

土木研究所資料

亀裂を有する岩盤模型のせん断試験(その2)

平成5年3月

建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室

Copyright © (1993) 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。

亀裂を有する岩盤模型のせん断試験(その2)

ダム構造研究室 室 長 永 山 功
研 究 員 佐々木 隆
尾畑 伸之
(前)部外研究員 杉浦 靖人

要 旨

コンクリートダムの設計において、基礎岩盤のせん断強度は設計上の重要な要素の1つである。岩盤のせん断強度は岩盤を構成する岩石の強度、亀裂の分布、状態などによって大きく影響を受けることがわかっている。せん断強度に及ぼす亀裂の影響度に関しては、先に、内部に亀裂を有する石膏模型を用いたせん断試験により検討を行っているが、本報告書は、先の試験結果と併せて追加試験を実施し、せん断強度に及ぼす亀裂の影響についてより詳細な検討を行ったものである。

キーワード：模型実験，せん断試験，せん断強度，岩盤，亀裂

ま え が き

コンクリートダム設計において、基礎岩盤のせん断強度はダムの構造的安全性に大きな影響を与える重要な要素である。岩盤のせん断強度は、岩盤を構成する岩片の硬さ、岩盤内の亀裂の間隔、亀裂の状態などによって大きく影響を受けることがわかっているが、このほかに、想定せん断面に対する亀裂の方向、亀裂の位置、亀裂の寸法などがその影響要因として考えられる。

せん断強度に及ぼす亀裂の影響度に関しては、先に亀裂を有する石膏模型を用いたせん断試験により検討を行っているが、本報告は、先の試験と併せて追加試験を実施し、せん断強度に及ぼす亀裂の影響についてより詳細な検討を行ったものである。

目 次

まえがき

1. 試験の目的	1
2. 試験の概要	2
2.1 試験の目的	2
2.2 試験の方法	2
2.3 模型の寸法と模型の作製方法	4
2.4 模型の種類	5
2.5 試験条件	6
2.6 計測項目	12
3. 試験結果	15
3.1 試験結果の概要	15
3.1.1 せん断面の形状	15
3.1.2 試験値のばらつき	31
3.1.3 各試験ケースにおけるせん断強度	46
3.2 亀裂とせん断強度	58
3.2.1 亀裂の存在しない岩盤模型の試験結果	58
3.2.2 想定せん断面上の亀裂の位置がせん断強度に及ぼす影響	58
3.2.3 想定せん断面上の亀裂の長さがせん断強度に及ぼす影響	62
3.2.4 想定せん断面と亀裂の距離（深さ）がせん断強度に及ぼす影響	62
3.2.5 想定せん断面に存在する亀裂の本数がせん断強度に及ぼす影響	67
4. ま と め	69
5. 参考文献	70

1. 試験の目的

コンクリートダムの構造の安定性を確保するためには、転倒、滑動、内部応力に対する安定性の検討を行わなければならない。このうち滑動に対する安定性については、現行の設計基準において、「ダムの堤体と基礎地盤との接合部付近におけるせん断力による滑動に対し、必要なせん断抵抗力を有するものとする」と規定されている。したがって、コンクリートダムを設計する場合、基礎岩盤のせん断強度を表す定数である純せん断強度 (τ_0) および内部摩擦角 (ϕ) はダムの安定性に大きな影響を与える重要な要素となっている。

ところで、実際にダムを建設する場合、各ダムサイトにおいてダム基礎岩盤の岩盤分類を行い、区分された各岩盤の代表的な試験地点で原位置岩盤せん断試験を実施してそのせん断強度を求めている。しかしながら、このようにして求めたせん断強度と岩盤の区分とは必ずしも十分に対応していない場合がある。

岩盤分類は、岩盤を構成する岩片の硬さ、岩盤内の亀裂の間隔、亀裂の状態という岩盤そのものの状態を示す指標をその分類要素としているが、せん断強度に影響を与える要素としては、さらにせん断を考える面に対する亀裂の方向、亀裂の位置、亀裂の寸法などが挙げられる。しかし、実際の岩盤においては内部の亀裂の状態を正確に知ることは困難であり、また複雑な地質状況にあっては、どの要因によって岩盤のせん断強度が影響されているのかを判断することも困難である。そこで、先に、筆者らは亀裂を有する岩盤をモデル化し、原位置岩盤せん断試験に準じた方法でせん断試験を実施し、せん断強度に及ぼす亀裂の影響について検討を加えてきた¹⁾。

本報告は、先の試験結果を踏まえ、亀裂の位置、亀裂の長さ、亀裂の本数を変化させたせん断試験を実施し、これらの要素がせん断強度に与える影響についてより詳細な検討を加えたものである。

2. 試験の概要

2.1 試験の目的

岩盤のせん断強度は、岩盤を構成する岩片の硬さ、岩盤内の亀裂の間隔、亀裂の状態という岩盤そのものの状態によって大きく影響を受けるが、さらにせん断を考える面に対する亀裂の方向、亀裂の位置、亀裂の寸法などによっても大きな影響を受ける。そこで、本報告では、水平亀裂を有する岩盤をモデル化して、

- ① 想定せん断面上に存在する水平亀裂の位置を一定とし、水平亀裂の長さがせん断強度に与える影響
- ② 想定せん断面上に存在する水平亀裂の長さを一定とし、水平亀裂の位置がせん断強度に与える影響
- ③ 想定せん断面上に存在する水平亀裂の合計の長さを一定とし、水平亀裂の本数がせん断強度に与える影響
- ④ 水平亀裂の長さ、想定せん断面上に投影した水平亀裂の位置を一定とし、想定せん断面から水平亀裂までの距離（深さ）がせん断強度に与える影響
- ⑤ 垂直荷重とせん断荷重の作用点が想定せん断面上で一致しない場合（以下、この状態の荷重を偏心荷重という）、これがせん断強度に与える影響

の5点について検討を行うこととした。

2.2 試験の方法

本試験では、各ダムサイトで実際に実施されている原位置岩盤せん断試験に準じた試験を行って、水平亀裂を有する岩盤モデルのせん断強度を求めることとした。

原位置岩盤せん断試験では、横坑内等の試験点において垂直方向荷重とせん断方向荷重を載荷できるようなせん断ブロックを作製し（せん断ブロックの作製方法によってロックせん断試験（図-2.1）とブロックせん断試験（図-2.2）に分類できる）、図-2.3に示すような装置を用いてせん断ブロックに一定の初期垂直荷重を与えながらせん断荷重を徐々に増加し、岩盤をせん断破壊させてその強度を求めている。ここで、破壊時の応力 τ_s 、 σ_s は式（2.1）、式（2.2）によって求められる。

$$\tau_s = \frac{T \cos \theta}{A} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\sigma_s = \frac{N + T \sin \theta}{A} \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、 τ_s ：想定せん断面における破壊時せん断応力

σ_s ：想定せん断面における破壊時垂直応力

T：破壊時のせん断荷重

N：初期垂直荷重

θ ：せん断角度（せん断荷重と水平面のなす角度）

A：想定せん断面の面積

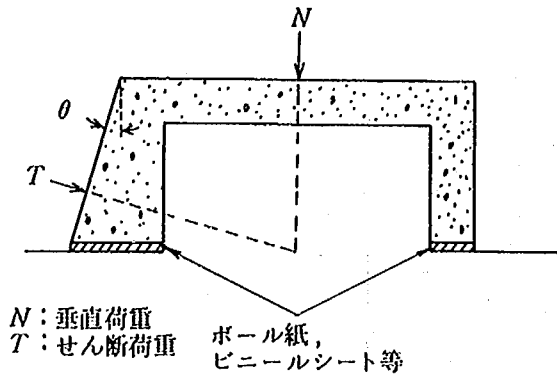


図-2.1 ロックせん断試験

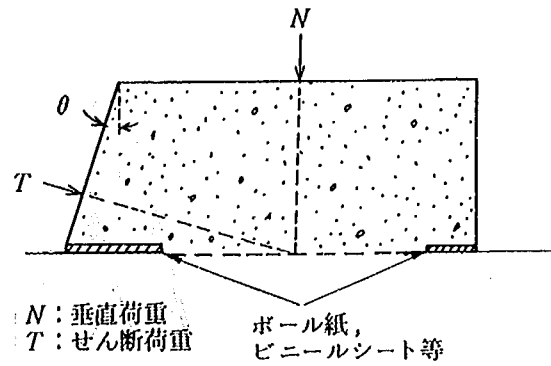


図-2.2 ブロックせん断試験

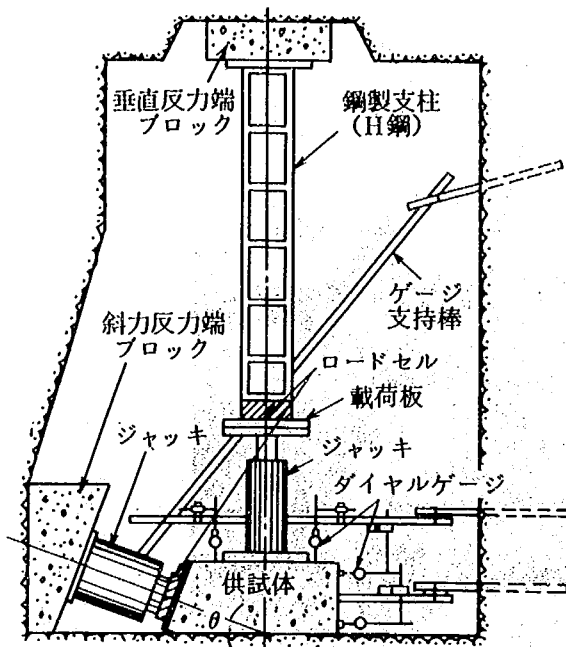


図-2.3 原位置岩盤せん断試験装置

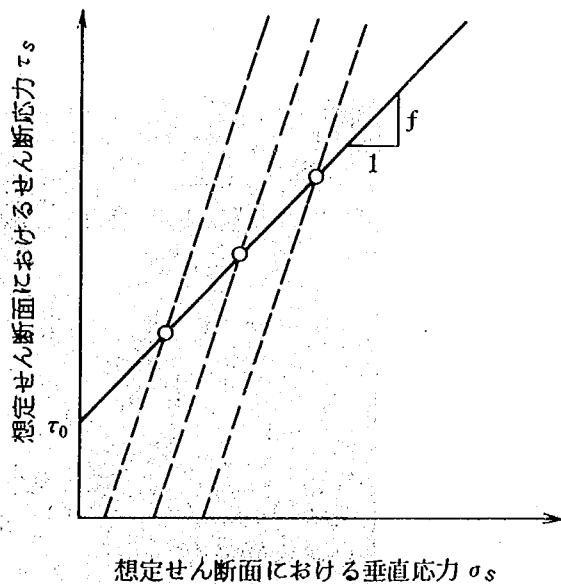


図-2.4 せん断強度の求め方

である。これと同様にして、種々の初期垂直荷重 N に対してせん断試験を実施すれば、破壊時のせん断応力 τ_s と垂直応力 σ_s の関係から、次式に与えられる岩盤の純せん断強度 τ_0 、内部摩擦角 f を求めることができる。(図-2.4参照)。

$$\tau = \tau_0 + f \cdot \sigma \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで、 τ : せん断強度

τ_0 : 岩盤の純せん断強度

f : 内部摩擦係数

σ : せん断面における垂直応力

である。

ここでは、原位置岩盤せん断試験と同様な試験条件を再現できるように、図-2.5、写真-2.1に示すようなせん断試験装置の載荷枠内に石膏を用いて作製した岩盤模型を設置し、垂直荷重およびせん断荷重を載荷してせん断試験を行った。

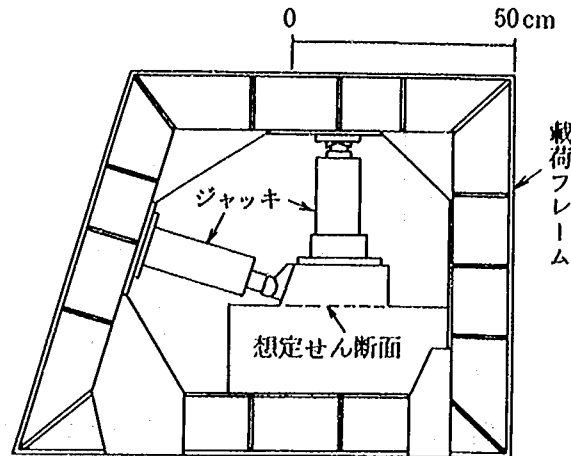


図-2.5 岩盤模型のせん断試験装置

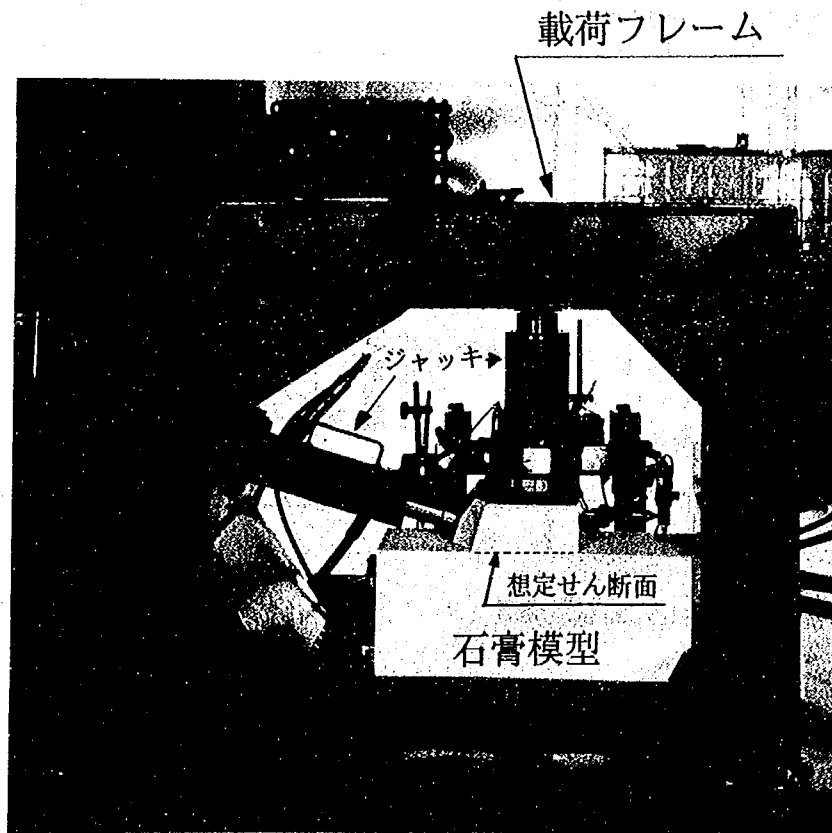
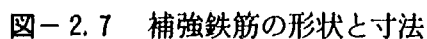
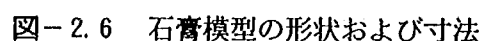


写真-2.1 岩盤模型のせん断試験装置

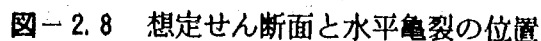
2.3 模型の寸法と模型の作製方法

原位置岩盤せん断試験において、その応力状態は厳密には3次元であるが、本試験においては模型の作製、水平亀裂の設置等を容易にするため、2次元模型を用いるものとした。試験に用いた石膏模型の形状および寸法を図-2.6に示す。試験ブロックの想定せん断面は15cm×15cmとし、実際の原位置岩盤せん断試験で一般に採用されている大きさの1/4の大きさとした。模型は、その材料として石膏を用いるものとし、アクリル樹脂製の型枠(板厚=20mm)に水:石膏を0.63:1の重量比で練り混ぜて打設、作製した。また、せん断ブロック部と岩盤部が同一の材料となるため、せん断ブロッ

なお、模型は、打設後約1時間で脱型し、室温40℃、湿度50%の恒温恒湿状態で約1ヶ月間乾燥した後、実験に使用することとした。



①の水平亀裂の位置に着目した試験では、想定せん断面上の水平亀裂の長さ L を一定とし、その位置をせん断ブロック・ジャッキ側端部から順次変化させて試験を行うこととした。



②の水平亀裂の長さに着目した試験では、図-2.8に示すせん断ブロック・ジャッキ側端部から水平亀裂の先端までの距離 S 、せん断ブロック・ジャッキ側端部から水平亀裂中央までの距離 $S+L/2$ を一定とした2つのケースを考え、それぞれのケースについて水平亀裂の長さ L を変化させて試験を行うこととした。

③の想定せん断面から水平亀裂までの距離（深さ）に着目した試験では、水平亀裂の長さ L 、せん断ブロック・ジャッキ側端部から想定せん断面に投影した水平亀裂先端までの距離 S を一定とし、想定せん断面から水平亀裂までの距離（深さ）を変化させて試験を行うこととした。

④の水平亀裂の本数に着目した試験では、水平亀裂の長さの合計 ΣL （水平亀裂の長さ $L \times$ 水平亀裂の本数 N ）を一定とし、水平亀裂の本数 N を変化させて試験を行うこととした。

⑤の偏心荷重に着目した試験では、供試体の岩盤部の高さを5mm低くし、せん断荷重の作用点が想定せん断面の中央からジャッキと反対側にずれた位置に作用するようにした。なお、これらの試験結果と比較を行うため水平亀裂を設けない模型についても併せて試験を行った。前回の試験に用いた模型と今回の試験に用いた模型を併せて整理したものを表-2.1、図-2.9に示す。

2.5 試験条件

せん断試験における荷重載荷方法は、前回の試験および今回の試験とも初期垂直荷重、せん断荷重とも油圧ジャッキを用いる方法とした。初期垂直荷重については、前回の試験では想定せん断面上における垂直応力 $\sigma_0 = N/A = 2 \text{ kgf/cm}^2$ 、 6 kgf/cm^2 、 10 kgf/cm^2 の3荷重を設定したが、今回の試験においては 2 kgf/cm^2 、 10 kgf/cm^2 の2荷重とした。また、供試体と載荷フレームを馴染ませるため、予備載荷として初期垂直荷重の $1/2$ を載荷・除荷した後規定した荷重を載荷することとした。荷重の載荷速度は、初期垂直荷重、せん断荷重とも想定せん断面上の応力で $1 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$ とした（せん断荷重の場合はせん断応力換算値）。今回のせん断試験に用いた荷重載荷パターンを図-2.10に示す。

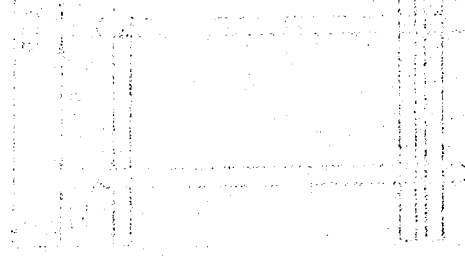


図-2.10

せん断試験の荷重載荷パターン（図-2.10）

せん断試験の荷重載荷パターン（図-2.10）

せん断試験の荷重載荷パターン（図-2.10）

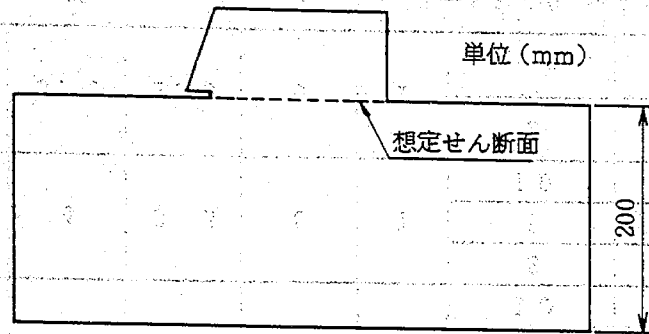
せん断試験の荷重載荷パターン（図-2.10）

表-2.1 試験ケース一覧表

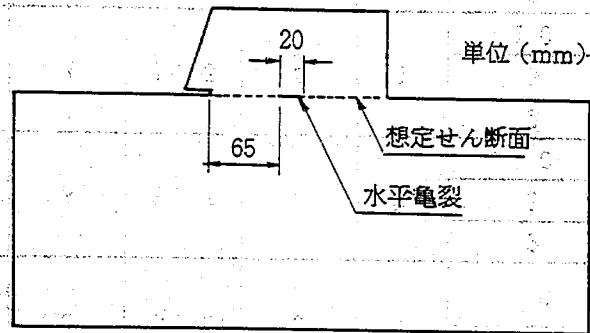
ケース	水平亀裂 の長さ L(cm)	水平亀裂 の位置*1 S(cm)	水平亀裂 の深さ*2 D(cm)	亀裂の 本数 N(本)	初期垂直応力 σ_0 (kgf/cm ²)	供試体個数 (基)	ケース	水平亀裂 の長さ L(cm)	水平亀裂 の位置*1 S(cm)	水平亀裂 の深さ*2 D(cm)	亀裂の 本数 N(本)	初期垂直応力 σ_0 (kgf/cm ²)	供試体個数 (基)
1	-	-	-	-	2	9	10	8	5.5	0	1	2	3
					6	3						10	3
					10	9						10	3
2	2	6.5	0	1	2	3	11	8	3.5	1.0	1	2	3
					6	3						10	3
					10	3						10	3
3	4	3.5	0	1	2	3	12	8	3.5	1.5	1	2	3
					10	3						10	3
4	6	3.5	0	1	2	3	13	8	3.5	2.0	1	2	3
					10	3						10	3
5	8	3.5	0	1	2	9	14	8	3.5	3.0	1	2	3
					6	3						10	3
					10	9						10	3
6	4	1.5	0	1	2	3	15	8	3.5	4.5	1	2	3
					6	3						10	3
					10	3						10	3
7	4	5.5	0	1	2	3	16	4	1.5	0	2	2	3
					6	3						10	3
					10	3						10	3
8	4	9.5	0	1	2	3	17	2	1.5	0	4	2	3
					6	3						10	3
					10	3						10	3
9	8.0	1.5	0	1	2	6	18 (偏心 荷重用)	-	-	-	-	2	3
					10	6						10	3

*1: せん断ブロック・ジャッキ側端部(図-2.8 参照)から水平亀裂先端までの距離

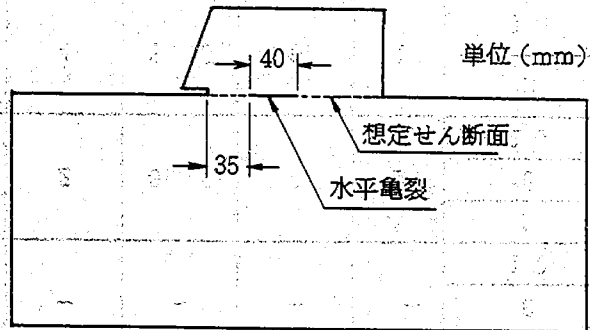
*2: 想定せん断面と水平亀裂の距離(深さ)



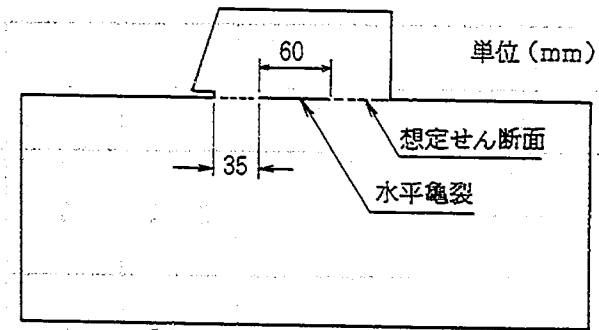
(a) ケース 1 (亀裂なし)



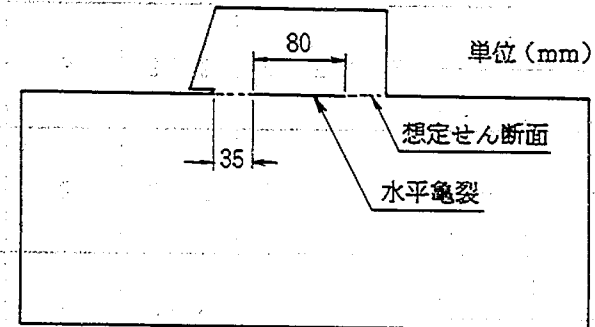
(b) ケース 2 ($L=2.0\text{ cm}$, $S=6.5\text{ cm}$, $D=0.0\text{ cm}$, $N=1\text{ 本}$)



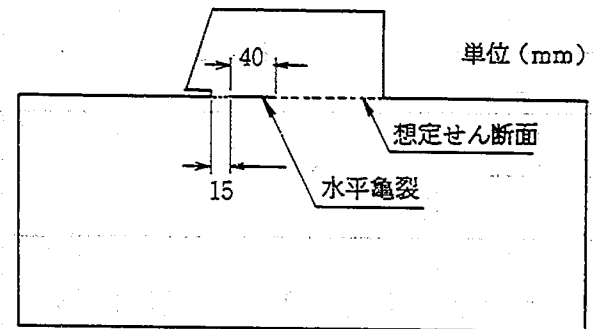
(c) ケース 3 ($L=4.0\text{ cm}$, $S=3.5\text{ cm}$, $D=0.0\text{ cm}$, $N=1\text{ 本}$)



(d) ケース 4 ($L=6.0\text{ cm}$, $S=3.5\text{ cm}$, $D=0.0\text{ cm}$, $N=1\text{ 本}$)

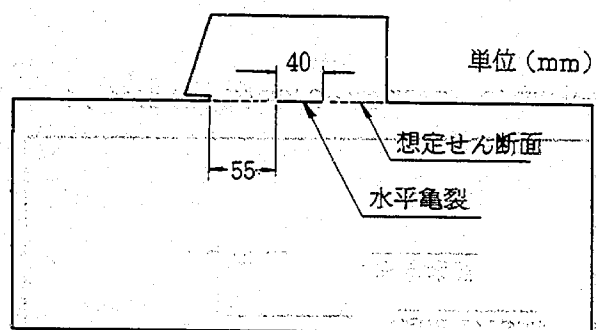


(e) ケース 5 ($L=8.0\text{ cm}$, $S=3.5\text{ cm}$, $D=0.0\text{ cm}$, $N=1\text{ 本}$)

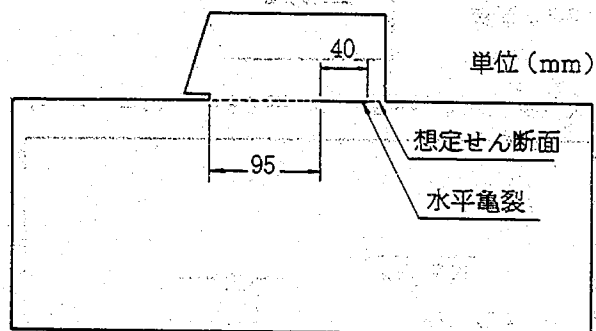


(f) ケース 6 ($L=4.0\text{ cm}$, $S=1.5\text{ cm}$, $D=0.0\text{ cm}$, $N=1\text{ 本}$)

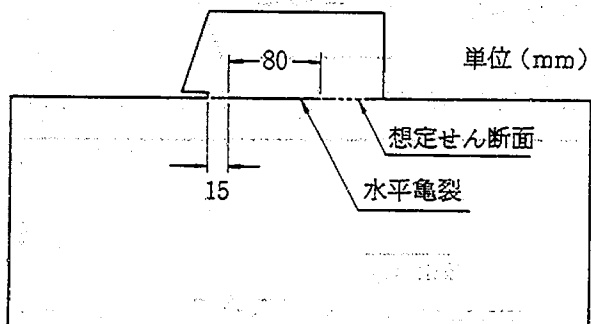
図-2.9 模型の種類



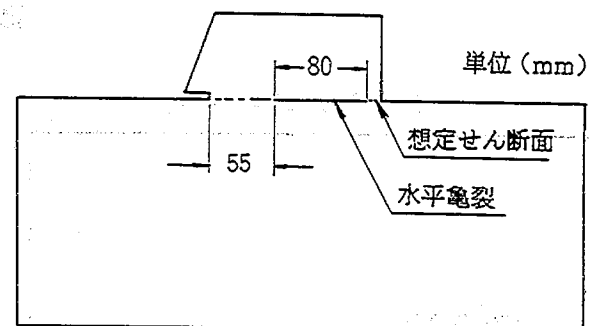
(g) ケース 7 ($L=4.0$ cm, $S=5.5$ cm, $D=0.0$ cm, $N=1$ 本)



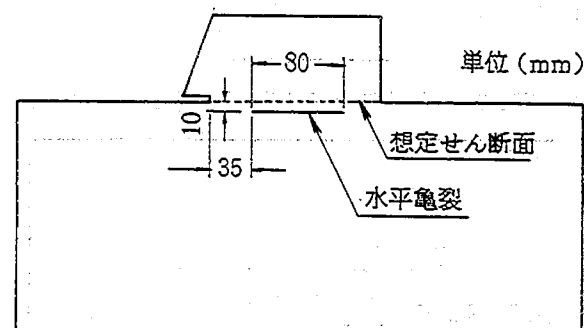
(h) ケース 8 ($L=4.0$ cm, $S=9.5$ cm, $D=0.0$ cm, $N=1$ 本)



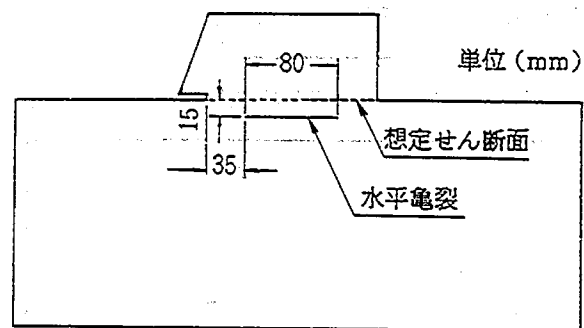
(i) ケース 9 ($L=8.0$ cm, $S=1.5$ cm, $D=0.0$ cm, $N=1$ 本)



(j) ケース 10 ($L=8.0$ cm, $S=5.5$ cm, $D=0.0$ cm, $N=1$ 本)

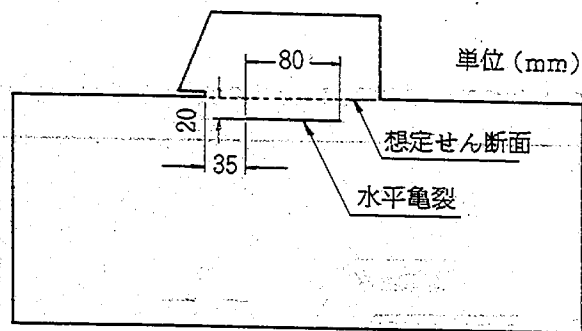


(k) ケース 11 ($L=8.0$ cm, $S=3.5$ cm, $D=1.0$ cm, $N=1$ 本)

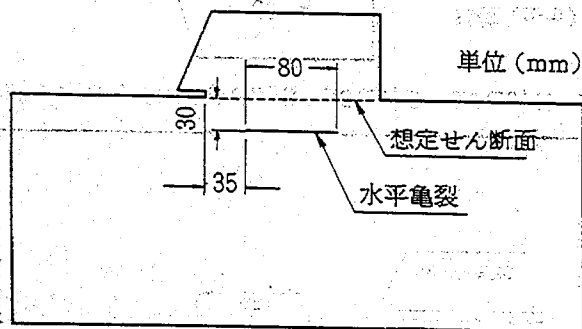


(l) ケース 12 ($L=8.0$ cm, $S=3.5$ cm, $D=1.5$ cm, $N=1$ 本)

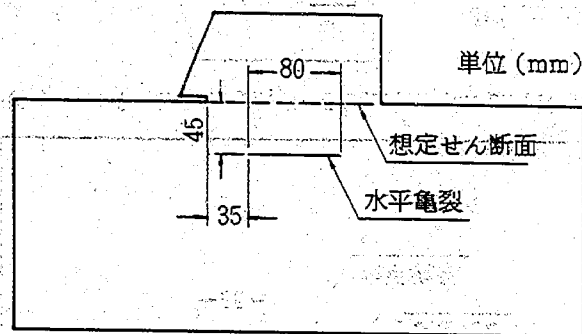
図-2.9 模型の種類



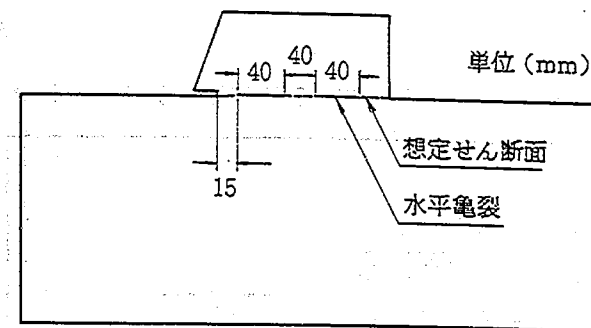
(m) ケース13 ($L=8.0$ cm, $S=3.5$ cm, $D=2.0$ cm, $N=1$ 本)



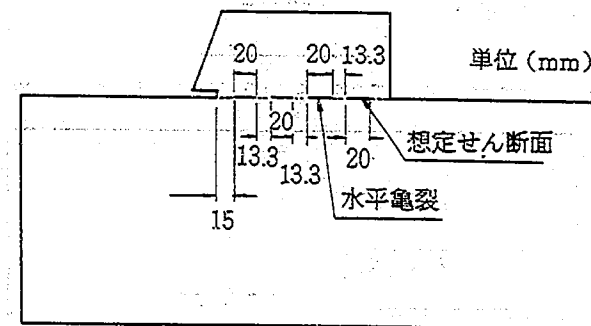
(n) ケース14 ($L=8.0$ cm, $S=3.5$ cm, $D=3.0$ cm, $N=1$ 本)



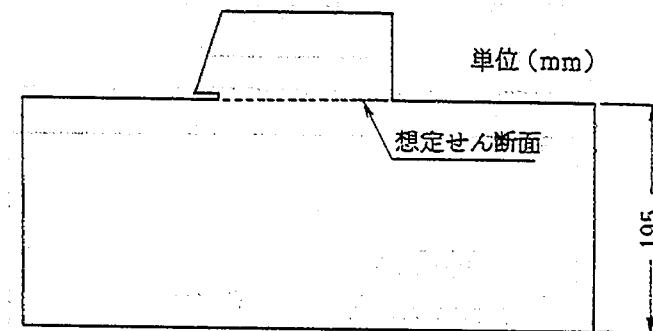
(o) ケース15 ($L=8.0$ cm, $S=3.5$ cm, $D=4.5$ cm, $N=1$ 本)



(p) ケース16 ($L=4.0$ cm, $S=1.5$ cm, $D=0.0$ cm, $N=2$ 本)

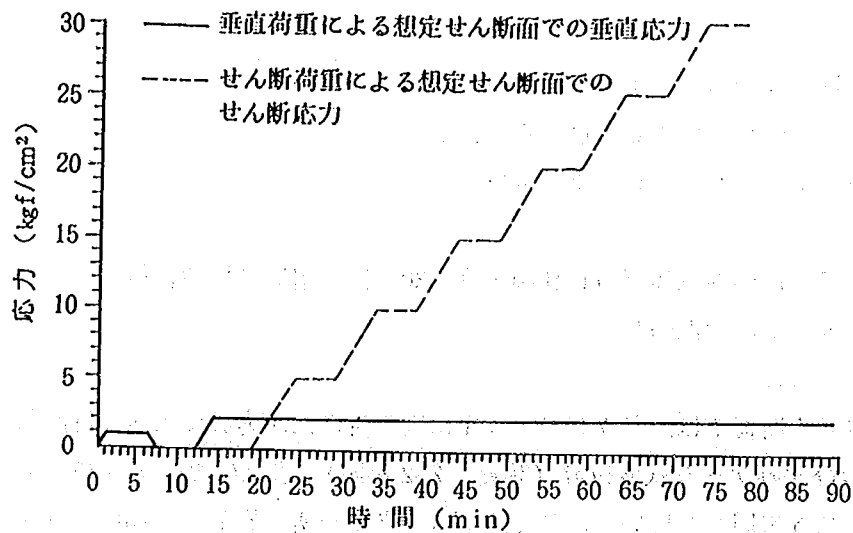


(q) ケース17 ($L=2.0$ cm, $S=1.5$ cm, $D=0.0$ cm, $N=4$ 本)

