24	0.105	29.3	0.561
		④	0.429	0.696	1.343	0.106	31.6	0.615

調査孔 : No 8 サンプル位置 : 左岸自然斜面 95 cm 深

供 試 体		No	1	2	3	強 度 定 数		
围 压 σ_3		kgf/cm ²	0.50	1.00	2.00			
主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$		kgf/cm ²	1.158	1.537	3.172	C	ϕ	勾 配
間隙水圧 u_f		kgf/cm ²	0.322	0.550	0.807	kgf/cm ²	炭	
整 理 方 法	有効応力法	X 粒	0.757	1.219	2.779	0.178	25.8	0.505
		Y 粒	0.579	0.769	1.586			
	モール円法	①				0.080	24.8	0.462
		②	0.48	0.67	1.41	0.110	32.5	0.637
		③	0.53	0.71	1.40	0.145	33.1	0.653
		④	0.579	0.769	1.586	0.171	34.7	0.692

調査孔 : No 9 サンプル位置 : 左岸自然斜面 105 cm 深

供 試 体		No	1	2	3	強 度 定 数		
围 圧 σ_3		kgf/cm ²	0.50	1.00	2.00			
主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$		kgf/cm ²	2.296	2.931	4.297	C	ϕ	勾 配
間隙水圧 u_f		kgf/cm ²	0.050	0.237	0.524	kgf/cm ²	炭	
整 理 方 法	有効応力法	X 粒	1.598	2.229	3.625	0.363	25.2	0.492
		Y 粒	1.148	1.466	2.149			
	モール円法	①				0.440	22.7	0.418
		②	0.23	1.17	1.80	0.515	32.8	0.644
		③	1.07	1.35	2.00	0.745	32.0	0.624
		④	1.148	1.466	2.149	0.807	33.8	0.670

調査孔 : No 10 サンプル位置 : 左岸自然斜面 115 cm 深

供 試 体 No		1	2	3	強 度 定 数			
围 圧 σ_3 kgf/cm ²		0.50	1.00	2.00				
主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ kgf/cm ²		1.100	1.192	1.760	C	ϕ	勾 配	
間隙水圧 u_f kgf/cm ²		0.264	0.573	1.226	kgf/cm ²	炭		
整 理 方 法	有効応力法	X 粒	0.786	1.023	1.652	0.219	21.6	0.396
		Y 粒	0.550	0.596	0.880			
	モール円法	①				0.325	11.1	0.196
		②	0.47	0.54	0.82	0.330	12.5	0.240
		③	0.51	0.55	0.82	0.375	12.2	0.219
		④	0.555	0.596	0.880	0.413	12.6	0.226

調査孔 : No. 11 サンプル位置 : 左岸自然斜面 17.5 cm 深

供 試 体		No	1	2	3	強 度 定 数		
側 圧 σ_3		kgf/cm ²	0.50	1.00	2.00			
主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$		kgf/cm ²	2.500	3.455	4.605	C	ϕ	勾 配
間隙水圧 u_f		kgf/cm ²	0.028	0.113	0.360	kgf/cm ²	度	
整 理 方 法	有効応力法	X 軸	1.722	2.615	3.943	0.461	25.2	0.471
		Y 軸	1.250	1.728	2.303			
	モール円法	①				0.550	24.7	0.460
		②	0.86	1.31	1.88	0.575	33.6	0.664
		③	1.15	1.60	2.14	0.880	32.7	0.643
		④	1.250	1.728	2.303	0.963	34.4	0.684

調査孔 : No. 13 サンプル位置 : 左岸のり面凝灰質シルト岩 10~25 cm 深

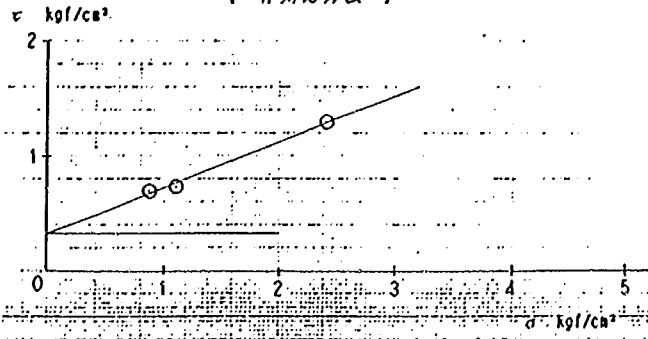
供 試 体		No	1	2	3	強 度 定 数		
側 圧 σ_3		kgf/cm ²	0.50	1.00	2.00			
主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$		kgf/cm ²	4.384	6.347	8.908	C	ϕ	勾 配
間隙水圧 u_f		kgf/cm ²	-0.118	-0.122	-0.043	kgf/cm ²	度	
整 理 方 法	有効応力法	X 軸	2.810	4.296	6.497	0.503	31.4	0.610
		Y 軸	2.192	3.174	4.454			
	モール円法	①				0.700	36.7	0.745
		②	1.20	2.09	3.12	0.685	51.2	1.244
		③	2.00	2.90	4.10	1.400	53.9	1.371
		④	2.192	3.174	4.454	1.552	55.9	1.475

