

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 438 Dec. 1982

X線透過試験によるサンプリングチューブ内の土の品質評価

善		功	企
松	本	一	明
石	井	一	郎

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. X線透過試験の概要	3
2.1 X線透過試験の基本原理	3
2.2 工業用X線装置	4
2.3 透過試験におけるX線線量率	4
2.4 工業用X線フィルムの特性	6
2.5 X線透過試験方法	7
3. サンプリングされた土のX線透過試験に関する従来の研究	7
4. X線透過試験の土への適用に関する検討	7
4.1 等価換算厚さ	7
4.2 クラックの識別限界	10
4.3 撮影分割数	11
5. サンプリングチューブ内の土のX線透過試験方法	13
5.1 X線装置及び撮影用資材	13
5.2 撮影方法及び配置	14
5.3 撮 影 条 件	14
6. X線透過試験結果及び考察	14
6.1 X線写真から得られる情報量と質	14
6.2 X線写真による試料の品質評価に関する考察	18
6.3 X線透過試験の定量的応用に関する試み	20
7. あ と が き	23
参 考 文 献	23
記 号 一 覧 表	24
付 録	24

Evaluation of the Disturbance of Soils in Sampling Tubes with the Radiographic Test

Kouki ZEN*
Kazuaki MATSUMOTO**
Ichiro ISHII***

Synopsis

As a test method to evaluate the disturbance of sampled soils, the study on the radiographic test has been carried out for soils in the sampling tubes. The soil conditions in the sampling tubes seem to have many patterns, which are classified into 13 patterns by X-ray photos from the radiographic test. Comparing these patterns with the causes of disturbance of samples, it is found that the radiographic test is a very useful method for the evaluation of the disturbance of soils. Moreover, as a quantitative estimation of X-ray photos, the relationships among the relative density, the unit weight and the density of the X-ray films are obtained by introducing an idea of the equivalent thickness of the sampling tube. Finally, as an example of the quantitative evaluation of the radiographic test, it is shown that the cracks in the specimens, which are found by X-ray photos and visual observation, affect the distribution of the unconfined compression strength to the depth of subsoils.

* Senior Research Engineer, Soils Division
** Chief of Soil Investigations Laboratory, Soils Division
*** Member of Soil Investigations Laboratory, Soils Division

X線透過試験によるサンプリングチューブ内の土の品質評価

善 功 企 *
松 本 一 **
石 井 一 郎 ***

要 旨

サンプリングされた土の乱れを評価する一手段として、サンプリングチューブ内の土を対象としたX線透過試験を実施し、その適用性について調べた。一般に、サンプリングチューブ内の土の状態にはいくつかのパターンがあり、本報告ではこれらをX線写真により13のパターンに分類した。次に、これらのパターンと試料の乱れの関係について考察し、サンプリングチューブ内の土の乱れをX線透過試験により判断できることを示した。また、X線透過試験の定量的応用に関する試みとして、等価換算厚さの概念を導入し、砂の相対密度及び粘土の湿潤密度と写真濃度との関係について調べた。さらに、洪積粘土についてX線写真及び目視により観察されるクラックが一軸圧縮強度に与える影響について調べ、一軸圧縮強度のバラツキの原因を明らかにすることにより、X線透過試験結果の定量的応用を試みている。

1. ま え が き

原地盤の土質特性を把握するために実施される室内試験では、原地盤から乱さない状態で採取されたいわゆる乱さない試料が用いられる。一般に乱さない試料とよばれるものは、サンプリングチューブの押込み、引抜きや試料の押出し、成形などの影響が比較的小さい試料と考えられる。実際に採取された試料の乱れを評価する方法については、これまでかなり研究がすすめられており、一軸圧縮試験や圧密試験などの室内試験結果からある程度判断できる。しかしながら、このような方法は、採取試料の室内試験が必要であり、試験結果の整理を行なった後に乱れの判定を行なうものであるから、乱れの原因のすべての影響を評価しているという点では合理的であるが、サンプリングによって生じた乱れや試料の押出し、成形による乱れなど、乱れの発生する原因ごとの評価はかなり困難である。

原地盤から採取され、サンプリングチューブ内に収納されたままの試料の状態を把握する方法として、X線透過試験がある。X線透過試験は、採取された試料をサンプリングチューブから押出すことなく、そのままの土の状態を把握するものであるから、これによって得られたX線写真には試料の押出し、成形などによる影響が全く

含まれておらず、X線写真上及びサンプリングチューブ内の土の状態と乱れの間接関係を調べることによってサンプリングの良否の評価に直接結びつけることが可能である。また、X線透過試験は、一種の非破壊試験であり、試料を痛めることなくその結果が得られるので、サンプリング後に室内試験を実施する上で、試験計画の立案などにおいて有用な情報として活用することができる。このような観点から、本報告ではサンプリングされた土の品質評価の一方法として、サンプリングチューブ内の土を試験体としたX線透過試験の適用性について報告するものである。本報告では、サンプリングチューブ内の土を対象としたX線透過試験方法、X線写真から得られる土の状態についての情報の量と質、X線写真による試料の品質評価及びX線透過試験の定量的応用に関する2～3の試みについて述べることにする。

2. X線透過試験の概要¹⁾

2.1 X線透過試験の基本原則

X線が物質の中を透過していくとき、透過の前後におけるX線の強さは異なる。X線の強さが減少する場合のX線の減弱を表わす基本式として、一般に式(2.1)が与えられている。

* 土質部 主任研究官
** 土質部 土質調査研究室長
*** 土質部 土質調査研究室

$$I = I_0 \exp(-\mu_x x) \quad (2.1)$$

ここで、 I_0 , I は X 線の透過前後の強さ、 x は物体の厚さ、 μ_x は減弱係数、または、吸収係数とよばれる比例定数である。ただし、単色 X 線では μ_x は一定であるが、現実に利用する白色 X 線では μ_x は物体の厚さ x に逆比例し、 x が大きくなる程小さくなる特性をもっている。式 (2.1) によれば、X 線が物体を透過するとき、物体内に空隙が存在すると、その分だけ X 線の減弱が少なくなり、透過後の X 線の強さは空隙のない部分に比較して大きくなる。図-2.1 は厚さ Δx の空隙をもつ厚さ x

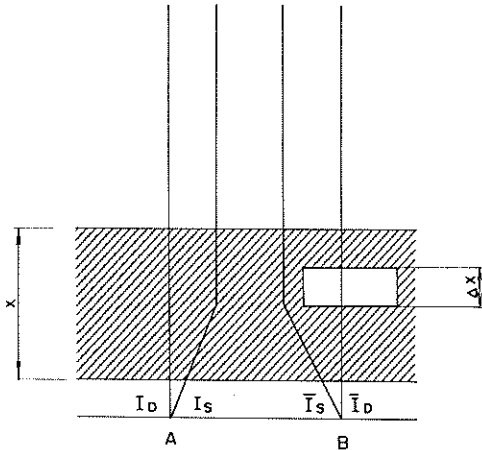


図-2.1 空隙のある物質の透過 X 線

の板の垂直上方から X 線を照射した場合の A, B 点における X 線の強さ I_A , I_B を示したものである。 I_A , I_B はそれぞれ式 (2.2), 式 (2.3) で与えられる。

$$I_A = I_D + I_S = (1 + I_S/I_D) I_D = C I_D \quad (2.2)$$

$$I_B = \bar{I}_D + \bar{I}_S = I_D + \Delta I_D + I_S = C I_D + \Delta I_D \quad (2.3)$$

ここで、 I_D , \bar{I}_D は透過 X 線の強さ、 I_S , \bar{I}_S は板の中で散乱してそれぞれ A, B 点に集まる 2 次 X 線であり、 $I_S \Rightarrow \bar{I}_S$ と考えてよい。また、板内の空隙のため $\bar{I}_D > I_D$ であり $\bar{I}_D = I_D + \Delta I_D$ における。C は再生係数とよばれ、 $C = 1 + I_S/I_D$ で表わされる 2 次 X 線の影響程度を表わす量である。A, B 点に到達する X 線の強さの差は上式から ΔI_D で表わされるが、この値を I_A で除した値 k は被写体コントラストとよばれ、式 (2.4) で与えられる。

$$k = \Delta I_D / I_A = \Delta I_D / C \cdot I_D \quad (2.4)$$

さらに、式 (2.1) と式 (2.4) の関係から、被写体コントラスト k は、

$$k = \mu_x \cdot \Delta x / C \quad (2.5)$$

のように表わされる。 k は小さな空隙の見つけやすさを表わす量で、同じ x の場合には、 μ_x を大きくするか、もしくは、C を小さくすることにより k を大きくすることが可能であり、空隙の検出感度が上がることになる。実用上は、C を小さくするために入射 X 線をしぼることにより不必要な部分に X 線を照射させないようにしたり、鉛箔増感紙により 2 次 X 線を吸収するような方法がとられている。また、 μ_x を大きくするためには、実効エネルギーの低い X 線を利用すればよい。出来上がった X 線写真のコントラストは、上述の被写体コントラストと後述のフィルムコントラストの積として表わされる。

2.2 工業用 X 線装置

高速度の電子が物体に衝突すると電子の運動エネルギーの一部が変換され物体から X 線が発生する。X 線管は陰極と陽極をガラス管球に封入した一種の真空管で、陰極から放射された電子をこの中で加速し陽極のターゲットに衝突させることにより X 線を生じさせるものである。電子の加速方式にはいくつかの方法があるが、工業用 X 線装置に用いられている方法は、変圧器で高電圧をつくり、これを陰極と陽極の間に加えて電子を加速する方法である。現状ではこの方式により X 線管電圧 470kVp までの装置が製造されているようである。

工業用 X 線装置は、X 線管、X 線管容器、高電圧発生器、X 線管回路、ケーブル、制御器、X 線管冷却器、付属器から構成されている。X 線装置の構造については、日本工業規格をはじめ、いくつかの規格が設けられている。透過試験条件など決める際に用いられる管電圧の誤差については、工業用携帯式 X 線装置 (JIS Z 4606) では $\pm 10\%$ 以内、工業用据置式 X 線装置 (JIS Z 4607) では $\pm 7\%$ 以内となっている。したがって、管電圧 200kVp で使用した場合、前者では ± 20 kVp、後者では ± 14 kVp の誤差が生じる可能性もあることを考慮しておかなければならない。

2.3 透過試験における X 線線量率

X 線を物体に照射した場合、透過試験に必要なのは透過 X 線の一部であり、それ以外は有害 X 線となる。透過試験における X 線としては図-2.2 に示すように、照射線、透過線、前方散乱線、後方散乱線および漏洩線がある。これらは使用する X 線装置、管電圧、管電流のほか物体

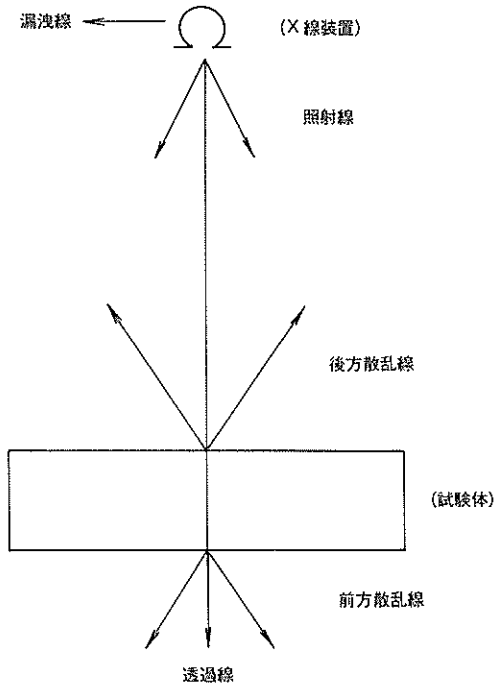


図-2.2 透過試験中のX線

の種類、厚さや照射されたX線の拡がりなどによっても異なる。

照射線量率は照射線の適当な単位時間当りのレントゲン量で表わされるが、この値は管電圧、管電流の増大にともなって大きくなる。しかしながら、管電圧、管電流が一定であっても照射線量率はX線装置によって異なる。図-2.3は、管電流1mA 当りの照射線量率を示したものであるが、同一管電圧でも装置によって照射線量率が大きく異なることが明らかである。

透過線量率は物体を透過したX線の単位時間当りのレントゲン量で表わされる。物体として鋼板を考えると、透過線量率は同一の鋼板厚に対して管電圧が大きくなると増大する。また、図-2.4に示すように、同一管電圧、管電流でも、X線装置が異なると必ずしも同じ値にはならない。これは管電圧が同じでも電圧波形の相違やX線管容器構造にともなう自己吸収体の材質・密度・厚さの違いなどによるものである。また、2.2で述べたように同じ型のX線装置でも、管電圧、管電流の測定にともなう誤差が存在することから、透過線量率は必ずしも同じ値になるとは限らない。表-2.1は透過線量率が1m離れた位置で100mR/min になる物体の厚さと鋼板を基準とした場合の板厚比を示している。表-2.1から明ら

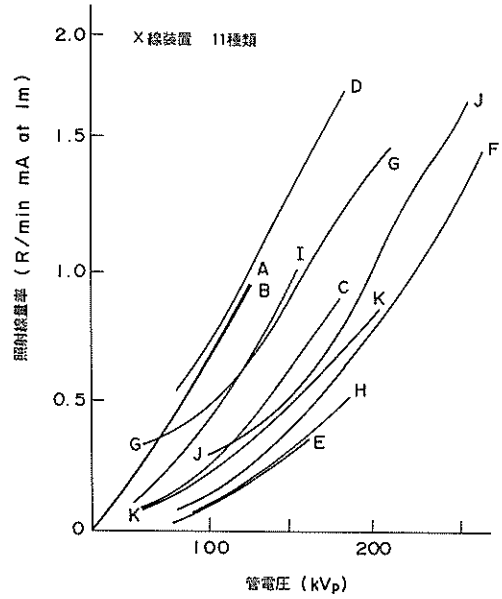


図-2.3 管電圧の照射線量率

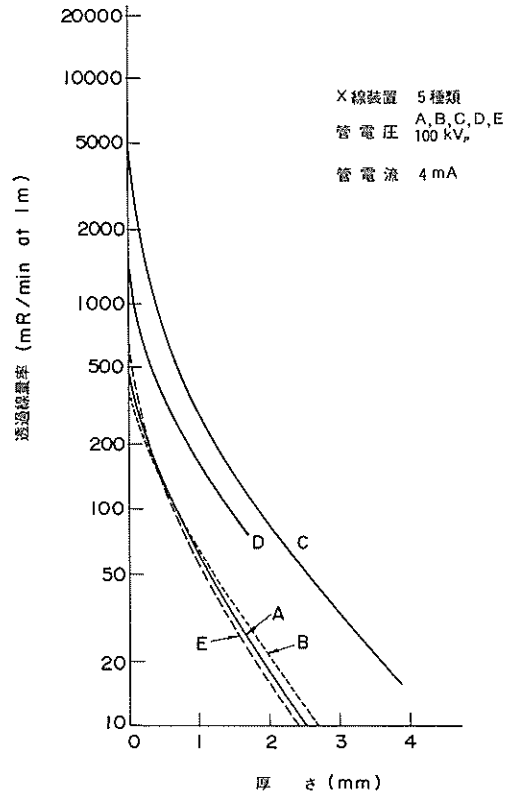


図-2.4 透過線量率と物体の厚さ

表-2.1 管電圧と板厚比の関係

管電圧 (kVp)	100		150		200		250	
	板厚 (mm)	板厚比	板厚 (mm)	板厚比	板厚 (mm)	板厚比	板厚 (mm)	板厚比
銅板	1.0	1.0	3.8	1.0	9.8	1.0	16	1.0
鉛板	0.6	0.6	2.8	0.7	6.8	0.7	13	0.8
鉛板	0.2	0.2	0.5	0.13	0.9	0.09	15	0.09
アルミニウム板	13	13	33	8.7	52	5.3	70	4.4

かなように、透過線量が等しくなるために必要な、材質の異なる物体の厚さの比は管電圧が異なれば変化する。

前方散乱線量は管電圧に比例し、銅板厚さに反比例する。また、方向依存性が大きく、散乱角が増加するにしたがって減少する傾向にある。

後方散乱線量は管電圧に比例し、銅板厚さが厚い場合には厚さに無関係であるが、薄い場合には厚さに比例する。しかし、X線透過試験に供するような物体の厚さでは厚さに無関係と考えられる。また、散乱角の増加にともなって増加するが、X線装置の影になる位置になると当然後方散乱線量は小さくなる。

2.4 工業用X線フィルムの特性

(1) 写真濃度

X線透過試験の結果得られるX線写真の画像の良否を判定する1つの方法として、画像の黒さの度合いを示す写真濃度（以後単に濃度とする）が使用される。濃度には透過濃度と反射濃度があるが、工業用X線フィルムの場合には透過濃度が用いられている。

濃度Dは光源から入射した光の強さ I_0 とフィルムを透過してきた光の強さ I により次式で定義される。

$$D = \log_{10} (I_0 / I) \quad (2.6)$$

すなわち、入射光の強さに対して、透過光の強さが $1/10$ になるようなフィルムの濃度は1である。

(2) 特性曲線

X線フィルムの特性を把握するための特性曲線は、フィルムに照射したX線量と現像処理後のフィルムの濃度により表わされる。実際にはX線の強さの絶対値を測定することには困難がともなうので、X線フィルムに照射した線量の相対値（比露出量）の対数が用いられている。図-2.5に示す特性曲線はフィルムの種類、X線の種類、増感紙の有無・種類、現像条件などによって形状が異なるが、この曲線から感度、平均階調、かぶりなどを判断することが可能である。

感度は特性曲線から求まる、ある一定濃度を得るための比露出量の逆数で表わされる相対量で、感度が高いと

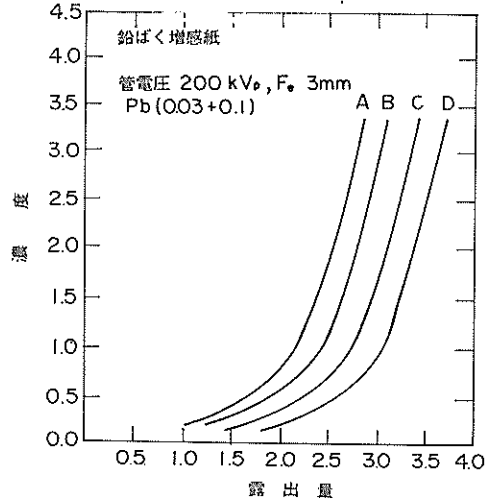


図-2.5 特性曲線

小さな露出量で同じ濃度が得られる。平均階調は図-2.6に示されるように、画像のコントラストに支配的な領域

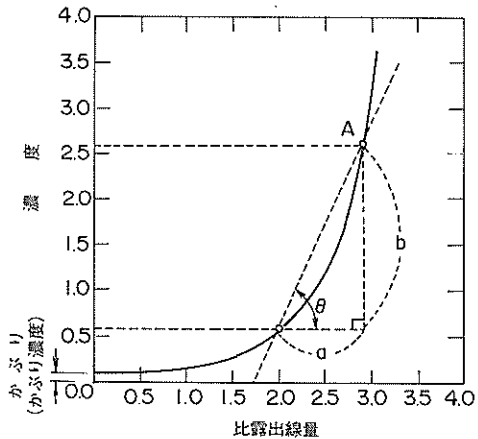


図-2.6 平均階調

における曲線の傾き b/a で表わされる。かぶりはX線照射などをうけない場合の画像の濃度で、画像にとっては有害であることからできるだけ少ない方がよいといわれている。

(3) X線写真の質

X線写真の出来具合の良否を判断するための要因として、コントラスト、鮮鋭度、濃度レベルがあげられる。コントラストは1枚の画像の中での最高濃度と最低濃度

の差を表わし、鮮鋭度は画像の境界の明確さ、微細像の描写能力を表わす尺度である。また、濃度レベルは画像の見やすさ、明るさを表わす。これらの要因はフィルム特性、撮影条件、現像条件などにより異なり、用途により最適なフィルムが選ばれているようである。

2.5 X線透過試験方法

X線が物体を透過するとき、物体を透過するX線の強さが物質の種類と厚さにより異なることを利用して、外部からは検出できない欠陥や、内部の構造を調べようとするものである。透過試験法としては、直接撮影法と蛍光増倍管（イメージ・インテンシファイヤー）を用いる方法があるが、最も一般的に使用されているのは前者である。これらの方法は、鋼溶接部などの非破壊検査法の一つとしてすでに日本工業規格などに規格化されている。たとえば、鋼溶接部の放射線透過試験方法および透過写真の等級分類方法（JIS Z 3104）では、1.総則、2.透過写真の撮影方法、3.透過写真の等級分類方法、4.記録の4項にわたって細かい規定がなされている。これらの項目の中で、2.透過写真の撮影方法について抜粋したものを付録に示す。この中で、透過写真の像質が普通級と特級に分けられているが、特級については、撮影作業効率の低下をとまなうことから原子炉用压力容器など、極めて重要な構造物に限定されている。透過度計および階調計の使用については、確認できる透過度計の最小の線径にはかなりの個人誤差が生じることから、透過度計識別度を求める際には階調計による試験部写真濃度が規定されている。階調計では濃度差により像質が示されるので個人差がなくなるものの他に、撮影条件の決定および撮影作業の管理に便利であるといわれる。撮影配置において、線源と透過度計間の距離 L_1 が透過度計とフィルム間距離 L_2 の m 倍（線源寸法の2.5又は5倍）以上と規定されている理由は、線源の法（のり）による幾何学的なぼけが大きくなるようにするためである。線源と透過度計間距離 L_1 が試験部の有効長 L_3 の n 倍（線源寸法の2又は3倍）以上と規定されているのは、放射線の広がりによるフィルム上の放射線の強さの変化が大きくなるようにするためと、ひびわれのような欠陥に照射される放射線の方向性によって検出程度が中央と端で大きく異なるようにするためである。サンプリングチューブ内の土の透過試験では、必ずしも上記の方法がそのまま適用できない点もあり、その方法については、4.および5.で述べることにする。

3. サンプリングされた土のX線透過試験に関する従来の研究

サンプリングチューブ内の土を対象にしてX線透過試験を行った結果が比較的近年になっていくつか報告されている。Allenら²⁾はX線装置によるサンプリングチューブの立体写真を撮り、写真の状況から試料の状態評価を試みている。Schjetneら³⁾はパーカッション式ワイヤーラインサンプリングにより北海で採取された39サンプル（プラスチックカートンの上から1~2cmパラフィンシールされたもの）のX線透過試験を行い、これから得られるX線写真の観察から45%の乱れのない試料と30%の乱れのある試料を選別している。Marcuson他⁴⁾は固定ピストン式サンプラーにより採取された沖積砂の濃度差から品質の評価を行い、高品質のサンプルはサンプル端に向かって濃度差の層状が平らになっており、低品質のサンプルは層状が曲がっていることにより判断されるとしている。また、できれば、X線透過試験をルーチンワークとして実施すべきだと述べている。Horn⁵⁾はニューヨーク交通局土質部でX線透過試験が日常業務として採用されていると報告している。著者の1人は1971年に軟X線装置を用いて、押出した試料内部の状態を把握する試みを行っている。阪上他⁶⁾はAllenらと同じようにサンプリングチューブのまま撮影した土のX線透過試験の結果から試料の品質評価を試みている。

以上のような土のX線透過試験が行われたのは比較的最近のことであるが、これらに共通していることはX線写真上に表われる濃度差から試料の状態を観察し判断していることである。X線透過試験の利点は目視により観察できない部分も見ることが可能であることや、X線写真の状態から試料の乱れを判断できること、また、採取試料の有効な使用計画がたてられることなどがあげられている。

4. X線透過試験の土への適用に関する検討

4.1 等価換算厚さ

X線透過試験ではフィルム上に表われた画像をもとに試験の結果が解析されるが、画像の良否を決める重要な要因の1つに濃度がある。

X線透過試験では同一の試験体を対象に、撮影条件、現像条件などを一定にして試験を行っても、常に同じX線写真の濃度を得ることが困難であることはすでに2章で述べた通りである。したがって、何らかの方法で濃度を補正する手段が必要であるが、ここでは材質・寸法の既知な校正用の鉄製の基準片を試験体と一緒に撮影することによって、試験体部の濃度を基準片の厚さ（等価換算厚さ）に換算することにし、その精度などについて検討する。試験体として検討に用いたサンプリングチュー

ブ及びそのなかの試料の特性を表-4.1に示す。

(1) 基準片の寸法

等価換算厚さを求めるためには、厚さの基準となる基準片が必要である。一般に、濃度の管理には付録の図-4に示される階調計が用いられている。これは一辺の長さが15mmであるが、この他に大型の基準片として図-4.1に示す一辺が40mmのものを用いて検討を行う。撮影配置及び撮影条件は図-4.2に示される通りである。図-4.3は階調計F₀I型、F₀II型及び大型の基準片の斜線部の濃度を読み取った結果である。図-4.4はシムを含めた合計厚さが10mmとなる場合の濃度差をF₀II型階調計及び大型の基準片について示したものである。濃度の測定はさくら製濃度計PDA-81を用いて読み取りを行っている。図-4.3、図-4.4から明らかなように、濃度の読み取り位置が中央からずれることにより読み取り値が変動している。さらに、変動量は大型の基準片にく

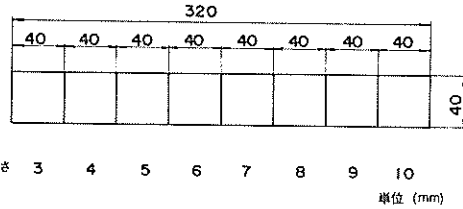


図-4.1 大型の基準片

らべて、F₀I型及びF₀II型階調計を用いて濃度測定を行った場合が大きく、測定位置のズレによって読み取り値の個人誤差が大きくなる可能性があることを示している。したがって、等価換算厚さを求める場合には、大型の基準片を用いる方が望ましく、小型の階調計を用いる場合は、読み取り位置を明確にしておく必要がある。

(2) 等価換算厚さに与える照射時間・現像処理の影響

表-4.1 試験体の特性

			大阪湾 56-13			大阪湾 56-9				
試験試料	試料番号		No.	D-6	D-8	D-10	T-1	T-41	T-50	T-51
		深さ	C.D.L (mより)	(mより)	-57.00	-63.00	-67.00	-19.50	-65.00	-76.80
		C.D.L (mまで)	(mまで)	-57.80	-63.80	-67.80	-20.48	-65.99	-77.79	-78.79
		平均位置	(m)	-57.40	-63.40	-67.40	-20.99	-65.50	-77.30	-78.30
自然状態	自然含水比	w_n (%)		51.4	83.6	77.8		43.3		
	湿潤密度	ρ_t (g/cm ³)		1.72	1.51	1.54		1.79		
	間隙比	e		1.40	2.25	2.07		1.11		
	飽和度	S_r (%)		100.0	99.5	100.0		100.0		
	乾燥密度	ρ_d (g/cm ³)		1.14	0.82	0.87		1.25		
	土粒子の比重	G_s		2.733	2.673	2.657		2.634		
特異性 コンシステンシー	液性限界	w_L (%)		66.7	111.2	98.9		67.7		
	塑性限界	w_p (%)		24.6	38.7	35.2		23.8		
	塑性指数	I_p		42.1	72.5	63.7		43.9		
	液性指数	I_L		0.636	0.619	0.668		0.203		
	コンシステンシー指数	I_c		0.363	0.380	0.331		0.797		
粒度組成	レキ(2000 μ 以上)	Gravel (%)		0	0	0		0		
	砂(74~2000 μ)	Sand (%)		1	9	1		40.6		
	シルト(5~74 μ)	Silt (%)		52	39	50		26.4		
	粘土(5 μ 以下)	Clay (%)		47	52	49		33.0		
分類	三角座標分類法	土質分類名		シルト質粘土	粘土	シルト質粘土		砂質粘土		
	統一土質分類法			CH	CH	CH		CH		
サンプリングチューブ	外径(mm)			78	78	78	94	89.1	89.1	89.1
	肉厚(mm)			1.8	1.8	1.8	2.0	4.0	4.0	4.0
	材質			ステンレススチール			ステンレススチール			

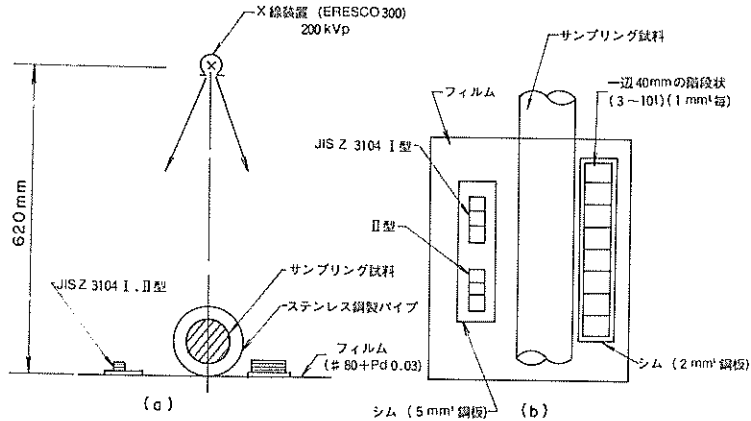


図-4.2 撮影配置および撮影条件

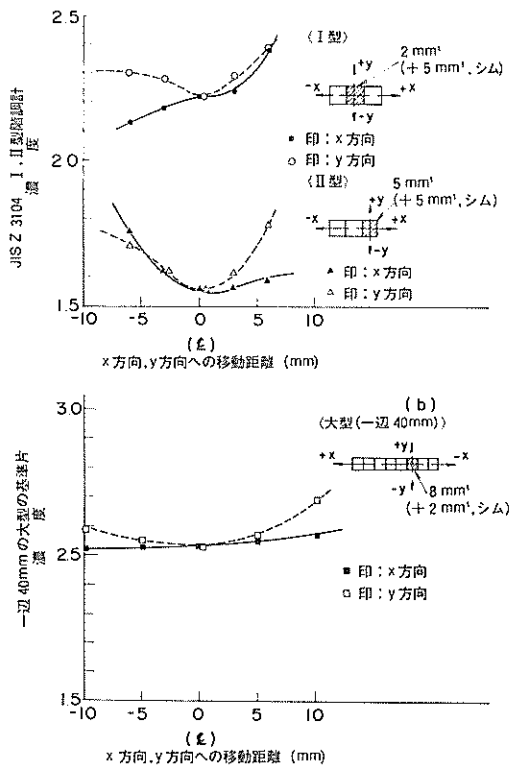


図-4.3 階調計と大型基準片の濃度分布

試験体の等価換算厚さは濃度を仲介として求められる。すなわち、基準片と同じ厚さをもつ試験体部は、基準片と同じ厚さとする考え方である。しかしながら、X線写真の濃度は、X線装置や管電圧が同じでも照射時間や現像処理条件などにより異なるので、これらの違いが等価

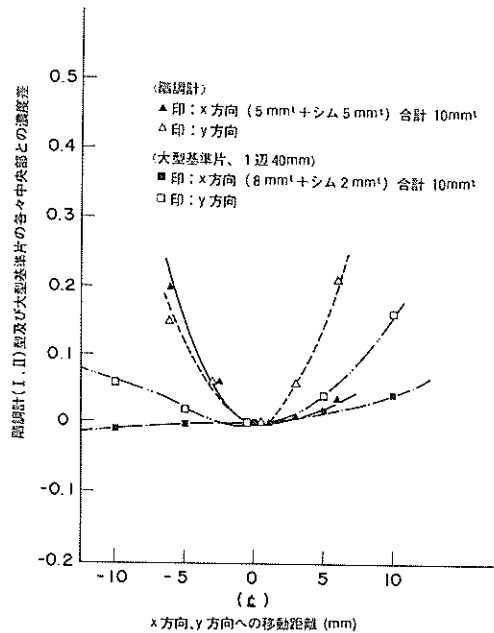


図-4.4 濃度差の分布

換算厚さに及ぼす影響について調べておく必要がある。そのために撮影配置及び撮影条件を図-4.2と同様にして、管電圧200kVpの条件のもとで、照射時間を3段階に変えて試験を行ってみた。用いられた試験体は表-4.1に示したD-6で、サンプリングチューブ内の土はシルト質の洪積粘土である。濃度測定は、大型の基準片では同一厚さの中央部で、試験体についてはサンプリングチューブの中央において行われている。図-4.5及び表-4.2に得られた結果が示されている。図-4.5から、ど

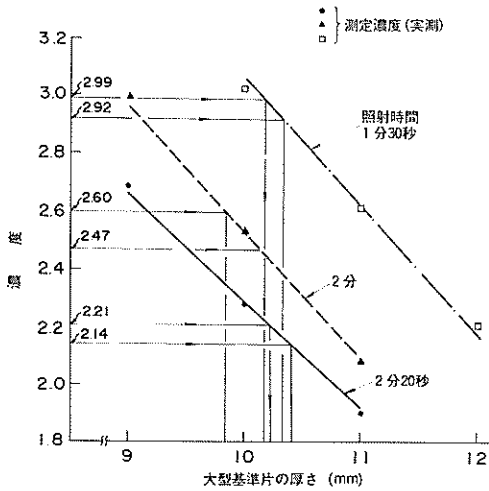


図-4.5 等価換算厚さの求め方

表-4.2 写真濃度と等価換算厚さの関係

写真濃度	試験体中央部の濃度		
	2.92~2.99	2.47~2.60	2.14~2.21
等価換算厚さ (mm)	1.02~1.04	0.98~1.02	1.02~1.04
照射時間	1分30秒	2分	2分20秒

注) 管電圧: 200 kVp

の照射時間においても、管電圧と照射時間を規定すれば濃度と基準片の厚さが直線関係にあることがわかる。また、表-4.2より濃度が2.14~2.99の間で変化しても、等価換算厚さは9.8mm~1.04mmとなっており変化の幅は小さい。等価換算厚さの変動幅は0.6mmであるから、かりに得られた等価換算厚さの中間値1.01mmに対する割合を求めると±3%となる。これは試験体D-6内の土の不均質性を考慮すると、さほど大きなバラツキではないものと考えられる。すなわち、このことは濃度のかわりに等価換算厚さを用いることによって、照射時間や現像処理条件の変動にともなう影響を無視することができることを示すものである。

(3) 管電圧と等価換算厚さ

同一の試験体に対して管電圧を変えた場合の管電圧と等価換算厚さについて調べる。撮影配置は図-4.2で示した通りで、管電圧及び照射時間は表-4.3に示されている。試験体はD-6が用いられており、結果を表-4.4に示す。管電圧が大きくなると等価換算厚さもやや増大する傾向にあるが、管電圧の10%程度の誤差ではさほど

表 4.3 管電圧と照射時間

フィルム番号	1	2	3	4	5
管電圧 (kVp)	160	180	200	220	240
照射時間 (min)	7	3	2	1.5	1

表-4.4 管電圧と等価換算厚さ

フィルム番号	1	2	3	4	5
管電圧 (kVp)	160	180	200	220	240
等価換算厚さ (mm)	9.38~9.56	9.78~9.93	9.80~10.15	10.35~10.50	10.78~10.90