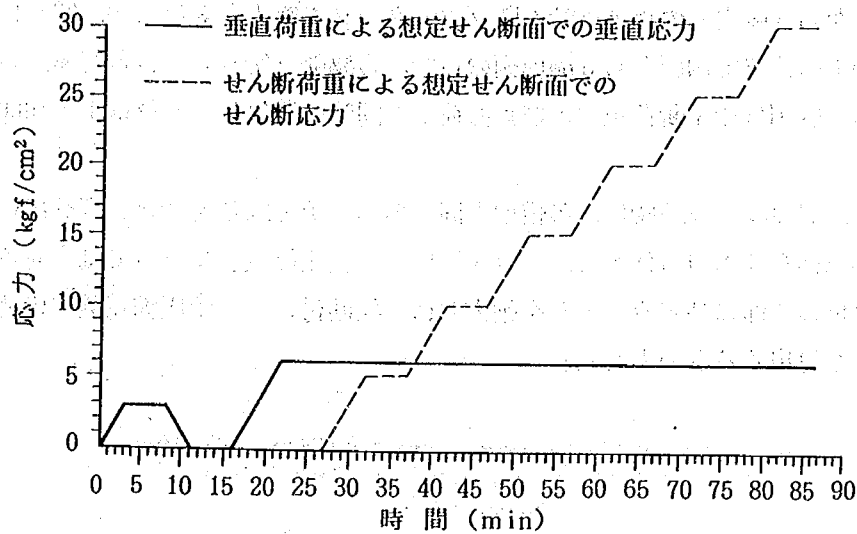


(r) ケース18 (偏心載荷)

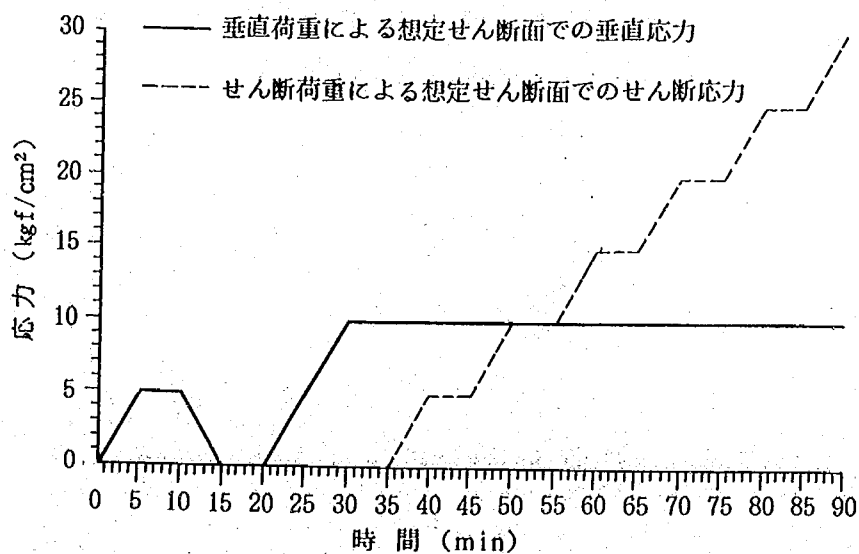
図-2.9 模型の種類



(a) 初期垂直応力 2 kgf/cm^2



(b) 初期垂直応力 6 kgf/cm^2



(c) 初期垂直応力 10 kgf/cm^2

図-2.10 荷重載荷パターン

2.6 計測項目

せん断試験における計測項目は次のとおりである。

- ① 破壊に至るまでの垂直荷重およびせん断荷重
- ② 破壊に至るまでのせん断ブロックの変位
- ③ 破断面の形状

また、試験に併せて、円柱供試体（直径10cm×高さ20cm）を用いて模型材料の

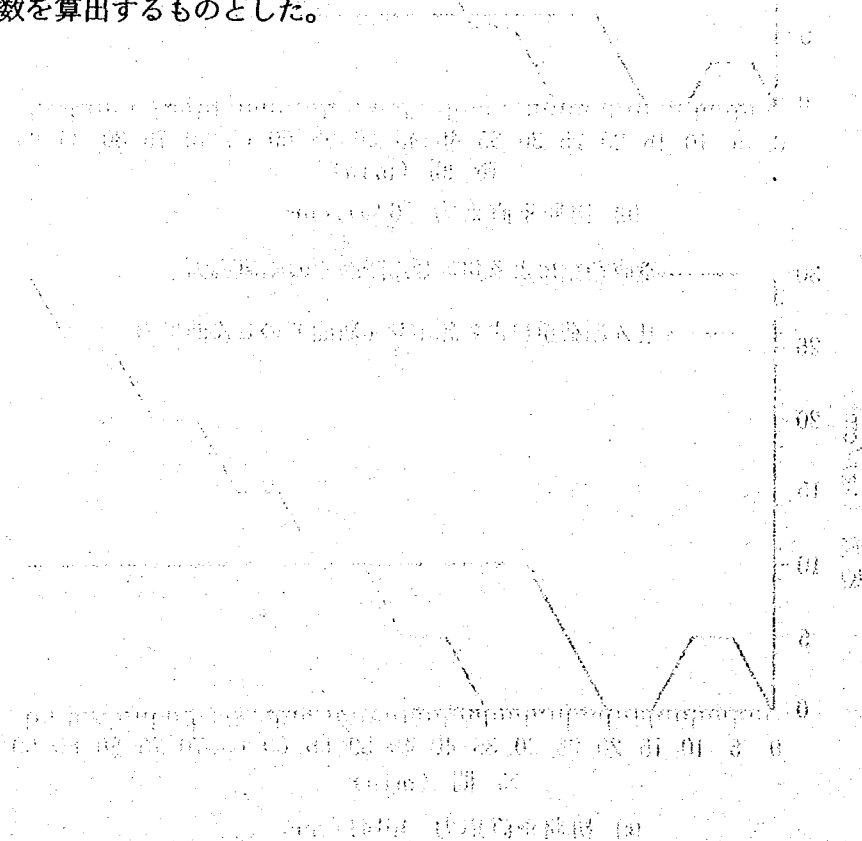
- ④ 一軸圧縮強度および弾性係数

を求めておくこととした。

垂直荷重およびせん断荷重は、各々のジャッキに取り付けた圧力計によって計測した。

変位は、通常のひずみゲージ式変位計（写真-2.2参照）、またはカンチレバー型のひずみゲージ式変位計（写真-2.3参照）を用いて、せん断ブロック6箇所、岩盤部10箇所の計16箇所について計測した。変位計の設置位置を図-2.11に示す。すなわち、せん断ブロック上面の鉛直方向変位（①、②、③、④）は各隅から5mm内側の点で、せん断ブロックのせん断方向変位（⑤、⑥）はせん断ブロック上面から37.5mm下の位置で側面から5mm内側の点で、岩盤部（⑦～⑯）は各端部から20mm内側の点で計測した。なお、計測はせん断荷重および垂直荷重と同時に記録し、変位は1/1000mmまで計測した。

一軸圧縮強度は、岩盤模型作製時に、各模型と同一のバッチで練り混ぜた石膏を用いて直径10cm×高さ20cmの円柱供試体を3本つづつ作製し、これを用いた一軸圧縮試験を行って測定するものとした。また、この時供試体の表面にひずみゲージを軸方向に4枚貼付け、一軸圧縮試験時の荷重とひずみの関係から弾性係数を算出するものとした。



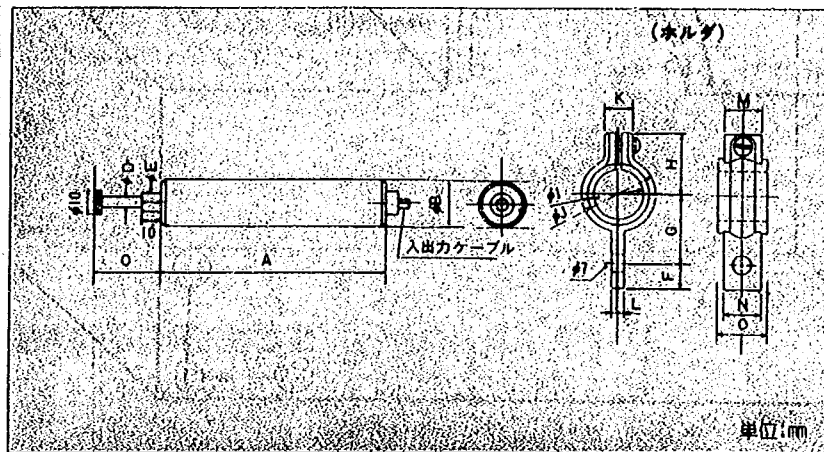
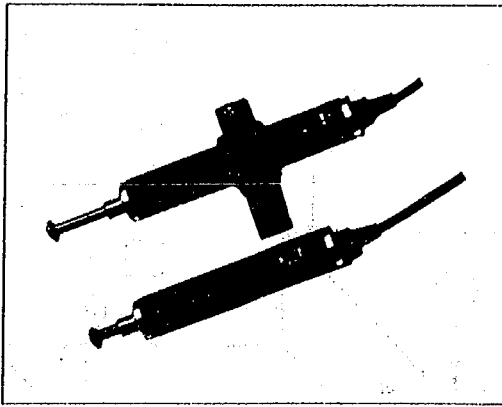


写真-2.2 通常のひずみゲージ式変位計

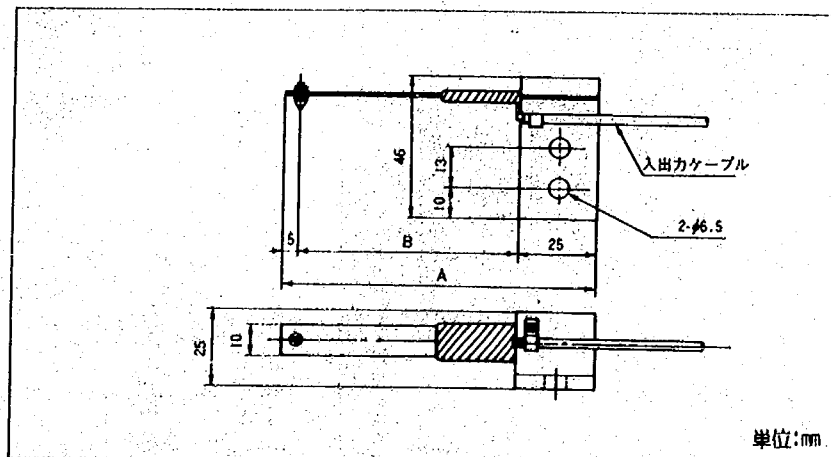
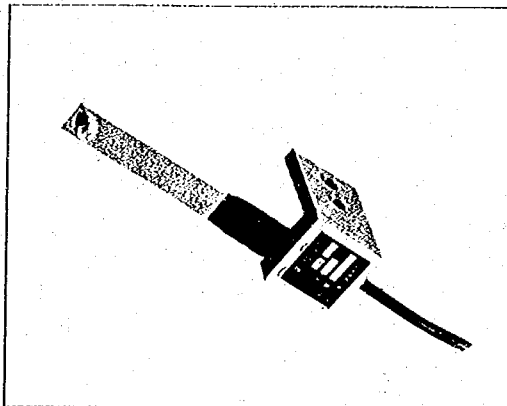


写真-2.3 カンチレバー型のひずみゲージ式変位計

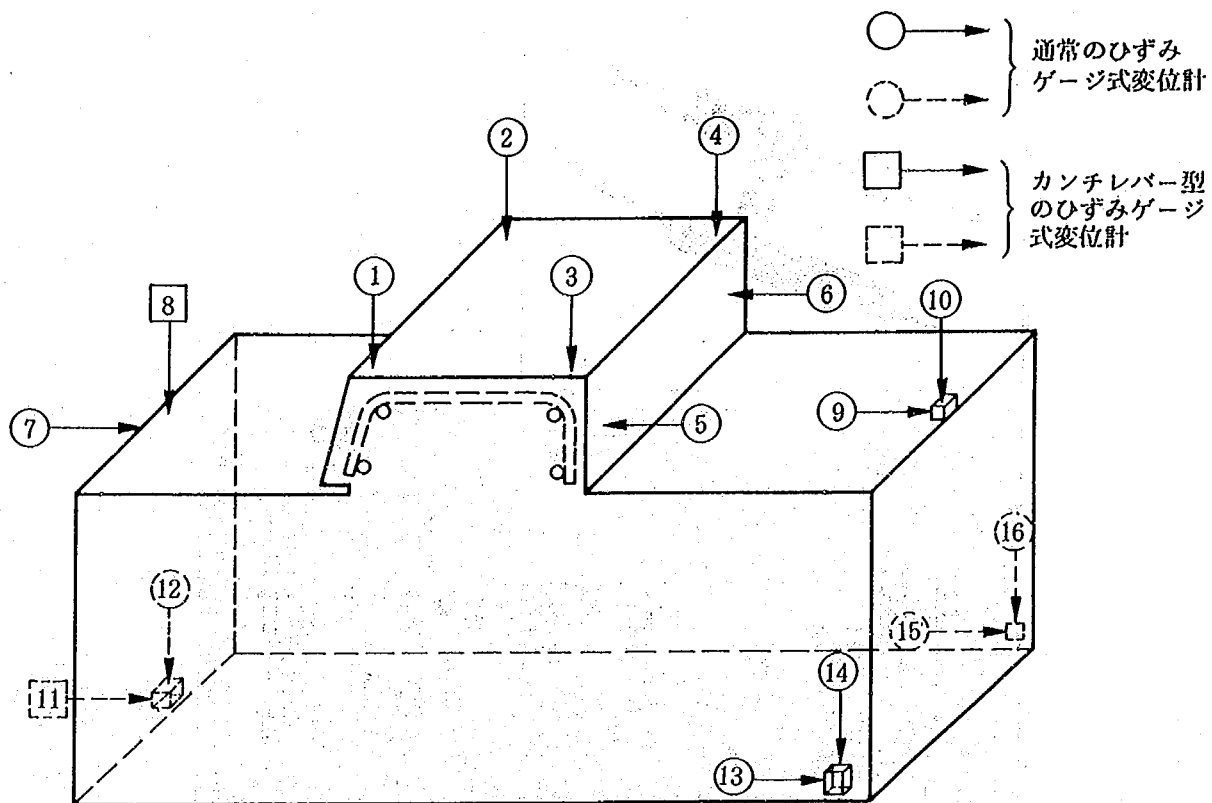


図-2.11 変位計の設置位置

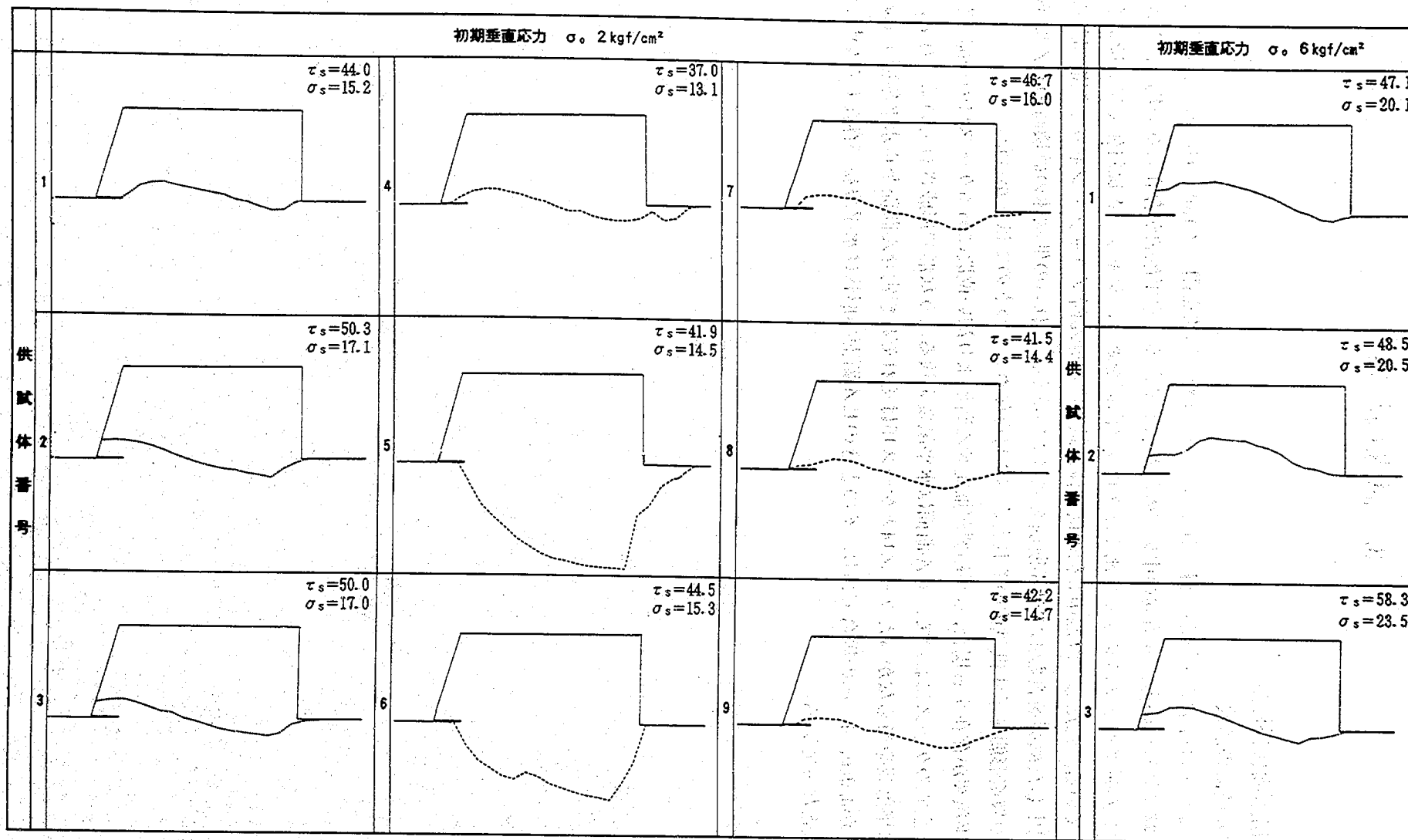
3. 試験結果

3.1 試験結果の概要

3.1.1 セン断面の形状

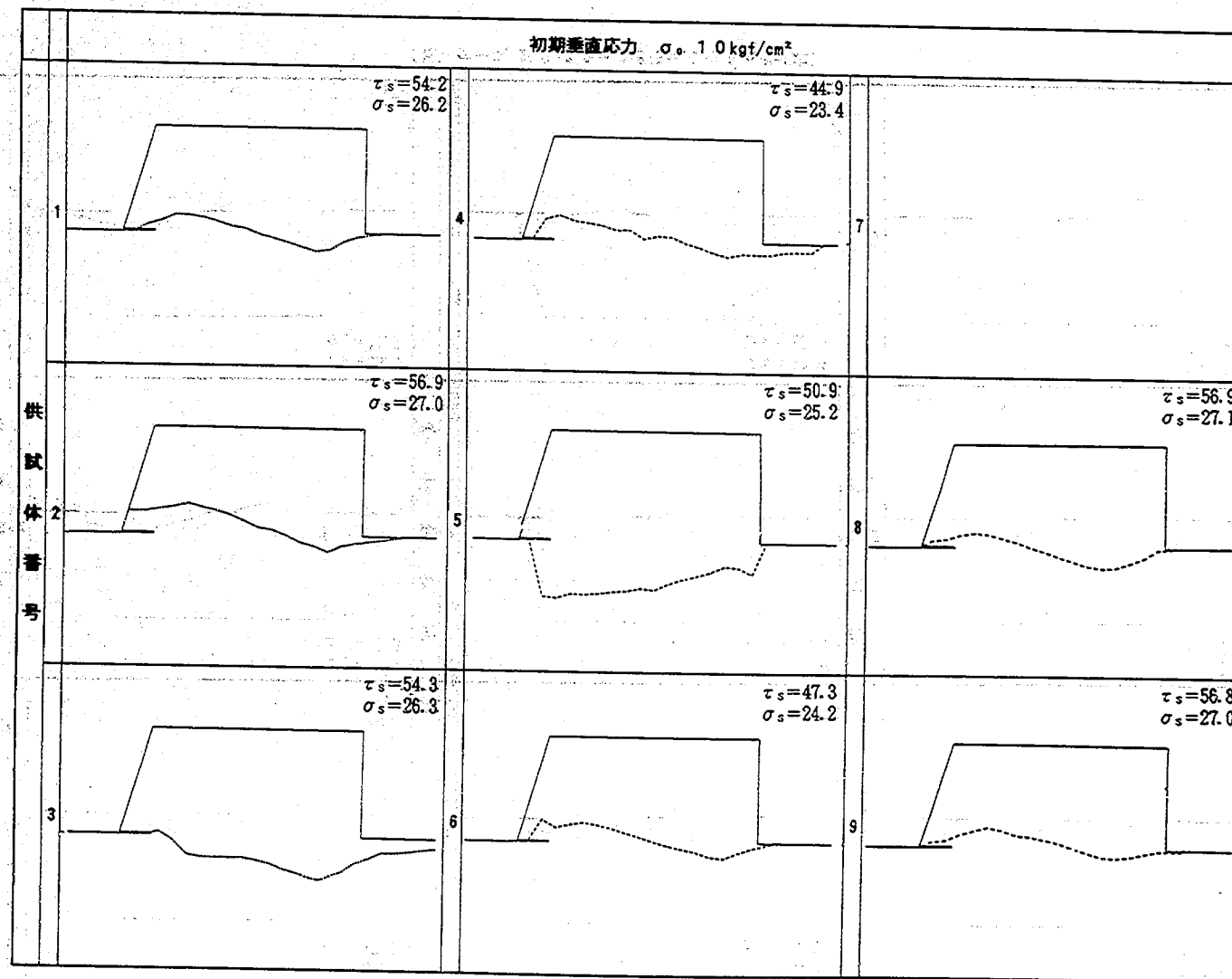
前回の試験および今回の試験から得られた試験後の破断面形状を図-3.1(a)~(r)に示す。ここで、破断面の形状は供試体の奥行き方向の中央での計測結果である。水平亀裂が存在しない場合、せん断面の形状はせん断ブロックのジャッキ側ではブロック内部を通り、ジャッキと反対側では岩盤側を通る形となっている。ただし、21個中2個の供試体は試験中にせん断ブロック・ジャッキ側端部から鉛直方向に発生した亀裂を含む形でせん断面を生じているが、これらの供試体の破壊時のせん断応力 τ_s は通常の破壊形態を示す供試体のそれと比べて有意な差をもつものではなかった。

一方、水平亀裂が存在する場合、水平亀裂が推定せん断面より深い位置にあるケース14の一部とケース15を除く全てのケースにおいて、せん断面は水平亀裂を通るような形で形成されている。なお、せん断面が水平亀裂を通らなかったケース14とケース15はそれぞれ想定せん断面から水平亀裂までの距離（深さ）が3.0cm、4.5cmの場合であり、そのときのせん断面の形状は水平亀裂が存在しない場合と同様な形状となっている。



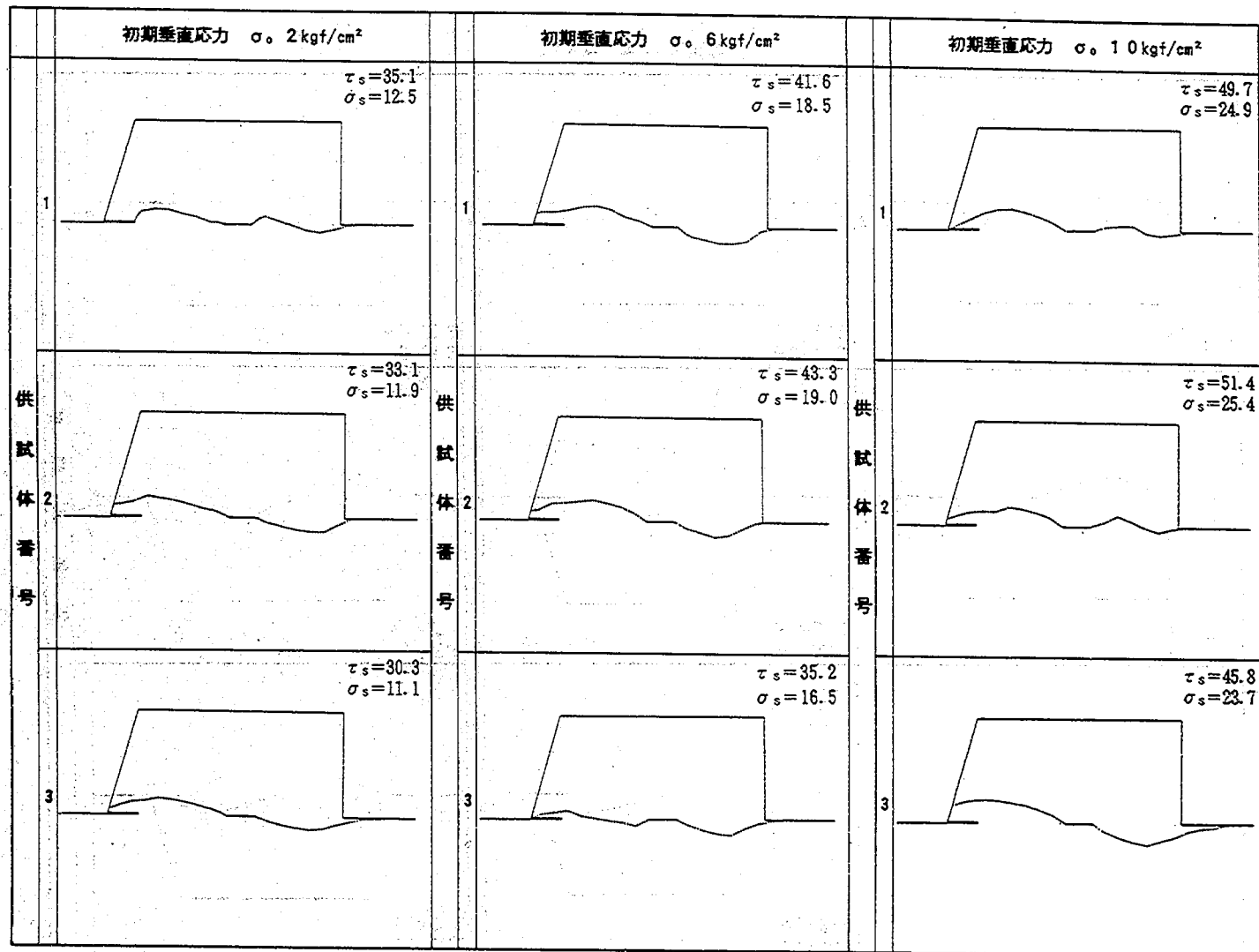
(a) ケース 1 (亀裂なし)

図-3.1 試験後の破断面形状



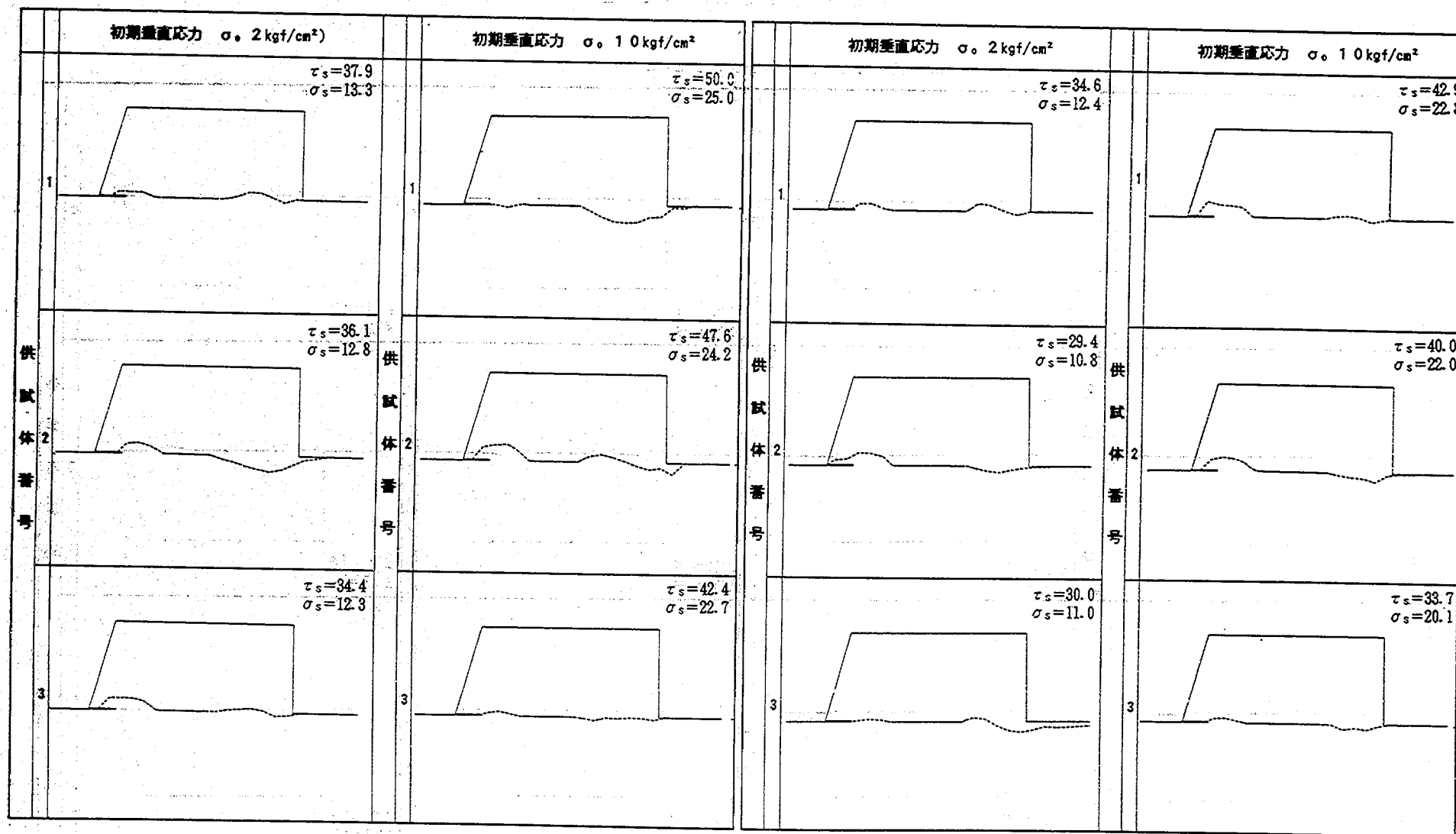
(a) ケース 1 (亀裂なし)

図-3.1 試験後の破断面形状



(b) ケース 2 (L=2.0cm, S=6.5cm, D=0.0cm, N=1本)

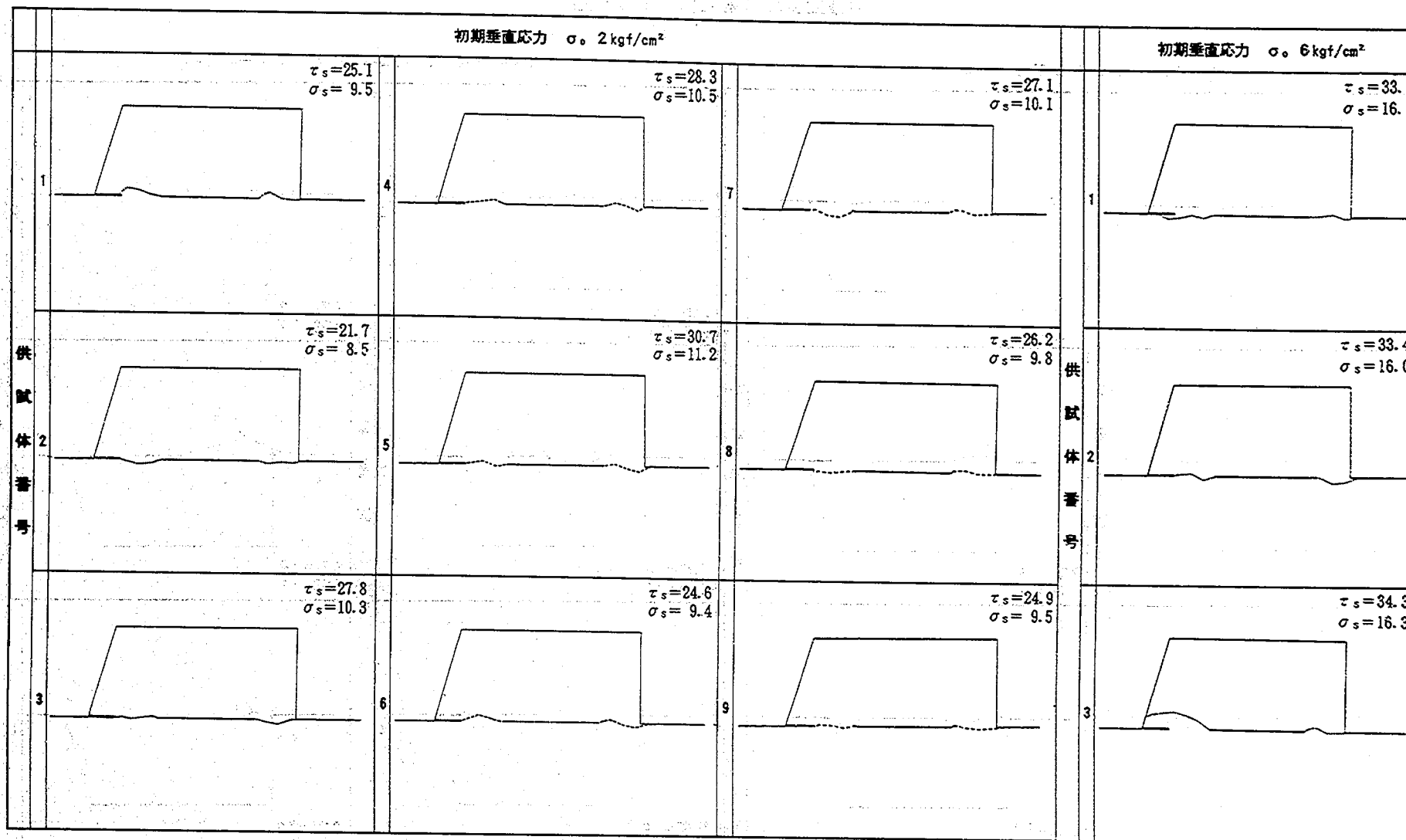
図-3.1 試験後の破断面形状



(c) ケース 3 (L=4.0cm, S=3.5cm, D=0.0cm, N=1本)

