

土木研究所資料

トンネル支保に作用する荷重に関する 研究報告書

平成12年3月

建設省土木研究所
道路部トンネル研究室

Copyright © (2000) 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。

トンネル支保に作用する荷重に関する 研究報告書

トンネル研究室 室長 真下 英人
研究員 砂金 伸治

要 旨

本研究では、トンネルの支保に作用する荷重をある前提条件のもとで解析的に評価することにより、トンネルの支保および覆工の設計に資するデータを得ることを目的として行った研究である。既往のトンネルにおける計測 A による変位計測データを分析し、弾性有限要素解析を実施し、地山特性曲線の概念に基づいて、支保の変形がどの程度の荷重を受けて生じたものかを算定し、それらの結果を岩種毎に評価し、傾向を大別した。さらに解析結果と切羽観察表の評価との関連性を考察するとともに、原位置試験から得られた結果との比較を行った。

その結果、支保に作用する荷重の最大値の傾向を岩種毎に明らかにしたとともに、土荷重の高さの観点からの傾向を明らかにした。また、切羽観察結果との比較では、特に観察時における圧縮強度に関する評価が変位の計測結果や荷重の解析結果と関連性の高いことが分かった。

キーワード：トンネル、支保、荷重、有限要素解析、地山特性曲線、地山評価、切羽観察

目 次

1. まえがき	1
2. 解析方法	2
2.1 解析対象トンネルと地山の分類	2
2.1.1 通常程度の土被りを持つ地山と地山分類	2
2.1.2 土被りの小さい地山	5
2.2 2次元有限要素解析	6
2.2.1 解析手法	6
2.2.2 荷重の評価方法	8
2.3 切羽観察結果との関連性	9
2.4 原位置試験との関連性	9
3. 変位計測結果	11
3.1 変位と土被りの関係	11
3.1.1 変位率と等価土被り厚	11
3.1.2 岩種毎の変位率-H/Bの関係	11
3.2 連続体地山と不連続体地山	13
4. 解析結果	32
4.1 2次元有限要素法の解析結果	32
4.1.1 地山分類別と荷重の関係	32
4.1.2 支保パターンと荷重の関係	37
4.1.3 計測Bの結果との比較	38
4.1.4 ロックボルトを考慮した場合の解析	40
4.2 解析結果と切羽観察表の評価指標との関連性	76
4.3 解析結果と原位置試験の結果との関連性	76
5. 結論	86
参考文献	88
参考資料 岩石グループ毎の支保に作用する荷重の傾向	91

1. まえがき

経済的で力学的にも安定なトンネルの支保や覆工の設計を行う場合、それらに作用する荷重の評価を行い、それに基づいた設計をすることが本来は望ましいと考えられる。しかしその評価は実際には困難であり、現在の支保設計では、通常の地山においてはあらかじめ定められた標準支保パターンを用いる方法、また、特殊地山等においては過去の類似地山の施工で得られた実績に基づいて設計される場合が多い。また覆工の設計においてもあらかじめ定められた標準の厚さを用いる場合がほとんどである。近年ではそれらの設計を解析手法によって行う場合も見受けられ、その場合は骨組み解析や有限要素解析を用いることが多い。特に有限要素解析を用いる場合では、地山を連続体と仮定する必要があることが多いと考えられるが、地山の挙動と同時に支保の挙動の把握が可能である。

地山が連続体、かつ弾性的な挙動を示すと仮定すれば、地山の弾性係数が一定であればトンネル掘削時の土被りの変化と種々の計測結果が線形関係になると考えられる。実際には地山の弾性係数が一定であることはなく、ある程度の幅を持って変化しているが、既往のトンネル掘削時に得られた計測結果を分析すると、地山が塑性していると考えにくい地山、また地山の弾性係数の変化の幅が地山全体に渡っても大きくないと考えられる地山においても、土被りの変化に対して、例えば天端沈下や内空変位といった変位の変化が線形関係と見なせない場合が見受けられ、地山自体が連続体とは言い難い挙動をする場合が多く見られる。その理由として構成している地質が概ね同一の地山であったとしても地山内部に亀裂等が存在していたり、風化の影響があると考えられ、連続体と仮定できる地山とそうでない地山があると考えられるためである¹⁾。本来は連続体に近似できるかどうかにより、解析に用いるべき力学理論も異なると考えられるが、いずれにしろ地山が連続体の挙動と考えられるか、もしくは不連続体の挙動と考えられるかに依らず、支保に作用する荷重の評価は事前に行っておくことが望ましい。また、それらの評価が覆工の設計において考慮しておくべき荷重の基礎的な傾向を把握できるものになると考えられる。

そこで、本研究では第一に既往のトンネル施工時に得られた計測結果をあらかじめ定めた地山の分類毎に整理した。第二に地山が弾性の連続体の挙動を示すといった仮定を設けたうえで、分類毎に整理された計測結果を用い、2次元弾性有限要素法による解析を行い、地山特性曲線の基礎的な概念に基づき、支保に作用する荷重を算定することを試みた。また、この結果に基づいて地山を変位や荷重の観点から工学的に分類する検討を行った。また、計測結果および解析結果と、切羽観察表に記録された指標との関連性および実際の施工地点で行われた簡易な原位置試験の結果との比較を行い考察を加えた。

2. 解析方法

本章では、まず初めに解析の準備として地山を分類した方法について述べる。引き続き支保に作用する荷重を算定した方法として、2次元有限要素解析の方法、およびそれらの結果を用いて支保に作用する荷重の算定を行った方法について述べる。最後に解析等で得られた結果を切羽観察による結果、および原位置試験の結果と比較するための考え方について述べる。

2.1 解析対象トンネルと地山の分類

本研究にて解析の対象としたトンネルの地山を構成する岩種は様々であり、傾向を把握するために地山を構成する岩を分類する必要がある。まず初めに、解析対象とするトンネルがおかれている条件により地山を大きく2つに分け、さらにその中で必要に応じて岩種毎に分類することとした。すなわち、トンネルのおかれている条件とは、第1に通常程度、すなわち坑口部や都市部周辺に見られるような土被り厚が小さい部分の地山を除いた部分におかれているトンネルであり、第2に坑口部や都市部周辺に多く見受けられる土被りが小さいトンネルである。それぞれについて、岩種の分類方法を以下に述べる。

2.1.1 通常程度の土被りを持つ地山と地山分類

掘削後の地山がアーチ作用によって保持できない土被りは今までの実績によると1~2B(B:トンネルの掘削幅)の範囲と言われている。そこで、初めに通常程度、すなわち、概ね2B以上の土被りを持つ地山において検討を加えることとし、それらについて岩石の分類を考えることとした。岩石の分類は、トンネル技術基準(構造編)・同解説)に基づく工学的性質を表していると考えられる堆積岩、火成岩および変成岩といった分類²⁾をもとに、データが得られているトンネルを表-2.1に示すように分類した。すなわち、分類としては堆積岩では、泥岩、頁岩、粘板岩、砂岩および凝灰岩(凝灰角礫岩を含む)があり、火成岩では安山岩、斑岩および花崗岩(花崗閃緑岩を含む)、そして変成岩では、千枚岩、片岩(緑色片岩と黒色片岩)、片麻岩および蛇紋岩となっている。なお、千枚岩についてはデータ数が少ないため、現段階では千枚岩単独での検討は行わないこととし、全体としてのデータの中を含めるにとどめてある。また、参考として日本道路公団の設計要領に基づく分類³⁾についてもあわせて検討することとし、それらについては分類方法を含めて参考資料にて述べることとする。

また、本研究において取り上げたトンネルの諸元を表-2.2に示す。表中の支保パターンについては、通常程度の土被りを持つ地山については、B~DⅡのパターンを対象とした。なお、本研究では、DⅠパターンの中でインバートを施工しないものが含まれており、それについてはDⅠ-nと記載することとした。また表中のSL~下半は、スプリングラインから下半盤までの距離を示している。なお、インバートが施工されている場合は、インバート掘削前下半盤までの数値を示している。

表-2.1 岩の分類(文献2に基づく分類)

(a) 堆積岩			
	小さい ←	粒径	→ 大きい
非火山質・固結	泥岩、頁岩、粘板岩		砂岩
火山質・固結	凝灰岩(凝灰角礫岩含む)		

(b) 火成岩	
火山岩・ガラス状	安山岩
脈岩・斑点状	斑岩
深成岩・粒状	花崗岩(花崗閃緑岩含む)

(c) 変成岩			
広域変成岩	千枚岩	片岩	片麻岩
その他	蛇紋岩		

表-2.2 中の解析対象については、○印を付したトンネルでは計測Aのデータを取りまとめたうえで、そのデータを用いて有限要素解析を実施したトンネルであり、△印については計測Aのデータを取りまとめたもののトンネルである。

解析では計測Aで得られた通常の変位計測結果の値を使用しているが、実際には各トンネルで変位計測を行っている断面は多数ある。そこで、断面を下記に示す方法で選定することとした。すなわち、

- ① 同一のトンネルの、同一の支保パターンでの変位計測データを1つのグループとする
- ② ①から土被り厚が概ね最大、最小、およびそれらの平均の値をとる断面を選択する
- ③ ①から天端沈下が概ね最大、最小、およびそれらの平均の値をとる断面を選択する
- ④ ①から内空変位が概ね最大、最小、およびそれらの平均の値をとる断面を選択する

の4つの観点に基づき選択した。なお、トンネル延長が長い場合や、計測を密に行うなどの場合によって変位計測断面数が非常に多い場合は、これらの観点より選択された断面を含んだ上で、解析対象とする断面を増加させて解析を行ったトンネルもある。その場合の断面の選択は、各値の最大値と平均値の中間値および平均値と最小値を含むように考え、データの分布に偏りが生じないようにした。逆にトンネル延長が短い場合や、計測の間隔が長い場合では、②～④において平均の値をとっている断面は省略しているものがある。なお、解析に用いた断面では、湧水の影響が非常に大きいと考えられる断面は断面を選択する段階で対象から除外した。また補助工法の採用した断面については、変位を抑制させる効果の高いと考えられると同時に、現段階ではその補助工法の定量的な効果を一意に解析に反映させにくい補助工法を行った断面のデータについては除外した。すなわち、補助工法を採用した断面のうちデータに採用したものは、切羽面を安定させるための鏡吹付けおよび鏡ボルト、また天端等からの一時的な崩落を防止するための簡易な薬液注入、また下半にて仮インバートを採用している断面にとどめることとした。なお、鏡吹付け、鏡ボルトおよび簡易な薬液注入は解析要素として考慮せず、仮インバートは梁部材として考慮した。

表-2.2 解析対象トンネルの主たる諸元と分類 (通常の地山)

トンネル No	切羽観察に基づく岩種名	文献 2 による分類		解析対象	支保パターン	掘削径 (m)	土被り (m)	
							最小	最大
S-01	泥岩	堆積岩	泥岩	○	D I	12.10	25.0	35.8
S-02	泥岩	堆積岩	泥岩	○	D II	12.70	33.4	91.4
S-03	泥岩	堆積岩	泥岩	○	C I	13.71	39.3	70.4
S-04	泥岩	堆積岩	泥岩	○	C II	13.71	32.6	97.3
S-05	砂層混じり泥岩	堆積岩	泥岩	○	C II	13.71	38.2	74.0
S-06	泥岩	堆積岩	泥岩	△	D I	9.80	26.0	105.2
S-07	泥岩	堆積岩	泥岩	△	C I	13.80	44.7	51.0
S-08	泥岩	堆積岩	泥岩	△	C II	13.80	34.2	46.5
S-09	泥岩	堆積岩	泥岩	△	D I	13.90	22.2	28.7
S-10	泥岩	堆積岩	泥岩	△	D I	13.81	24.0	31.2
S-11	泥岩	堆積岩	泥岩	△	C II	12.00	34.0	57.0
S-12	泥岩	堆積岩	泥岩	△	D I	9.80	33.0	117.0
S-13	泥岩	堆積岩	泥岩	△	D II	10.10	23.3	57.3
S-14	泥岩	堆積岩	泥岩	△	C II	13.70	30.9	110.7
S-15	泥岩	堆積岩	泥岩	△	D I	13.80	21.0	105.2
S-21	頁岩	堆積岩	頁岩	○	C II	12.20	55.2	101.1
S-22	頁岩	堆積岩	頁岩	○	D I -n	12.30	37.6	97.0
S-23	頁岩	堆積岩	頁岩	○	D I	12.30	30.7	-
S-24	砂岩・頁岩	堆積岩	頁岩	○	C II	12.20	37.5	57.0
S-25	頁岩	堆積岩	頁岩	○	D I	12.10	36.6	78.1
S-26	砂岩・頁岩	堆積岩	頁岩	○	D I -n	12.80	26.7	52.4
S-27	頁岩	堆積岩	頁岩	△	D II	12.05	25.4	39.1
S-28	頁岩	堆積岩	頁岩	△	C II	11.20	41.7	77.7
S-29	頁岩	堆積岩	頁岩	△	C II	13.10	24.3	60.3
S-30	頁岩	堆積岩	頁岩	○	C II	12.20	22.5	54.4
S-41	砂岩・粘板岩	堆積岩	粘板岩	○	D I	12.90	53.3	246.2
S-42	粘板岩	堆積岩	粘板岩	○	C II	10.70	58.8	131.6
S-51	砂岩・泥岩互層 (砂岩優勢)	堆積岩	砂岩	○	C I	12.40	49.5	138.3
S-52	砂岩・泥岩互層 (砂岩優勢)	堆積岩	砂岩	○	C II	12.40	25.0	124.0
S-53	砂岩・頁岩 (砂岩優勢)	堆積岩	砂岩	△	C II	12.40	26.5	82.8
S-54	砂岩	堆積岩	砂岩	○	C II	11.80	26.0	91.4
S-55	砂岩	堆積岩	砂岩	○	C II	11.80	25.1	83.1
S-61	凝灰岩	堆積岩	凝灰岩	○	C II	12.30	24.3	131.7
S-62	凝灰岩	堆積岩	凝灰岩	○	D I	12.40	54.7	142.8
S-63	凝灰岩	堆積岩	凝灰岩	○	D II	12.70	74.8	140.1
S-64	凝灰岩	堆積岩	凝灰岩	△	C II	13.20	27.6	49.1