注) 管電圧の誤差10% ; (200±20)kVpに対する等価換算厚さの誤差0.72mm

影響はないものと思われる。しかしながら、管電圧が大きく異なると等価換算厚さの相違が顕著になることから、管電圧が大幅に異なる場合には、それぞれの管電圧に対応する等価換算厚さを求める必要がある。

4.2 クラックの識別限界

X線透過試験から得られるX線写真の画質の良否の程度を把握しておくことは、土中に存在する種々の状態を識別するという観点からみると重要なことである。それらの中で、土中のヘヤークラックは最も検出しにくいと考えられるのでクラックの識別限界について述べることにする。

一般に金属のX線透過試験では、透過度計を用いて試験体と同材質の細い線径の針金がどの程度識別できるかを調べている。しかしこの方法は、サンプリングチューブ内の土のように、金属製チューブ内にX線の減弱の異なる土が存在する場合には適用が著しく困難である。そこで、透過度計に比較して、減弱の大きく異なる試験体を撮影する場合に、透過度計と同材質の基準片を合せて撮影し、試験体をX線的に等価な厚さをもつ基準片に換算する。この等価換算厚さと試験体がX線的に等価と考えて、試験体上に置いた透過度計の識別最小線径を、等価換算厚さで除した値を透過度計識別度とし、X線写真の画質を計る尺度とする。なお、この方法は、JIS Z 3106にもとりいれられている。このような考え方にもとづいて、透過度計識別度を求めると、式(4.1)のようになる。

$$\text{透過度計識別度}(\%) = \frac{\text{試験体上に置いた透過度計のうち識別される最小線径 (mm)}}{\text{試験体中央部の等価換算厚さ (mm)}} \times 100 \quad (4.1)$$

表-4.5 各チューブの透過度計識別度

チューブ記号	T-1	T-51	T-41	T-50	D-6	D-8	D-10	
照射時間 (min)	2	6	6	6	2	2	2	
寸法	肉厚 (mm)	2.0	4.0	4.0	4.0	1.8	1.8	1.8
	外径 (mm)	94	89	89	89	78	78	78
等価換算厚さ (mm)	1.0 ~1.1	1.63 ~1.65	1.55 ~1.57	1.68 ~1.72	9.8 ~10.2	9.1	9.1 ~9.2	
識別される最小線径 (mm)	0.2	0.2	0.32	0.32	0.2	0.2	0.2	
透過度計識別度 (%)	1.9	2.0	2.1	1.9	2.0	2.2	2.2	

注 厚さ10mmの大型の基準片上に置いた透過度計では0.16mmの線径の針金が識別最小線径となっており、この場合、1.6%の識別度であった。

表-4.5は数種類のサンプリングチューブを用いて、管電圧200kVpにて試験を行ったときの等価換算厚さを求めた結果にもとづき、式(4.1)により各々の透過度計識別度を算定したものである。表-4.5の結果から明らかかなように、透過度計識別度としては一般に鋼溶接部のX線写真撮影において要求される2%の識別度と同程度といえるが、表-4.5の脚注に記されているように、大型の基準片の10mm厚さ上に置いた場合には識別度は1.6%となっており、等価換算厚さがほぼ10mmのD-6の場合の2%にくらべ識別度が優れている。このことは、厳密に言えば、JIS Z 3106の考え方がそのままは適用できないことを示すわけであるが、いずれにしても鋼換算を行った場合、十分に2%以下の識別度が得られていることを示すものと考えられる。

実務上の問題としては、鋼に換算した場合2%の識別度を満足しているとしても、土について考える場合に何mm以上のクラックがX線写真上に検出されるかを明らかにする必要がある。クラックの識別限界は、クラックとフィルム間距離、透過X線量率及び散乱X線量率などの違いなどにより一概に決定することは困難であるが、

ここでは以下に示す仮定を設け、土に換算した場合に識別される最小のクラック高さ(照射方向のクラックの大きさ)を求め今後の参考とした。

(仮定)

- ① X線装置と試験体との距離は充分に離れており、X線の拡大などの影響がほとんど無視できる。
- ② サンプリングチューブのように形状が異なっているが、散乱比(散乱X線量率/透過X線量率)は基準片と同じである。

表-4.6は上記の仮定のもとに土中の識別可能な最小クラック高さを求めたものである。いずれのサンプリングチューブについても2~3mmのクラック高さの識別が可能である。このことは、X線写真上で識別される貝片などの大きさとほぼ一致しているようである。

4.3 撮影分割数

サンプリングチューブ内に存在するクラックなどの状態は方向性を有しており、X線の照射方向によっては検出される場合とされない場合が予想される。4.2で述べた識別度は照射方向の識別度であるから、照射角度の異なる場合についての検討が必要である。そのため、以下

表-4.6 土中の欠陥高さに換算した場合に識別限界となるクラックの高さ

チューブ記号	チューブ肉厚 t (mm)	チューブ外径 φ (mm)	土の高さ h=φ-2t (mm)	等価換算厚さ t _e (mm)	h/(t _e -2t)*	識別度2%の場合に識別される土中の欠陥高さ (mm)
T-1	2.0	94	90.0	1.0	1.27	2.5
D-6	1.8	78	74.4	1.0	1.16	2.3
T-50	4.0	89.1	81.1	1.68	9.2	1.8

注* 鋼1mmφ当りに対する土の等価な高さ

ではサンプリングチューブ内の土に含まれるいくつかの状態のうち図-4.6に示す9箇所を対象にし、照射方向（この場合、円周方向の分割数）と検出度合いとの関係を求めた。図-4.6の中で①～④、及び⑨はクラックと推定されるもの、他は間隙もしくは貝殻、貝片などの異質物と思われるものである。分割方法は図-4.7(a)に示すように、円周方向を6分割し各箇所の中央部とX線装置の焦点とを結ぶ線がフィルムに対し直交するように配置した。なお、撮影条件は図-4.7(b)に示した通りである。

表-4.7は各状態についての識別状況を各フィルム番号について示したものであるが、表-4.7より明らかなように、微細なクラック⑦及び軸方向に伸びたクラック⑧を除き、他の状態は6枚中4枚以上のX線写真で確認されている。すなわち、円周方向に4～6分割し連続す

表-4.7 フィルム番号と土の状態の識別状況

フィルム番号 欠陥No.	1	2	3	4	5	6
①	○	○	○	○	×	○
②	○	○	○	○	○	○
③	○	○	○	○	○	○
④	○	○	○	○	×	○
⑤	○	○	○	○	×	×
⑥	○	○	○	○	○	○
⑦	×	×	×	○	×	○
⑧	○	○	○	○	×	×
⑨	×	×	○	×	×	○

○印：欠陥が識別された場合
×印：欠陥が識別されなかった場合

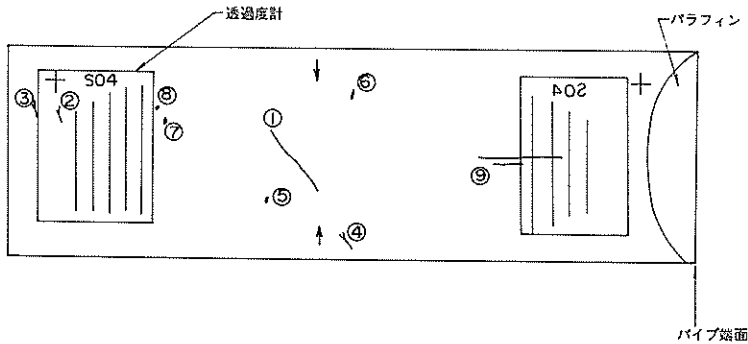


図-4.6 欠陥の模式図

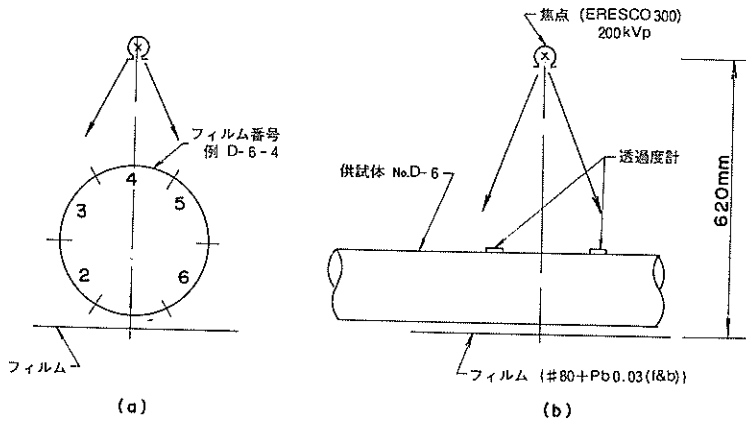


図-4.7 分割方法と撮影条件

る2～3箇所を撮影することによって、いずれかのX線写真上で識別されるものと思われる。

クラック⑨について言及すれば、識別されているフィルム番号は3番と6番で、これは6分割した場合相対する方向（照射方向が180°）となっている。クラック⑨がその他のX線写真上では識別されていないことを考えると、わずかな照射方向の違いによってもX線写真上に検出されない場合が生じることが明らかである。そこで、クラック⑨については図-4.8に示すように、フィルム番号6番を中心に15°きざみで照射方向を変化させて撮影し、各X線写真上でのクラック⑨の識別状況を調べている。表-4.8は識別可能か不可能かを示したもので、

表-4.8 No. 9に対する照射角度の影響

フィルム番号 欠陥No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
⑨	×	×	×	×	×	○	○	×	×	×	×	×

○印：識別可能 ×印：識別不可能

照射方向が15°異なった隣りあうX線写真でのみクラック⑨が検出されている。したがって、クラック⑨のように軸方向に延びたクラックでは円周を12分割し、隣りあう6箇所を撮影することによりいずれかのX線写真上に検出されることになる。以上のことから、軸方向に延びたクラックを精度よく検出するためには、サンプリングチューブ円周の片側から30°ピッチで6方向から撮影することが必要となる。

5. サンプリングチューブ内の土のX線透過試験方法

5.1 X線装置及び撮影用資材

透過試験に用いられたX線装置は、最大管電圧250

kVp及び300kVp、管電流5mAの携帯式X線装置である。これは、鋼管溶接部の検査、鋳鋼、鋳鋼品の検査、レンガ・コンクリートの検査及びアルミニウム溶接部の検査等に広く用いられている。透過試験に用いられたサンプリングチューブの公称外径は、66mm～101.5mm内厚は、1.5mm～4.3mm程度であることから、サンプリングチューブ内に土が満たされた状態でも、最大管電圧が250kVp～300kVpあれば露出時間を適切に調整することにより鮮明な透過写真が得られる。

使用したフィルムは、富士工業用X線フィルム、直接撮影用ノンスクリーンタイプ#80で、寸法は10×12インチ及び7×17インチの2種類である。フィルム増感紙は鉛箔増感紙0.03mmである。

フィルムの現像処理は、自動現像機による処理とタンク現象による処理を用いている。自動現像機は富士工業用X-レイプロセッサFIP 4000が用いられており、処理液、現像温度、現像時間はそれぞれ、スーパードール、30°C、5分である。タンク処理の現像条件は、現像温度20°C±2°C、現像時間5分、現像液、定着液はそれぞれ、富士レンドール、富士レンフィスである。自動現像機処理の利点は、フィルムの写真像を常に一定に、しかも多量に仕上げる点にあり、フィルム濃度が問題にされる場合には、撮影条件を規定しておくことにより、撮影から仕上がりまではば一定の条件のもとでの透過写真が得られることになる。一方、このことは、写真を最良の状態で見ようとするときに、現像処理時に露出の過不足を補うといったような処置がとれないということになるので、事前に適切な露出条件を決定するための予備試験が必要である。

基準片については、鋼溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法（JIS Z 3104）に規定されている階調計Fe II型及び4.で述べた大型の基準片

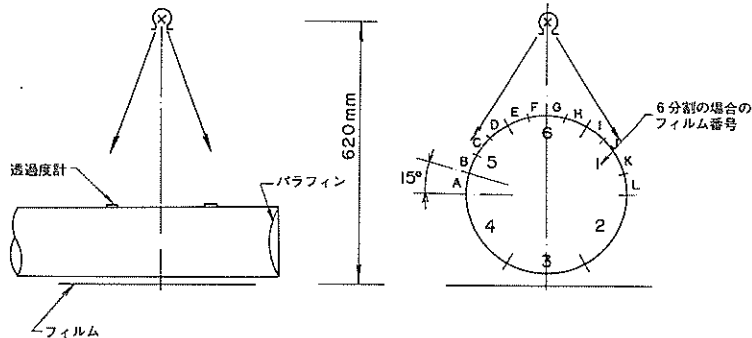


図-4.8 撮影配置と分割方法

(厚さ 3.0 mm ~ 10.0 mm, 一段階の厚さ部分は一辺が 40mm の正方形, 材質は一般構造用圧延鋼材 (JIS G 3101) による SS41) である。

5.2 撮影方法及び配置

サンプリングチューブの撮影方法は4.の図-4.2 に示したように、フィルムをのせた鉛板の上にサンプリングチューブを横たえる。6章以下の試験では、フィルム面からX線管焦点までの距離が、900 mm 又は 1200 mm となる位置にX線装置をセットしている。サンプリングチューブの両側に鋼板または鉛板を置いて散乱線の影響をできるだけ少なくし、階調計、大型の基準片、透過度計、試料番号、撮影年月日などをセットして撮影を行う。1本のサンプリングチューブについての撮影は、軸方向については25~30 cm, 軸直角方向については、直交する2方向又は30°ピッチで6方向としている。サンプリングチューブ内の土の概要を把握するためには直交する2方向、土の内部のクラックなど、より詳細な情報を得たい場合には180°の範囲を30°ピッチで6方向から撮影を行っている。

5.3 撮影条件

撮影条件については事前いくつかの照射時間に対して撮影を行い、得られた写真の階調計又は大型基準片部分(厚さ3段階又は8段階のうちの真中部)の中央における濃度が2.5になることを原則として決められたものである。サンプリングチューブの規格が異なればその都度予備試験を行わなければならないが、実際に使用するサンプリングチューブの種類はそれほど多くはないので、サンプリングチューブの撮影条件を決めるための予備試験を一度行っておけば、そう頻繁に行う必要はないものと思われる。

6. X線透過試験結果及び考察

6.1 X線写真から得られる情報量と質

サンプリングチューブ内の土のX線透過試験は、結果として得られるX線写真の画像の濃淡から、サンプリングチューブ内の土の状態を把握するものである。X線写真上に濃淡が生じるためには、減弱係数が異なる物質の存在が必要であるが、海底地盤から採取された試料についてみると、これらの物質は表-6.1に示されるように土の部分、水の部分、異物質の部分、パラフィン、空間部の5つに大別される。物質個々の状態の判断は、主としてX線写真上に表われた画像によるが、画像のなかでも濃度差に重点が置かれるものと、形状に重点が置かれるものがある。また、濃度差及び形状についても、詳細にみれば土の状態によりパターンが異なっていることがわかる。図-6.1は、実際のサンプリングチューブの透

表-6.1 サンプリングチューブ内の物質の分類

サンプリングチューブ内の物質	主な分類
土	砂, 粘土, シルト, 礫など
水	間隙, クラック中の間隙水など
その他の異物質	貝殻・貝片, 木片, 有機物など
パラフィン	パラフィンシール
空	気
	サンプリングチューブの空間部

過試験によるX線写真から、特に濃度差に重点を置くべきものと、形状に重点を置くべきものに分けてチューブ内の物質の状態を分類したものである。これらは表-6.2に示すように、ステンレス、黄銅、鉄及びアクリル製サンプリングチューブ内の粘土、砂、コーラル、シラスなどの土質を対象に行ったX線透過試験結果である。以下に図-6.1に分類したパターンごとのX線写真のなかから代表的な事例について述べることにする。

(1) 均質な状態 (図-6.1(a); A)

海底の地盤の中でも、堆積環境のおだやかな状態で成生された場合には比較的均質な地盤をなす場合が多い。このような地盤から採取された乱れのない試料では、写真-6.1(a), (b)に示すように均質な画像が得られる。このような均質な画像は原地盤の土質が均質であったこと、及びサンプリング時の人為的な乱れが加わらなかったことにより得られた試料と考えられる。尚、試料押し出し後の状態を写真-6.25に示している。

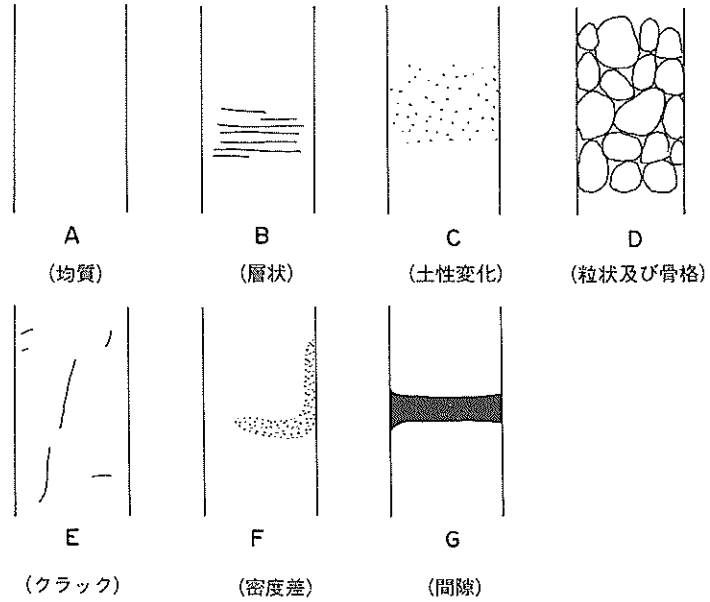
(2) 層状 (図-6.1(a); B)

地盤中の土は複雑な土質構成をなすものが少なくなく、1本のサンプリングチューブ内においても、厳密に言えば必ずしも同じ土ではない。したがって、このような場合にX線写真上に表われる画像には、土の層状がしま模様の濃度差として写し出される。この濃度差は主として土の種類及び単位体積重量の差によるものと判断されるが、一方、サンプリング時の乱れに伴ない試料が層状を示す場合もある。写真-6.2(a), (b)はサンプリングチューブ内の土が層状をなしている状態をX線写真により示したものであるが層状がよく判読できる。

(3) 土性変化 (図-6.1(a); C)

サンプリングにより得られた粘土試料中に砂質土を挟む例は、地盤が複雑な場合によく見受けられる。写真-6.3(a), (b)は粘土試料中に存在しているシルト、もしくは砂質土を示したものである。サンプリングチューブ内で土質が少しずつ変化するような場合には境界が必ずしも明確でないようであるが、写真-6.3のように粘土と

(a) 濃度差



(b) 形状

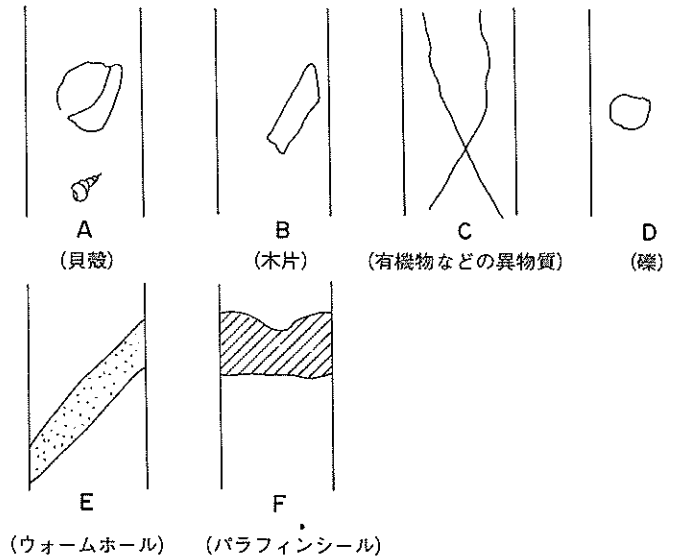


図-6.1 X線写真のパターン

の境界がはっきりしている場合にはX線写真により容易に区別することができる。

(4) 粒状及び骨格(図-6.1(a); D)

シラスやコーラルなどの粒状性の土では、粒子間の接触状態をサンプリングチューブに入ったままの状態で見ることができる。写真-6.4(a),(b)は、鹿児島新港のシ

表-6.2 X線透過試験の撮影条件

試料採取地	孔番号	試料番号	サンプラー	サンプリングチューブ寸法 (O.Dmm; 1mm)	材質	採取深度 (m)	採取率	乱さない/乱した	土質	管電圧 (kVp)	管電流 (mA)	照射時間 (min)	シム厚さ (mm)	階調計
大阪湾	56-1	D-2	デニソソ	78:1.5	ステンレス	16.00-16.80	80/80	乱さない試料	粘土	250	5	1.0	3	F _e II
		D-9				38.00-38.80	80/80							
		D-15				50.00-50.80	62/70							
	56-2	D-2	デニソソ	78:1.5	ステンレス	22.00-22.80	80/80	乱さない試料	粘土	250	5	1.0	3	F _e II
		D-8				34.00-34.80	75/80							
		D-14				49.00-49.80	75/80							
	56-4	S-1	サンド	78:1.5	ステンレス	18.70-19.50	50/80	乱した試料	砂, シルト	250	5	1.0	3	F _e II
		S-2				41.00-41.80	34/80							
		S-3				42.00-42.80	80/80							
	56-6	S-4	シンウォール	78:1.5	ステンレス	47.00-47.80	69/80	乱さない試料	粘土	250	5	1.0	3	F _e II
		T-6				5.00-5.80	80/80							
	56-8	T-18	シンウォール	78:1.5	ステンレス	25.00-25.80	80/80	乱さない試料	粘土	250	5	1.0	3	F _e II
		T-4				4.50-5.30	80/80							
		T-10				13.50-14.30	80/80							
	56-9	D-4	デニソソ	78:1.5	ステンレス	38.00-38.80	80/80	乱さない試料	粘土	250	5	1.0	3	F _e II
T-28		52.00-52.93				87/93								
T-31		55.00-55.99				98/99								
T-41		65.00-65.99				99/99								
T-59		84.80-85.79				99/99								
56-5	K1-1	デニソソ	78:1.5	ステンレス	8.00-8.80	80/80	乱さない試料	粘土	250	5	1.0	3	F _e II	
	K1-2				31.20-32.00	56/80								
	K1-3				41.55-42.35	-								
	T-2				8.00-8.80	80/80								
	T-11				26.00-26.80	80/80								
57-1	T-10	シンウォール	78:1.5	ステンレス	24.00-24.80	80/80	乱さない試料	粘土	250	5	1.0	3	F _e II	
	T-10				8.00-8.80	80/80								
釜石湾	—	D-26-6	デニソソ	101.6:2.0	黄銅	5.00-6.00	50/100	乱さない試料	砂, シルト	250	5	2.5	10	F _e II
		D-27-1				0.00-1.00	60/100							
		D-28-1				0.00-1.00	80/100							
		D-28-5				6.00-7.00	50/100							
		D-31-1				0.00-1.00	-							
	D-35-2	1.00-2.00	50/100											
	—	R-36-1	リジット	92.4:1.2	黄銅	3.00-4.00	90/100	乱した試料	砂, シルト	250	5	2.5	10	F _e II
		R-46-1				6.00-7.00	60/100							
		R-46-2				7.00-8.00	75/100							
		D-48-1				0.00-1.00	70/100							
D-49-2		6.00-7.00				50/100								
那覇湾	56-1	T-13	炭層サンプラー	74,76:30,10 (二重管)	鉄	32.00-33.50	115/150	乱した試料	コーラル	250	5	3.0	10	F _e II
		T-14				34.00-35.50	115/150							
		T-15				36.00-37.50	70/150							
		T-16				40.00-41.50	90/150							
		T-17				42.00-42.50	94/150							
		T-18				46.00-47.50	83/150							
鹿児島 新港	—	TA-1 TA-2	—	68:2.5	アクリル	9.90 ~10.55	— —	乱した試料	シラス	90	5	10	0	F _e I

ラスについてのX線写真である。この写真-6.4はアクリル製のサンプリングチューブによるものであるので、サンプリングチューブの外側から目視可能であるが、表面上に表われない内部の状態についてもある程度推定することができる。

(5) クラック (図-6.1(a); E)

洪積粘土などでは、サンプリングされた試料にクラックが存在する場合が多い。このクラックは地盤中に存在するもの、サンプリング中にできたもの及び試料押し時に発生したものなどが考えられる。従来のように、試料をサンプリングチューブから押し出した後に観察を行う

と、押し出しによるクラックの発生の可能性があったが、X線透過試験では、試料の押し出しを行わないので、この影響は考慮しなくてもよい。写真-6.5(a),(b)はクラックの状態を示すものであるが、クラックの部分は細い線で表われることにより判断できる。クラックの検出度については4.2で詳しく述べたようにある程度限界がある。本試験方法で行った場合のクラックの最小線径を透過計識別度でみると2%程度であり、この場合の土中のクラック高さは3mm程度に相当すると考えられる。また、クラックには方向性があり、方向によりX線の減弱が異なることから、角度によっては大きなクラックを見逃す可能性があるこ

とを考慮しなければならない。しかしながら、X線写真により、表面からは観察できないクラックを見ることが出来る利点は大きい。

(6) 密度差 (図-6.1(a); F)

サンプリングされた土の種類が同じでも、X線写真上には部分的な濃度差がみられる場合がある。写真-6.6(a), (b)は同じ土質にもかかわらず、密度の差が表われている例である。同一のサンプリングチューブ内の同じ土質について、局部的密度差が表われる原因については、6.2で述べることにするが、何らかの人為的攪乱が加えられた場合に生じる可能性がある。

(7) 間隙 (図-6.1(a); G)

X線写真に表われた画像の中には、周囲にくらべ極端に濃度が大きな所が存在する場合がある。これはX線の減弱が非常に小さかった結果であり、試料中に存在する間隙に起因するものである。したがって、前述の土の層状や土の種類の変化による濃度差とは異なった意味もっている。写真-6.7(a), (b)は那覇港で採取されたコーラルについて間隙の状態を示したものである。X線写真に表われる濃度は、間隙の状態(位置や大きさ)により異なるが、サンプリングチューブの任意の断面が完全に間隙だとすると、サンプリングチューブ端部の試料の詰まっていない部分との濃度を濃度計で読み取り比較することにより判断することができる。すなわち、このようにして比較した両者の濃度は、水と空気による減弱係数の違いはあるが、その差はそれほど大きくない。

(8) 貝殻 (図-6.1(b); A)

海底の地盤から採取されたサンプルは、採取場所によってはかなりの貝殻、貝片を含んでいる場合がある。これらのX線減弱係数は土に対する値に比べて大きいことから、X線写真上には白く写し出される。5.で述べた方法により撮影した場合のX線写真は、原寸とはほぼ同じであるから大きさについては簡単に測定できる。また、それらの位置や形状については、サンプリングチューブを回転させて数方向から撮影することにより、全体的な像を把握することができるが、実用上は、直交する2方向からのX線写真で充分有用な情報が求められる。貝殻、貝片と他の混入物との区別については、前者の形状から比較的容易に判断される。写真-6.8(a), (b)は直交する2方向から撮影したときの貝殻、貝片の状態を示すものである。写真-6.9は、1方向からのみのX線写真、及び写真-6.26は試料押出し後の写真であるが貝殻の形状がよく観察できる。

貝殻、貝片の存在をX線写真により把握する利点として、一軸圧縮試験、圧密試験などの供試体の作成が容易にな

ることがあげられる。すなわち、サンプリングチューブ数が少ない場合や、1つのチューブ内で多くの試験が必要な場合などは非常に有用な情報として活用できるもので、貝殻、貝片の存在を考慮して供試体の切り出し、成形を行うことができる。乱さない試料の供試体作成時に、貝殻、貝片にぶつかり、供試体の作成ができなくなった例は稀なことではないので、このような事態を避けることができる。

(9) 木片 (図-6.1(b); B)

サンプリングされた試料の中には、種々の異物質が含まれている場合も多い。海底地盤中に存在する異物質はある程度その種類が限られているので、このような異物質はX線写真上の形状からおおよその判断が可能である。写真-6.10(a), (b)はサンプリングチューブ内の木片を示すもので、木片がサンプリングチューブ内で折れた形状をなしている。これは木片周辺の土の濃度の差から、サンプリングチューブ押込み中に刃先にぶつかって折れたものと推定される。

(10) 有機物などの異物質 (図-6.1(b); C)

写真-6.11(a), (b)は試料中の細長い異物質を示している。試料押出し後の観察によれば、これは周りの土とは異なる色調をもつ物質であり、X線の弱減状況から判断すると、周りの土よりも減弱係数の大きな物質であるものと思われる。写真-6.29はこのような物質の状態を示したもので、写真-6.29では、何らかの原因により生じたクラックの中に後から異物質が堆積した結果であることが推定される。

(11) 礫 (図-6.1(b); D)

写真-6.12(a), (b)は粘土試料中の砂及び礫を、6方向撮影分のうち直交する2枚で示したものである。砂及び礫の状態をみるために、試料を押し出した後の状態を写真-6.27(a), (b)に示している。両者を比較することにより、X線写真がかなりの解像力をもっていることがわかる。X線写真で見られるような砂礫分がよく観察される。

(12) ウォームホール (図-6.1(b); E)

海底地盤中には過去から現在にわたって底生生物が生棲していた痕跡がある。これらの痕跡の1つに、しゃこ(蝦蛄)によるものと推定される地盤中の穴がある。これらのウォームホールの中には後から土が満たされている場合が多く、このような場合周りの土との密度差がみられる。写真-6.13(a), (b)は、しゃこの生棲海域から採取された試料のX線写真であるが、しゃこによるものと思われるウォームホールが濃度の差として明確に表われている。写真-6.28(a)は同じサンプリングチューブ内の写真-6.13(a), (b)と対応する位置において押出し

後の試料を観察したものであるが、X線写真とよい対応を示している。写真-6.28(b), (c)は他の試料についての同様な例である。

(13) パラフィン(図-6.1(b); F)

写真-6.14(a), (b)はパラフィンシールの状態をX線透過試験により調べた結果である。X線写真はほぼ原寸であることから、パラフィンシールの厚さを推定することができる。また、パラフィンシールの形状や、サンプリングチューブ内の土との境界の状態などもみることができる。

6.2 X線写真による試料の品質評価に関する考察

一般に乱さない試料とよばれている試料は、サンプリングチューブの押込みや引抜き、試料の押出し成形などの影響をうけており、いわゆる理想的な試料でも完全な試料でもない⁷⁾。実際に採取された試料の乱れを評価する方法についてはかなり研究が行われており、一軸圧縮試験や圧密試験などの室内試験からある程度判断できるようである。しかしながら、これらの方法では、採取した試料についての室内試験が必要であり、試験結果の整理を行った後に乱れの評価を行うものであるから、乱れの原因のすべてを評価しているという点では合理的であるが、サンプリングによって生じた乱れや、試料の押出し、成形による乱れなど、乱れの発生する原因ごとの評価はかなり困難である。サンプリングチューブ内の土のX線透過試験は、採取された試料をサンプリングチューブから押出すことなく、そのまま土の状態を把握し、試料の品質評価を行おうとするものであるから、これによって評価された試料は、試料の押出し、成形による乱れの影響を全く受けることがなく、試料の状態と乱れの関係を調べることににより、サンプリングの良否の評価に直接結びつけることが可能である。また、X線写真はサンプリング後に室内試験を実施する上で、有用な情報として活用することができる。このような観点から、本節ではX線透過試験によるサンプリングチューブ内の土の品質評価の可能性について考察することにする。

ところで、サンプリングされた試料の乱れをX線写真から判断する場合にあらかじめ乱れの定義を明確にしておく必要がある。X線透過試験では、結果として数枚の写真が得られるわけであるが、画像に表れているのはサンプリング終了後のサンプリングチューブ内の土の状態である。したがって、画像に表われた情報からサンプリング方法を考慮しつつ試料の乱れを判断するわけであるが、この乱れは土の変形と解釈することができる。すなわち、サンプリングチューブ内の土に人為的と思われるような変形が加わった場合や、地盤中に存在する異物質によって周辺の土に変形が生じた場合など、X線写真に

表われた変形の形跡をもって乱れの判断根拠としようとするものである。

6.1の図-6.1で、X線写真から得られる情報のパターンを分類したが、これらのパターンにおいて、試料の品質を評価するさいの有用な情報として採用できるものは、図-6.1における(a)のA, B, E, F, G及び(b)のFであろう。その他のパターンについても総合的な判断の材料として用いることはできるが、これらは二次的な情報と考えられる。すなわち、図-6.1の(b)のA, B, Dなどでは、それらの異物質がサンプリングチューブの刃先につかかって乱れが生じた場合など、異物質周辺の密度差により乱れの判断ができるもので、情報のパターンとしては、(a)のFに分類することにする。いずれにしても、これらのパターンは、乱れの原因についての情報を与えるという点で有用な情報であることに変わりはない。以上のような考えにもとづき、図-6.1の(a)のA, B, E, F, G及び(b)のFのパターンについて、乱れと品質評価について考察することにする。

(1) 均質性からの品質評価

X線写真からみた乱れの評価は、上述のように、土に変形が生じたかどうかによっている。したがって、画像が均質である場合には、土に人為的な変形が加わっていない、乱れの可能性の少ない試料が採取されたと評価される。写真-6.15(a), (b)はアニオン型サンプラーにより採取された洪積粘土のX線写真であるが、画像が均質でX線的にみた場合、乱れの少ない試料と判断することができる。

(2) 層状による品質評価

6.1で述べたように、サンプリングチューブ内の土が層状の濃淡として写される場合がある。これは土の密度及び土質の違いにより生じるものであるが、サンプリングチューブ内の層状から乱れを判断することが可能である。すなわち、X線写真上に表れた層状の形から、サンプリングチューブの押込み方を考慮して、押込みにより力の加わる方向への試料の変形が観察された場合、その変形の周辺部の状態をみて乱れの判断を行うものである。写真-6.16(a), (b)は、リジットサンプラーにより採取された乱した砂質試料のX線写真であるが、サンプリングチューブ中央部において層状は水平をなしており、また、これらの層状はサンプリングチューブ周辺部において刃先方向へ移動している傾向がある。Marcuson他⁸⁾は、層状が水平な場合には採取された試料の品質は良いと報告しているが、写真-6.16は少なくとも層状が水平でもサンプリングチューブ周辺部の層状によっては乱れの可能性のあることを示唆するものである。さらに、

写真-6.2で示した層状の例は、デニソン型サンプラーによるものであるが、採取率が50%であることを考慮すると、先端部分の砂質試料の脱落または流出の影響を受けた可能性もあり、乱された試料と考えられる。

