

微視的観察による締固め土の構造についての一考察

柴田 英明*

Micro-Structure of Compacted Sand-clay Mixture

By Hideaki Shibata*

Synopsis: In the present paper, the author reports on the results he obtained by observing micro-structure of compacted sand-clay mixture directly by scanning electron microscope, and its comparison with already reported result²⁾.

Consequently, it is found that the structures of compacted soils consist of two "basis". The one is structure mainly composed of sand, the other is that mainly composed of clay.

要旨: 前報告では、土の締固め機構を解明するうえで、締固め土内の粘土分と砂分の混合状況に着目し、それぞれの土粒子の形成する2種の基本構造 I 及び II を提案し、締固め土は、この2つの基本構造の集合体とみなせることを予測した。また、同一締固めエネルギー下におけるこの基本構造 I 及び II の密度状況についての検討を行ない、締固め土内におけるこれらの基本構造の混合比率を算定する式 $[(P-\alpha)$ 式] を提案した。

本報告では、走査型電子顕微鏡を使用して、直接に締固めた砂・粘土混合土の構造を微視的に観察することにより、締固め土内におけるこれらの基本構造の考え方についての妥当性に関する検証を試み、締固め土の構造状況を把握することを目的とした。

1. まえがき

土の締固め機構が、土質、液分、締固めエネルギー等、締固め要因の差異によって異なり、その締固め曲線の形状¹⁾が複雑であるのは、周知の通りであり、土の締固め機構を考える上で、締固め土の構造状況を把握するのも一方法である。前報告²⁾では、砂・粘土混合土の締固め理論曲線と、実験による締固め曲線との差異について検討を加え、それぞれ、砂粒子と粘土粒子から形成される基本構造 I 及び II (図-1, 2 参照) を提案し、締固め土内におけるこれらの基本構造の混合比率を算定する式 $[(P-\alpha)$ 式³⁾] を示した。さらに、水浸による飽和状態では、不飽和の時に比べて、粘性土は、強度が極端に小さくなることに着目し、各粘土混合率の試料の水浸 CBR 試験⁴⁾を行ない、その結果、締固め後の土の構造は、これらの基本構造の混じり合った構造で形成され、土中におけるこれらの構造の比率は、砂と粘土の混合比率と、締固めたときの密度によって決まることを見出した。

本報告では、走査型電子顕微鏡を使用して、直接に、

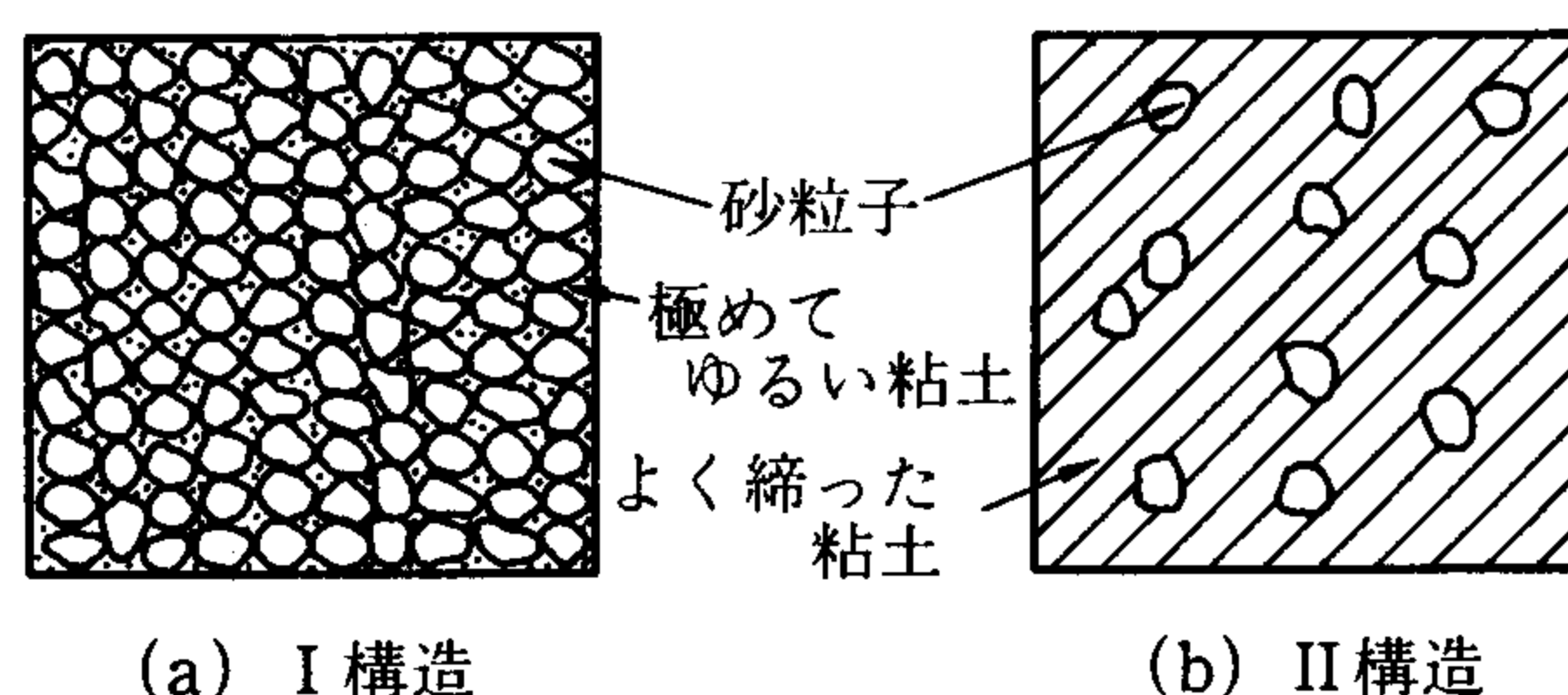


図-1 砂・粘土混合土の2種の基本構造

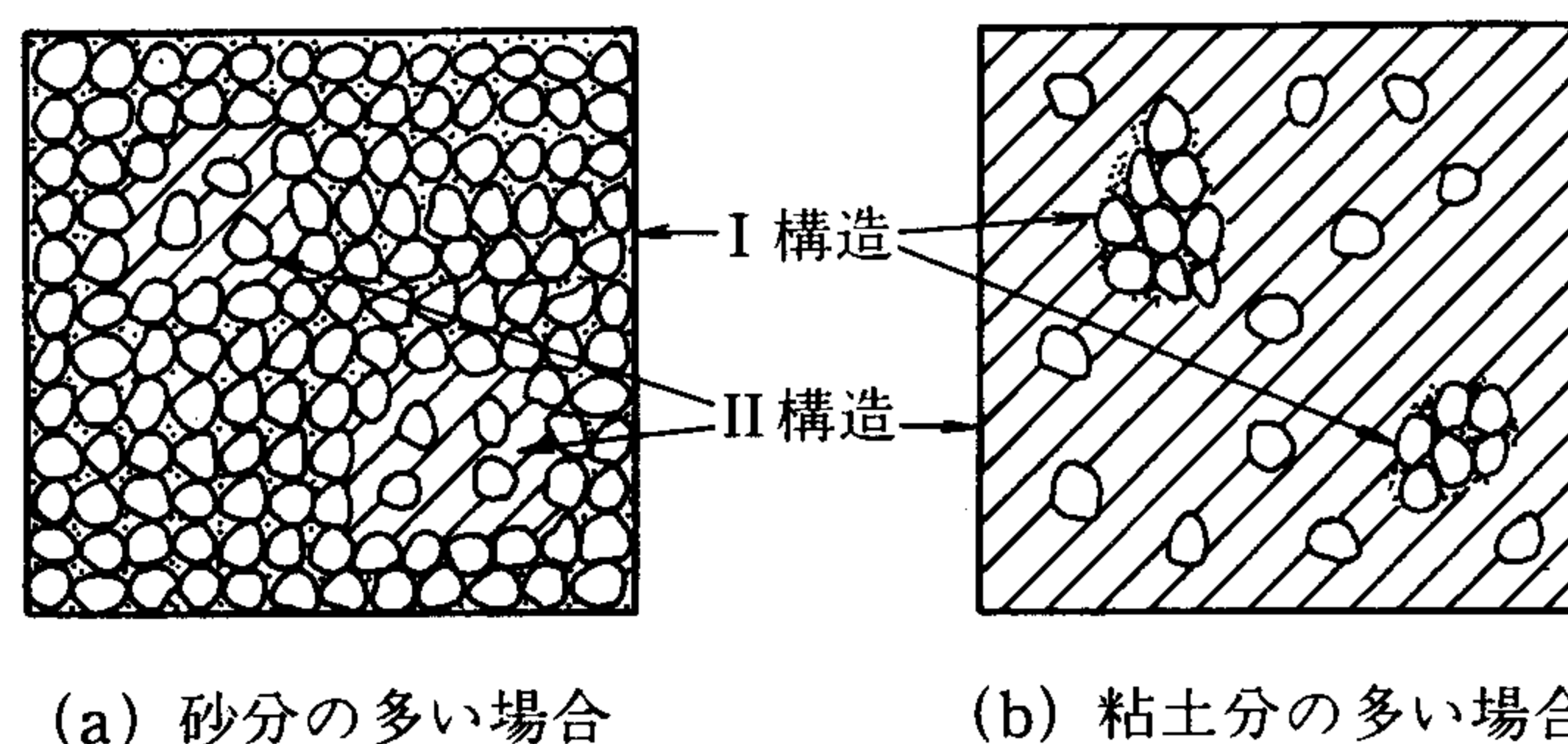


図-2 締固めた混合土内の I, II 構造

締固めた砂・粘土混合土の構造を微視的に観察することにより、締固め土内におけるこれらの基本構造の考え方についての妥当性に関する検討を加えたものである。すなわち、各粘土混合率の試料について、検鏡試料を作成⁵⁾し、顕微鏡の倍率を、100倍、1000倍の2種で写真

* 土木工学科 講師
Lecturer, Civil Engineering Division

撮映を行ない、砂粒子と粘土粒子との混じり具合、砂粒子と砂粒子との接触状態、粘土粒子の集合状況⁶⁾⁷⁾、混合土内の空隙部分の大きさ等について観察し、さらに、この観察結果と、前報告で提案した〔(P- α)式〕による混合土内における基本構造の占める割合との比較検討を行なった。その結果、砂分の多い場合に、基本構造 II にあたる粘土粒子の集合体の確認、及び、粘土分が過半数を占める場合の基本構造 I の存在する可能性について確認することができた。

2. 実験及び検鏡試料の作成方法⁵⁾⁸⁾

締固め方法は、試料を乱さないようにするため、静的試験を行なった。載荷速度は 1mm/min, 最大載荷荷重は 35 kgf/cm² 試料としては、砂分として豊浦標準砂、粘土分として市販カオリンを用いた。試料の物理的性質は表-1 に示す通りである。粘土混合率 (P) は、重量比で求めた。モールドは、内径 7.5 cm, 高さ 7.5 cm のものを用いた。走査型電子顕微鏡の検鏡試料作成については、次の手順で作成した。