S-65	凝灰角礫岩	堆積岩	凝灰岩	○	C II	9.30	29.8	121.7
S-66	凝灰角礫岩	堆積岩	凝灰岩	○	D I	9.30	20.2	158.3
I-01	安山岩	火成岩	安山岩	○	D I	14.40	50.5	63.0
I-02	安山岩	火成岩	安山岩	○	C II	12.50	46.2	120.0
I-11	花崗岩	火成岩	花崗岩	○	C II	11.20	40.0	203.5
I-12	花崗岩	火成岩	花崗岩	○	D I	11.30	102.0	143.0
I-13	花崗岩	火成岩	花崗岩	○	D I	13.10	30.0	60.0
I-14	花崗岩	火成岩	花崗岩	○	C II	13.10	28.5	47.1
I-15	花崗閃緑岩	火成岩	花崗岩	○	D I	14.68	23.1	45.7
I-16	花崗閃緑岩	火成岩	花崗岩	△	B	11.20	51.4	124.2
I-17	花崗閃緑岩	火成岩	花崗岩	△	C I	11.30	28.2	161.8
I-18	花崗閃緑岩	火成岩	花崗岩	△	C II	11.40	20.0	203.4
I-19	花崗閃緑岩	火成岩	花崗岩	△	D I	14.40	27.0	67.0
I-20	花崗斑岩	火成岩	花崗岩	○	D I-n	12.20	25.0	59.0
I-31	斑岩	火成岩	斑岩	○	D I-n	12.80	29.8	67.3
I-41	緑色岩	火成岩	緑色岩	○	B	12.10	51.3	128.1
I-42	緑色岩	火成岩	緑色岩	○	D I	12.40	29.0	67.0
M-01	黒色片岩(泥質片岩)	変成岩	片岩	○	C II	11.40	100.0	540.0
M-02	黒色片岩・緑色片岩	変成岩	片岩	○	C II	11.40	50.7	109.1
M-03	黒色片岩・緑色片岩	変成岩	片岩	○	D II	11.80	56.0	90.0
M-11	蛇紋岩	変成岩	蛇紋岩	○	D II	11.00	39.7	110.8
M-21	片麻岩	変成岩	片麻岩	○	C I	12.70	83.0	185.0
M-22	片麻岩	変成岩	片麻岩	○	C II	12.70	62.0	188.0
M-23	片麻岩	変成岩	片麻岩	△	C I	11.53	35.0	120.7
M-24	片麻岩	変成岩	片麻岩	△	C II	11.53	98.0	120.0
M-31	千枚岩	変成岩	千枚岩	○	D I-n	12.80	31.8	53.0
M-32	千枚岩	変成岩	千枚岩	○	D I	12.80	51.1	53.0

2.1.2 土被りの小さい地山

次に、1項で取り上げた以外の地山、すなわち土被りが概ね2B(B:掘削径)以下になっているトンネル坑口部付近や都市部周辺に多く見られるような土被りの小さい部分の地山について検討した。土被りの小さい部分については、地山の地質は表土、マサ土、粘土、砂層等に見られるように多種にわたる構成となっていたり、また風化が進行している場合が多い。これらの構成に基づいて地山を分類することは工学的には困難であると考えられる。本研究では、支保に作用する荷重を算定することを目的としたため、土被りが小さい地山については、「土被り小の洪積層・沖積層の地山」として単一で取り扱うことによって検討することとした。本研究において取り上げたトンネルの諸元を表-2.3に示す。すべてのトンネルで土被りが小さいために、補助工法が使用されている断面がほとんどであるが、その中でも計測Aの結果に大きく影響の及ぼすことが

少ない断面をなるべく選定することとした。

表-2.3 解析対象トンネルの主たる諸元と分類(土被り小の洪積層・沖積層地山)

トンネル No.	基盤となる岩種名	支保 パターン	採用されている 補助工法	掘削径 (m)	土被り(m)	
					最大	最小
DA-1	風化砂岩	DⅢ	フォアパイリング	12.00	5.0	5.5
DA-2	風化砂岩	DⅢ	フォアパイリング	12.00	4.5	16.5
DA-3	洪積粘土層・砂層	DⅢ	フォアパイリング	14.00	3.0	7.0
DA-4	強風化花崗閃緑岩、斑状花崗岩	DⅢ	フォアパイリング, PU-IF	14.88	13.0	27.0
DA-5	シルト混じり砂礫	DⅢ	フォアパイリング	12.80, 12.90	6.0	14.0

2.2 2次元有限要素解析

2.2.1 解析手法

本研究における支保に作用する荷重の評価にあたっては2次元有限要素解析を用いて行った。解析に使用した地山と支保工の諸定数等を表-2.4に示す。地山は弾性体とし、地山を構成している地質は解析領域全体で均一であると仮定して解析を行った。また、解析を行う断面直上の地表面については、本来は凹凸があると考えられるが、本研究では解析領域の範囲内で水平であると仮定した。解析領域であるが、土被りの大きさによって解析領域を区別した。すなわち、通常程度の土被りを持つ地山においては、トンネルの左右の側壁から10B(Bは掘削径)、下側はスプリングラインより5Bを考えた。解析領域のイメージを図-2.1.1に示す。また土被りの小さい地山の解析については、トンネルの左右の側壁から2H(Hは土被り)、下側はトンネル底盤より1Bを考えた。解析領域のイメージを図-2.1.2に示す。地山のポアソン比は岩石の種類や一軸圧縮強度によらず、本研究では0.3と仮定して解析した。

表-2.4 地山および支保工の諸定数

弾性係数	コンクリート	3.5GPa
	鋼材	210GPa
ポアソン比	コンクリート	0.2
	鋼材	0.3
	地山	0.3
応力解放率	掘削時	30%
	支保建込み時	70%

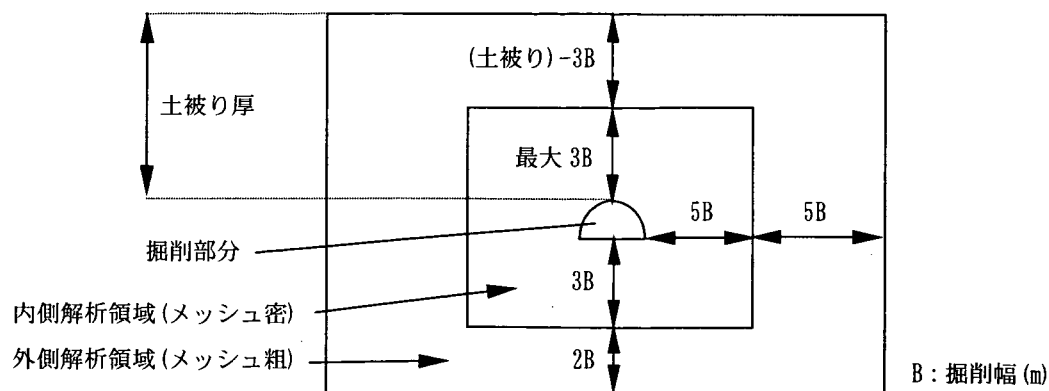


図-2.1.1 解析領域のイメージ(通常程度の土被りの地山)

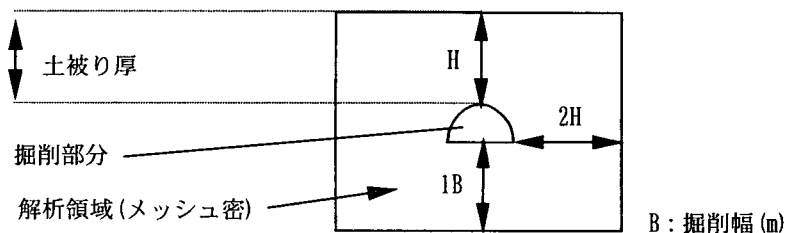


図-2.1.2 解析領域のイメージ(土被りの小さい地山)

解析の具体的な方法は、断面の天端沈下量と、スプリングラインより概ね 1.5m 上部の内空変位量の計測値を用い、その計測結果と解析上の変位が一致するように地山の見かけの弾性係数と見かけの側圧係数を変化させていき、解析上の天端沈下と内空変位が $\pm 5\%$ の誤差以下で実測の天端沈下と内空変位の値になったときに概ね一致したと判断し、その地山は、解析による見かけの弾性係数と見かけの側圧係数をもつ地山と決定した。さらにそれら 2 つの係数を用いて素掘りの解析を行い、次項で述べる方法により、支保に作用していると考えられる荷重の大きさを算定した。なお、解析に使用した天端沈下および内空変位については、上半の支保建込み後から覆工施工前までにおける収束変位を使用した。

次に、解析上の支保のモデル化については、支保はアーチ状の梁要素として検討した。支保の弾性係数は、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の弾性係数と断面積を基に、式(1)によって算定した等価な弾性係数を使用した。

$$E_{bc} = \frac{E_c \cdot A_c + E_s \cdot A_s}{A_c + A_s} \quad \dots \quad (1)$$

ここに、

E_{bc} : 等価な支保の弾性係数

E_c : 吹付けコンクリートの弾性係数 (=3.5GPa)

A_c : 単位長さ(1掘進長)あたりの吹付けコンクリートの断面積

E_s : 鋼アーチ支保工の弾性係数 (=210GPa)

A_s : 単位長さ(1掘進長)あたりの鋼アーチ支保工の断面積

この方法で計算した場合の梁要素に用いた定数を一例としてCⅡパターンについて、表-2.5に示す。

表-2.5 梁要素に用いた定数の一例

支保パターン：CⅡ

加背	上半部	下半部
ヤング率(GPa)	8.663	3.5
断面2次モーメント(cm ⁴)	10000	10000
断面積(cm ²)	1200	1200

なお、本研究で実施している荷重の算定にはロックボルトの影響は考慮せずに解析を行っているものの、傾向を把握するために解析を実施した断面もあるため、それらの結果については4章で後述する。

また、2次元有限要素解析であるため、応力解放率の設定が問題となるが、本研究では掘削時に30%の応力が解放され、建込み時に70%の応力が作用するものと仮定した。なお、この応力解放率については、上半掘削時、下半掘削時、インバート施工時とも同一の値をとるものと仮定して解析を実施した。

2.2.2 荷重の評価方法

2次元有限要素法における荷重の評価は、地山特性曲線の基礎的な考え方に基づき検討を行った。すなわち、前項に記した方法により、ある断面で実測の結果と合致するような見かけの弾性係数と見かけの側圧係数を用い、素掘りの変位量を算定した。そのうち、特に天端沈下および内空変位の値に着目し、図-2.2の実線に示すような支保の内圧と変位量の関係を算定した。ここで、 p_0 は初期の支保の内圧、すなわち天端沈下で荷重を考えようとする場合は、その断面における土被り厚に単位体積重量を乗じた値になっており、内空変位で荷重を考えようとする場合は、その断面における土被り厚に内空高さを加え、それに単位体積重量を乗じたものとなっている。また δ_3 は素掘で行った解析により得られた場合の天端沈下または内空変位である。しかし、実際は支保の建込みにより、天端沈下および内空変位が δ_1 にまで抑制されており、この時の支保に作用する圧力は p_1 と算定できる。これを支保への作用荷重と考えた。また、 p_1/p_0 の値が、作用している荷重の初期土圧に対する比と考えることができる。支保の変形特性曲線については応力解放率を30%と仮定したため、図中の δ_2 、すなわち、上半の応力が30%解放されている時の変位より支保の変形が発生し、それ以降の圧力が支保に作用すると考えた。なお、掘削直後に地山が解放されてから δ_2 に達するまでは実際の施工では計測値には含まれないことになり、実際に施工中に計測されている変位量の値は $\delta_1 - \delta_2$ であると考えることができる。