(3) クラックによる品質評価

採取された試料の中にはクラックの存在するものがあるが、クラックの存在には、もともと地盤中に存在していたものと、サンプリング中に発生したものがある。特に硬質の洪積粘土では試料中にクラックを有する場合が多く、この両者の区別は非常に困難である。しかしながら、洪積粘土のクラックについてみると、写真-6.29に示すようにクラック周辺に色調の異なる物質が存在する場合がある。これらは地質学的にみて、海面の変動により地盤の乾燥収縮によってクラックが発生し、その間に異物質が堆積したものと推定できる。したがって、このようなクラックについては、元来地盤中に存在していたものと判断することができる。一方、写真-6.30に示されるクラックは、クラックに沿って異物質が観察されておらず、元来地盤中に存在していたものか、サンプリング中に発生したものか判断できない。写真-6.31はデニソン型サンプラーによる採取試料の押出し後の状態である。この写真から判断されることは、サンプリング中にサンプリングチューブがともまわりを生じた結果、チューブの回転によってクラックが発生したということである。この試料のX線写真をみると、写真-6.17(a)、(b)に示されるように、試料内部に小さなクラックが観察され、写真-6.31に示したクラックが試料押出し中に発生したものではないことを裏付ける。したがって、写真-6.31に表われたようなクラックは、サンプリング中に生じたものと判断される。また、写真-6.17に表われたクラックが少ない理由については、4.で述べたように、クラックの方向性によるものと考えられ、実際のクラックは、写真-6.31に示されるように2方向からのみ撮影した写真-6.17で観察されるものよりもかなり多いことがわかる。写真-6.18(a)、(b)は写真-6.32に示した試料についてのX線写真を示しているが、これは30°ピッチで6方向から撮影したものである。照射方向によってクラックの表われ方がかなり異なってくることが明らかである。写真-6.19(a)~(f)は有機物と思われる異物質を示したものである。試料押出し後の観察によると、これらに沿ってクラックが発生している場合が多い。また、写真-6.33は試料押出し後の写真であるが、有機物の状況をX線写真とよく対比することができる。

X線写真から判読されるクラックのパターンとしては、軸方向に伸びたもの、軸直角方向に伸びたもの、円周方

向に伸びたもの及びこれらの組合せが考えられるが、試料の乱れの可能性の大きいクラックとしては、円周方向のクラックと軸直角方向のクラックがあげられ、サンプリングチューブ周辺部にこれらのクラックが数多く観察された場合には、乱れが生じているものと考えられることができる。写真-6.34は、デニソン型サンプラーにより採取された試料の押出し後の写真である。写真-6.34では円周方向のクラックが観察される。写真-6.20(a)、(b)はこの試料のX線写真であるが、サンプリングチューブ周辺部に上記の円周方向クラックと軸直角方向のクラックが観察される。

以上、クラックと乱れの関係について考察したが、クラックの発生のパターンにより乱れの判定が行える可能性がある。

(4) 密度差による品質評価

試料の採取方法が適切でない場合には、サンプリングチューブ内の土には大きな変形が生じる。写真-6.21(a)、(b)はデニソン型サンプラーにより採取された試料のX線写真を示しているが、同一のサンプリングチューブ内で著しい密度差が観察され、この密度差は試料の密度の差に起因するものと考えられる。密度差の生じた原因は、この試料の回収率が50%であること及びこの地盤が砂層とシルト層の複雑な互層をなしていることを考えあわせると、元来地盤中に存在していたものではなく、サンプリングチューブ先端付近の試料が脱落し、その影響によって残りの試料に密度差が生じたものと判断される。したがって、このように密度差の観察される試料についてはある程度乱された状態にあるものと判断される。

(5) 間隙による品質評価

サンプリング中の試料の変形が大きくなると、試料はチューブ内で切断される場合もある。写真-6.22(a)、(b)は、デニソン型サンプラーにより採取された試料であるが、サンプリングチューブ内において試料に間隙部がみられる。この試料の回収率は60%であり、6.2(4)で述べたと同じ理由により、試料中に間隙が生じたものと思われる。間隙部の判断は、この部分の濃度を濃度計で測定し、サンプリングチューブのみの濃度と比較することによって、両者の濃度がほぼ等しくなることから容易に判断することができる。地盤中に間隙が存在することは考えられないことから、このようなX線写真が得られた試料は乱されたものと判断される。

(6) パラフィンシール

サンプリングされた試料はパラフィンシールされる。パラフィンシールが目的通り機能しているかどうかの判断はその厚さにより一応の目安を得ることができる。パ

ラフィンシールの厚さは3cm以上が必要とされており、これより薄い場合には充分シールとしての働きをなしていないものとみなされる。6.1で示した写真-6.14は、パラフィンシールが薄い例である。パラフィンシールの厚さをX線写真により調べた結果では、シール厚さが不足している例がかなり多い。また、写真-6.23(a),(b)はパラフィンシールと試料との接触面の状況をX線写真によりみたものであり、試料とパラフィンシール間に間隙がみられる。この原因については、サンプリングチューブの輸送時、保存時などに何らかの機械的力が加わり、サンプリングチューブ内の試料の密度が変化したことによるものと思われる。

以上、X線写真とサンプリングされた試料の品質との関係について述べた。従来、試料の品質を評価する方法として、室内試験の結果による方法が主に用いられており、サンプリングチューブ内に納められた状態での乱れの評価については、ほとんどなされていない現状である。したがって、今後、サンプリングチューブ内の試料の品質評価法として、X線透過試験の有効な活用が望まれる。

6.3 X線透過試験の定量的応用に関する試み

X線が土の中を透過するときの減弱の度合いは、土の種類によって異なる。減弱の違いはX線写真上に濃度差として表われるが、この濃度差と土の特性との定性的な関係については6.1及び6.2で述べた。本節ではX線写真の濃度と土の特性の定量的な関係を、2,3の項目について調べることによって、土に対するX線透過試験の定量的な適用性を検討する。

(1) 砂の相対密度と等価換算厚さの関係

試験に用いた試料は、気乾状態の小名浜砂でその物理的特性、粒径加積曲線については表-6.3、図-6.2に示す通りである。この小名浜砂を外径78mm、内径75mm、肉厚1.5mmのステンレス製サンプリングチューブに詰めこんだ後、X線透過試験を行っている。詰めこみ方法は、試料を自然落下させる方法と、サンプリングチューブ内に試料を数層に分けて自然落下させ、各層毎に打撃を加える方法によっている。前者の平均的な相対密度は37.9%、後者は66.6%及び88.9%である。

X線透過試験は5.で述べた方法に準じているが、撮影方向は直交するA、B2方向であり、撮影条件は表-6.4に示されている。

写真-6.24(a),(b)は上記で得られた6枚の写真のうち相対密度が37.9%と88.9%の2つのケースについて得られたX線写真を示している。写真-6.24(a)は相対密度37.9%のもので自然落下によるものであるが、写真は均

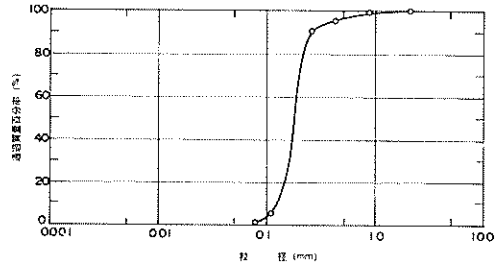


図-6.2 粒径加積曲線

表-6.3 小名浜砂の物理的特性

土粒子比重	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)	均等係数
2.745	0.13	0.19	0.17	1.3

表-6.4 撮影条件

管電圧 (kVp)	管電流 (mA)	フィルム - 焦点距離 (mm)	照射時間 (min)	シム厚 (mm)	増感紙
245	5	1200	1	3	0.03mm前面 0.1mm後面

質な状態を示している。一方、写真-6.24(b)は打撃による締固めを行ったもので相対密度は88.9%である。写真-6.24(b)では水平方向の層状が観察されており、必ずしもサンプリングチューブ全体にわたって均質ではない。これはサンプリングチューブ外周からの打撃エネルギーの伝わり方による砂の詰めこみ時のバラツキと思われる。このような不均質性は、濃度計により測定されるが、写真-6.24から読み取った階調計濃度(各厚さ部分の中央部分)は各X線写真で必ずしも同じではないのでX線写真相互の濃度比較はできない。したがって、4.1で述べたように階調計の各厚さ部分の濃度から等価換算厚さを求めて、各X線写真について基準となる濃度と等価換算厚さの関係を求めた。図-6.3はこれらの関係を示したものであるが、これらの関係は、X線写真ごとに異なっている。

図-6.4は、写真-6.24に示されるX線写真の中央部を15×15mmごとに分割し、各分割要素の中央部の濃度を読み取り、この濃度から図-6.3を用いて等価換算厚さを求め、サンプリングチューブ軸方向に対してプロットしたものである。図-6.4から明らかなように、等価換算厚さの軸方向の変化は互いにやや異なっている。SAND-2の場合は自然落下による詰め込み方法を用いているの

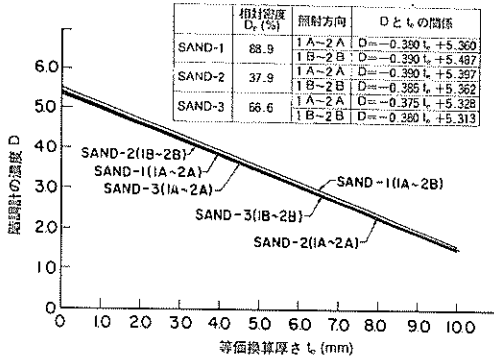


図-6.3 階調計の濃度と等価換算厚さ

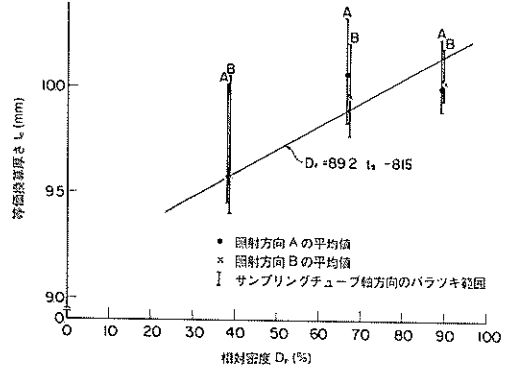


図-6.5 相対密度と等価換算厚さの関係

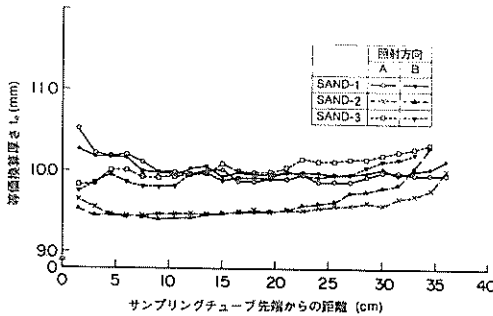


図-6.4 等価換算厚さの軸方向のパラッキ

ではば均一な密度と考えられることから、変化の理由としては、端部のシール材による乱反射の影響や、照射角度がサンプリングチューブ中央部と端部で異なっていることなどによるものと思われる。また、SAND-1及び3については、砂の詰め方が不均一なことにより、等価換算厚さがばらついているものと思われる。

図-6.5 は、サンプリングチューブ中央部分の読み取り濃度を図-6.3 の関係から等価換算厚さに直したものの平均値を相対密度に対してプロットしたものである。厳密にはサンプリングチューブ内の密度は均一でないので、微小要素に対する比較が必要であるが、ここでは両値とも平均値を用いている。等価換算厚さのパラッキ範囲は、図-6.5 に幅で示している。図-6.5 から明らかなように、相対密度が大きくなると等価換算厚さが増大し、今回の試験条件では、

$$D_r = 89.2 t_e - 815$$

ここで D_r ; 相対密度(%)

t_e ; 等価換算厚さ (mm)

の関係が得られている

(2) 粘土の湿潤密度と等価換算厚さの関係

試験体は大阪湾泉州沖海域において、水圧式固定ピストンサンプラーにより採取された、沖積及び洪積粘土である。一軸圧縮試験を実施する前にX線透過試験を行い、得られたX線写真において一軸圧縮試験の供試体に対応する部分の濃度を読み取り、等価換算厚さを求めて、供試体の単位体積重量との関係を求めた。濃度測定は砂の場合と同様にサンプリングチューブ中央部を軸方向にそって分割した15×15mmの要素の中央部で読み取った値である。撮影条件は表-6.5 に示されているが、6.3(1)

表-6.5 撮影条件

管電圧 (kVp)	管電流 (mA)	フィルム～焦点間距離(mm)	照射時間 (min)	シム厚 (mm)	増感紙
200	5	900	6	5.10	0.03mm前面 0.1mm後面

と異なる点は、6方向から撮影を行っていること、大型の基準片が用いられていること、シム厚が10mm及び5mmであること、そしてタンク現像が用いられていることである。

図-6.6 は、各撮影方向における大型基準片の濃度と等価換算厚さの関係である。図-6.6 には、シム厚10mmと5mmの場合を示している。図-6.6 から明らかなように、同じ撮影条件においても基準片の濃度と等価換算厚さの関係は同じではない。したがって、これらの関係を、各々の撮影方向(A~F)に対して適用し、サンプリングチューブ中心軸にそった15×15mm要素中央

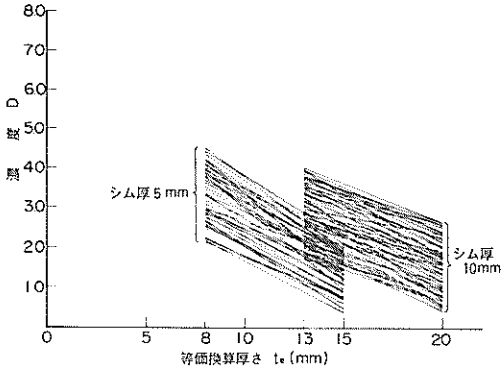


図-6.6 等価換算厚さと濃度の関係

部ごとの等価換算厚さを求め、10 cm ごとにその幅をこれに対応する湿潤密度に対して示したものが図-6.7で

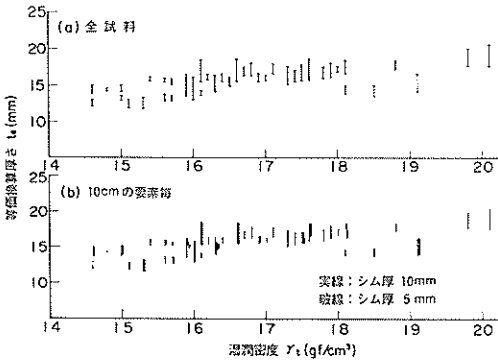


図-6.7 湿潤密度と等価換算厚さの関係

ある。図-6.7 中の実線及び破線は、それぞれシム厚が10mm、5mmを用いた場合の結果である。また、図-6.7(b)では、異なるサンプリングチューブで同じ湿潤密度に対応するものは少し横にずらして示している。図-6.7では、等価換算厚さと湿潤密度の関係はかなりバラツキが大きいが、湿潤密度が大きくなると等価換算厚さも大きくなる傾向にある。図-6.8 はこれらのバラツキの平均値と湿潤密度の関係を示したもので、両者の関係は、この試験の結果では、

シム厚10mmの場合

$$\gamma_t = 0.11 t_e + 0.082$$
シム厚5mmの場合

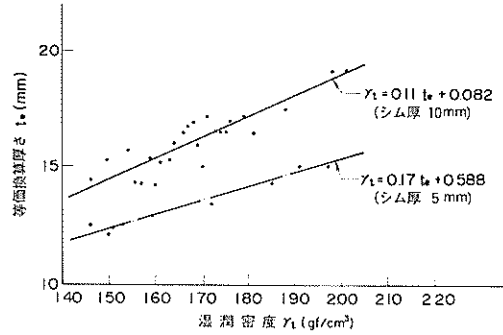


図-6.8 等価換算厚さの平均値と湿潤密度の関係

$$\gamma_t = 0.17 t_e + 0.588$$

ここで

$$\gamma_t : \text{湿潤密度 (gf/cm}^3\text{)}$$

$$t_e : \text{等価換算厚さ (mm)}$$

が得られた。

(3) X線写真及び目視観察によるクラックと一軸圧縮強度の関係

6.1, 6.2で述べたように、X線写真によりサンプリングチューブ内の試料内部のクラックの状態が検出される。クラックの検出可能な大きさについては限界があるものの、ここでは、サンプリングチューブから押出される前のクラックの状態及び押出された後の試料のクラックの目視観察の結果と一軸圧縮強度の関係について調べた。

図-6.9は大阪湾泉州沖の海底から採取された洪積粘土について、X線透過試験を行った後に一軸圧縮試験を実施し、X線写真と目視観察によるクラックの存在の有無と一軸圧縮強度との関係について示したものである。X線写真の撮影は2方向に限定したので、クラックが、大きさ、方向によっては検出されなかった場合もあるが、X線写真をもとにした視覚的な判断によって一軸圧縮強度のバラツキの一因が明らかにされた例である。なお、乱れの評価法として、沖積粘土で行なわれているような破壊ひずみから評価する方法は、破壊ひずみがいずれも2%前後であったことから適用不可能であった。このようなケースは特に洪積粘土において顕著に表われると思われるが、沖積粘土においてもX線写真によってクラックが観察される場合があり、このような試料についても一軸圧縮強度が異なるとすれば、X線透過試験が結果として定量的に強度の判定に用いることが可能だと思われる。

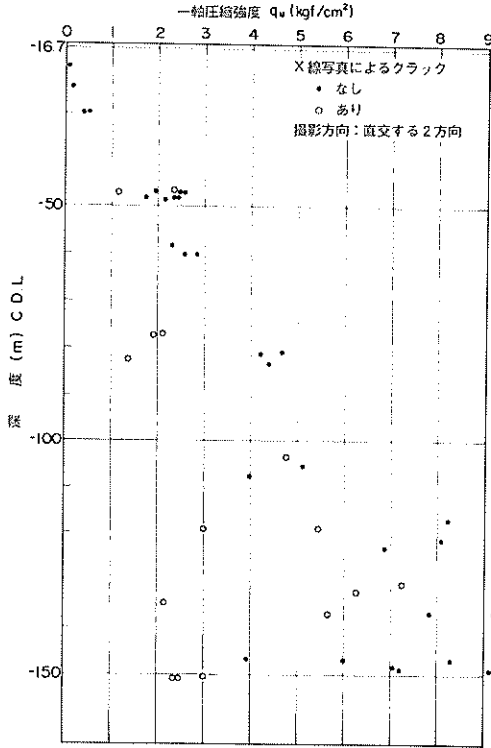


図-6.9 クラックと一軸圧縮強度の関係

以上、X線透過試験の定量的応用に関する試みとして3つの例について述べたが、X線透過試験のもつ可能性は大きく、今後さらに、土の物理的、力学的特性と結びついたより広範なX線透過試験についての研究が望まれる。

7. あとがき

原地盤から採取されたサンプリングチューブ内の土の状態はある程度限定されており、いくつかのパターンに分類することができる。本報告では、X線写真から読取られるサンプリングチューブ内の土の状態を、主として濃度差に着目する場合と、形状に着目する場合に大別し、さらに各々の状態の違いによりこれらを13のパターンに細分類した。さらに、これらのパターンがサンプリング中や試料の運搬、保存中の人為的な攪乱により変化することを利用して、採取された試料の乱れを評価する方法について述べ、X線透過試験がサンプリングチューブ内の土の品質評価に有用な手段であることを示した。この方法は多分に経験的な要因も含まれており、今後できるだけ定量的な判断手法の開発に関する研究が望まれる。

その第1歩として本報告ではある限定された条件のもとで等価換算厚さの考え方を導入するとともに、X線透過試験の定量的応用に関する可能性についても報告している。

今後に残された問題も多く、サンプリングチューブ内の土を対象としたX線透過試験法の確立、乱れのパターンの分類、X線撮影方向、枚数と検出精度、X線写真の定量的な評価法など、より多くのデータの収集と今後の研究が期待される。

おわりに、本研究にあたって、第三港湾建設局関西国際空港調査室副島、浜田、浅山の各氏、神戸港工事事務所武村氏の助力をいただいた。また、本資料のX線透過試験は石川島検査計測株式会社、非破壊検査株式会社に委託して実施したものである。関係各位に深甚の謝意を表するものである。(1982年9月30日受付)

参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会；エックス線作業主任者用テキスト，1975
- 2) Allen, R.L., Yen, B.C. & McNeill, R.L.; Stereoscopic X-Ray Assessment of Offshore Soil Samples, Offshore Technology Conference, Houston, Vol. 3, 1978, pp 1391~1399
- 3) Schjetne, K. & Brylawski, E.D.; Offshore Soil Sampling in the North Sea, State of the Art on Current Practice of Soil Sampling, Proc. of the International Symposium of Soil Sampling, 1979, Singapore, pp 139~156
- 4) Marcuson, W.F. & Franklin, A.G.; State of the Art of Undisturbed Sampling of Cohesionless Soils, ditto, 1979, pp 57~71
- 5) Horn, H.; North American Experience in Soil Sampling and Its Influence on Dynamic Laboratory Testing, ASCE Convention Exposition, 1978, pp 113~148
- 6) 阪上最一, 森博, 齊藤幸雄; サンプリング試料のX線透過試験結果, 第15回土質工学研究発表会, 土質工学会, 昭和56年, pp 81~84.
- 7) 最上武雄編; 土質力学, 技報堂, 昭和44年, pp 562~575.

記号一覧表

C ; 再生係数
 D ; 写真濃度 (濃度)
 I_0, I ; 透過前後のX線の強さ
 I_A, I_B ; A, B点におけるX線の強さ
 I_D, \bar{I}_D ; 透過X線の強さ
 I_S, \bar{I}_S ; 散乱X線の強さ
 ΔI_D ; 透過X線の強さの差
 k ; 被写体コントラスト
 L_1 ; X線源と透過度計との距離
 L_2 ; 透過度計とフィルム間の距離
 L_3 ; 試験部の有効長
 m ; L_2 を規定する係数
 n ; L_3 を規定する係数
 R ; レントゲン
 t_e ; 等価換算厚さ
 γ_t ; 湿潤単位体積重量
 α ; 物質の厚さ
 Δx ; 空隙の厚さ
 μ_2 ; 減弱係数または吸収係数

付 録

鋼溶接部の放射線透過試験方法 Z 3104-1968
 及び透過写真の等級分類方法 (1977確認)
 (抜粋)

Methods of Radiographic Test and Classification
 of Radiographs for Steel Welds

2. 透過写真の撮影方法

2.1 試験用具の性能

放射線装置, 感光材料, 撮影用具および観察用具は, 溶接部の試験される部分 (以下, 試験部という。)の欠陥を明りょうに表わす透過写真を撮影し, これを観察できる性能を有するものでなければならない。

2.2 放射線の照射方向

透過写真は, 原則として試験部の透過する厚さ (以下, 材厚という。)が最小になる方向から放射線をあてて撮影する。ただし, この方向では撮影ができないか, または不適当な場合には, それぞれに適した方向から放射線をあてて撮影してもよい。

2.3 母材の厚さおよび材厚

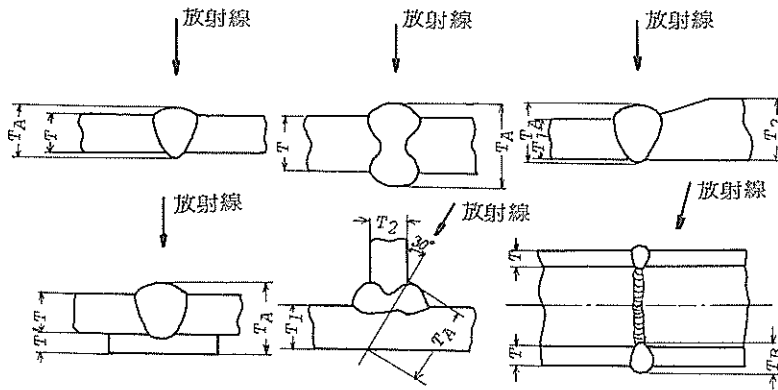
母材の厚さおよび材厚の値は, 図-1に示す各寸法を測定するものとし, 実さい測定が困難な場合には, 原則としてつぎの値を用いる。

- (1) 母材の厚さとしては, 使用された板の呼び厚さを用いる。
- (2) 材厚としては, 各種溶接継手について表-1に示す値を用いる。

2.4 透過度計および階調計の使用

- (1) 撮影にさいしては, 2.5に規定する透過度計を用い, 試験部と同時に撮影するものとする。
- (2) 材厚20mm以下の平板の突合せ溶接部について撮影条件を決定する場合には2.6に規定する階調計を用い試験部と同時に撮影し, また同一条件で撮影する場合には, 原則として連続する10回以下の撮影を1群として1群に1回以上使用する。

2.5 透過度計の構造



ただし, T, T_1, T_2 は母材の厚さを示し, T_A は材厚を示す。 $T_A = T_B + T$

図-1

表 1

継手の種類	母材の厚さ mm	溶接部の形状	材厚 mm
突合せ継手	T	余盛なし	T
突合せ継手	T	片面余盛あり	$T+2$
突合せ継手	T	両面余盛あり	$T+4$
突合せ継手	T	片面余盛あり 裏あて金あり(厚さ T' mm)	$T+2+T'$
突合せ継手(二重壁撮影)	T	余盛なし	$2.0 \times T$
突合せ継手(二重壁撮影)	T	片面余盛あり	$2.0 \times T+2$
突合せ継手(二重壁撮影)	T	両面余盛あり	$2.0 \times T+4$
T 継手	$T_1 \approx T_2$		$2.2 \times T$
			$1.1 \times (T_1+T_2)$

備考 母材の厚さは呼び厚とする。突合せ継手において母材の厚さが異なる場合は、薄い方の厚さ T_1 を T とする。

透過度計の構造は、つぎのとおりとする。

- (1) 透過度計は1組の線を台紙またはわくに取り付け
たもので、線の配列は図-2に示すように左側から右
側に順次太くなるようにし、形の種類と線径の系列
は表-2に示すとおりとする。ただし、透過度計は、
図-3および表-3に示すものであってもよい。
- (2) 線は、JIS G 3522(ピアノ線)またはJIS G
3532(鉄線)に規定するピアノ線または鉄線とす
る。
- (3) 台紙またはわくは、紙、ゴムまたは合成樹脂など
を用い、線よりも放射線の吸収が小さいことが必要
であり、図-2に示すように、フィルム上で明りよう
に認められる材料を用いて透過度計の形の種類を表
示する。

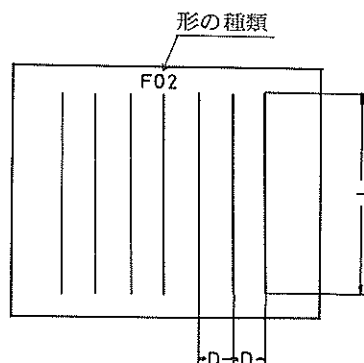


図-2

2.6 階調計の構造

階調計の構造は、つぎのとおりとする。

- (1) 階調計は、図-4に示すような階段状のもので、厚
さが1.0 2.0 および3.0 mmのものをI形とし、3.0、

表 2

単位:mm

形の種類	使用材厚範囲		線径の系列							線の中心 間距離 (D)	線の長さ (L)
	普通級	特級	0.10	0.125	0.16	0.20	0.25	0.32	0.40		
F 02	20以下	30以下	0.10	0.125	0.16	0.20	0.25	0.32	0.40	3	40
F 04	10~40	15~60	0.20	0.25	0.32	0.40	0.50	0.64	0.80	4	40
F 08	20~80	30~130	0.40	0.50	0.64	0.80	1.00	1.25	1.60	6	60
F 16	40~160	60~300	0.80	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.20	10	60
F 32	80~320	130~500	1.60	2.00	2.50	3.20	4.00	5.00	6.40	15	60
寸法の許容差			JIS G 3522に定められた値または±5%のいずれか小さい方の値							±15%	±1

表 3

形の種類	使用材厚範囲		線 径 の 系 列								線 間 距 (d)	線 長 (L)		
	普通級	特 級	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.5			0.6	0.7
1F	20 以下	30 以下	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4			2~5	35	
2F	10~50	15~70	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	3~6	40
3F	40~100	60~190	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0			4~7	45	
4F	50~200	70~350	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0			5~8	50	

単位: mm

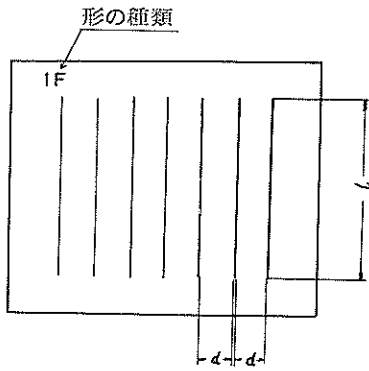


図-3

4.0 および 5.0mm のものをⅡ形とする。それぞれの厚さの部分は正方形で、一辺の長さは15mmとする。

- (2) 階調計には、JIS G 3101 (一般構造用圧延鋼材)、JIS G 4305 (冷間圧延ステンレス鋼板) の SUS 27 CP またはこれと同等のものを使用する。
- (3) 寸法の許容差は、厚さについては ± 0.02 mm、幅および長さについては ± 0.5 mm とする。

2.7 撮影配置

突合せ溶接部を撮影する場合の放射線源、透過度計、

階調計およびフィルムとの関係位置は、原則としてつぎによる。すなわち、図-5 に示すように 2 個の透過度計を試験部の線源側の面上に溶接部をまたいで、両側になるべく遠いところにおく。このさい、細線が外側になるようにする。また階調計を使用する場合には、試験部の線源側の中央付近からあまり離れない母材の面上に階調計の厚さの変化する方向が試験部と平行になるようにおく。ここで、線源と透過度計間の距離 L_1 は、原則として透過度計とフィルム間の距離 L_2 の m 倍以上、試験部の有効長さ L_3 の n 倍以上とする。線源寸法 f mm の場合、係数 m は普通級で $2.5f$ 、特級で $5f$ とする。また係数 n は普通級では 2、特級では 3 とする。

なお、透過度計の線は、放射線の方向と直角になるように注意する必要がある。一例を図-6 に示す。

2.8 透過写真の具備すべき条件

2.8.1 撮影された透過写真においては、透過度計識別度が表-4 に示す値以下でなければならない。透過度計識別度は、つぎの式によって求める。

$$\text{透過度計識別度} = \frac{\text{試験部において認められる透過度計の最小の線径(mm)}}{\text{材厚(mm)}} \times 100\%$$

ただし、普通級において材厚 5 mm 未満、特級において材厚 6.6 mm 未満では、直径 0.1 mm の線が認められ

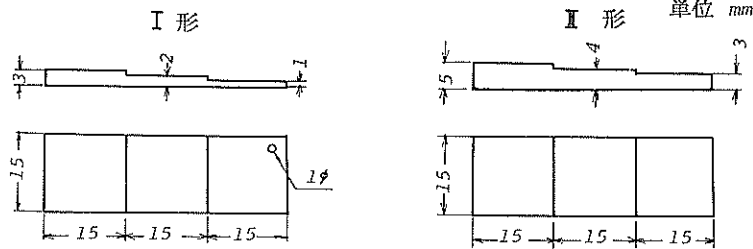


図-4

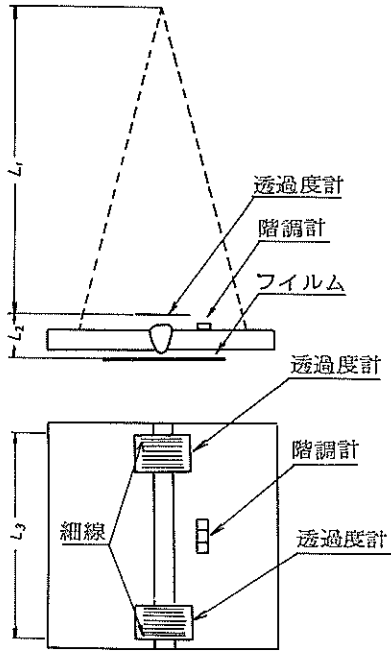


図-5

表 4

像質	材厚mm	透過度計識別度%
普通級	—	2.0 以下
特級	100 以下	1.5 以下
	100 をこえるもの	1.3 以下

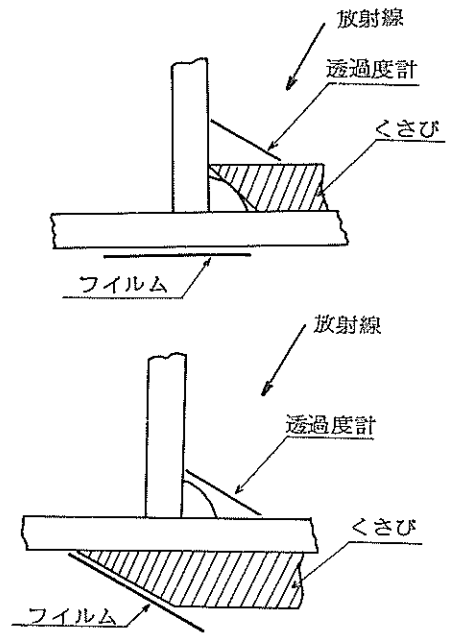


図-6

表 5

材厚 mm	写真濃度範囲
50 以下	1.0以上 3.5以下
50をこえ100 以下	1.5以上 3.5以下
100をこえるもの	2.0以上 3.5以下

ればよい。

2.8.2 試験部の欠陥以外の部分の写真濃度は、表-5に示す範囲に入っていないなければならない。

2.8.3 撮影条件を決定するため階調計を使用した透過写真においては、つぎに示すような階調計の測定箇所の濃度差が表-6に示す値以上でなければならない。

表 6

材厚 mm	3.0 以下		3.0 をこえ 6.0 以下		6.0 をこえ 10.0 以下		10.0 をこえ 15.0 以下		15.0 をこえ 20.0 以下	
	普通級	特級	普通級	特級	普通級	特級	普通級	特級	普通級	特級
濃度差	0.45	0.60	0.30	0.40	0.20	0.25	0.13	0.17	0.10	0.13

(1) 材厚を表-1により求めた場合

(a) 余盛りのない場合は、階調計に近接した母材の部分の濃度と階調計 I 形の 1.0 mm の部分の中央

の濃度を測定し、その濃度差を求める。

(b) 片面に余盛のある場合は、階調計 I 形の 2.0mm および 3.0 mm の各部分の中央の濃度を測定し、その濃度差を求める。

(c) 両面に余盛のある場合は、階調計 II 形の 4.0mm および 5.0 mm の各部分の中央の濃度を測定し、その濃度差を求める。

(2) 材厚を測定した場合

材厚から母材の厚さを差し引いた厚さ (mm) の小数点以下を切り捨てた値に対応する階調計の部分の中央の濃度とそれより 1 mm 厚い部分の中央の濃度を測定し、その濃度差を求める。このさい階調計の II 形でも厚さが不足する場合は、1 mm の整数倍の厚さの板を階調計の下に加えて撮影する。