表1 試料の物理的性質

試料	比重	備考
豊浦標準砂	2.64	平均粒径 0.18mm U _c =1.46
市販カオリン	2.68	LL=51.9 PL=24.3 IP=27.6

(イ) 図-3 に示されるように、試料を練り混ぜたとき高さ 4 mm, 内径 8 mm のアルミパイプを埋め込み、静的方法にて、締固めを行なう。

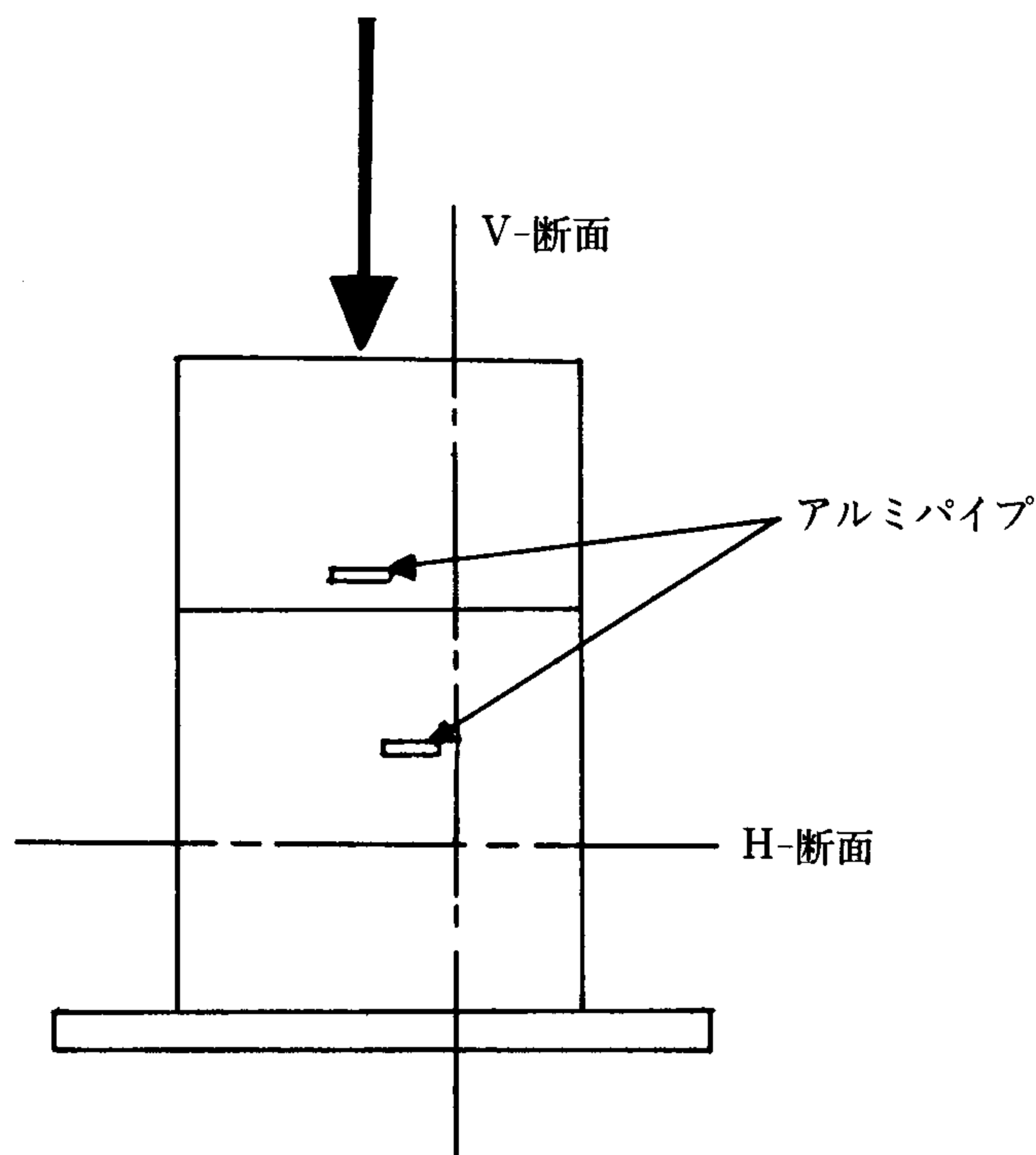


図-3 検鏡試料の作成 (1)

(ロ) 除荷後、試料を取り出し、アルミパイプ部分を図-4 の如く、1.5 cm~2.0 cm 位の大きさに切り出す。このときアルミパイプの片側を瞬間接着剤にて固結しておく。

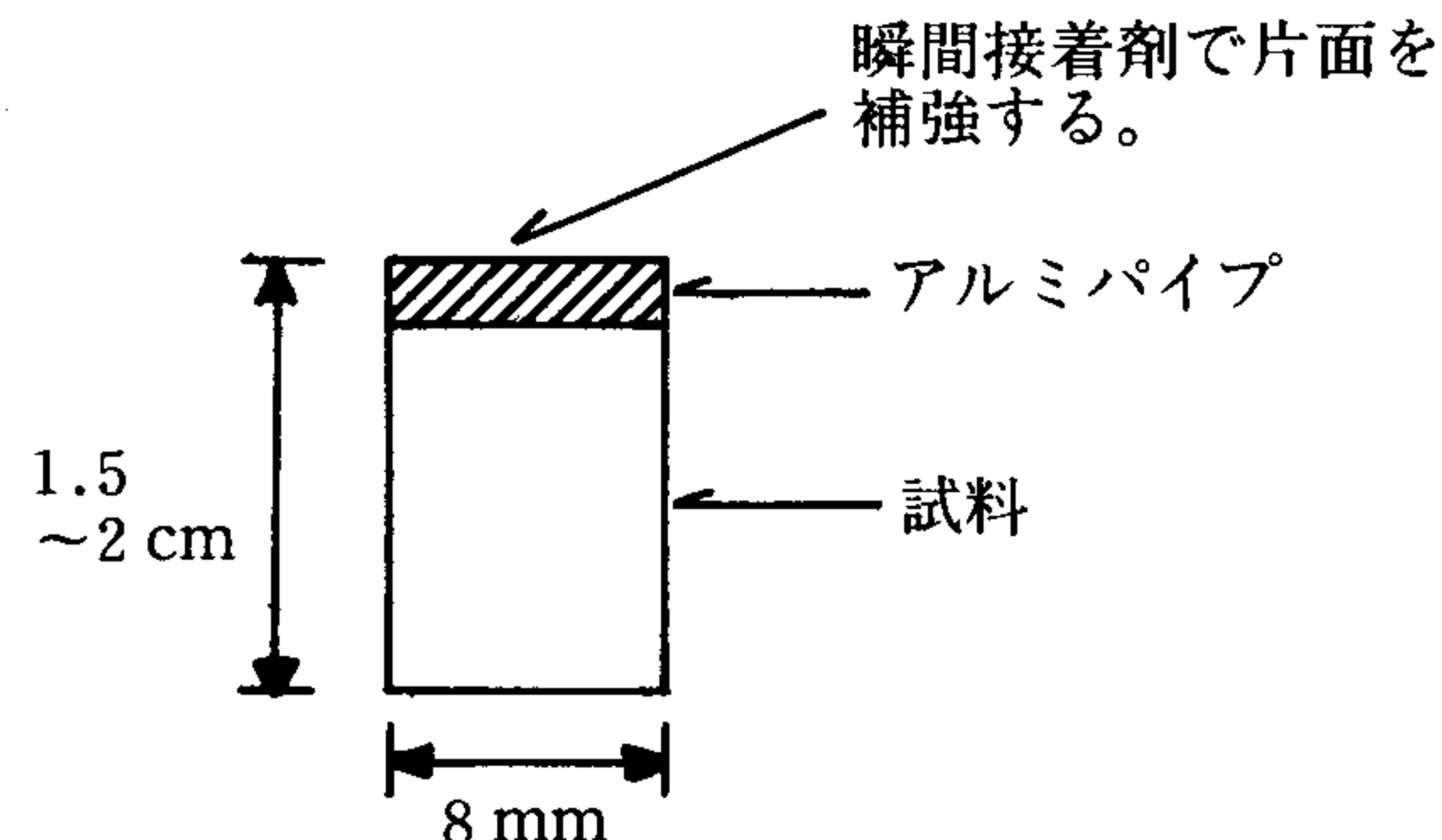


図-4 検鏡試料の作成 (2)

- (ハ) 自然乾燥法により、水分を除去する。
- (ニ) 観察表面の作成。接着剤にて固結していない面を観察面として切り出す。
- (ホ) ピーリングを行なう。(接着テープを使用。) 粘土分の多い場合は、50~100回、接着テープにより、ピーリングを行なう。しかし、砂分の多い場合は、砂粒子が、接着テープのため、余分にはがされ易いので、数回しか行なわなかった。
- (ヘ) 導電性接着材 (銀ペースを使用) で、試料台にはりつける。
- (ト) 試料面からの 2 次電子の発生効率を高めるため、高真空中にて、金蒸着を行なう。
- (チ) 観察開始
観察面としては、図-3 に示すように、載荷荷重方向に対して、垂直面を H-断面として観察を行なった。

3. 走査型電子顕微鏡による締固め土の微視的観察

観察に使用した電子顕微鏡は、日本電子 K・K の走査型電子顕微鏡である。以下写真 1~10 について、粘土混合率別に説明を行なう。

P=0% (写真-1 参照)

砂粒子は、互いに粒子間接触を保ちながら、土の骨格を形成している。このときの ρ_d は、1,503 g/cm³ であり、空隙率は、43%位であった。

P=100% (写真-2, 3 参照)

倍率1000倍では、粘土粒子を 1 個 1 個確認することはできないが、0.002 mm~0.005 mm 程度の小さい粘土粒子のブロックが集合して、土を形成している。この粘土の集合体については、いろいろの呼び名がつけられている。(例えば、ベッド、アッセンブリ等) 倍率100倍では、P=0% のときにみられる大きい空隙部分は、ほと