調査孔 : No. 12 サンプル位置 : 左岸のり面凝灰岩 10~25 cm 深

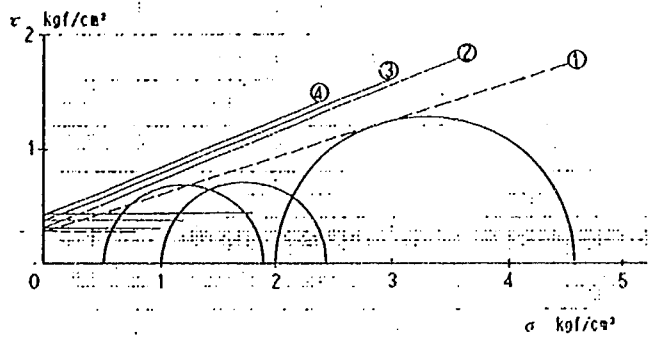
供 試 体	No	1	2	3	強 度 定 数			
側 圧 σ_3	kgf/cm ²	0.50	1.00	2.00				
主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$	kgf/cm ²	4.798	5.705	8.892	C	ϕ	勾 配	
間隙水圧 u_f	kgf/cm ²	-0.152	-0.044	-0.023	kgf/cm ²	度		
整 理 方 法	有効応力法	X 軸	3.051	3.897	5.469	0.533	31.1	0.603
		Y 軸	2.399	2.853	4.446			
	モール円法	①				0.700	36.9	0.752
		②	1.25	1.97	3.10	0.625	50.6	1.219
		③	2.21	2.62	4.10	1.470	52.2	1.291
		④	2.399	2.853	4.446	1.603	54.4	1.397