2.8.4 連続する撮影において、撮影条件に変化のないことを確認するために階調計を使用した透過写真にお

いては、階調計の示す濃度差が表-6に示す値の80%以上でなければならない

2.9 透過写真の観察

透過写真は、暗所においてじゅうぶん明るいフィルム観察器を用いて観察する。このさい、原則としてフィルム寸法に適合した固定マスクを使用する。また、フィル

ム観察器は、明るさを調節できることがのぞましい。

2.10 その他

- (1) 撮影された透過写真が記録と照合できるように記号を同時に撮影する。
- (2) 撮影にさいしては絞りをを用い、照射野を必要以上に大きくしないことがのぞましい。

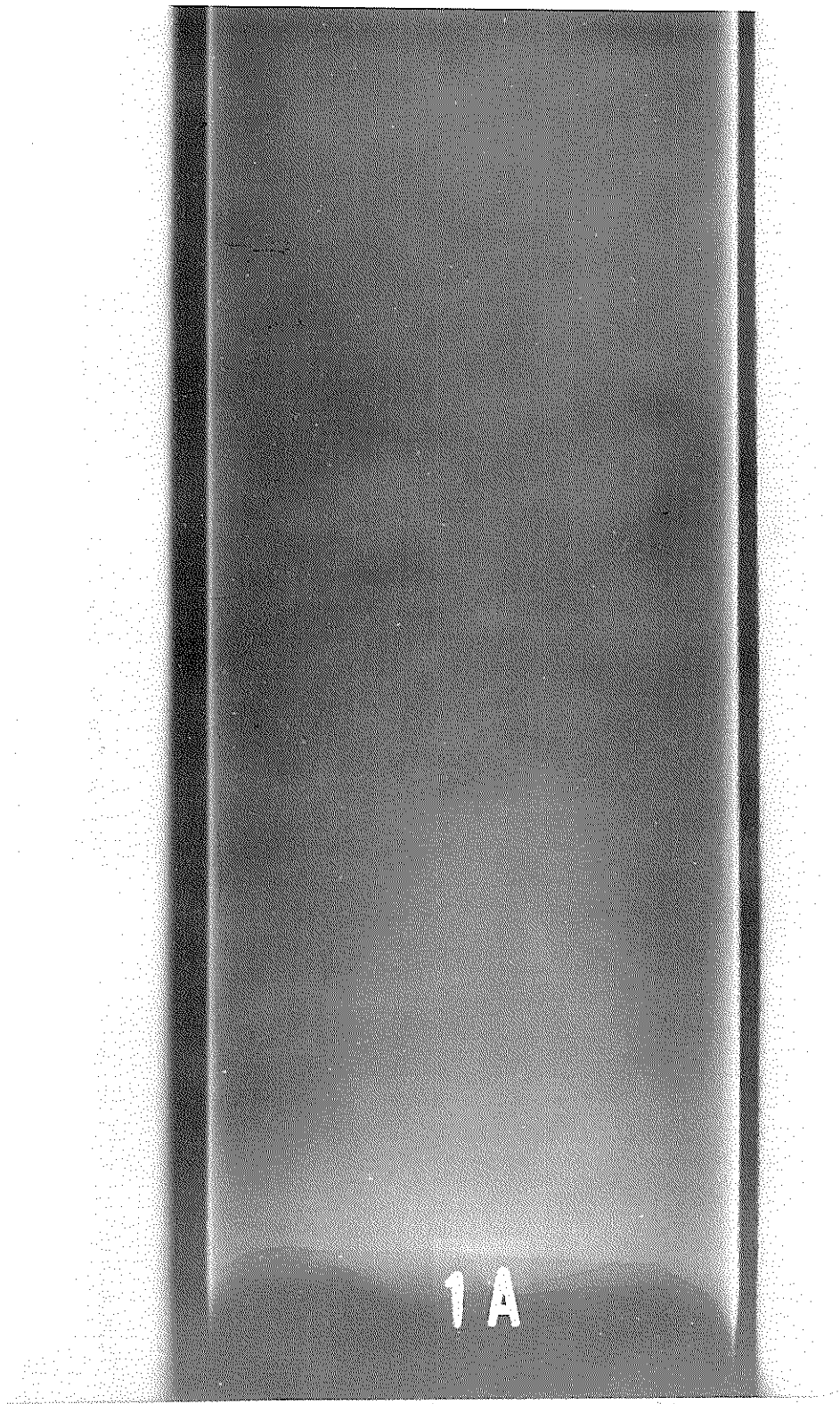
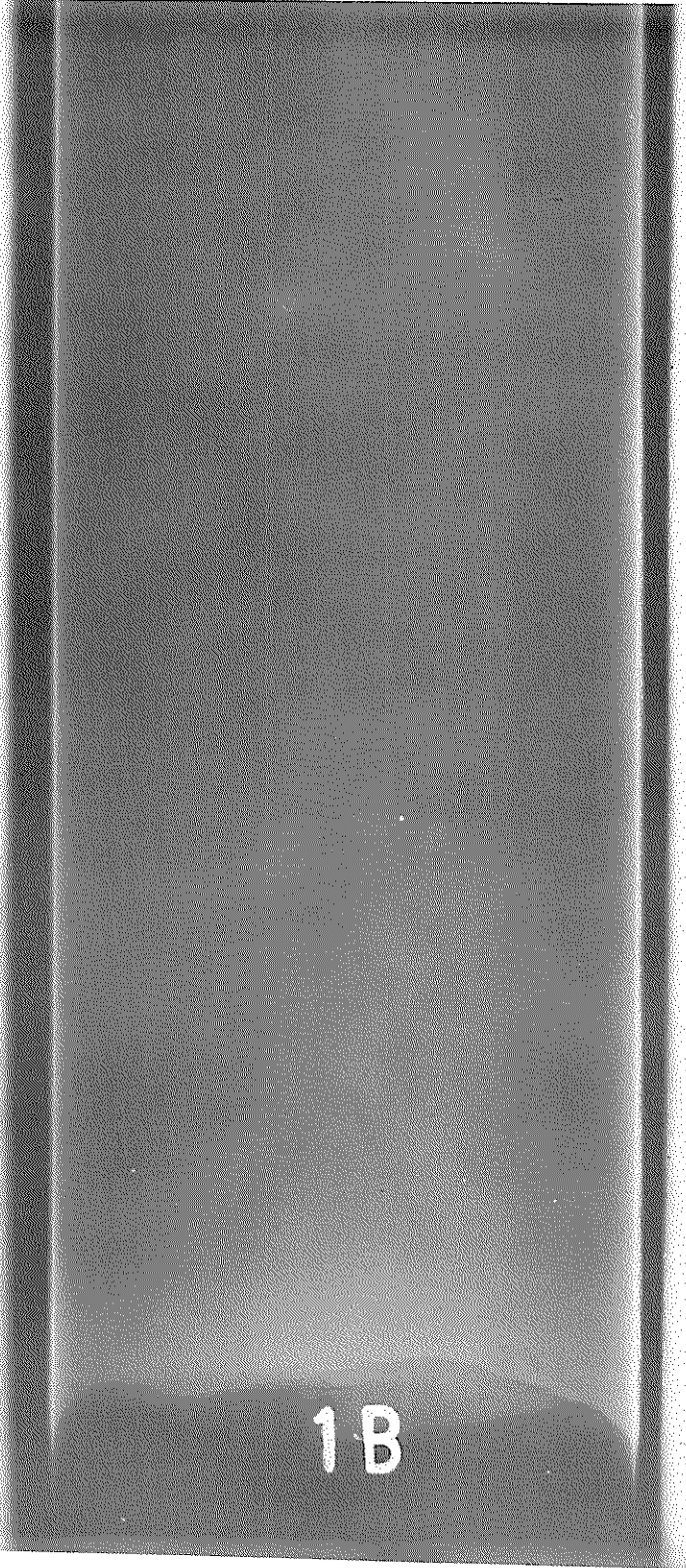


写真-6.1(a) 均質(大阪湾56-8, T-10, 1A~2A)



1B

写真一 6.1(b) 均質 (大阪湾 56-8, T-10, 1B~2B)

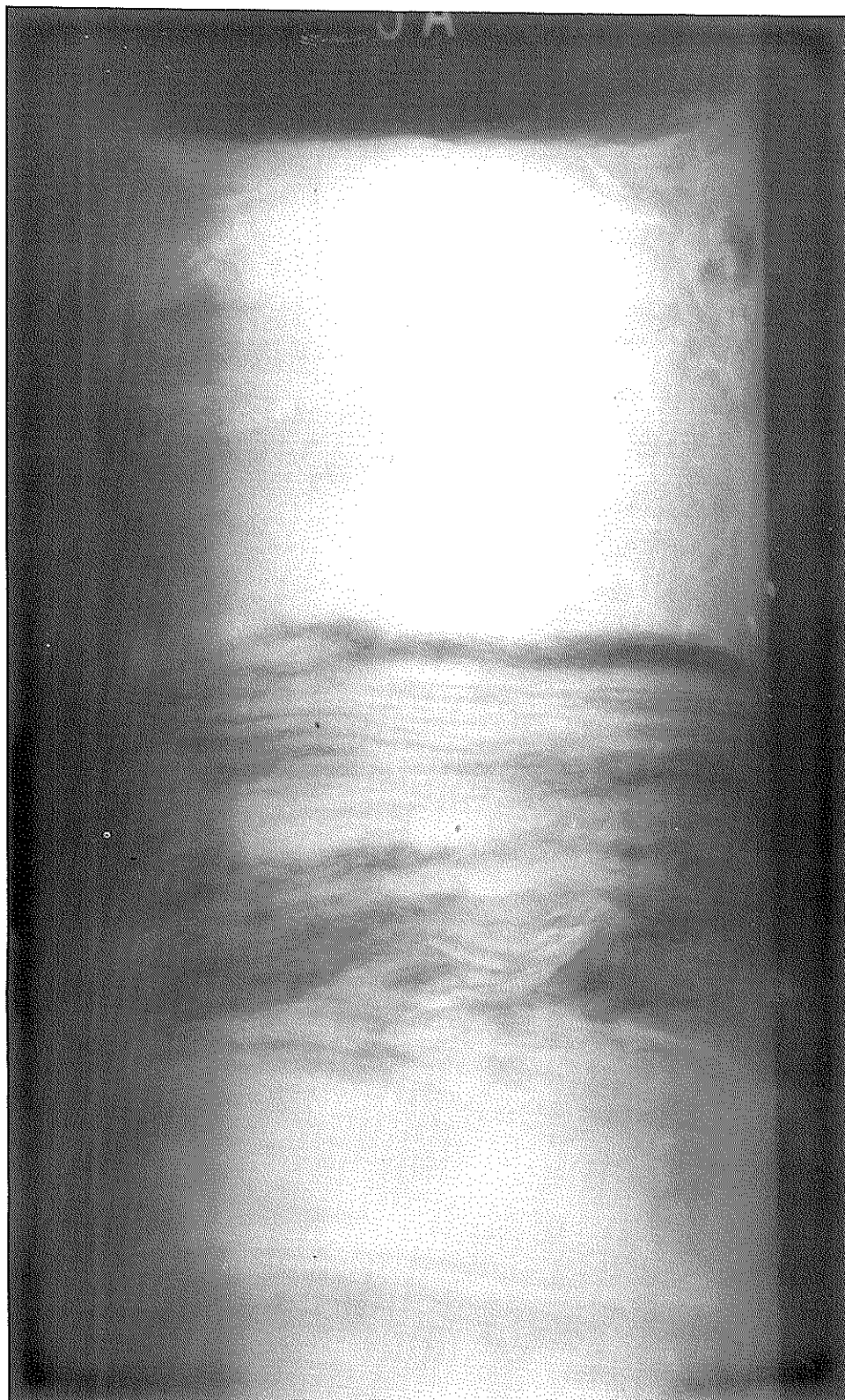


写真-6.2(a) 層状(釜石灣D-28-5, 2A~3A)

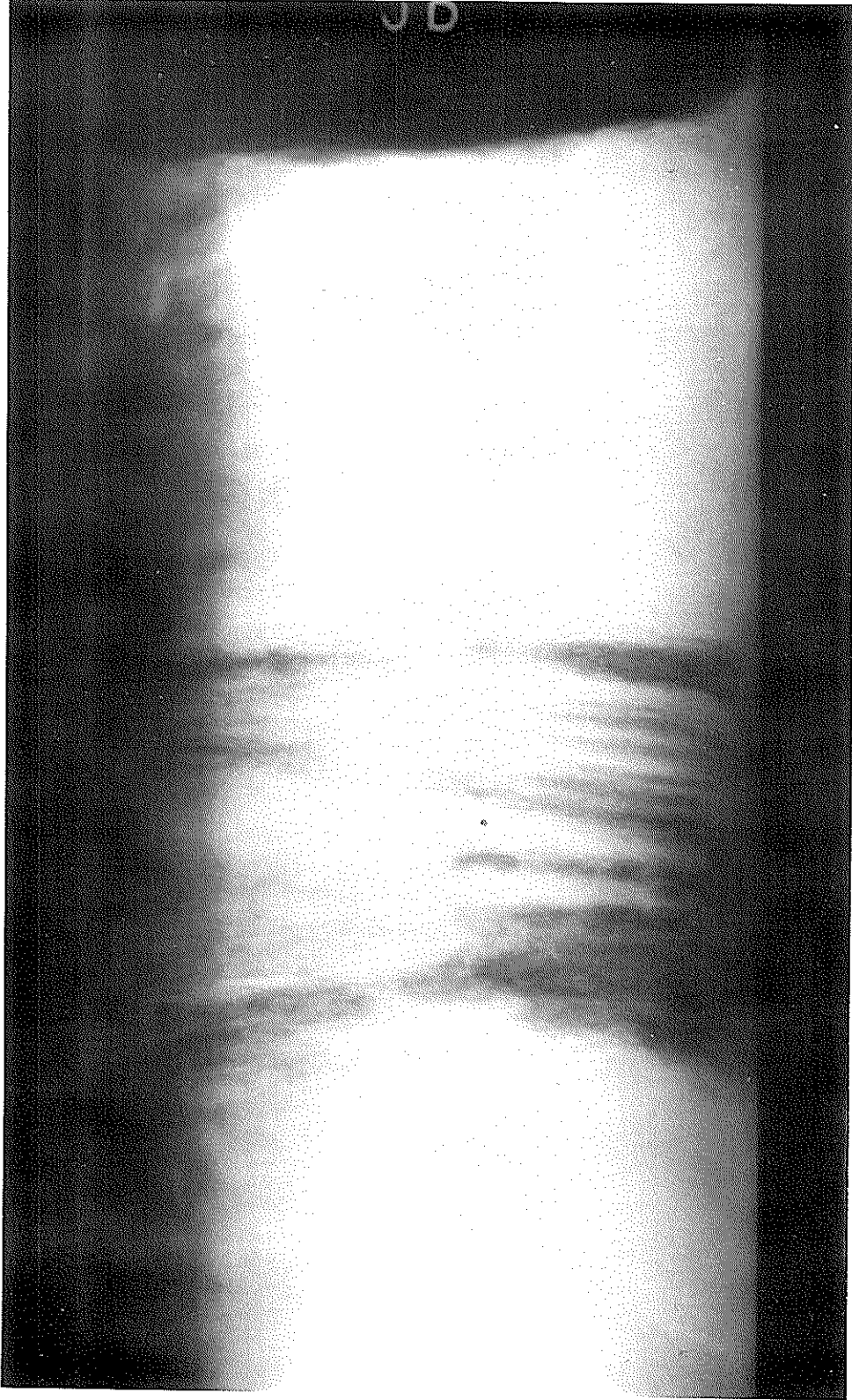


写真-6.2(b) 層状(釜石湾D-28-5, 2B~3B)

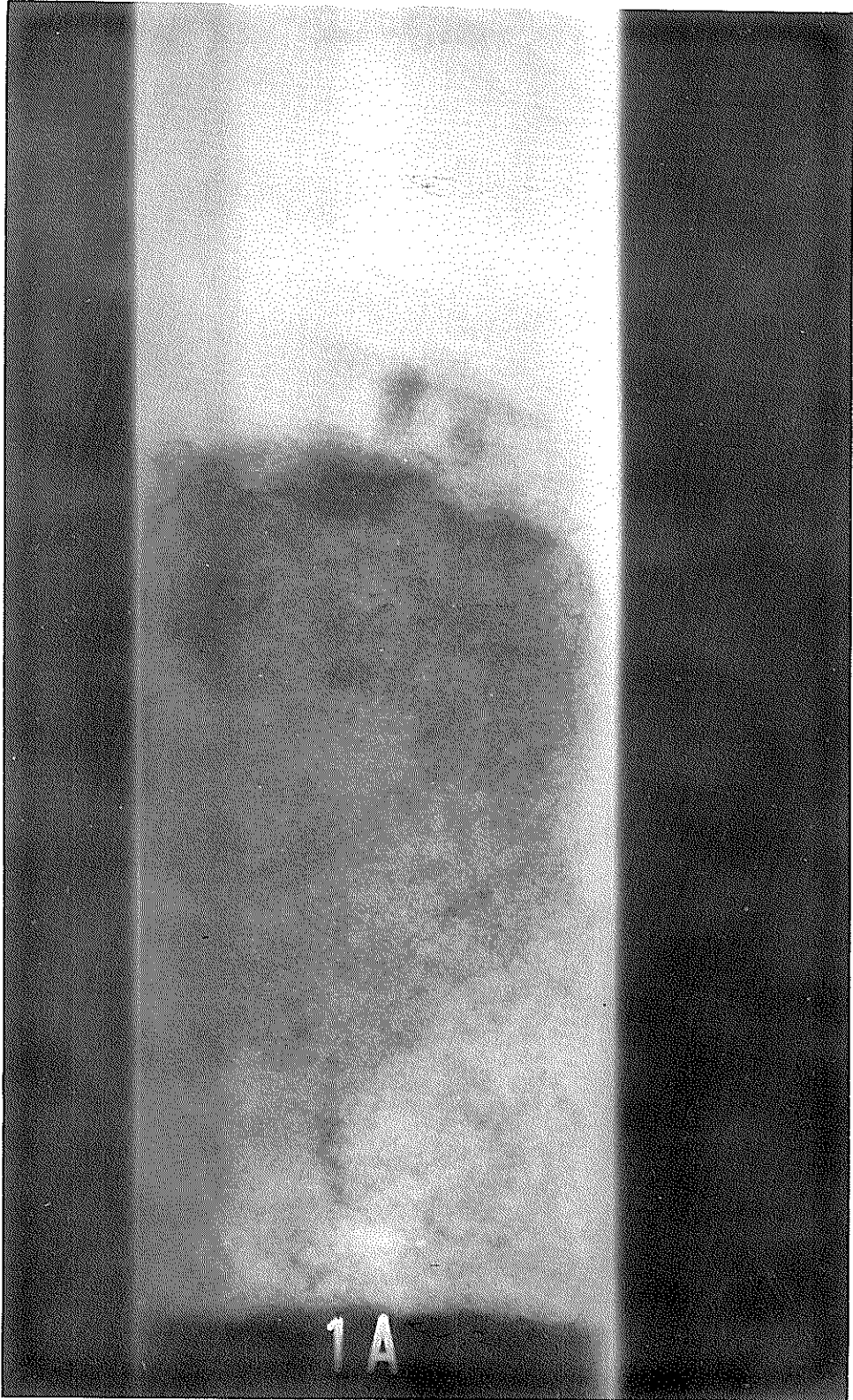
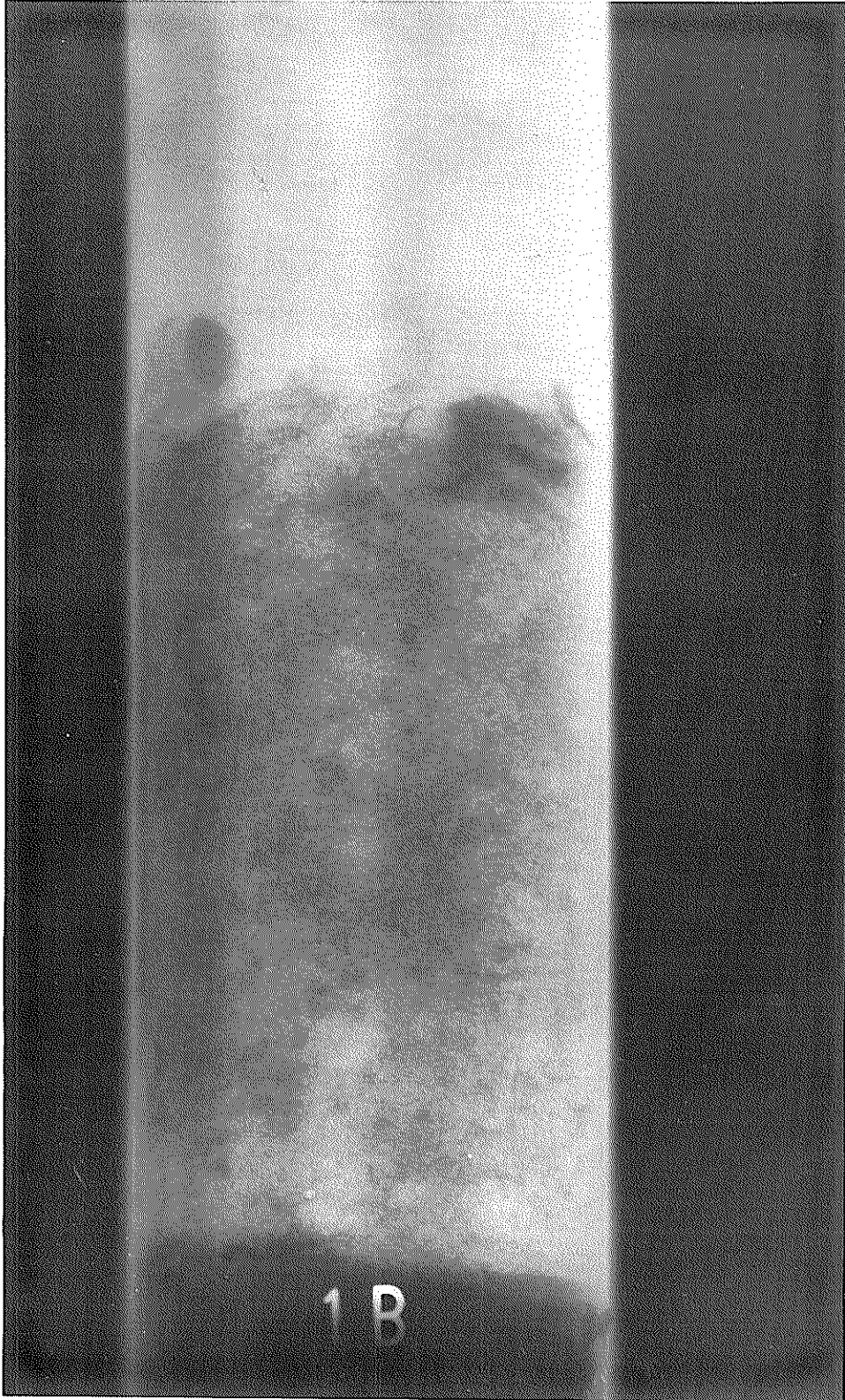


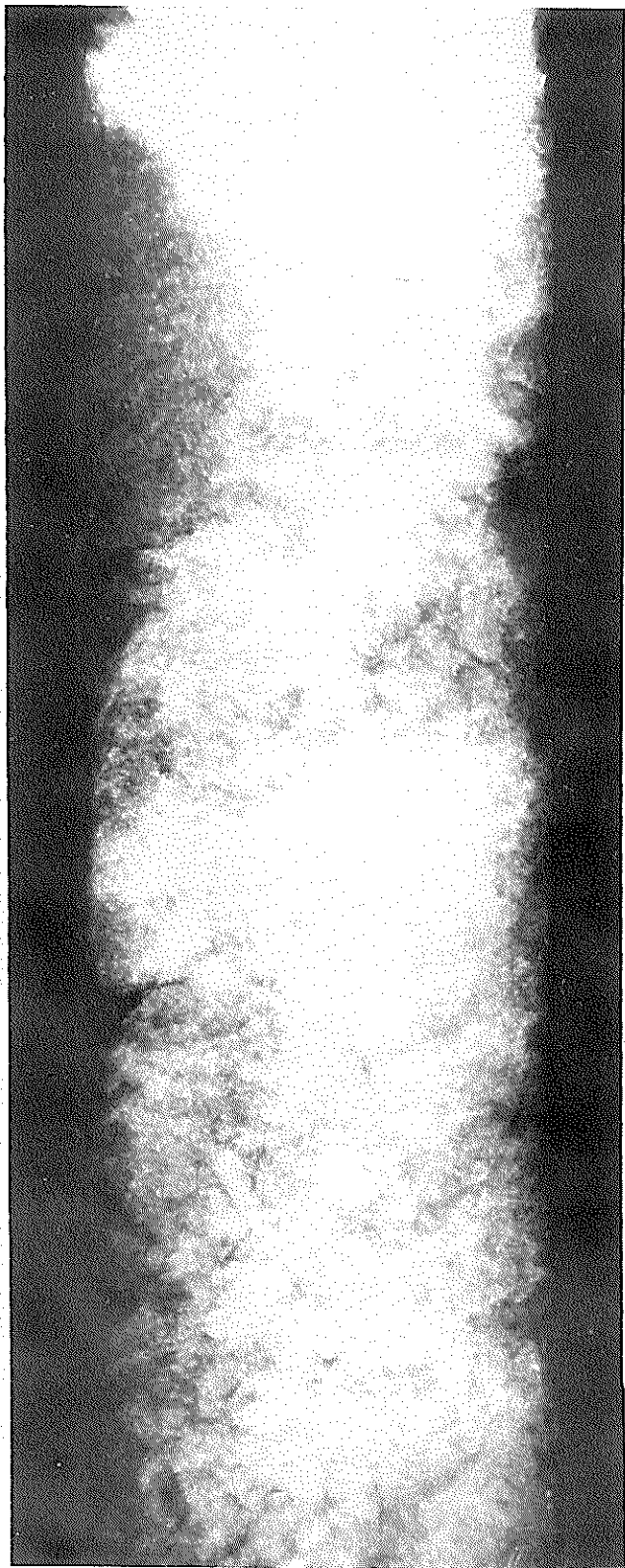
写真-6.3(a) 土性変化(錦海湾56-5, KI-3, 1A~2A)



写真一 6.3 (b) 土性変化 (錦海湾 56-5, KI-3, 1B~2B)



写真-6.4(a) 粒状(鹿儿島新港TA-1, 1A~2A)



写真一 6.4 (b) 粒状(鹿兒島新港TA-1, 1B~2B)

写真一6.5(a) クラック（大阪港56-2, D-8, 1A~2A）



写真一 6.5 (b) クラック (大阪湾 56-2, D-8, 1B~2B)

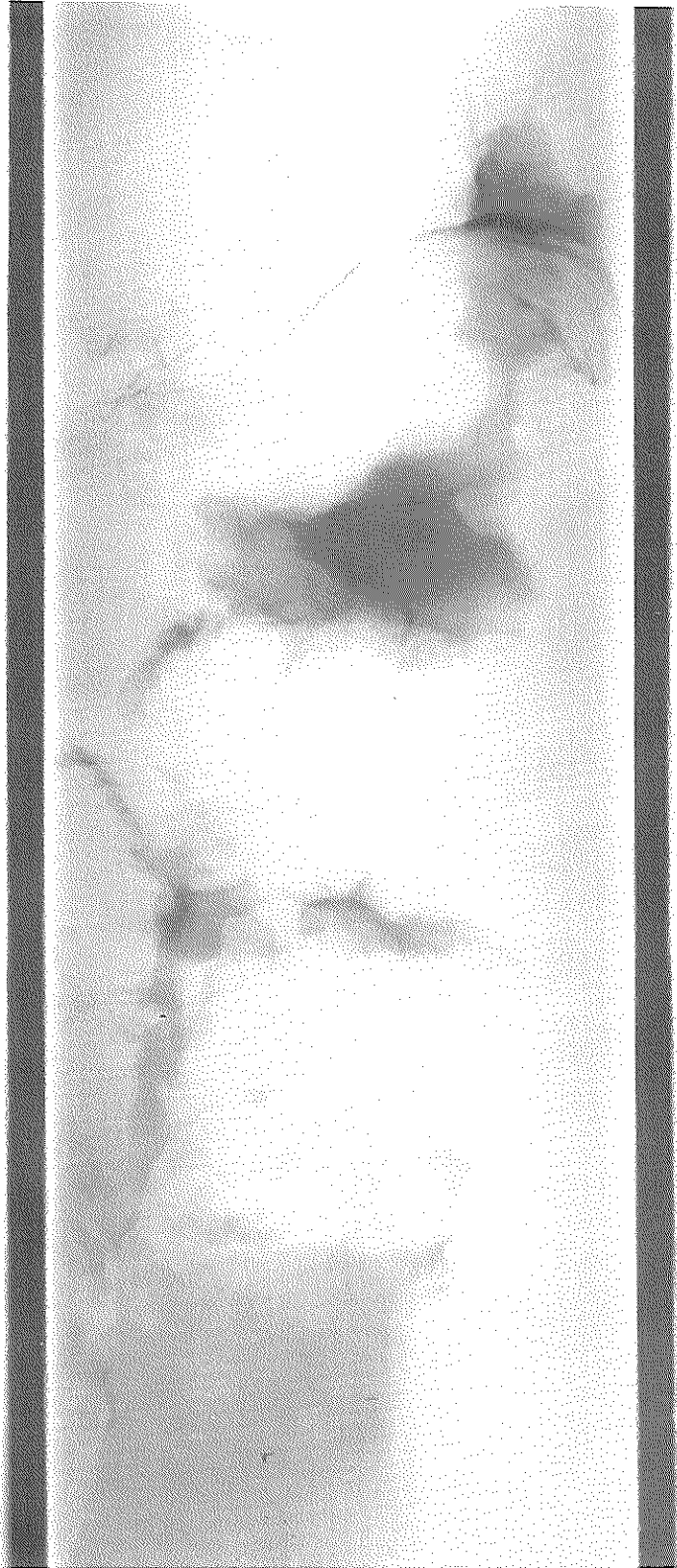
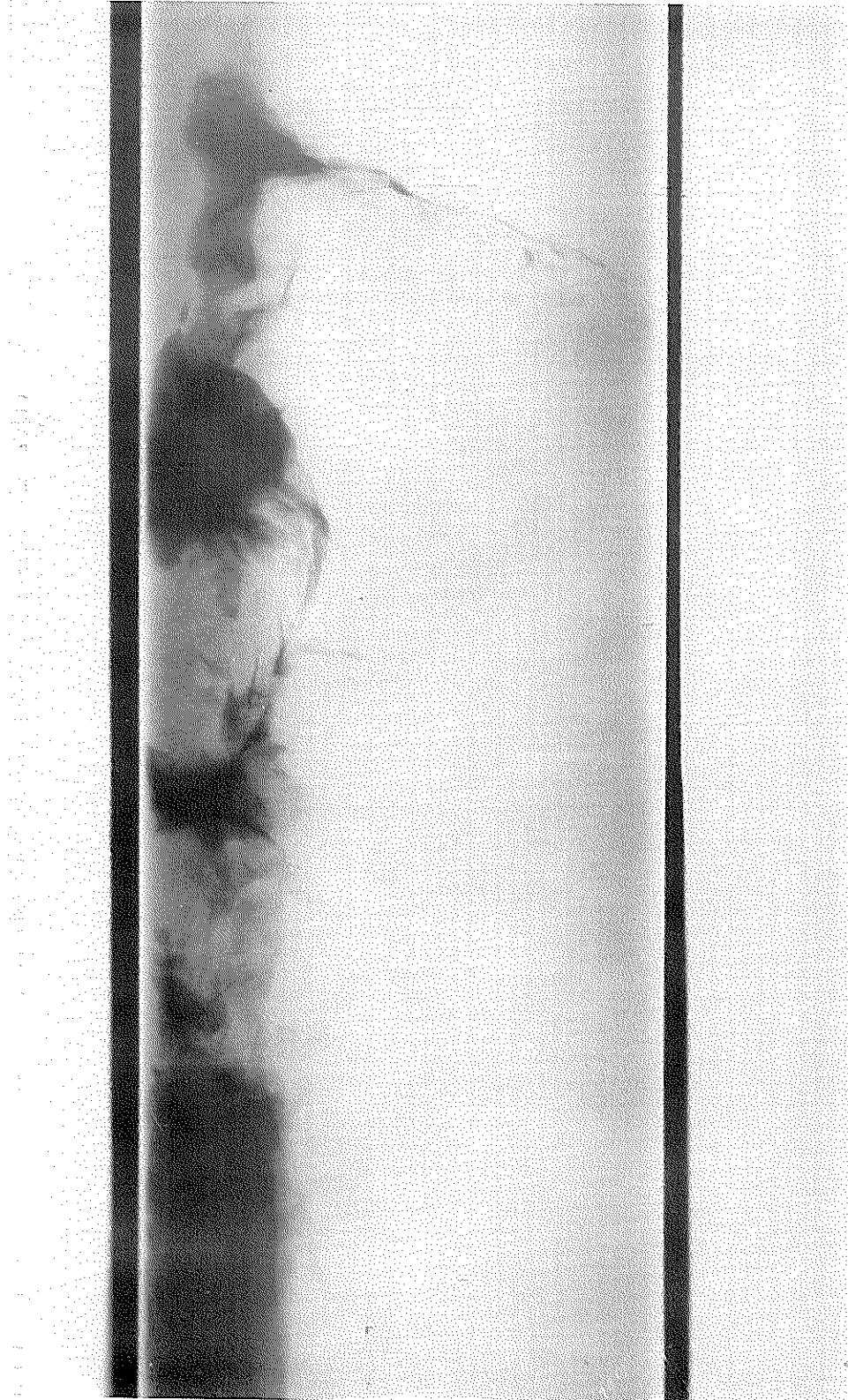


写真-6.6(a) 密度差(大阪湾56-4, S-1, 1A~2A)



写真一 6.6 (b) 密度差 (大阪湾 56-4, S-1, 1B~2B)