写真-1 $P=0\%$
 $\times 100$
H-断面

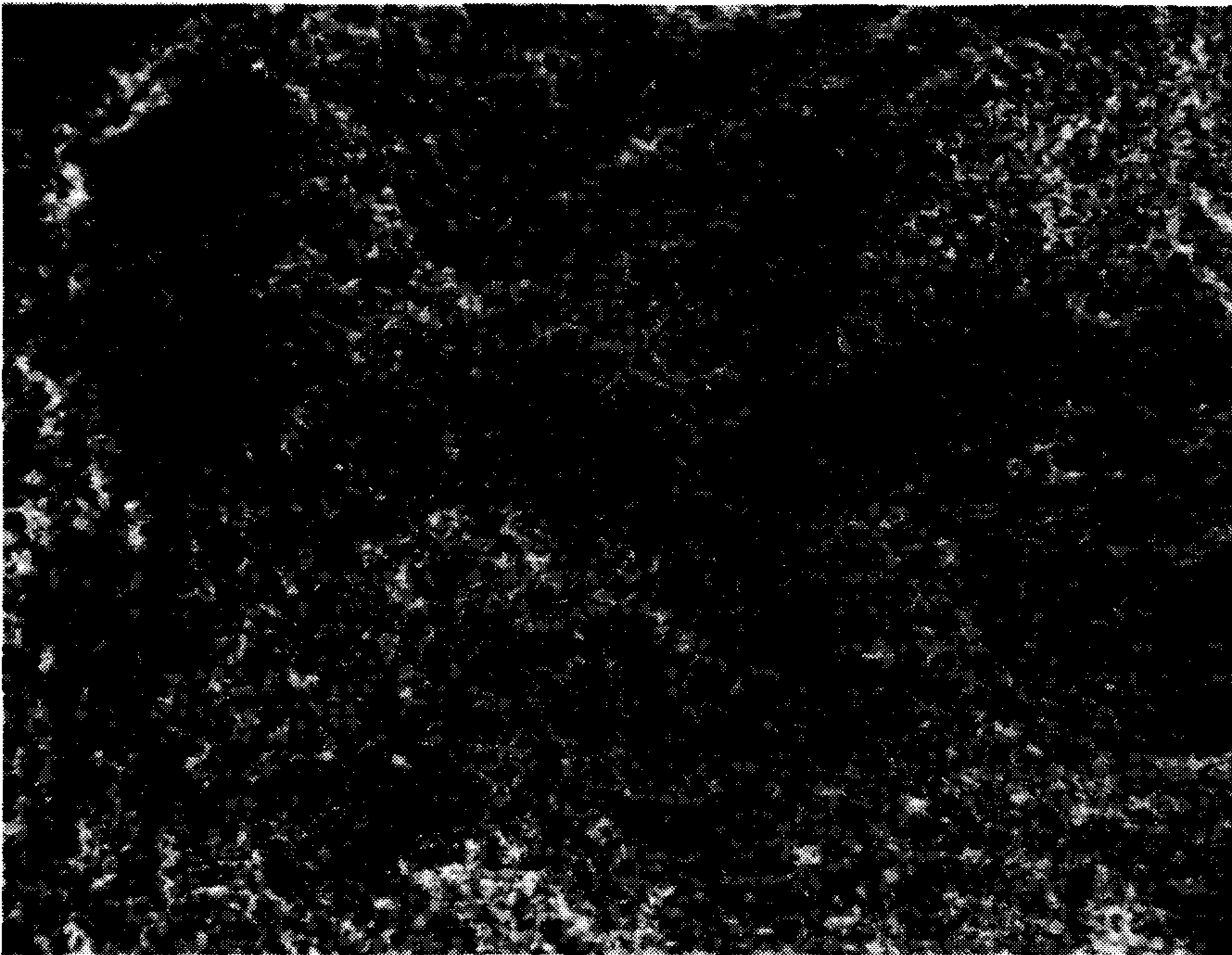


写真-2 $P=100\%$
 $\times 100$
H-断面

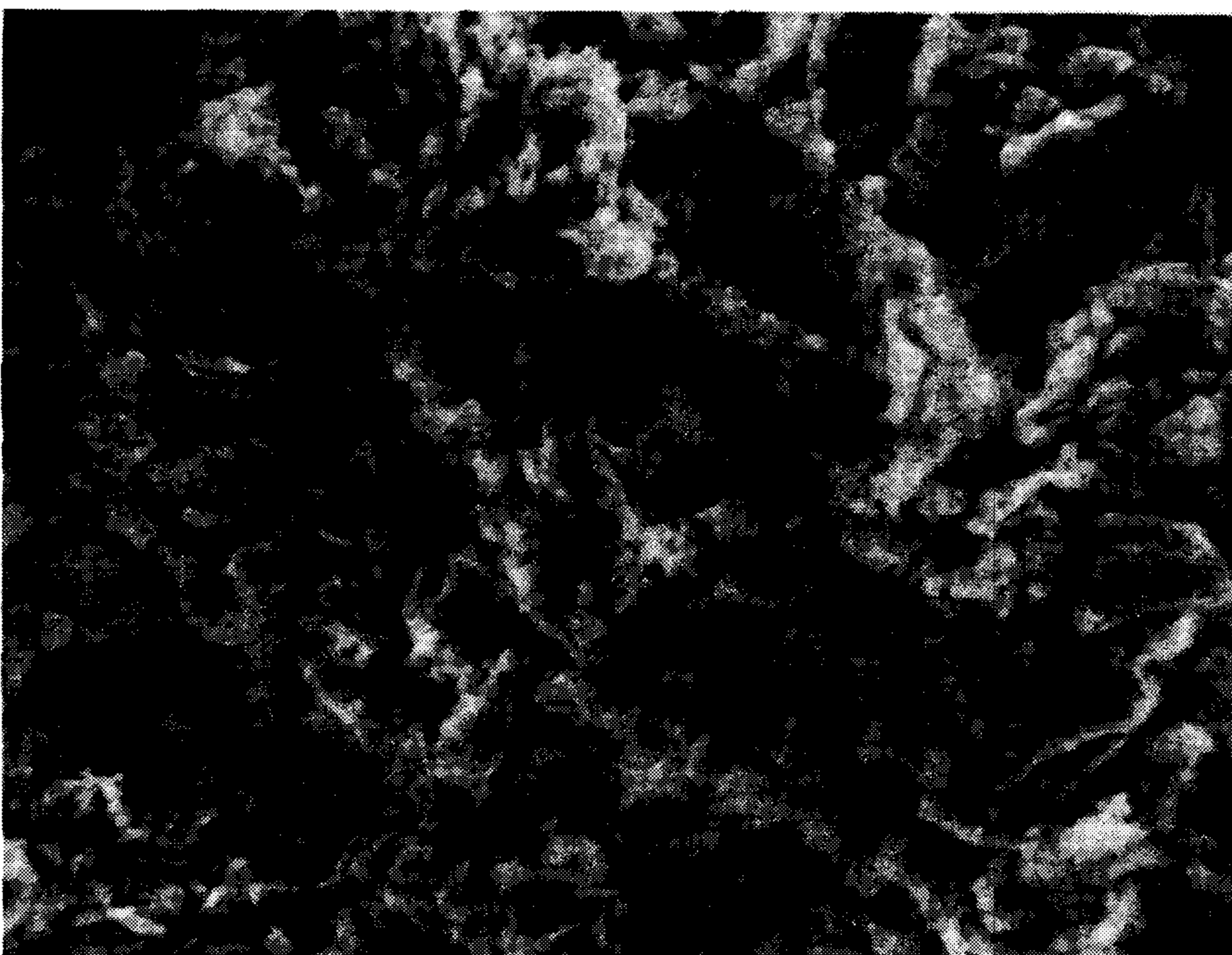


写真-3 $P=100\%$
 $\times 1000$
H-断面

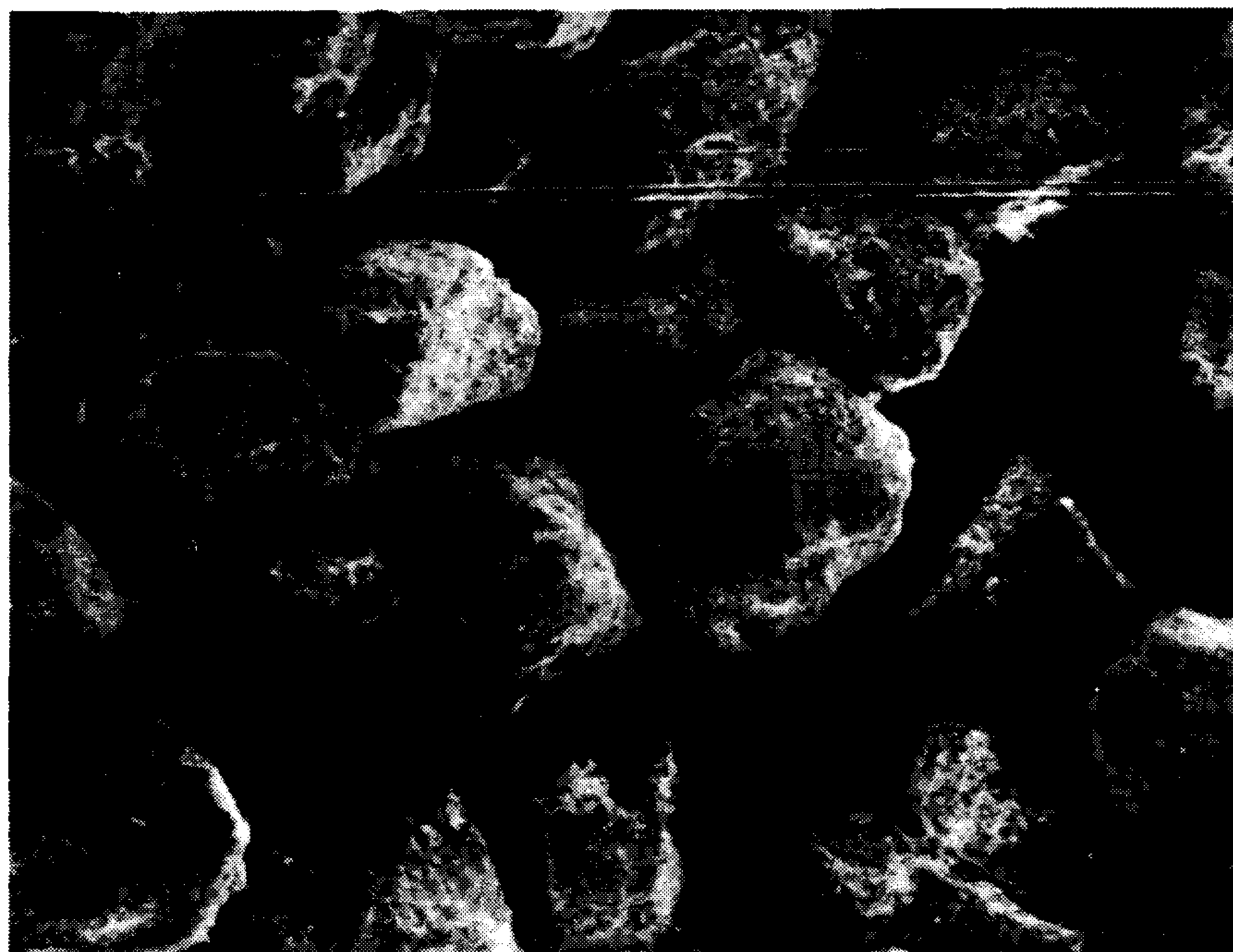


写真-4 $P=10\%$
 $\times 100$
H-断面

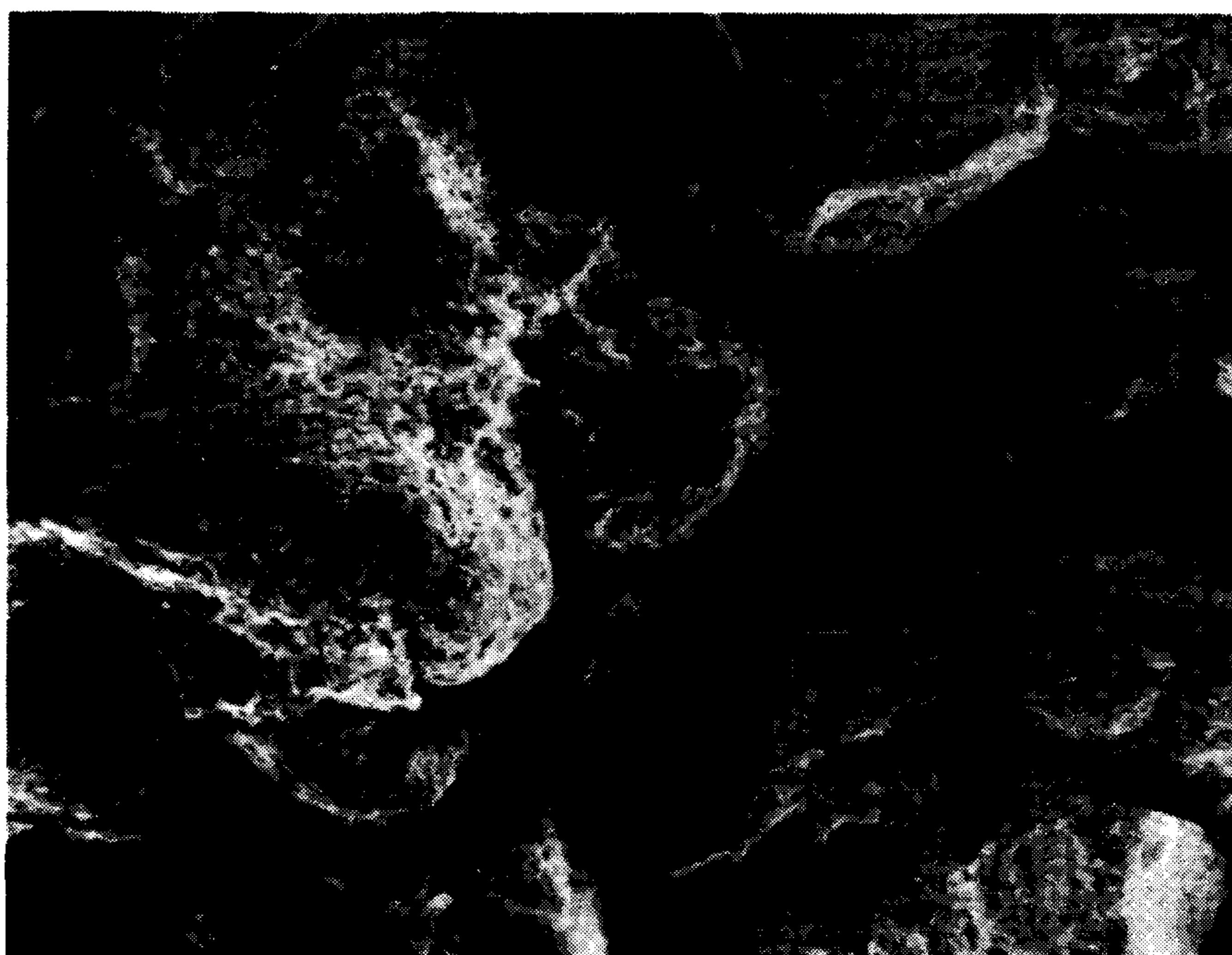


写真-5 $P=20\%$
 $\times 100$
H-断面

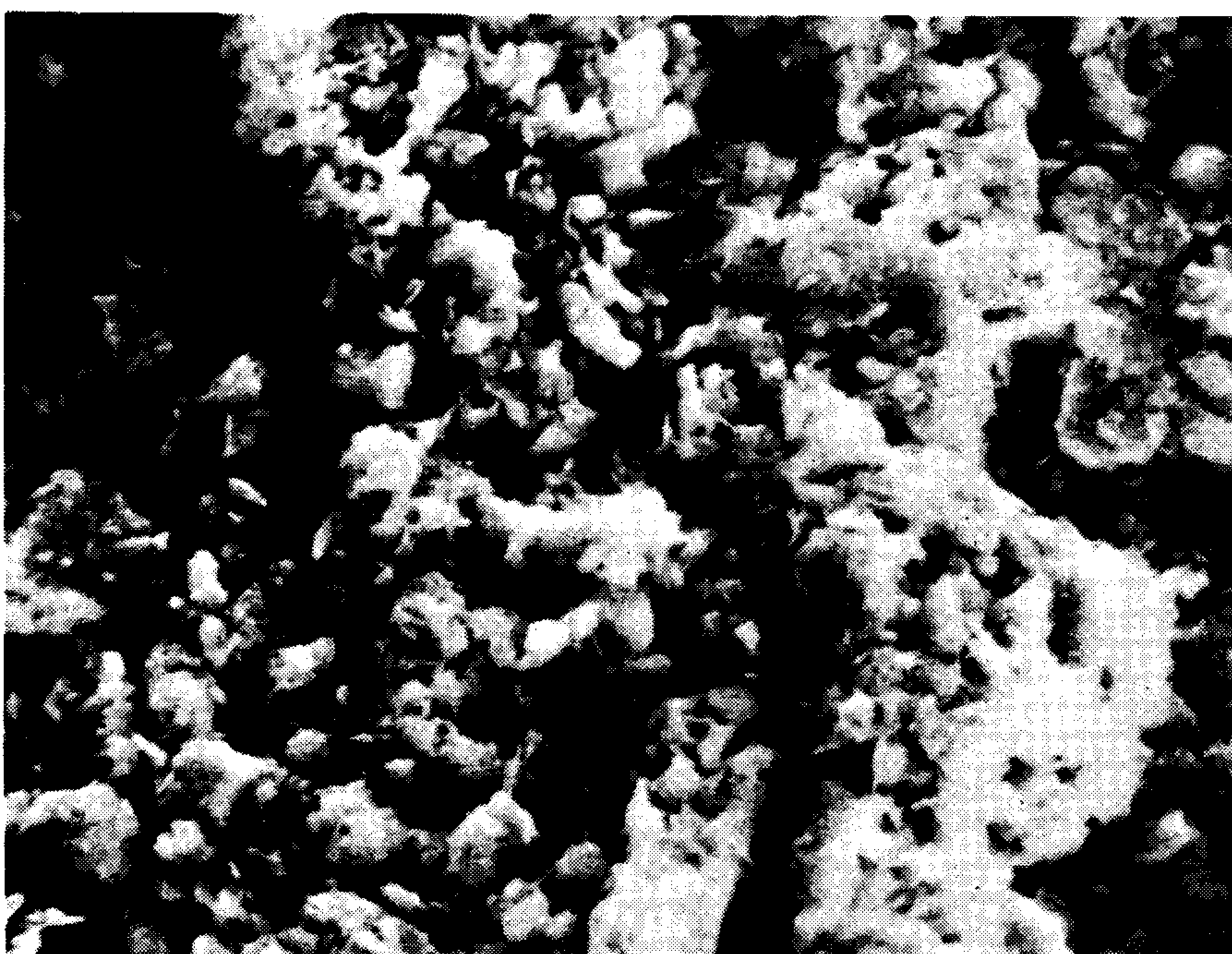


写真-6 $P=20\%$
 $\times 1000$
H-断面

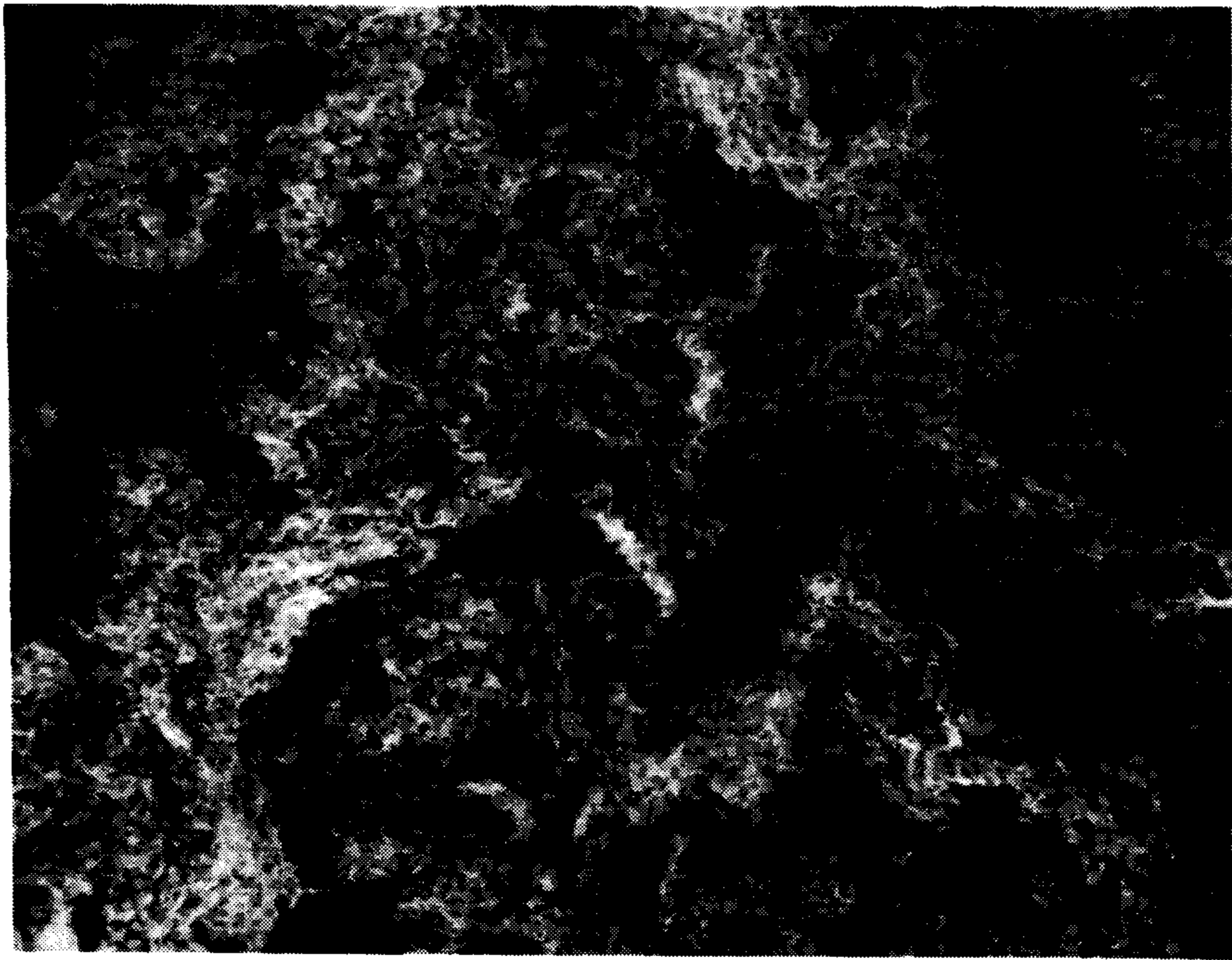


写真-7 $P=30\%$
 $\times 100$