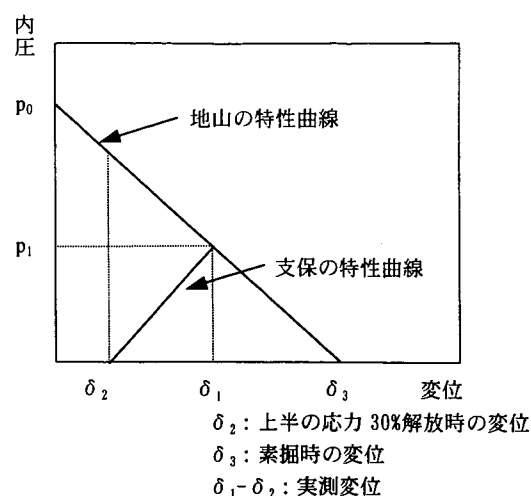


図-2.2 地山特性曲線による内圧の算定

2.3 切羽観察結果との関連性

実際の施工では日常の変位計測と同時に切羽の観察が行われている。そのときの観察結果の蓄積が以降の施工に及ぼす影響も大きいと考えられる。そこで本研究では計測された変位や有限要素解析による解析結果に基づく諸数値と、切羽観察の結果との関連性を検討した。すなわち、切羽観察の結果の指標および指標の数値毎に計測結果と解析結果の値の分布を算定し、関連性を検討することとした。観察結果の指標については、土圧による変状に関係する指標のうち、影響が大きいと報告⁹されている表-2.7に示した各指標について比較を行うこととした。また指標の数値は1～4の4段階で考えることとし、数値が小さいほど良好な地山であると考えることが出来る。

表-2.7 切羽観察表での指標

評価指標	圧縮強度 (MPa)	風化変質	割目の状態
1	$\sigma \geq 100$	なし・健全	密着
2	20～100	強度やや低下	部分的に開口
3	5～20	強度相当に低下	開口
4	$\sigma < 5$	破碎・未固結	未固結

2.4 原位置試験との関連性

トンネルの通常の施工時においては、計測 A に示される内空断面の変位計測と上述の切羽観察による管理が一般的である。しかし、計測 A は数値として表れるのに対し、切羽観察は多項目を現場技術者の経験によって記載することが多い。そのため、より客観的な指標で、しかも簡便な方法で切羽を観察する手法が検討されている。代表的な例として、切羽面内の任意の点としての圧縮強度の評価に用いられるロックシュ

ミットハンマー試験や、切羽近傍の岩石によって圧縮強度等の評価に用いられるポイントロード試験、特に軟質系の地山において、地山の圧縮強度を判定する針貫入試験、さらに切羽側の地山状態を推定する切羽面における簡易弾性波試験といった試験が挙げられる。

ここでは、表-2.2に示されるトンネルのうち、代表的なトンネルにおいて、ポイントロード試験やロックシュミットハンマー試験を実施した。それらによって得られた試験結果をもとに原位置試験による地山の弾性係数を算定し、その変化の傾向と有限要素解析による見かけの弾性係数の変化の傾向と比較した。

3. 変位計測結果

3.1 変位と土被りの関係

3.1.1 変位率と等価土被り厚

岩種分類毎の変位の分布の比較は表-2.1の岩種毎の分類に基づいて検討することとした。

各トンネルにおいて、天端沈下および内空変位の収束値が計測されている。しかしその掘削されているトンネルはトンネル自体の大きさや形状が若干異なるため、天端沈下および内空変位の値を直接比較した場合は、断面の大きさ等の影響を無視することになる。そこで本研究では変位率と称し、天端沈下および内空変位の値を無次元化して比較を行うこととした。具体的には、天端沈下を掘削幅の半分で除した天端変位率、内空変位を掘削幅で除した内空変位率を式(3.1)や式(3.2)に示すように算定して比較に用いた。すなわち、

$$\varepsilon_v = \frac{\delta_v}{0.5B} \quad \cdots \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_h = \frac{\delta_h}{B} \quad \cdots \quad (3.2)$$

ここに、

- ε_v : 天端変位率
- δ_v : 計測された天端沈下の収束値
- ε_h : 内空変位率
- δ_h : 計測された内空変位の収束値
- B : スプリングラインにおける掘削幅

である。

また、同様に土被りについても、断面の大きさによる影響を低減させるために、変位率と同様に無次元化を行うことにより比較することとした。すなわち、土被りを掘削幅で除した H/B を等価な土被り厚として算定して比較を行った。

3.1.2 岩種毎の変位率- H/B の関係

前項で定義した変位率等を用い、表-2.1に基づき、通常程度の土被りを持つ地山と土被りの小さい地山について変位率と H/B の関係を考察した。それらについて述べる。

(1) 通常程度の土被りを持つ地山

図-3.1.1に、岩種毎に分類した天端変位率 ε_v - H/B の関係、さらに図-3.1.2~3.1.12に、 H/B を15以下

とし、さらに岩種毎に分類した図を示す。これらより、堆積岩について考えると、泥岩についてはばらつきが大きく、 ε_v の最大値が3%程度に達するものも見受けられる。頁岩については、土被りが小さい部分で2%程度に達するデータがある。砂岩では概ね0.5%以下で分布していることが分かる。粘板岩や凝灰岩については1%に達しているものもあると考えることが出来る。次に火成岩である安山岩、斑岩および花崗岩については土被りが小さい一部のデータを除いて、最大値で0.5%程度と考えることが出来る。変成岩については、片麻岩は ε_v が小さいものの、片岩や蛇紋岩については最大値で2%程度に達しているものもあり、また値の平均も高い傾向が見受けられる。以上より、天端変位率に着目すると、土被り厚に無関係で、最大0.5%程度の天端変位率であると考えられる砂岩、安山岩、斑岩、花崗岩および片麻岩、また、土被り厚が増加すると天端変位率が増加してくる傾向があり、最大で1%程度の粘板岩および凝灰岩、さらに土被り厚に無関係で、最大では2%以上といった大きな天端変位率をとると考えられる泥岩、頁岩、片岩および蛇紋岩といったように傾向としては大きく3つに分類できる。

次に図-3.2.1に、岩種毎に分類した内空変位率 ε_h -H/Bの関係、さらに図-3.2.2~3.2.12に、H/Bを15以下とし、さらに岩種毎に分類した図を示す。これより ε_h については ε_v よりも若干低めとなっていることが多いものの、傾向としては ε_v の場合と概ね同一になっていると考えられる。堆積岩については、砂岩では低めであり、また頁岩についても ε_h は低めになっていた。凝灰岩では砂岩や頁岩に比較すると ε_h は高いが、全体的な値としては若干小さめになっていることが分かる。粘板岩については、最大で1%程度となっていた。また泥岩については、値は ε_v より小さいが値の分布の傾向はほぼ同一でばらつきは大きい。火成岩については傾向は ε_v の場合と概ね同様と考えることができ、安山岩、斑岩および花崗岩とも最大値で0.5%程度と考えられる。また、変成岩についても ε_v の場合と傾向は概ね同一で、片岩および蛇紋岩はばらつきが大きく最大で2%程度に達するデータもあるが、片麻岩の最大値は低い傾向が見られた。

次に図-3.3.1に、岩種毎に分類した内空変位 $\div$ (2 $\times$ 天端変位)(以降 $\varepsilon_h/\varepsilon_v$ と記す)、すなわち変位の実測値に基づく側圧の強弱の程度とH/Bの関係、さらに図-3.3.2~3.3.12に、H/Bを15以下とし、さらに岩種毎に分類した図を示す。これらの図からは、砂岩、安山岩、斑岩、花崗岩および片麻岩がほとんどのデータで1.0以下になっていると考えられる。また泥岩、頁岩、粘板岩および凝灰岩については1.0以下のデータも多いが、一部で値が大きいデータも見受けられる。また、片岩や蛇紋岩については逆に値が小さいものも大きいものも少なく、天端沈下と内空変位がほぼ同一の値、概ね1.0付近を中心とした分布になっていると考えられる。

以上のグラフから総合すると、岩種毎の傾向で3つの地山のグループに分けられる。第一に、砂岩、安山岩、斑岩、花崗岩および片麻岩に見られるように、土被り厚の変化と変位の変化がほぼ無関係で変位の値も小さいと考えられる①変位の小さい岩石から成るグループ、第二に粘板岩や凝灰岩に見られるように土被り厚が小さい場合の変位は大きくはないものの、土被り厚が増加してくると変位の最大値も若干ではあるが増加してくる②土被り厚が増加すると変位が増加する岩石から成るグループ、第三に蛇紋岩や片岩といった変成岩や軟岩の中でも押し出しの強い泥岩や頁岩に見られるように、土被り厚が小さくても変位が大きく発生しており、またその傾向が土被り厚が増加しても変位が大きいといった③土被り厚に無関係で変位の大きい岩石から成るグループとで傾向が大別できると考えられる。これらのグループで分類した場合の天端変位率

ε_v 、内空変位率 ε_h 、および $\varepsilon_h/\varepsilon_v$ の変化をそれぞれ図-3.4.1~3.4.3、図-3.5.1~3.5.3、および図-3.6.1~3.6.3 に記す。 ε_v についてみると変位の小さい岩石のグループでは一部の土被りの小さい部分の花崗岩のデータを除くと最大で 0.5% 程度、変位が増加する岩石のグループでは最大で 1.5% 程度、変位の大きい岩石のグループでは最大で 3% 程度になっている。また、 ε_h についてみると変位の小さい岩石のグループでは最大で概ね 0.5% 程度、変位が増加する岩石のグループでは最大で 1% 程度、変位の大きい岩石のグループでは最大で 2% 程度になっている。 $\varepsilon_h/\varepsilon_v$ については大きく 2 つに傾向が分類でき、変位の小さい岩石のグループで大きく見ると 0~3 程度で大部分が 0~1 程度、また変位が増加する岩石のグループおよび変位の大きい岩石のグループで 0~5 程度であり、値のばらつきの度合いは両グループともに変位の小さい岩石のグループに比べて大きかった。

(2) 土被りが小さい地山

図-3.7 に、土被り小の沖積層・洪積層地山における天端変位率 ε_v - H/B の関係を示す。これらより天端変位率自体は小さく、また ε_v の分布は H/B に無関係である。また、図-3.8 に、内空変位率 ε_h - H/B の関係を示す。内空変位率は天端変位率の概ね半分程度の値で得られており、天端変位と内空変位の値自体は概ね同一の傾向であると考えられる。土被りが小さい断面では、明らかに断面直上からの変位のほうが大きいことが分かる。また、図-3.9 に $\varepsilon_h/\varepsilon_v$ と H/B の関係を示す。これより値が 1.0 以下となっている断面が多く、0.5 付近に多くのデータがあることが分かり、地山の變形は鉛直方向の變形が水平方向の變形よりも大きく発生していることが分かる。

3.2 連続体地山と不連続体地山

トンネル地山の挙動は一概には言えないものの、近似的に連続体地山と不連続体地山に大別できると考えられる。計測結果による変位に着目して考えた場合、前者の場合は、地山の弾性係数が一定であれば変位と土被りの関係が概ね線形の関係にあり、後者は線形の関係とは言い難い場合である。特に後者については、2 つに分けられ、土被りが大きくなっても変位が増加しない場合と、土被りが概ね一定の時でも変位が大きくばらつく場合である。土被りが大きくなっても変位が増加しない場合は、断面直上部の緩みによる影響が大きいと考えられる。

連続体地山の例として図-3.10.1、不連続体地山の例として、土被りが大きくなっても変位が増加しない場合を図-3.10.2、土被りがほぼ同一の場合でも変位が大きくばらつく傾向がある場合を図-3.10.3 に、それぞれ ε_h と H/B の関係を示す。

図-3.10.1 より、トンネル S-41 については若干ばらつきが大きい部分もあるものの、 H/B が増加するにつれて ε_h も増加していく傾向が分かり、またトンネル S-61 については、土被りの増加とともに ε_h がほぼ線形で増加していると考えることが出来ることから、連続体に近似できる挙動を示すと考えられる。また、図-3.10.2 からトンネル S-51 および S-54 については、土被りが増加しても変位が概ね一定の範囲内に含まれている傾向が見られる。また図-3.10.3 から、トンネル M-11 については、土被りが一定の場合でも内空変位

率は大きくばらついており、これらは蛇紋岩等の変成岩に多く見られる傾向と考えられる。連続体もしくは不連続体の挙動をとることが事前に判断することにより、それに応じたモデルを用いて支保に作用する荷重の評価が容易になると考えられるものの、これらの分類については同一の岩種でも異なる傾向を示すことがあることから、さらにデータを蓄積して検討を重ねる必要がある。