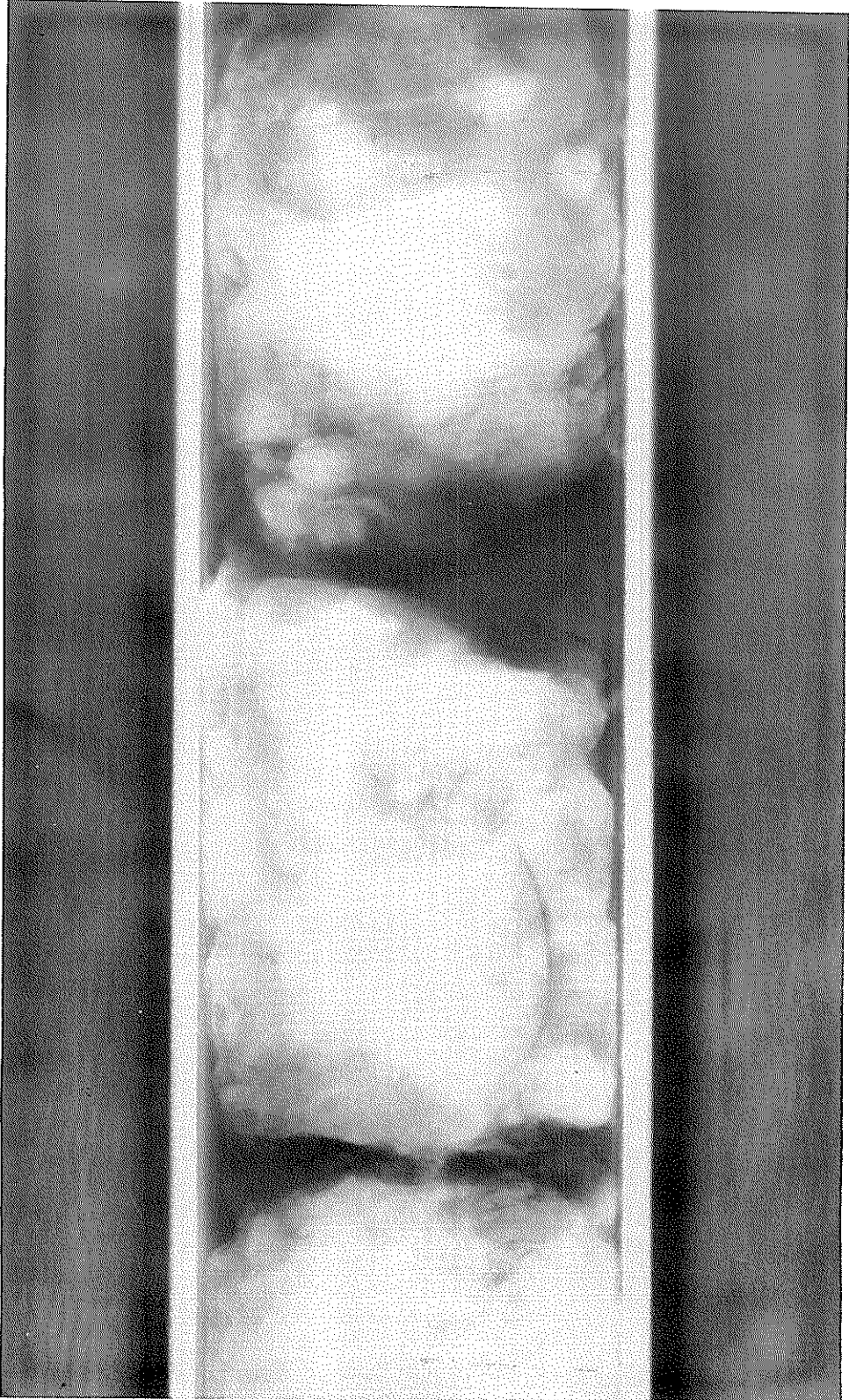


写真-6.7(a) 間隙(那覇港56-1, T-13, 3A~4A)

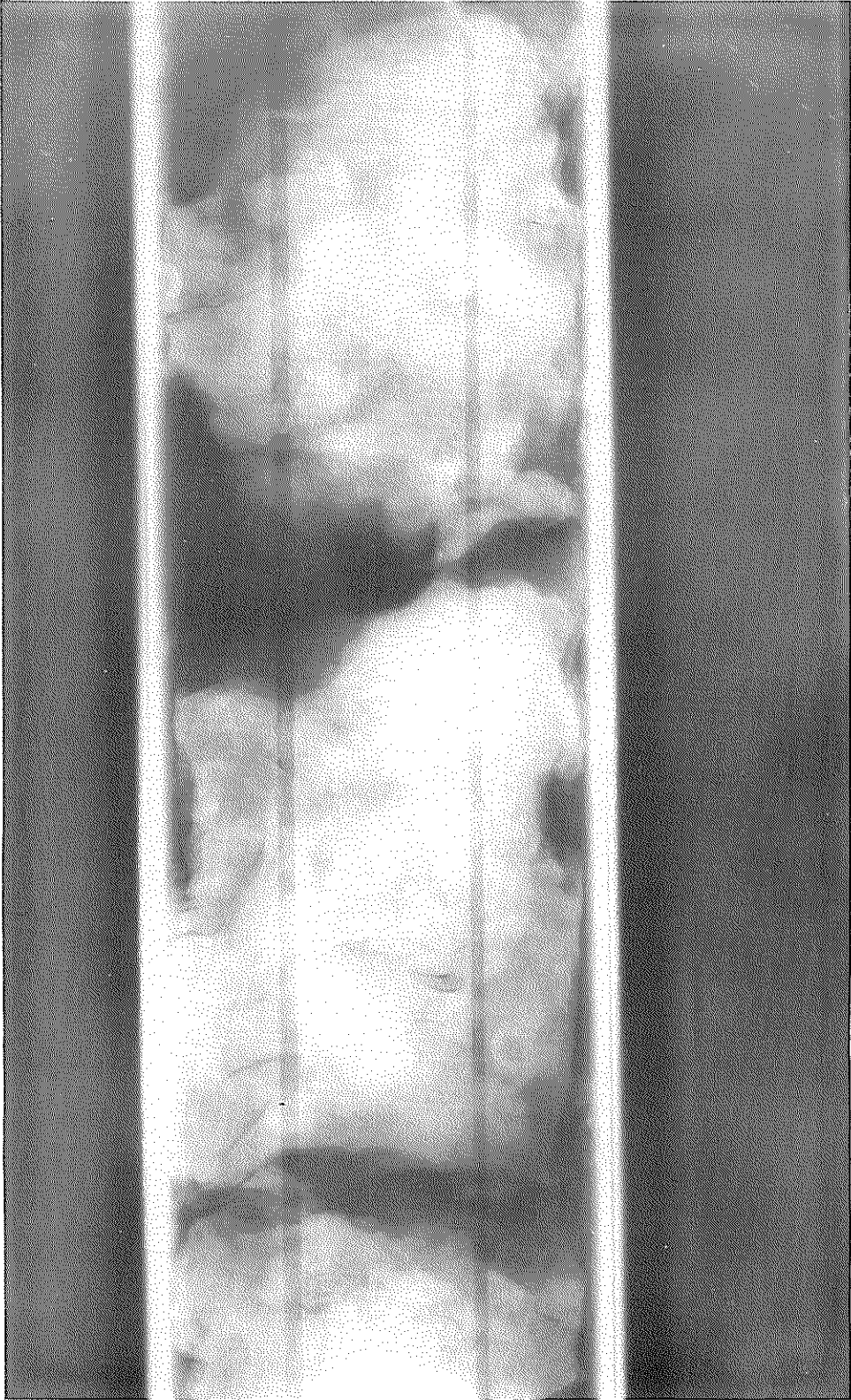


写真-6.7(b) 間隙(那覇港56-1, T-13, 3B~4B)

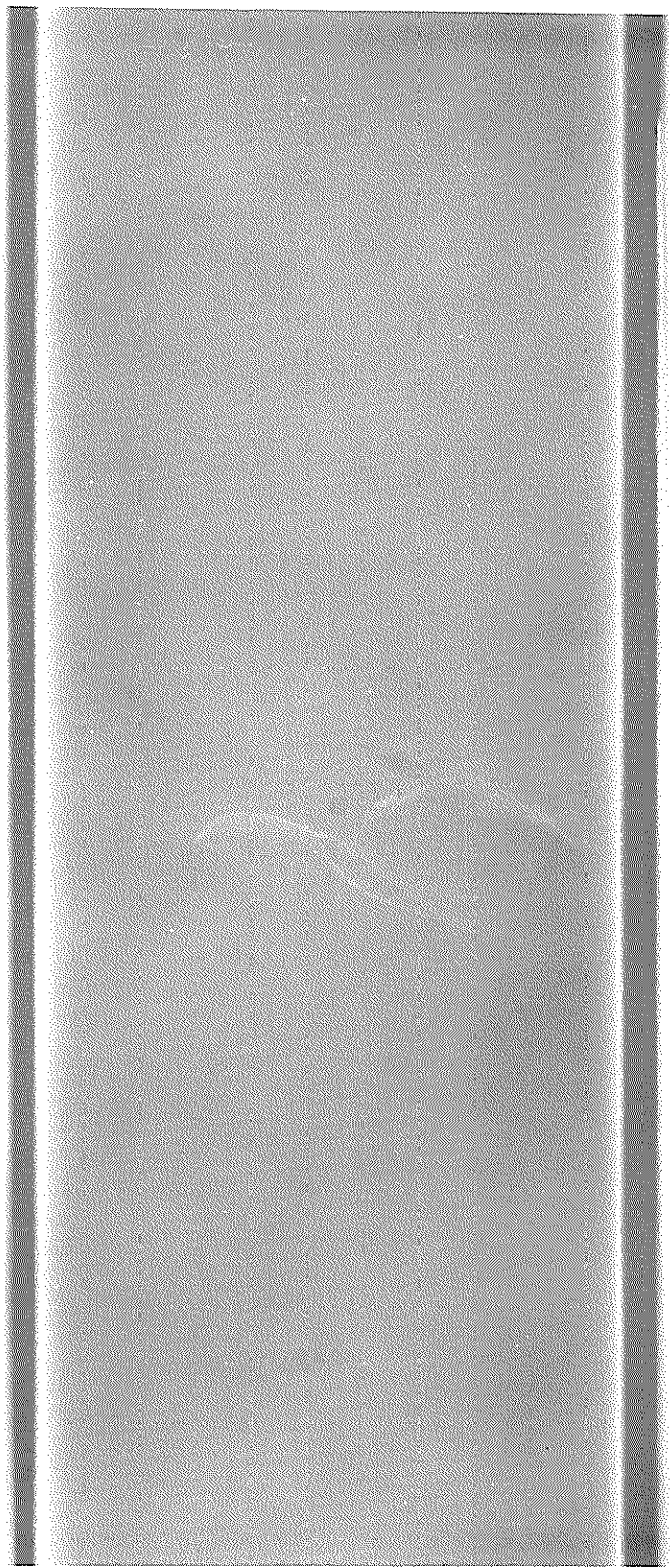


写真-6.8(a) 貝殻(大阪湾56-8, D-4, 1A~2A)

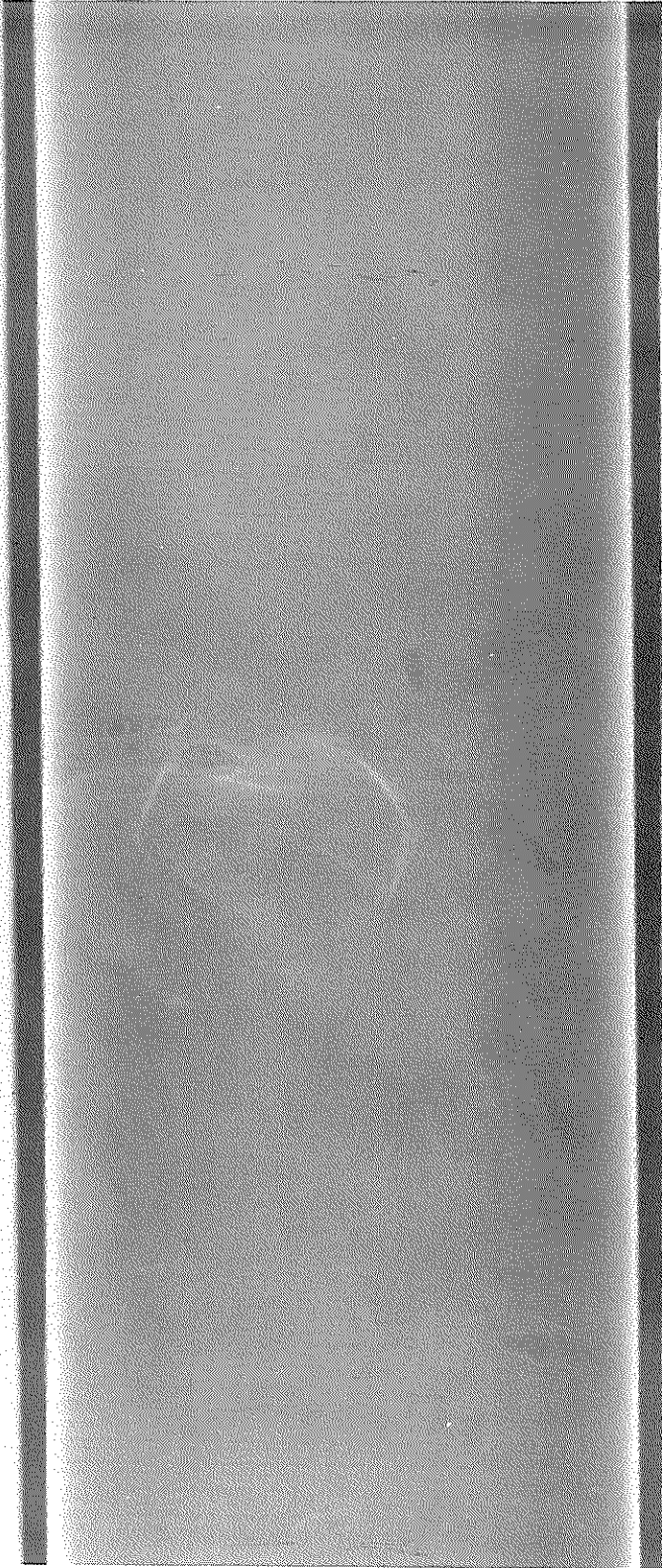
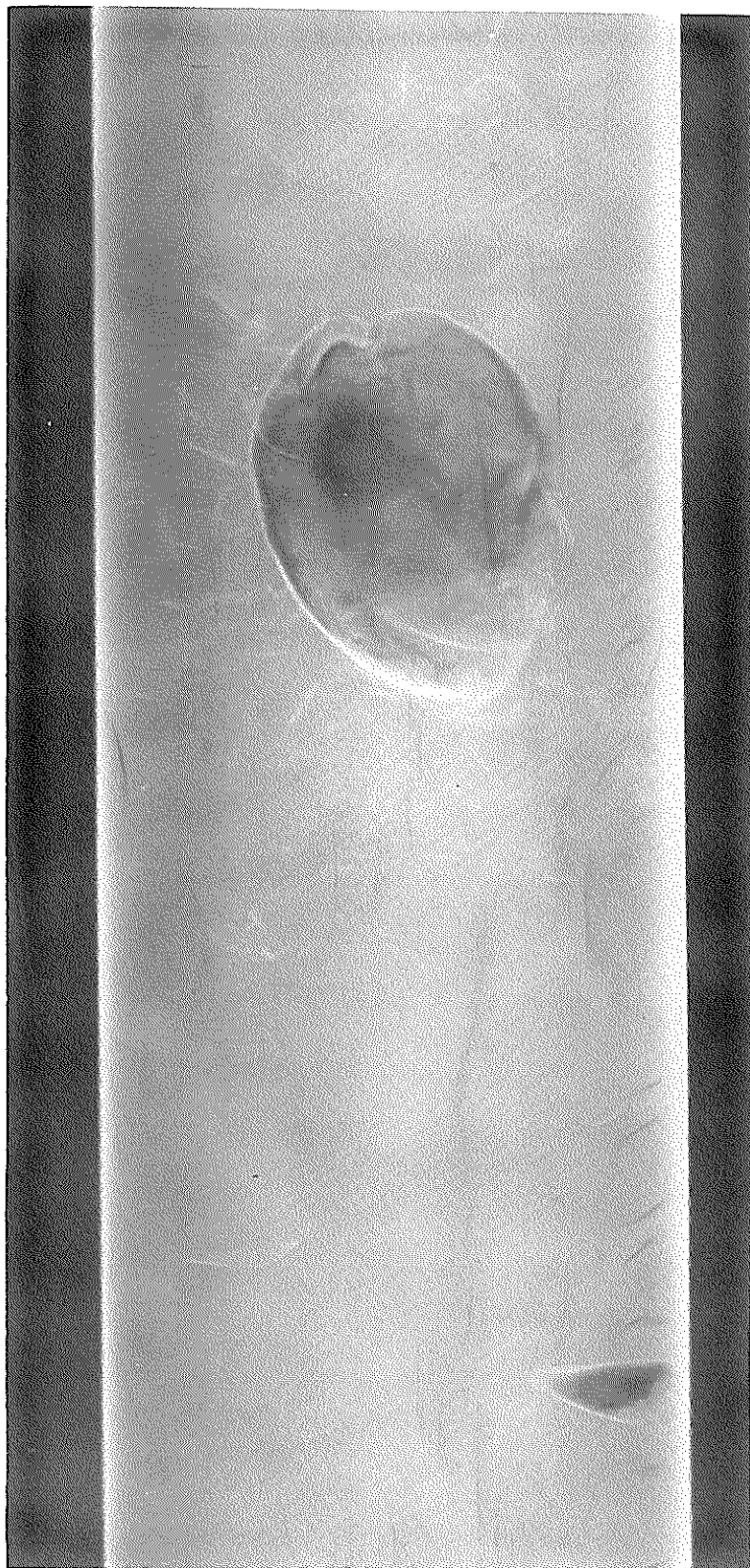


写真-6.8(b) 貝殻(大阪湾56-8, D-4, 1B~2B)



写真一6.9 貝殻(錦海湾57-1, T-2)

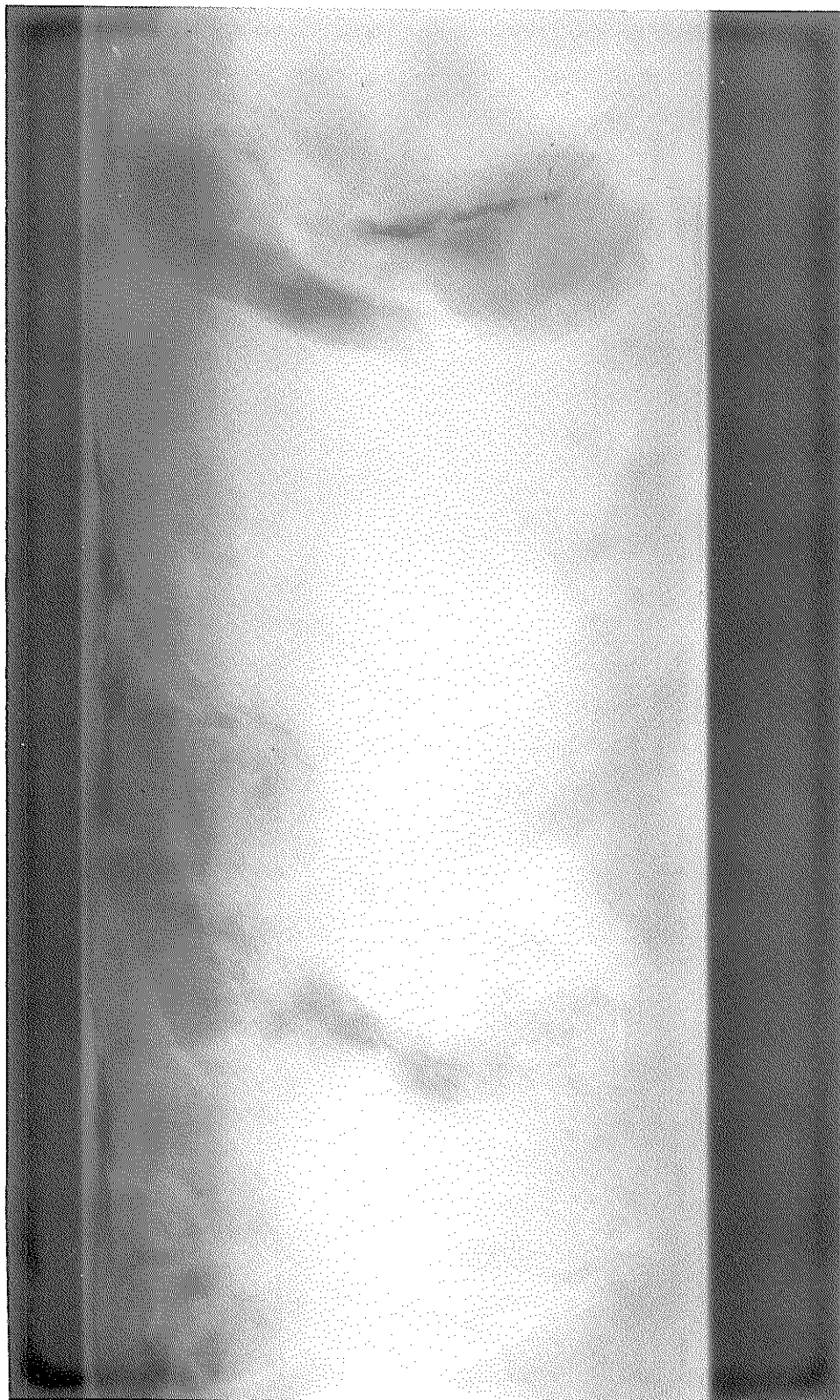
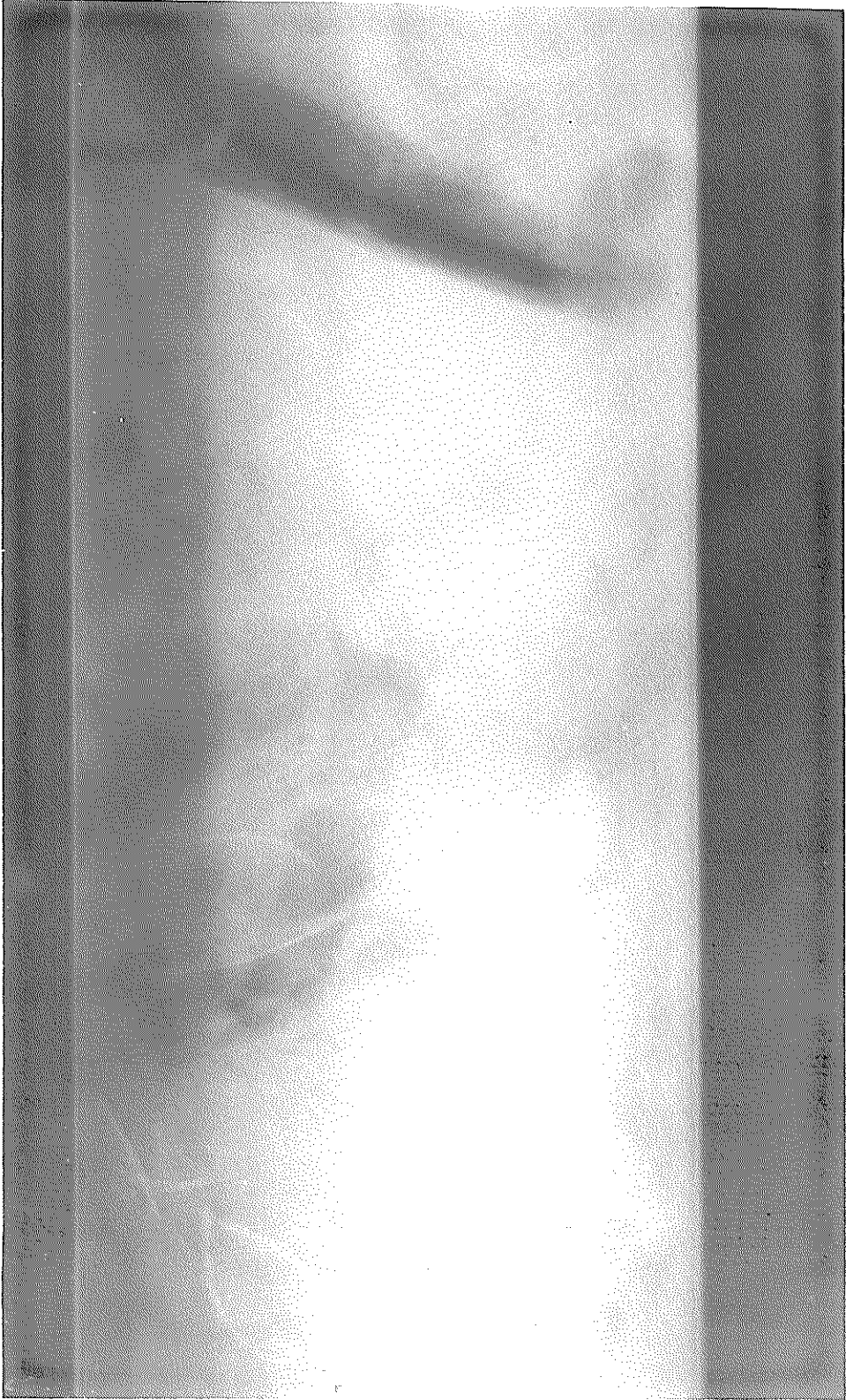


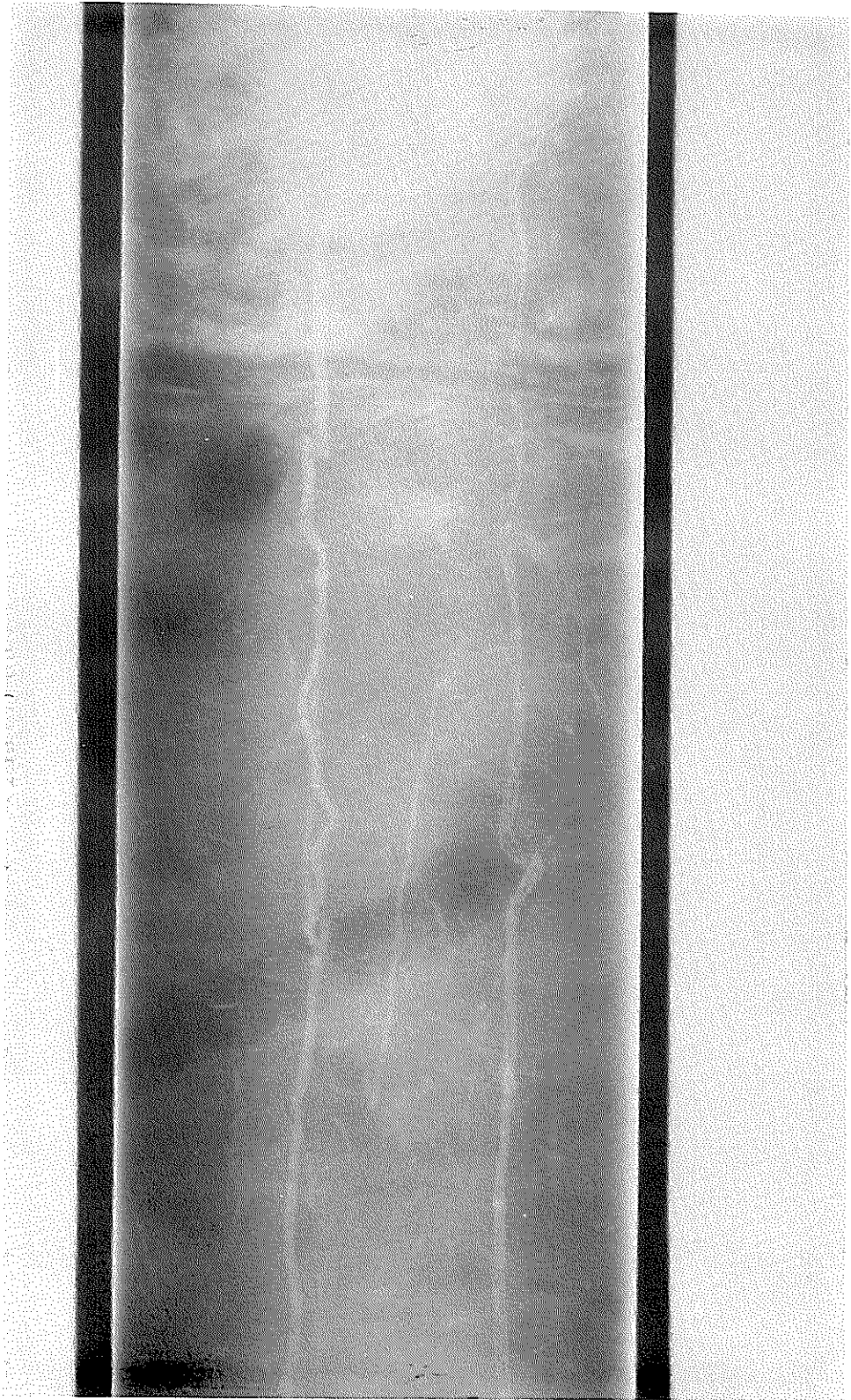
写真-6.10(a) 木片(釜石酒田-36-1, 2A~3A)



写真一6. 10 (b) 木片 (釜石湾R-36-1, 2 B~3 B)



写真-6.11(a) 有機物(大阪湾56-1, D-2, 1A~2A)



写真一 6.11 (b) 有機物 (大阪湾 56-1, D-2, 1B~2B)。

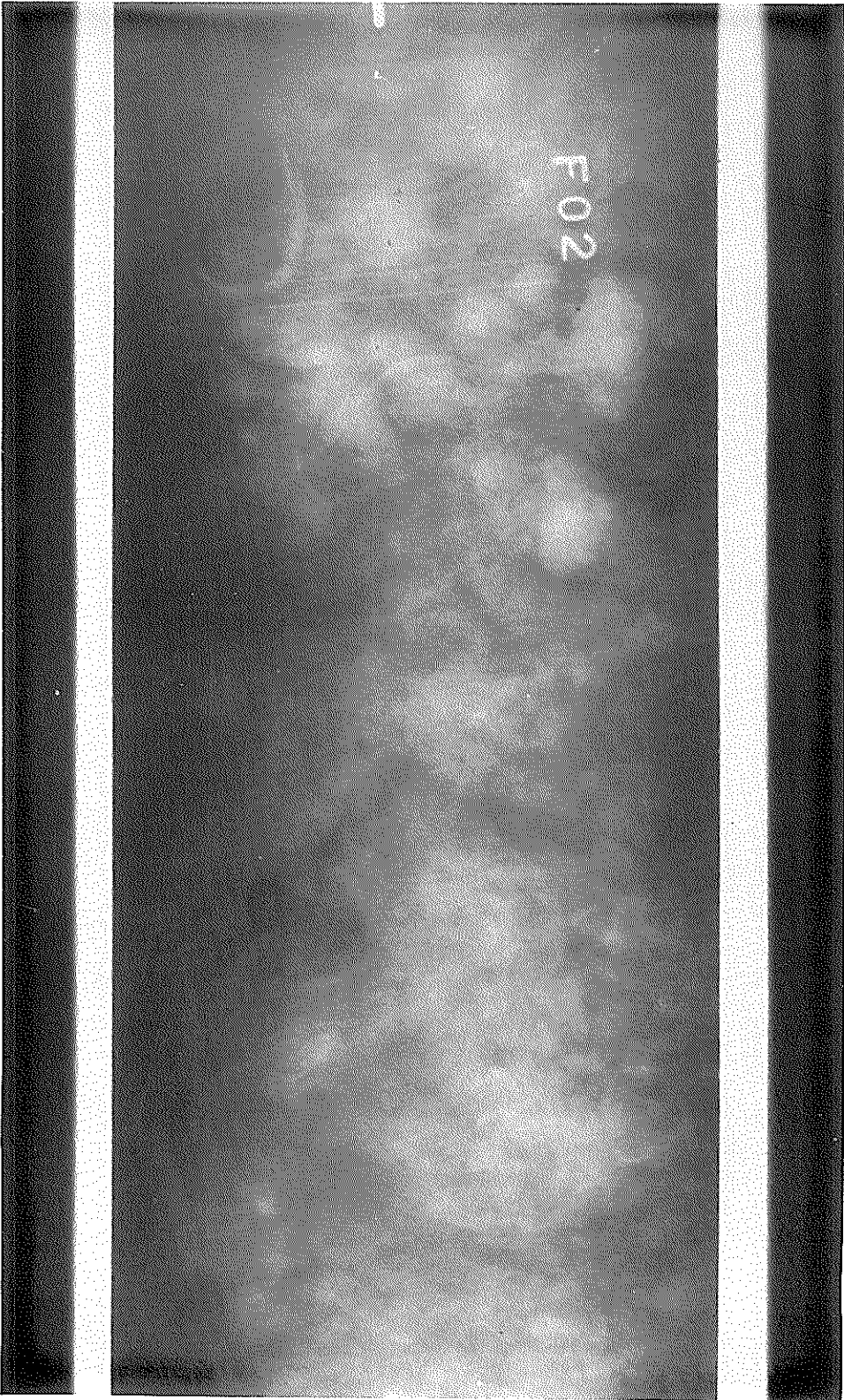


写真-6.12(a) 砂礫(大阪湾56-9, T-41, 2A)