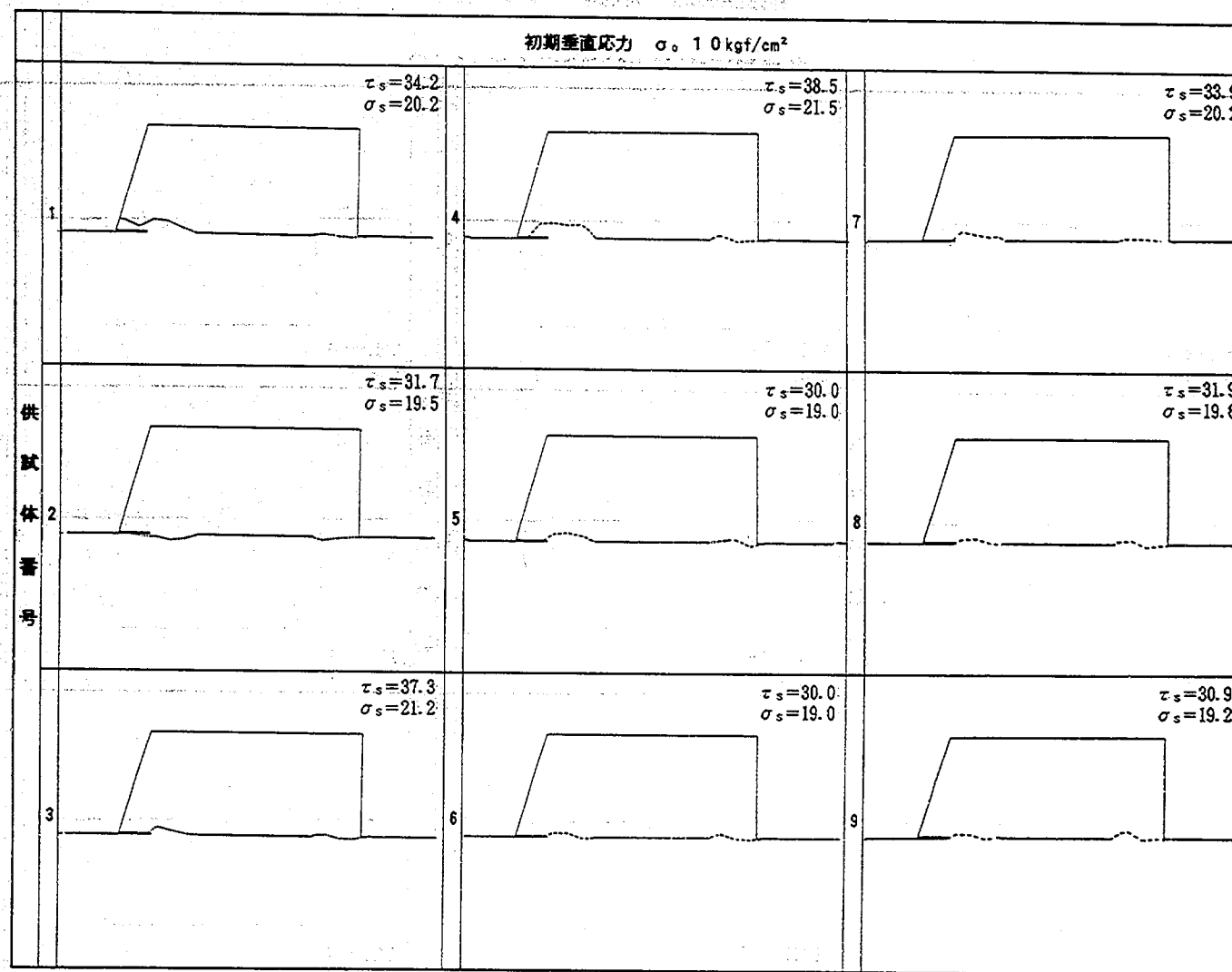
(d) ケース 4 (L=6.0cm, S=3.5cm, D=0.0cm, N=1本)

図-3.1 試験後の破断面形状



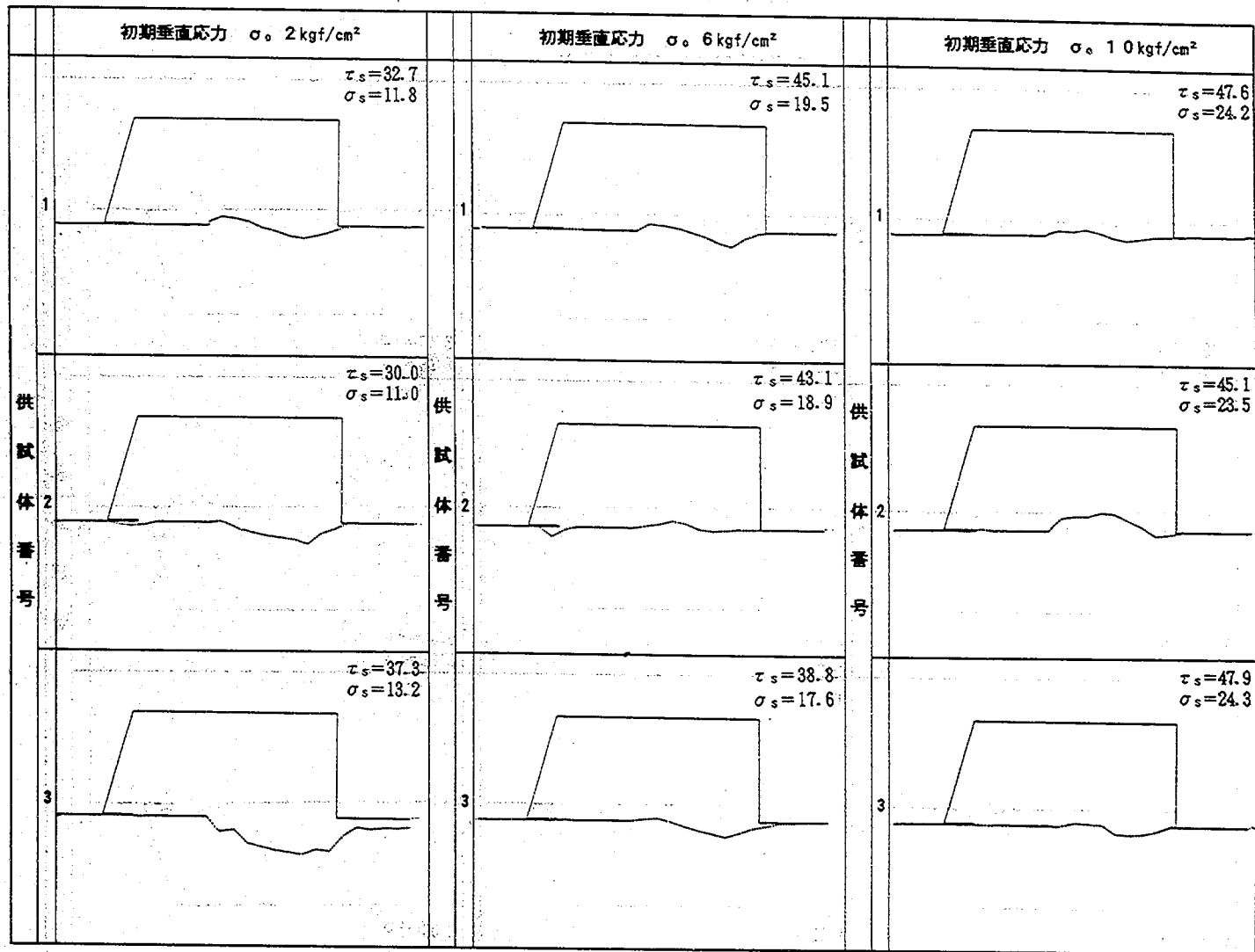
(e) ケース 5 (L=8.0cm, S=3.5cm, D=0.0cm, N=1本)

図-3.1 試験後の破断面形状



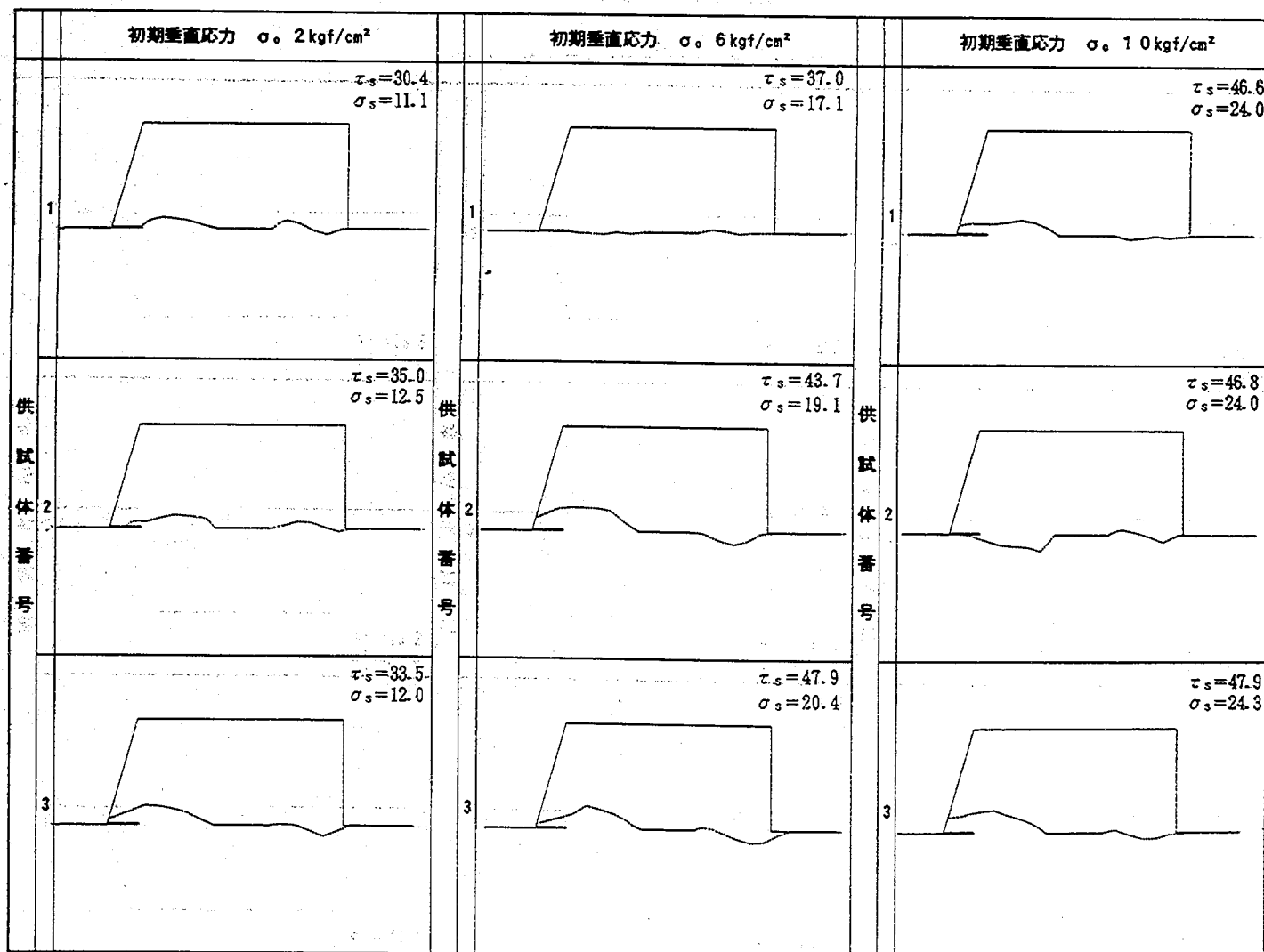
(e) ケース 5 (L=8.0cm, S=3.5cm, D=0.0cm, N=1本)

図-3.1 試験後の破断面形状



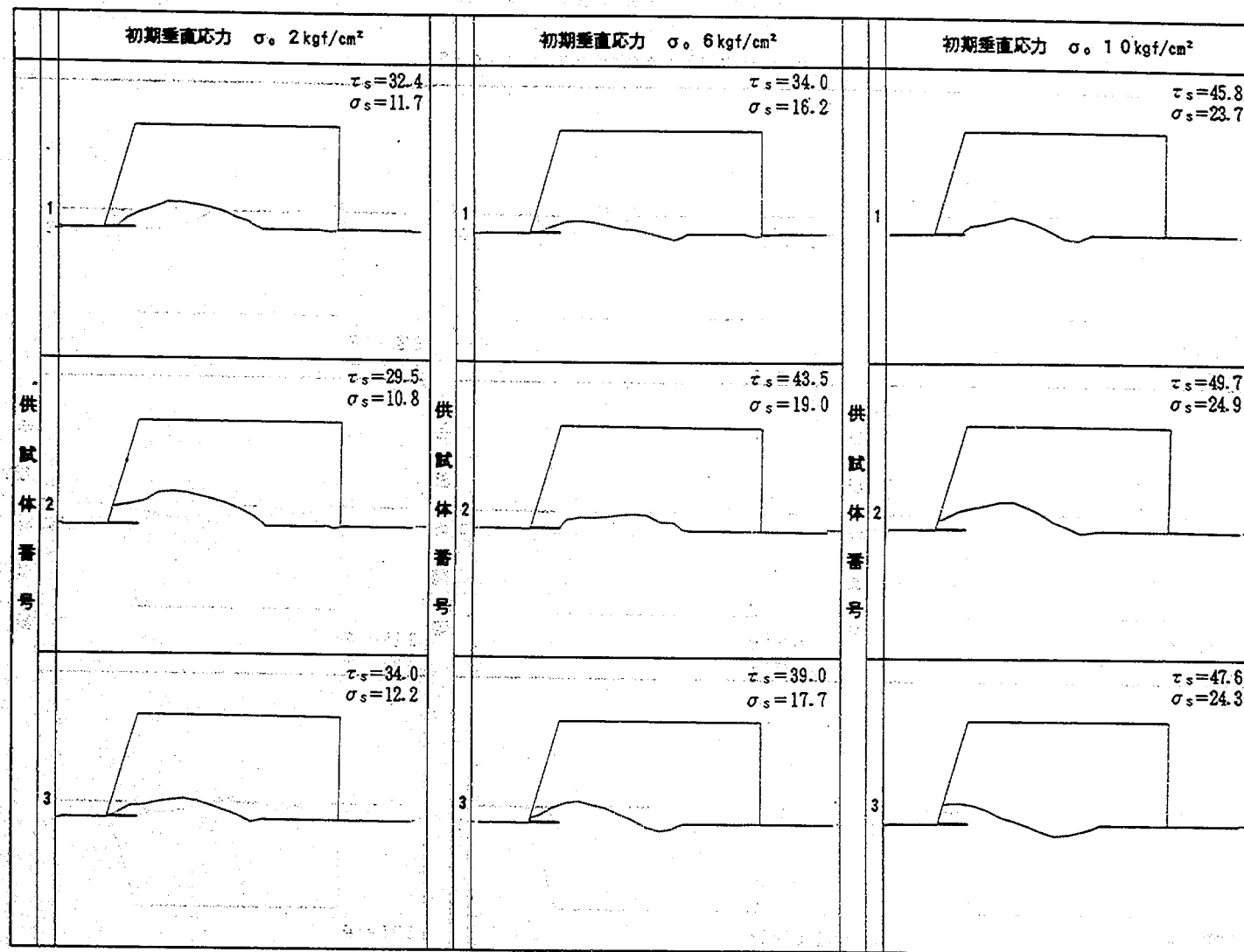
(f) ケース 6 (L=4.0cm, S=1.5cm, D=0.0cm, N=1本)

図-3.1 試験後の破断面形状



(g) ケース 7 (L=4.0cm, S=5.5cm, D=0.0cm, N=1本)

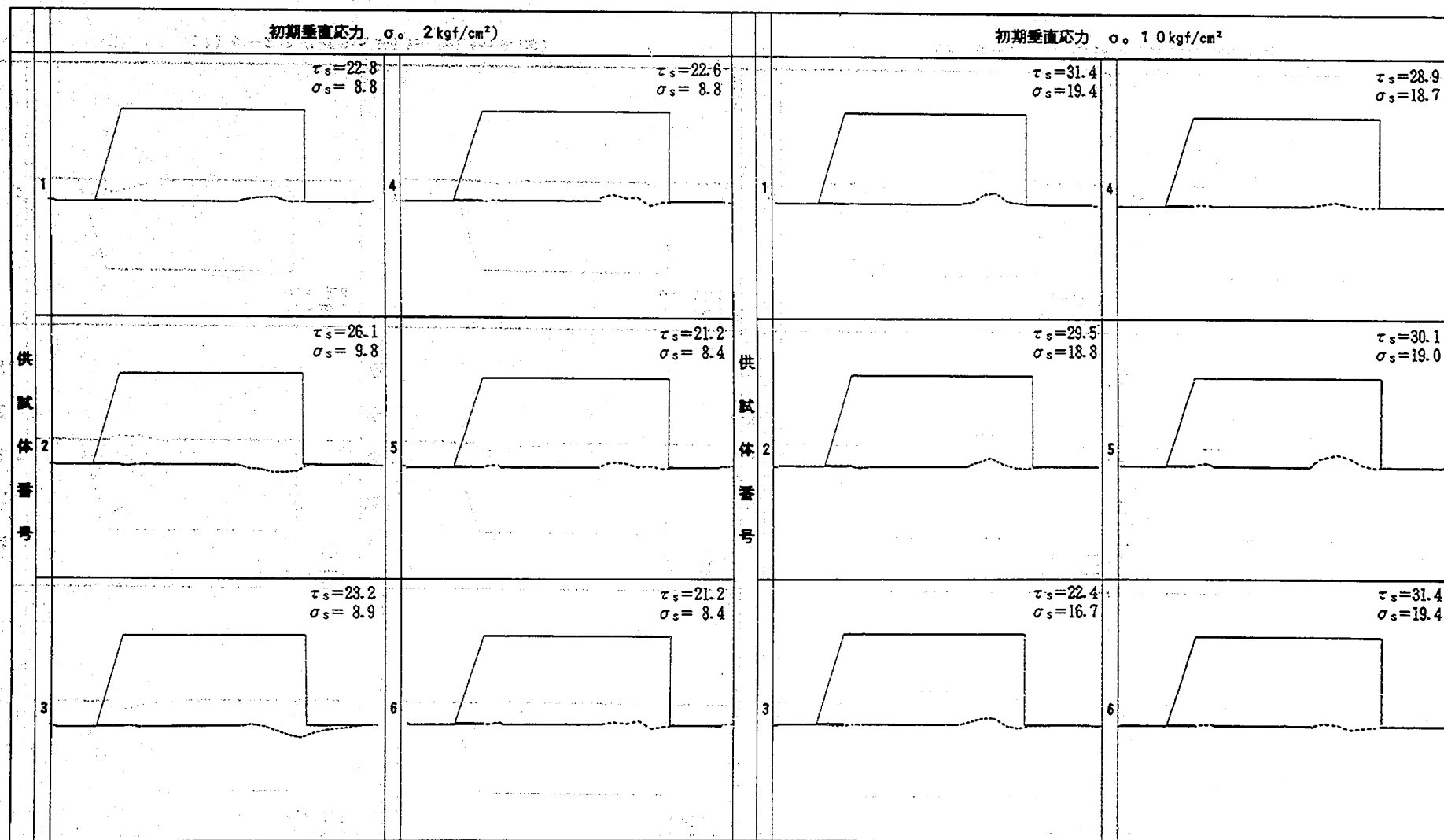
図-3.1 試験後の破断面形状



(h) ケース 8: (L=4.0cm, S=9.5cm, D=0.0cm, N=1本)

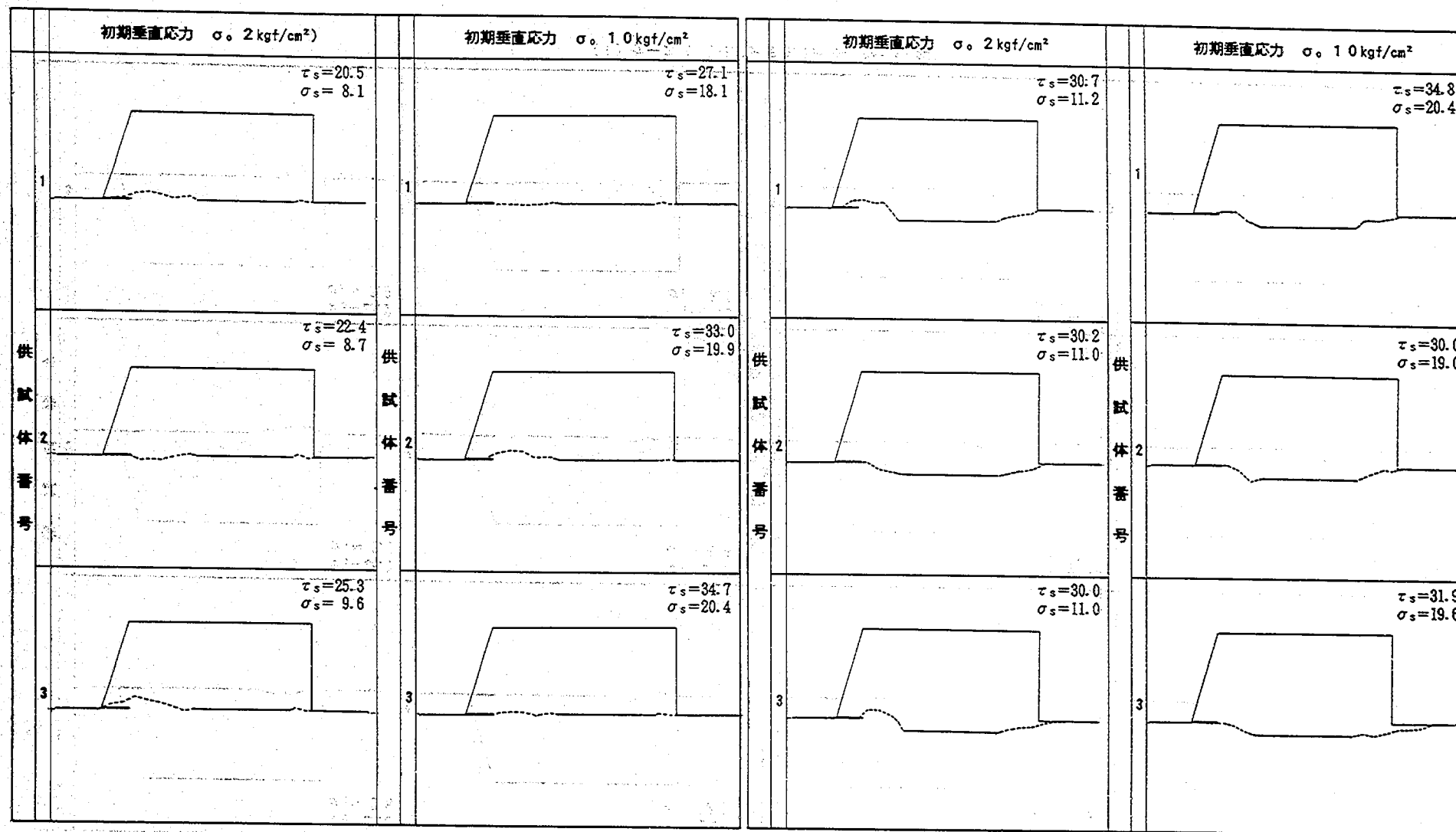
図-3.1 試験後の破断面形状

図-3.1 試験後の破断面形状



(i) ケース 9 (L=8.0cm, S=1.5cm, D=0.0cm, N=1本)

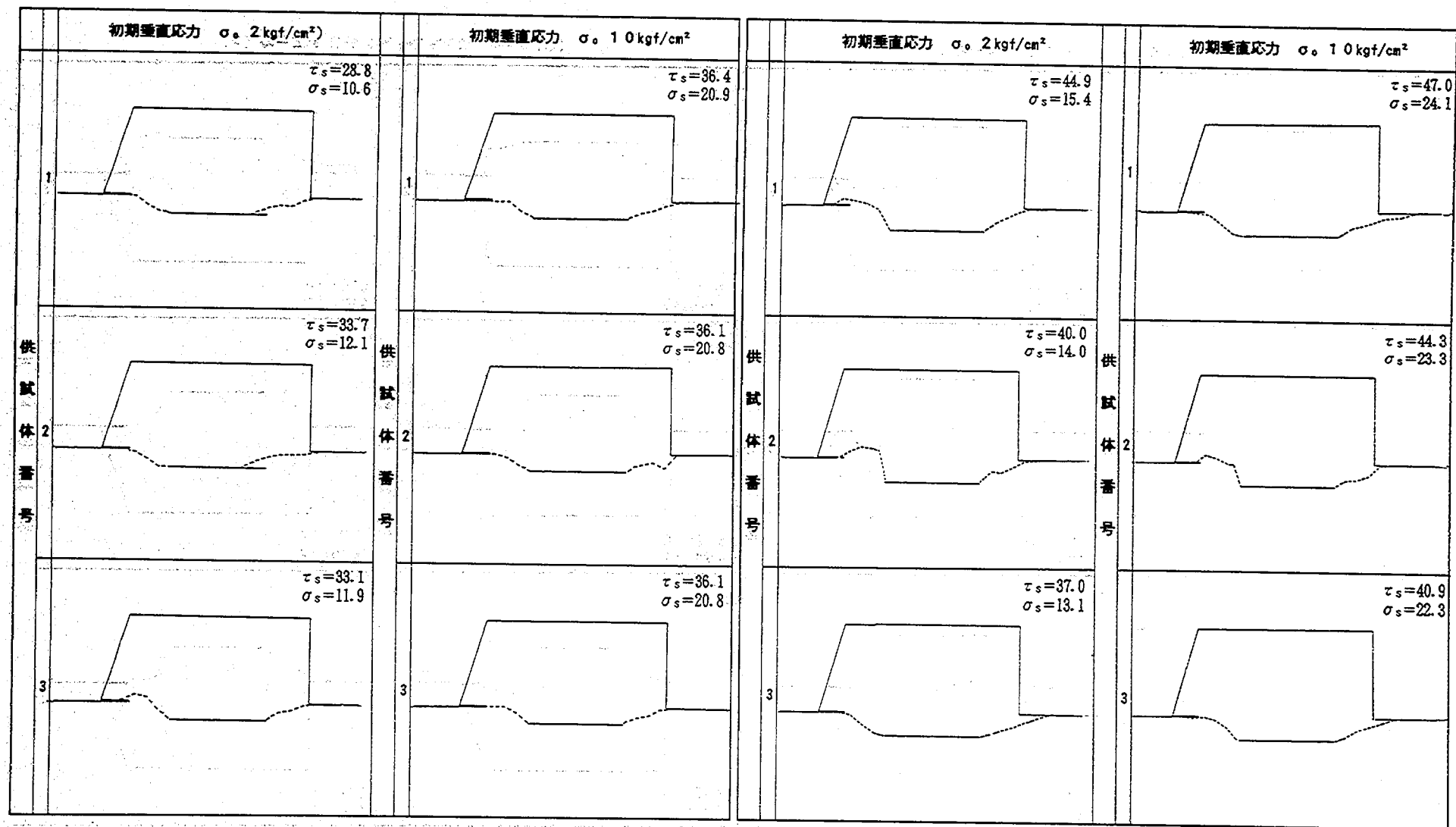
図-3.1 試験後の破断面形状



(j) ケース10 (L=8.0cm, S=5.5cm, D=0.0cm, N=1本)

(k) ケース11 (L=8.0cm, S=3.5cm, D=1.0cm, N=1本)

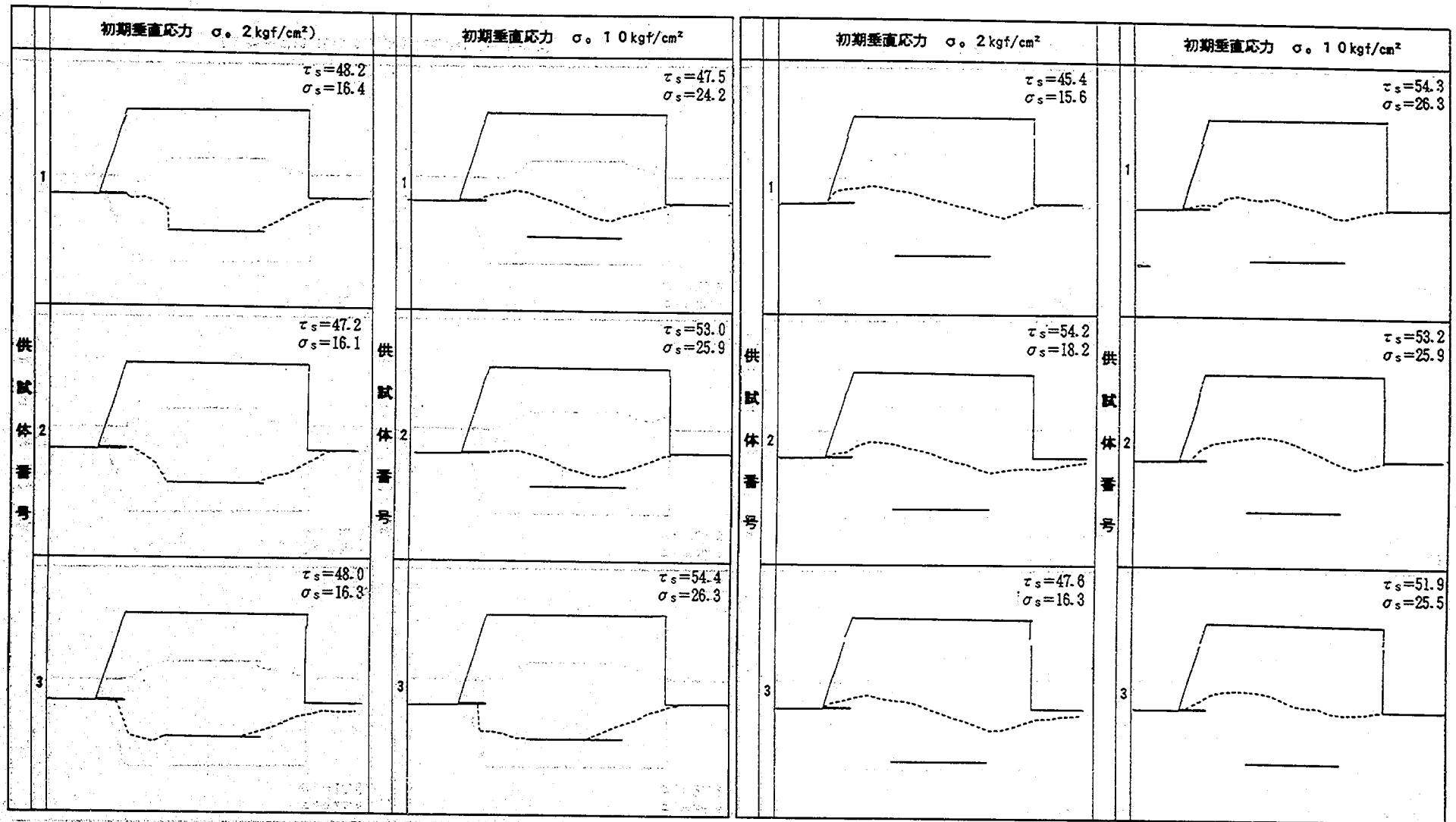
図-3.1 試験後の破断面形状



(I) ケース12 (L=8.0cm, S=3.5cm, D=1.5cm, N=1本)

(m) ケース13 (L=8.0cm, S=3.5cm, D=2.0cm, N=1本)

図-3.1 試験後の破断面形状



(n) ケース14 (L=8.0cm, S=3.5cm, D=3.0cm, N=1本)

(o) ケース15 (L=8.0cm, S=3.5cm, D=4.5cm, N=1本)

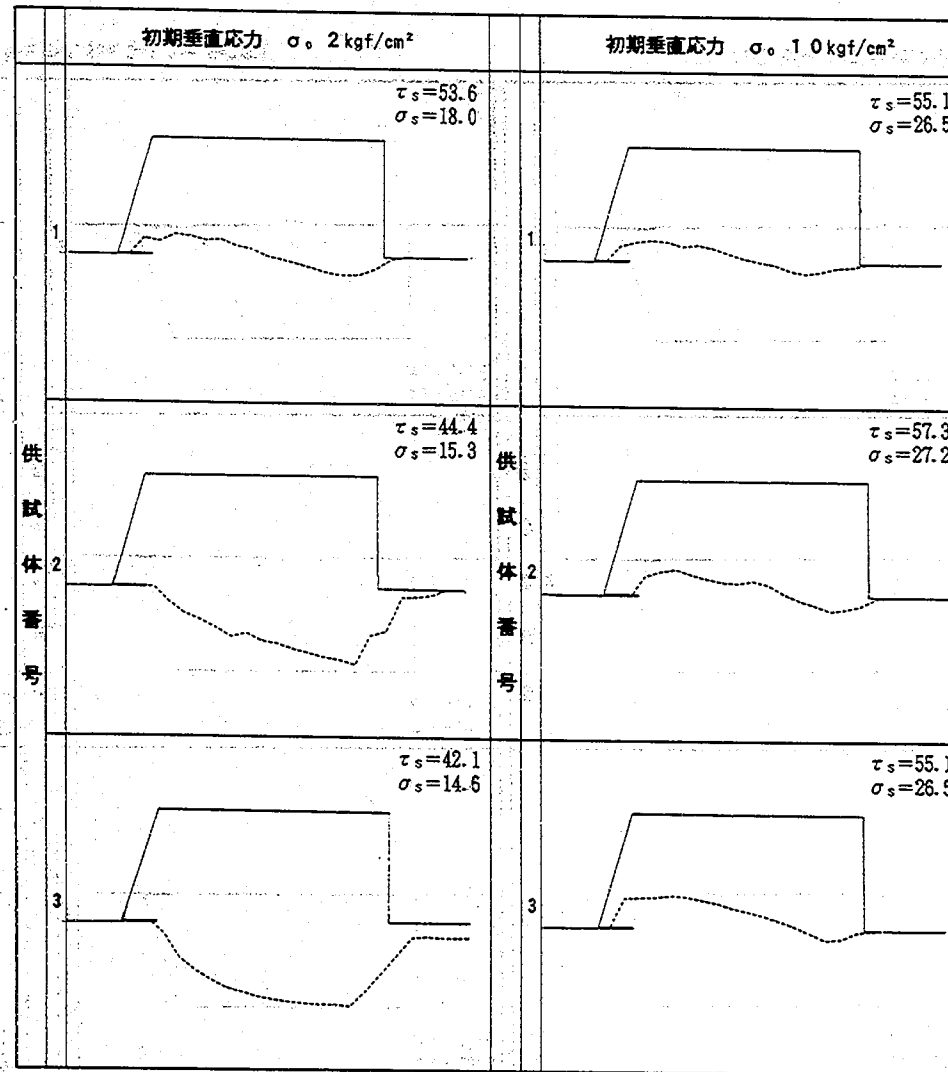
図-3.1 試験後の破断面形状

初期垂直応力 σ_0 2 kgf/cm ²			初期垂直応力 σ_0 10 kgf/cm ²			初期垂直応力 σ_0 2 kgf/cm ²			初期垂直応力 σ_0 10 kgf/cm ²		
供 試 体 番 号	1	$\tau_s=22.3$ $\sigma_s=8.7$	供 試 体 番 号	1	$\tau_s=29.3$ $\sigma_s=18.8$	供 試 体 番 号	1	$\tau_s=23.1$ $\sigma_s=8.9$	供 試 体 番 号	1	$\tau_s=27.1$ $\sigma_s=18.1$
	2	$\tau_s=24.0$ $\sigma_s=9.2$		2	$\tau_s=29.5$ $\sigma_s=18.8$		2	$\tau_s=22.9$ $\sigma_s=8.9$		2	$\tau_s=31.3$ $\sigma_s=19.4$
	3	$\tau_s=22.4$ $\sigma_s=8.7$		3	$\tau_s=31.9$ $\sigma_s=19.6$		3	$\tau_s=23.7$ $\sigma_s=9.1$		3	$\tau_s=34.9$ $\sigma_s=20.4$

(p) ケース16 (L=4.0cm, S=1.5cm, D=0.0cm, N=2本)

(q) ケース17 (L=2.0cm, S=1.5cm, D=0.0cm, N=4本)

図-3.1 試験後の破断面形状



(r) ケース 18 (偏心載荷)