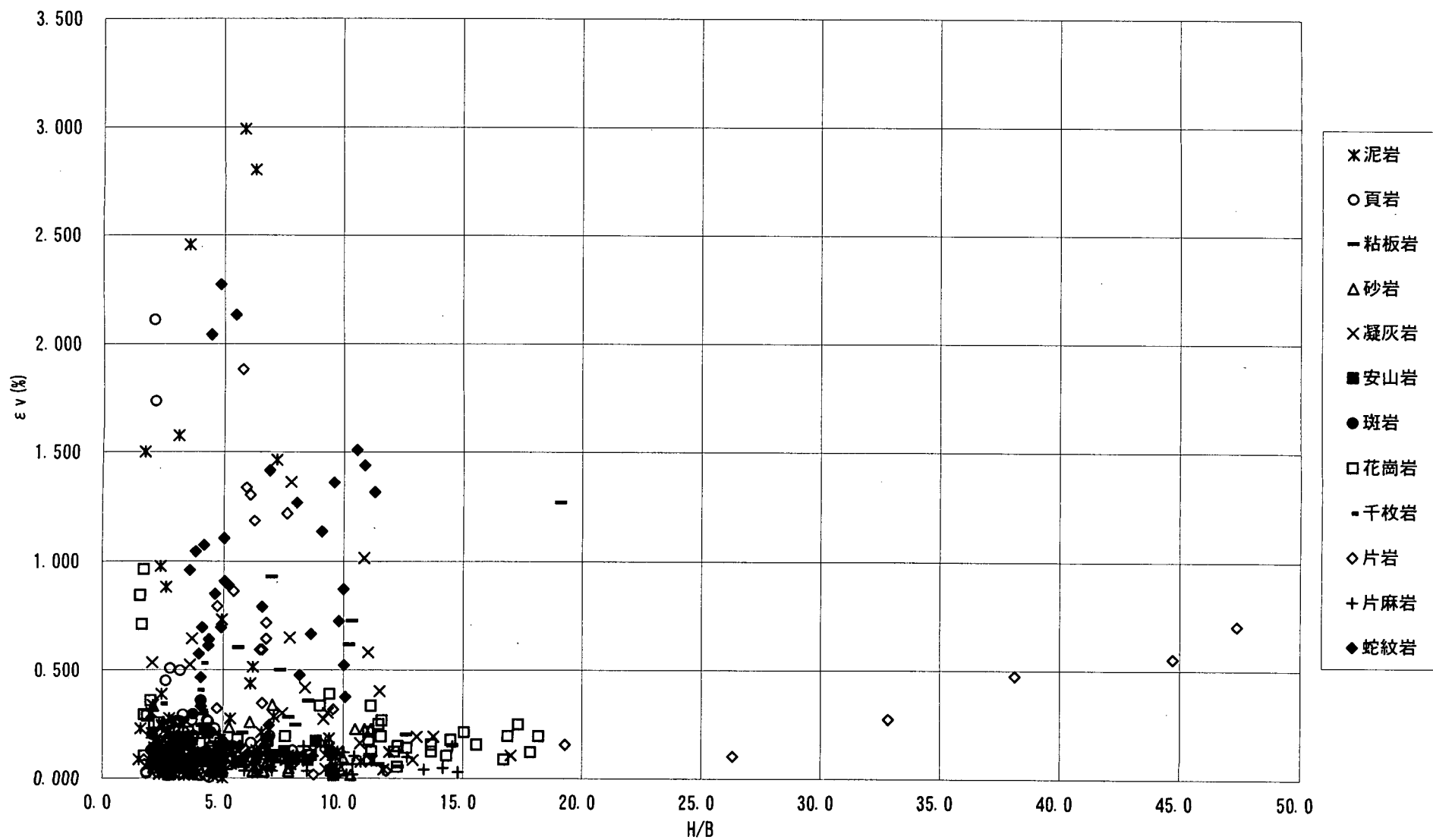


圖-3.1.1 天端變位率 $\varepsilon_{v-H/B}$ (全岩種)

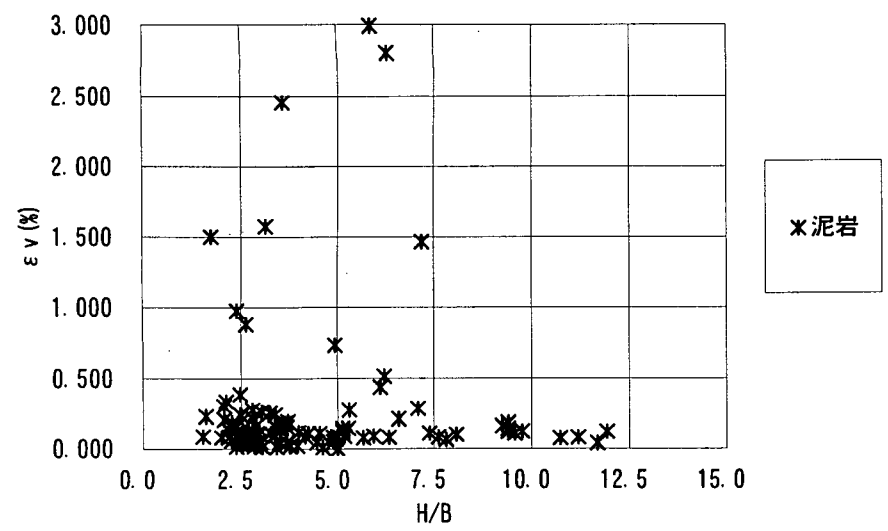


图-3.1.2 天端变位率 ϵ_v -H/B (泥岩)

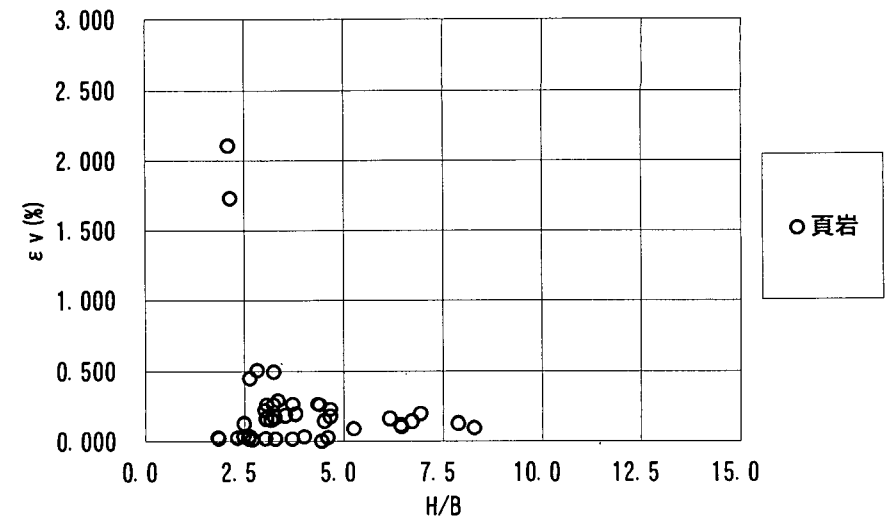


图-3.1.3 天端变位率 ϵ_v -H/B (頁岩)

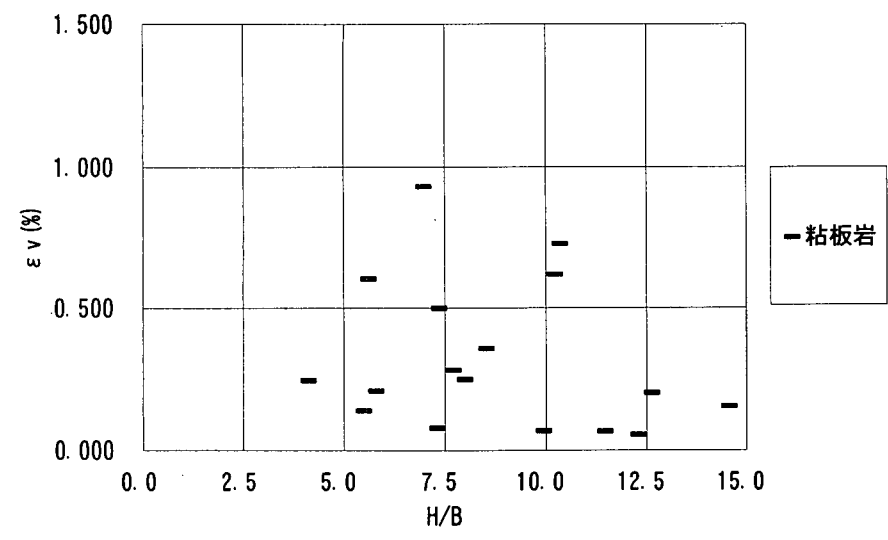


图-3.1.4 天端变位率 ϵ_v -H/B (粘板岩)

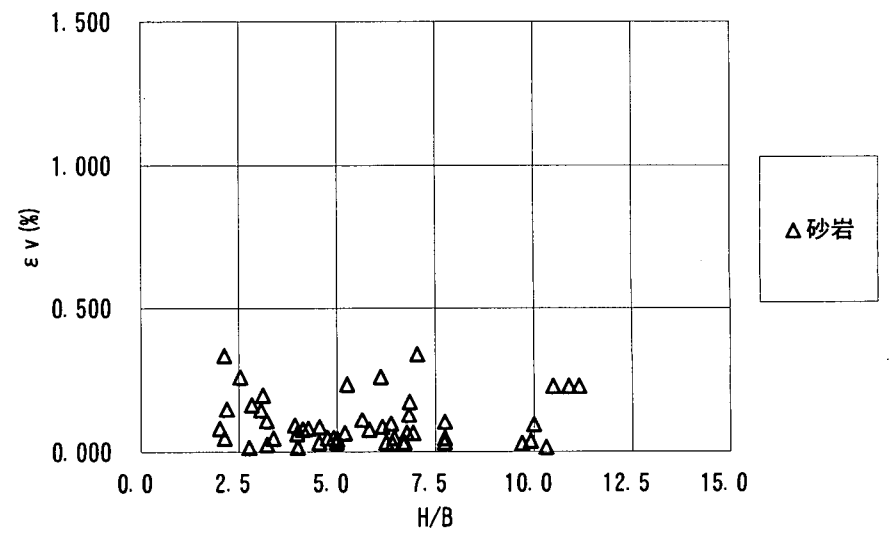


图-3.1.5 天端变位率 ϵ_v -H/B (砂岩)

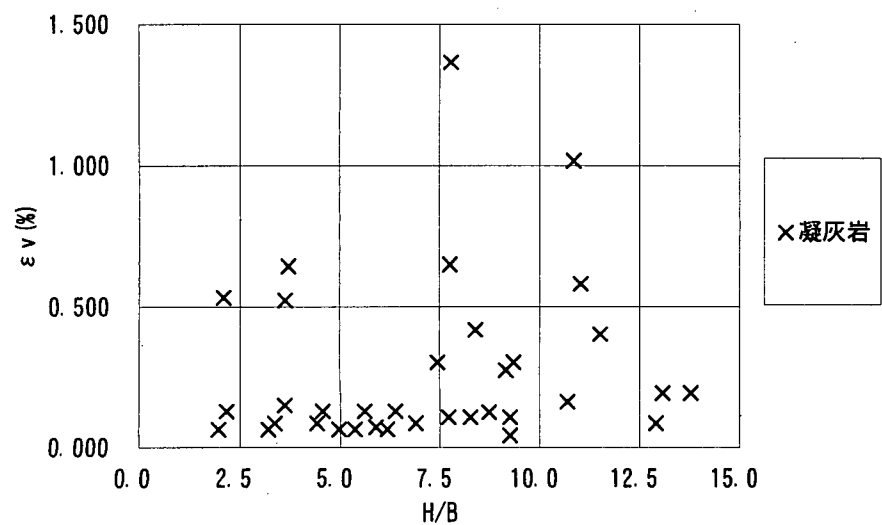


图-3.1.6 天端变位率 ε_v - H/B (凝灰岩)

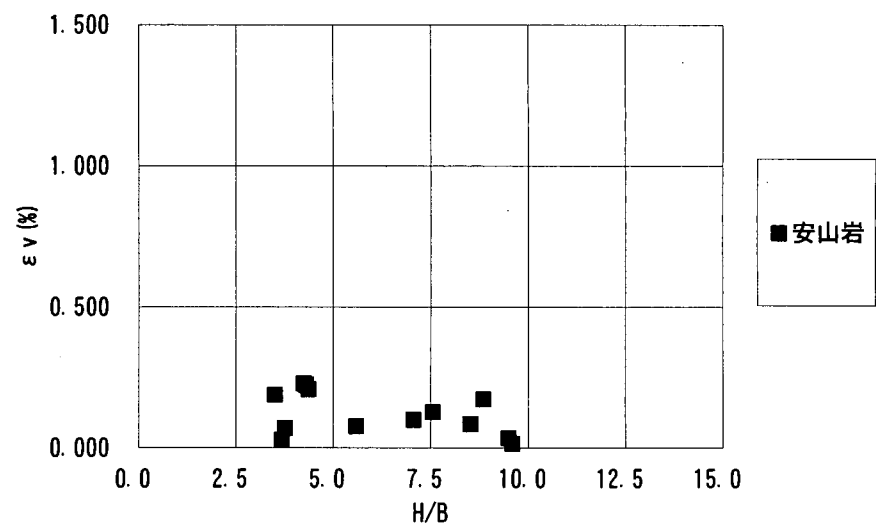


图-3.1.7 天端变位率 ε_v - H/B (安山岩)