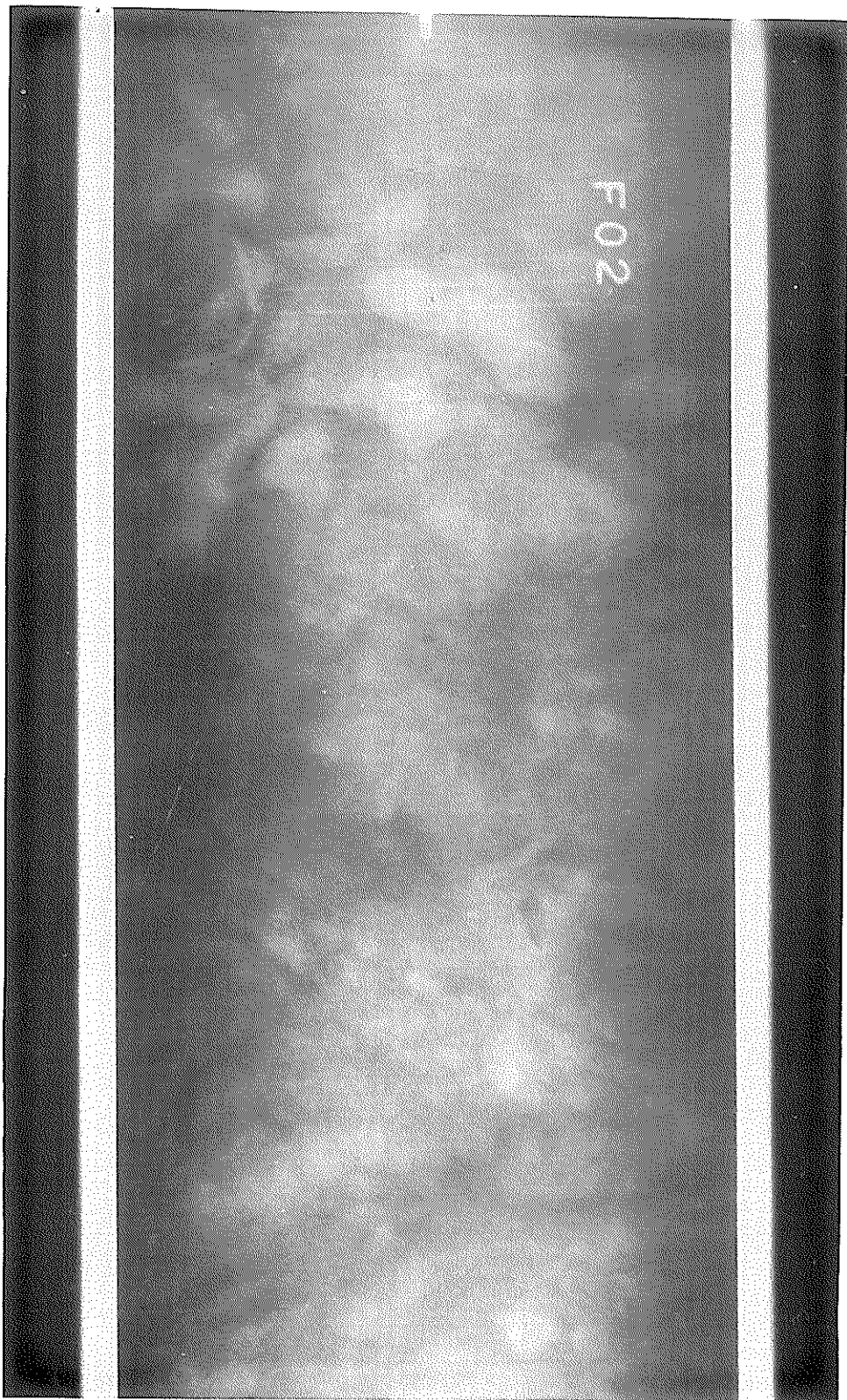
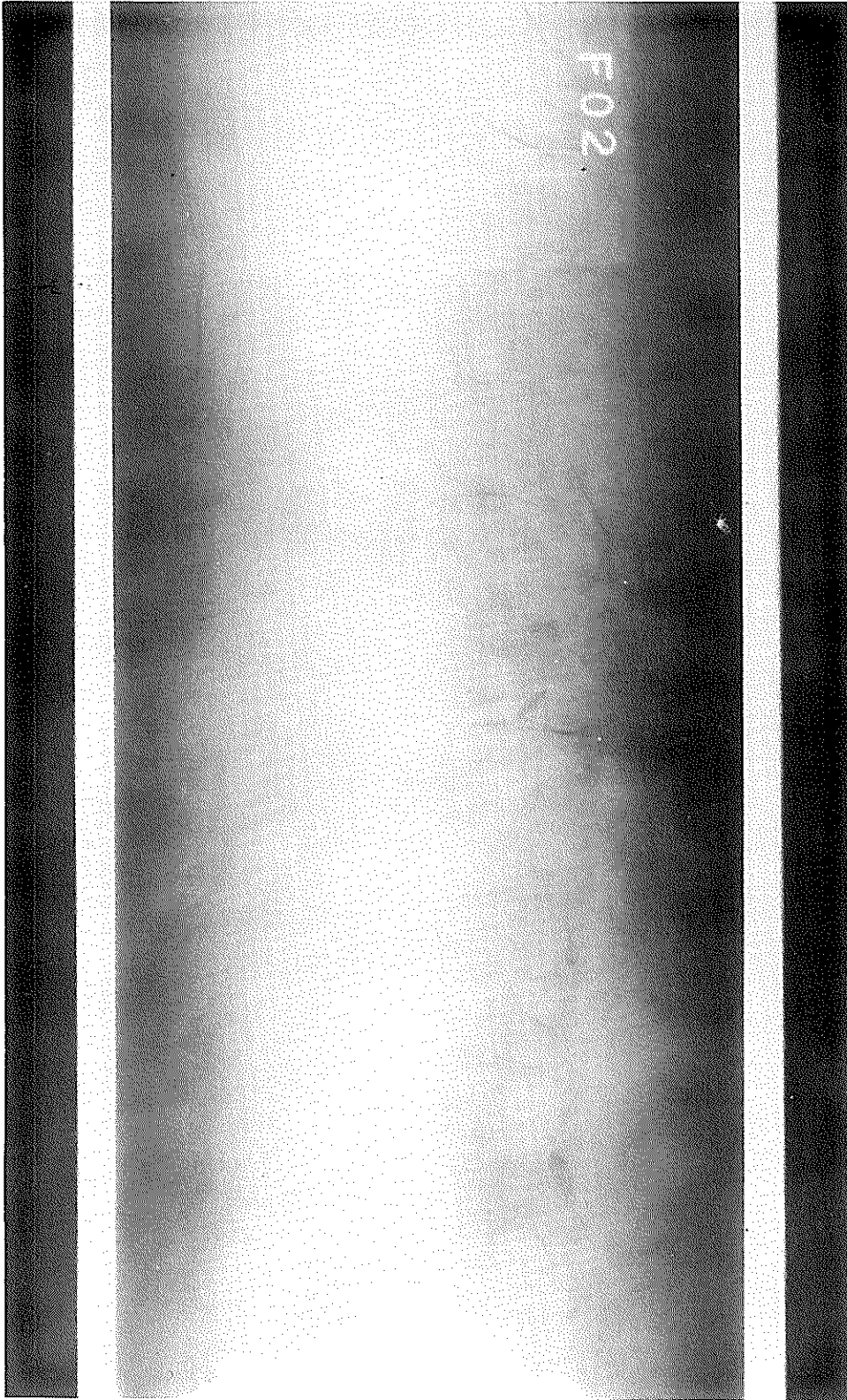
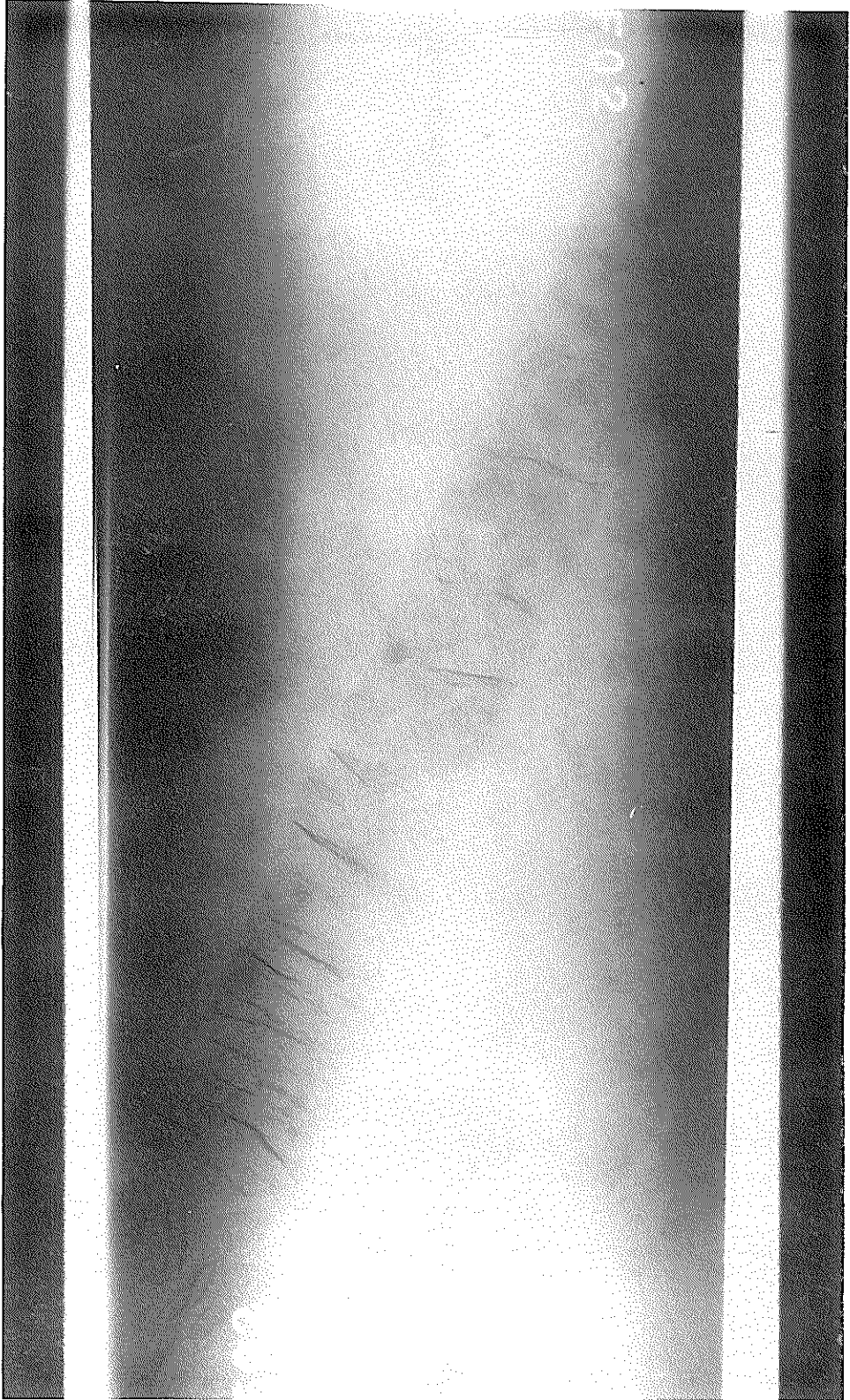


写真-6.12(b) 砂礫(大阪湾56-9, T-41, 2D)



写真一6.13(a) ウォームホール(大阪湾56-9, T-28, 2E)



写真一6.13(b) ウォームホール(大阪湾56-9, T-28, 2B)

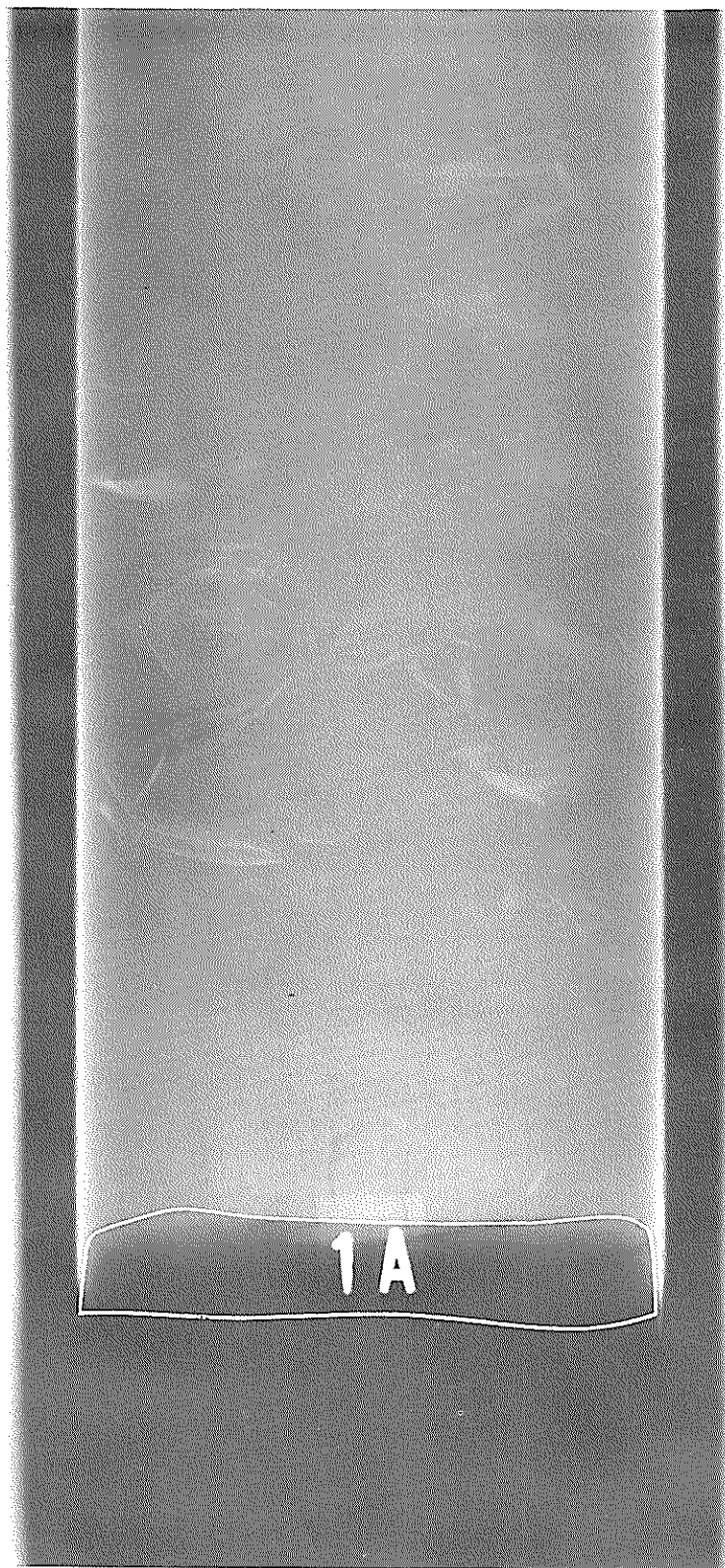
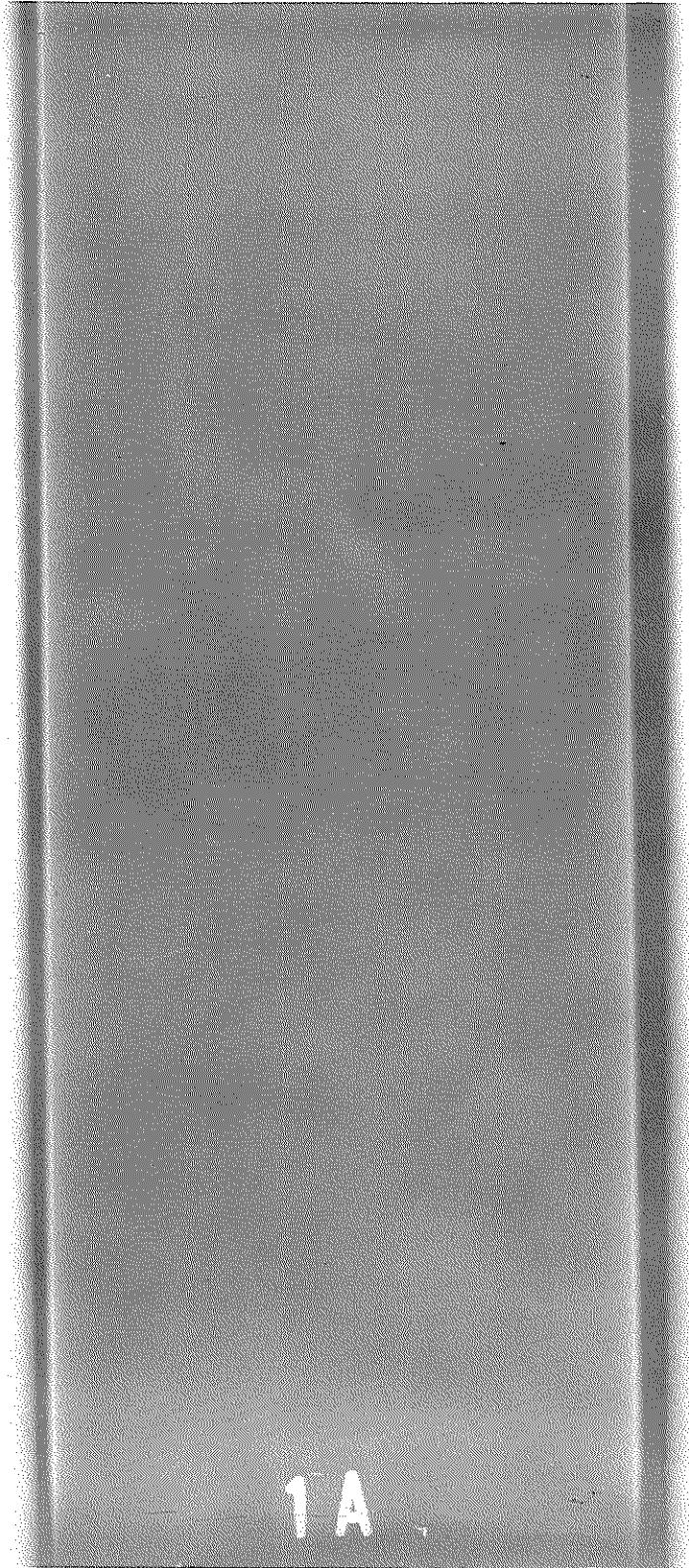


写真-6.14 (a) パラフィンシール (錦海湾 56-5, KI-1, 1A~2A, 枠内はパラフィンシール)



写真-6.14 (b) パラフィンシール (錦海湾 56-5, KI-1, 1B~2B, 枠内はパラフィンシール)



写真一6.15(a) 均質(大阪湾56-1, D-9, 1A~2A)

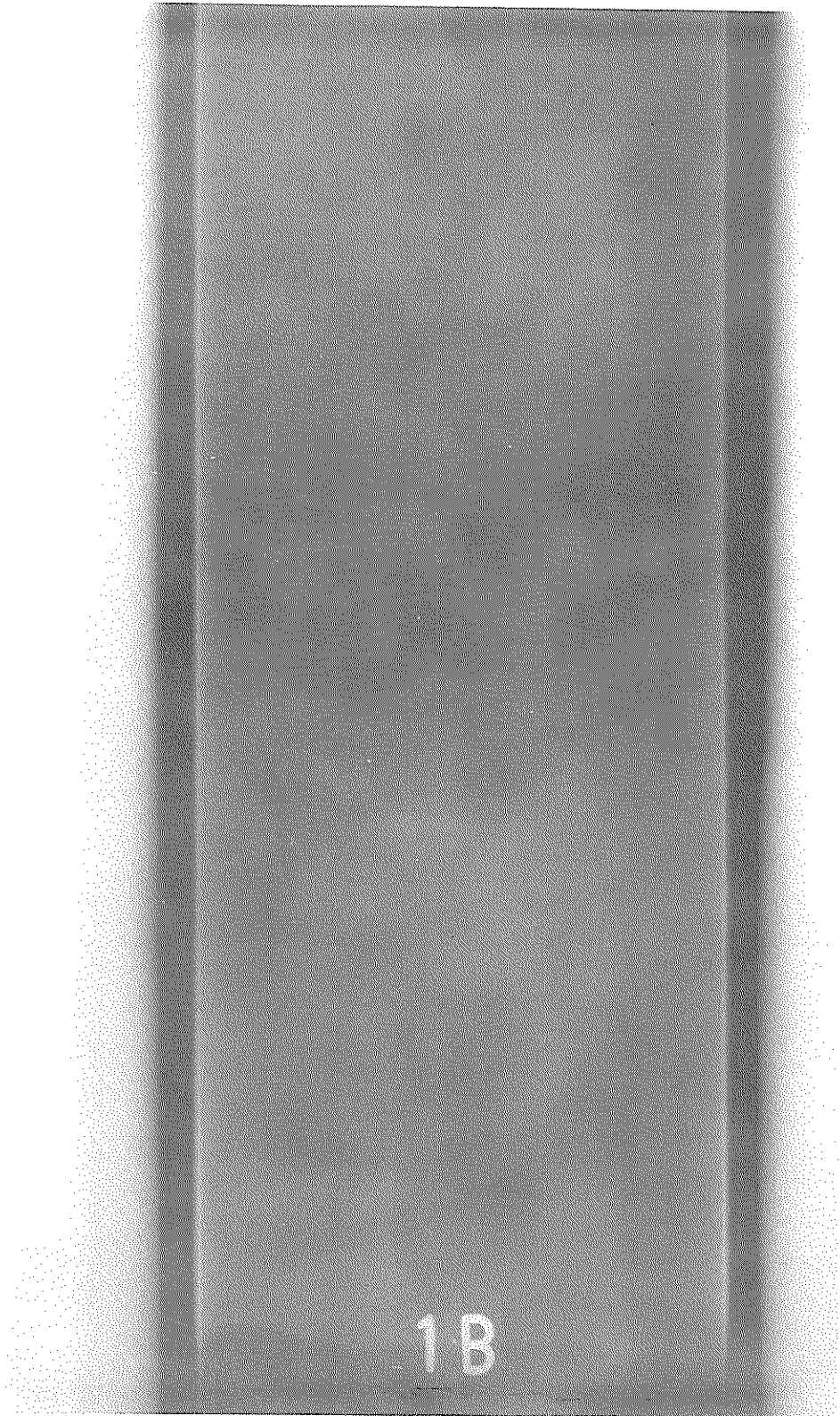
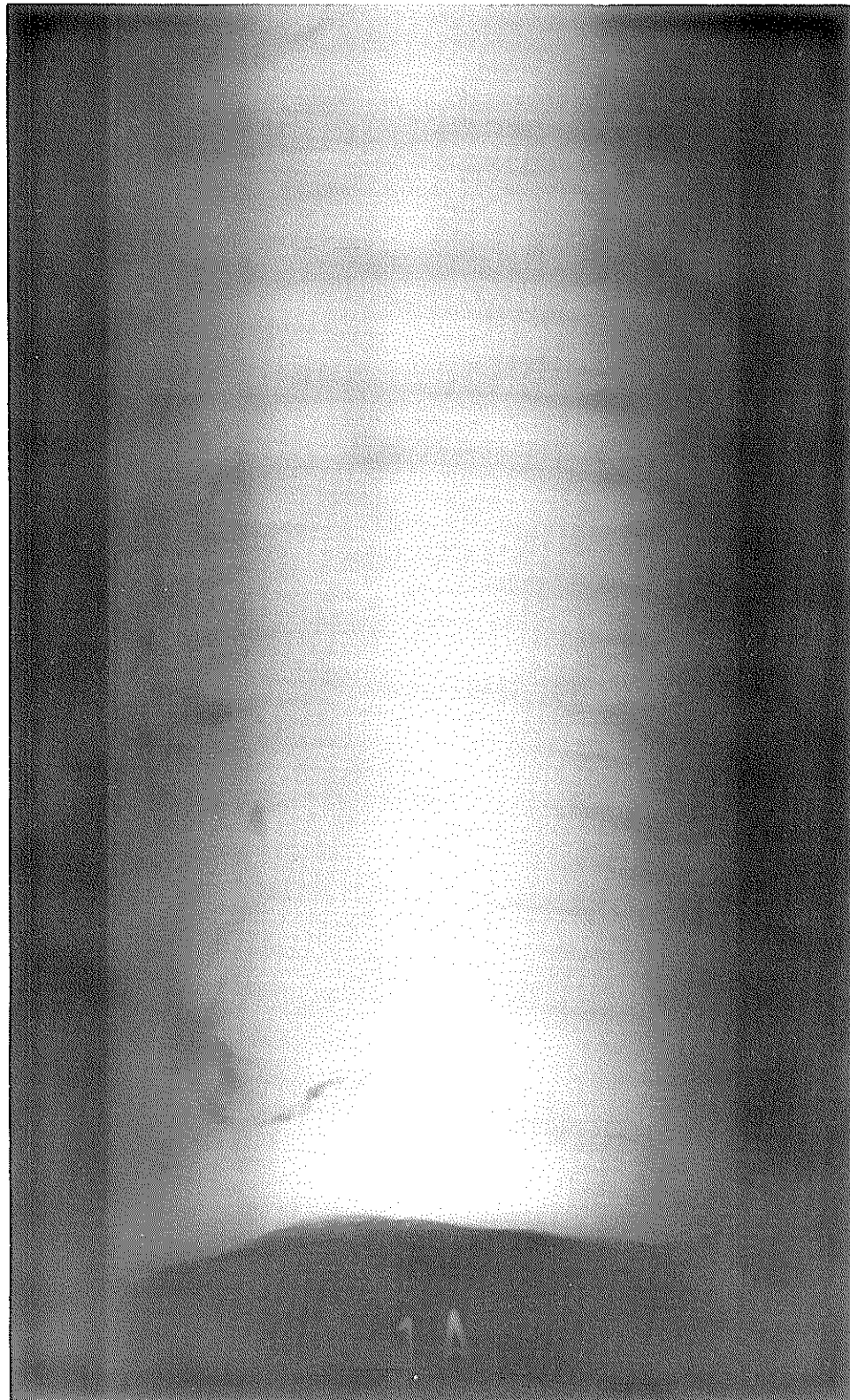
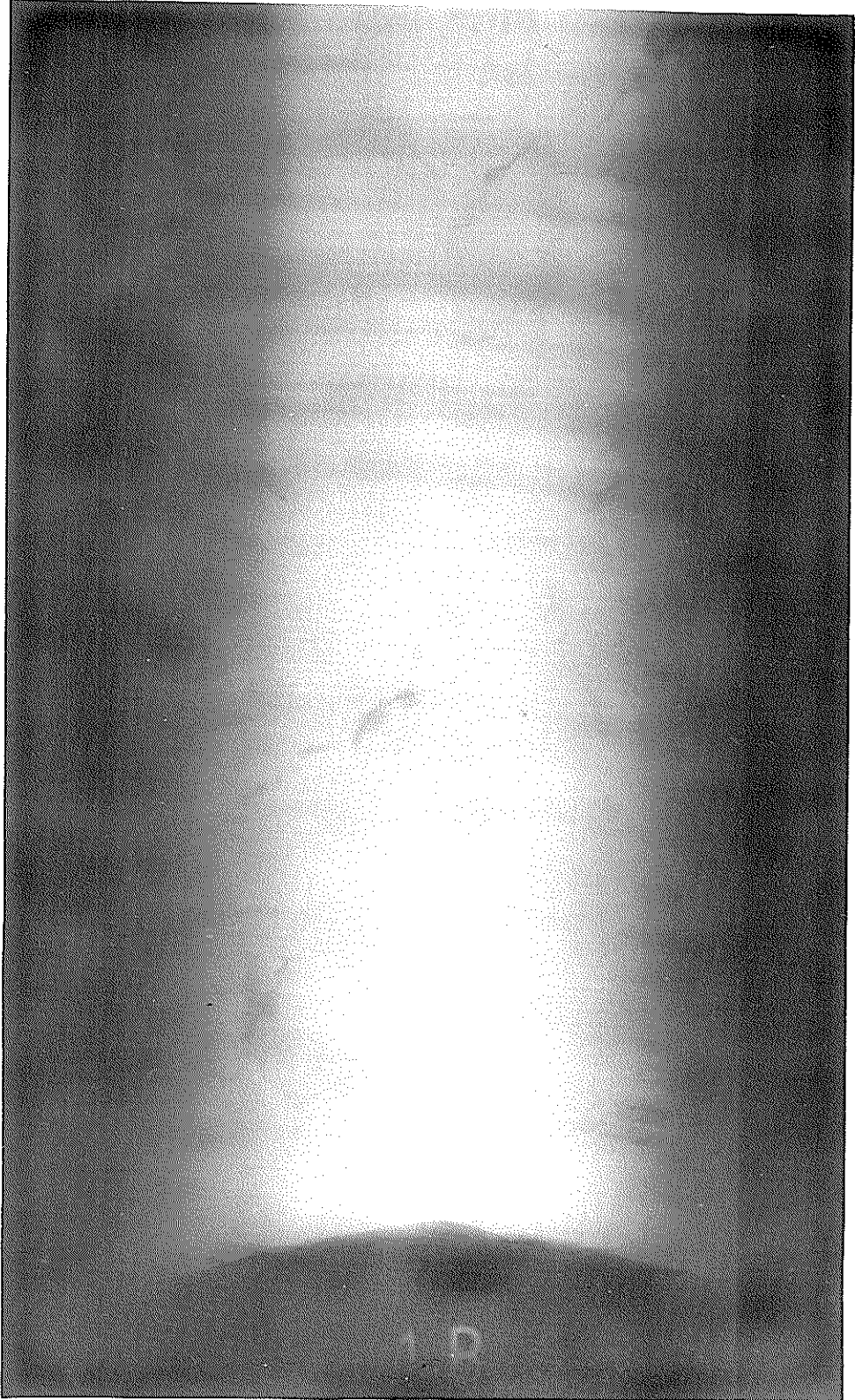


写真-6.15 (b) 均質 (大阪湾 56-1, D-9, 1B~2B)



写真—6.16(a) 層状(釜石湾R-46-2, 1A~2A)



写真一6.16(b) 層状(釜石湾R-46-2, 1B~2B)

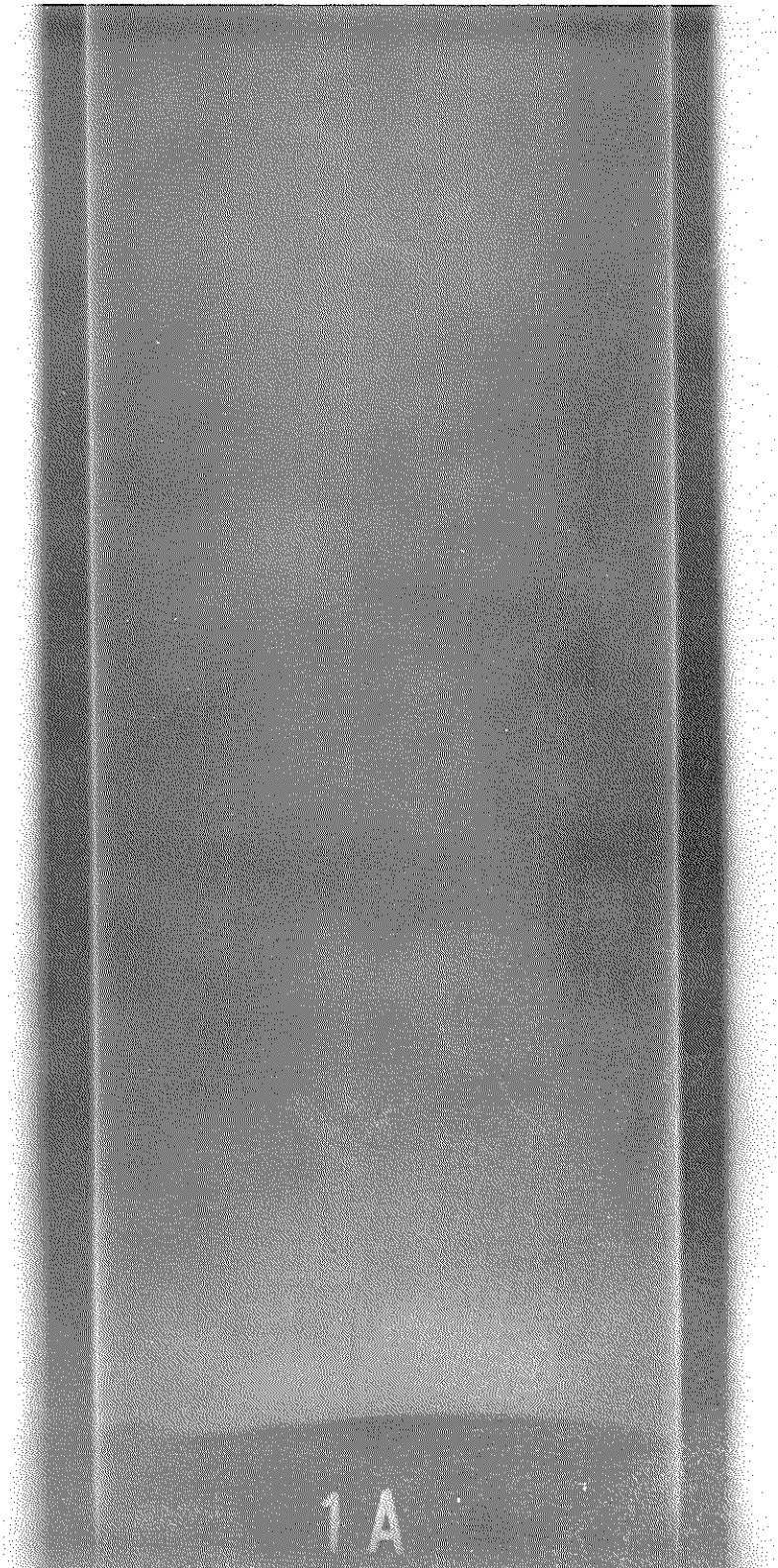


写真-6.17(a) クラック (大阪湾56-2, D-18, 1A~2A)

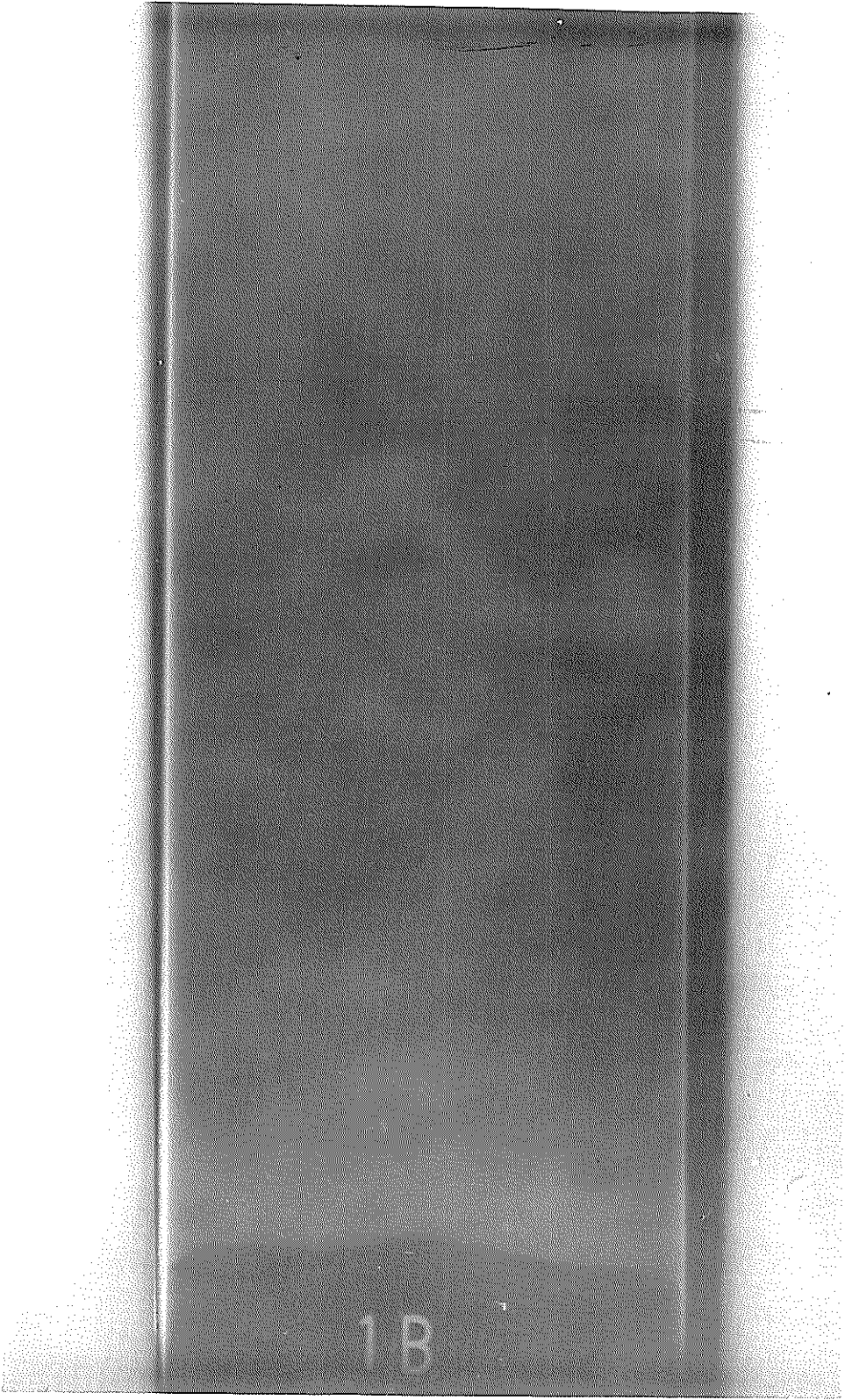


写真-6.17 (b) クラック (大阪湾56-2, D-18, 1B~2B)