図-3.1 試験後の破断面形状

3.1.2 試験値のばらつき

全てのケースに対するせん断試験結果および一軸圧縮試験結果を表-3.1(a)~(r)に示す。また、想定せん断面における破壊時のせん断応力 τ_s と一軸圧縮強度の関係を図-3.2(a)~(r)に示す。ここで、図の縦軸は破壊時のせん断応力 τ_s 、横軸は岩盤模型と同一バッチで作製した3本の円柱供試体の一軸圧縮強度の平均値である。図より、ケース3においては、一軸圧縮強度が大きくなるとせん断強度が大きくなる右上がりの傾向がみられるものの、その他のケースにおいてはこのような傾向はほとんど見られない。したがって、これらの結果を総合すると、想定せん断面における破壊時のせん断応力 τ_s と一軸圧縮強度の間には有意な関係は認められず、全体のばらつきを考慮すると岩盤模型はほぼ同程度の物性であると考えることができる。

試験番号	せん断試験結果	一軸圧縮試験結果	せん断試験結果	一軸圧縮試験結果
101	0.00	0.00	0.00	0.00
102	0.00	0.00	0.00	0.00
103	0.00	0.00	0.00	0.00
104	0.00	0.00	0.00	0.00
105	0.00	0.00	0.00	0.00
106	0.00	0.00	0.00	0.00
107	0.00	0.00	0.00	0.00
108	0.00	0.00	0.00	0.00
109	0.00	0.00	0.00	0.00
110	0.00	0.00	0.00	0.00
111	0.00	0.00	0.00	0.00
112	0.00	0.00	0.00	0.00
113	0.00	0.00	0.00	0.00
114	0.00	0.00	0.00	0.00
115	0.00	0.00	0.00	0.00
116	0.00	0.00	0.00	0.00
117	0.00	0.00	0.00	0.00
118	0.00	0.00	0.00	0.00
119	0.00	0.00	0.00	0.00
120	0.00	0.00	0.00	0.00

試験番号	せん断試験結果	一軸圧縮試験結果	せん断試験結果	一軸圧縮試験結果
201	0.00	0.00	0.00	0.00
202	0.00	0.00	0.00	0.00
203	0.00	0.00	0.00	0.00
204	0.00	0.00	0.00	0.00
205	0.00	0.00	0.00	0.00
206	0.00	0.00	0.00	0.00
207	0.00	0.00	0.00	0.00
208	0.00	0.00	0.00	0.00
209	0.00	0.00	0.00	0.00
210	0.00	0.00	0.00	0.00
211	0.00	0.00	0.00	0.00
212	0.00	0.00	0.00	0.00
213	0.00	0.00	0.00	0.00
214	0.00	0.00	0.00	0.00
215	0.00	0.00	0.00	0.00
216	0.00	0.00	0.00	0.00
217	0.00	0.00	0.00	0.00
218	0.00	0.00	0.00	0.00
219	0.00	0.00	0.00	0.00
220	0.00	0.00	0.00	0.00

試験番号	せん断試験結果	一軸圧縮試験結果	せん断試験結果	一軸圧縮試験結果
301	0.00	0.00	0.00	0.00
302	0.00	0.00	0.00	0.00
303	0.00	0.00	0.00	0.00
304	0.00	0.00	0.00	0.00
305	0.00	0.00	0.00	0.00
306	0.00	0.00	0.00	0.00
307	0.00	0.00	0.00	0.00
308	0.00	0.00	0.00	0.00
309	0.00	0.00	0.00	0.00
310	0.00	0.00	0.00	0.00
311	0.00	0.00	0.00	0.00
312	0.00	0.00	0.00	0.00
313	0.00	0.00	0.00	0.00
314	0.00	0.00	0.00	0.00
315	0.00	0.00	0.00	0.00
316	0.00	0.00	0.00	0.00
317	0.00	0.00	0.00	0.00
318	0.00	0.00	0.00	0.00
319	0.00	0.00	0.00	0.00
320	0.00	0.00	0.00	0.00

表-3.1 破壊時のせん断応力と垂直応力

単位 (kgf/cm²)

(a) L=0.0cm, S=0.0cm, D=0.0cm (亀裂なし)

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケース1	2	1	15.2	44.0	181
		2	17.1	50.3	183
		3	17.0	50.0	188
		4	13.1	37.0	181
		5	14.5	41.9	169
		6	15.3	44.5	166
		7	16.0	46.7	185
		8	14.4	41.5	146
		9	14.7	42.2	
	6	1	20.1	47.1	178
		2	20.5	48.5	168
		3	23.5	58.3	222
		1	26.2	54.2	218
		2	27.0	56.9	183
		3	26.3	54.3	193
		4	23.4	44.9	171
		5	25.3	50.2	182
		6	24.2	47.3	168
		7	24.2	47.4	
		8	27.1	56.9	187
		9	27.0	56.8	189

(b) L=2.0cm, S=6.5cm, D=0.0cm

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケース2	2	1	12.5	35.1	173
		2	11.9	33.1	192
		3	11.1	30.3	178
	6	1	18.5	41.6	174
		2	19.0	43.3	182
		3	16.5	35.2	179
	10	1	24.9	49.7	200
		2	25.4	51.4	208
		3	23.7	45.8	189

(c) L=4.0cm, S=3.5cm, D=0.0cm

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケース3	2	1	13.3	37.9	191
		2	12.8	36.1	167
		3	12.3	34.4	137
	10	1	25.0	50.0	205
		2	24.2	47.6	169
		3	22.7	42.4	150

(d) L=6.0cm, S=3.5cm, D=0.0cm

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケ ー ス 4	2	1	12.4	34.6	226
		2	10.8	29.4	211
		3	11.0	30.0	181
	10	1	22.8	42.9	173
		2	22.0	40.0	179
		3	20.1	33.7	190

(e) L=8.0cm, S=3.5cm, D=0.0cm

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケ ー ス 5	2	1	9.5	25.1	175
		2	8.5	21.7	219
		3	10.3	27.8	182
		4	10.5	28.3	210
		5	11.2	30.7	194
		6	9.4	24.6	177
		7	10.1	27.1	185
		8	9.8	26.2	191
		9	9.5	24.9	170
	6	1	16.1	33.6	186
		2	16.0	33.4	180
		3	16.3	34.3	181
	10	1	20.2	34.2	192
		2	19.5	31.7	163
		3	21.2	37.3	172
		4	21.5	38.5	223
		5	19.0	30.0	196
		6	19.0	30.0	183
		7	20.2	33.9	190
		8	19.6	31.9	167
		9	19.2	30.9	187

(f) L=4.0cm, S=1.5cm, D=0.0cm

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケ ー ス 6	2	1	11.8	32.7	178
		2	11.0	30.0	186
		3	13.2	37.3	178
	6	1	19.5	45.1	182
		2	18.9	43.1	187
		3	17.6	38.8	188
	10	1	24.2	47.6	204
		2	23.5	45.1	193
		3	24.3	47.8	164

(g) L=4.0cm, S=5.5cm, D=0.0cm

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケース 7	2	1	11.1	30.4	174
		2	12.5	35.0	190
		3	12.0	33.5	172
	6	1	17.1	37.0	167
		2	19.1	43.7	182
		3	20.4	47.9	222
	10	1	24.0	46.6	193
		2	24.0	46.8	201
		3	24.4	47.9	186

(h) L=4.0cm, S=9.5cm, D=0.0cm

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケース 8	2	1	11.7	32.4	174
		2	10.8	29.5	173
		3	12.2	34.0	178
	6	1	16.2	34.0	178
		2	19.0	43.5	192
		3	17.7	39.0	179
	10	1	23.7	45.8	201
		2	24.9	49.7	165
		3	24.3	47.6	198

(i) L=8.0cm, S=1.5cm, D=0.0cm

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケース 9	2	1	8.8	22.8	186
		2	9.8	26.1	156
		3	8.9	23.2	133
		4	8.8	22.6	193
		5	8.4	21.2	183
		6	8.4	21.2	165
	10	1	19.4	31.4	183
		2	18.8	29.5	167
		3	16.7	22.4	176
		4	18.7	28.9	164
		5	19.0	30.1	166
		6	19.4	31.4	167

(j) $L=8.0\text{cm}$, $S=5.5\text{cm}$, $D=0.0\text{cm}$

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケ ー ス 10	2	1	8.1	20.5	174
		2	8.7	22.4	186
		3	9.6	25.3	172
	1.0	1	18.1	27.1	176
		2	19.9	33.0	176
		3	20.4	34.7	168

(k) $L=8.0\text{cm}$, $S=3.5\text{cm}$, $D=1.0\text{cm}$

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケ ー ス 11	2	1	11.2	30.7	197
		2	11.0	30.2	179
		3	11.0	30.0	162
	1.0	1	20.4	34.8	191
		2	19.0	30.0	178
		3	19.6	31.9	150

(l) $L=8.0\text{cm}$, $S=3.5\text{cm}$, $D=1.5\text{cm}$

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケ ー ス 12	2	1	10.6	28.8	204
		2	12.1	33.7	192
		3	11.9	33.1	172
	1.0	1	20.9	36.4	189
		2	20.8	36.1	193
		3	20.8	36.1	175

(m) $L=8.0\text{cm}$, $S=3.5\text{cm}$, $D=2.0\text{cm}$

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケ ー ス 13	2	1	15.4	44.9	193
		2	14.0	40.0	207
		3	13.1	37.0	130
	1.0	1	24.1	47.0	196
		2	23.3	44.3	200
		3	22.3	40.9	165

(n) $L=8.0\text{cm}$, $S=3.5\text{cm}$, $D=3.0\text{cm}$

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケ ー ス 14	2	1	16.4	48.2	190
		2	16.1	47.2	172
		3	16.3	47.8	178
	1.0	1	24.2	47.5	186
		2	25.9	53.0	186
		3	26.3	54.4	177

(o) L=8.0cm, S=3.5cm, D=4.5cm

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケ ー ス 15	2	1	15.6	45.4	162
		2	18.2	54.2	192
		3	16.3	47.6	178
	10	1	26.3	54.3	
		2	25.9	53.2	179
		3	25.5	51.9	191

(p) L=4.0cm, S=1.5cm, D=0.0cm, N=2本

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケ ー ス 16	2	1	8.7	22.3	188
		2	9.2	24.0	194
		3	8.7	22.4	
	10	1	18.8	29.3	185
		2	18.8	29.5	185
		3	19.6	31.9	180

(q) L=2.0cm, S=1.5cm, D=0.0cm, N=4本

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケ ー ス 17	2	1	8.9	23.1	191
		2	8.9	22.9	188
		3	9.1	23.7	
	10	1	18.1	27.1	161
		2	19.4	31.3	185
		3	20.4	34.9	185

(r) L=0.0cm, S=0.0cm, D=0.0cm (亀裂なし, 偏心荷重)

	初期 垂直応力	供試体番号	破 壊 時		円柱供試体 一軸圧縮強度
			垂直応力 σ_s	せん断応力 τ_s	
ケ ー ス 18	2	1	18.0	53.6	198
		2	15.3	44.4	189
		3	14.6	42.1	150
	10	1	26.5	55.1	205
		2	27.2	57.3	161
		3	26.5	55.1	168

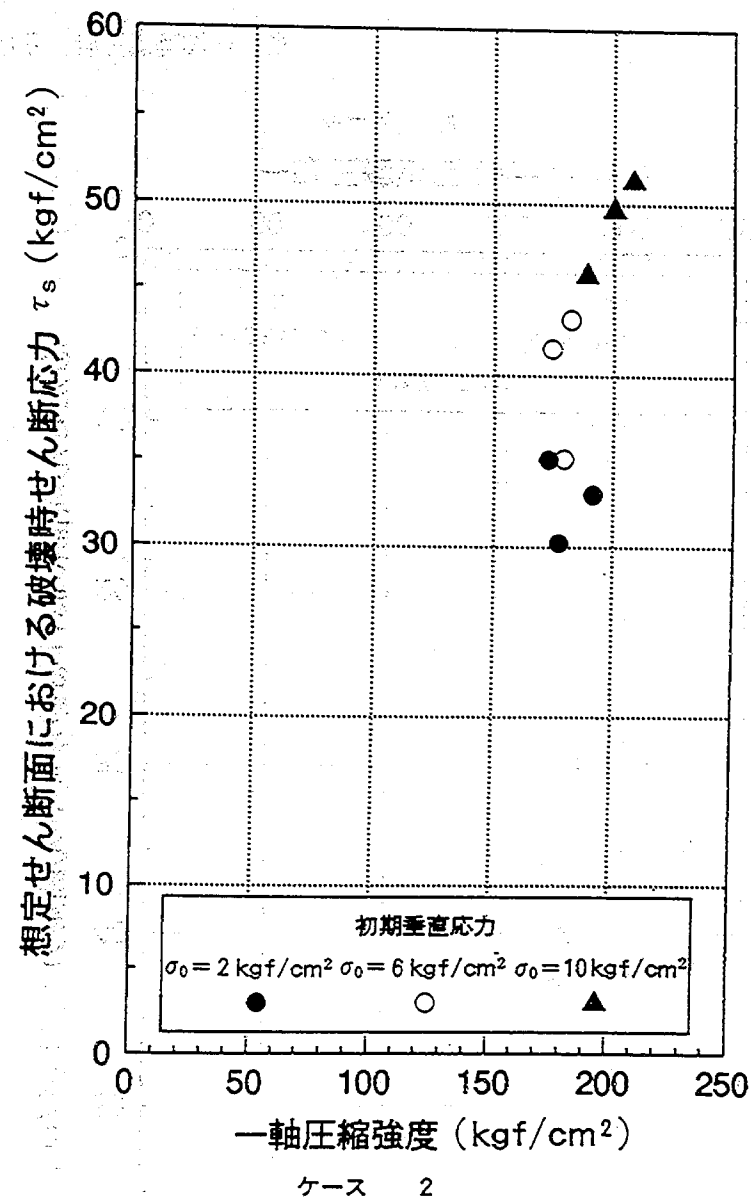
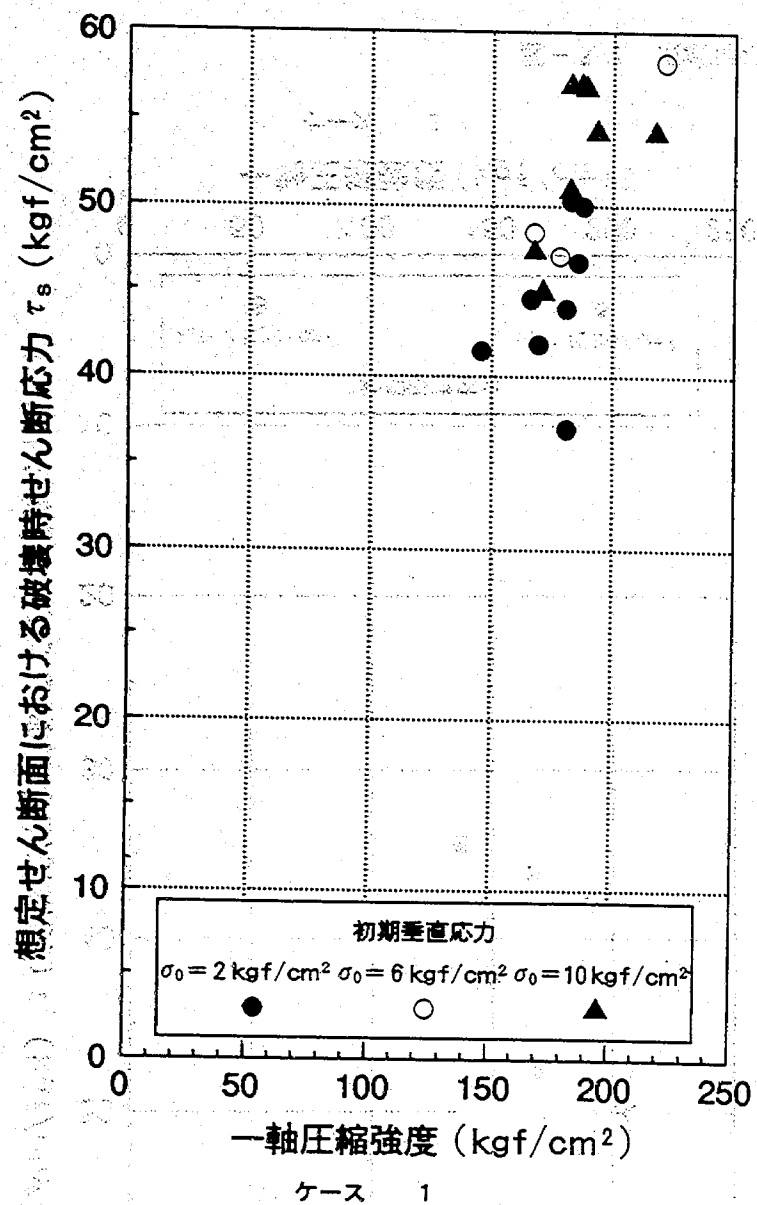
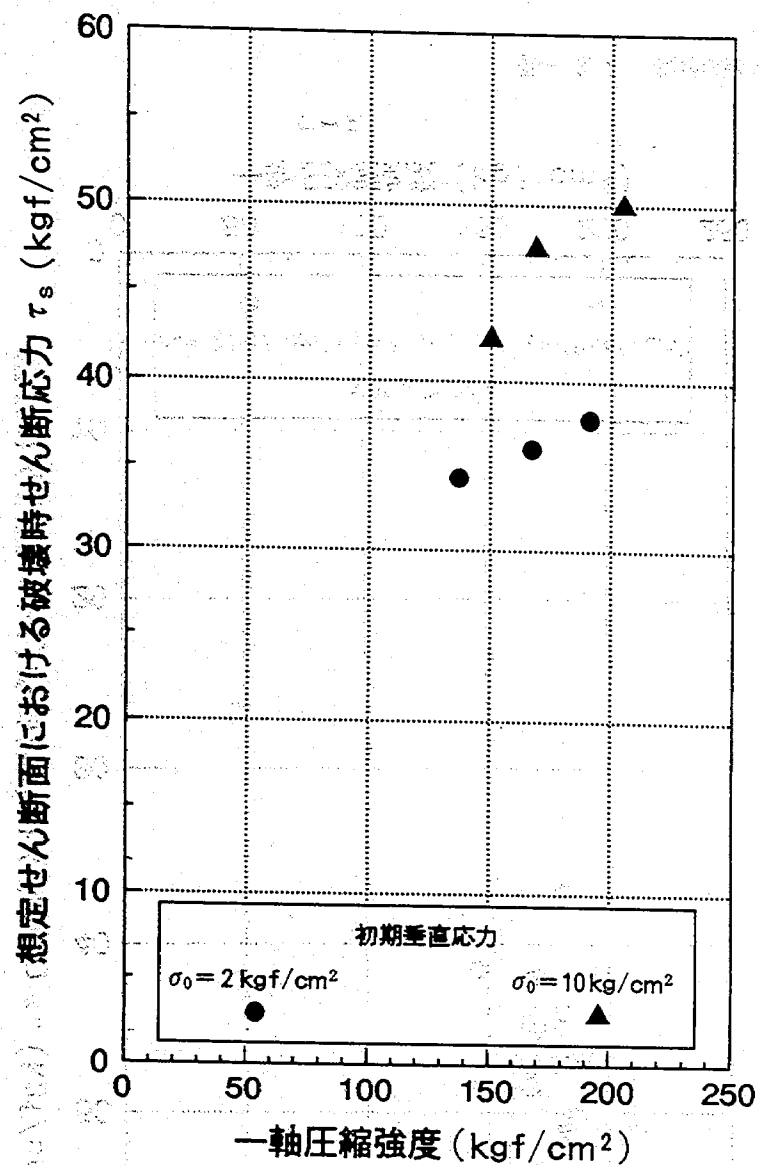
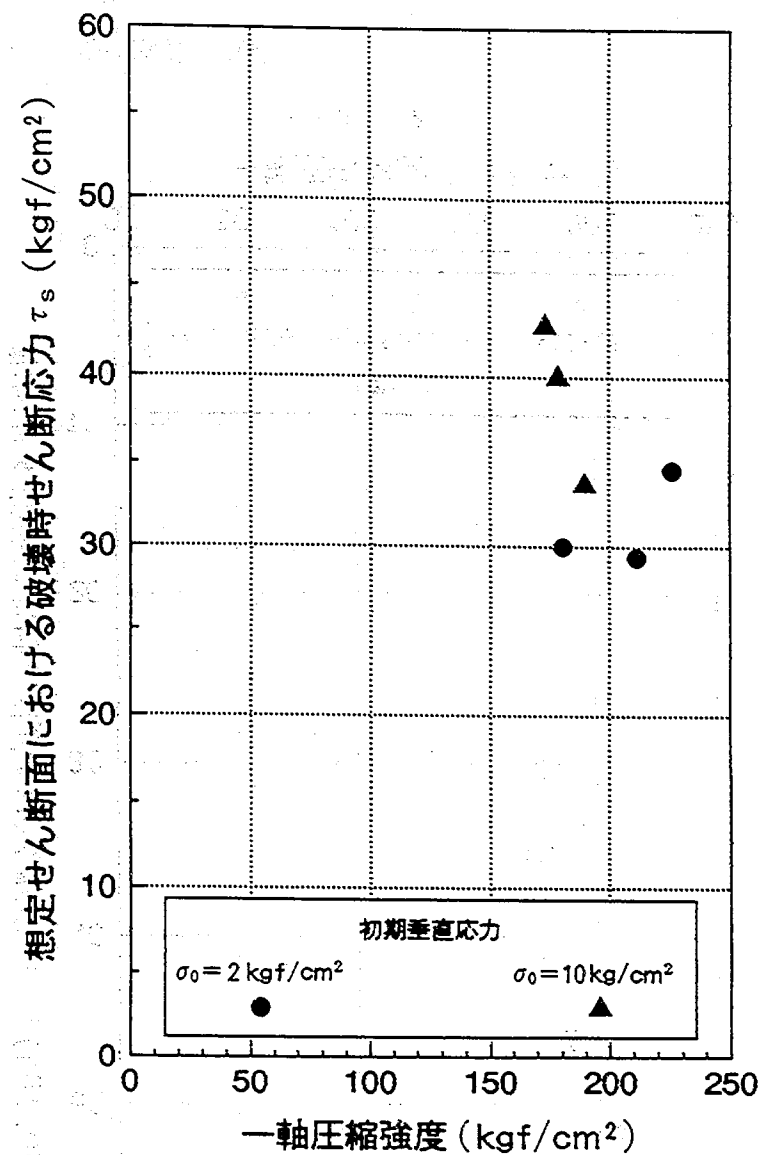


図-3.2 破壊時のせん断応力と一軸圧縮強度の関係



ケース 3



ケース 4

図-3.2 破壊時のせん断応力と一軸圧縮強度の関係

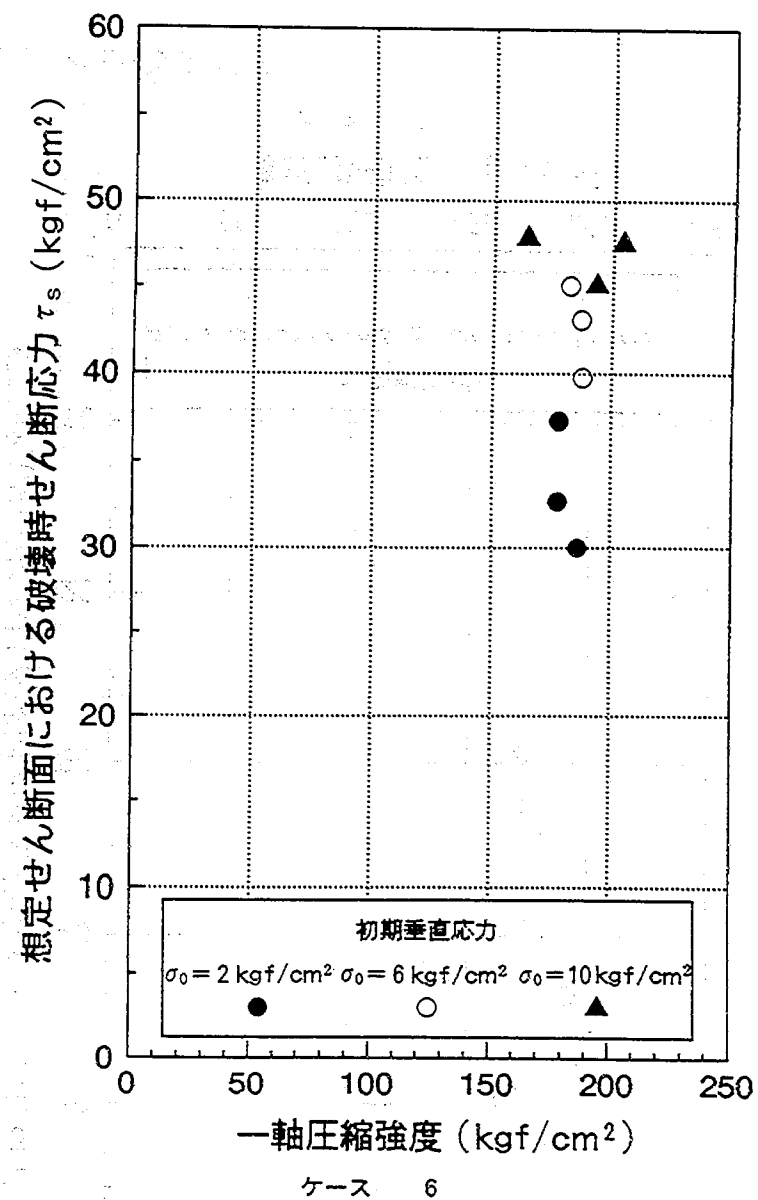
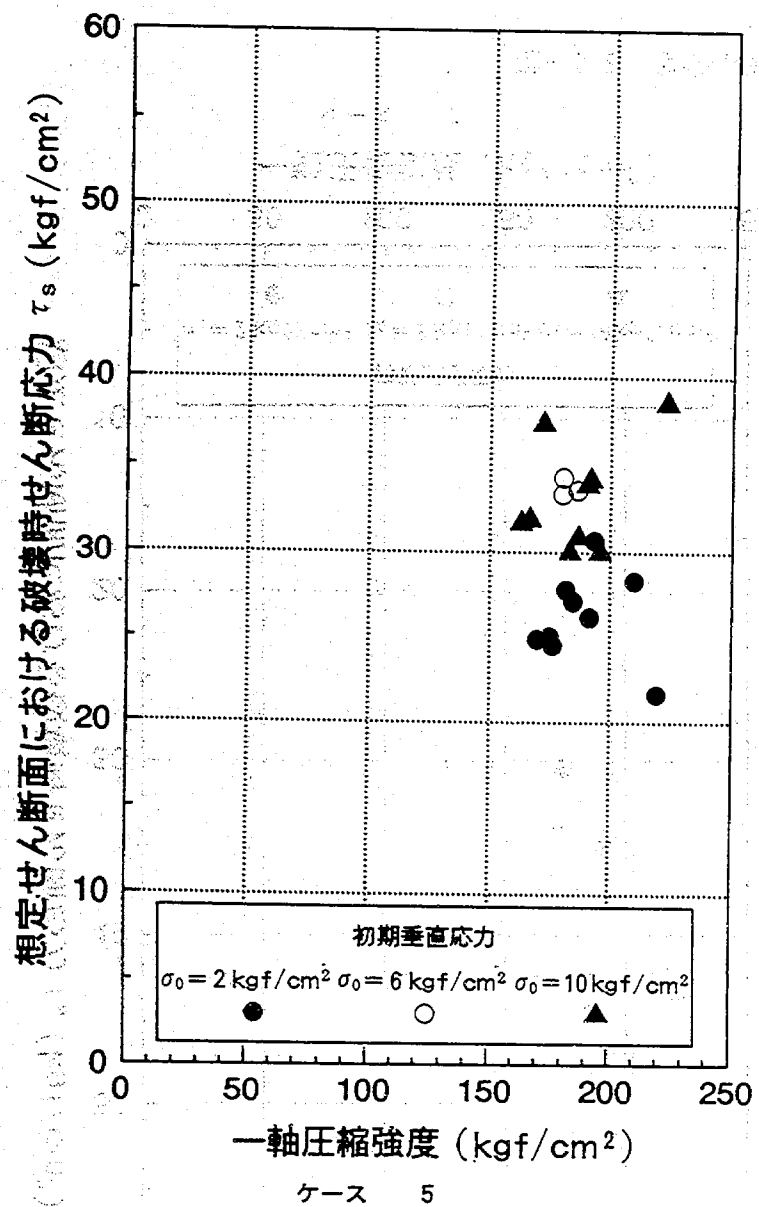


図-3.2 破壊時のせん断応力と一軸圧縮強度の関係

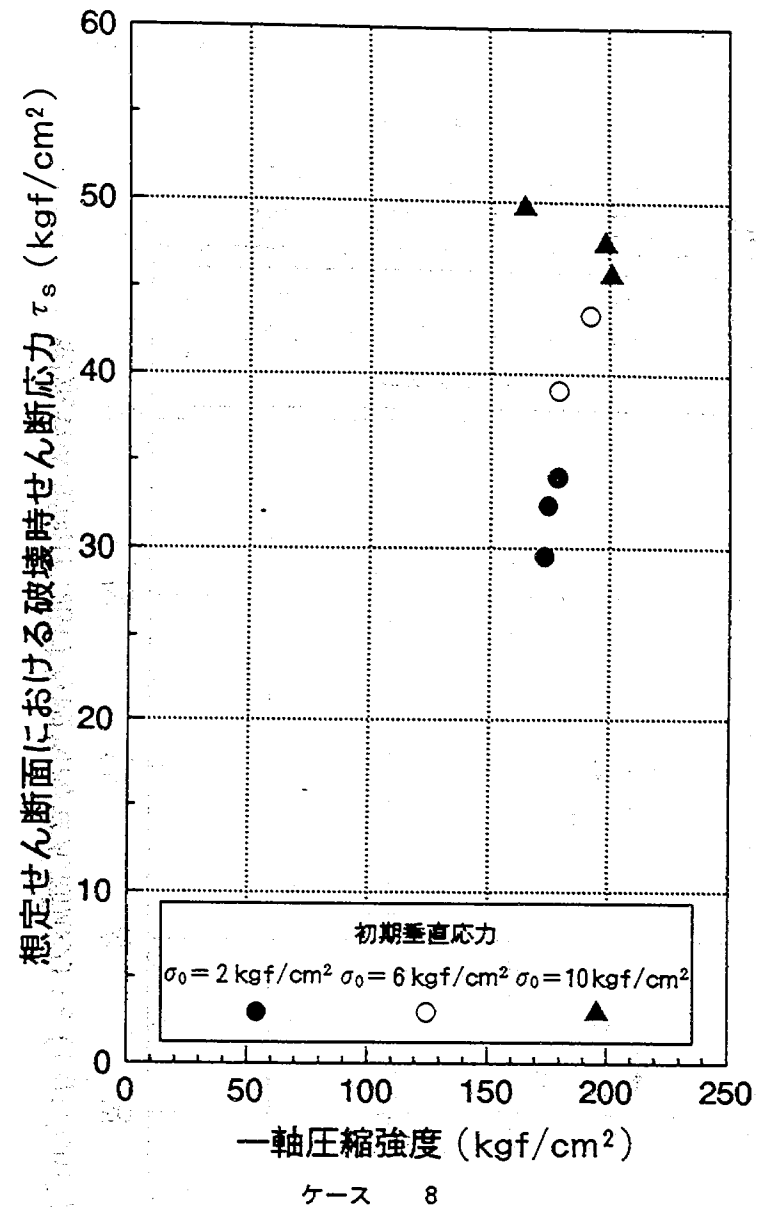
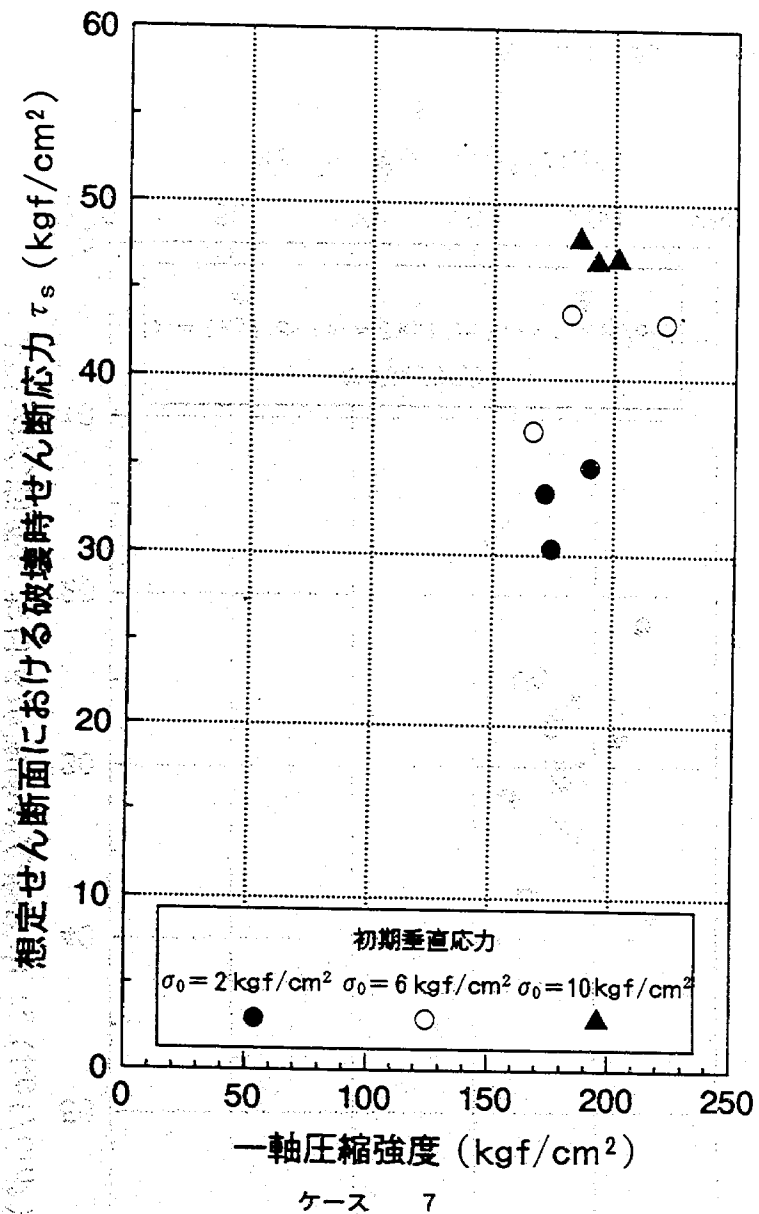