No. 1

【有効応力法】

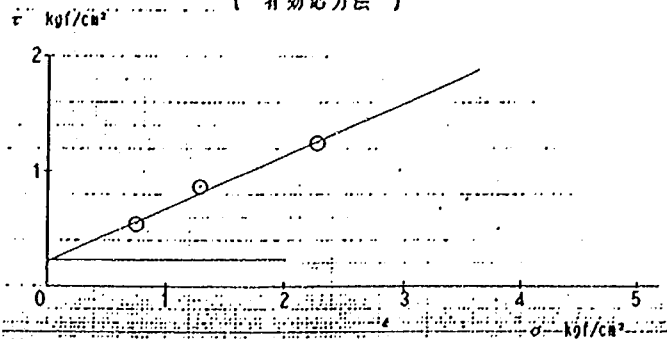


【モール円法】

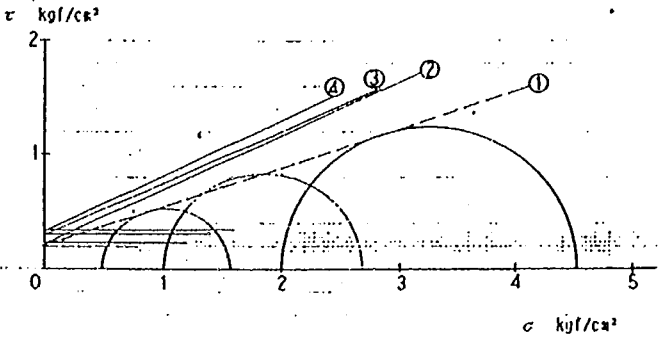


No. 2

【有効応力法】

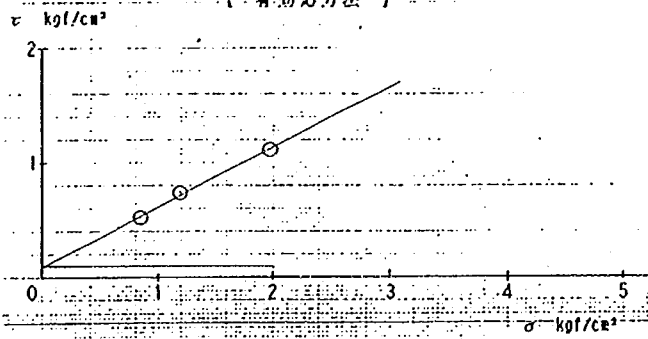


【モール円法】

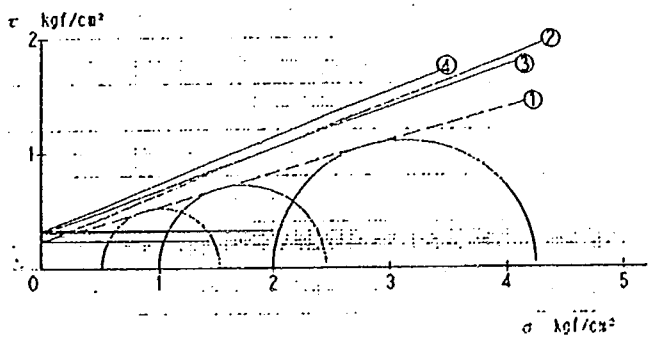


No. 4

【有効応力法】

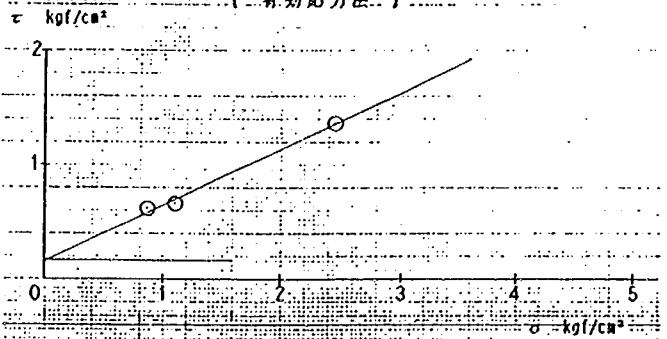


【モール円法】

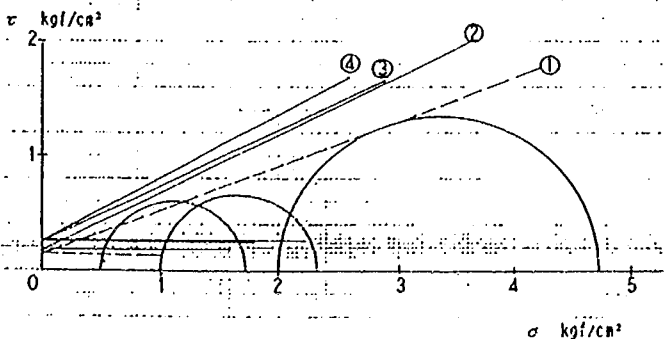


No. 3

【有効応力法】

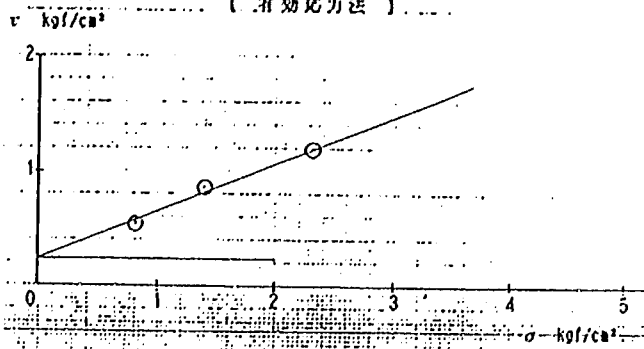


【モール円法】

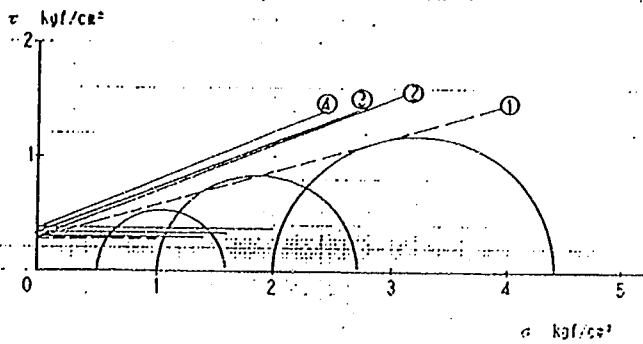


No. 5

【有効応力法】

