

## 三軸圧縮応力下におけるモルタルの変形特性

ON THE CHARACTERISTICS OF DEFORMATION OF MORTAR  
SUBJECTED TO TRIAXIAL COMPRESSION

富田和政\*・秋本昌胤\*\*・川本聰万\*\*\*

By Kazumasa Tomita, Masatsugu Akimoto and Toshikazu Kawamoto

### 1. まえがき

モルタルは拘束圧の小さい応力状態でぜい性を示し、実際には多くの空げきを有し、微視的には不均一な材料である。そのため、その破壊機構は多くの要素に支配される。この複雑な機構を解明するためには、単に応力状態のみに注目する立場からだけでなく、それが破壊に至るまでの変形特性や破壊の形態などの多方面にわたる微視的ならびに巨視的立場からの研究が必要とされる。変形がぜい性的から延性的さらにひずみ硬化とともに変形に変化し、それにともなって破壊機構も変化することは知られている<sup>1)</sup>。現在までに多くの研究者によってなされた研究<sup>2)</sup>は応力状態によって破壊機構の説明を試みたものが大部分で、そのため変形機構の変化を考慮した一般的なものではなかった。破壊時の変形の測定より、ひずみに立脚した破壊論が報告されているが、軸対称の三軸応力状態のみを取り扱っているので一般的でない<sup>3)</sup>。

この研究は供試体の作製が容易で、巨視的には等方、等質な材料と考えられるモルタルを対象として、一軸、二軸および三軸圧縮下でのひずみを、3つの主応力を任意に変えうる純三軸圧縮試験機を用いて測定し実験的に変形機構を考察し、さらには破壊機構を解釈するための資料を得ようとしたものである。

本研究ではまず、等方、等質、線型弾性体の圧縮応力下の応力一ひずみ関係を、三次元的に平均応力成分と偏差応力成分とに分けて求め、ついでこれらの応力状態あるいはひずみ状態を示すパラメーターを用いて、実験結果は平均応力成分あるいは偏差応力成分とそれらに対応する変形との間で考察されている。さらに、弾性係数と

ポアソン比が変化する状態や偏差応力の作用によって生ずる異方性の発生についても述べている。

### 2. 試験装置ならびに実験方法

#### (1) 供試体

本実験で使用したモルタルの材料は普通ポルトランドセメントと豊浦標準砂である。モルタルの重量配合比はつぎのようである。

水：セメント：砂=0.65:1:2

モルタルの練りまぜは電動式アスファルトミキサを用いて行なわれ、練りまぜ時間は空練りで90秒、注水して90秒の合計3分である。1回の打設量は10.8cm×10.8cm×10.8cm立方供試体10個とした。供試体は鋼製型わくに2層に分けて打設され、十分突き固められた。そして、打設後約2時間で、供試体表面はストレートエッジを用いて平滑にされた。供試体は打設後24時間恒温室(20±1°C)内に置かれ、その後水中(20±1°C)で材令27日まで養生された。その後、24時間空中養生され、材令28日で試験された。

#### (2) 純三軸圧縮試験機

三軸圧縮下の力学的挙動を研究するためには、従来多くの研究者によって用いられた軸対称三軸圧縮試験機では不十分で、3つの軸荷重を任意に制御できる三軸圧縮試験機を用いることが望ましい。本実験で用いた試験機を写真-1に示す。本試験機の載荷装置は6個の油圧ジャッキで構成され、ジャッキは互いに直交する3方向に2個ずつ向かい合ってとりつけられている。水平方向の2組のジャッキはそれぞれ最大100t、垂直方向のジャッキの組は200tの載荷能力をもっている。本試験機には、上述の載荷装置のほか、種々の付属装置があり、つぎに示す特殊な載荷試験を行なうことができる。

\* 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科 修士課程  
土木工学専攻

\*\* 正会員 工修 名古屋大学助手 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工博 名古屋大学助教授工学部土木工学科

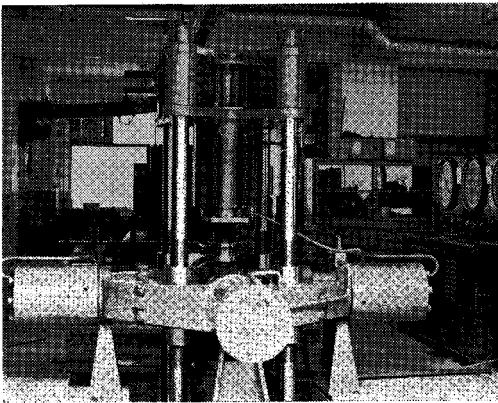


写真-1

1. 比例載荷試験
2. 定荷重載荷試験
3. 定ひずみ載荷試験

上述の試験を各軸独立にまたは同時に行なうことができ、また(1),(2),(3)を組合せて行なうこともできる。なお、ラムの移動量をラム間にとりつけた差動トランスで読み取ることにより供試体の変形量を測定するひずみ測定装置も付属している。

### (3) 実験方法

載荷は前記の三軸圧縮試験機を用いて行なった。後述するように、応力状態を平均応力成分と偏差応力成分とに分けて考えることを考慮して、つぎのような載荷方法で載荷された。

- A. 単軸圧縮載荷
- B. 静水圧載荷
- C. 三軸比例載荷（平均応力は常に一定に保持）
- D. 一軸定荷重二軸比例載荷
- E. 静水圧定荷重載荷

各載荷方法の目的を述べるとつぎのようである。Bの載荷方法で試験を行なえば、作用する応力成分は平均応力だけであるから、平均応力と体積変化の関係を検討することができる。Cの載荷方法で試験すると、変化する応力成分は偏差応力成分だけであるから、偏差応力の変化にともなう変形特性を求めることができる。Dの載荷方法で試験すると、平均応力成分と偏差応力成分の変化にともなう変形特性を検討でき、さらに後述する弾性定数をもとめることができる。Eの載荷方法によって、高圧下におけるモルタルの流動現象の傾向を調べることができる。載荷速度は最大主応力方向で2~4 kg/cm<sup>2</sup>/sec、他の方向の載荷速度はこれに準じた。