図-3.2 破壊時のせん断応力と一軸圧縮強度の関係

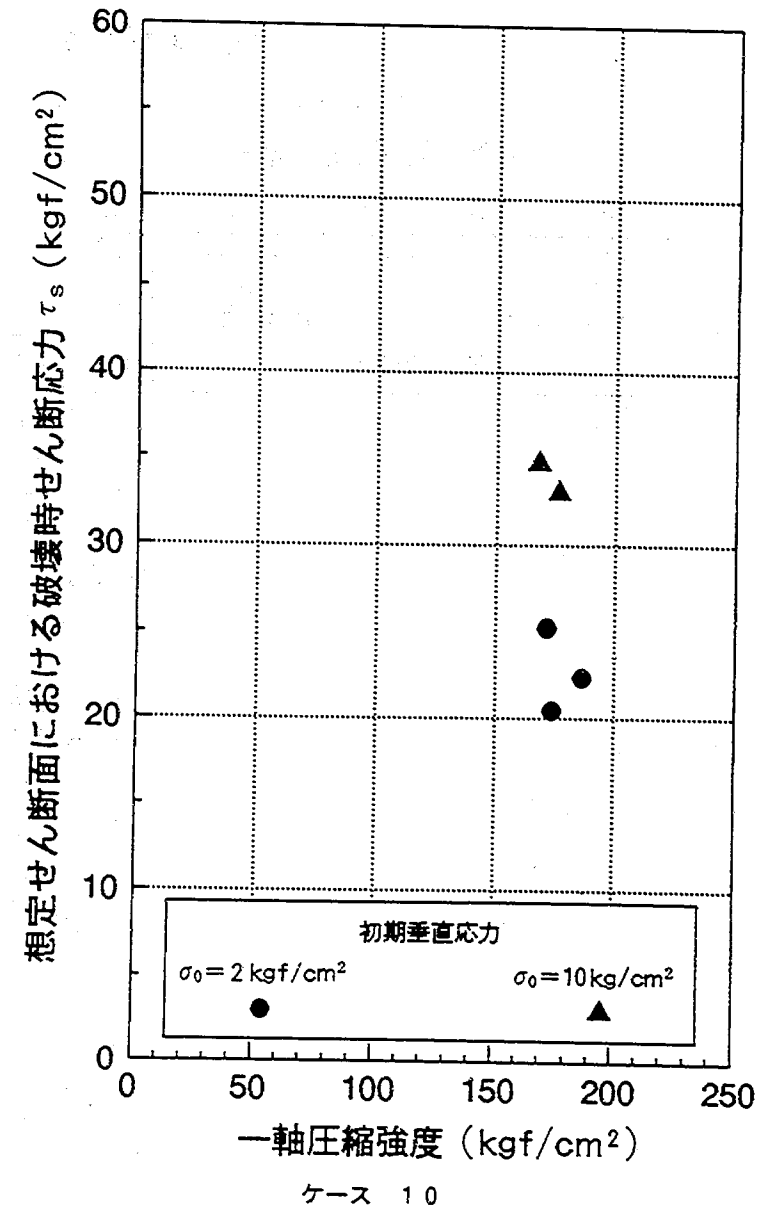
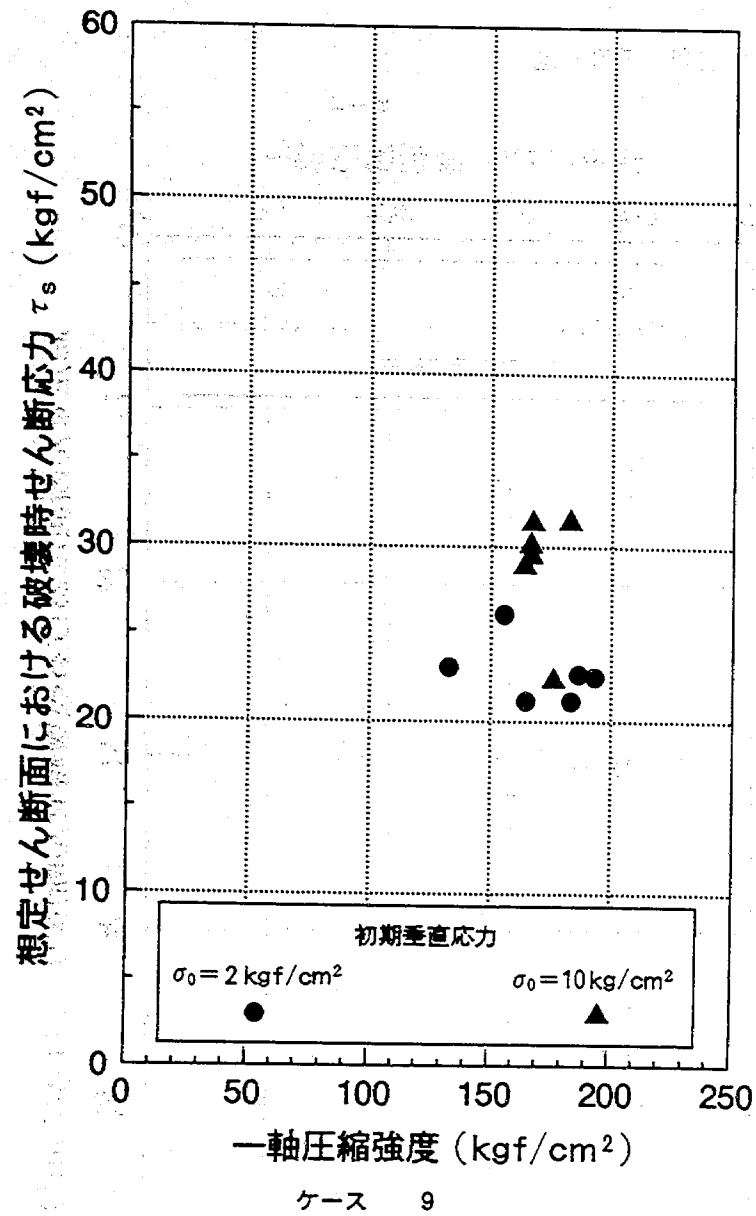


図-3.2 破壊時のせん断応力と一軸圧縮強度の関係

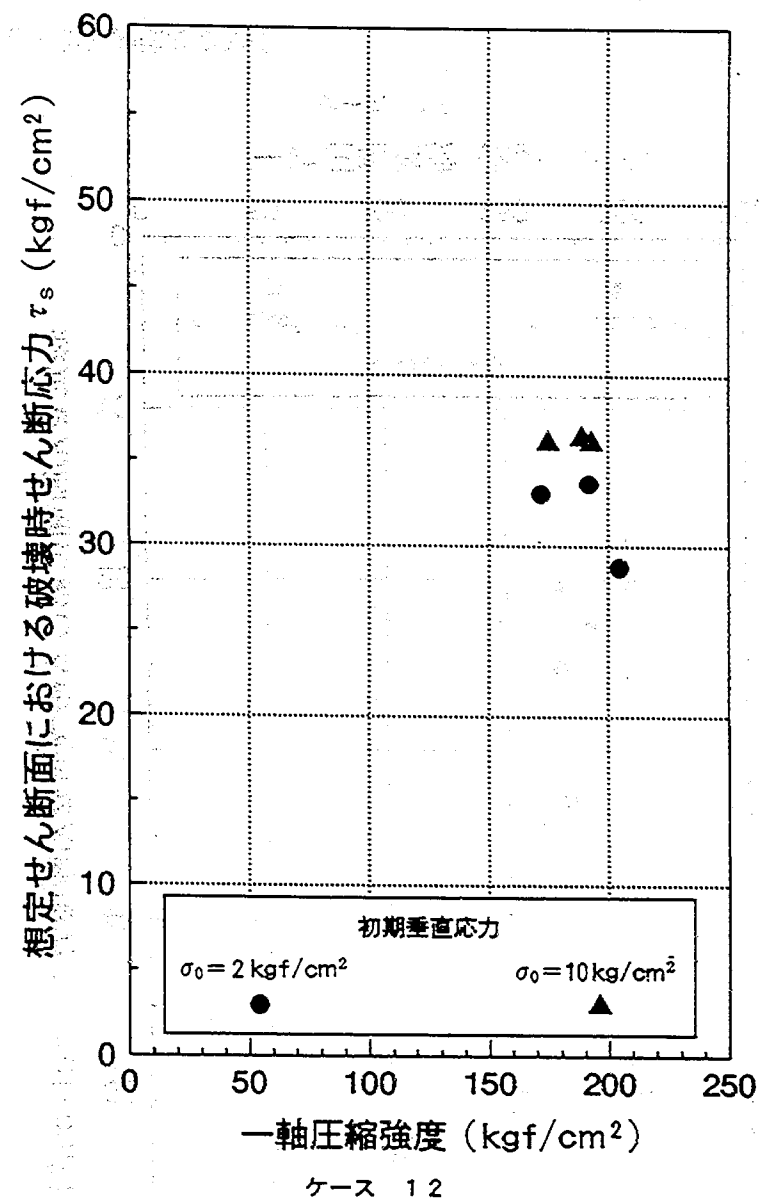
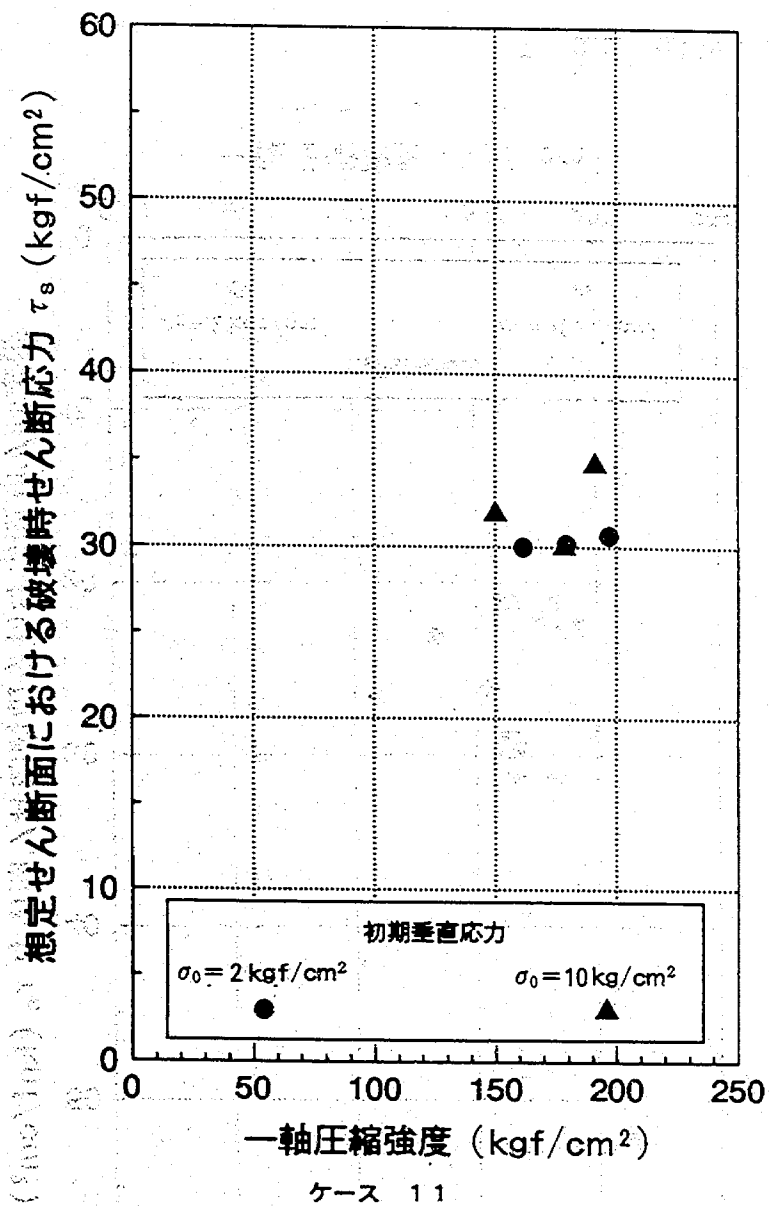
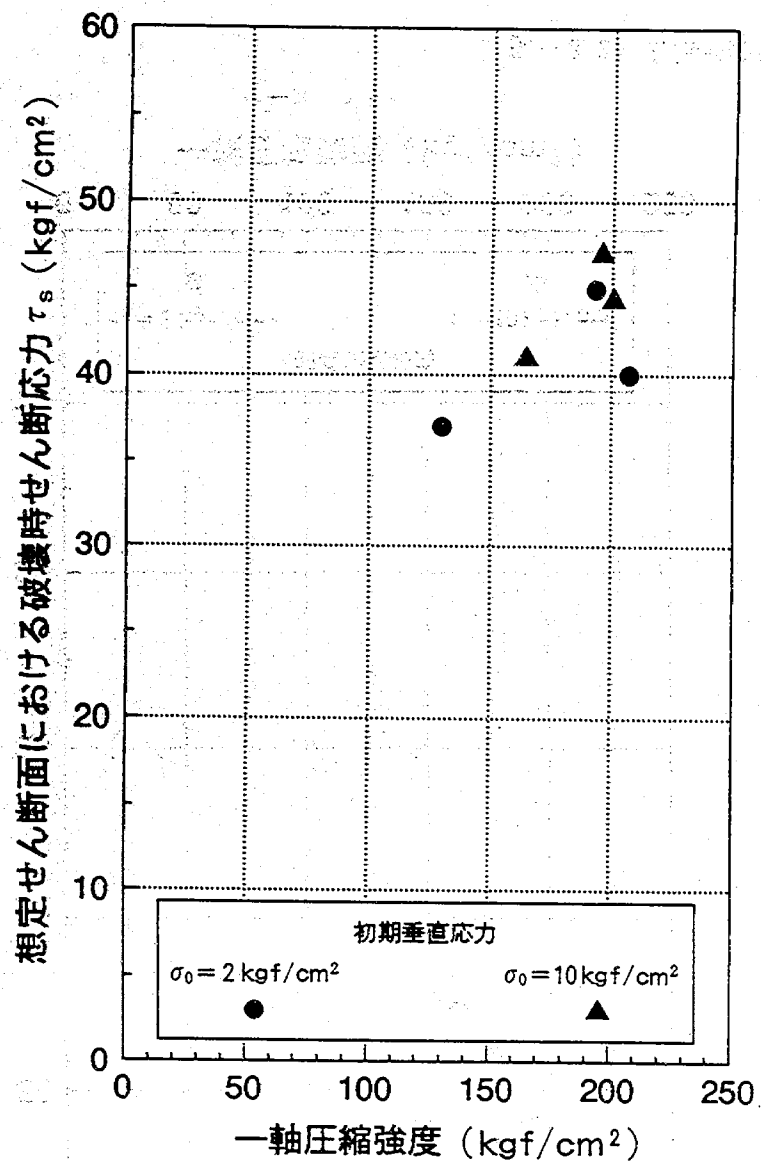
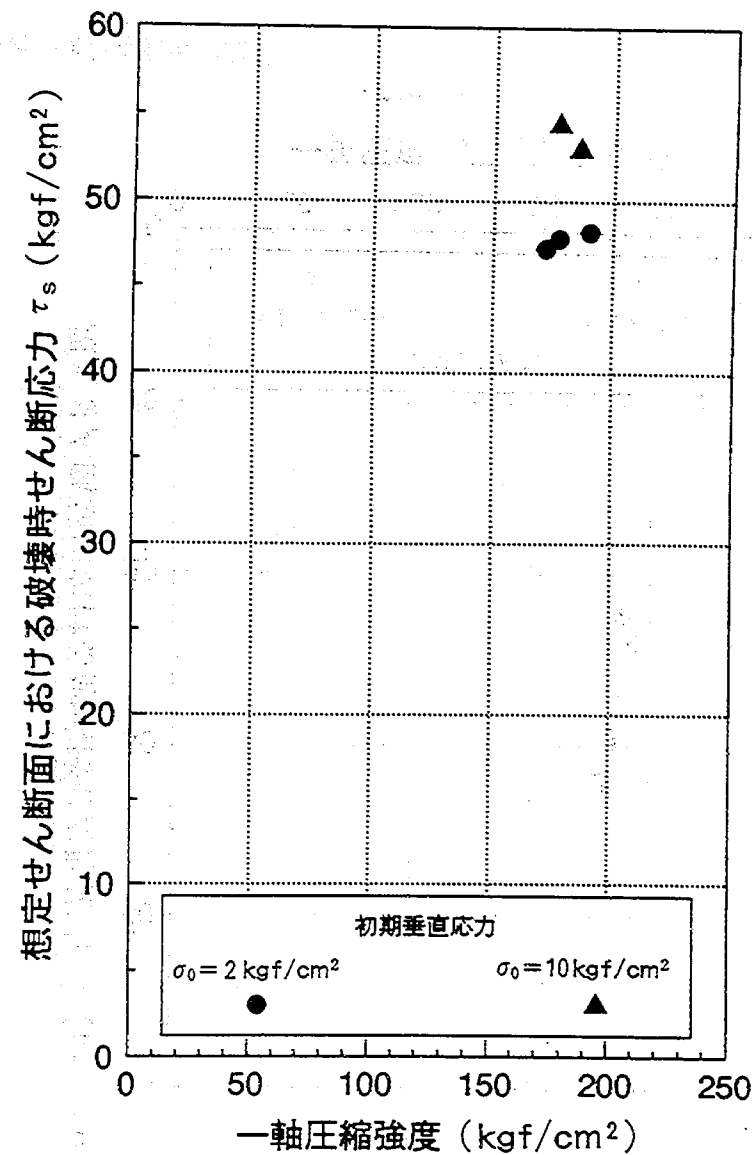


図-3.2 破壊時のせん断応力と一軸圧縮強度の関係



ケース 13



ケース 14

図-3.2 破壊時のせん断応力と一軸圧縮強度の関係

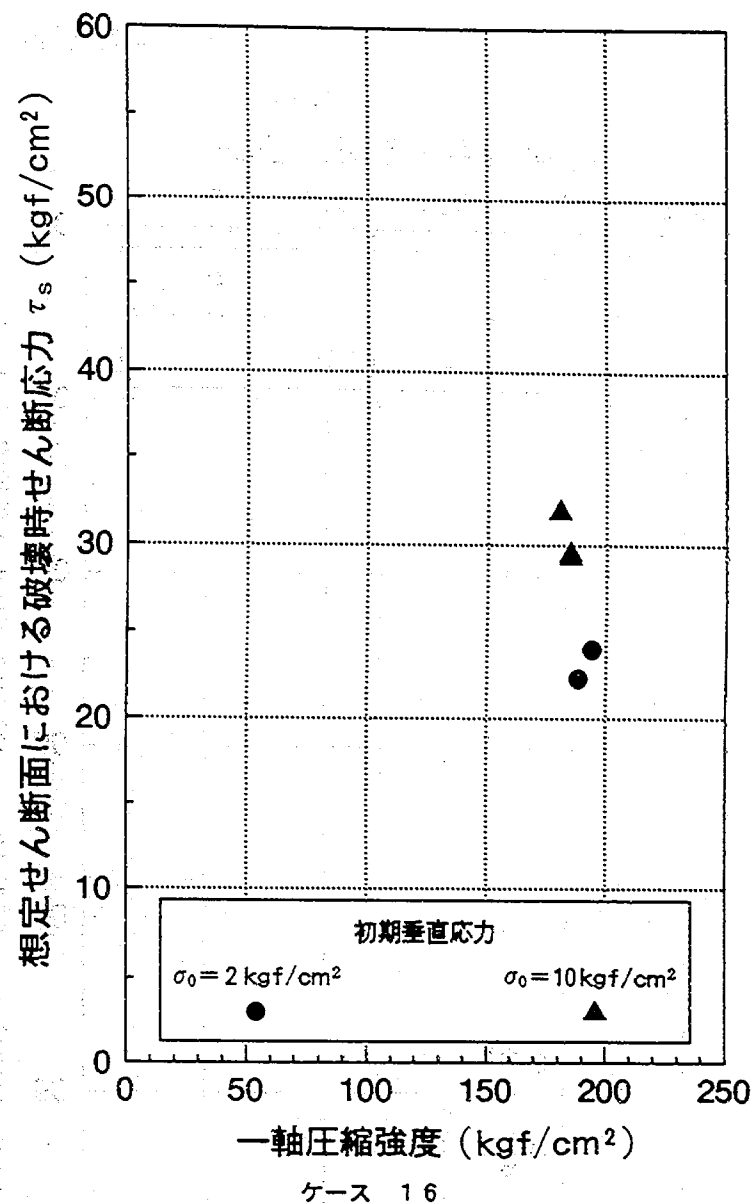
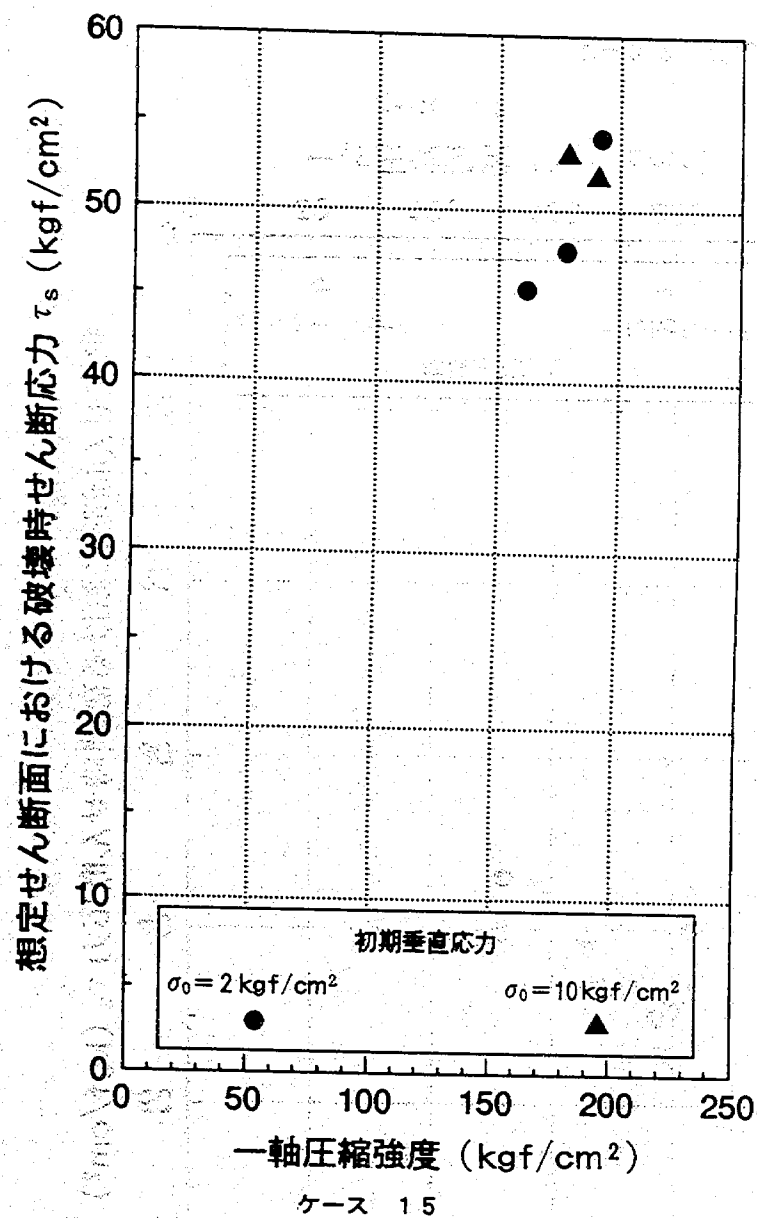
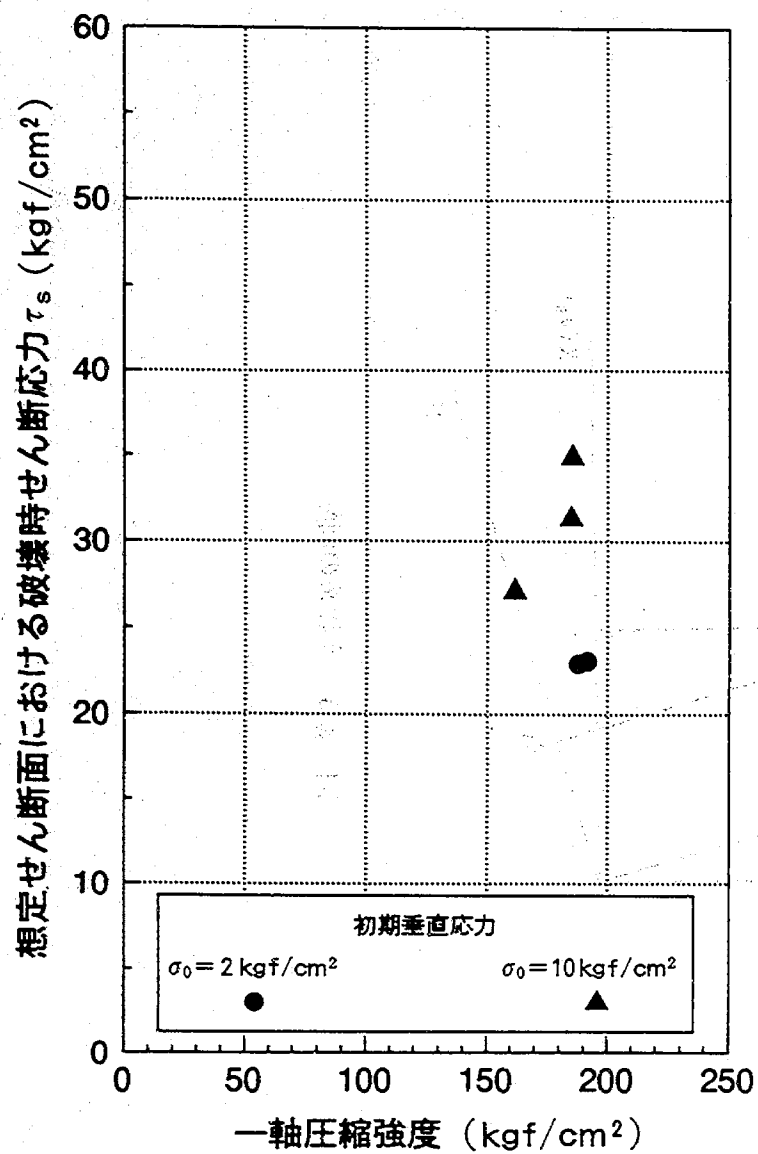
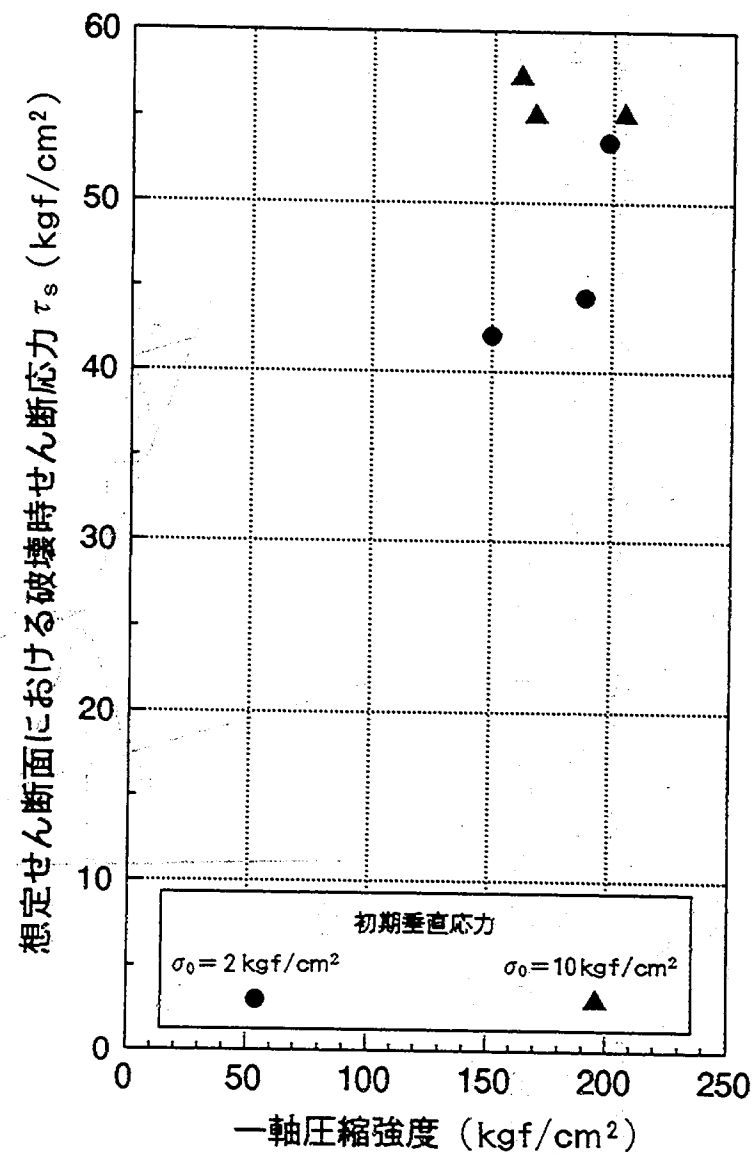


図-3.2 破壊時のせん断応力と一軸圧縮強度の関係



ケース 17



ケース 18

図-3.2 破壊時のせん断応力と一軸圧縮強度の関係

3.1.3 各試験ケースにおけるせん断強度

次に、各試験ケースにおけるせん断強度について示す。各試験ケースにおけるせん断破壊規準線は想定せん断面における破壊時のせん断応力 τ_s 、と垂直応力 σ_s の関係から、最小2乗法によって求めることができるが、この回帰直線の算出にあたっては、垂直応力が垂直荷重とせん断荷重の従属変数となっていることから、図-3.3のようにせん断荷重の角度 θ だけ回転した座標系において最小2乗法を適用するものとした。この場合、図-3.3のN-T座標系において、Nは垂直荷重のみの変数となり、独立変数として取り扱うことが可能となる。X-Y (σ_s - τ_s) 座標系での値 (X_1 , Y_1)、直線 $Y=Y_0+aX$ が、N-T座標系において (N_1 , T_1)、 $T=T_0+bN$ であるとする、それらの関係は、次のような式で表される。

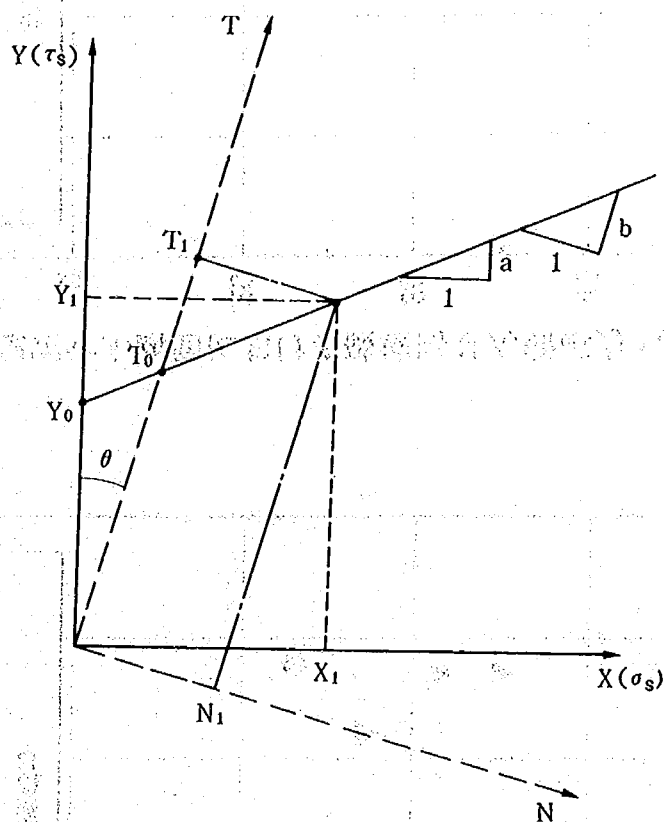


図-3.3 座標系の回転

$$\left\{ \begin{array}{l} N_1 = X_1 \cos \theta - Y_1 \sin \theta \end{array} \right. \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = X_1 \sin \theta + Y_1 \cos \theta \end{array} \right. \dots\dots\dots (3.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = N_1 \cos \theta + T_1 \sin \theta \end{array} \right. \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_1 = -N_1 \sin \theta + T_1 \cos \theta \end{array} \right. \dots\dots\dots (3.4)$$

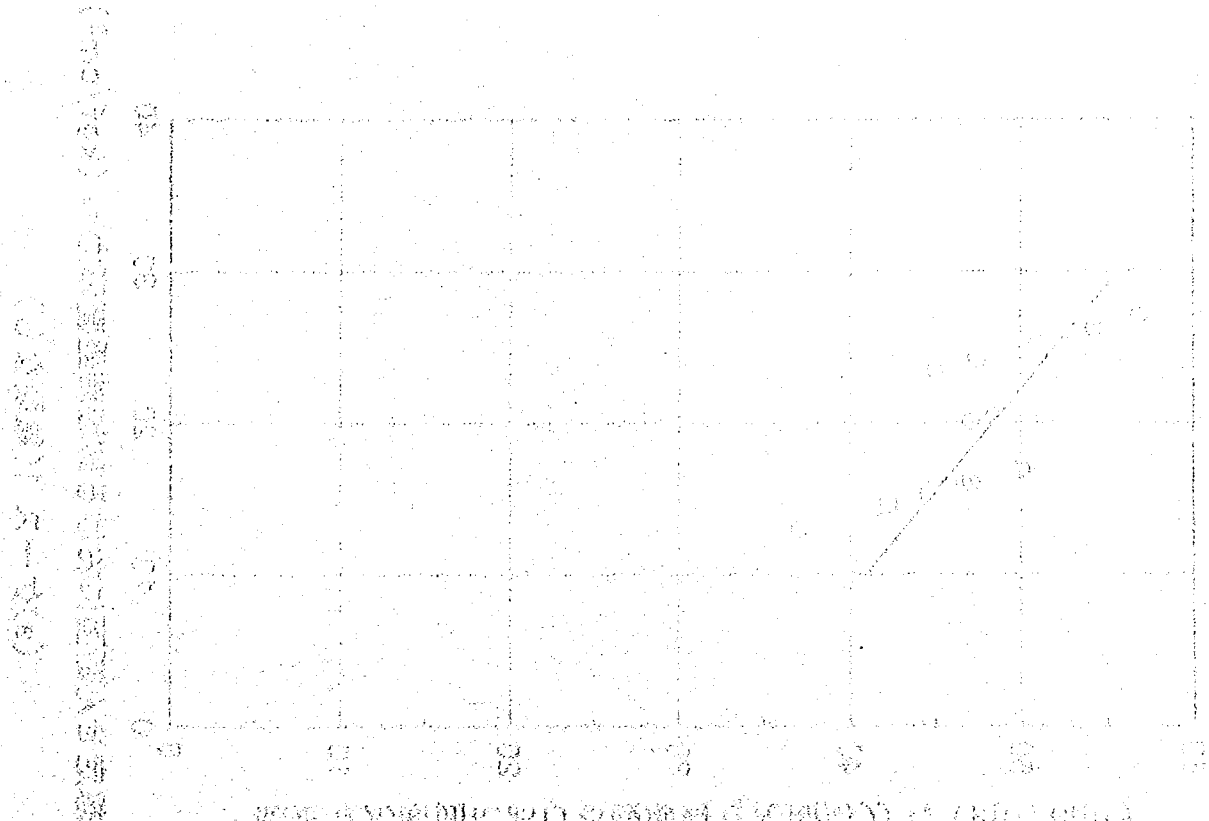
$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{b \cos \theta - \sin \theta}{b \sin \theta + \cos \theta} \end{array} \right. \dots\dots\dots (3.5)$$

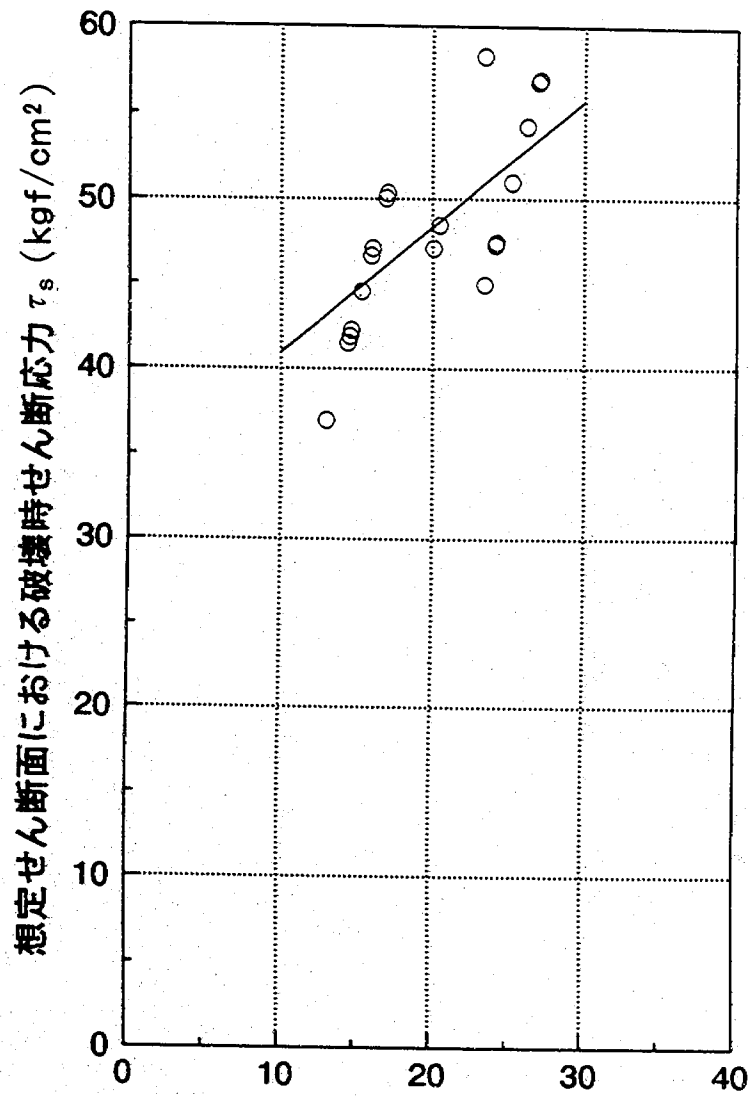
$$\left\{ \begin{array}{l} Y_0 = \frac{T_0}{b \sin \theta + \cos \theta} \end{array} \right. \dots\dots\dots (3.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} b = \frac{a \cos \theta + \sin \theta}{-a \sin \theta + \cos \theta} \end{array} \right. \dots\dots\dots (3.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_0 = \frac{Y_0}{-a \sin \theta + \cos \theta} \end{array} \right. \dots\dots\dots (3.8)$$