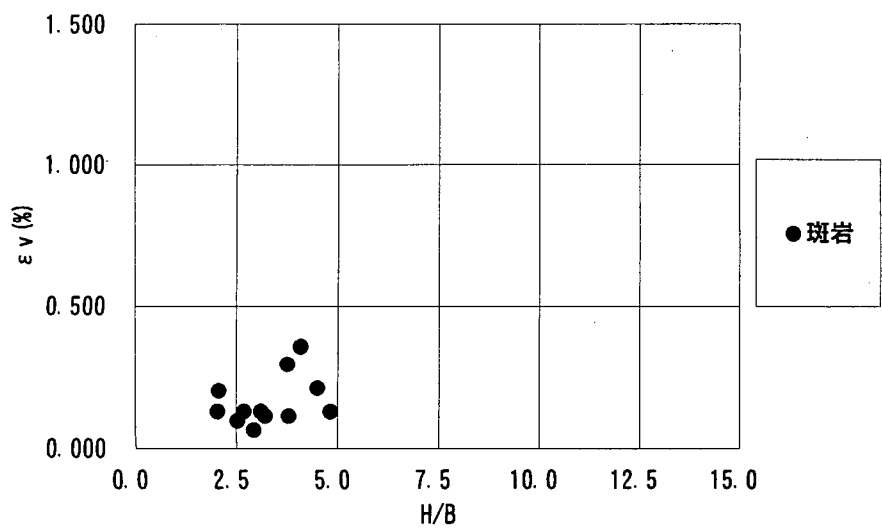


图-3.1.8 天端变位率 ε_v - H/B (斑岩)

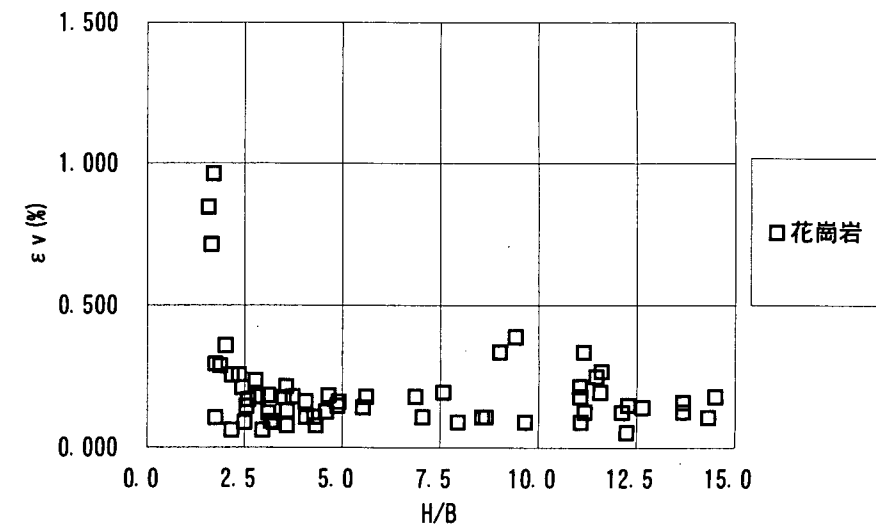


图-3.1.9 天端变位率 ε_v - H/B (花岗岩)

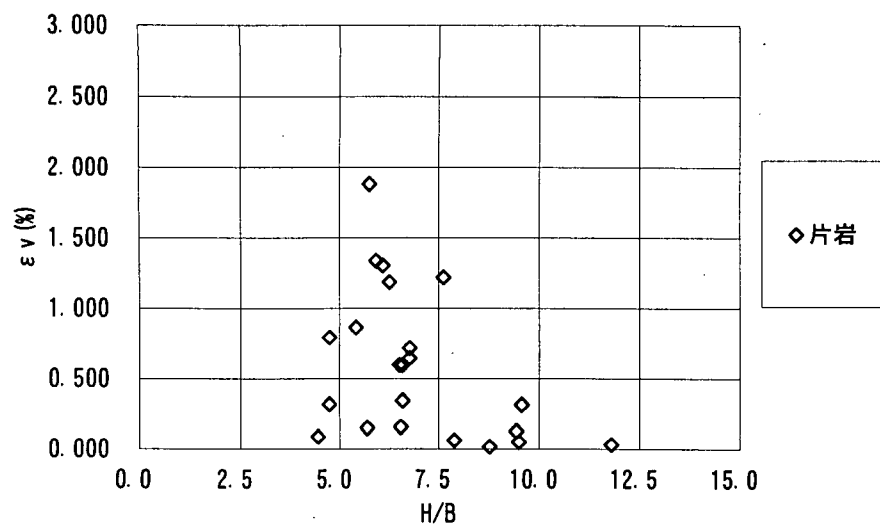


图-3.1.10 天端变位率 ε_v -H/B (片岩)

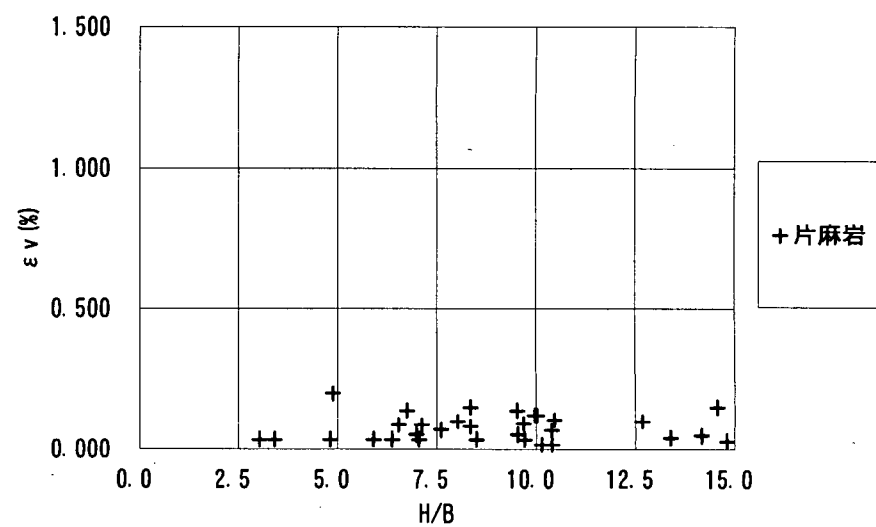


图-3.1.11 天端变位率 ε_v -H/B (片麻岩)

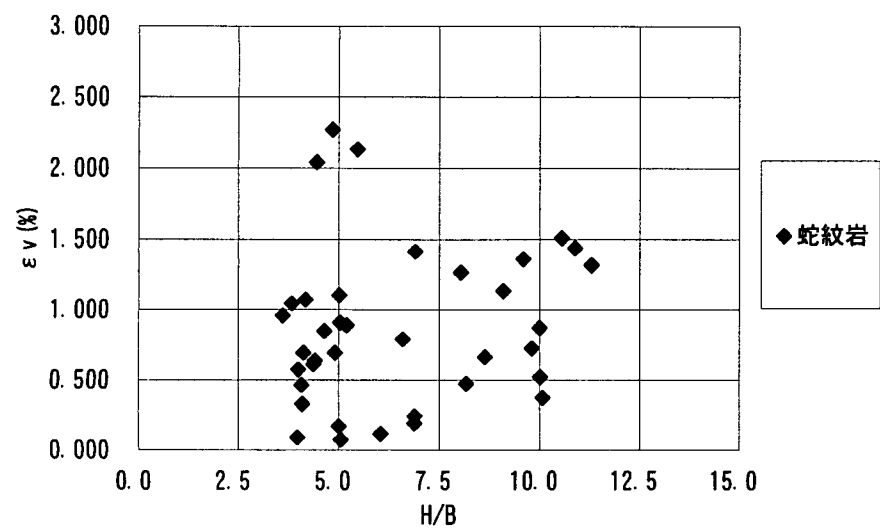


图-3.1.12 天端变位率 ε_v -H/B (蛇纹岩)

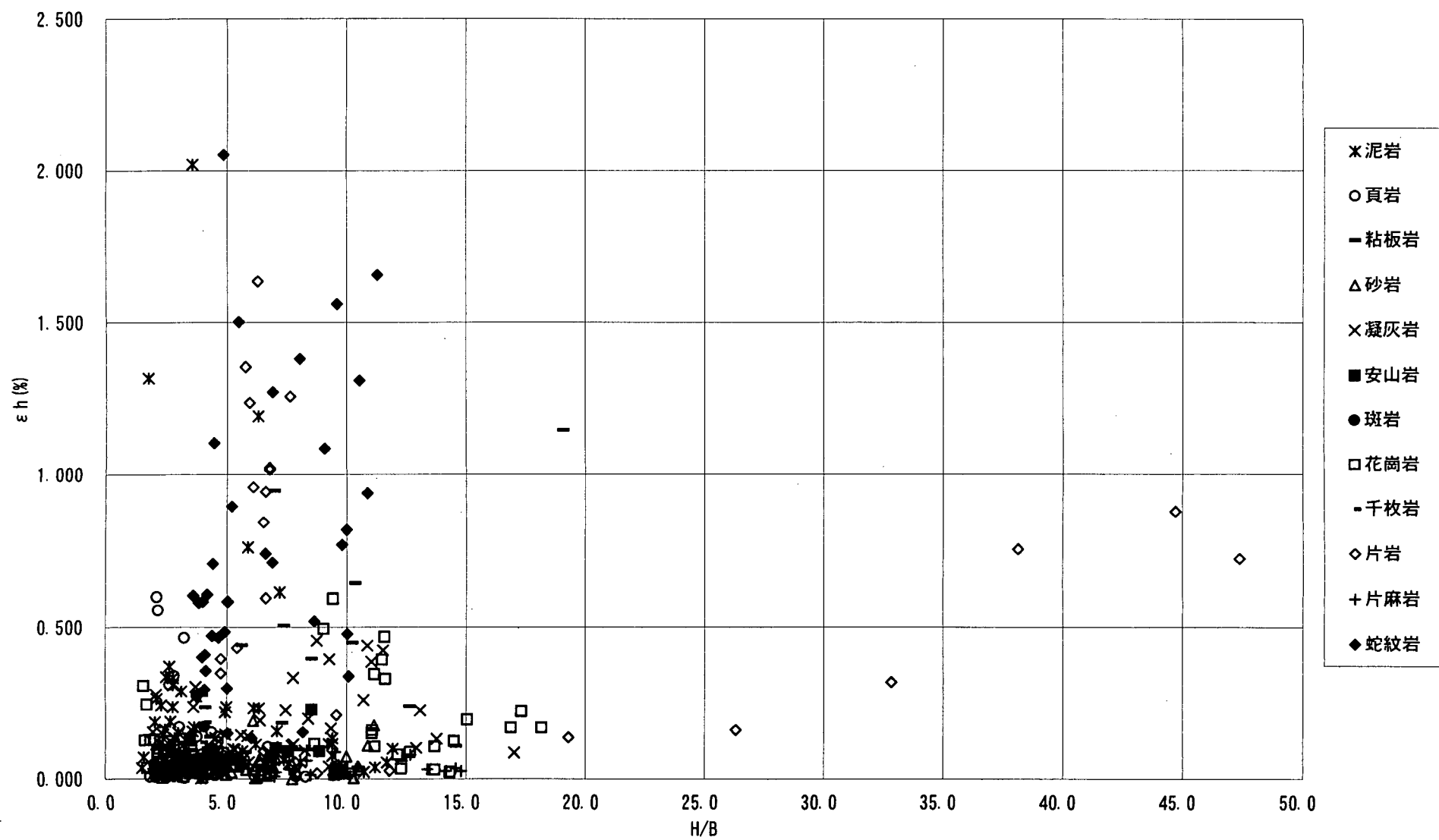


图-3.2.1 内空变位率 ϵ_h - H/B (全岩種)

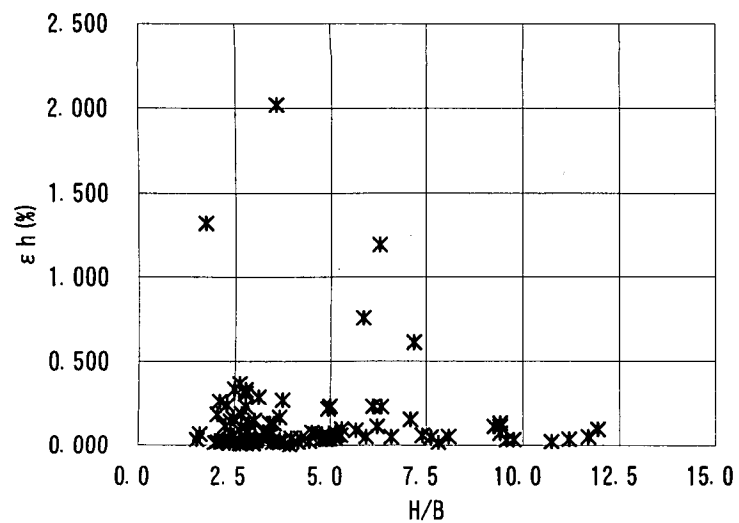


图-3.2.2 内空变位率 $\varepsilon_{h-H/B}$ (泥岩)