供試体と加圧板との間に生じる摩擦は供試体の変形、応力分布に大きな影響をおよぼすことはよく知られてい

る<sup>4)</sup>。摩擦の影響をさけるために、大きな供試体を用いて摩擦の影響のおよばない部分で測定したり<sup>5)</sup>、供試体と加圧板の間に減摩剤をはさみこんだりしているものもある<sup>6)</sup>。本実験では摩擦の影響をさけるために、シリコングリスを塗ったテフロンシートを加圧板と供試体の間に入れた。二軸圧縮で上記の減摩剤を使用した場合、静止摩擦係数は約0.02となり、減摩剤を使用しないときの静止摩擦係数約0.5と比較して、減摩剤は非常に有効であることを確かめた。減摩剤と摩擦係数との関係については文献7)で非常にくわしく検討されている。図-9に、一軸圧縮下における摩擦の影響が示されている。図-9から明らかなように、材端摩擦が除かれないと、変形量は減少し、見掛け上強度は増加する。三軸圧縮下、とくに拘束圧が大きい場合、このような摩擦の影響は減少するであろうが、できる限り材端摩擦を除かねばならない。

減摩剤を使用する場合、ラム間にとりつけた差動トランスで変形を測定すると、測定値には、テフロンシートなどの減摩剤の変形が含まれるため、供試体の変形はモールドゲージで測定しなければならない。しかしながら、モールドゲージを使用しても、その周囲に応力集中が生じ、モルタル自体の特性とは異なった結果が測定される可能性が、とくに高拘束圧のもとで考えられる。このように、摩擦の影響を受けないで、応力集中が生じないように変形を測定することはかなり困難である。モルタルの場合、モールドゲージを埋め込むことができるが、岩石のようにモールドゲージを使用できない場合、摩擦を除いて変形を測定することはさらに困難である。本実験でのひずみは拘束圧が比較的小さい場合、モールドゲージ（ゲージ長=40 m/m）で測定され、拘束圧が大きい場合、ラム間にとりつけた差動トランスで測定した。当然この場合には、摩擦の影響があり好ましくないが、比較実験の立場に立てば許されるであろう。なお特別に断わらない限り、変形は前者の方法で求められている。

### 3. 実験結果

#### (1) 体積変化

図-1から図-5に示されるひずみはラムの移動量を差動トランスで測定することによって求めたものである。したがって、測定値は供試体表面の破損、加圧板の弾性変形を含んでいる。

載荷方法Bによる結果を示すとつぎのようである。静水圧応力 $\sigma_p$  ( $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$ )と平均ひずみ $\varepsilon_m$  ( $\varepsilon_1=\varepsilon_2=\varepsilon_3$ )の関係は図-1のようである。図-1で、一点鎖線は処

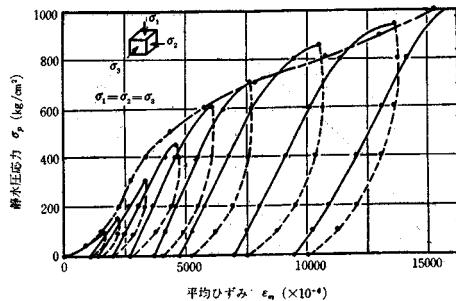


図-1 平均ひずみと静水圧応力の関係

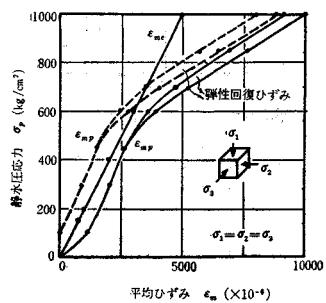


図-2 平均ひずみの弾性成分と塑性成分

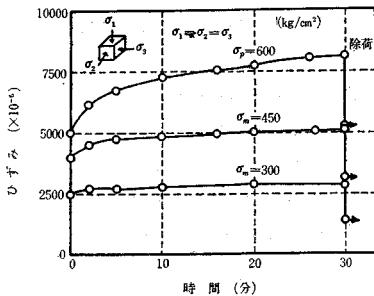


図-3 短時間のクリープ特性

女圧縮曲線を、実線と点線は繰返し載荷曲線を示す。繰返し載荷の過程は、ある荷重まで載荷したのち、ただちに除荷し、完全に除荷された状態で弾性回復を測定するため 10 分間放置した。そしてさらに載荷、除荷が繰返された。両曲線は一致していないが、ここでは近似的に一致するものとして扱うこととする。

処女圧縮曲線の勾配は最初ゆるやかである。これは主に供試体表面の破損に基づくものと考えられる。載荷初期の急激な変形を無視すると、曲線の勾配は応力が  $400 \text{ kg/cm}^2$  までは、ほとんど一定で、 $400 \text{ kg/cm}^2$  から  $600 \text{ kg/cm}^2$  の間で変化している。勾配が急激に変化する挙動、すなわち、変形増分が応力増分にくらべて非常に大きい挙動を降伏とすると、この場合、応力のある範囲（ここではこれを降伏領域と呼ぶ）内で降伏が起こることになる。この降伏領域は図-2、図-3 に示すように、塑性変形の急激な増加とクリープひずみの増加に対応

し、この領域で材料の質的変化が起こることが推定できる。降伏領域を過ぎると、曲線の勾配は一定となり、変形は直線的に進行する。

処女応力が  $350 \text{ kg/cm}^2$  以下である場合、再負荷曲線の勾配はその処女応力値まではほぼ一定であるが、処女応力がそれ以上になると、再負荷応力がその値に達する以前に、再負荷曲線の勾配は変化する。これは、降伏領域の存在を示すものであろう。なお、再負荷曲線の直線部分はお互いに平行になる。ループは処女応力の増加とともに大きくなるが、その形は、ほぼ相似である。また、応力が  $600 \text{ kg/cm}^2$  以上になると、ループは弾性回復ひずみを示すようになる。

降伏領域での変形を明らかにするために、図-1 の結果を使用して図-2 が書かれた。図-2 には、ひずみが弾性ひずみ  $\epsilon_{me}$  と塑性ひずみ  $\epsilon_{mp}$  とに分けられている。弾性ひずみは応力と直線関係を示し、また、降伏領域で急激に変化しないことがわかる。載荷初期に生じる塑性変形を無視した塑性ひずみは点線で示され、図-2 では、 $\sigma_p = 100 \text{ kg/cm}^2$  までの塑性ひずみが無視されている。図-2 によると、塑性ひずみは応力とともに増加し、 $400 \text{ kg/cm}^2$  までは、直線的に増加している。さらに、応力が増加すると、降伏領域に対応して曲線の勾配は急激に変化する。したがって、降伏領域でのひずみとの急激な増加は塑性ひずみの急激な増加のためであることがわかる。また、 $\epsilon_{me}$  曲線と  $\epsilon_{mp}$  曲線の比較から、応力が  $600 \text{ kg/cm}^2$  以上になると、塑性ひずみが弾性ひずみより大きくなり、ひずみ硬化をともなう変形が起こることを示している。