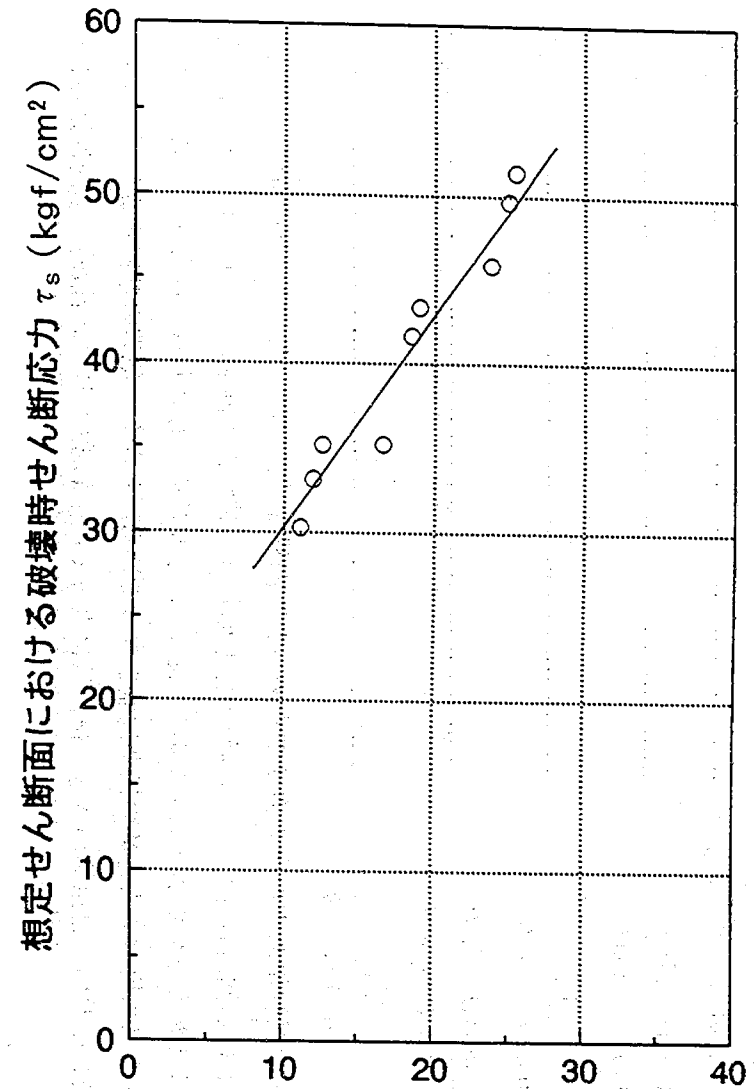
全試験ケースの試験値および上の方法で求められた回帰曲線を、図-3.4(a)~(r)に示す。また、N-T座標系における回帰直線からの試験値の標準偏差（各試験値の回帰直線からの差 ΔT の2乗平均の平方根）をまとめたものが表-3.2である。表より、水平亀裂の存在しない場合（ケース1，ケース18）は他のケースに比べて大きめの標準偏差となっている。しかし、亀裂の存在するケース（ケース2~ケース17）においては亀裂の長さ、位置等によって標準偏差の違いに特徴的な傾向は見られない。





想定せん断面における破壊時垂直応力 σ_s (kgf/cm²)

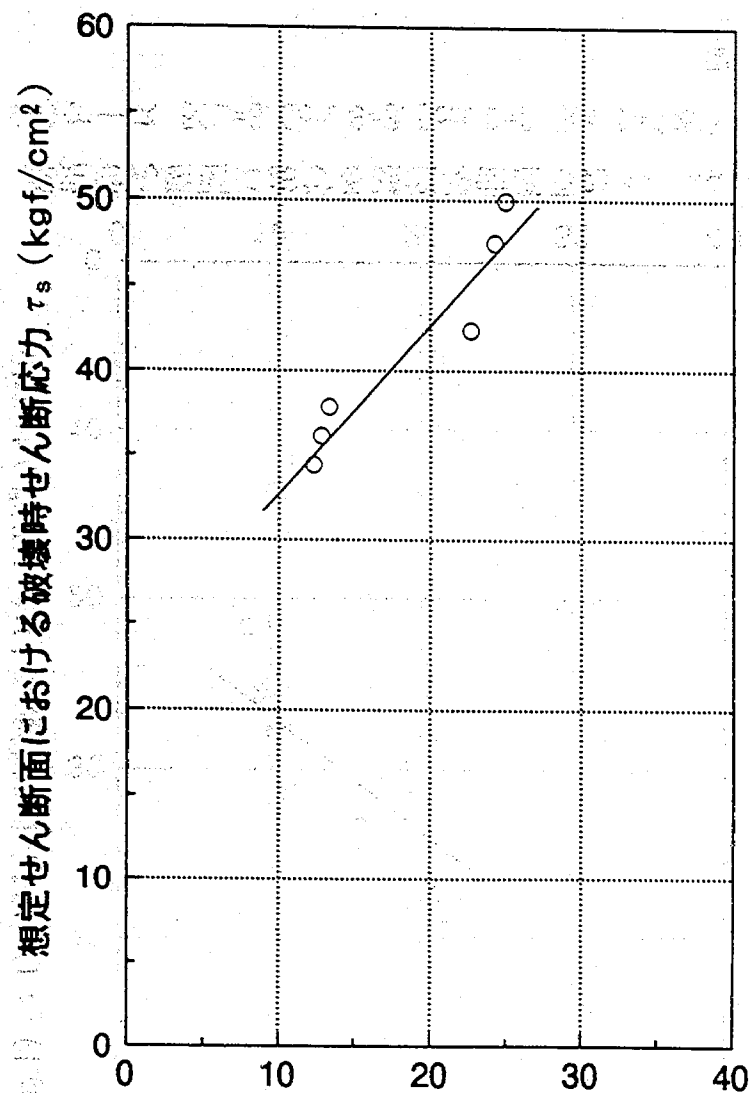
(a) ケース 1 (亀裂なし)



想定せん断面における破壊時垂直応力 σ_s (kgf/cm²)

(b) ケース 2 (L=2.0cm, S=6.5cm, D=0.0cm, N=1本)

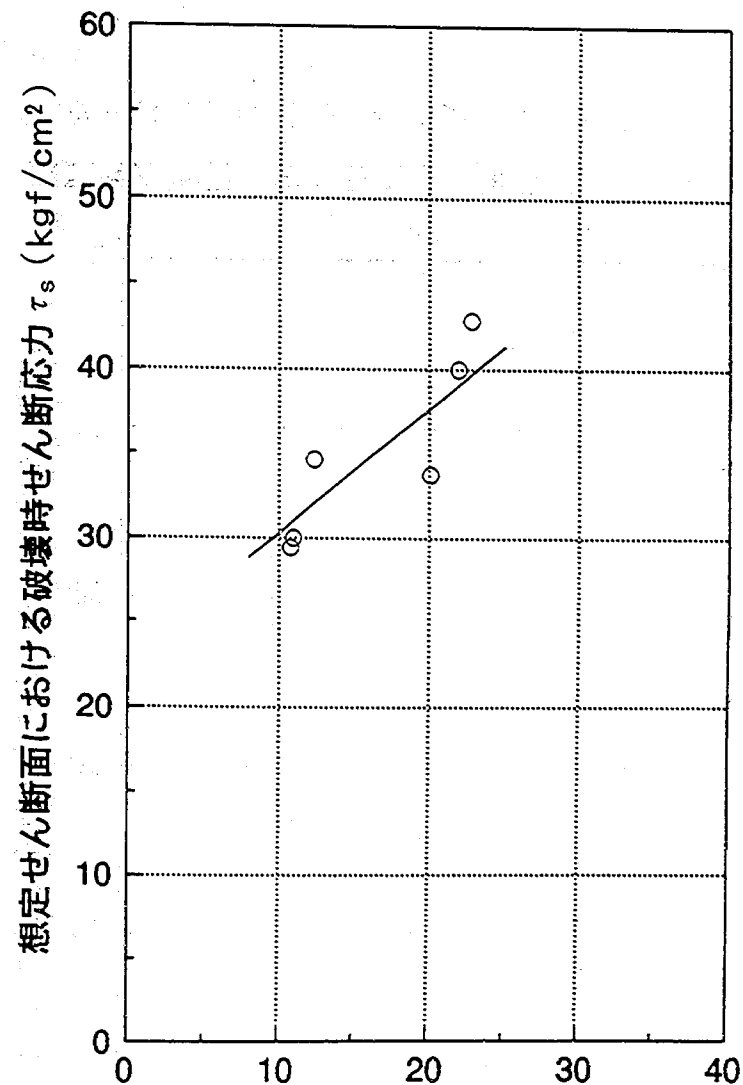
図-3.4 試験結果



想定せん断面における破壊時せん断応力 τ_s (kgf/cm²)

想定せん断面における破壊時垂直応力 σ_s (kgf/cm²)

(c) ケース 3 (L=4.0cm, S=3.5cm, D=0.0cm, N=1本)

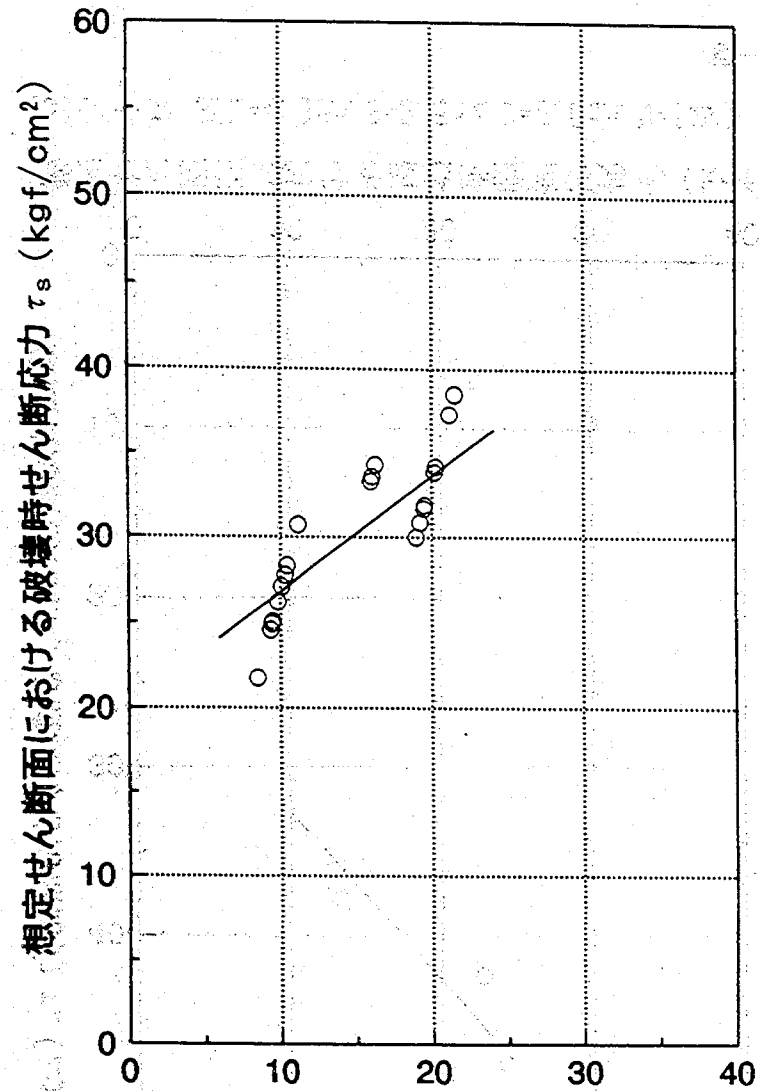


想定せん断面における破壊時せん断応力 τ_s (kgf/cm²)

想定せん断面における破壊時垂直応力 σ_s (kgf/cm²)

(d) ケース 4 (L=6.0cm, S=3.5cm, D=0.0cm, N=1本)

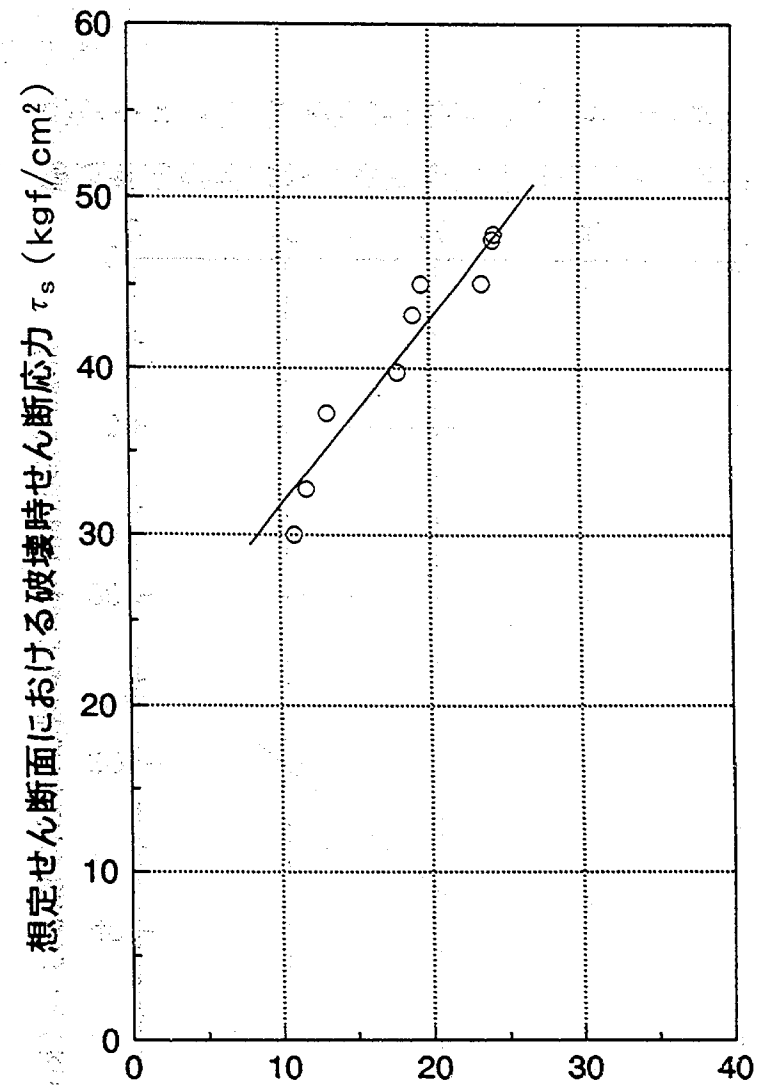
図-3.4 試験結果



想定せん断面における破壊時せん断応力 τ_s (kgf/cm²)

想定せん断面における破壊時垂直応力 σ_s (kgf/cm²)

(e) ケース 5 (L=8.0cm, S=3.5cm, D=0.0cm, N=1本)

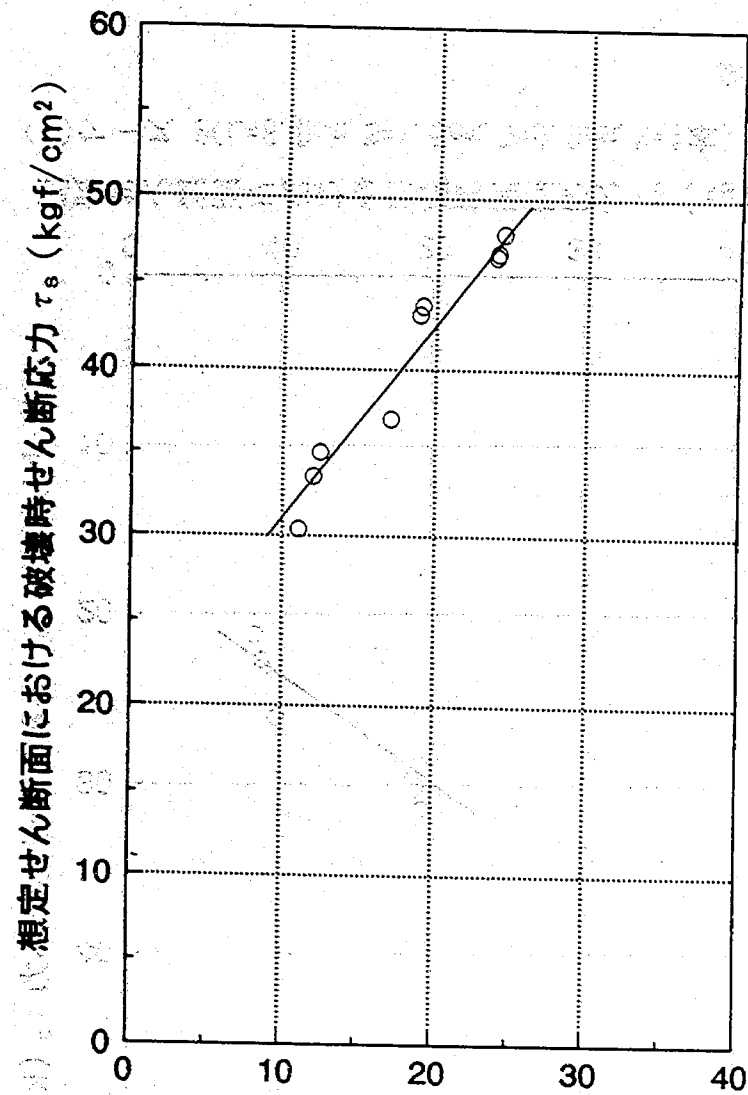


想定せん断面における破壊時せん断応力 τ_s (kgf/cm²)

想定せん断面における破壊時垂直応力 σ_s (kgf/cm²)

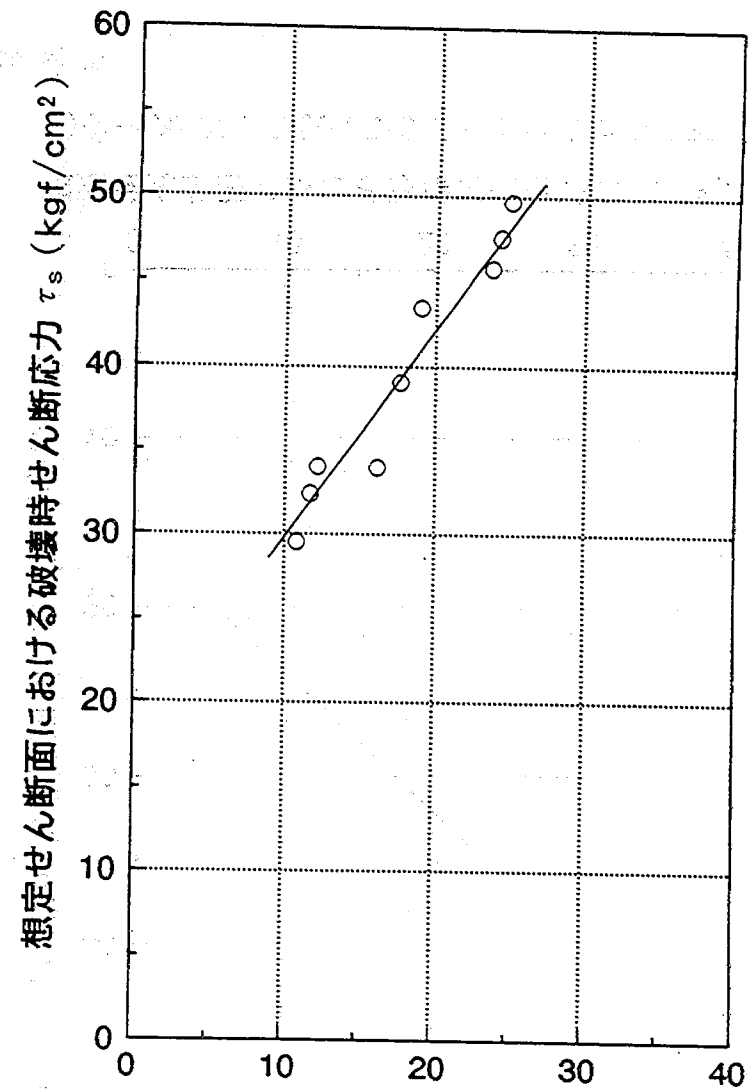
(f) ケース 6 (L=4.0cm, S=1.5cm, D=0.0cm, N=1本)

図-3.4 試験結果



想定せん断面における破壊時せん断応力 τ_s (kgf/cm²)

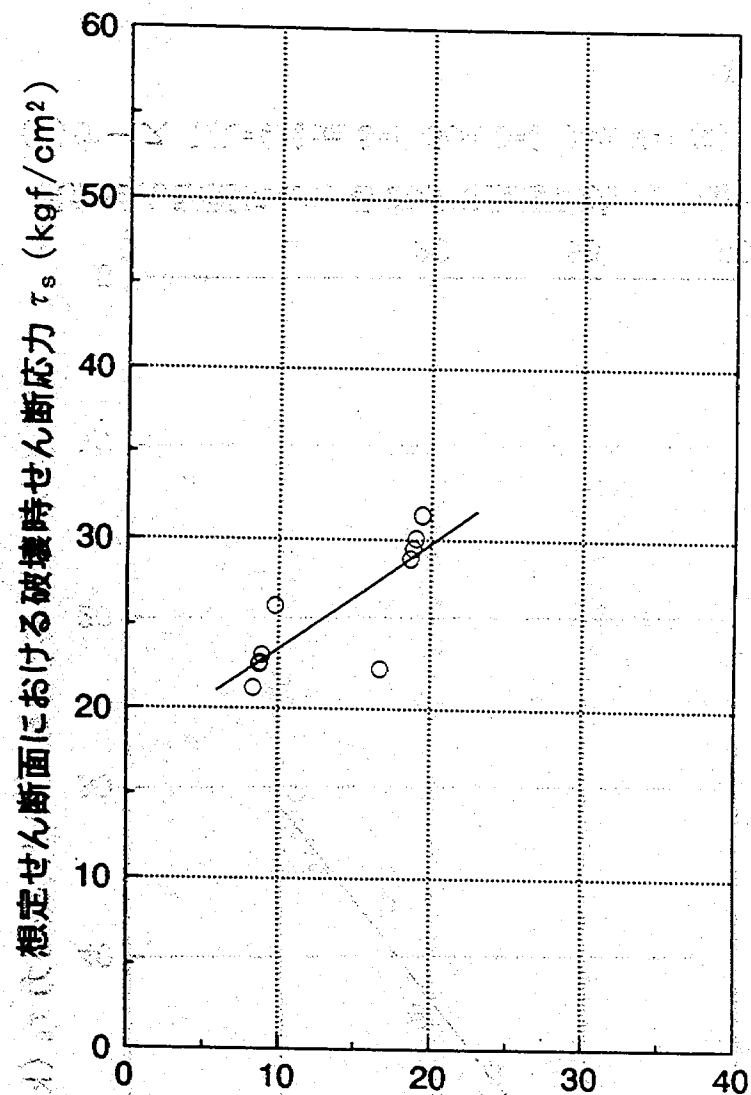
(g) ケース 7 (L=4.0cm, S=5.5cm, D=0.0cm, N=1本)



想定せん断面における破壊時せん断応力 τ_s (kgf/cm²)

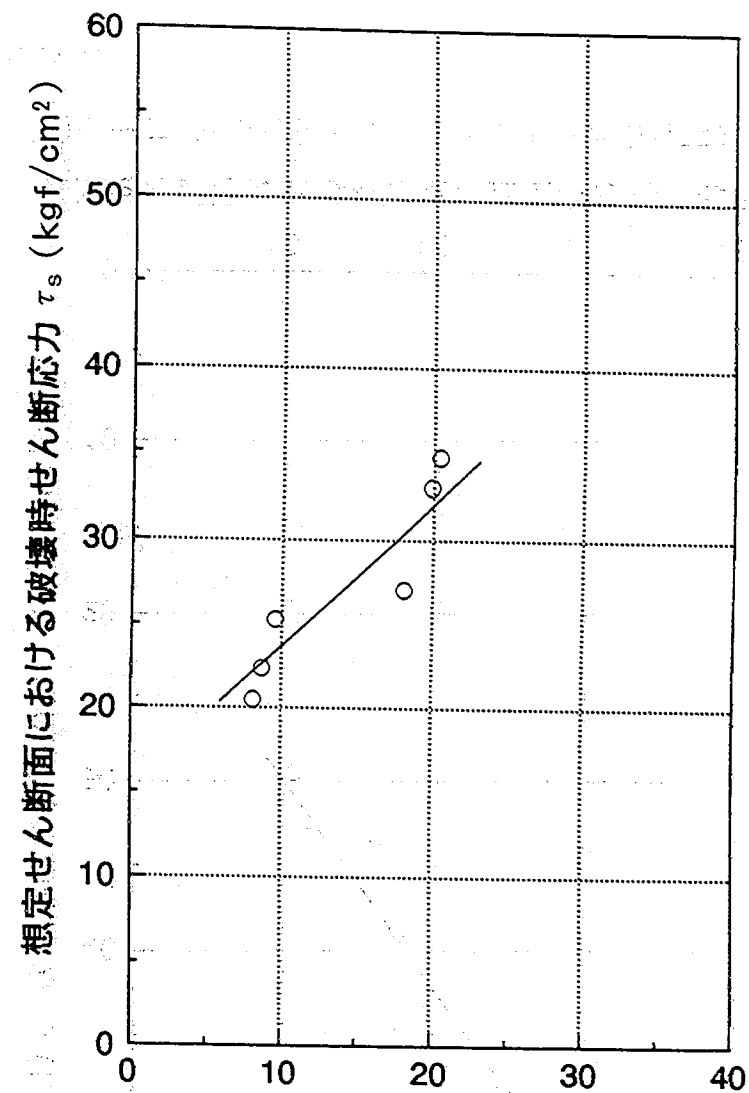
(h) ケース 8 (L=4.0cm, S=9.5cm, D=0.0cm, N=1本)

図-3.4 試験結果



想定せん断面における破壊時垂直応力 σ_s (kgf/cm²)

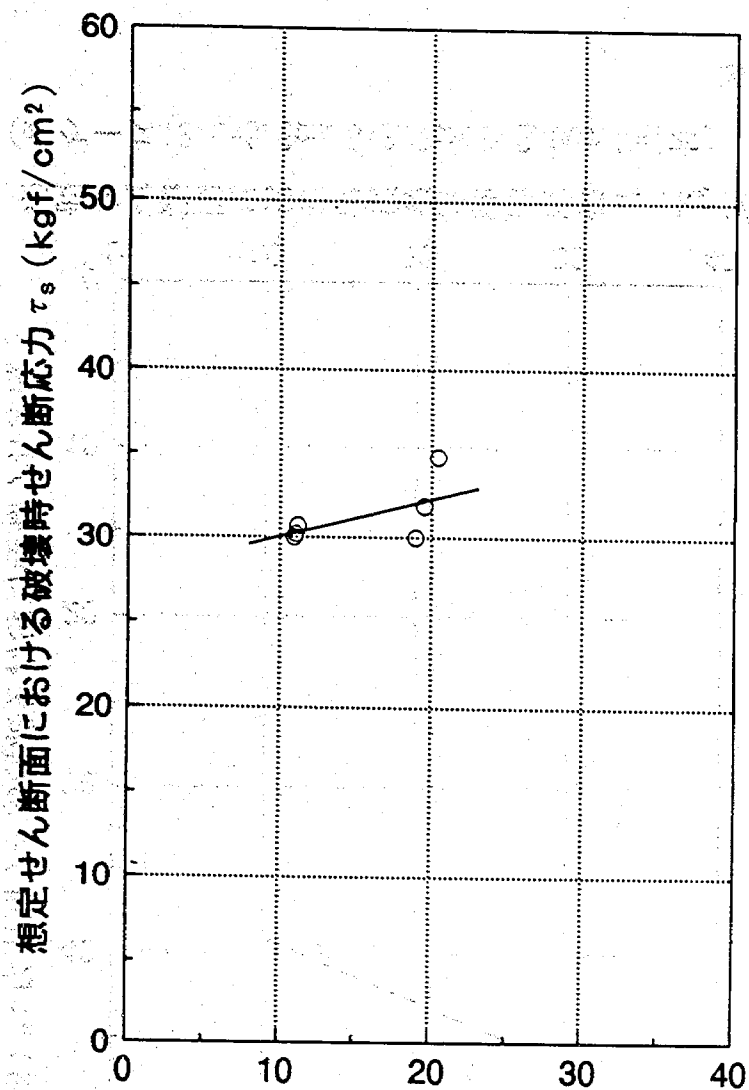
(i) ケース 9 (L=8.0cm, S=1.5cm, D=0.0cm, N=1本)



想定せん断面における破壊時垂直応力 σ_s (kgf/cm²)

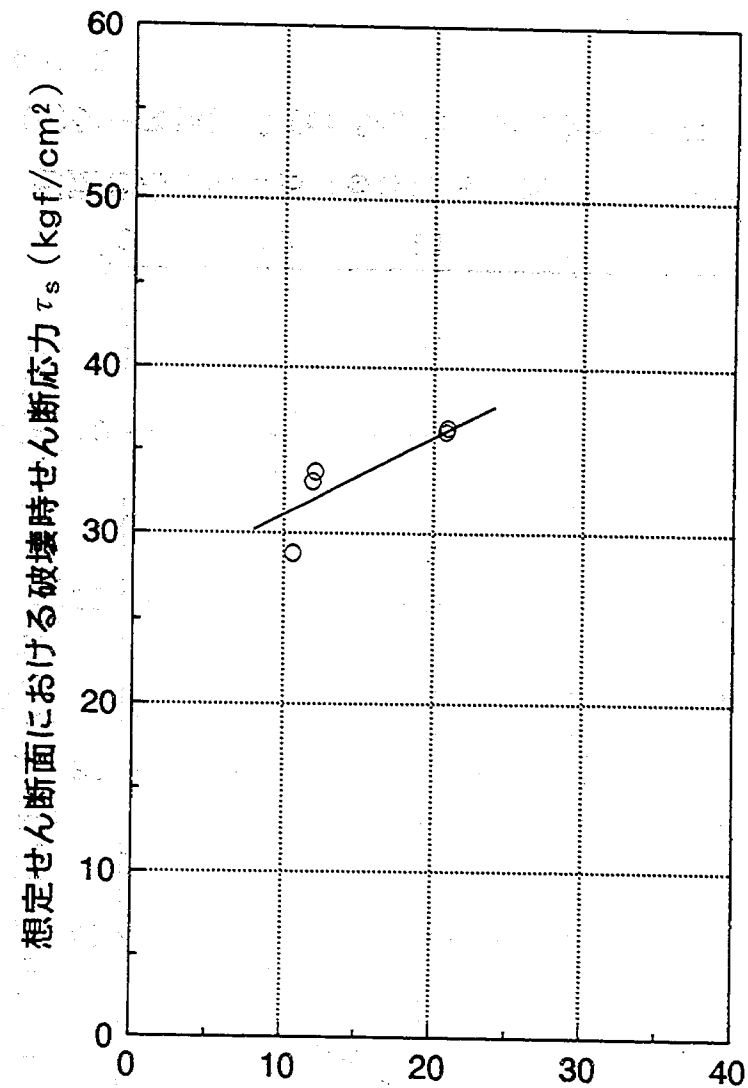
(j) ケース 10 (L=8.0cm, S=5.5cm, D=0.0cm, N=1本)

図-3.4 試験結果



想定せん断面における破壊時垂直応力 σ_s (kgf/cm²)

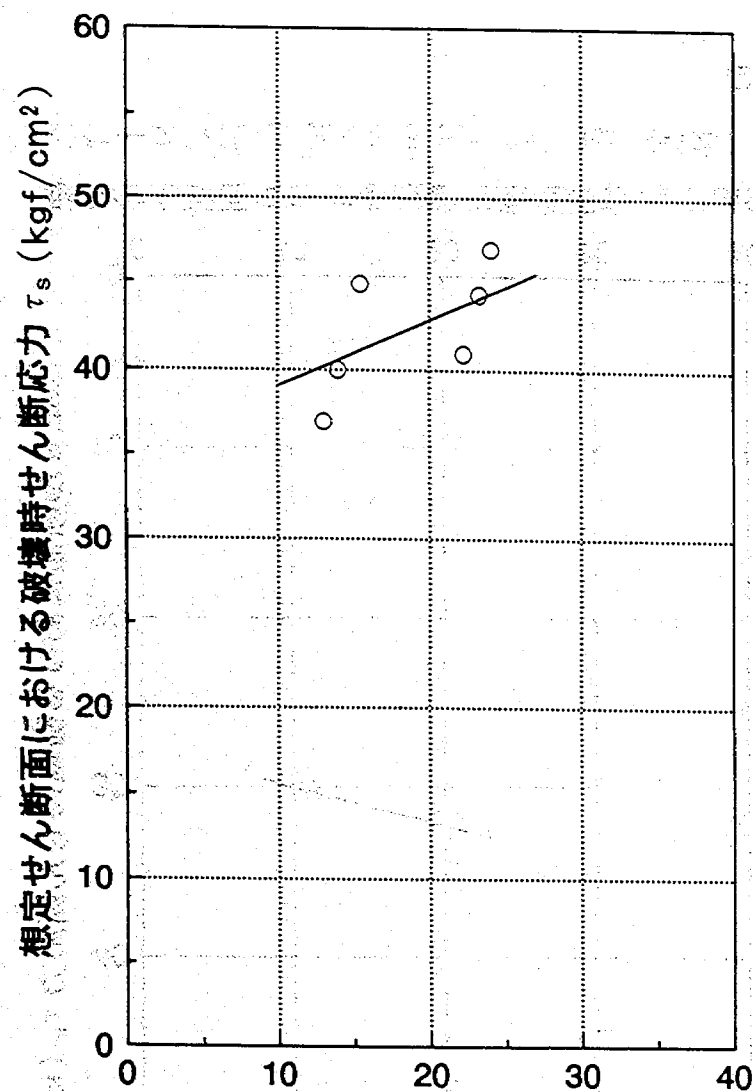
(k) ケース11 (L=8.0cm, S=3.5cm, D=1.0cm, N=1本)



想定せん断面における破壊時垂直応力 σ_s (kgf/cm²)

(l) ケース12 (L=8.0cm, S=3.5cm, D=1.5cm, N=1本)