H-断面

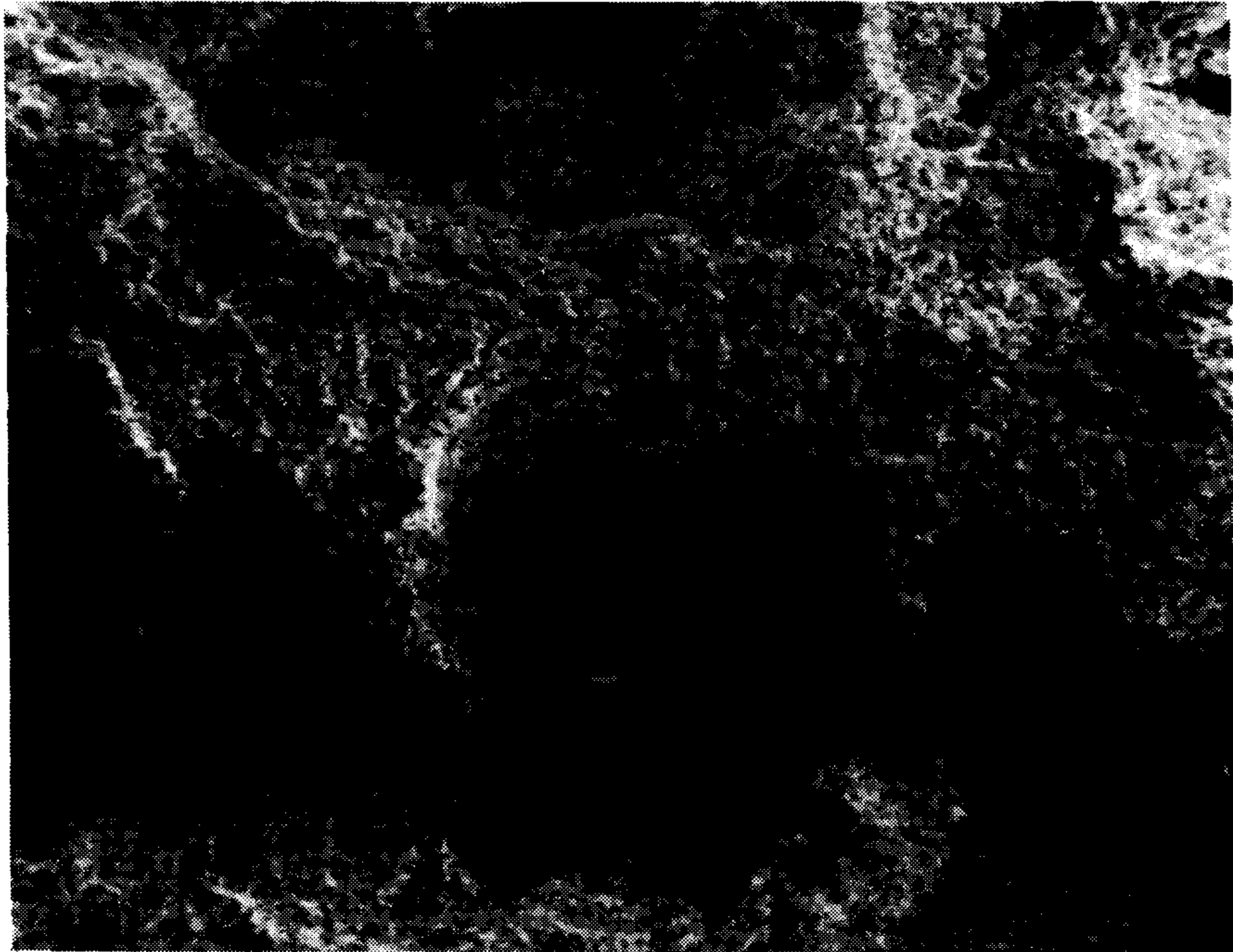


写真-8 $P=50\%$
 $\times 100$
H-断面

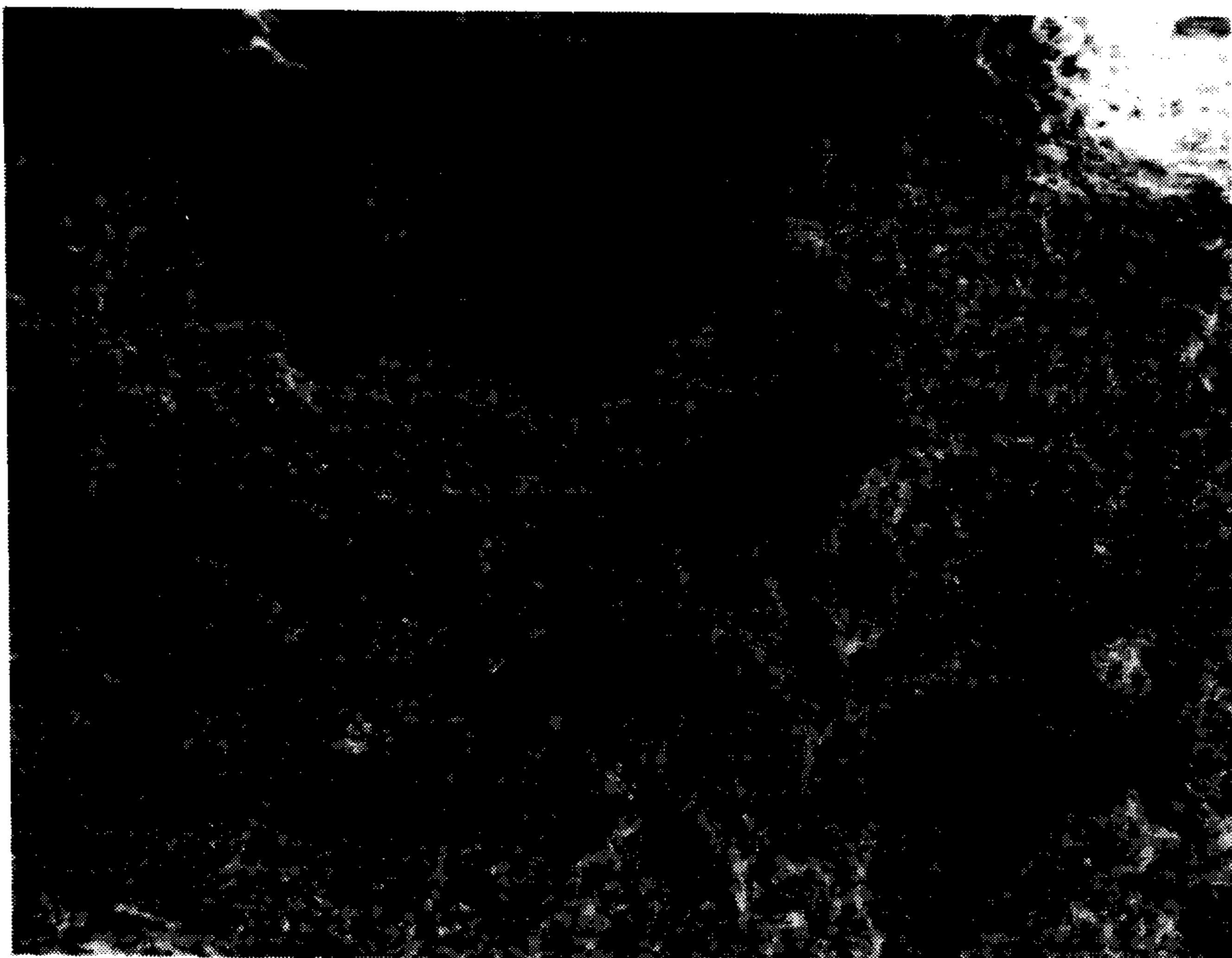


写真-9 $P=70\%$
 $\times 100$
H-断面

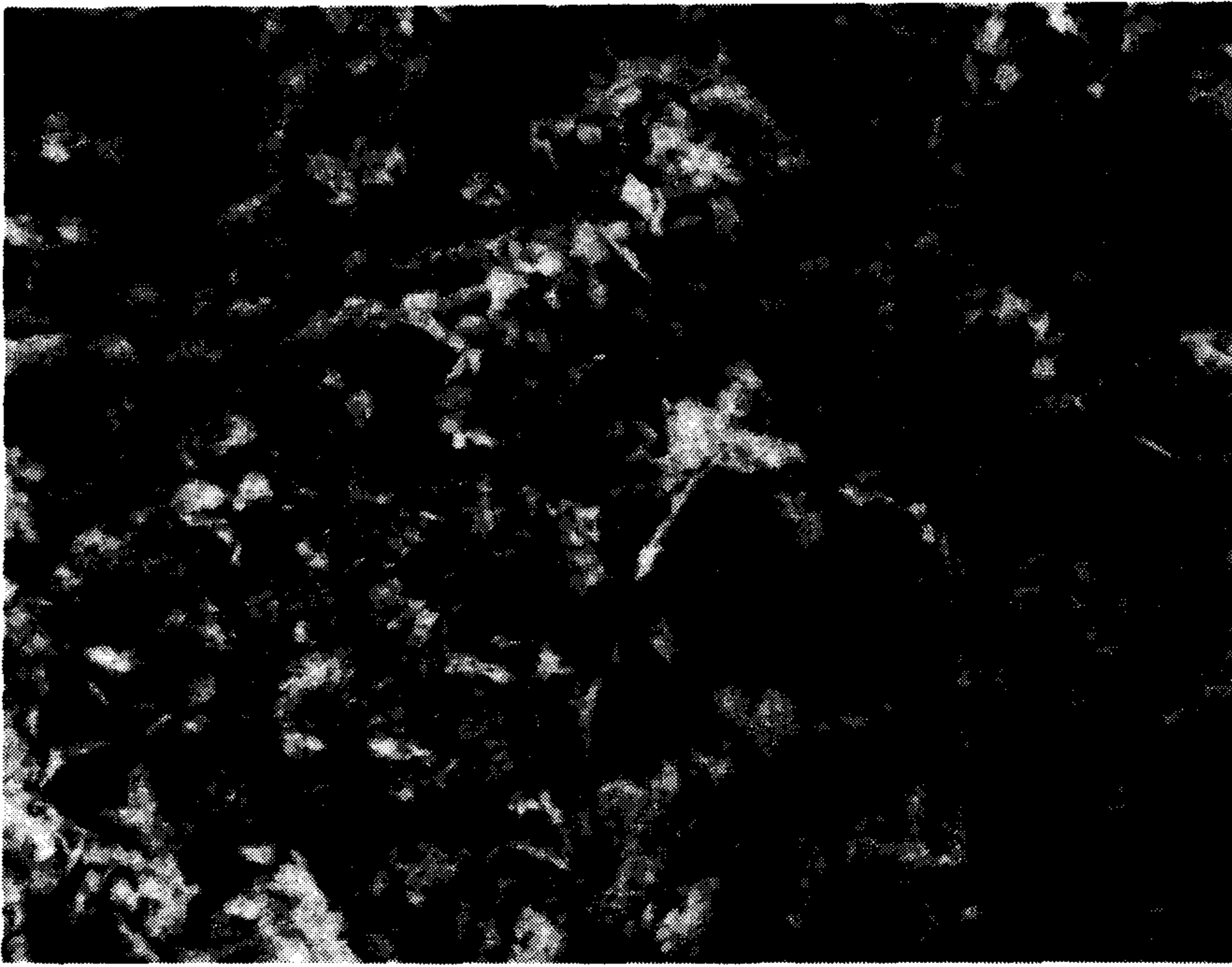


写真-10 $P=70\%$
 $\times 1000$
H-断面

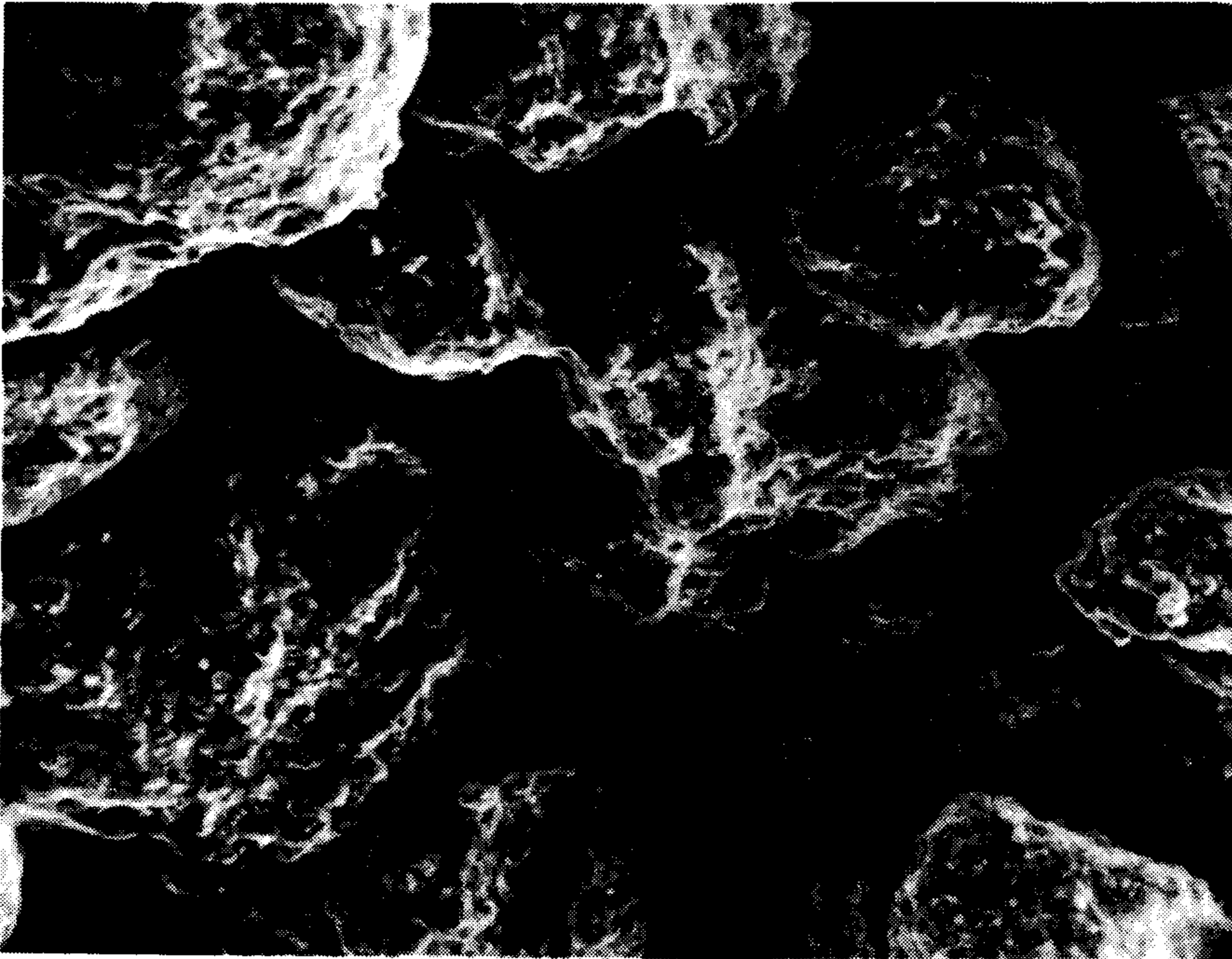


写真-11 $P=20\%$
 $\times 100$
V-断面

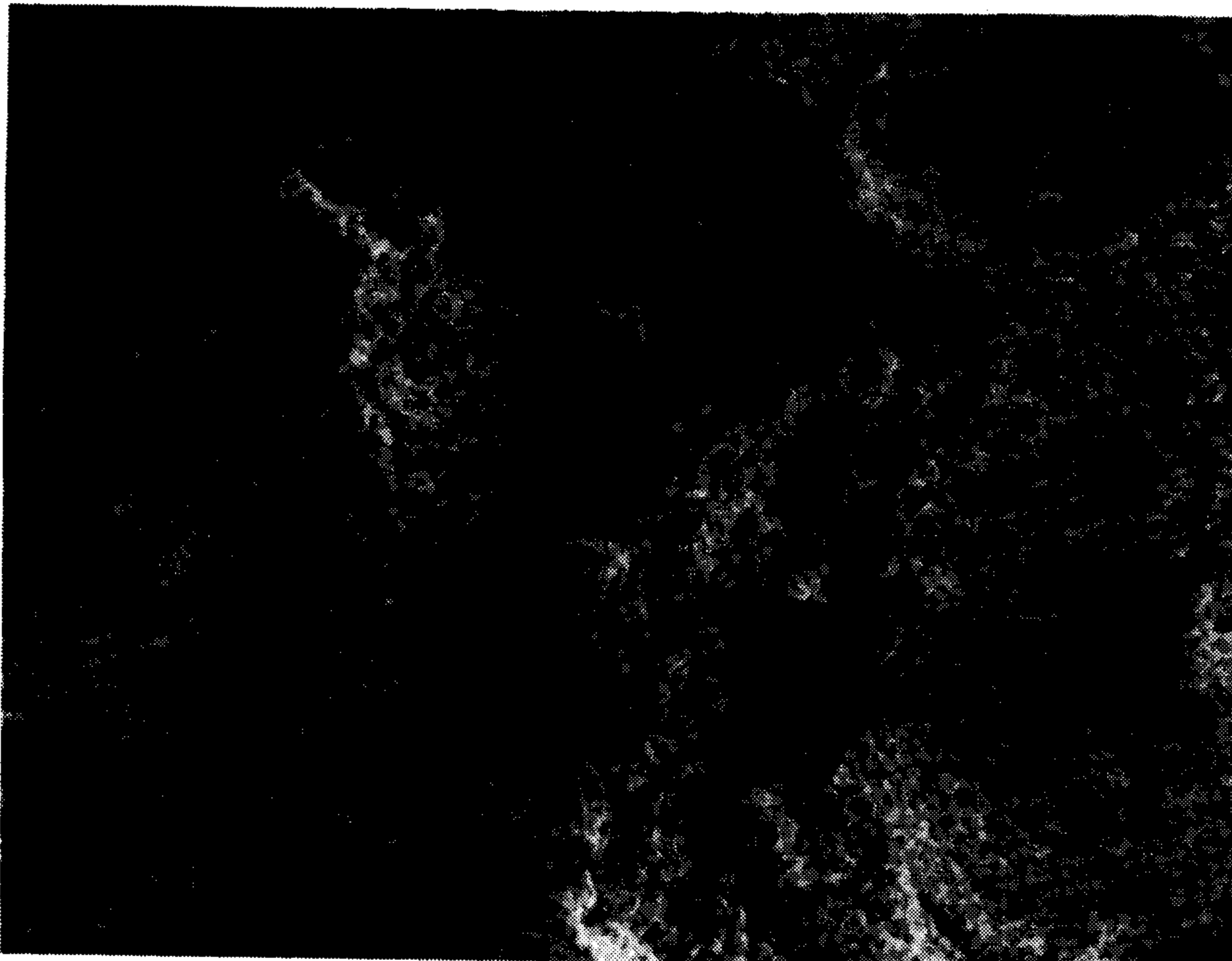


写真-12 $P=50\%$
 $\times 100$
V-断面

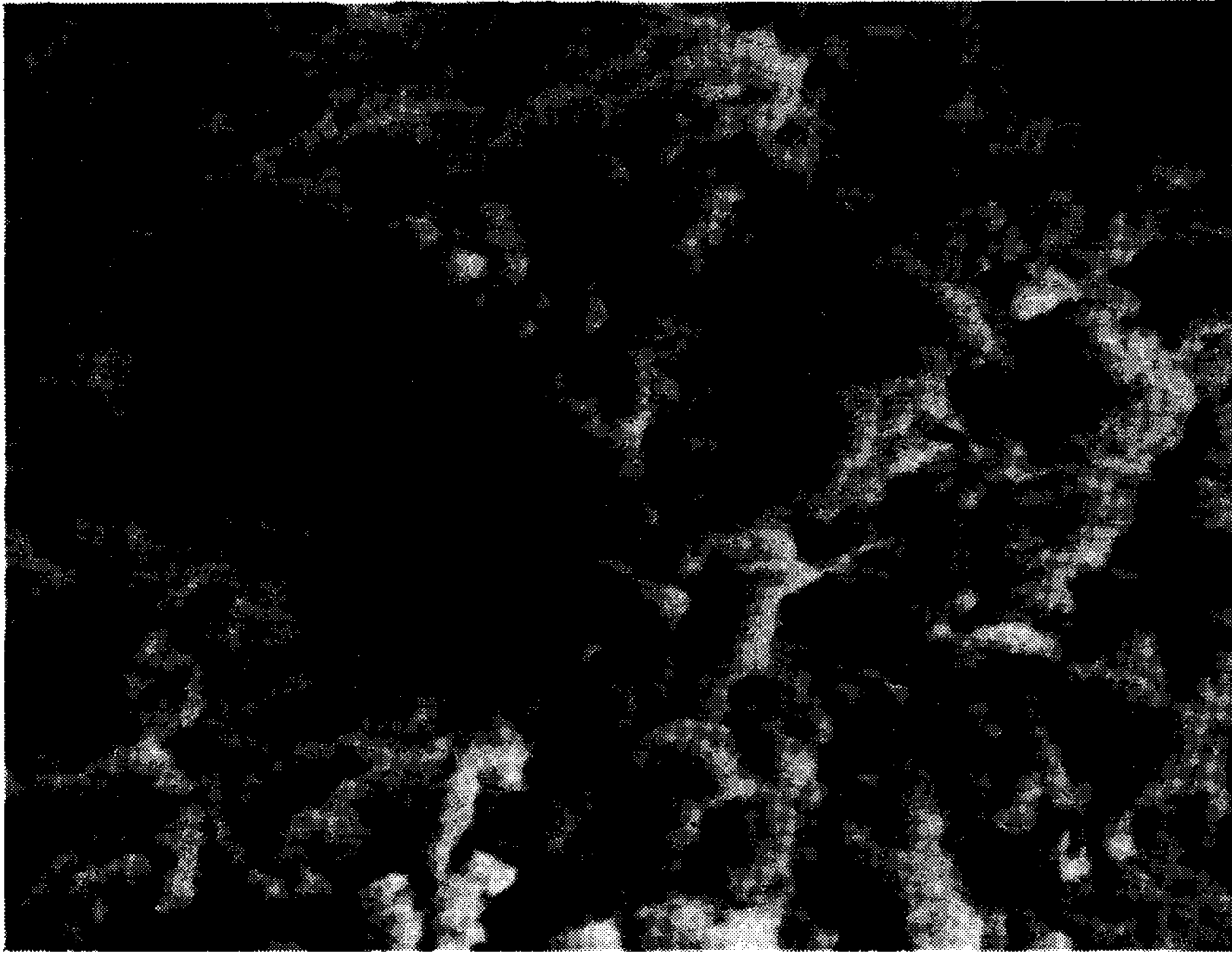


写真-13 $P=50\%$
 $\times 1000$
V-断面

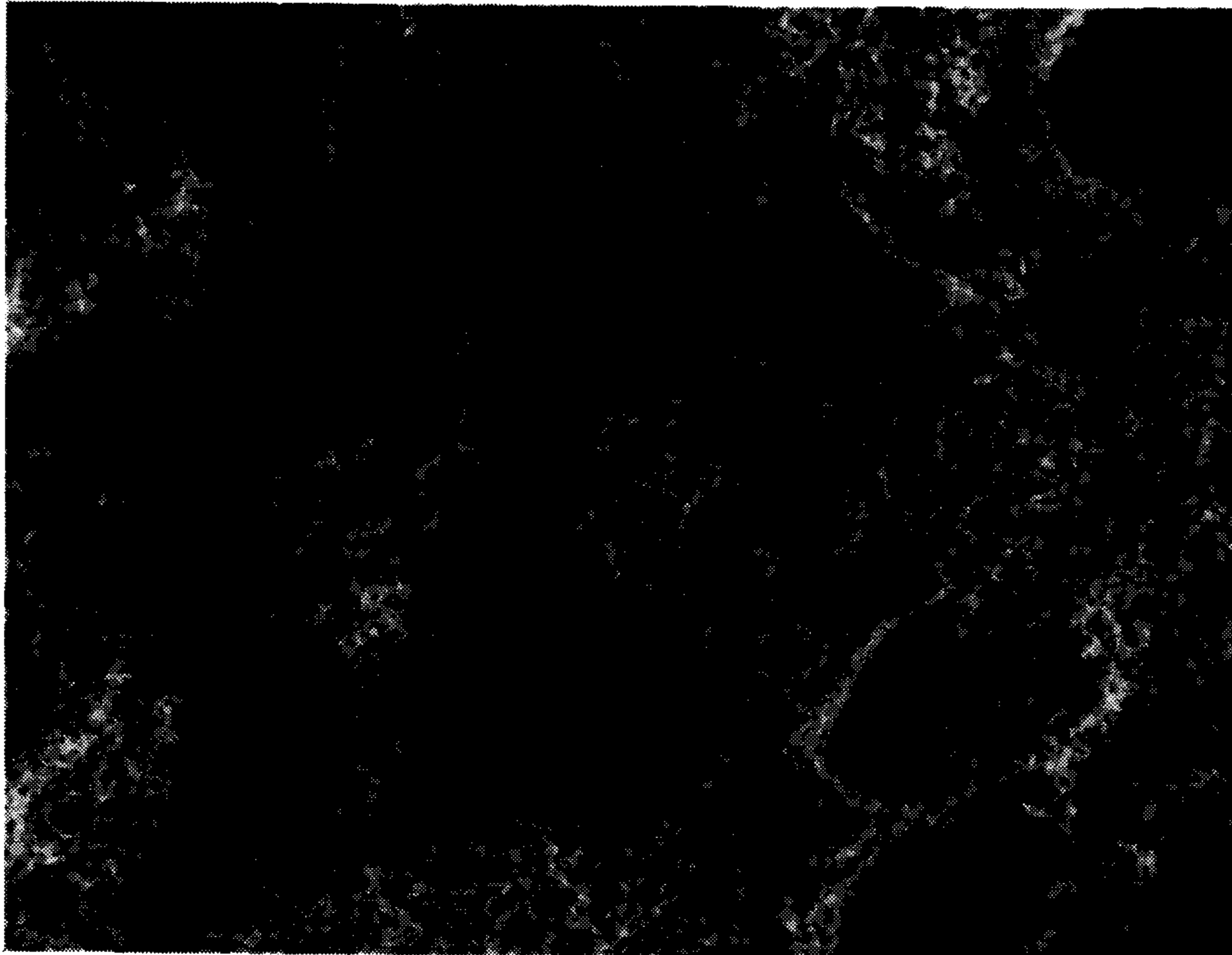