一般に、モルタルに対して行なった試験結果によると、載荷中においても、かなりの流動現象が認められる。図-3 は載荷中に生じるクリープひずみの傾向を知るために行なわれた実験の結果で、ここでは、30 分間に生じるクリープひずみが示されている。図-3 で、 $\sigma_p = 300 \text{ kg/cm}^2$  の場合、定荷重に保持されたあと、クリープ変形は約 5 分間でほとんど起り、クリープ変形がわずかであることを示している。 $\sigma_p = 450 \text{ kg/cm}^2$  の場合、やはり定荷重に保持したあと、約 5 分間で大部分のクリー

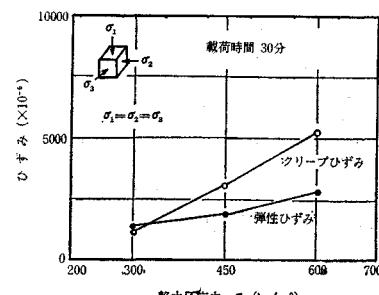


図-4 クリープひずみと弾性ひずみの比較

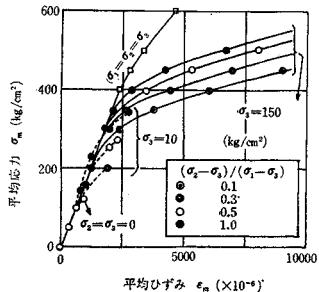


図-5 中間主応力が体積変化に与える影響

変形が生じるようである。しかしながら、30分経過しても、なおクリープ変形の進行を示している。図-3の結果を、弾性成分と塑性成分に分けて示すと、図-4のようになる。

つぎに、偏差応力が作用するときの、平均応力  $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  と体積ひずみ  $\epsilon_m = (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)/3$  の関係を中間主応力の大きさを示すパラメーター  $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$  を用いて図示したものが図-5である。静水圧応力に対する曲線を基準曲線として、平均応力と平均ひずみの関係を見る。まず  $\sigma_3 = 150 \text{ kg/cm}^2$  の場合、これらの曲線は、平均応力の小さいところでは、基準曲線と一致した曲線であるが、平均応力がある値に達すると、中間主応力の大きさに応じてこの基準曲線から分岐し、静水圧応力状態で認められた降伏領域と異なる降伏領域で降伏することがわかる。そして、降伏領域を通過した曲線は、 $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$  を異にしても、互いに平行になる。このことは静水圧応力と平均応力の力学的性質は等しいとする弾塑性理論の仮定<sup>8)</sup>がモルタルでは成立しないことを示している。

等方、等質な弾性連続体の応力は一般的に2つの応力成分に分けて考えることができる。すなわち、一つは体積変化に関係する平均応力成分であり、他の一つは形状変化に関係する偏差応力成分である。二つの応力成分を八面体上に作用する応力で考えると、八面体垂直応力は平均応力成分を、また八面体せん断応力は偏差応力成分を表わす。 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  をそれぞれ、最大主応力、中間主応力、最小主応力とすると、平均応力  $\sigma_m$  と、八面体せん断応力  $\tau_{oct}$  はつぎのようになる。

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (1)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (2)$$

ひずみの場合も、同様に求められる。いま  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  をそれぞれ最大主ひずみ、中間主ひずみ、最小主ひずみとすると、ひずみは体積変化に対応する平均ひずみ成分と形状変化に対応する偏差ひずみ成分に分けることがで

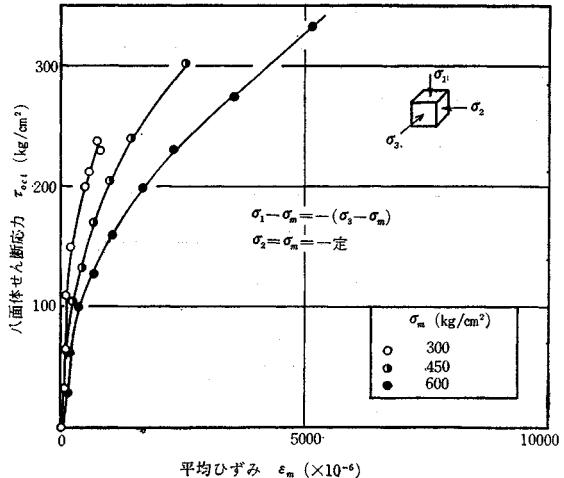


図-6 偏差応力による体積変化

きる。

$$\epsilon_m = \frac{1}{3}(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) \quad (3)$$

$$\frac{1}{2}\tau_{oct} = \frac{1}{3}[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]^{1/2} \quad (4)$$

ここで、 $\epsilon_m$  は平均ひずみ、 $\tau_{oct}$  は八面体せん断ひずみである。

実験結果から、八面体せん断応力と平均ひずみの関係の一例を示すと図-6 のようになる。載荷方法 C で載荷すれば、偏差応力状態のみが変化し、平均応力は一定に保持されるので、一般的には、体積の変化はありえない。しかしながら、図-6 は体積変化を示している。この原因として、載荷方法 C によって載荷される供試体は、載荷中、常に一定の平均応力を受けているので、図-4 に示す短時間のクリープ変形によって体積変化が生じると考えることもできる。しかしながら、図-4 に示すクリープひずみと図-6 に示す平均ひずみを比較してみると、図-6 に示す平均ひずみの方が大きい。このことより、八面体せん断応力の変化によって生じる体積変化がクリープ変形のみによって生じたのではなく、他の原因にも関係していることがわかる<sup>9)</sup>。すなわち、砂や土が偏差応力下で体積変化を示すように、モルタルも偏差応力の変化によって変化するものと考えられる。

図-6 に示す3本の曲線は同じ経路を通らない。 $\sigma_m = 300 \text{ kg/cm}^2$  の場合、曲線の勾配は急で、体積変化の急激な変化を示さないで、破壊している。 $\sigma_m = 450 \text{ kg/cm}^2$  の場合、曲線はやや延性的で、急激な体積変化のうち破壊を示している。 $\sigma_m = 600 \text{ kg/cm}^2$  の場合、変形はひずみ硬化をともなうような挙動を示す。このように、偏差応力の変化による体積変化が作用する平均応力の大きさによって異なることは材料の質的変化と変形特性の