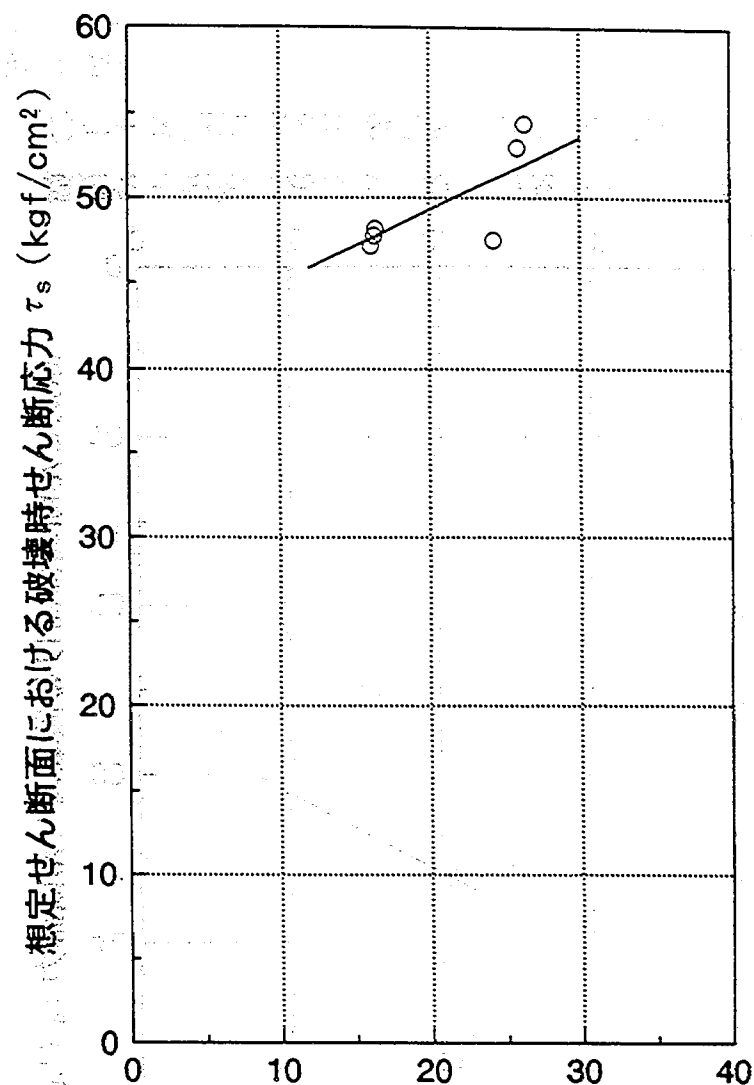
図-3.4 試験結果



想定せん断面における破壊時せん断応力 τ_s (kgf/cm²)

想定せん断面における破壊時垂直応力 σ_s (kgf/cm²)

(m) ケース13 (L=8.0cm, S=3.5cm, D=2.0cm, N=1本)



想定せん断面における破壊時せん断応力 τ_s (kgf/cm²)

想定せん断面における破壊時垂直応力 σ_s (kgf/cm²)

(n) ケース14 (L=8.0cm, S=3.5cm, D=3.0cm, N=1本)

図-3.4 試験結果

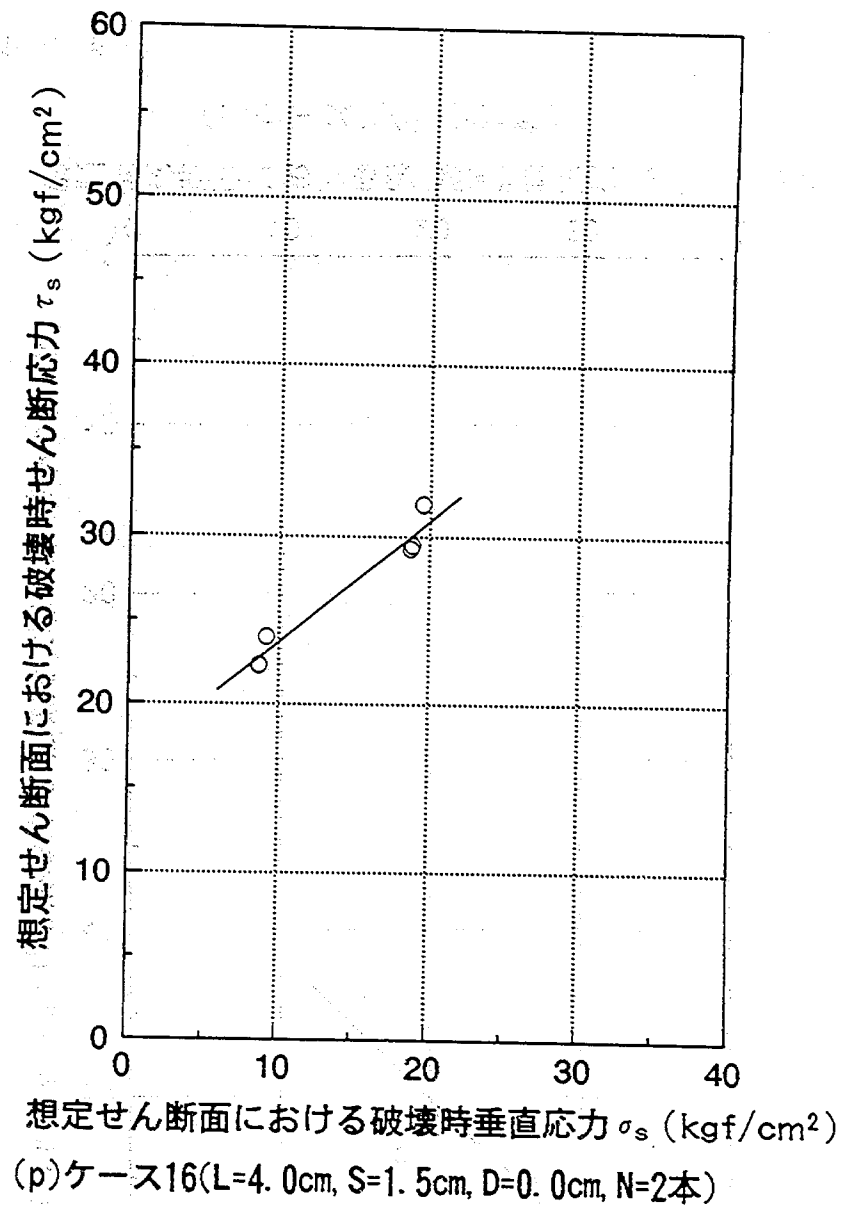
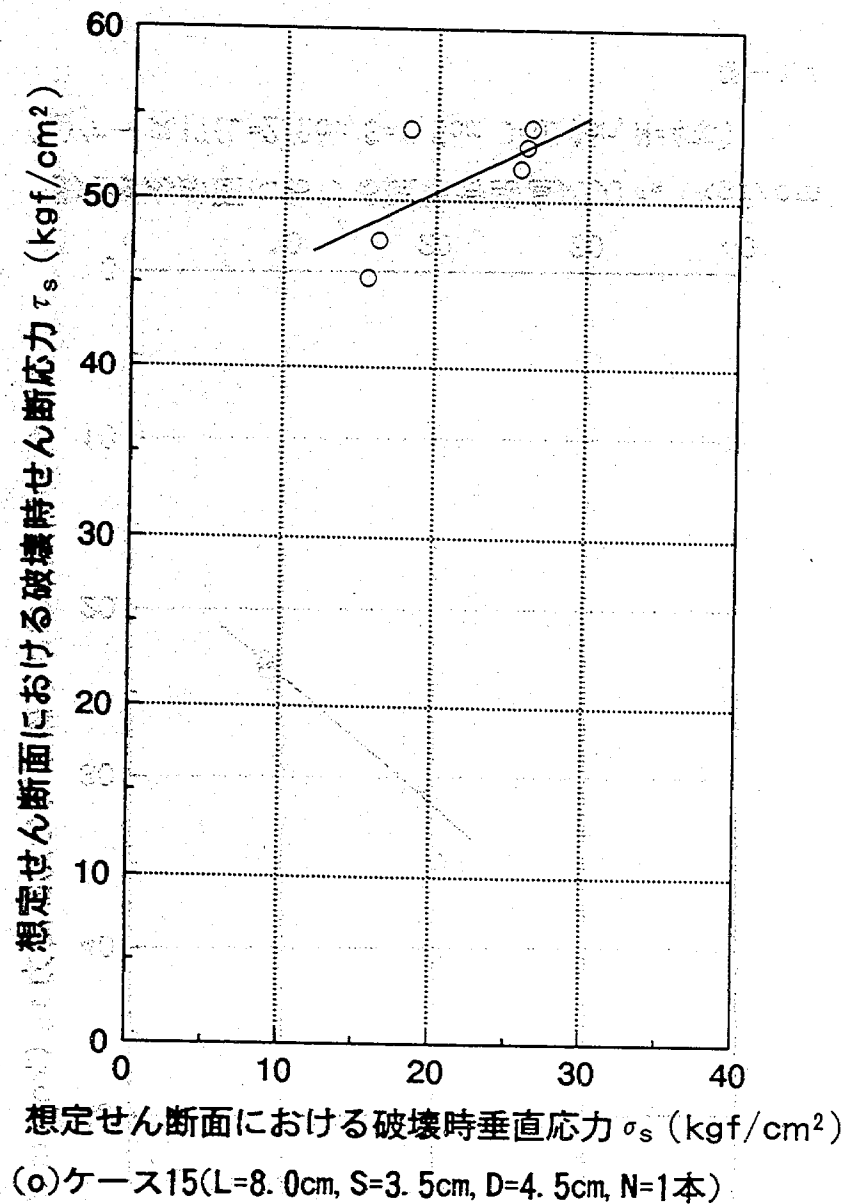
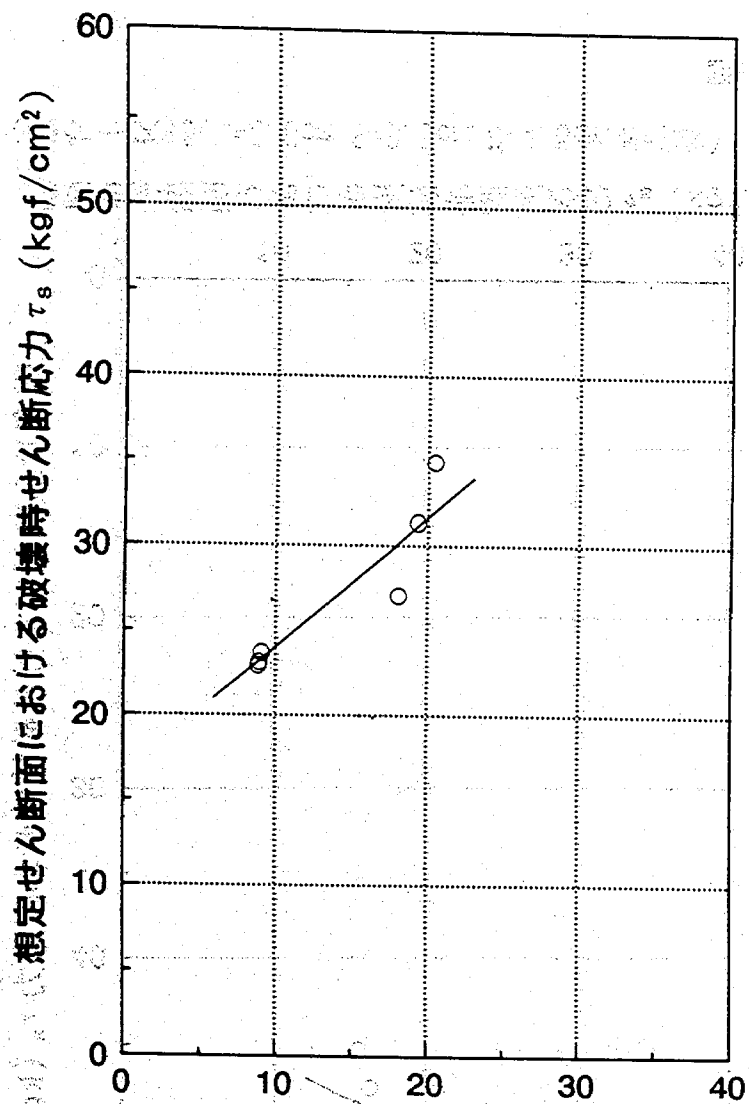
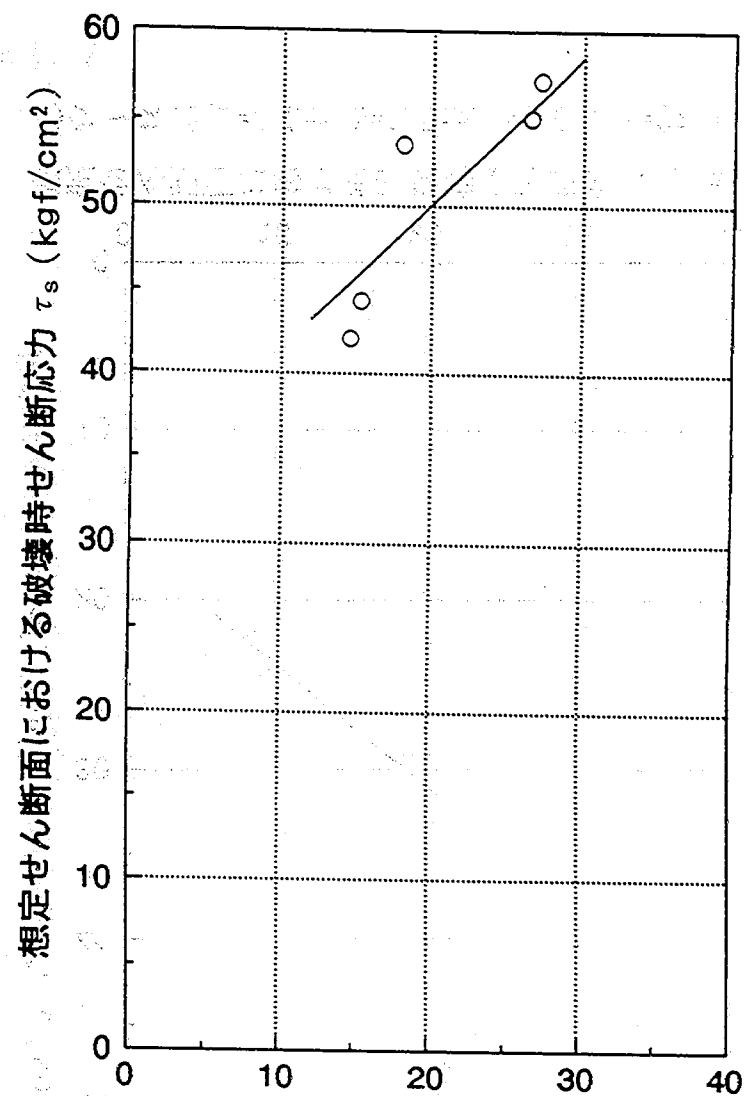


図-3.4 試験結果



想定せん断面における破壊時垂直応力 σ_s (kgf/cm²)

(q) ケース17 (L=2.0cm, S=1.5cm, D=0.0cm, N=4本)



想定せん断面における破壊時垂直応力 σ_s (kgf/cm²)

(r) ケース18 (偏心载荷)

図-3.4 試験結果

表-3.2 各ケースの試験値の標準偏差

ケース	水平亀裂 の長さ L (cm)	水平亀裂 の位置*1 S (cm)	水平亀裂 の深さ*2 D (cm)	亀裂の本数 N (本)	供試体個数 (基)	試験値の 標準偏差	ケース	水平亀裂 の長さ L (cm)	水平亀裂 の位置*1 S (cm)	水平亀裂 の深さ*2 D (cm)	亀裂の本数 N (本)	供試体個数 (基)	試験値の 標準偏差
1	-	-	-	-	21	4.94	10	8	5.5	0	1	6	3.44
2	2	6.5	0	1	9	3.21	11	8	3.5	1	1	6	1.81
3	4	3.5	0	1	6	2.93	12	8	3.5	1.5	1	6	1.98
4	6	3.5	0	1	6	4.05	13	8	3.5	2	1	6	3.70
5	8	3.5	0	1	21	3.16	14	8	3.5	3	1	6	2.71
6	4	1.5	0	1	9	3.04	15	8	3.5	4.5	1	6	3.49
7	4	5.5	0	1	9	2.60	16	4	1.5	0	2	6	1.29
8	4	9.5	0	1	9	3.18	17	2	1.5	0	4	6	2.89
9	8	1.5	0	1	12	2.81	18 (偏心 荷重用)	-	-	-	-	6	4.57

*1: せん断ブロック・ジャッキ側端部 (図-2.8参照) から水平先端までの距離

*2: 想定せん断面と水平亀裂の距離 (深さ)

3.2 亀裂とせん断強度

3.2.1 亀裂の存在しない岩盤模型の試験結果

(1) 圧縮強度とせん断強度の関係

図-3.5に水平亀裂の存在しない岩盤模型(ケース1)の想定せん断面における破壊時せん断応力 τ_s 、垂直応力 σ_s と模型と同時に作製した円柱供試体の一軸圧縮強度の平均値から求めたモールの応力円を示す。また、図中の直線は水平亀裂の存在しない場合のせん断破壊規準線である。図より、せん断試験より得られた破壊規準線はモールの応力円に対し交差して若干小さ目の値となっているが、今回のような一面せん断試験ではせん断面の応力分布が一様でないなどを考慮すると、せん断破壊規準線とモールの応力円の関係は概ね妥当なものと考えられる。

(2) 偏心荷重とせん断強度の関係

一般に、偏心荷重が作用すると、曲げモーメントが作用することによってせん断ブロックの端部に引張応力が発生し、これがせん断強度に影響を与えるといわれている。載荷重が偏心荷重となる場合としては、垂直ジャッキがせん断ブロック上の中心に設置されていない場合、せん断ジャッキが規定された位置に設置されていない場合の2つが考えられる。このうち、垂直ジャッキがせん断ブロックの中心に設置されていない場合については先に報告した¹⁾。そこで、本検討ではせん断ジャッキが規定された位置に設置されなかった場合を想定し、偏心荷重がせん断強度に与える影響について検討を行った。偏心載荷は、せん断ジャッキを鉛直方向上向きに5mm(せん断ブロックの高さ75mmに対して6.7%の偏心)ずらした位置に設置することによって作用させるものとした。この時、せん断破壊時における想定せん断面上の垂直応力の分布を曲げモーメントの理論によって計算すると図-3.6のようになり、初期垂直応力が2kgf/cm²の場合には、せん断ジャッキ側のブロック端部に引張応力が生じることはないものの、ブロックの両端の応力は1:4程度とかなり大きなものとなる。

さて、図-3.7に荷重の偏心がない正規の場合の試験結果と偏心荷重を載荷させた場合の試験結果の比較を示す。図より、偏心荷重のないケース1と偏心荷重を載荷させたケース12では、破壊時のせん断強度および最小2乗法により求めた回帰直線に有意な差は認められない。したがって、本試験結果を考慮すると、相当に大きな偏心荷重を作用させてもその影響は小さいといえることができる。

3.2.2 想定せん断面上の亀裂の位置がせん断強度に及ぼす影響

(1) 水平亀裂の長さLが4cmの場合

図-3.8～図-3.9に、水平亀裂の長さLを4cm一定とし、せん断ブロック・ジャッキ側端部から水平亀裂の先端までの距離Sを1.5cm, 3.5cm, 5.5cm, 9.5cmと変化させた場合の試験結果を示す。図-3.8によれば、どのケースにおいてもせん断強度の分布範囲、回帰直線はほぼ同一であり、有意な差は認められない。また、図-3.9によれば、いずれの初期垂直応力 σ_0 においても、せん断ブロック・ジャッキ側端部から亀裂の先端までの距離Sに関係なく破壊時のせん断応力 τ_s の値はほぼ一定となっている。したがって、水平亀裂の長さLが4cmの場合、水平亀裂の位置にかかわらず、そのせん断強度はほぼ同じになるといえることができる。

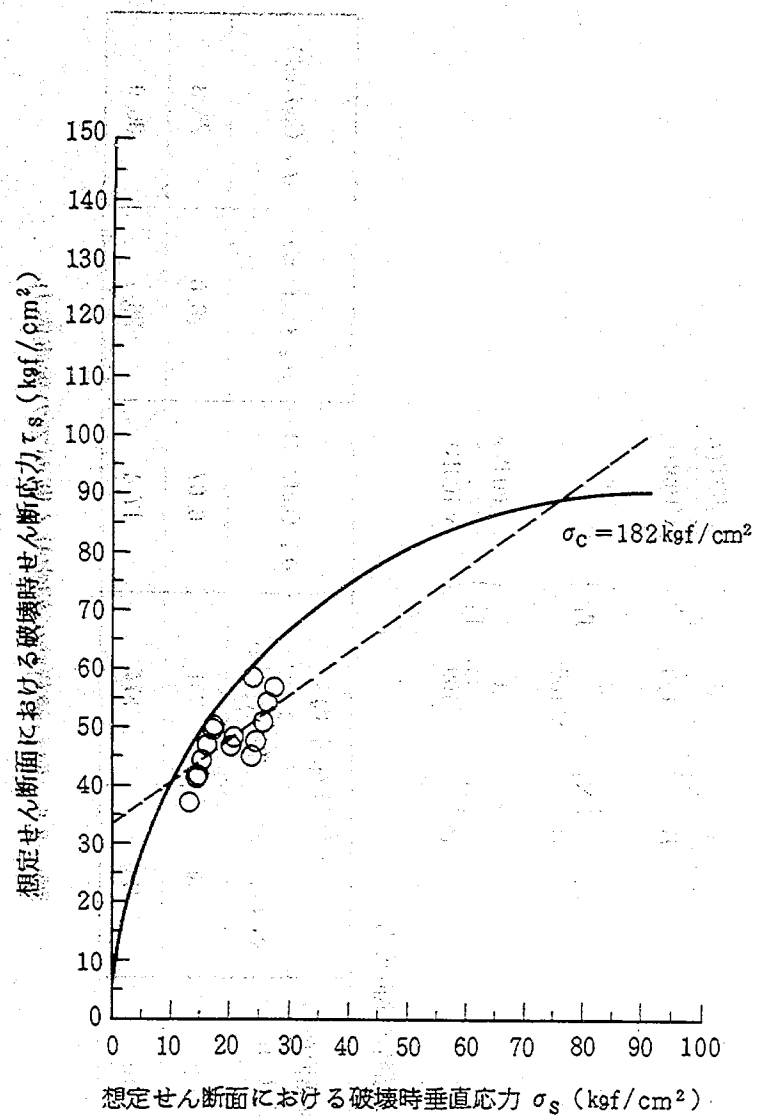


図-3.5 せん断強度と一軸圧縮強度の関係

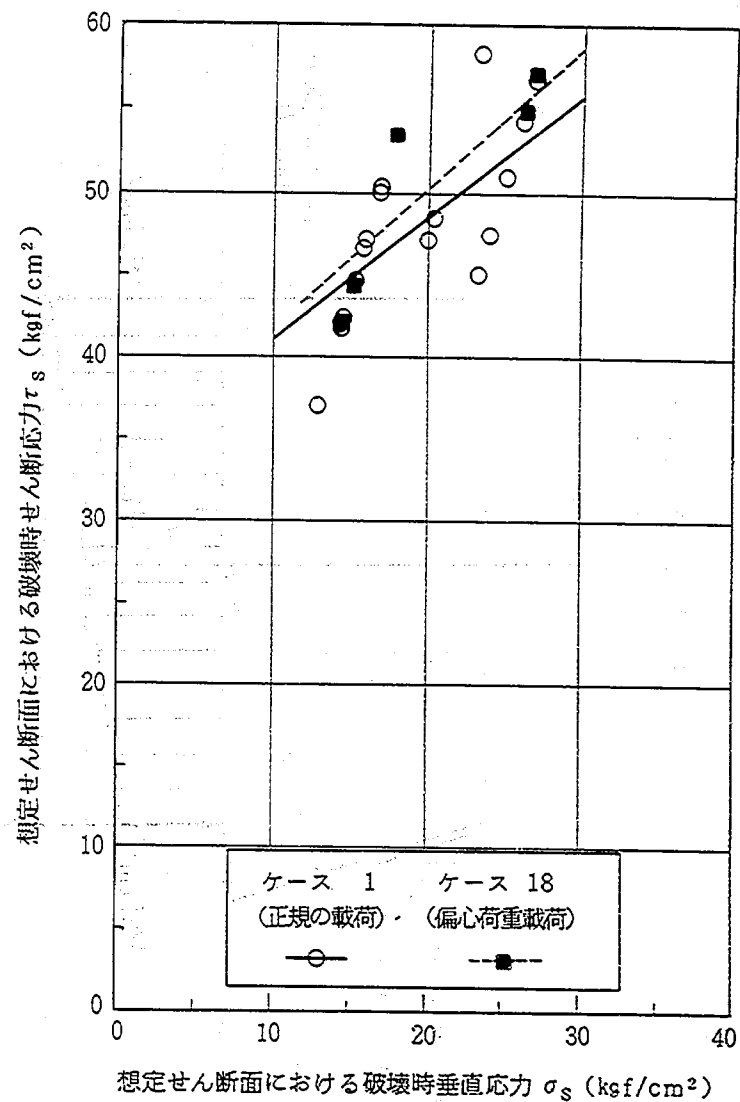
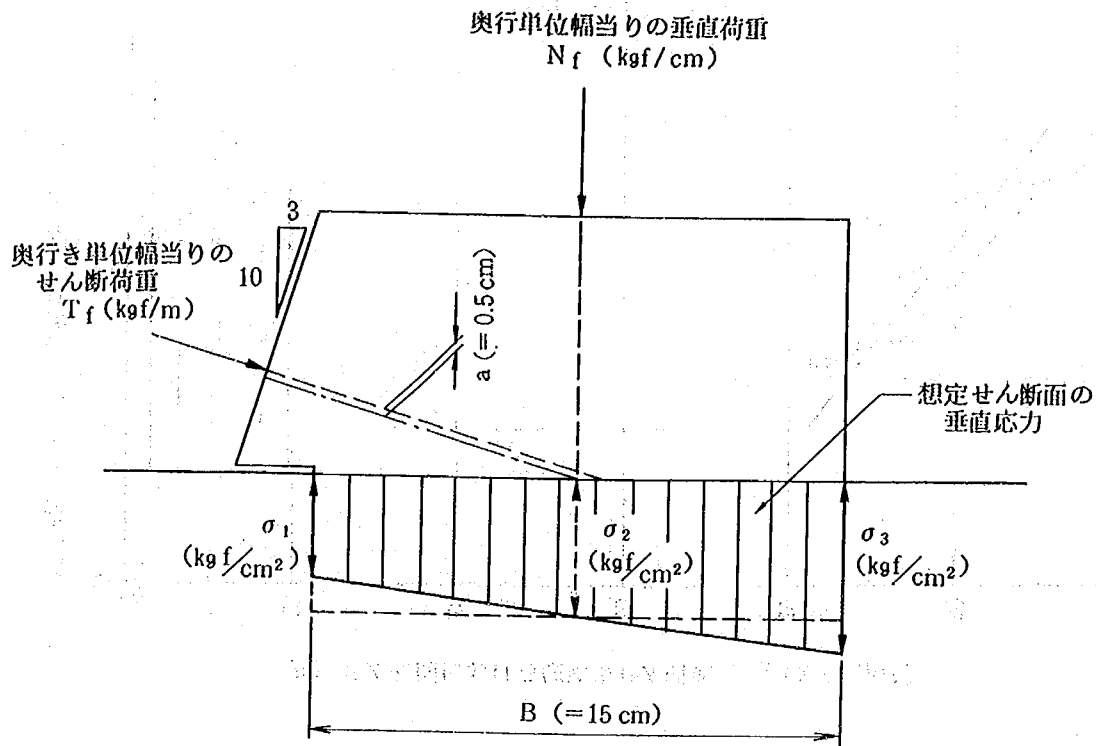


図-3.7 偏心荷重の載荷とせん断強度の関係



$$\sigma_1 = \frac{1}{B} \left(N_f + \frac{3}{\sqrt{109}} T_f \right) - \frac{60 T_f a}{\sqrt{109} B^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{B} \left(N_f + \frac{3}{\sqrt{109}} T_f \right)$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{B} \left(N_f + \frac{3}{\sqrt{109}} T_f \right) + \frac{60 T_f a}{\sqrt{109} B^2}$$

〈破壊時の垂直応力〉

初期垂直応力 (kgf/cm ²)	3 供試体平均		σ_1 (kgf/cm ²)	σ_2 (kgf/cm ²)	σ_3 (kgf/cm ²)
	N_f (kgf/cm)	T_f (kgf/cm)			
2	30	731	6.67	16.0	25.3
10	150	874	17.4	26.7	36.0

図-3.6 偏心載荷時の想定せん断面での垂直応力

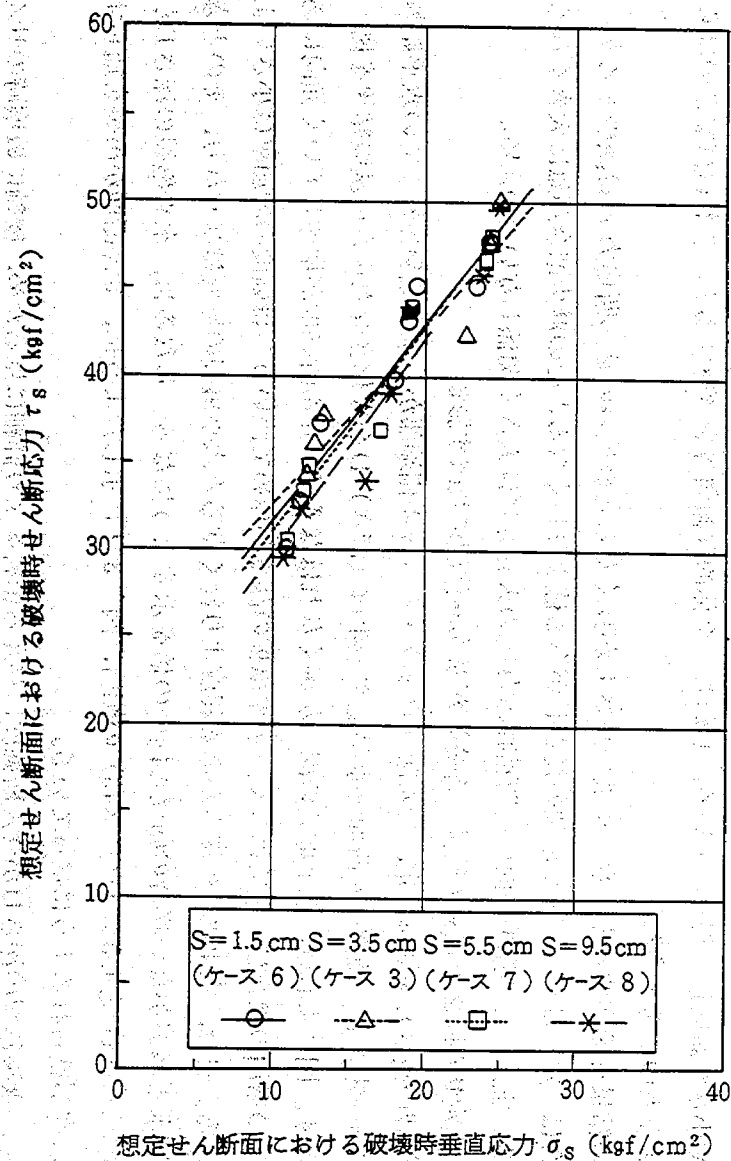


図-3.8 水平亀裂の位置とせん断強度の関係 ($L = 4.0\text{cm}$)

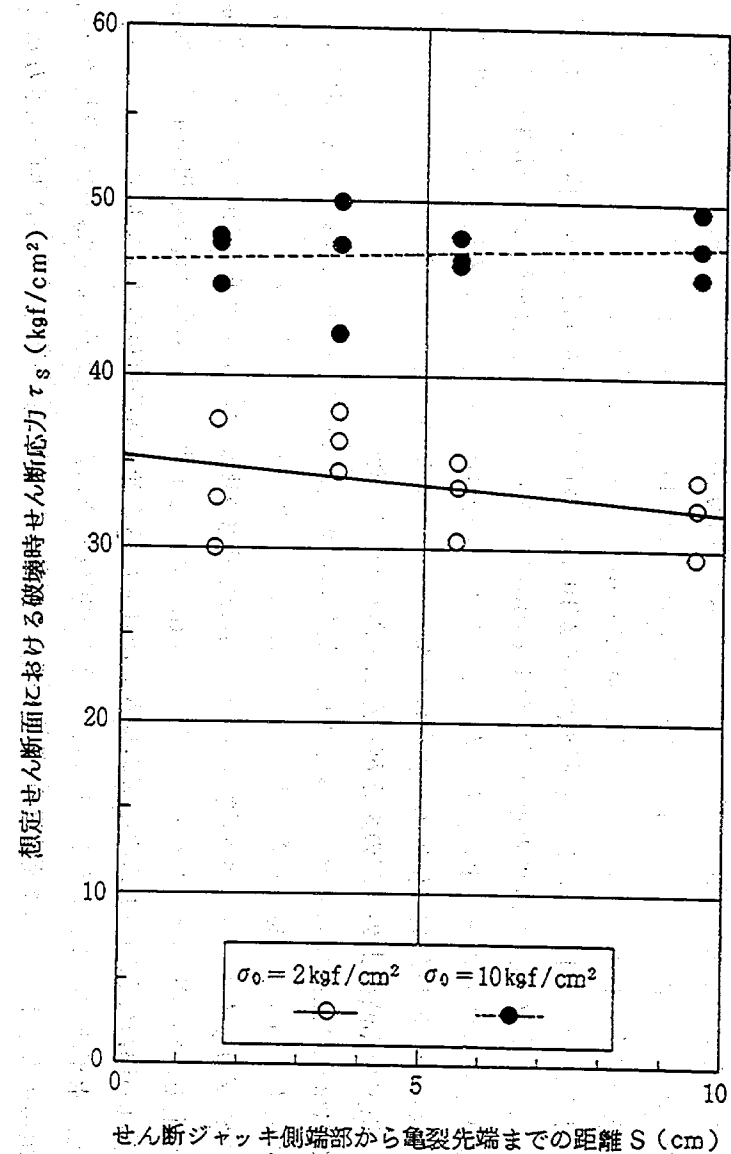


図-3.9 水平亀裂の位置とせん断強度の関係 ($L = 4.0\text{cm}$)

(2) 水平亀裂の長さ L が8 cmの場合

図-3.10～図-3.11に、水平亀裂の長さ L を8 cm一定とし、せん断ブロック・ジャッキ側端部から水平亀裂先端までの距離を1.5 cm, 3.5 cm, 5.5 cmと変化させた場合の試験結果を示す。図-3.10によれば、水平亀裂の長さ L が8 cmの場合、水平亀裂の長さ L が4 cmの場合に比べるとそのせん断強度に若干の差異が認められるように見えるが、試験値のばらつきを考慮すると、これは有意な差と考えがたい。また、図-3.11によれば、初期垂直荷重が10 kgf/cm²の場合、求められた回帰直線が右上がりの傾向を示しているが、これは水平亀裂先端までの距離 S が1.5 cmの場合に極端に低い強度が得られた結果が1点存在することによる。したがって、このことを考慮すると、亀裂の長さが4 cmの場合と同様に、せん断強度は亀裂の位置の影響をほとんど受けないといえることができる。

3.2.3 想定せん断面上の亀裂の長さがせん断強度に及ぼす影響

図-3.12(a)にせん断ブロック・ジャッキ側端部から水平亀裂先端までの距離 S を3.5 cm一定とし、想定せん断面上の水平亀裂の長さ L を0 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cmと変化させた結果を、また、図-3.12(b)にせん断ブロック・ジャッキ側端部から水平亀裂中央まで距離 $S + L/2$ を7.5 cm一定とし、想定せん断面上で水平亀裂の長さ L を0 cm, 2 cm, 4 cm, 8 cmと変化させた場合の試験結果を示す。図より、いずれの場合においても水平亀裂の長さ L が長くなるとせん断強度は低下している。