写真-14 $P=70\%$
 $\times 100$
V-断面

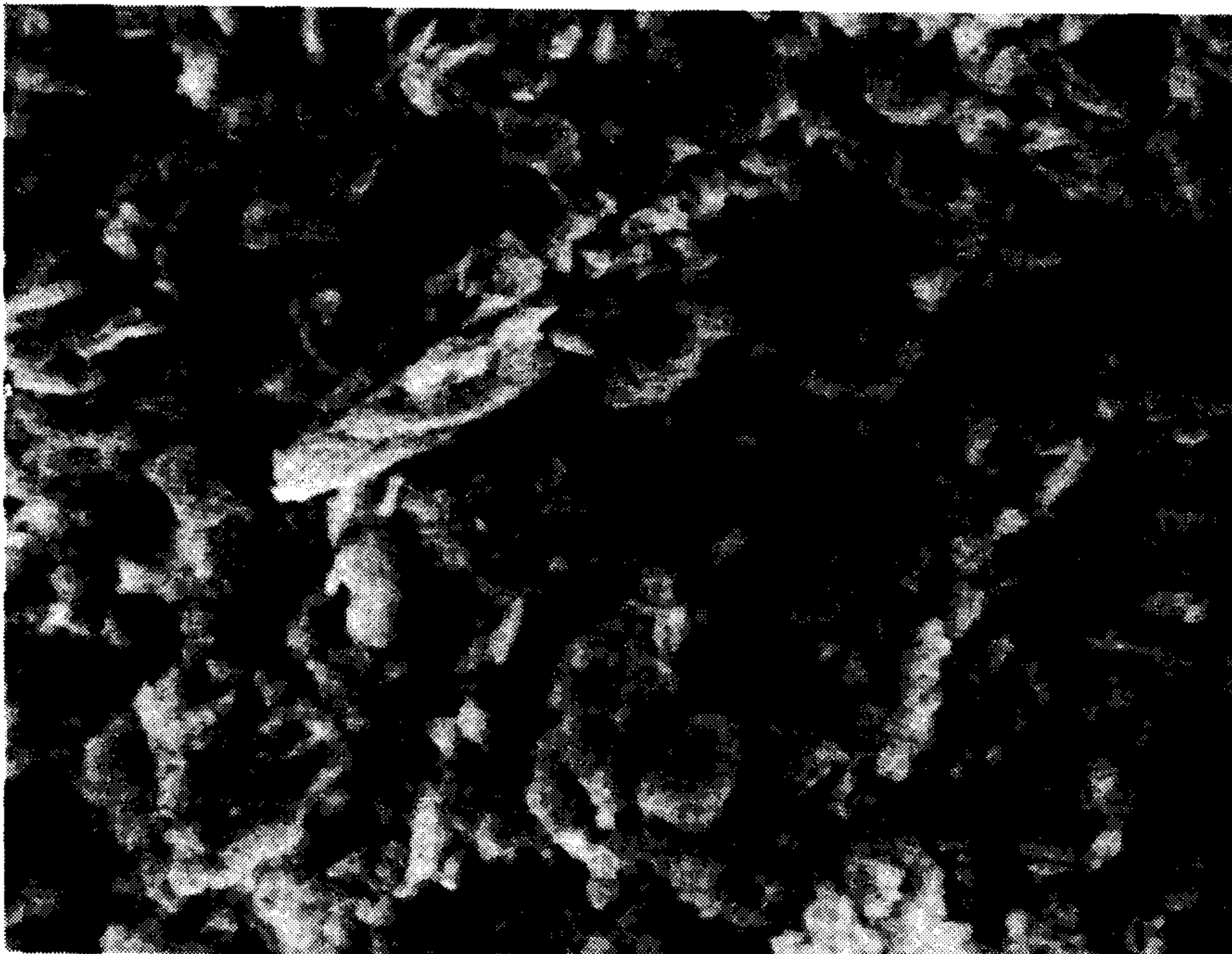


写真-15 $P=70\%$
 $\times 1000$
V-断面

んどみあたらない状態である。

$P=10\%$ (写真-4 参照)

粘土粒子は、小さなブロックのまま、砂粒子の表面に付着しており、混合土全体としては、砂粒子が粒子間接触を保ち、土の骨格を形成している。

$P=20\%$ (写真-5, 6 参照)

砂粒子の構造状態は、 $P=0\%$ と同様に、粒子間接触を保った骨格を形成しているが、粘土粒子は、砂粒子の表面に付着しているものと、砂粒子間の間隙部分を埋め尽して、砂粒子を被うように集合しているものの2種類が確認できる。この砂粒子間の間隙部分に存在する粘土粒子の集合部分を倍率1000倍で観察し、 $P=100\%$ (写真-3 参照) と比較したところ、やはり、 0.005mm 程度の小さな粘土粒子のブロックが集合して、さらに大きなブロックを形成しており、この粘土粒子の集合部分は $P=100\%$ のときの密度と同一であると判断できる。