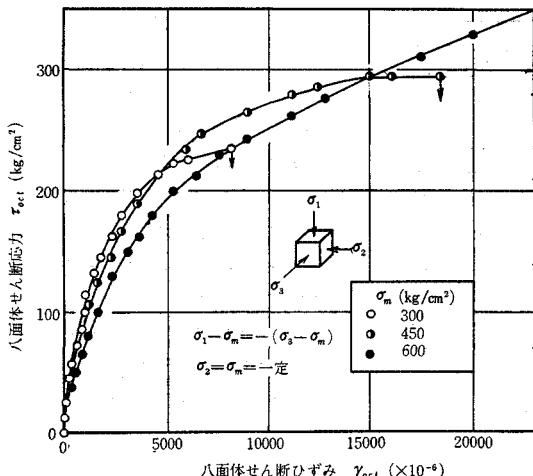


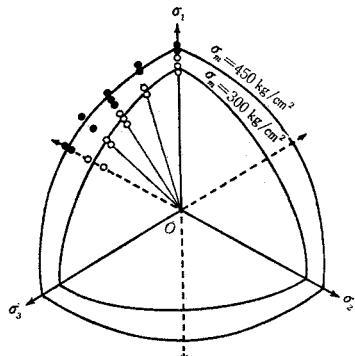
図-7 偏差応力による形状変化

多様性を示しているが、詳細には後述する形状変化の特性を考慮して論ぜられねばならない。

## (2) 形状变化

図-7 に八面体せん断応力と八面体せん断ひずみの関係が示されている。 $\sigma_m = 300 \text{ kg/cm}^2$  の場合、曲線は降伏領域に達するとすぐ破壊を示し、ぜい性的な挙動を示す。 $\sigma_m = 450 \text{ kg/cm}^2$  の場合、降伏領域に達したのち、なお変形は進行し、延性的な挙動を示す。 $\sigma_m = 600 \text{ kg/cm}^2$  の場合、曲線の勾配が変化する範囲は非常に広く、 $\tau_{oct}$  が  $200 \text{ kg/cm}^2$  以上になると、曲線は直線になり、ひずみ硬化をともなう変形となる。平均応力の異なる3本の曲線はいずれも同じ経路を通り、平均応力の大きい曲線ほど勾配は小さく、変形抵抗の減少を示している。これらより、平均応力の増加とともに、降伏領域とそれ以後の変形特性がぜい性的から延性的に、さらにひずみ硬化をともなう変形に変化することがわかる。また、降伏領域に達する応力状態においても、形状変化は若干ではあるが、平均応力の影響を受けるのが認められる。

前記のように、モルタルは降伏領域内で降伏すると考



圖一八 降伏面

えられるので、一義的に降伏応力を定めることは困難である。ここでは、載荷が載荷方法Cで行なわれた場合、最小主応力方向の変形が急激に増加する応力状態を降伏応力とし、載荷が載荷方法Dで行なわれた場合、最大主応力方向の変形が急激に増加する応力状態を降伏応力とした。しかしながら、いずれの場合にも、拘束圧が大きくなると、変形の急激な変化がはっきりせず、降伏応力の決定は困難であった。

載荷方法Cによって求めた降伏応力が図-8に示されている。図-8において、 $\sigma_m = 450 \text{ kg/cm}^2$ に対する曲線は $\sigma_m = 300 \text{ kg/cm}^2$ に対する曲線より丸味をおびている。 $\sigma_m = 600 \text{ kg/cm}^2$ の場合は、降伏を示す変形の急激な増加を判定できなかったため、図示されていない。図-7で $\sigma_m = 600 \text{ kg/cm}^2$ に対する降伏応力を考えてみると、 $\sigma_m = 300 \text{ kg/cm}^2$ あるいは $\sigma_m = 450 \text{ kg/cm}^2$ に対する降伏応力より小さくなるようである。これは、図-8の閉曲線の大きさがある平均応力までは大きくなり、ある限界の平均応力になると反対に小さくなることを示すものと考えられる。このことは、モルタルの降伏が静水圧応力のみで起こることからも理解できよう。

降伏応力は、図-1で、つぎのような降伏領域の応力状態に対応している。すなわち、 $\sigma_m = 300 \text{ kg/cm}^2$  の場合の降伏応力は曲線の勾配が変化はじめる状態すなわち降伏領域の始点に対応し、 $\sigma_m = 450 \text{ kg/cm}^2$  の場合、降伏領域の中間部分に対応している。このように、降伏応力が降伏領域の異なった位置に対応し、また、降伏曲面の違いは、平均応力が降伏領域での変形に関係することを示すものであろう。

これまでに述べてきた結果は、変化する応力成分が平均応力成分のみの場合と、偏差応力成分のみの場合とであった。

載荷方法Dによって実験を行なえば、両成分が変形に与える影響を検討することができ、また、次式によって弾性定数を求めることができる。

等方、等質な線型材料では、応力一ひずみ関係はつきのようになる<sup>10)</sup>。

ここで、 $K$  と  $G$  はおのおの体積弾性係数とせん断弾性係数である。 $K$  と  $G$  を弾性係数  $E$  とポアソン比  $P$  で表わすとつぎのようになる。