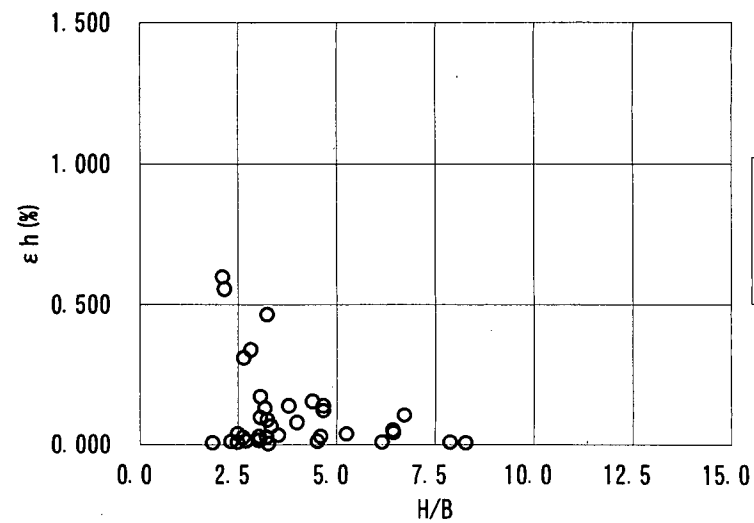


图-3.2.3 内空变位率 $\varepsilon_{h-H/B}$ (頁岩)

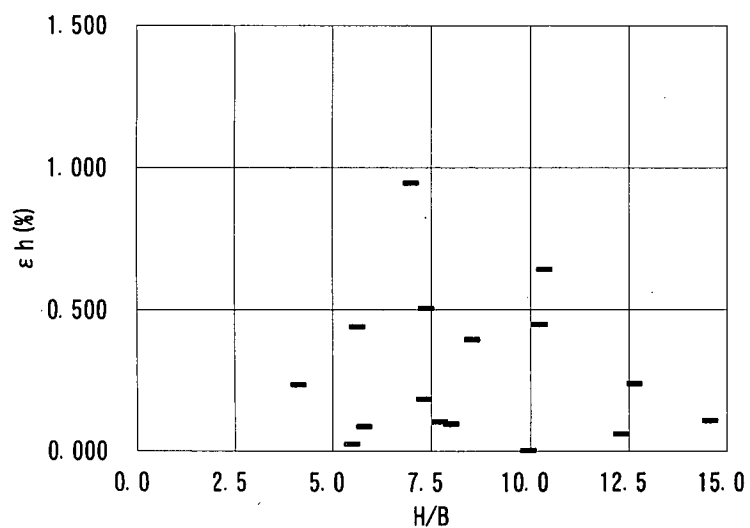


图-3.2.4 内空变位率 $\varepsilon_{h-H/B}$ (粘板岩)

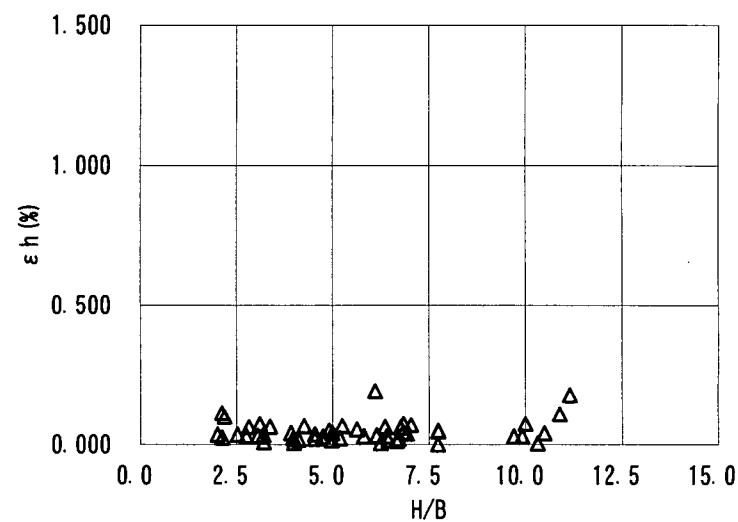


图-3.2.5 内空变位率 $\varepsilon_{h-H/B}$ (砂岩)

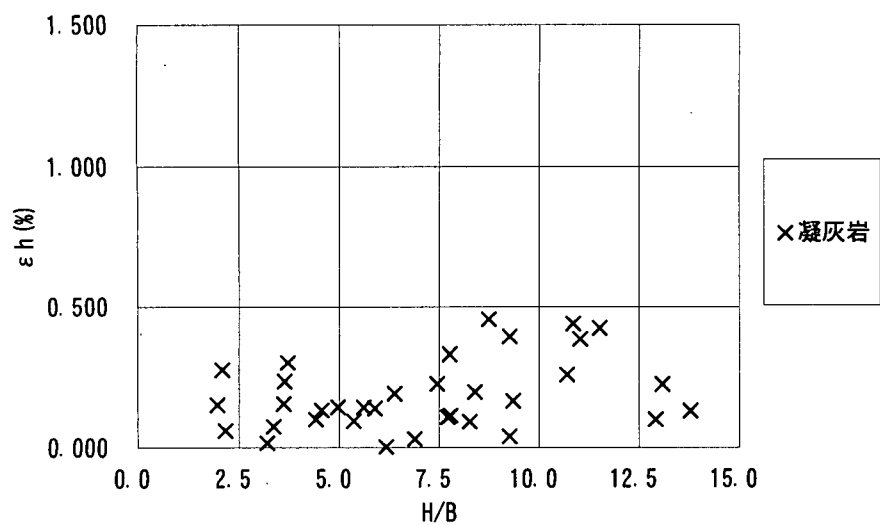


图-3. 2. 6 内空变位率 ε_h -H/B (凝灰岩)

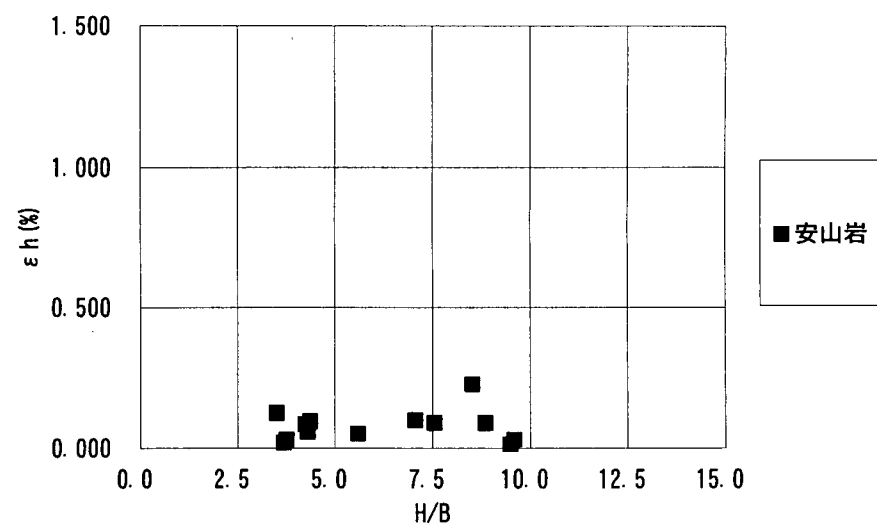


图-3. 2. 7 内空变位率 ε_h -H/B (安山岩)

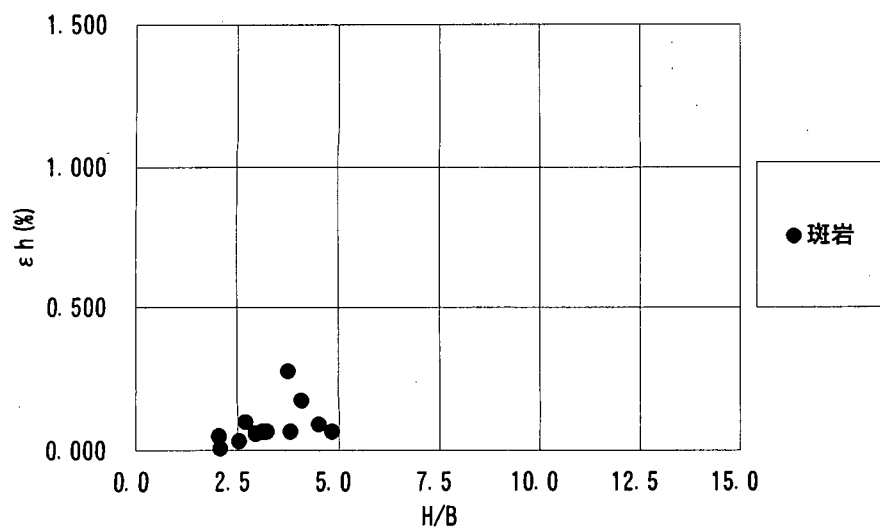


图-3. 2. 8 内空变位率 ε_h -H/B (斑岩)

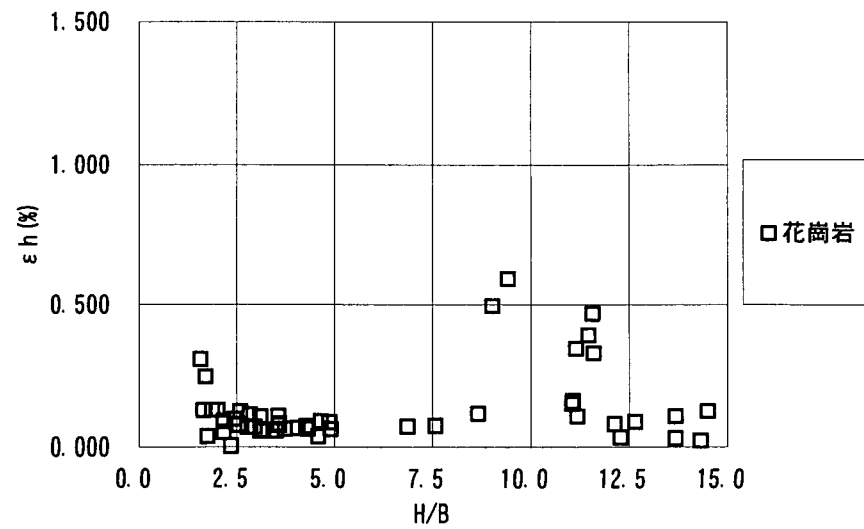


图-3. 2. 9 内空变位率 ε_h -H/B (花岗岩)

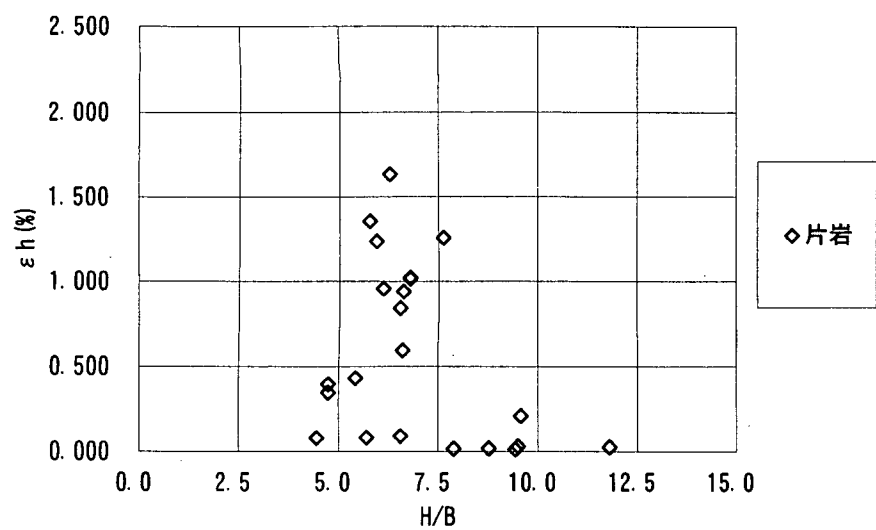


图-3.2.10 内空变位率 $\varepsilon_{h-H/B}$ (片岩)

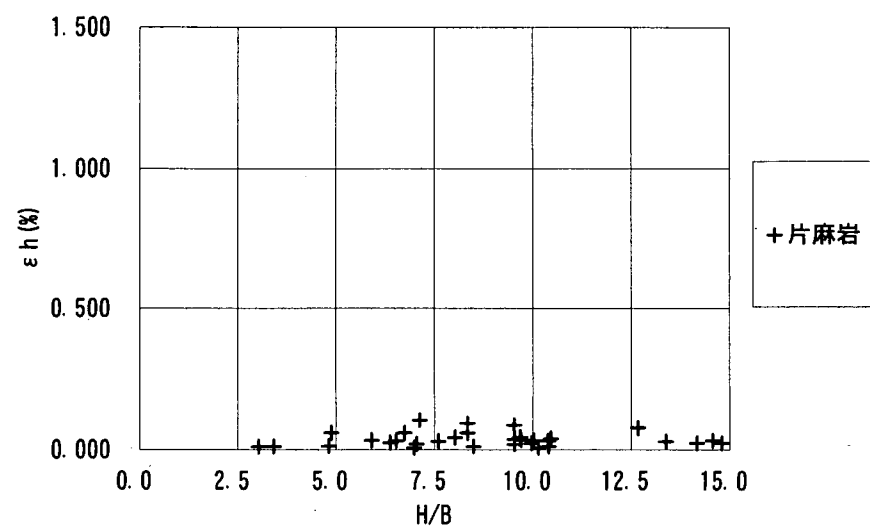


图-3.2.11 内空变位率 $\varepsilon_{h-H/B}$ (片麻岩)