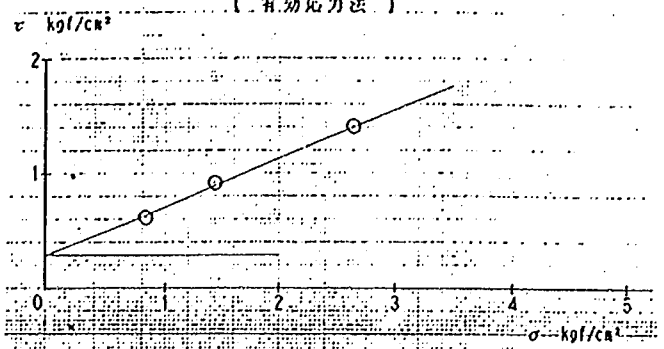


【モール円法】

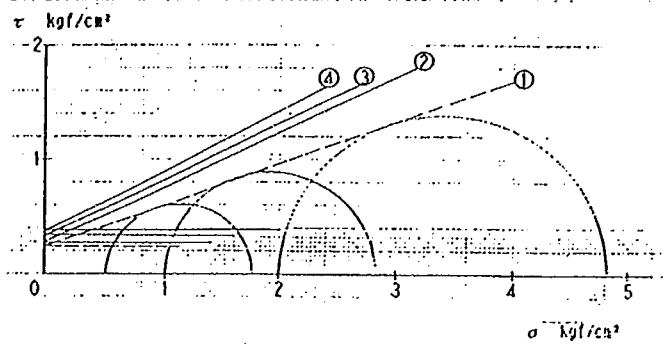


No. 6

【有効応力法】

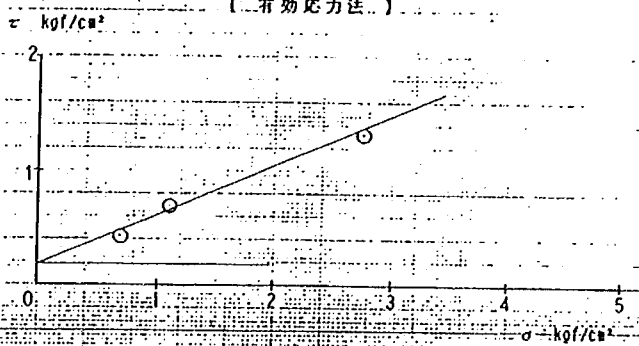


【モール円法】

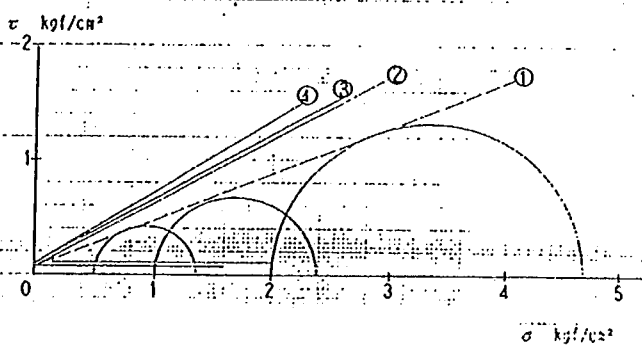


No. 7

【有効応力法】

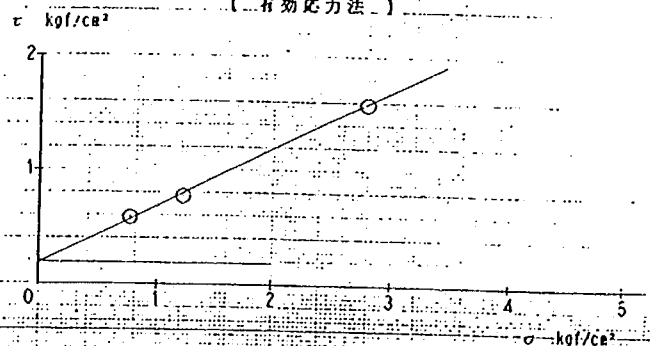


【モール円法】

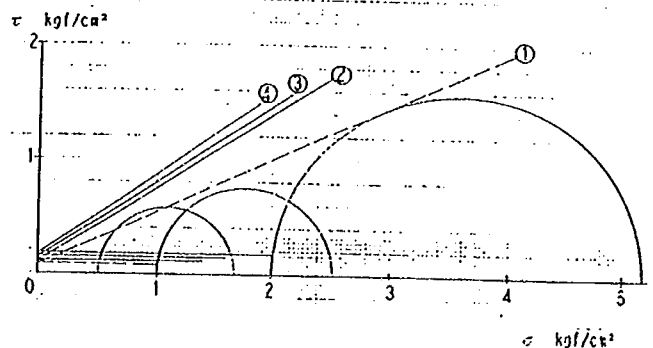


No. 8

【有効応力法】

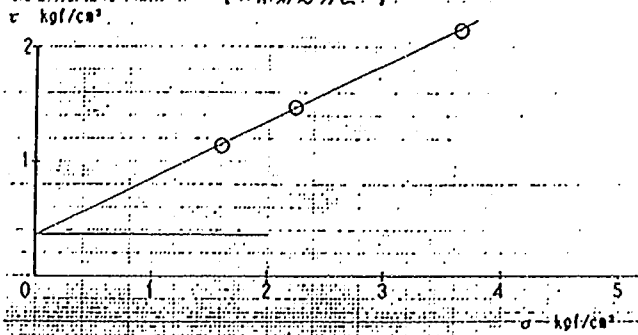


【モール円法】

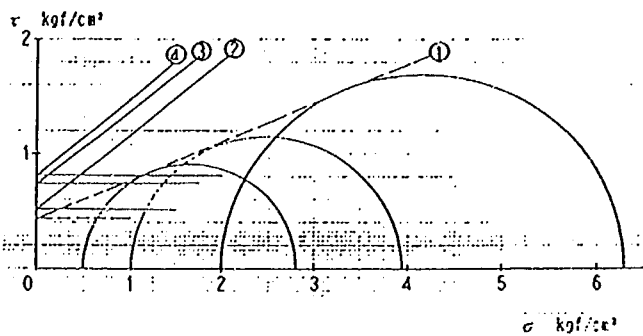


No. 9

〔有効応力法〕