$$G = \frac{E}{2(1+P)} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

非圧縮性材料であれば、 $P=0.5$  となるから、 $K=\infty$ 、 $E=3G$  となる。

図-9 に一軸圧縮、図-10 に二軸圧縮と三軸圧縮の

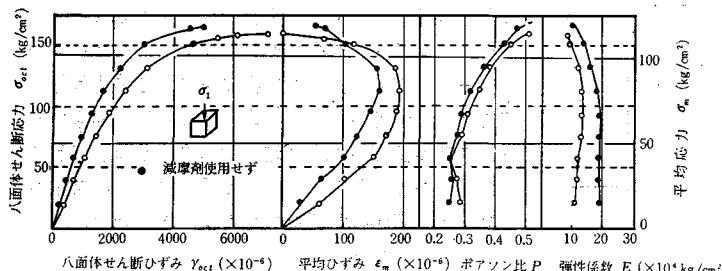


図-9 一軸圧縮下における変形特性

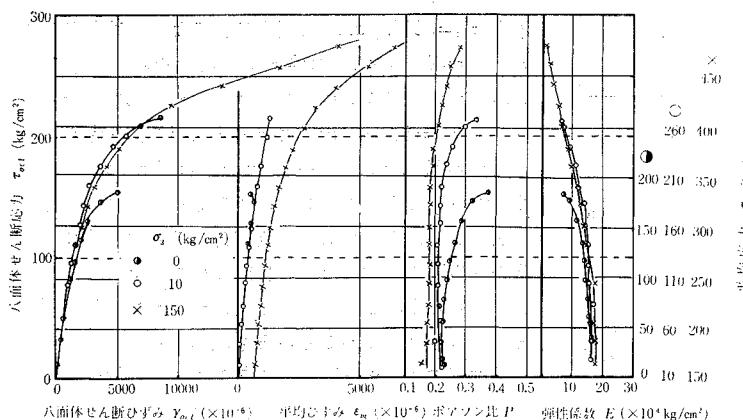


図-10 二軸および三軸圧縮下における変形特性

結果が示されている。図-9より明らかなように、一軸圧縮の場合、 $\tau_{oct}$  が  $60 \text{ kg/cm}^2$  以下のときには、応力-ひずみ関係は線形であるが、それ以上になると、形状変化を示す曲線と、体積変化を示す曲線は同じ応力レベルで降伏領域に入る。このように、両応力成分は降伏領域を示すのであるが、図-10で、形状変化曲線と体積変化曲線との比較より明らかなように、 $\sigma_3 = 0 \text{ kg/cm}^2$  と  $\sigma_3 = 10 \text{ kg/cm}^2$  の場合、形状変化の降伏領域は認められるが、それに対応する体積変化の降伏領域はあまり明確でない。一方、 $\sigma_3 = 150 \text{ kg/cm}^2$  の場合には、形状変化と体積変化の降伏領域は同じ応力レベルで認められる。このことは、降伏領域での挙動がせい性的であれば、降伏は主に形状の急激な変化によって起こり、せい性的から延性的さらにひずみ硬化をともなう挙動に移行すると、降伏は形状変化だけでなく体積変化によっても起こることを示すものであろう。

### (3) 弹性定数

式(5)と式(6)を用いて求めた弹性定数と応力との関係は図-9、10に示されているが、それによると、ボアソン比はある応力状態までは一定値で、 $\sigma_3 = 0 \text{ kg/cm}^2$  の場合約 0.23、 $\sigma_3 = 10 \text{ kg/cm}^2$  の場合約 0.21、また  $\sigma_3 = 150 \text{ kg/cm}^2$  の場合約 0.18 である。このように、ボアソン比の値は最小主応力の大きさによって異なるようである。

ある。降伏領域でのポアソン比の変化状態は、最小主応力が小さい場合、急激であるが、最小主応力の増加とともに、急激でなくなる。一軸圧縮下のモルタルのポアソン比の変化は、微視的には内部きれつの発達に対応するようである<sup>11)</sup>。これより、ぜい性的挙動を示す場合のポアソン比の変化はきれつの発達に起因すると考えることができよう。延性変形とくにひずみ硬化をともなう変形の場合、ポアソン比の変化はきれつの発達よりも、後述する空げき率の変化による材料の質的変化に起因すると考えられる。このことはひずみ硬化をともなう変形で、降伏領域を過ぎても破壊が生じないことからも理解できよう。以上のようにポアソン比の変化状態の比較からも、応力状態によって変形特性の異なることがわかる。そして、安定した弾性定数として一般に考え

られるボアソン比は応力成分との間に一義的な関係をもたず、応力状態の種々の条件によって変化するようである。

つぎに弾性定数について見ると、その値はある応力状態までは、ほぼ一定値を示し、ポアソン比の値が最小主応力の大きさに大きく影響されたのに対して、弾性係数の場合にはその影響はわずかである。降伏領域あるいはそれ以後の応力状態では、弾性係数は、 $\sigma_3 = 0 \text{ kg/cm}^2$  の場合を除いて、八面体せん断応力と一義的関係にあると見なされるようである。なお二つの弾性定数の比較は有効数字二けたとした場合である。

#### (4) 異 方 性

偏差応力が作用した場合、局部破壊および空げき率の変化に方向性が生じ、供試体全体として巨視的な異方性を持つのではないかと推定される。

連続体が等方、等質で線型材料であれば、応力作用時の応力のモール円とひずみのモール円は相似である。これを、Lode のパラメーター<sup>12)</sup>で表わすとつぎのようになる。

ここで、

$$\nu = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad \mu = 2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} - 1 \quad \dots\dots\dots(10)$$

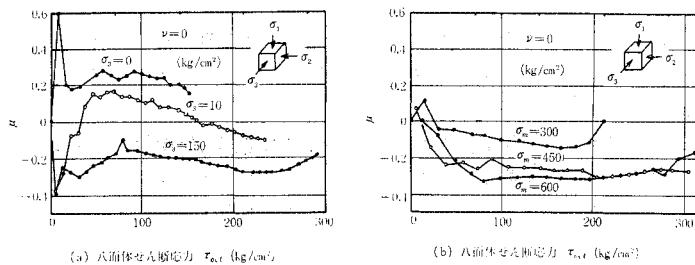
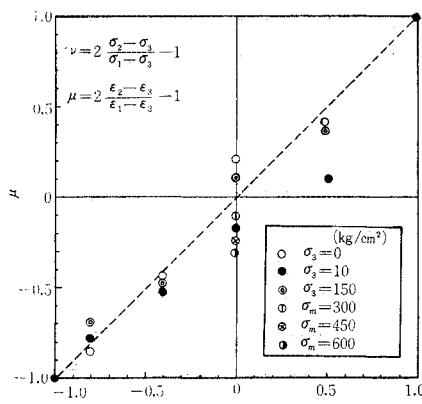


図-11 偏差応力による異方性

図-12  $\nu$  と  $\mu$  の関係

である。たとえば、一軸引張の場合、 $\sigma_1=\sigma_2=0$  で  $\nu=-1$ 、一軸圧縮の場合、 $\sigma_2=\sigma_3=0$  で  $\nu=1$ 、純せん断の場合、 $\sigma_2=(\sigma_1+\sigma_3)/2$  で  $\nu=0$  となる。以上より明らかのように  $\nu$  の領域は  $-1 \leq \nu \leq 1$  である。なお、 $\mu$ についても同様の関係が求められる。

図-11(a)には載荷方法Dで載荷されたときの  $\mu$  と  $\tau_{oct}$  の関係の一例、図-11(b)には載荷方法Cで載荷されたときの  $\mu$  と  $\tau_{oct}$  の関係の一例が示されている。この場合、 $\nu=0$  であるから、モルタルが等方・等質であれば、 $\mu$  は 0 を中心とした値をとるのであるが、図はそのような関係を示していない。すなわち、図-11(a)では最小主応力の大きさによって、図-11(b)では平均応力の大きさによって、 $\mu$  は異なる値を示している。このことは圧縮と引張に対する弾性係数が異なること、またその割合が拘束圧の大きさによって変化するものと推定され、偏差応力成分の増加による異方性の発生を示唆するものと考えられる。図-12には、他の  $\nu$  の値に対する  $\mu$  示されているが、同様の傾向を示している。