$P=30\%$ (写真-7 参照)

砂粒子間の間隙を埋め尽す粘土粒子の集合部分は、 $P=20\%$ のときに比べて、2倍以上に増加しており、砂粒子を、1個1個、はっきりと確認できるものは数個に減少している。一方、 $P=0\%$ のときにみられる大きな間隙部分は10ヶ所程度確認できており、混合土全体として考えた場合、砂粒子と粘土粒子の集合部分とで、どちらが、主たる骨格を形成しているかを判断することは、できない。

$P=50\%$ (写真-8 参照)

砂粒子は、ほとんど確認できないが、 $0.05\sim 0.1\text{mm}$ 程度の大きさの間隙が、まだ数ヶ所存在している。一方、粘土粒子は、大部分が連続的につながるように存在しており、この粘土粒子の集合体が混合土の骨格を形成しているとみなすことができる。

$P=70\%$ (写真-9, 10 参照)

$P=50\%$ の写真例と同様、砂粒子を確認することはできず、混合土全体が、粘土粒子の集合体により形成されている。しかし、まだ、 $0.05\text{mm}\sim 0.1\text{mm}$ 程度の大きさの間隙、が数ヶ所確認できる。この写真で、 0.08mm 程度のクレーターのようなくぼみが2ヶ所存在しているが、これは、検鏡試料をピーリングした際、砂粒子が接着テープのためにはがされてできた跡であると考えられる。

なお、載荷荷重方向に対して平行な面をV-断面とし、V-断面で撮映したものについて、数枚参考として掲載した。(写真-11, 12, 13, 14, 15 参照)

4. 締固め土内における基本構造 I 及び II について¹⁾³⁾

前報告で、締固めた砂・粘土混合土の基本構造として、

図-1 に示す2種の構造を提案した。I 構造は、砂のみを締固めたときと同一の砂粒子の形成する骨格構造をもち、粘土粒子は、その骨格の形成する間ゲキ内に入り込んでおり、この粘土の密度は大きくなり得ず、かなり小さいものとする構造である。一方、II 構造は、粘土マトリックス中に砂粒子が種々の混入率で分散している状態であり、II 構造内の粘土の密度は、同一締固めエネルギーで粘土のみを締固めたときの密度と等しいとする構造であ