ここで、水平亀裂の長さ L がせん断強度に及ぼす影響をみるため、縦軸に破壊時のせん断強度 τ_s 、横軸に亀裂の長さ L をとって整理したものが図-3.13(a)～(b)である。両図より、初期垂直応力 σ_o が10 kgf/cm²の場合、水平亀裂の長さ L が2 cm程度では水平亀裂の存在しない場合（ケース1）と同じ程度の破壊時のせん断応力であるが、水平亀裂の長さ L が4 cm（想定せん断面の長さの27%）より長くなると、破壊時のせん断応力は急激に減少し、水平亀裂の長さ L が8 cmになると亀裂の存在しない場合の約6割程度の強度となっている。一方、初期垂直応力 σ_o が2 kgf/cm²の場合にも図-3.13(a)では同様な傾向が見られるが、図-3.13(b)では水平亀裂の長さ L が2 cmのケースおよび4 cmのケースにおいてやや小さな試験値が得られている。しかし、全体的な傾向等を考慮すると、これは試験値のばらつきによるものと考えられる。

以上の結果を総合すると、水平亀裂の長さ L が長くなると破壊時のせん断応力 τ_s は減少するが、その割合は一定ではなく、水平亀裂の長さ L がある値より長くなるとその減少割合が急に大きくなるといえる。また、この減少傾向は初期垂直応力 σ_o の大きさには大きく関係しないといえる。

3.2.4 想定せん断面と亀裂の距離（深さ）がせん断強度に及ぼす影響

水平亀裂の長さ L を8 cm一定、せん断ブロック・ジャッキ側端部から水平亀裂先端までの水平距離 S を3.5 cm一定とし、想定せん断面と水平亀裂の距離（深さ） D を変化させた場合の試験結果を図-3.14に示す。図によれば、水平亀裂の深さが深くなればなるほどせん断強度が増加していく傾向にあるが、その増加の割合は一定ではなく、水平亀裂の深さが極めて浅いうちは強度の増加率は小さいように見える。また、水平亀裂の深さがある程度より深くなると水平亀裂の影響はなくなり、そのときの強度は水平亀裂がない場合の強度と同一の値を示すようになる。ちなみに、水平亀裂の深さ D が3.0 cm（ケース14）と4.5 cm（ケース15）の場合、図-3.1に示したように、せん断面が亀裂を通らずに生じる例が見られるようになっている。

そこで、水平亀裂の深さ D がせん断強度に与える影響をより詳細に見るため、縦軸に破壊時のせん断応力 τ_s 、横軸に水平亀裂の深さ D をとってこれを整理したものが図-3.15である。図によれば、

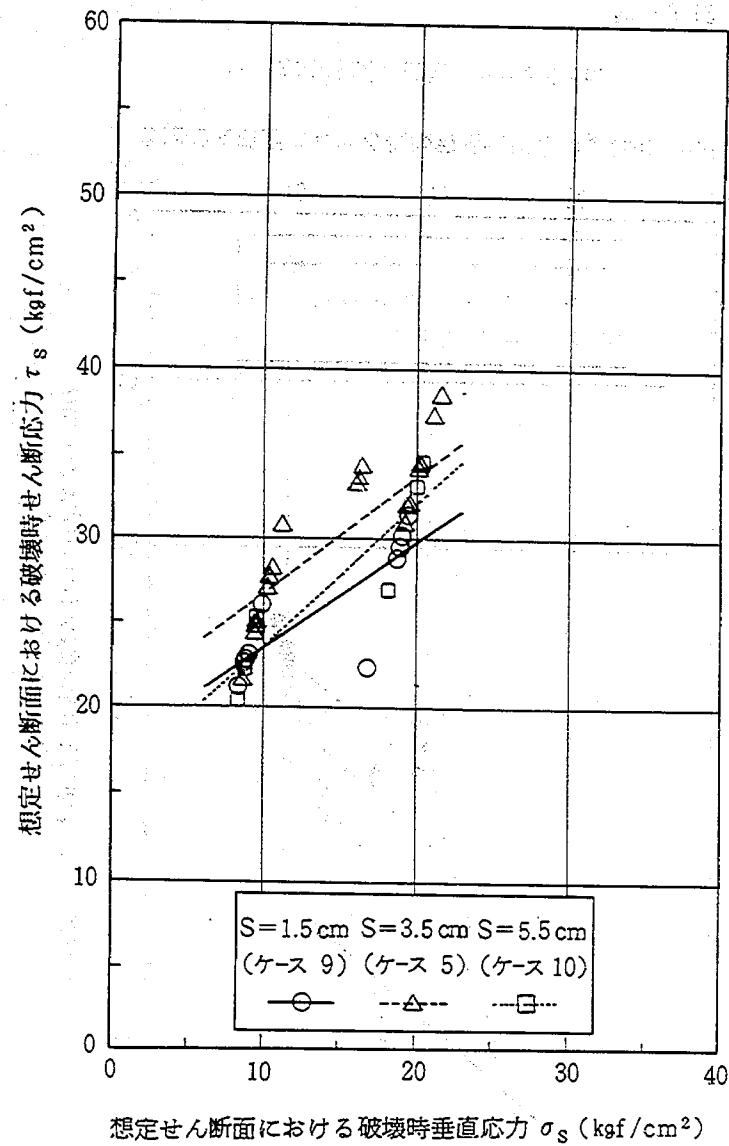


図-3.10 水平亀裂の位置とせん断強度の関係 ($L=8.0\text{ cm}$)

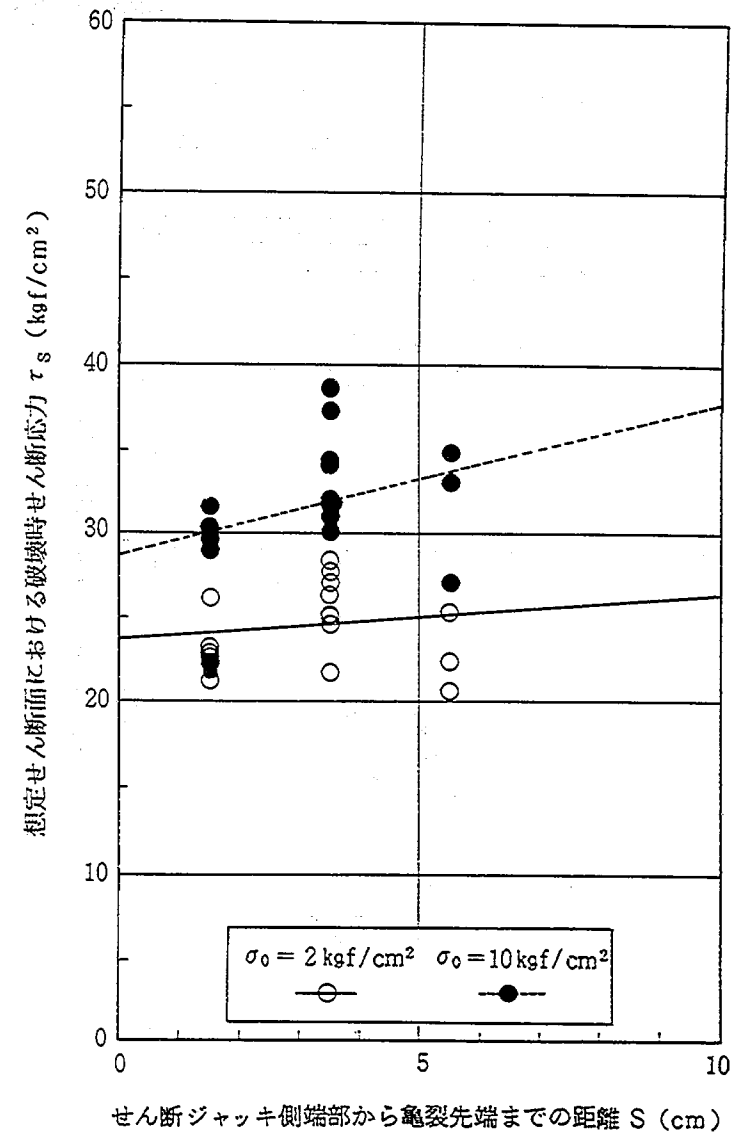
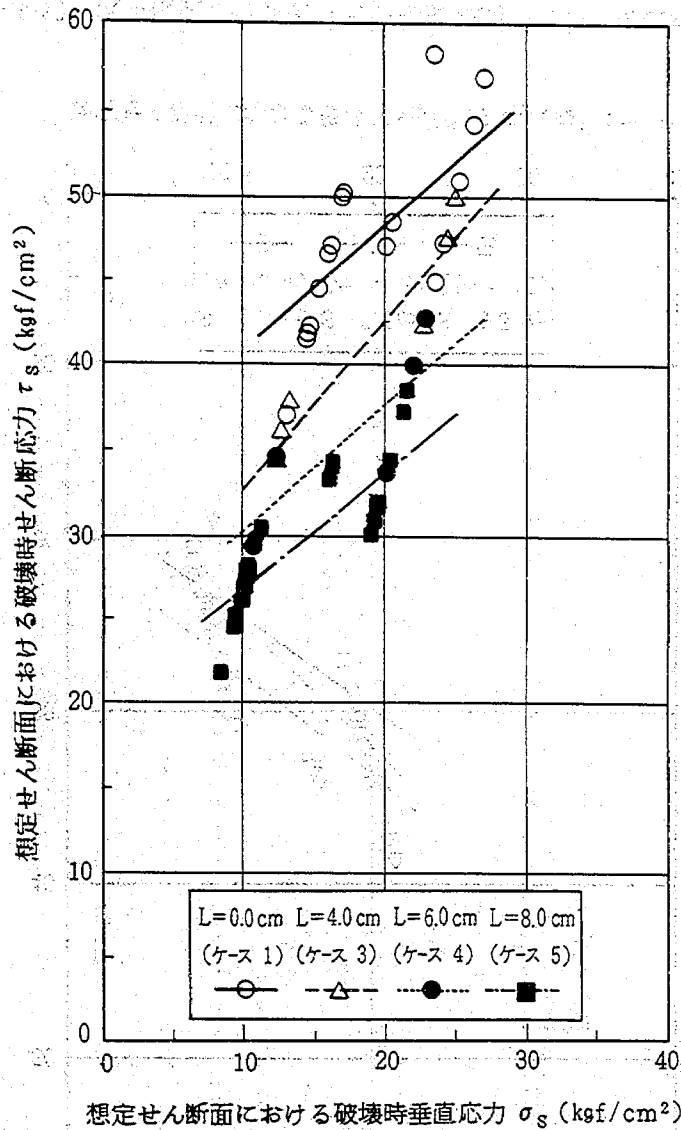
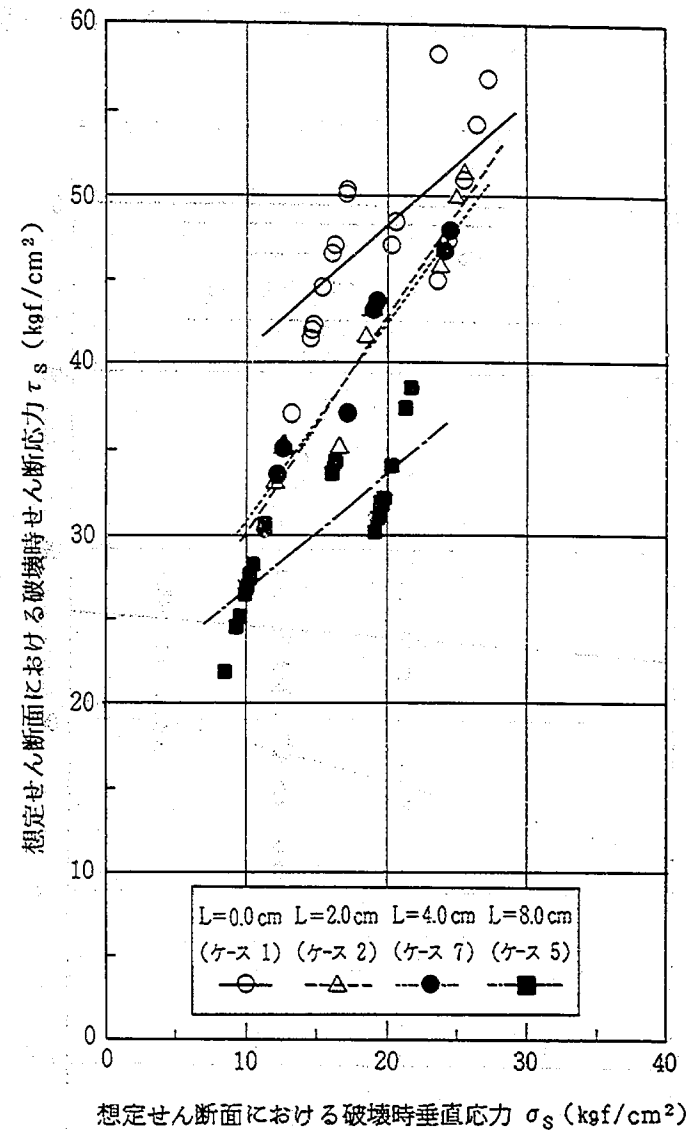


図-3.11 水平亀裂の位置とせん断強度の関係 ($L=8.0\text{ cm}$)

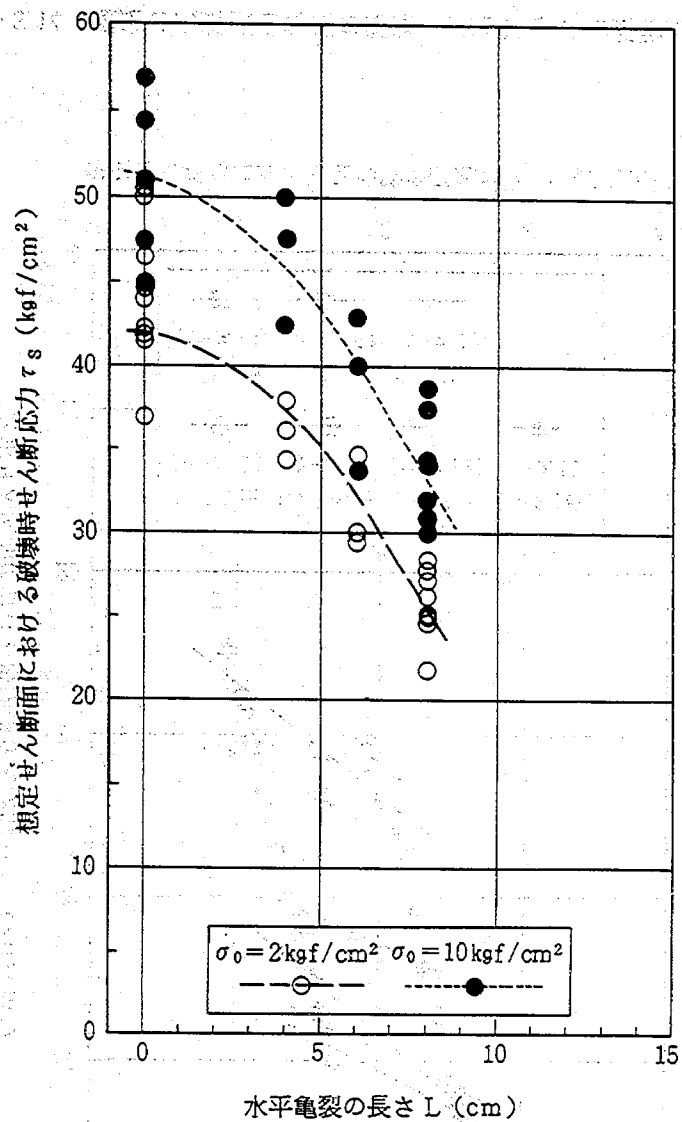


(a) 水平亀裂の位置 $S=3.5\text{ cm}$

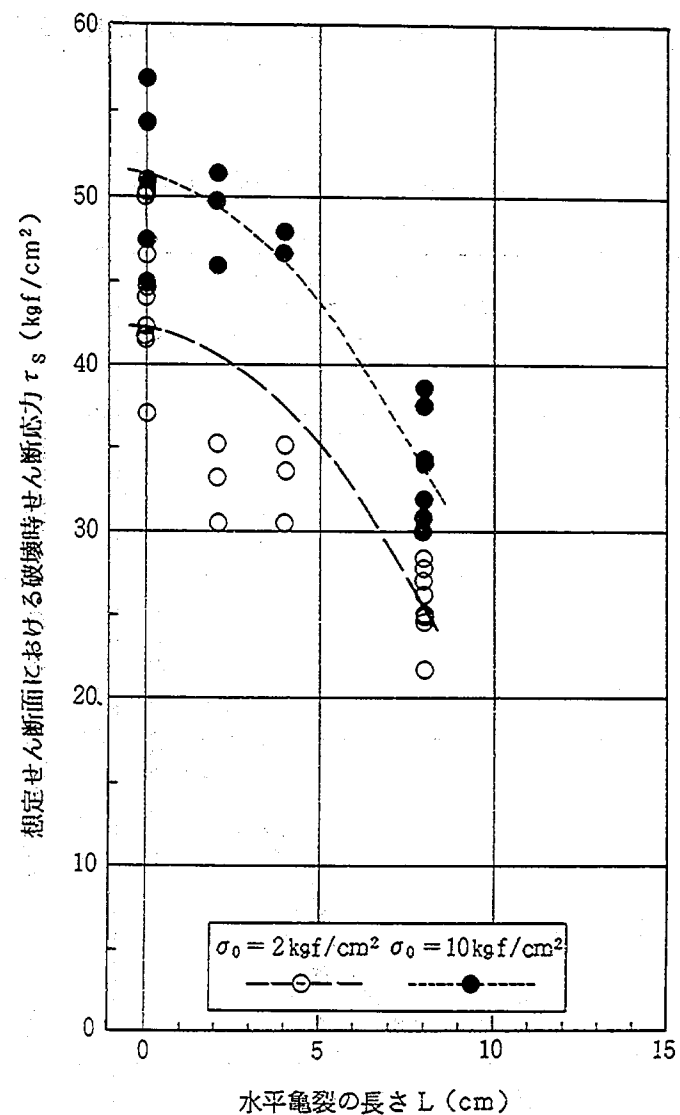


(b) 水平亀裂の位置 $S+L/2=7.5\text{ cm}$

図-3.12 亀裂の長さとせん断強度の関係



(a) 水平亀裂の位置 $S = 3.5 \text{ cm}$



(b) 水平亀裂の位置 $S + L/2 = 7.5 \text{ cm}$

図-3.13 亀裂の長さとせん断強度の関係

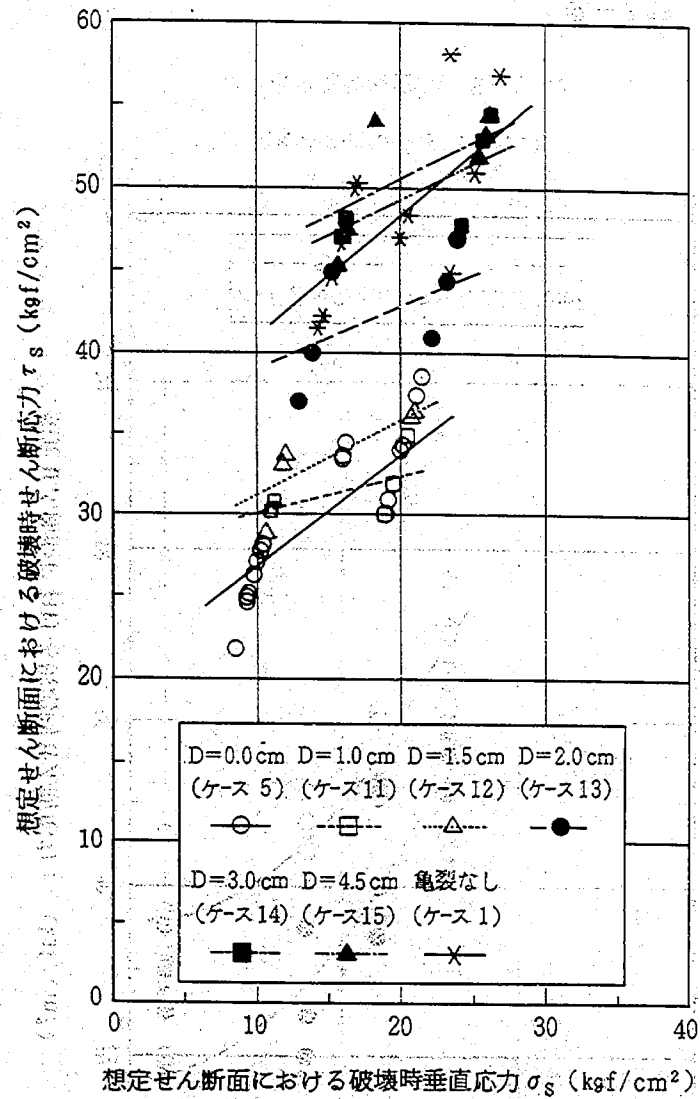


図-3.14 想定せん断面と亀裂の距離(深さ)とせん断強度の関係

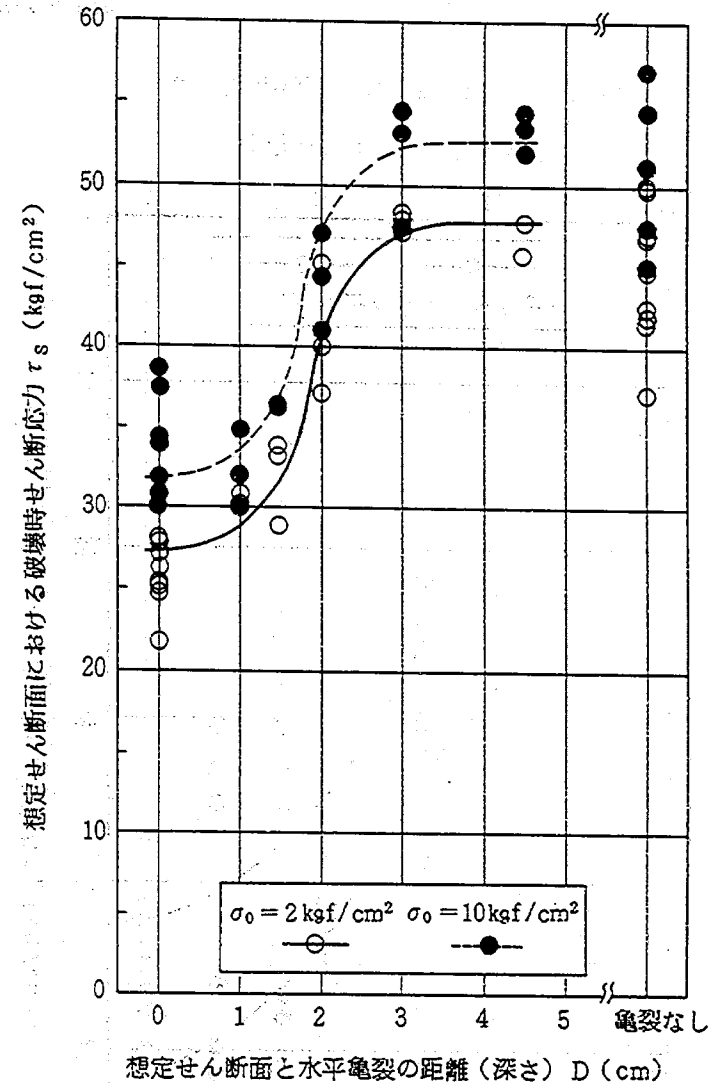


図-3.15 想定せん断面と亀裂の距離(深さ)とせん断強度の関係

水平亀裂の深さ D が大きくなるほど破壊時のせん断応力 τ_s も大きくなるが、水平亀裂の深さ D が 1.5 cm 程度以下ではその増加率は極めて緩やかである。しかし、水平亀裂の深さ D が 1.5 cm より大きくなると破壊時のせん断応力 τ_s は急激に大きくなる。さらに、 D が 3 cm を超えると破壊時のせん断応力 τ_s の増加率は再び緩やかになり、水平亀裂が存在しない場合の破壊時せん断応力に収束している。以上のことから、想定せん断面と水平亀裂の距離（深さ） D がせん断ブロックの底面幅（15 cm）の 20 % 程度（3 cm）以上になると水平亀裂の影響は極めて小さくなるものと考えられる。

3.2.5 想定せん断面に存在する亀裂の本数がせん断強度に及ぼす影響

次に、想定せん断面に存在する水平亀裂の長さの総和 ΣL ($L \times N$) を 8 cm 一定として水平亀裂の本数を 1 ～ 4 本に変化させた場合の試験結果を図 - 3.16 に、また水平亀裂の本数 N と破壊時のせん断応力 τ_s の関係を図 - 3.17 に示す。図より、せん断強度は水平亀裂の長さの総和 ΣL によって決定され、想定せん断面上に存在する水平亀裂の本数はせん断強度にほとんど影響を及ぼさないといえることができる。

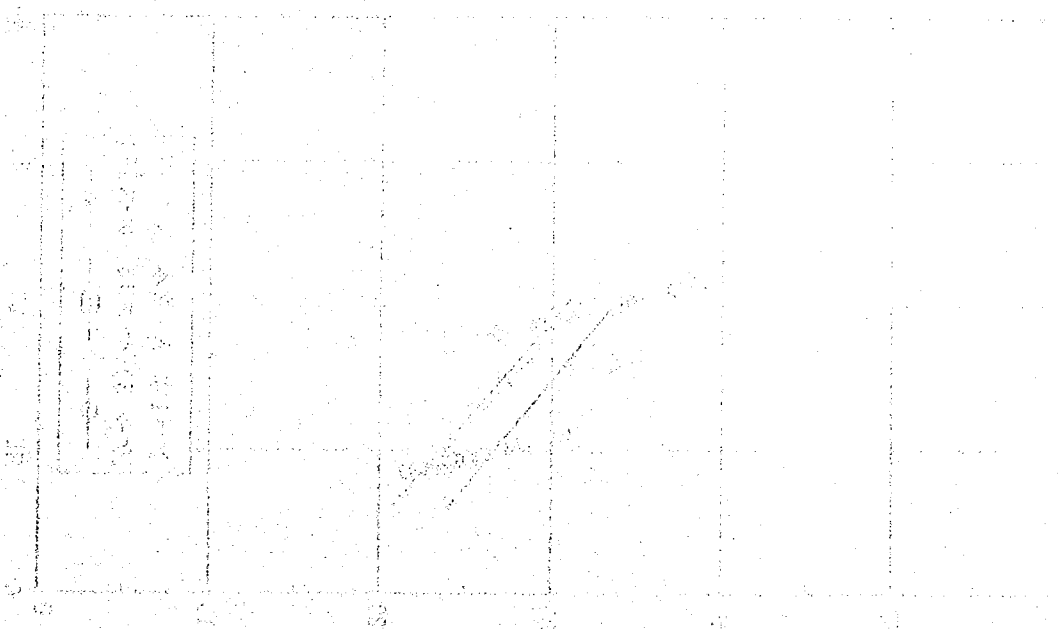


図 3.16 水平亀裂の長さの総和 ΣL とせん断強度 τ_s の関係

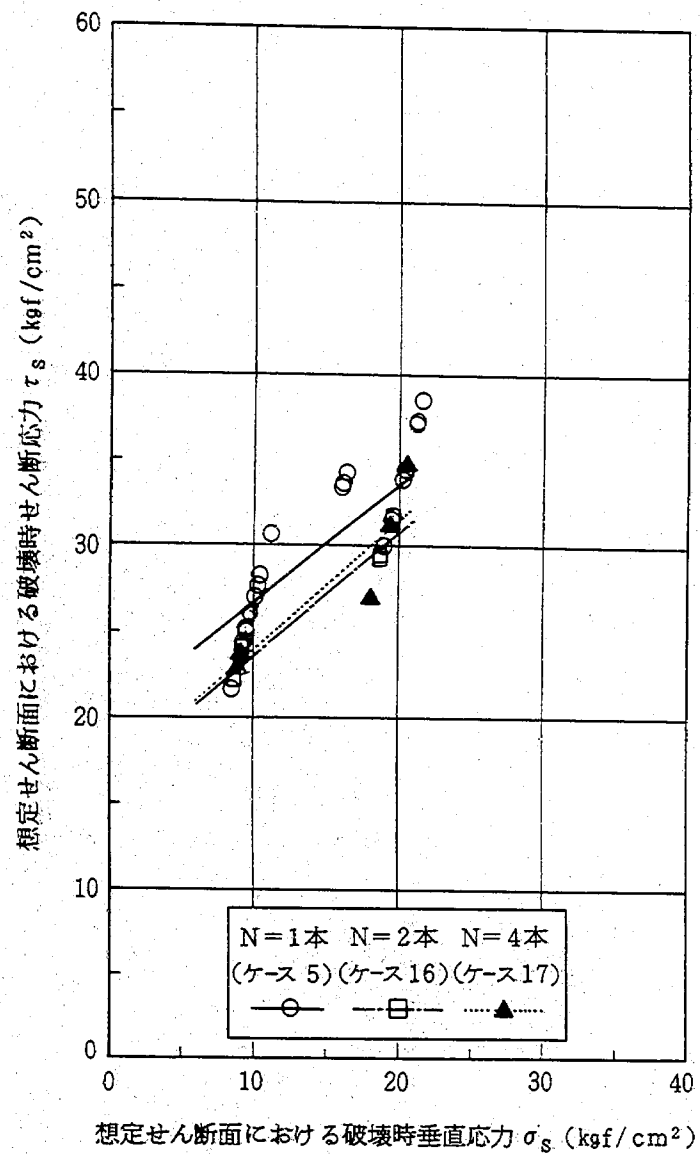


図-3.16 想定せん断面上の亀裂の本数とせん断強度の関係

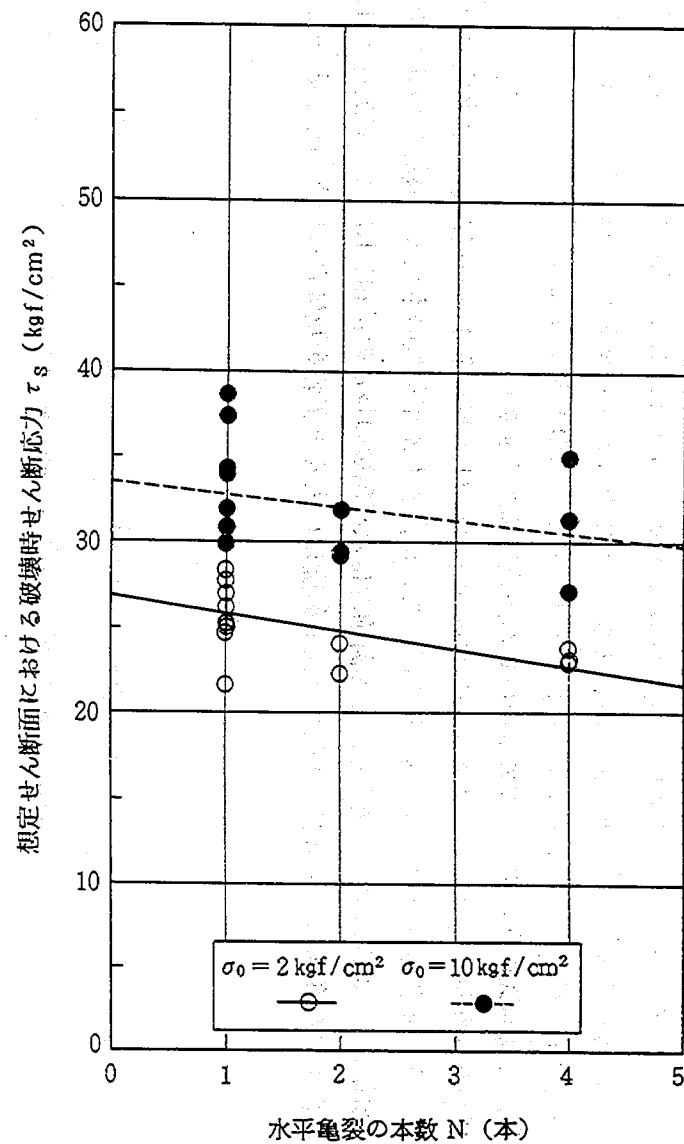


図-3.17 想定せん断面上の亀裂の本数とせん断強度の関係

4. ま と め

本報告は、水平亀裂の位置、水平亀裂の長さ、水平亀裂の本数を変化させた模型実験を行い、これらの要素がせん断強度に及ぼす影響について検討を加えたものである。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) 水平亀裂が存在しない均質な岩盤模型の場合、せん断試験より得られた破壊規準線はモールの応力円に対し交差して若干小さ目の値となっているが、実用上、石膏はMohr-Coulombのせん断破壊規準に従う材料と考えることができる。
- (2) せん断荷重が偏心していない正規の場合と偏心荷重を載荷させた場合とでは、破壊時のせん断強度に有意な差は認められず、従来よりいわれているほど偏心荷重の影響は大きくない。
- (3) いずれの長さの水平亀裂においても、想定せん断面上の水平亀裂の位置はそのせん断強度に大きな影響を及ぼさない。
- (4) 水平亀裂の長さが長くなると想定せん断面上のせん断強度は減少するが、その減少割合は一定ではなく、水平亀裂の長さ L が想定せん断面の長さの30%程度より長くなるとその減少割合は大きくなる。
- (5) 想定せん断面と水平亀裂の距離（深さ）が大きくなると想定せん断面上のせん断強度は大きくなる。この場合、水平亀裂の深さが想定せん断面の長さの10%程度以下ではその増加割合は大きくないが、水平亀裂の深さがこれより大きくなるとせん断強度は急激に大きくなる。しかし、水平亀裂の深さが想定せん断面の長さの20%を超すとせん断強度の増加率は再び緩やかになり、水平亀裂の存在しない場合のせん断強度に収束する。
- (6) せん断強度は想定せん断面上の水平亀裂の長さの総和 ΣL によって決定され、想定せん断面上に存在する水平亀裂の本数はせん断強度に大きな影響を及ぼさない。

参考文献

- 1) 永山 功, 佐々木 隆, 尾畑 伸之: 亀裂を有する岩盤模型のせん断試験, 土木研究所資料第2923号, 平成3年3月
- 2) 永山 功, 佐々木 隆, 尾畑 伸之: 亀裂を有する岩盤模型のせん断試験について, 第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, PP.137~PP.141, 1991年2月, 土木学会
- 3) 河川管理施設等構造令研究会編: 解説・河川管理施設等構造令, 昭和53年3月, 山海堂
- 4) 土木学会岩盤力学委員会編: 原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針—解説と設計への適用—, 昭和58年12月, 土木学会

亀裂を有する岩盤模型の
せん断試験(その2)

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3132号
平成5年3月(1993)

ダム構造研究室 室 長 永山 功
研 究 員 佐々木 隆
尾畑 伸之
(前)部外研究員 杉浦 靖人

要 旨 コンクリートダムの設計において、基礎岩盤のせん断強度は設計上の重要な要素の1つである。岩盤のせん断強度は岩盤を構成する岩石の強度、亀裂の分布、状態などによって大きく影響を受けることがわかっている。せん断強度に及ぼす亀裂の影響度に関しては、先に、内部に亀裂を有する石膏模型を用いたせん断試験により検討を行っているが、本報告書は、先の試験結果と併せて追加試験を実施し、せん断強度に及ぼす亀裂の影響についてより詳細な検討を行ったものである。

キーワード：模型実験，せん断試験，せん断強度，岩盤，亀裂

郵便はがき

は 41
い 円
っ 切
て 手
下 を
さ

305-□□

建設省土木研究所

ダム部ダム構造研究室

御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第3132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3132号