#### 4. 変形特性に対する考察

これまでにいくつか問題点を指摘してきたように、モルタルの降伏領域での変形は複雑である。ここでは、モルタルの変形特性を理解するために、今までに整理し

た結果に基づいて、体積変化と形状変化の変形機構を微視的観点から考察し、さらに、体積変化と形状変化との相互間の関係について検討する。

まず最初に、体積変化について考える。金属のような材料は変形が弾塑性的であっても、その体積変化成分は近似的には弾性的で、塑性成分は無視できるほどわずかである<sup>8)</sup>。一方、モルタルのよ

うな材料の体積変化は決して弾性的でなく、応力一ひずみ曲線の勾配が急激に変化する降伏領域で、塑性変形の増加とフロー現象を示す弾塑性的である。このようなモルタルの変形機構をつぎのように考えた。

静水圧荷重を受けるモルタルの変形はまず最初セメントペーストの変形によってはじまるであろう。そして応力がさらに増加すると、応力の不等分布によって、セメントペーストの局部的破壊やセメントペーストと砂との分離破壊が生じ、それにともなって、セメントペーストの破片や砂粒が生じると考えられる。これらの破片や砂粒の一部はさらに圧縮変形され、一部は空げきに落ちこみ巨視的には塑性変形の急激な増加、すなわち、応力一ひずみ曲線の勾配の急激な変化となる。このようにして破片や砂粒の落ちこみが進行すると、しだいに空げき率は減少し、空げきへの落ちこみが困難になり、つぎの段階として空げきへの押し込みが開始するであろう。この空げきへの押し込みは変形の流動化に対応するものと考えられる。フローの程度は空げきの充てん度と応力の大きさによって定まり、ある応力度で最大になり、空げきが完全に充てんされるとフローはなくなるであろう。さらに応力度が増せば、セメントペーストと砂の変形が進行し、残留強度は非常に減少するものと思われる。

つぎに形状変化について考える。装置の関係上供試体に純せん断応力を作用したときの形状変化を考えることはできない。ここでは、一定の平均応力が作用するとき、偏差応力の変化によって生ずる形状変化の機構を扱う。前述のように、平均応力のレベルによって、モルタル内部の変化が生じるので、つぎに示すような材料の質的変化を与える静水圧応力状態から偏差応力が増加していく場合に生ずる形状変化特性について考える。

- i) 落ちこみや押しこみをひき起こす静水圧応力が作用していない状態。
- ii) おもに落ちこみをひき起こす静水圧応力が作用している状態。
- iii) 押しこみをひき起こす静水圧応力が作用している状態。
- i) の場合、静水圧応力によって降伏のきっかけとな

るような局部的破壊は生じていない。したがって、モルタルに生じる局部的破壊は偏差応力の増加によって生じ、降伏の原因は偏差応力によって与えられる。

i) および ii) の場合の破壊面は、ほとんど最小主応力方向に垂直であることから、 $\sigma_3 - \sigma_m$  が  $\sigma_m$  によって定まるある値に達すると、降伏のきっかけとなるクラックをともなう局部的破壊が生じ、そしてクラックの発達速度は  $\sigma_m$  によって変化すると考えられる。また、このような挙動は iii) の場合にも起こる。

i) の場合、 $\sigma_3 - \sigma_m$  がある値に達すると、クラックが発生し、 $\sigma_m$  が小さいので、クラックの発達速度は速い。そのため、降伏と破壊面の形成が接近した応力レベルで起こる。

ii) の場合、モルタルは静水圧応力によって降伏領域に入っていることから、かなりの局部破壊を起こしていると考えられる。したがって、このような状態のモルタルの偏差応力に対する変形抵抗はかなり減少しているものと考えられる。しかしながら、この場合、変形抵抗が減少していても、作用する平均応力が大きいので、局部破壊をともなうクラックは発生しにくく、また、クラックの発達速度も遅くなり、i) の場合より大きな偏差応力が作用しないと降伏しないと考えられる。偏差応力の増加とともに、局部破壊が発生し、それにともなうセメントペーストの破片や砂粒の空げきへの落ちこみ、さらには、押し込みが起こるであろう。i) の場合、クラックの発達が急激であるため、このような現象は現われないが、ii) の場合、空げきが変化し、外的には、偏差応力の変化による体積として観察される。

iii) の場合には、作用する平均応力が非常に大きいのでかなり偏差応力が増加しなければクラックの発達をともなう局部破壊は起らなくなる。この場合には、前記の破片や砂粒の空げきへの落ちこみ、押し込みが非常に進行し、静水圧応力下で認められるような降伏を起こすと考えられる。このような空げき率の変化による降伏は偏差応力による降伏すなわちクラックの発達による降伏より早く起こるので、i) または ii) の場合の偏差応力より小さな応力で降伏挙動を示すものと考えられる。このように、降伏が圧縮的であることは、偏差応力による体積変化が大きくなることを意味し、i) ii) の場合より、体積変化は大きい。

以上三つの場合について変形特性を考察してきたが、これらはそれぞれ、せい性的変形、延性的変形およびひずみ硬化をともなう変形に対応している。おのおのの変形で、偏差応力成分と平均応力成分の降伏領域での役割りをまとめると、せい性変形の場合には、降伏はおもに偏差応力の変化によって進行し、平均応力による体積変化の降伏は起らぬ。延性変形の場合には、降伏はや

はり偏差応力によって進行するが、若干平均応力による体積変化の降伏も起こる。ひずみ硬化をともなう変形では、降伏は偏差応力と平均応力による降伏が競合して起こる。

中間主応力が降伏領域での変形に関係することは実験結果より明らかであるが、ここでは、中間主応力を示すパラメーターとして次式の  $\alpha$  を考える。

$$\tan \alpha = \sqrt{3}(\sigma_2 - \sigma_3)/(2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3) \quad \dots\dots\dots(11)$$

前述のように、最小主応力方向の偏差応力  $\sigma_3 - \sigma_m$  が  $\sigma_m$  によって定まるある値になると、クラックの発達が起こると考える。いま、作用する平均応力と偏差応力の値が同じで、 $\alpha$  が異なっているときの  $|\sigma_3 - \sigma_m|$  の大きさを比較してみる。 $\alpha$  の境界値を考え、 $\alpha=0^\circ$  のとき  $\sigma_2=\sigma_3$ 、 $\alpha=60^\circ$  のとき  $\sigma_1=\sigma_2$  であるから、この場合、 $\alpha=60^\circ$  のときの  $|\sigma_3 - \sigma_m|$  の方が大きい。したがって、作用する平均応力と偏差応力が同じであっても、 $\alpha$  が異なれば、降伏領域は異なり、一般に  $\alpha$  が大きいほど、偏差応力の低いレベルで降伏に達するといえよう。