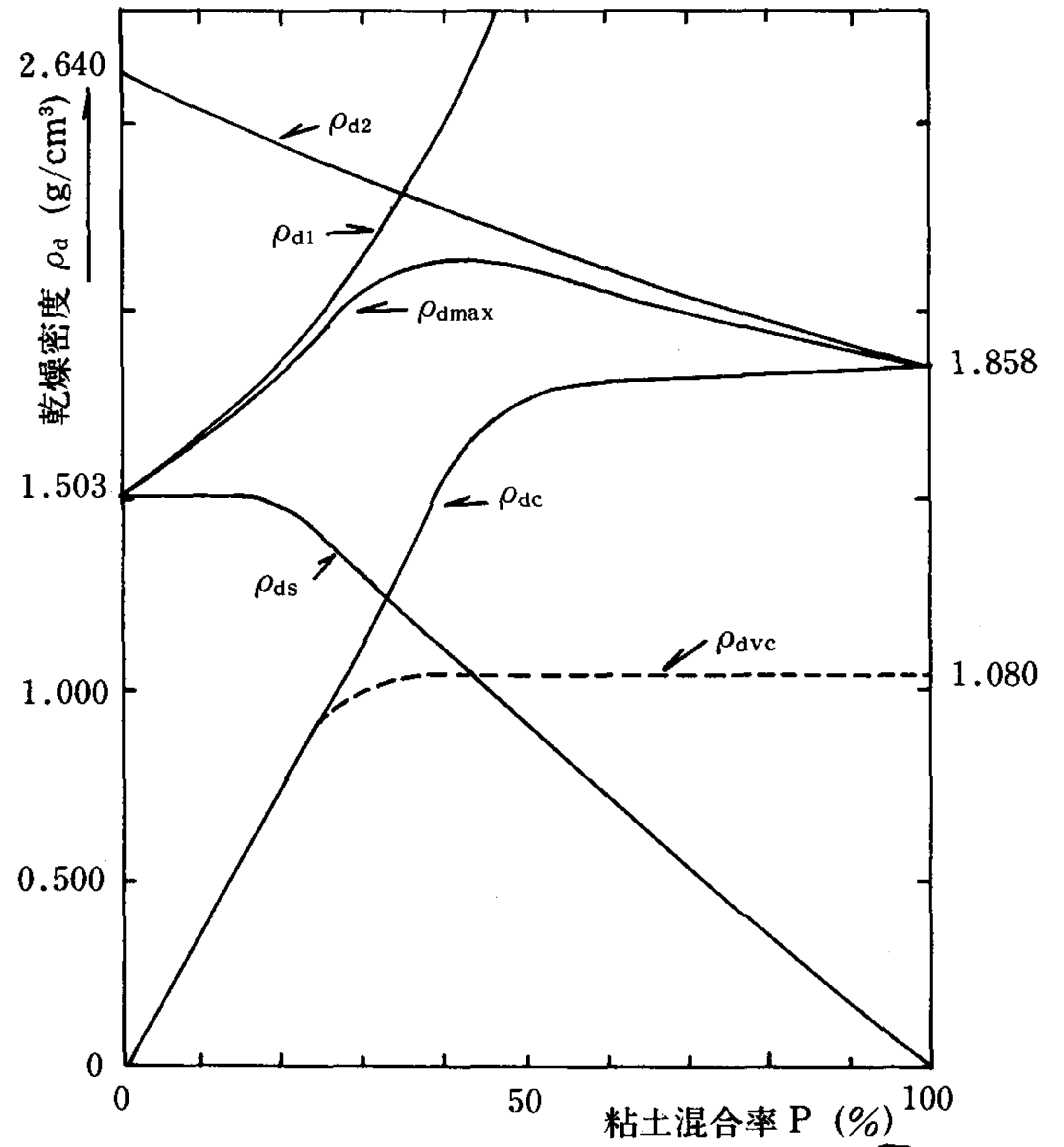


図-5 $P\sim\rho_d$ 曲線

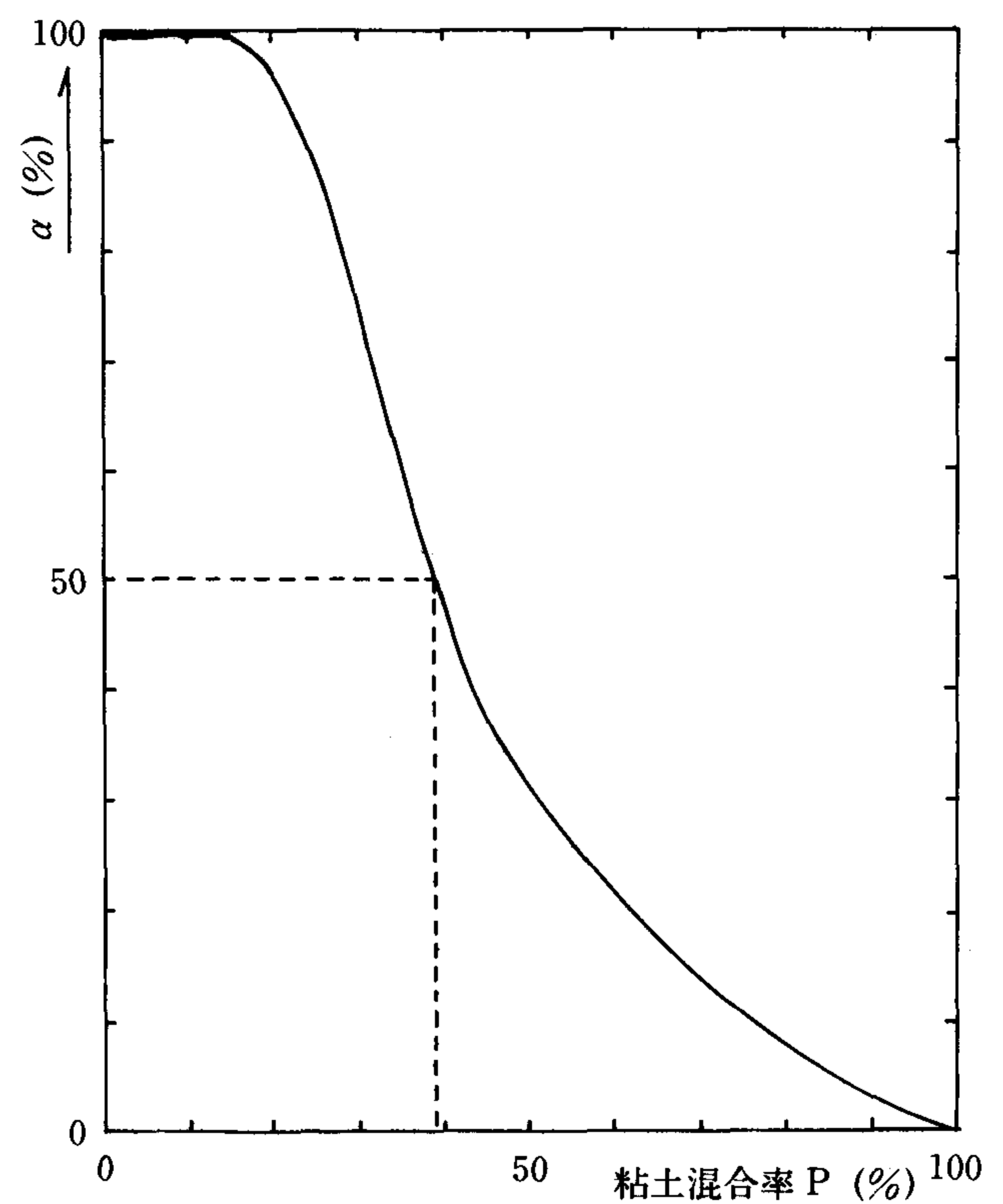


図-6 $P\sim\alpha$ 曲線

る。締固めた砂・粘土混合土の構造を考えた場合、この2種の基本構造が、締固め土の乾燥密度に合致する割合で混じり合う構造(図-2参照)をもつと考えた。また、砂・粘土混合土内における各基本構造の占める割合を次式で求め、図-6に示した。なお、図-5は、各粘土混合率に対する最大乾燥密度等を示している。

ここで、

$$\alpha = \frac{\rho d_{c0}\{G_s - \rho d(1-P)\} - G_s \cdot \rho d \cdot P}{(G_s - \rho d_{s0})(\rho d_{c0} - \rho d_{vc})}$$

α : 混合土内におけるI構造の占める割合(%)

G_s : 砂粒子の比重

P : 粘土混合率(%)

ρd : 各粘土混合率のときの最大乾燥密度(g/cm³)

ρd_{s0} : 砂のみを締固めたときの密度(g/cm³)

ρd_{c0} : 粘土のみを締固めたときの密度(g/cm³)

ρd_{vc} : I構造中の粘土の密度(g/cm³)

5. 写真観察にもとづく基本構造の存在について⁸⁾

5.1 基本構造IIについて

3章の締固め土の微視的観察と、図-5のグラフとを、比較検討してみると、写真-5より、 $P=20\%$ のとき、粘土粒子は、砂粒子の表面に付着しているものと、砂粒子間の空隙部分を埋め尽して、砂粒子を被うように集合しているものの2種類が存在している。この砂粒子間の空隙部分に存在する粘土粒子の集合部分が、粘土のみを同一条件で締固めたときの構造状態と類似していることが、写真-6と3との比較により、指摘できる。また、 $P=30\%$ になると、砂粒子間の空隙を埋める粘土粒子の集合部分が、 $P=20\%$ のときに比べて、2倍以上に増加していることが確認できる。このことから、粘土混合率が20%前後になると、砂粒子間の空隙を埋める粘土粒子の集合体の一部は、粘土100%のときの密度に近い値をもち、混合土全体として考えた場合、これらの粘土粒子の集合体も、混合土の骨格構造を形成することに、十分、関与しているとみなすことができる。一方、図-5より、 $P=20\%$ のとき、混合土内でI構造の占める割合が95%、 $P=30\%$ のとき、 $\alpha=75\%$ となっており、砂分の多い混合土内においても、II構造が存在することになっているが、前述の微視的観察結果より、この粘土粒子の集合部分をII構造の一部分とみなすことができる。

5.2 基本構造Iについて

観察結果より、粘土混合率が50%以上になると、粘土粒子の集合部分は、混合土内でほとんど連続的につながって存在しており、一方、砂粒子は一個一個確認できなくなっている。しかし、砂分が多いときに存在してい

た約0.1mm程度の大きさと同程度の空隙は、この粘土分の多い混合土内でも、十分、確認できる。また、この大きさの空隙は、粘土量の増加とともに、減少し、 $P=90\%$ 以上では、ほとんどなくなっているのが、写真観察より得られた。一方、図-5より、 $P=70\%$ のとき $\alpha=12\%$ と、混合土内では、まだI構造が12%程度存在していることになるが、前述の写真観察結果からも、この0.1mm程度の大きさの空隙の存在する部分が、I構造中の砂粒子の形成する骨格内の空隙の一部分とみられるので、粘土分の多いときでも、混合土内では、I構造が存在するとみなすことができる。

6. まとめ

電子顕微鏡の利用により、締固めた砂・粘土混合土の構造状態について、直接、観察することができ、粘土量の変化に伴う、締固め土の骨格構造の変移について、前報告にて提案した基本構造の考え方を適用することの妥当性について検討することができた。

6.1 砂分が多い場合(0% $<P<30\%$)

締固めた混合土の主たる骨格を形成するのは、I構造、すなわち、砂粒子が互いに粒子間接触を保つ構造であるが、II構造もわずかであるが、混合土の骨格構造を形成することに、関与している。

6.2 粘土量が30%から50%含まれる場合

この粘土量の範囲では、わずかの粘土量の変化に伴ない、砂粒子と粘土粒子の集合体は、複雑に入り混じって、混合土の構造を形成しており、主たる骨格構造を明確に確認することは困難である。

6.3 粘土分が多い場合(50% $<P<100\%$)

この粘土量の範囲では、粘土粒子の集合部分は、混合土内で、ほとんど、連続的につながっており、II構造が、混合土の主たる骨格を形成しており、砂粒子は一部を除いて、粘土マトリックス内で分散した状態である。

6.4 今回の観察は、H-断面を中心に考察を行なったが、参考として、V-断面の観察結果として、一部記載したが、今回の倍率程度での観察では、H-断面と、V-断面との差異は、見出せなかった。

謝辞：本研究を進めるにあたり、早稲田大学理工学部教授 森麟博士から、懇切なるご討議、ご助言を賜りました。また、電子顕微鏡観察に際して、検鏡試料の作成方法等については、埼玉大学理工学部、風間秀彦氏にご助言をいただき、一方、顕微鏡操作におきましては、本大学工学部教授 太田淳氏に、直接、ご指導を賜りました。ここに記して、深謝なる謝意を表します。

(原稿受付 昭和58年9月10日)

参 考 文 献

- 1) 柴田：土の締固めによる密度増加と締固め土の構造に関する研究，国士館大学工学部紀要第13号昭和55年3月
- 2) 柴田：締固め土の構造に関する一考察，国士館大学工学部紀要第15号昭和57年3月
- 3) 森，柴田：締固めた砂・粘土混合土の構造についての考察，第14回土質工学発表会 1979
- 4) 森，柴田：締固めた砂・粘土混合土の構造と水浸 CRB, 第16回土質工学研究発表会 1981
- 5) 嘉門雅史：超軟弱粘土の工学的性質とその安定処理に関する研究，昭和54年2月
- 6) 松屋，嘉門：粘土の構造に関する用語について，土と基礎 24-1
- 7) YOSHINAKA, KAZAMA: MICRO-STRUCTURE OF COMPACTED KAOLIN CLAY. SOILS AND FOUNDATIONS Vol. 13, No. 2, June, 1973.
- 8) 柴田：電子顕微鏡観察による締固めた砂・粘土混合土の構造についての一考察，第18回土質工学研究発表会 1983