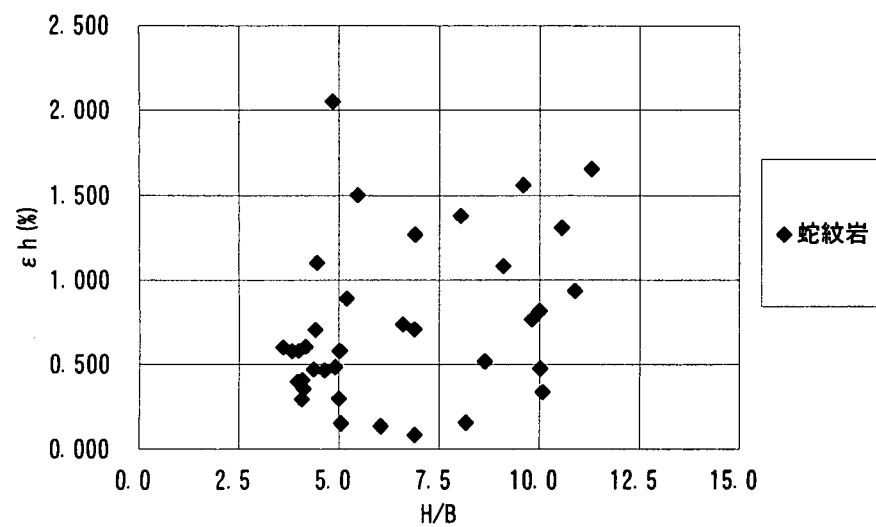


图-3.2.12 内空变位率 $\varepsilon_{h-H/B}$ (蛇纹岩)

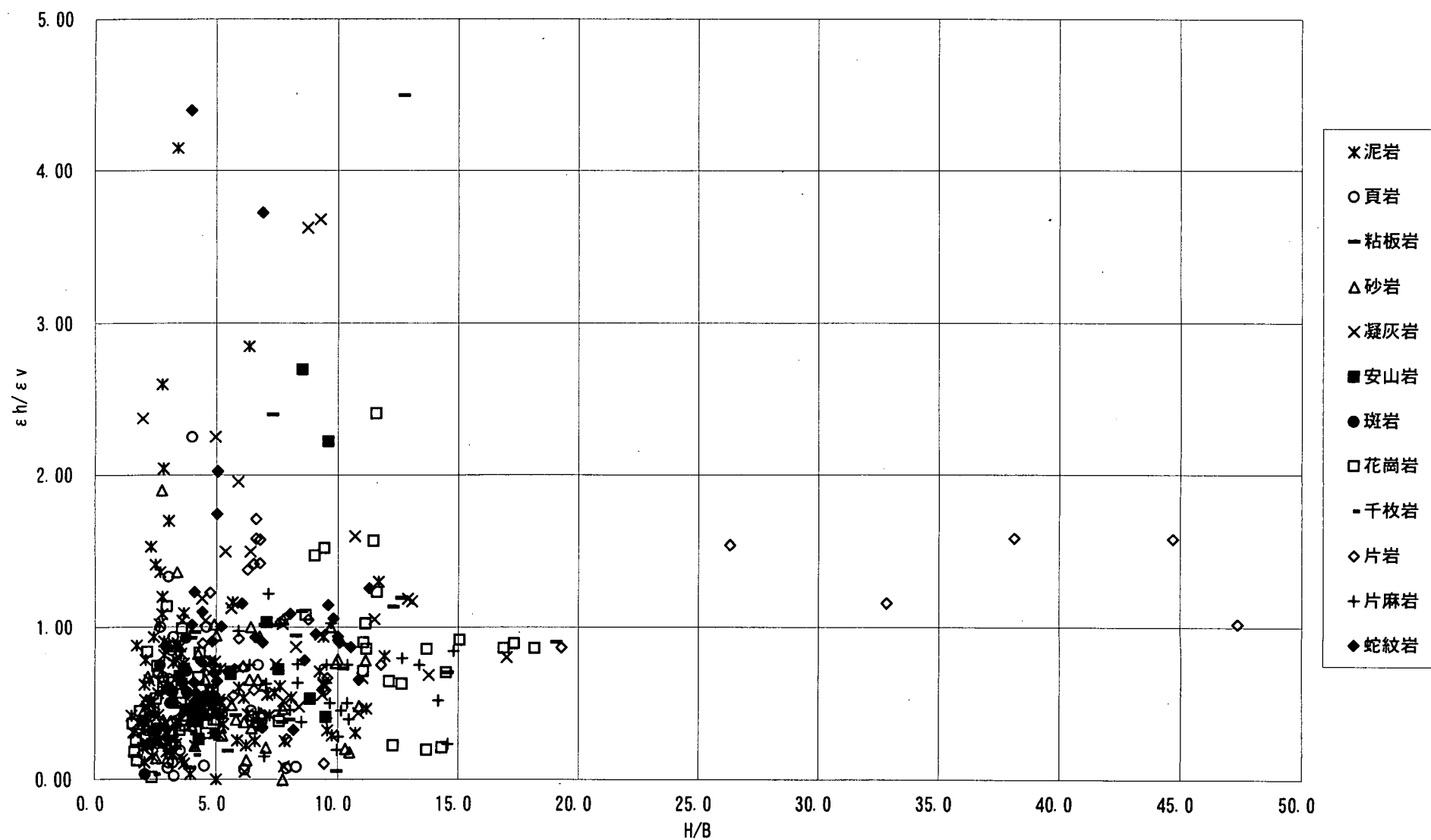


圖-3.3.1 $\epsilon_h/\epsilon_v-H/B$ (全岩種)

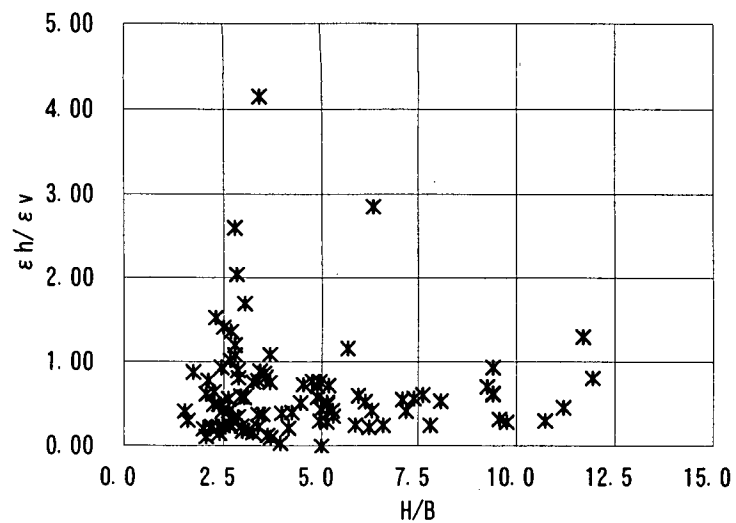


图-3.3.2 $\varepsilon_h/\varepsilon_v-H/B$ (泥岩)

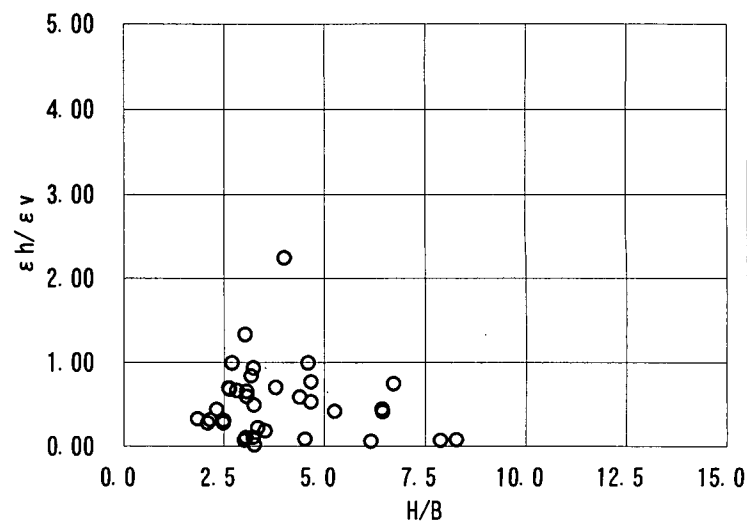


图-3.3.3 $\varepsilon_h/\varepsilon_v-H/B$ (頁岩)

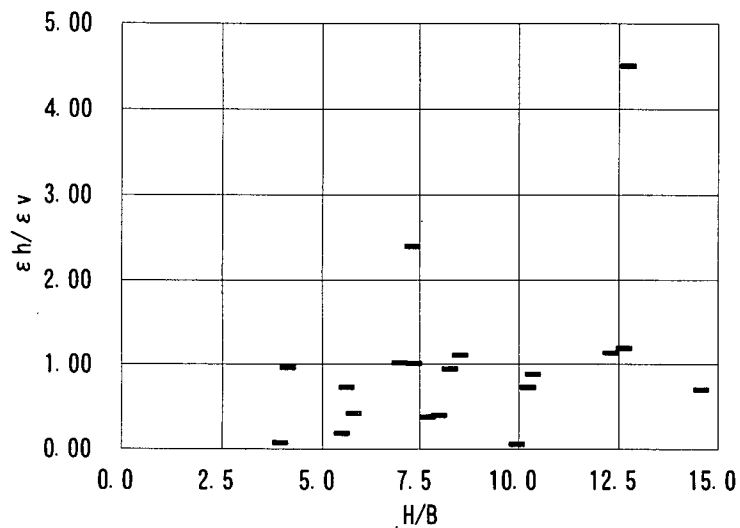


图-3.3.4 $\varepsilon_h/\varepsilon_v-H/B$ (粘板岩)

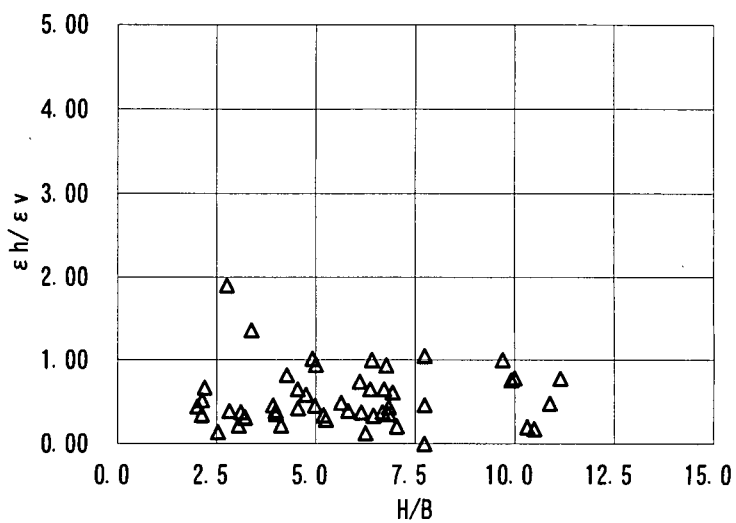


图-3.3.5 $\varepsilon_h/\varepsilon_v-H/B$ (砂岩)

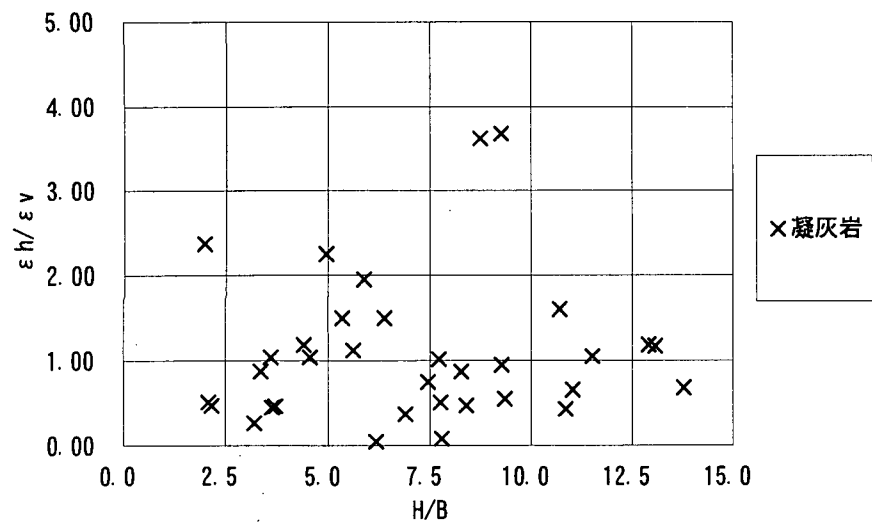


图-3.3.6 $\varepsilon_h/\varepsilon_v-H/B$ (凝灰岩)