降伏領域での変形を  $\tau_{oct}$ 、 $\sigma_m$ 、 $\sigma_3 - \sigma_m$ 、 $\alpha$  との関係で述べてきたが、一般的に、 $\tau_{oct}$ 、 $\sigma_m$ 、 $\alpha$  が与えられれば一義的に  $\sigma_3 - \sigma_m$  は定まる。Nadai<sup>13)</sup> らの式との類似性を考慮して降伏条件を示すとつぎのようになる。

$$f_1(\tau_{oct}, \sigma_m, \alpha) = 0 \quad \dots\dots\dots(12)$$

上式をひずみの関係で示すと

$$f_2(\tau_{oct}, \epsilon_m, \alpha) = 0 \quad \dots\dots\dots(13)$$

となる。畠野<sup>3)</sup> はひずみ成分を用いて、つぎのような降伏条件を仮定し

$$f_3(\tau_{oct}, \epsilon_m) = 0 \quad \dots\dots\dots(14)$$

実験的に、降伏条件式を求めている。

$$\tau_{oct} = a_1 + b_1 \epsilon_m \quad \dots\dots\dots(15)$$

ここで、 $a_1$ 、 $b_1$  は実験定数である。式(13)と式(14)の違いは  $\alpha$  のあるなしであるが、式(13)は応力状態が  $\sigma_2 = \sigma_3$  の場合について求められたものであることを考慮すれば、式(14)の特殊な場合といえよう。したがって、式(15)を一般的に示すと次式のようになる。

$$\tau_{oct} = a_2(\alpha) + b_2 \epsilon_m \quad \dots\dots\dots(16)$$

ここで、 $a_2$  は  $\alpha$  の関数、 $b_2$  は定数である。

以上より、降伏領域での変形を一般的に示すと、つぎのようによく表わされる。

$$\epsilon_m = f_4(\tau_{oct}, \sigma_m, \alpha) \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$\tau_{oct} = f_5(\tau_{oct}, \sigma_m, \alpha) \quad \dots\dots\dots(18)$$

今後、 $f_4$ 、 $f_5$  の関数形は検討されねばならない。

## 5. あとがき

本研究の目的は降伏領域での変形特性を応力状態との関係で明らかにすることであった。これらの結果はおも

に平均応力と偏差応力成分との関係で考察され、つぎのように結論できよう。

(1) 降伏は応力一ひずみ曲線の勾配が急激に変化する降伏領域内で起こり、これは内部的にはクラックの発達あるいは空げきの変化に対応するものと考えられる。降伏の原因は応力状態によって異なり、せい性変形の場合には、クラックの発達であり、拘束圧の増加とともに空げきの変化による要因が増加していく。そして、ひずみ硬化をともなう場合には、おもに空げきの変化に依存するようである。

(2) クラックの発達をともなう局部破壊は、最小主応力方向の偏差応力が、そのとき作用する平均応力によって決まる一定値に達すると起こると考えられる。クラックの発達速度を支配する応力状態は平均応力であって、これを拘束圧と考えることができる。作用する拘束圧が大きくなれば、クラックの発達をともなう局部破壊は起こりにくくなる。

(3) 空げき率の変化による降伏はセメントペーストの破片ならびに砂粒の空げきへの落ち込み、および押しこみに対応し、このとき塑性変形の急激な増加と流動化が起こる。

(4) 体積変化および形状変化は、平均応力成分、偏差応力成分および中間主応力の影響を示すパラメーターの関数で、たとえば、つぎのように表わすことができる。

$$\epsilon_m = f_1(\tau_{oct}, \sigma_m, \alpha)$$

$$\tau_{oct} = f_2(\tau_{oct}, \sigma_m, \alpha)$$

(5) 偏差応力の作用による異方性の発生が推定される。

(6) 弹性係数とポアソン比を有効数字2けたで比較すると、弾性係数の応力に対する変化状況は平均応力が異なっても、偏差応力と一義的によく対応するが、ポアソン比の応力に対する変化状況はこのような関係を示さない。

以上はモルタルに対して得られた結果であるが、コンクリートにも近似的に適用できるであろう。

上記の変形特性の考察、とくに材料の質的変化を明らかにするため、さらに顕微鏡による観察を計画している。式(15)で与えられるような降伏領域での変形を表わす関数の関数形の検討、さらに、偏差応力による異方性の発生の確認を現在行なっている。

終りに、本研究を行なうにあたり、数多くの実験に協力を得た石川兼治技官ならびに資料の提出を得た大阪セメントKKに感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) Serata, S. : Application of continuum mechanics to design of deep patach mines in Canada, J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 5, 1968
- 2) たとえば、丹羽・小林・平島：三軸圧縮応力状態におけるモルタルの破壊条件、材料、161号、1967。
- 3) 畑野 正：組合せ圧縮荷重によるコンクリートの変形と破壊、土木学会論文集第143号、1967。
- 4) たとえば、梶田・秋本・川本：円柱状せい性材料供試体の一軸圧縮試験における加圧面拘束が変形状態および圧縮強度におよぼす影響について、土木学会論文報告集第165号、1969。
- 5) たとえば、George S. Robinson; Behavior of concrete in biaxial compression, Structural Division Prc. of A.S.C.E., Feb. 1967.
- 6) たとえば、丹羽・小林・小柳：人工軽量コンクリートの三軸圧縮破壊条件、土木学会論文集第143号、1967。
- 7) 前述、丹羽他：文献6)
- 8) Hill : The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford, 1950.
- 9) 富田・秋本・川本：モルタルのようなせい性材料の変形特性、第5回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要、1969。
- 10) ベースホップ：弾性塑性論、日刊工業新聞社
- 11) Shah, S.P., Chandra, S. : Critical Stress, Volume Change and Microcracking, J. of A.C.I Vol. 65, No. 9, 1968
- 12) たとえば、Hill：文献8)
- 13) Nadai : Theory of Flow and Fracture of Solids, McGraw-Hill, 1950.