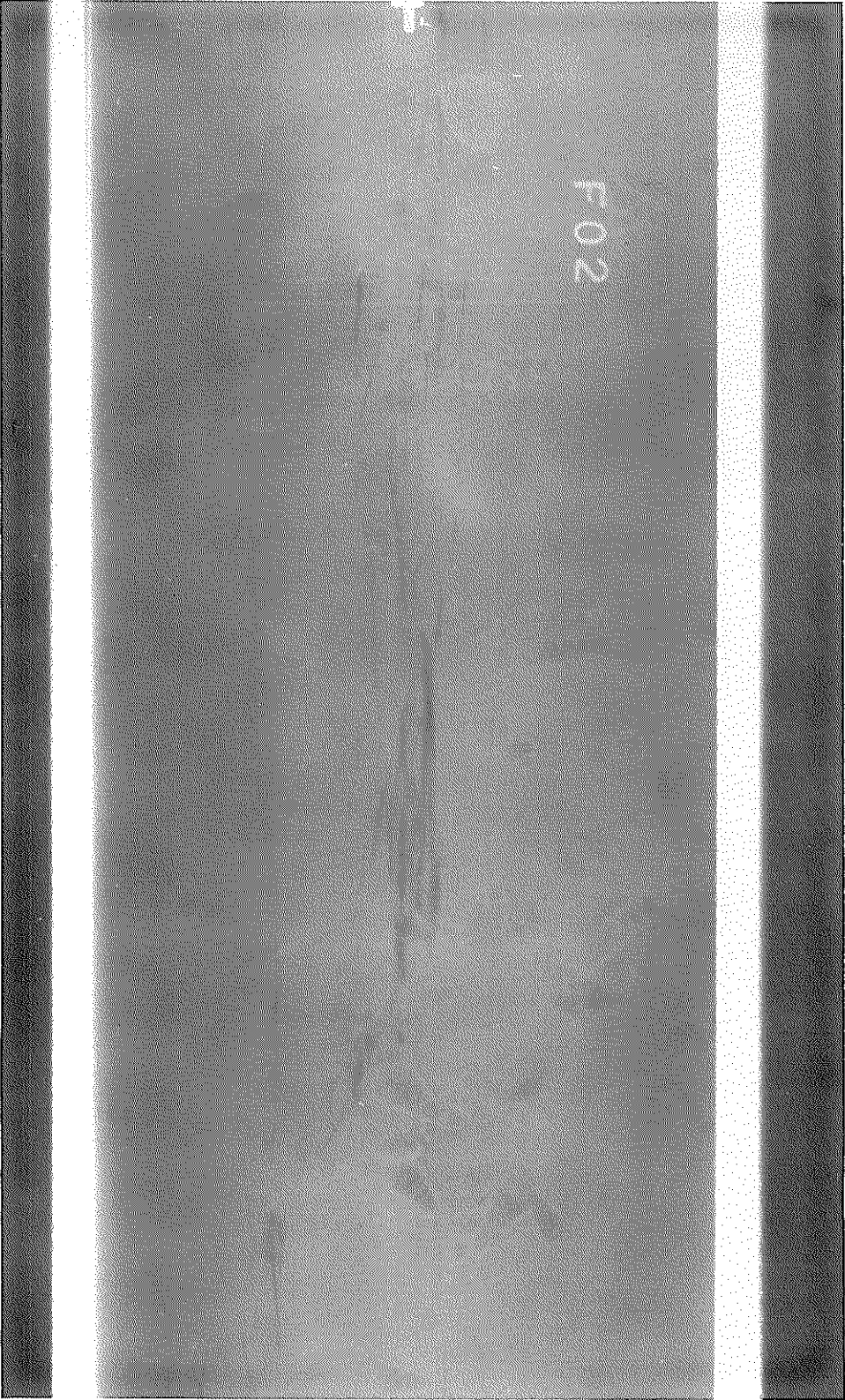


写真-6.18 (a) クラック及び貝殻（大阪湾56-9, T-31, 2A）

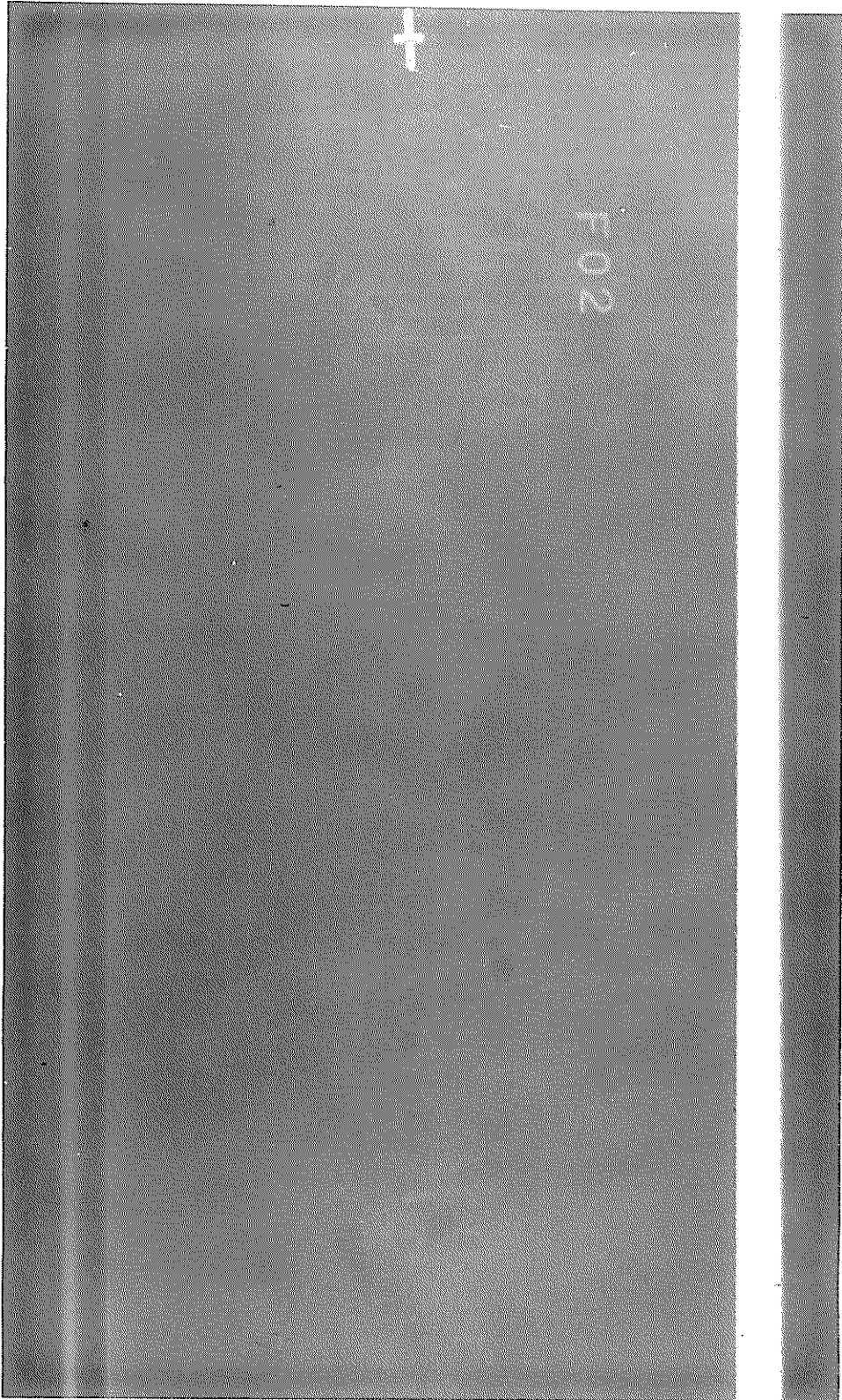


写真-6.18 (b) クラック及び貝殻（大阪湾56-9, T-31, 2B）

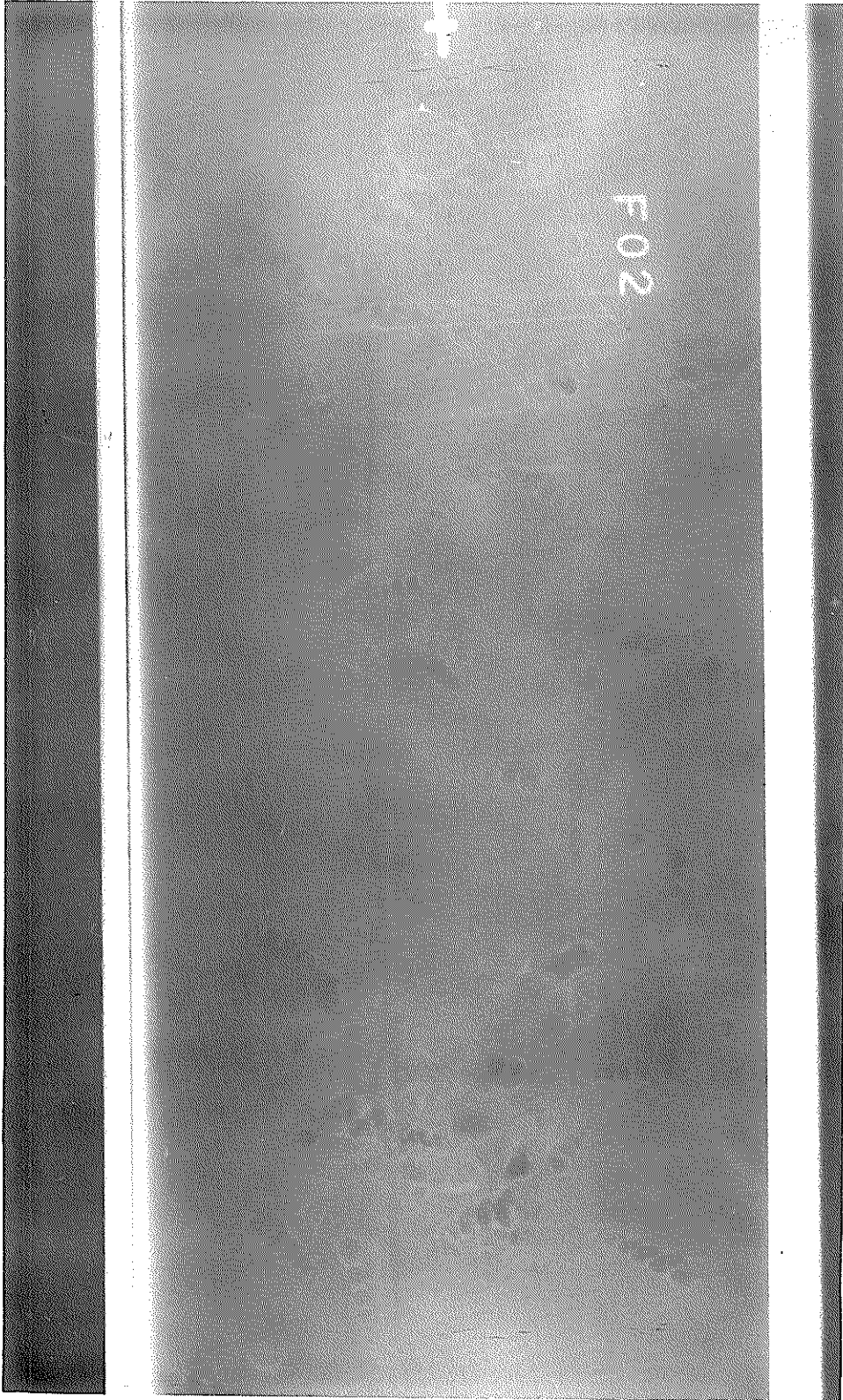
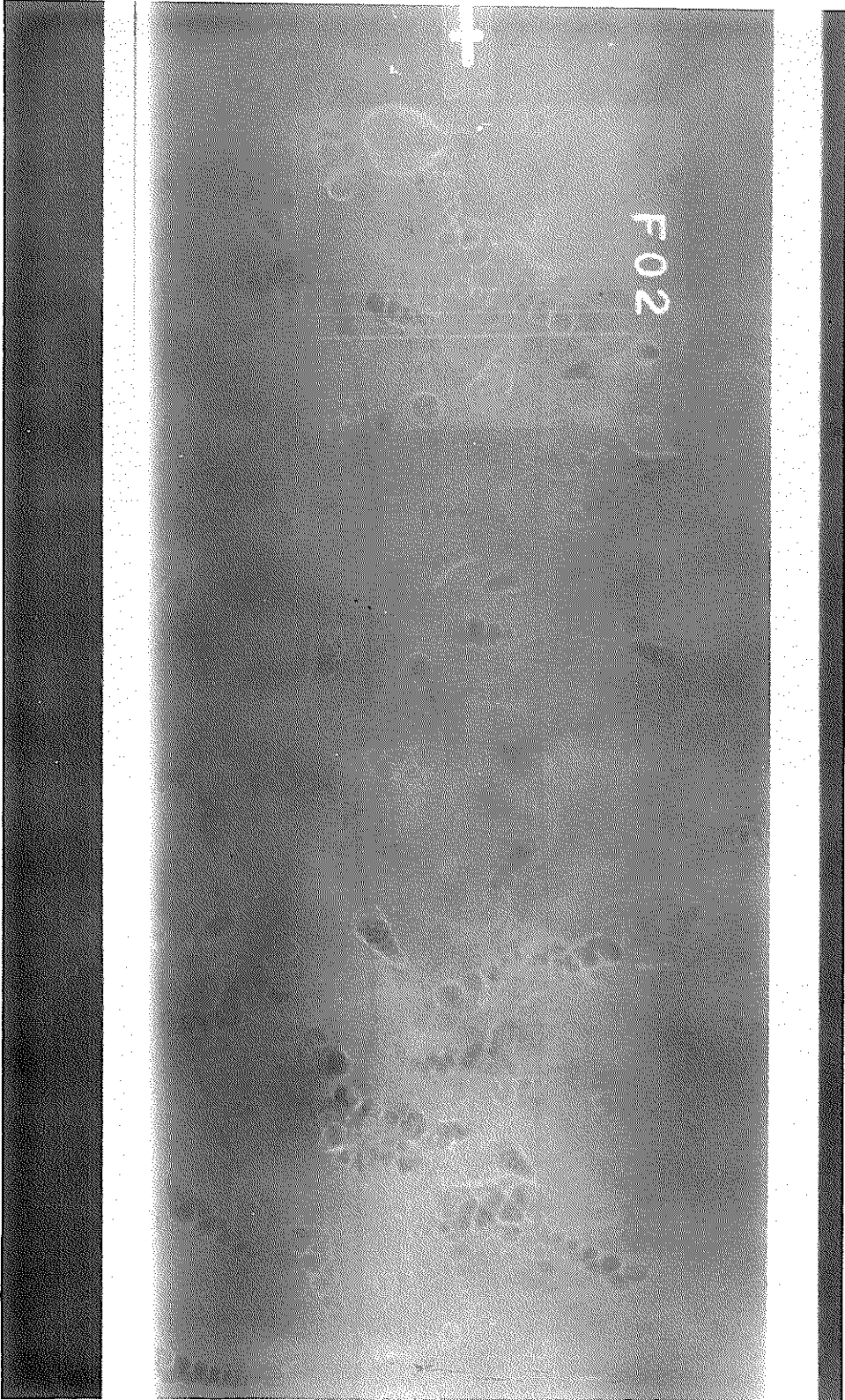


写真-6.18(c) クラック及び貝殻(大阪湾56-9, T-31, 2C)



写真一6.18(d) クラック及び貝殻（大阪湾56-9, T-31, 2D）



写真—6.18(e) クラック及び員殺(大阪湾56—9, T—31, 2E)



写真-6.18(チ) クラック及び貝殻(大阪湾56-9, T-31, 2F)

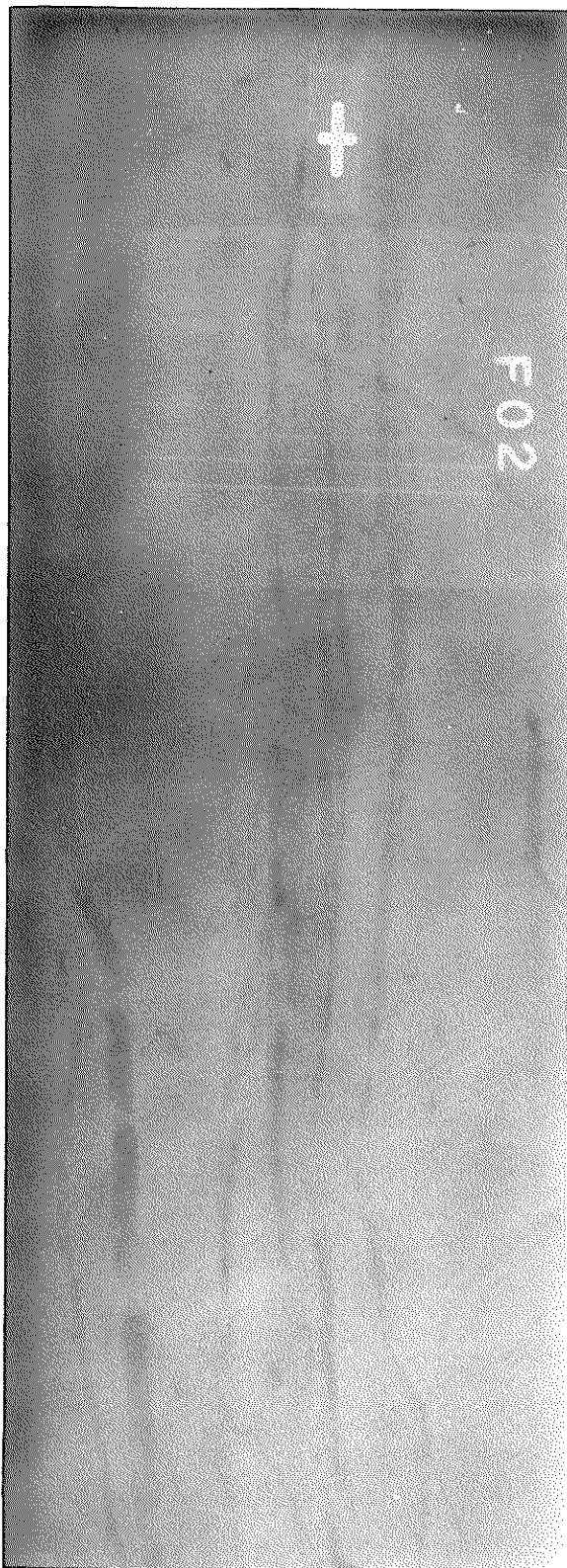
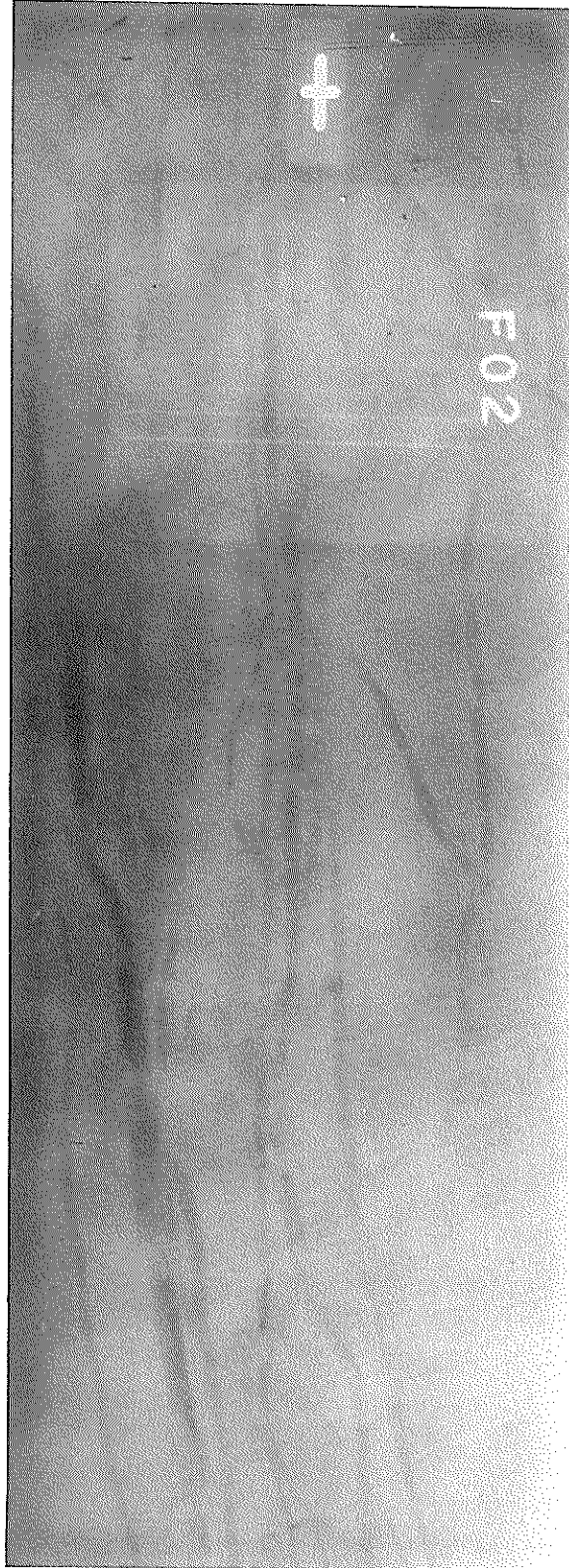


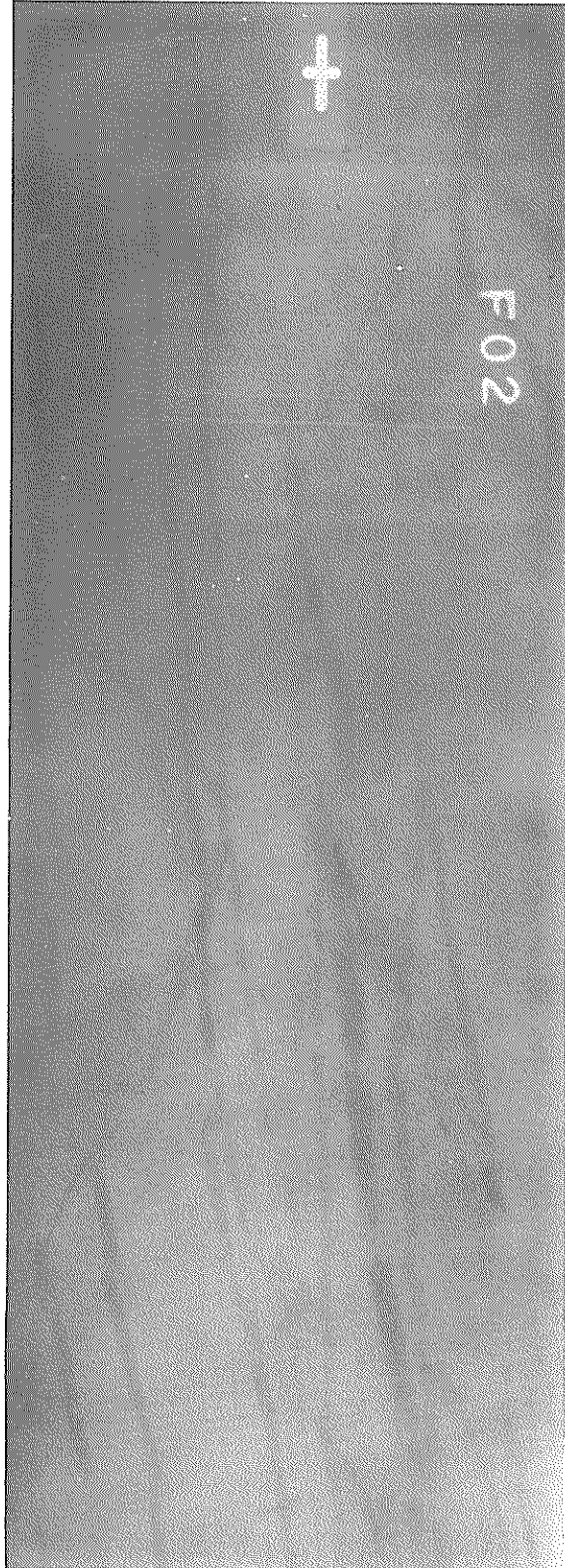
写真-6.19(a) 有機物及びブラック（大阪湾56-9, T-59, 2A）



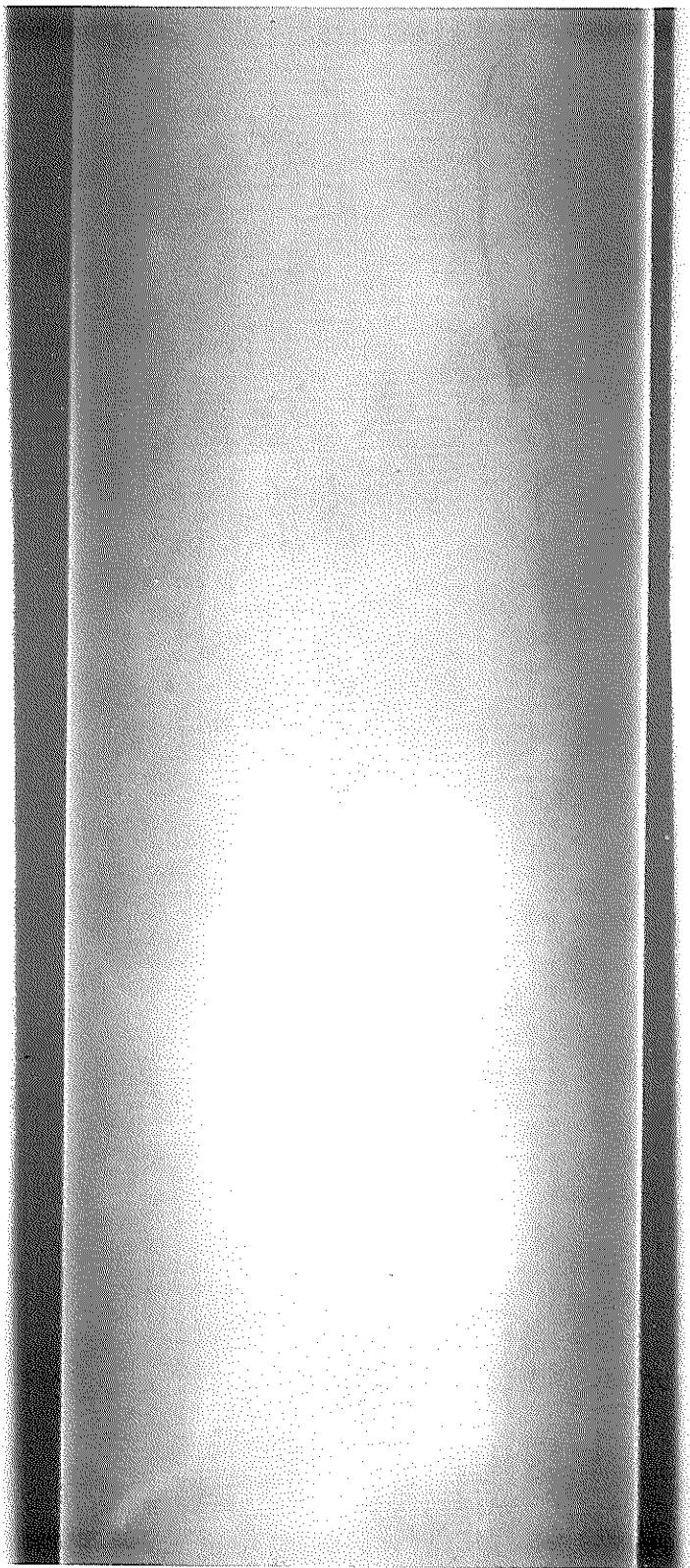
写真— 6.19 (b) 有機物及びクラック (大阪湾 56-9, T-59, 2B)



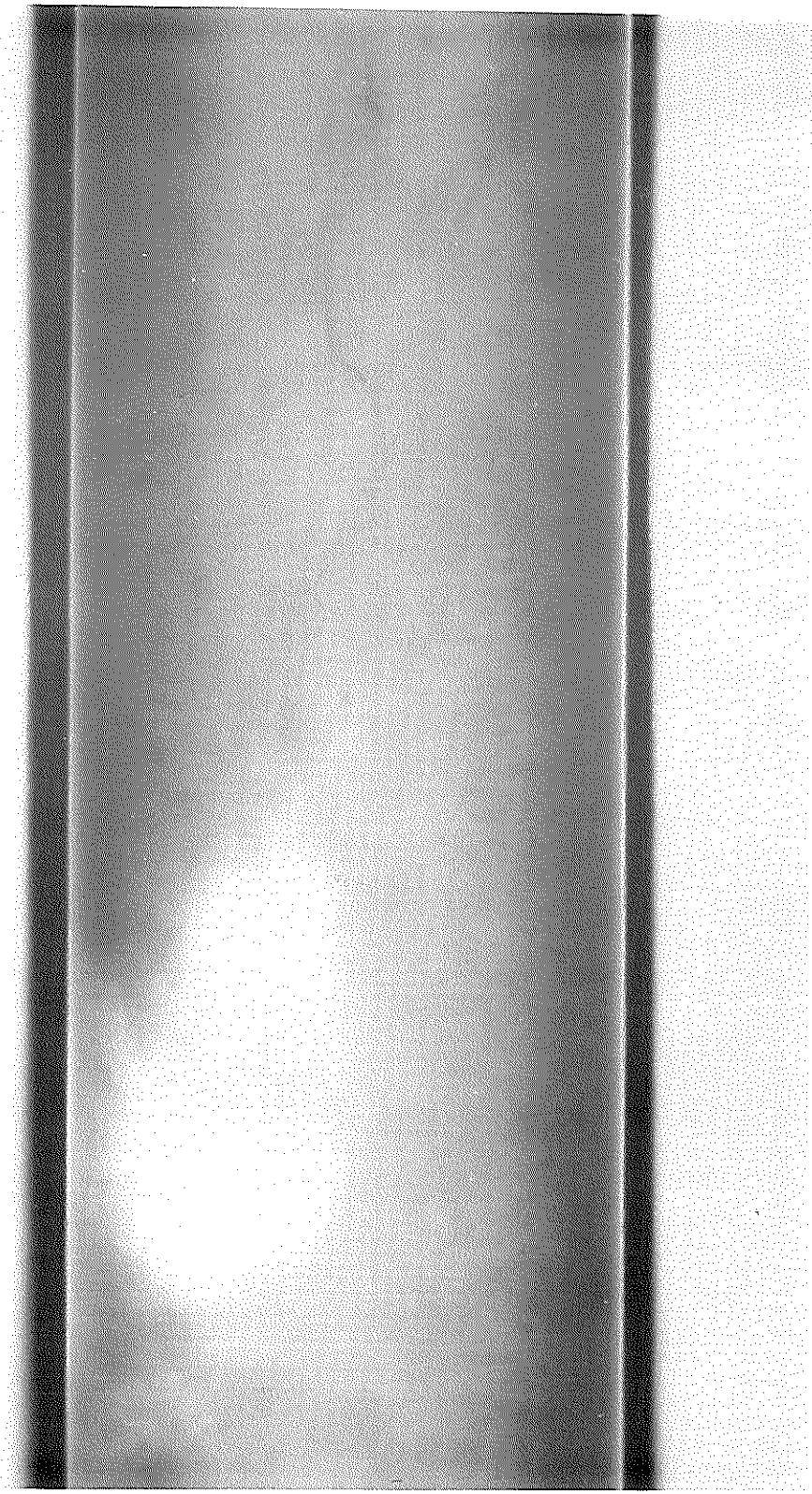
写真-6.19(c) 有機物及びクラック（大阪湾56-9, T-59, 20）



写真— 6.19 (d) 有機物及びクラック（大阪湾56-9, T-59, 2D）



写真—6.20(a) クラック (大阪湾56-2, D-8, 2A~3A)



写真一 6.20 (b) クラック (大阪湾 56-2, D-8, 2B~3B)