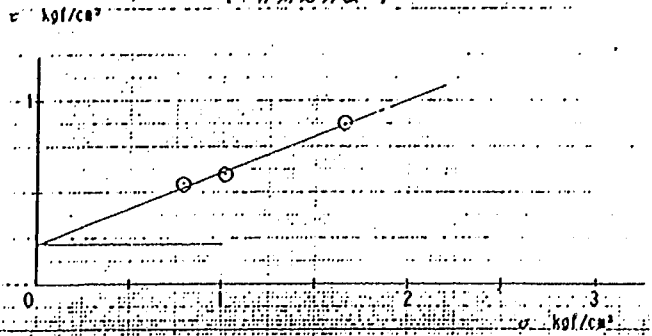


〔モール円法〕

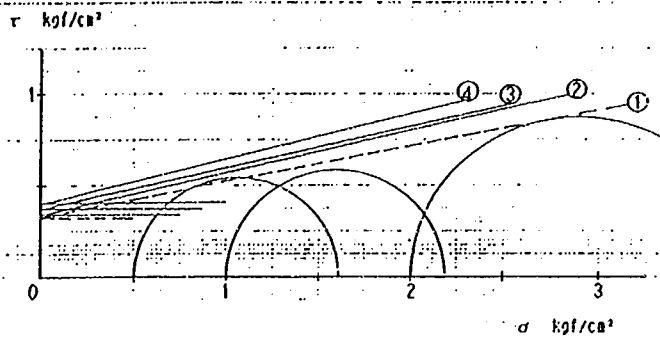


No. 10

〔有効応力法〕

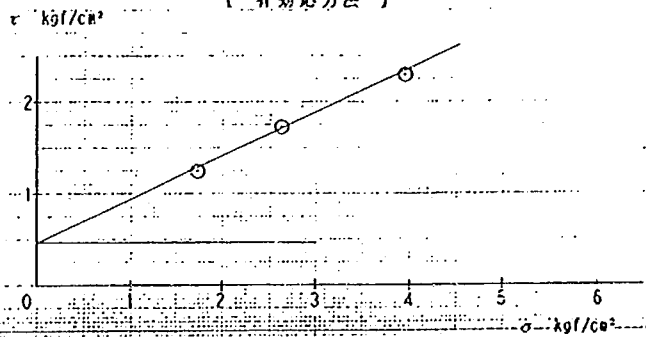


〔モール円法〕

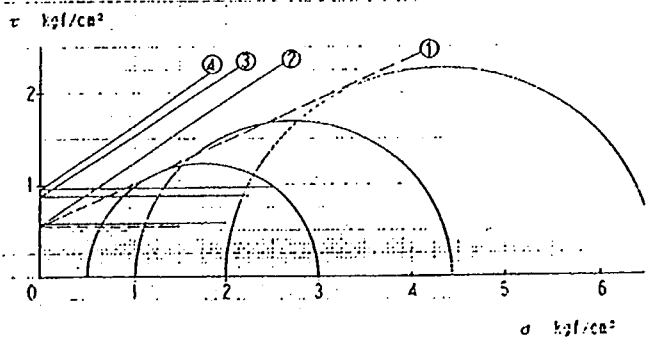


No. 11

〔有効応力法〕

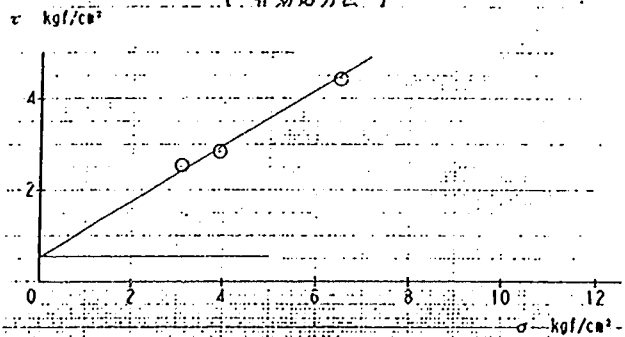


〔モール円法〕

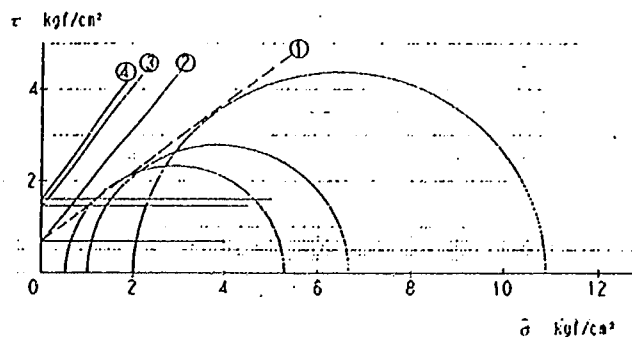


No. 12

〔有効応力法〕

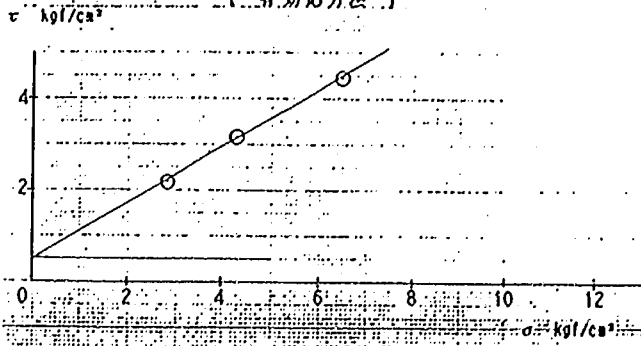


〔モール円法〕

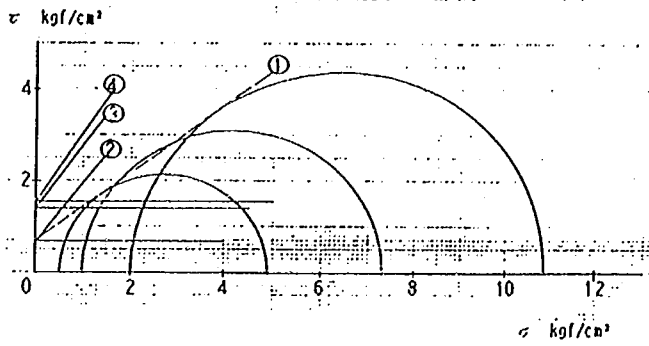


No. 13

(有効応力法)



(モール円法)



軟岩切土のり面の劣化予測

I S S N 0386-5878

土木研究所資料 第2930号

平成3年3月 (1991)

中村 康夫・平野 勇
佐々木 靖人・阿部 昌彦

要 旨

斐伊川放水路開削部に施工された新第三系中新統の軟質な細粒砂岩～シルト岩および第四系の砂礫層よりなる試験切土のり面において、風化侵食状況を観測するとともに、風化侵食の進行モデルを設定し、のり面の長期的な劣化の予測を行なった。

キーワード：軟岩・切土のり面・風化・侵食・劣化



郵便はがき

305-□□

41円切手
をはって
下さい

建設省土木研究所

地質研究室御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 001

No. 001

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第2930号 部

上記のとおり受領しました。

所 属(住所)

氏 名

印

土木研究所資料第2930号
軟岩切土のり面の劣化予測