(1969.8.14・受付)

- 高い粘性によるコストダウン
- 高い膨潤
- 少ない沈殿
- 品質安定

業界に絶対信用ある…  
山形産ベントナイト

基礎工事用泥水に

# フニゲル

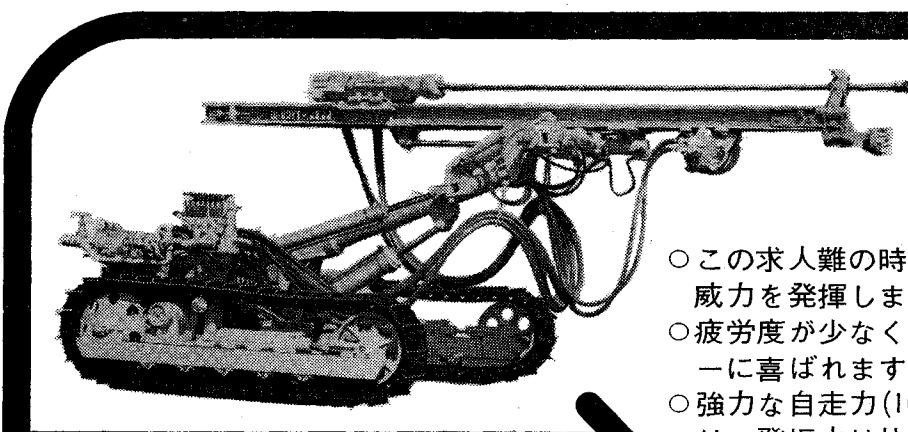


国峯礎化工業株式会社  
代理店 ベントナイト産業株式会社

本社 東京都中央区新川1-10 電話(552)6101代表  
工場 山形県大江町左沢 電話 大江 2255~6  
鉱山 山形県大江町月布 電話 貢見 14

東京都港区新橋2-18-2 電話 東京 (571)4851-3

お金にはかえられない利得があります



トヨーさくがんき

- この求人難の時代、数人分の威力を発揮します。
- 疲労度が少なく、オペレーターに喜ばれます。
- 強力な自走力(10HP×2)により、登坂力は抜群。
- 耐久性が高く、故障知らずのタフなドリッパー。
- 強力な打撃力・回転力で長孔さく孔もらくらく。

発 売 元

△ 東洋さく岩機販売株式会社

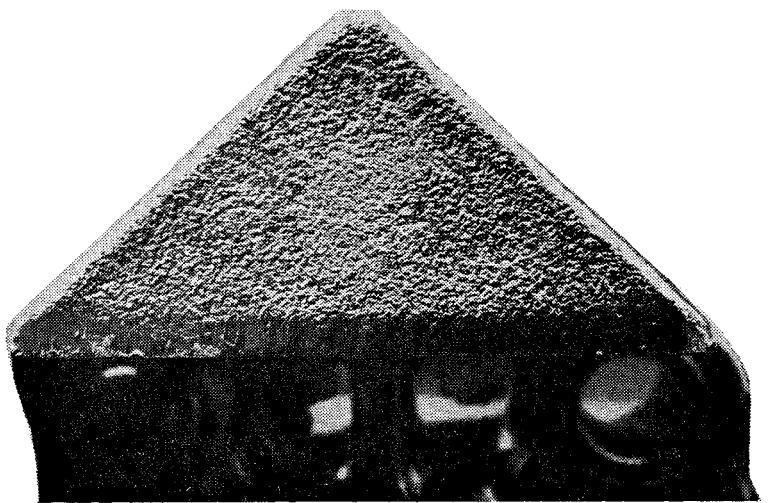
東京本店 東京都中央区日本橋江戸橋3の6  
支店・営業所 東京・大阪・名古屋・福岡・札幌・仙台・高松・広島

製造元・広島 ◎ 東洋工業株式会社

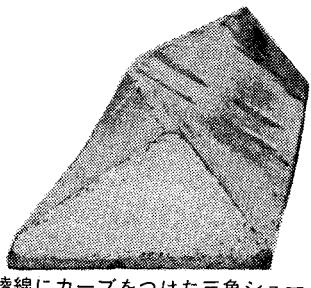
**TYCD-10**  
クローラードリル

さくがんきづくり36年 トヨーさくがんき

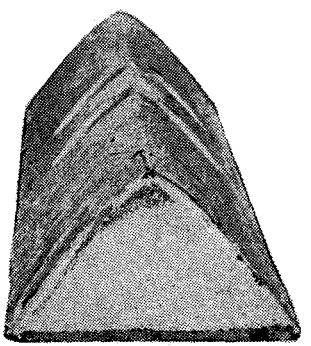
# NTKが 正統派です



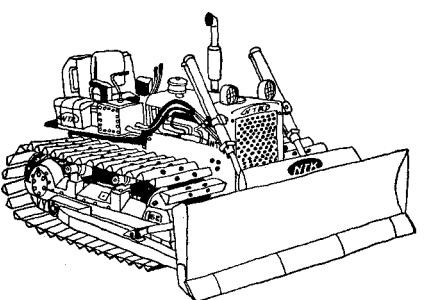
二等辺直角三角形の純正 NTK 三角シュー



稜線にカーブをつけた三角シュー



側面に丸味をつけた三角シュー



悪質地盤の処理に抜群の働きを示す湿地ブルドーザは、日本のユーラーにとつて欠かせない機動力であることはご承知の通りですが、その普及の目覚ましさにつれて、あるメーカーが「日本No.1の技術が開発した」といえば、一方は「世界No.1の技術が…」とうたう。しかし、一寸待つて下さい。湿地ブルドーザの生命である三角シューは、北海道の泥炭地と取組んだ日特金属が発明したもの。それまでシューは、グローサしかなかつたのです。日特の開発した三角シューは、『土がつかず、土を乱さず、転圧力が大きく、傾斜地にも強い』という画期的な性能を備えており、日本のユーラーの要望に完全に応えたもの。そして湿地研究から生れた頑強な足廻り、理想的の車体バランス等正統派 NTK の湿地ブルドーザは断然ピカ一です。超々湿地ブルドーまで種類も豊富。湿地ブルドーについては専門家の NTK にまずご相談下さい。

豊富な湿地シリーズ	接 地 底	定格出力	総 重 量
NTK-6C 湿地	0.29kg/cm <sup>2</sup>	120ps	15,000kg
NTK-5 湿地	0.27kg/cm <sup>2</sup>	76ps	9,200kg
NTK-5 超湿地	0.19kg/cm <sup>2</sup>	76ps	10,300kg
NTK-5 超々湿地	0.13kg/cm <sup>2</sup>	76ps	10,000kg
NTK-4 湿地	0.25kg/cm <sup>2</sup>	61ps	8,100kg

**NTK**  
**日特金属工業株式会社**  
東京都田無市谷戸町2-1-1 0424(63)2121