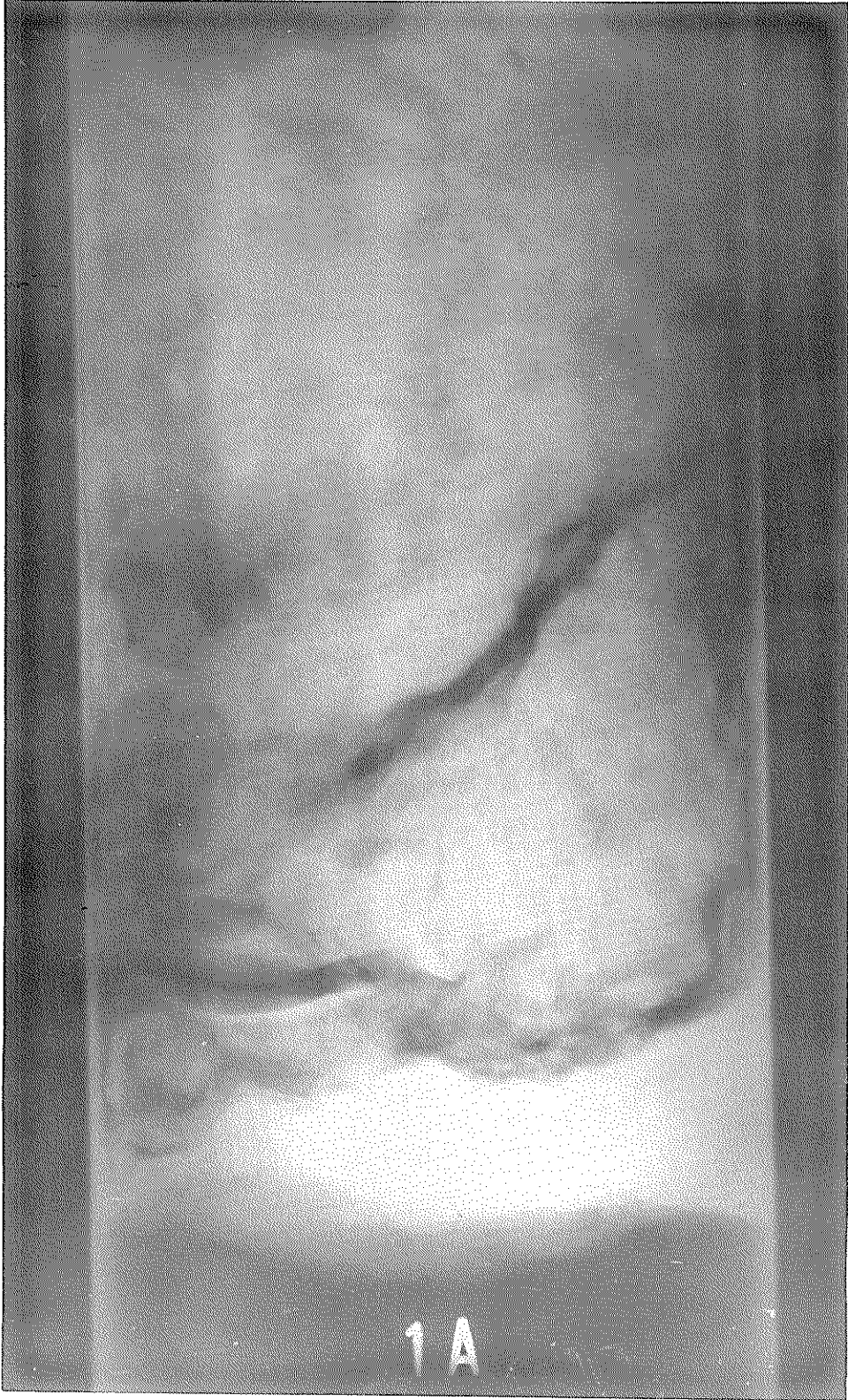
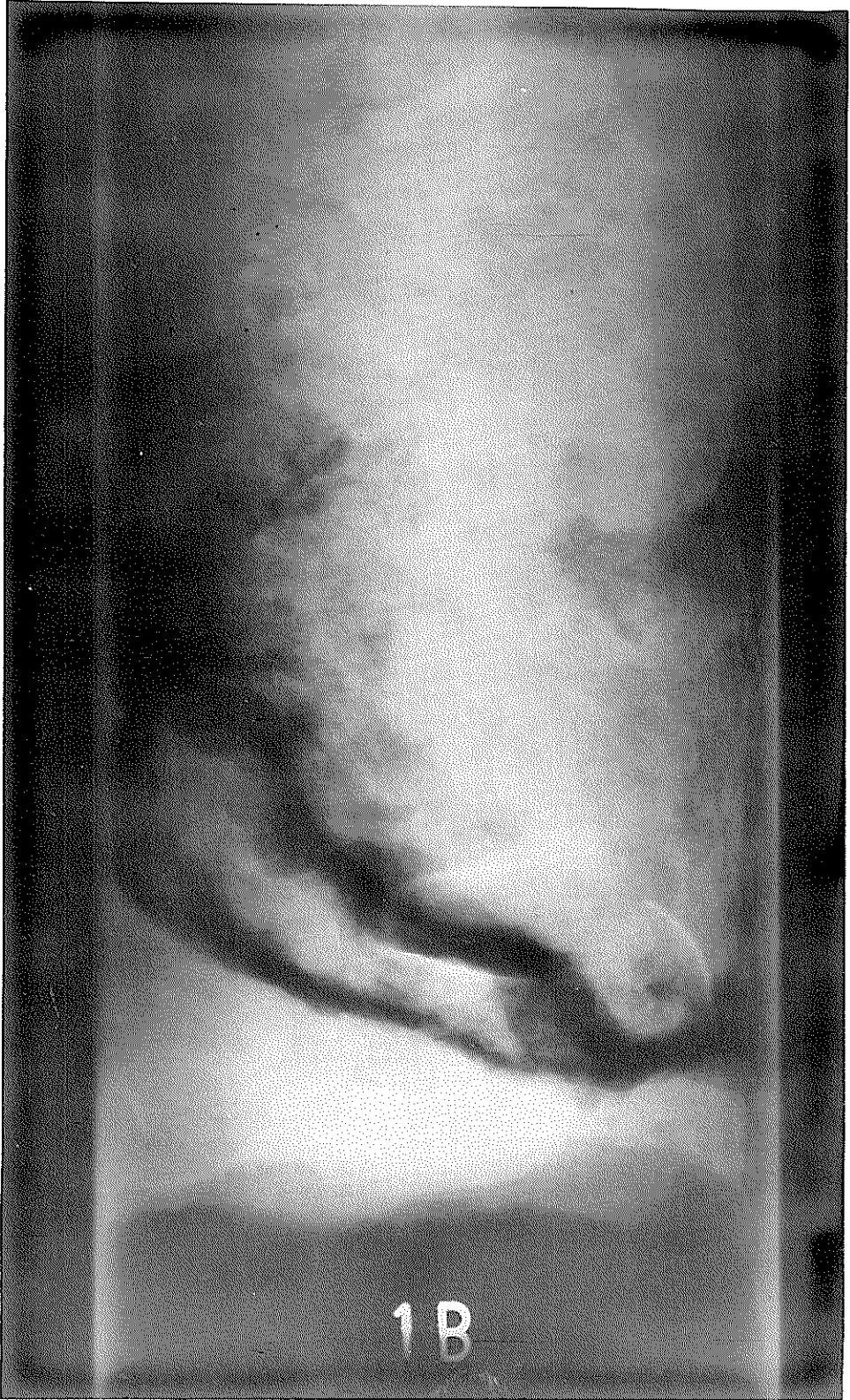


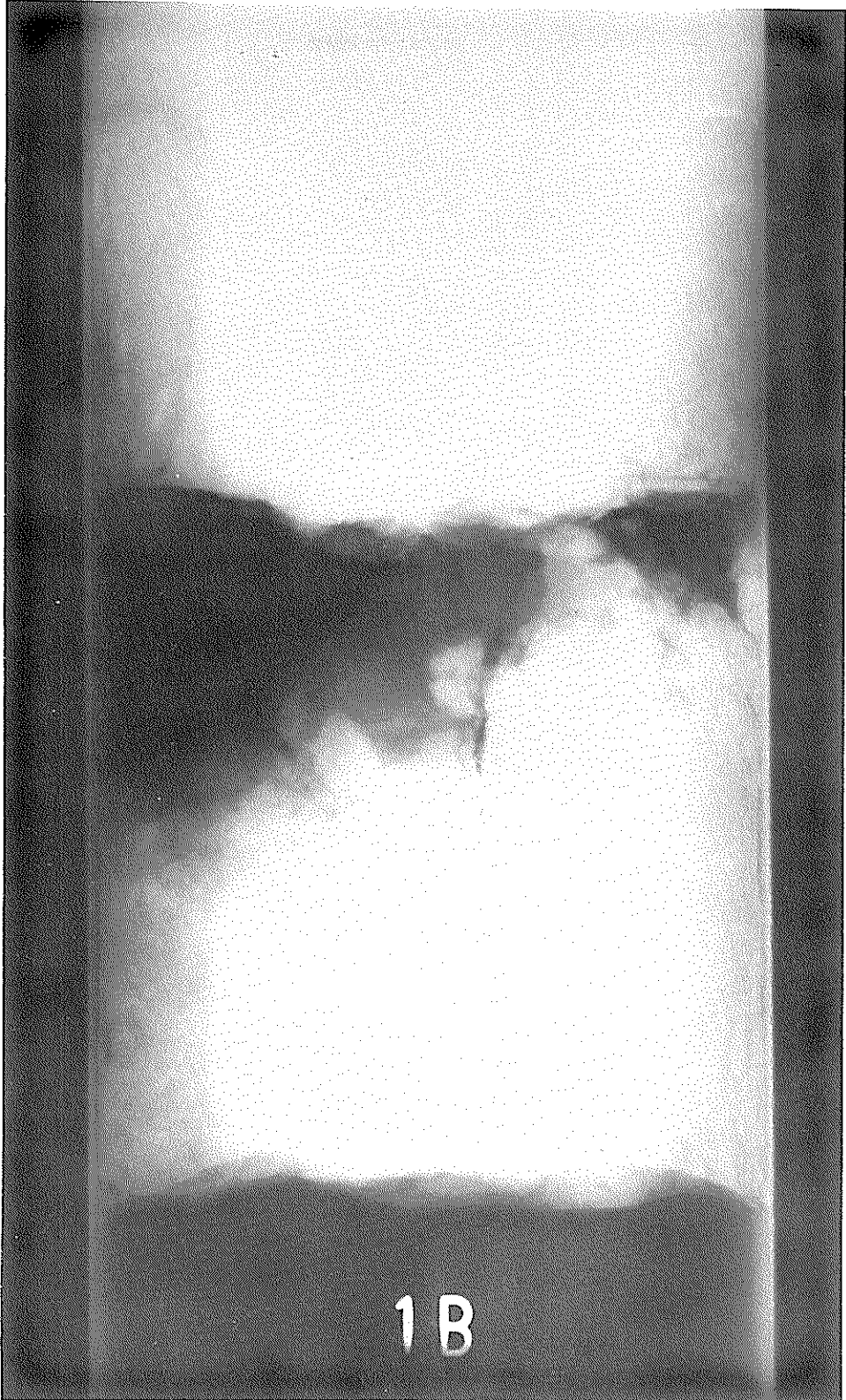
写真-6.21(a) 密度差(釜石湾D-27-1, 1A~2A)



写真一 6.21 (b) 密度差 (釜石湾 D-27-1, 1B~2B)



写真-6.22(a) 間隙 (金石湾D-26-6, 1A~2A)



写真一6.22(b) 間隙（釜石湾D-26-6, 1B~2B）

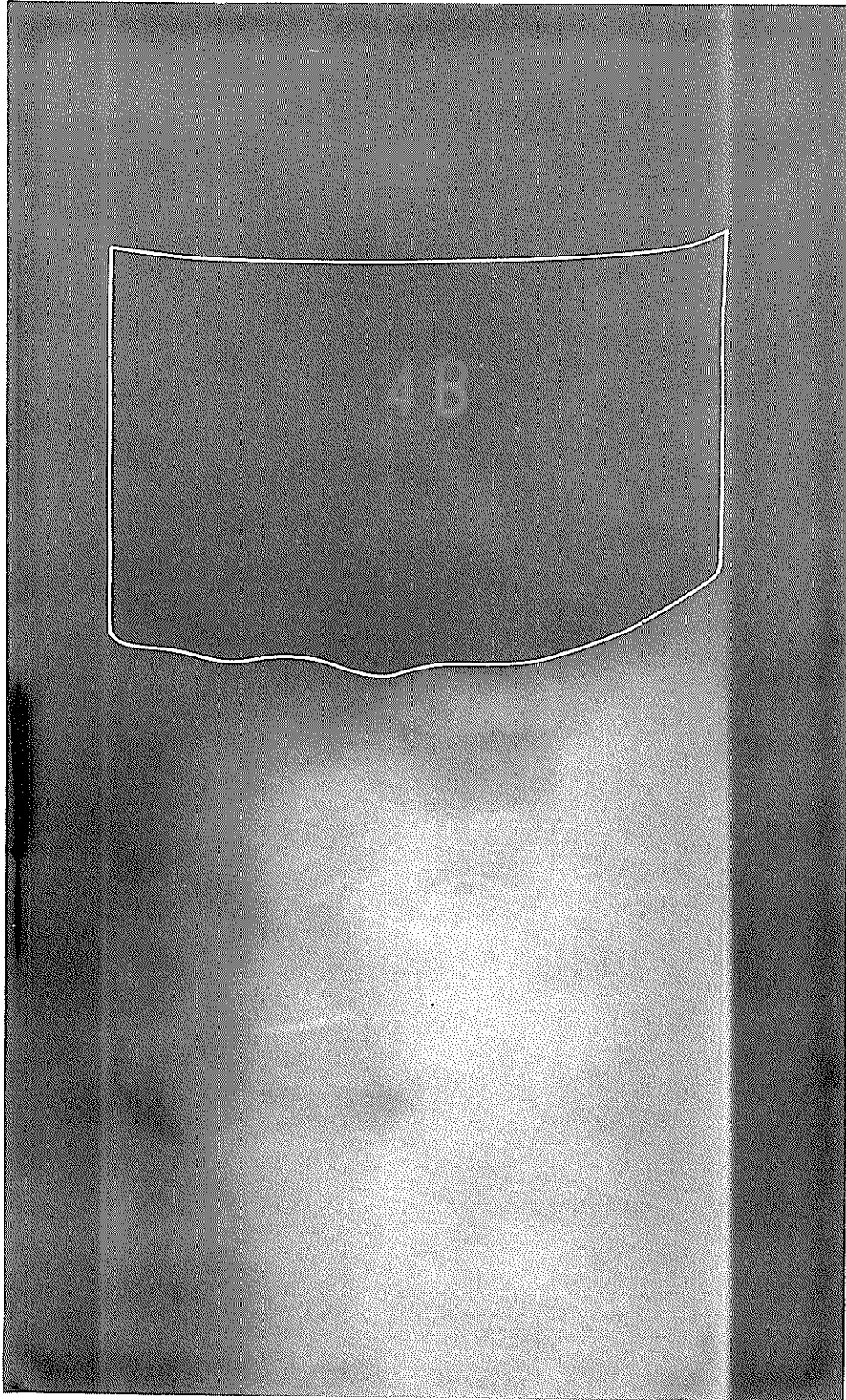


写真-6.23(a) パラフィンシール(釜石湾R-36-1, 3A~4A 枠内はパラフィンシール)

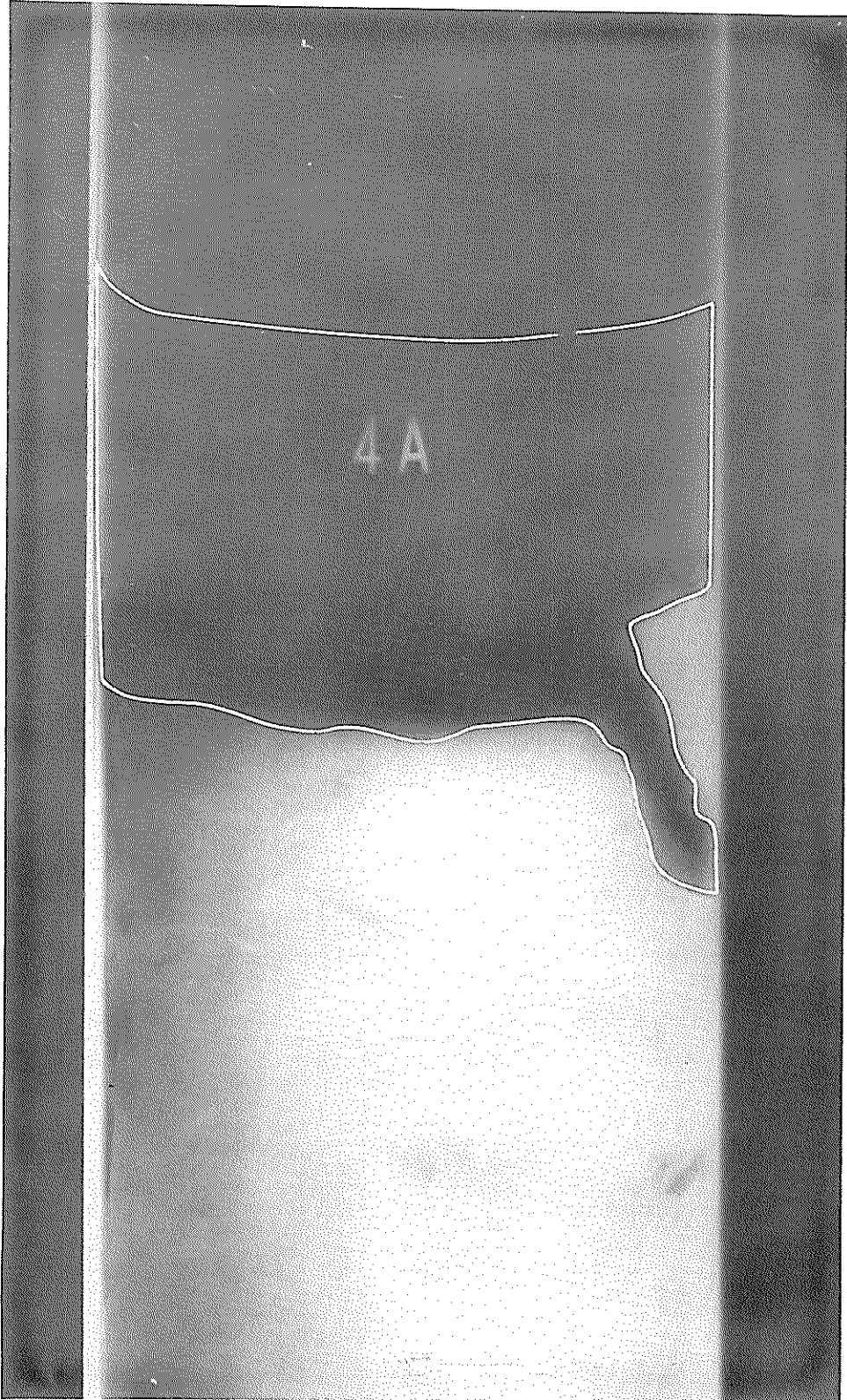
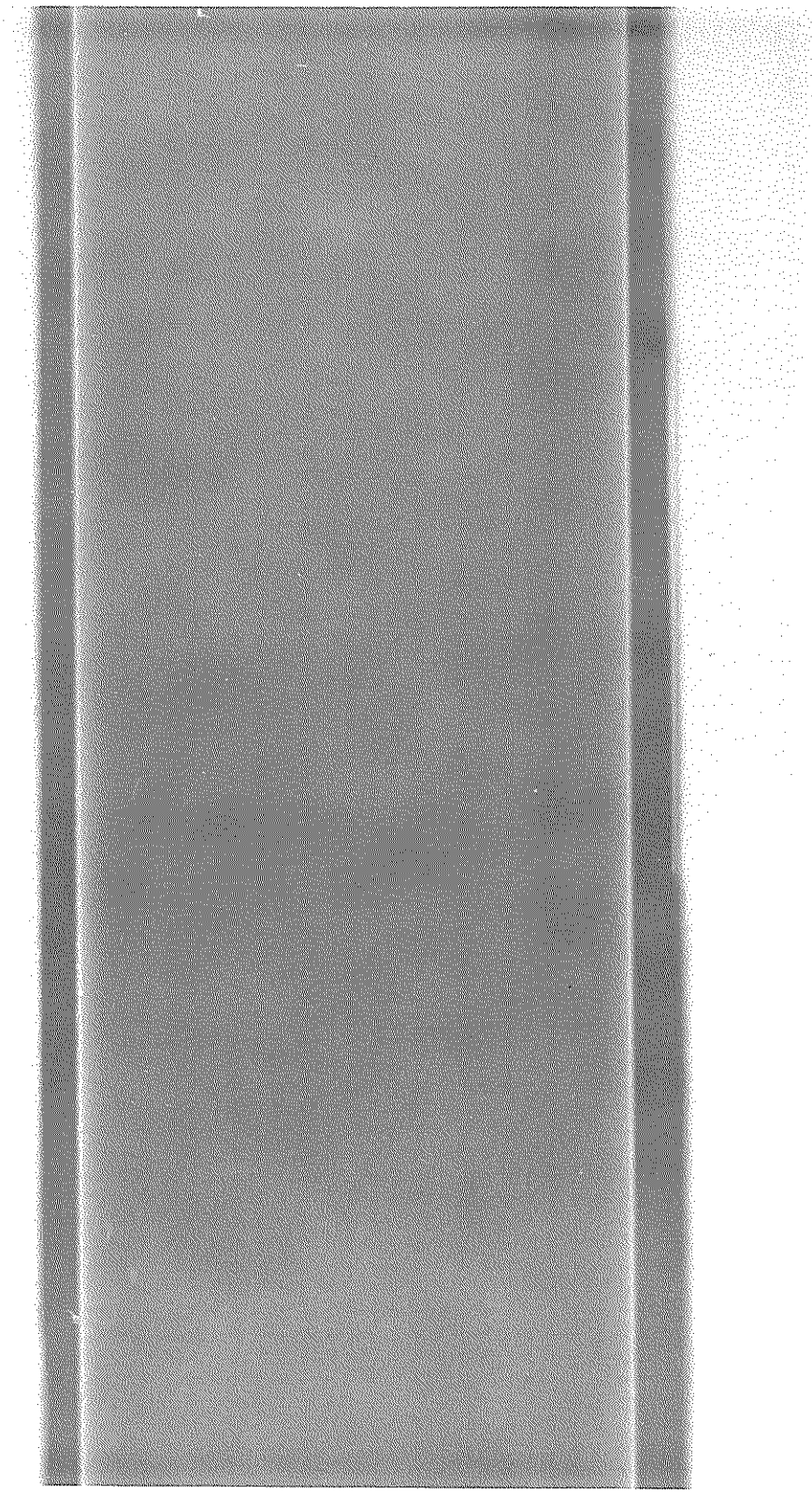


写真-6.23(b) パラフィンシール(釜石海B-36-1, 3B~4B 枠内はパラフィンシール)



写真一 6.24 (a) 小名浜砂 (緩詰め, $D_r=37.9\%$)

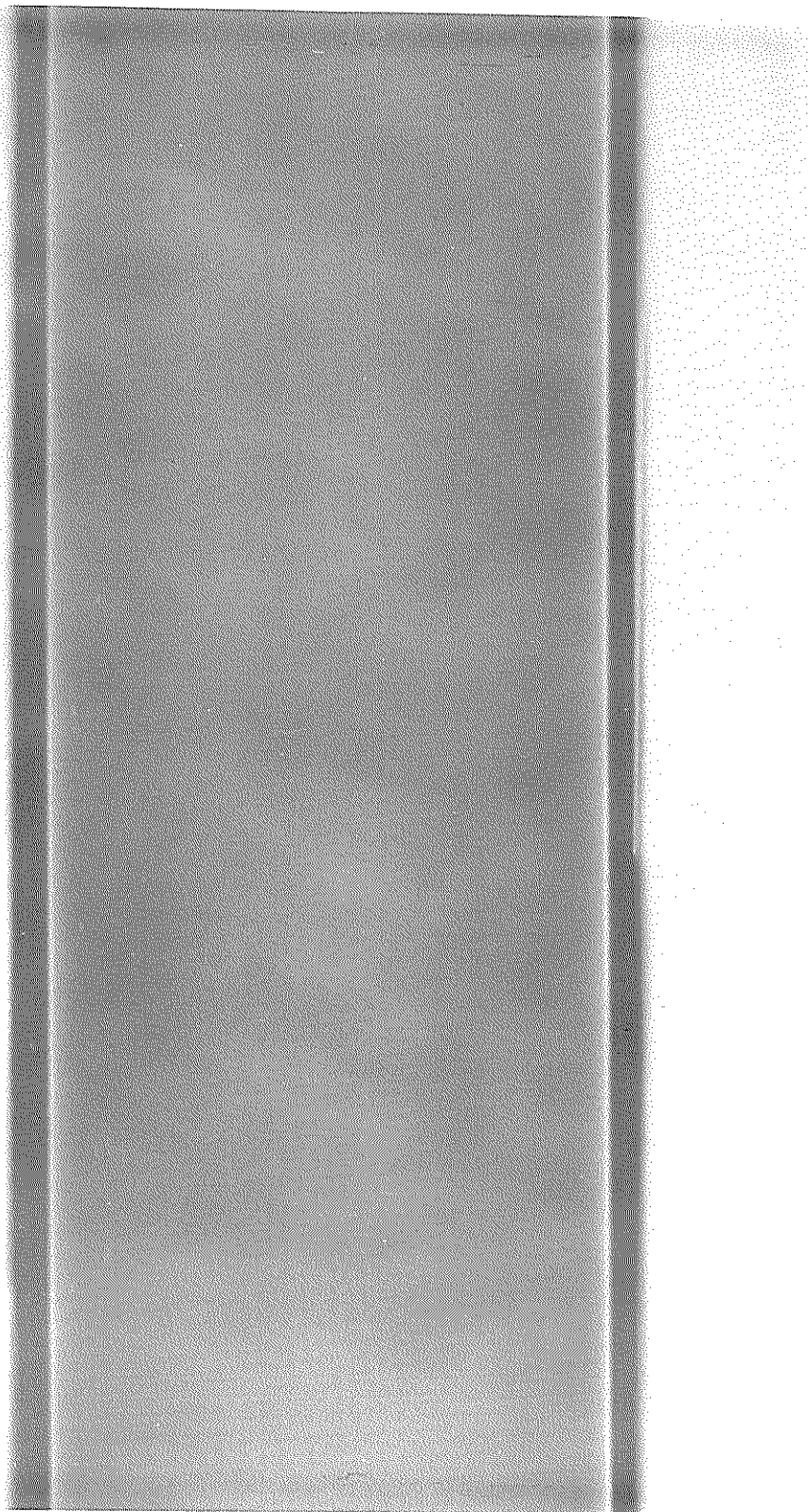
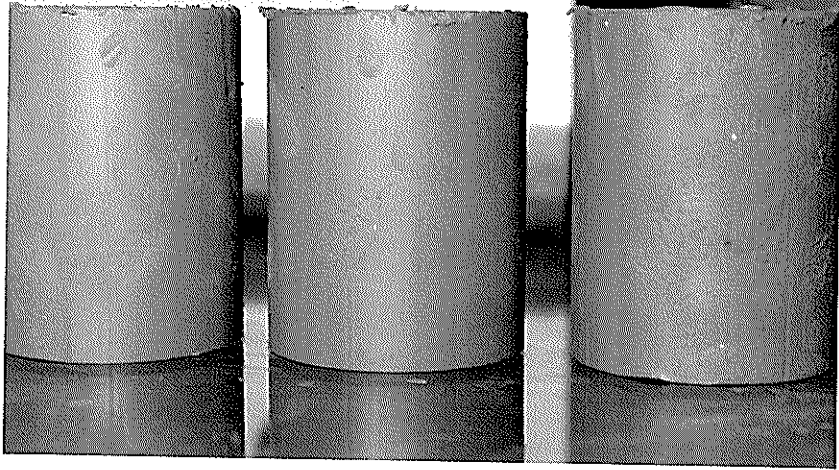
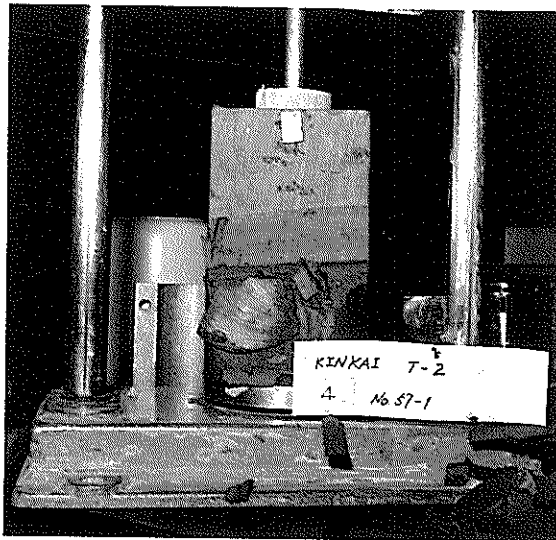


写真-6.24 (b) 小名浜砂 (密詰め, $D_r=88.9\%$)

工性研果定



写真—6.25 均 質



写真—6.26 貝 殻

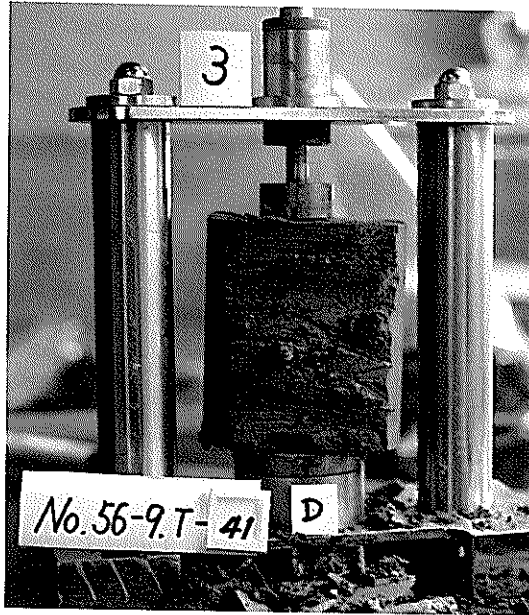


写真-6.27 (a) 砂 礫

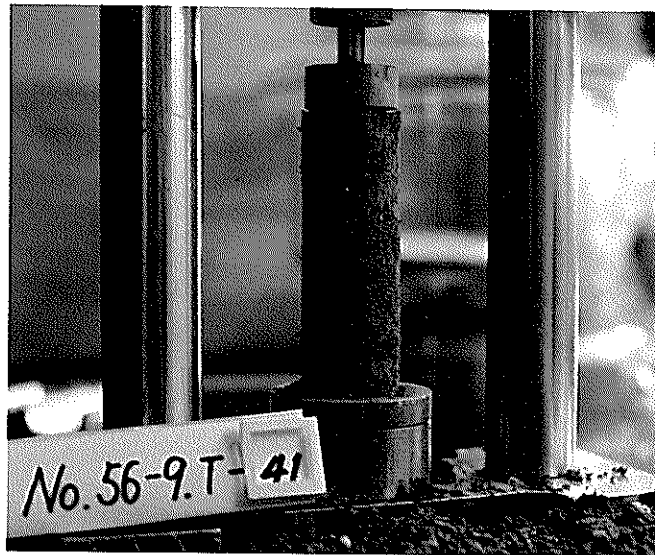


写真-6.27 (b) 砂 礫

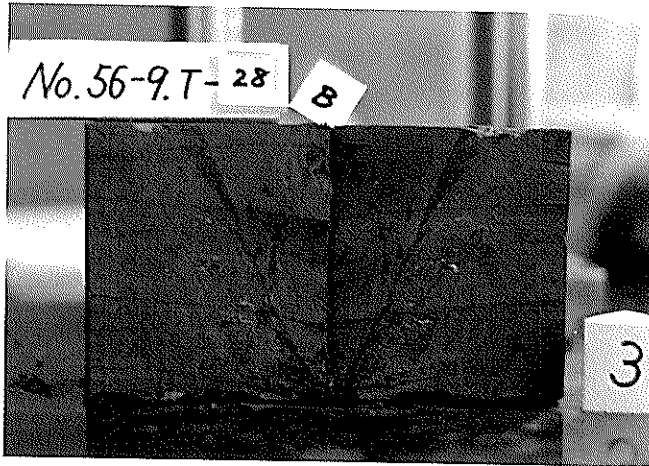


写真-6.28 (a) ウォームホール

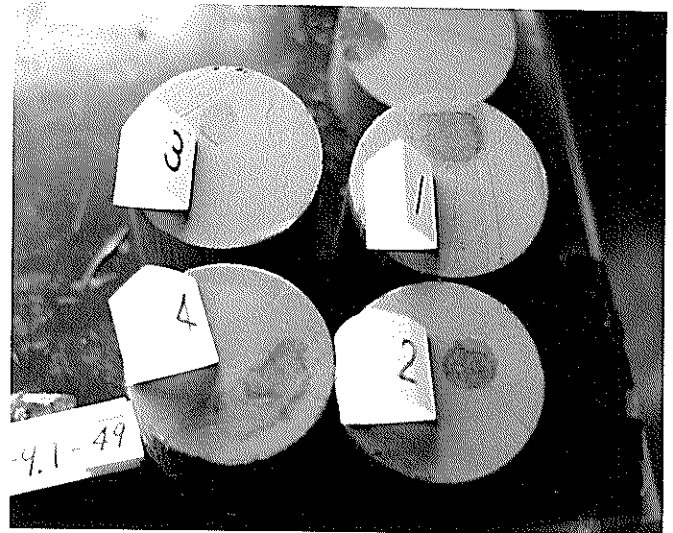


写真-6.28 (b) ウォームホール



写真-6.28 (c) ウォームホール



写真-6.29 クラック及び有機物



写真-6.30 クラック

写真-6.31 クラック

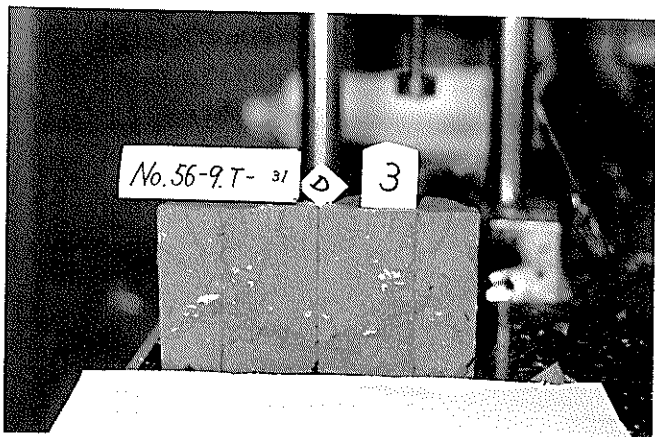


写真-6.32 クラック及び貝殻

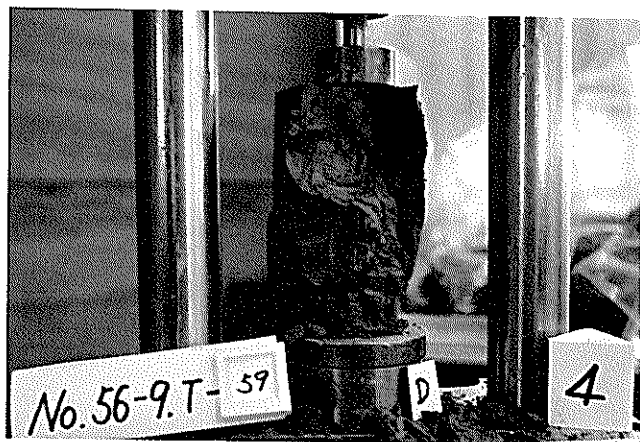


写真-6.33 有機物及びクラック

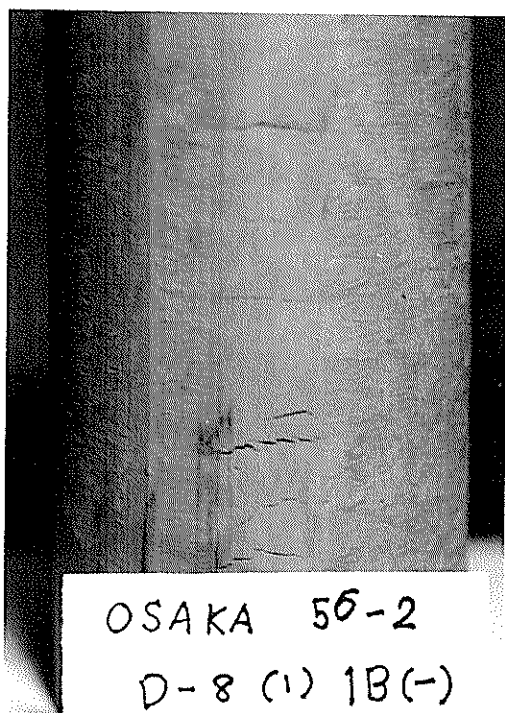


写真-6.34 クラック

港湾技研資料 No.438

1982・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 日青工業株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.