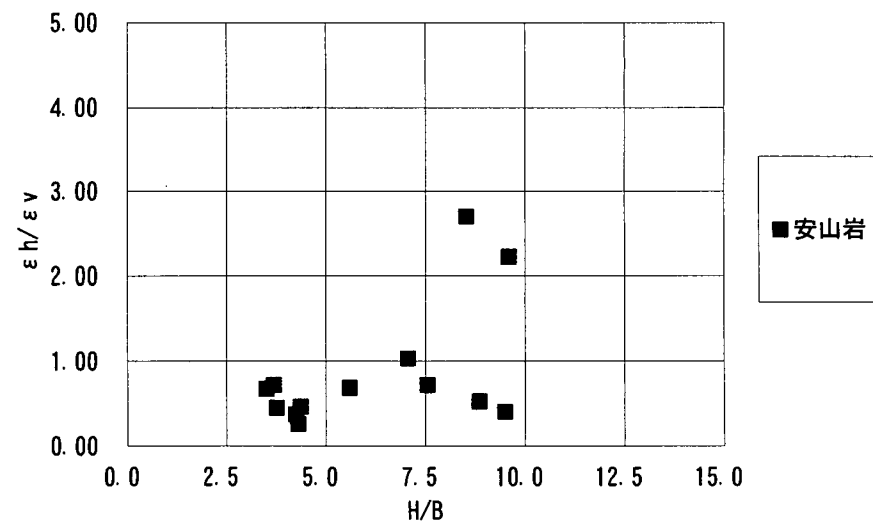


图-3.3.7 $\varepsilon_h/\varepsilon_v-H/B$ (安山岩)

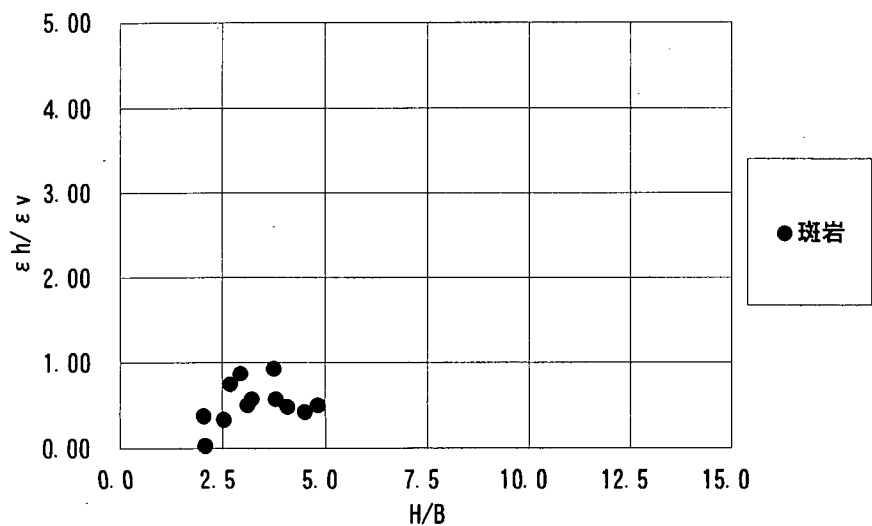


图-3.3.8 $\varepsilon_h/\varepsilon_v-H/B$ (斑岩)

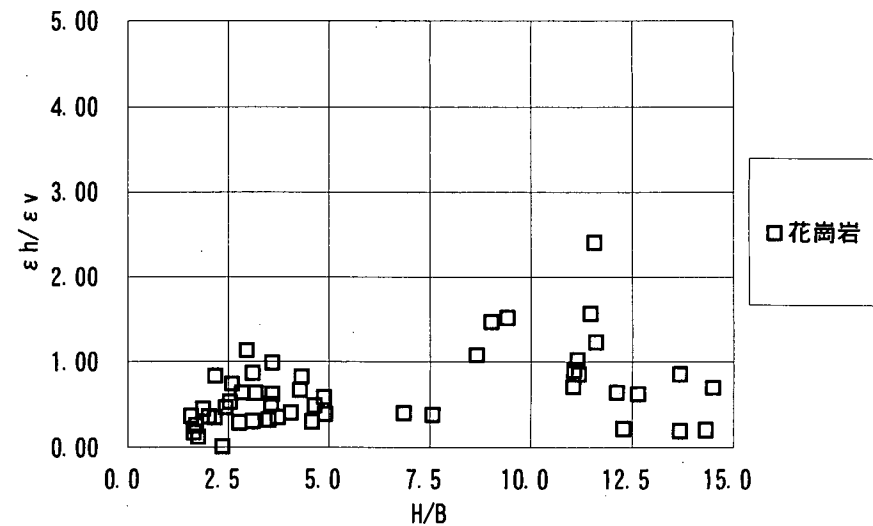


图-3.3.9 $\varepsilon_h/\varepsilon_v-H/B$ (花岗岩)

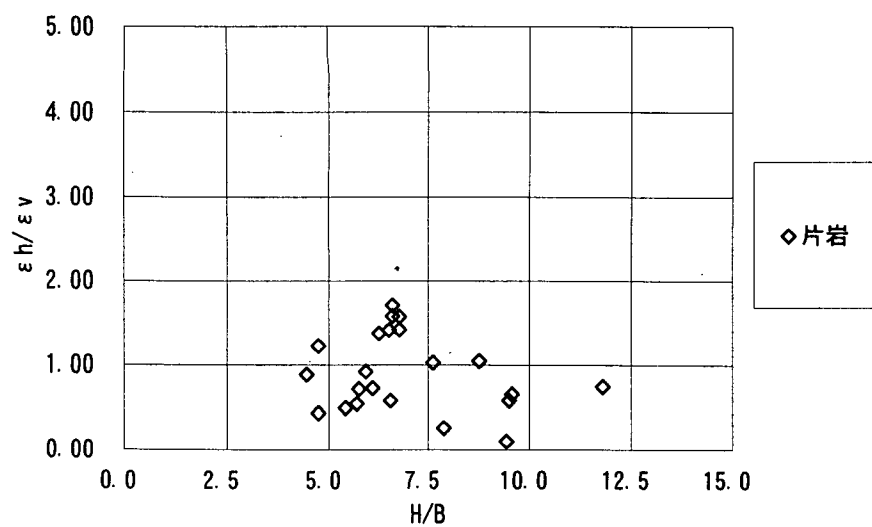


圖-3.3.10 $\epsilon_h/\epsilon_v-H/B$ (片岩)

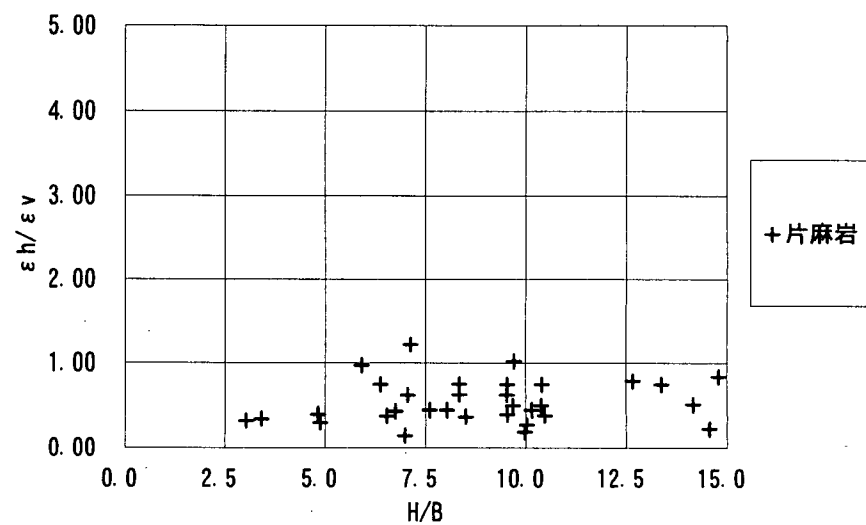


圖-3.3.11 $\epsilon_h/\epsilon_v-H/B$ (片麻岩)

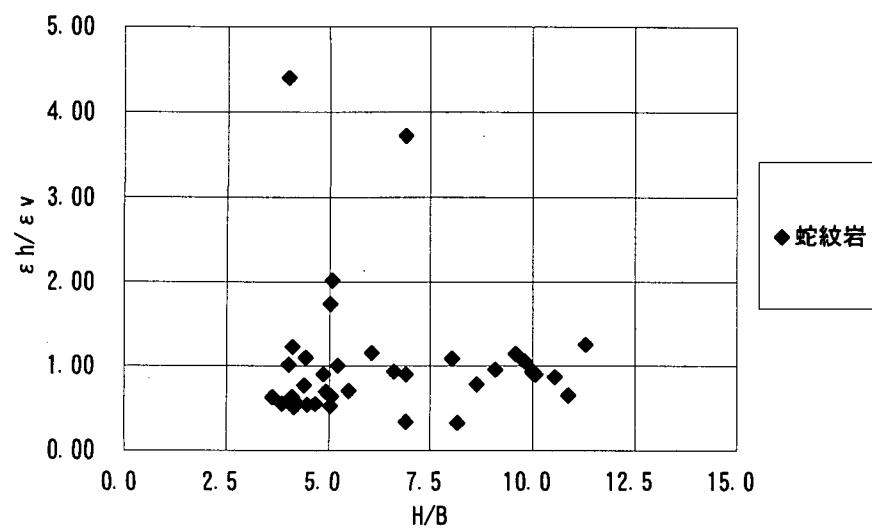


圖-3.3.12 $\epsilon_h/\epsilon_v-H/B$ (蛇紋岩)

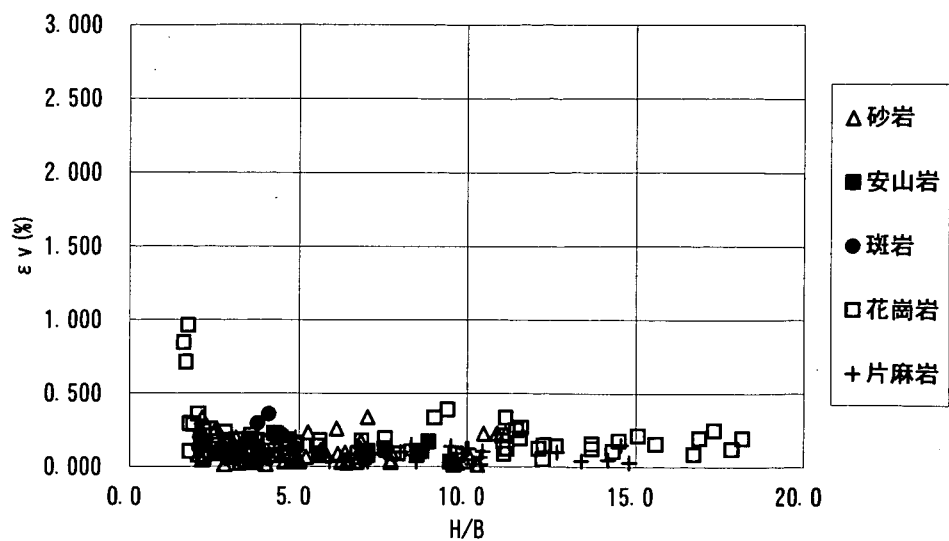


図-3. 4. 1 ε_v -H/B (変位の小さい岩石のグループ)

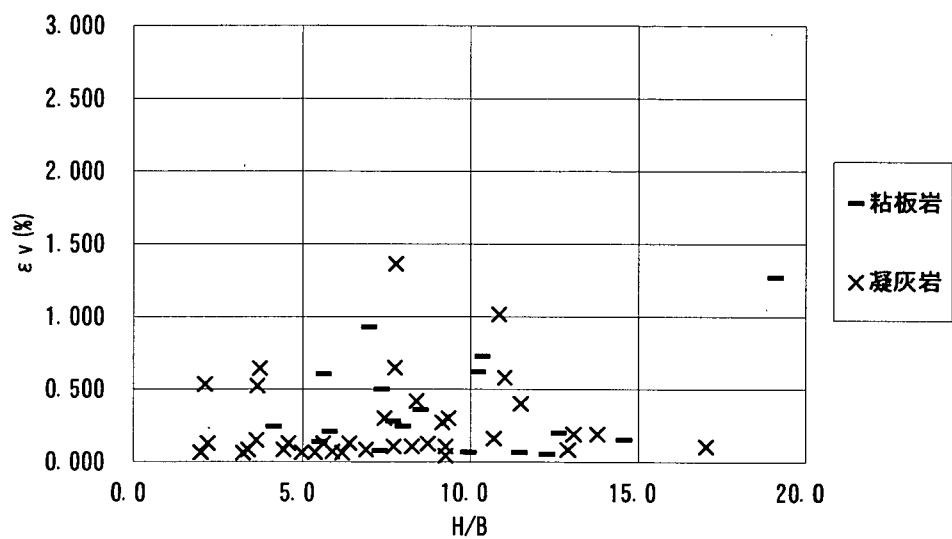


図-3. 4. 2 ε_v -H/B (変位が増加する岩石のグループ)

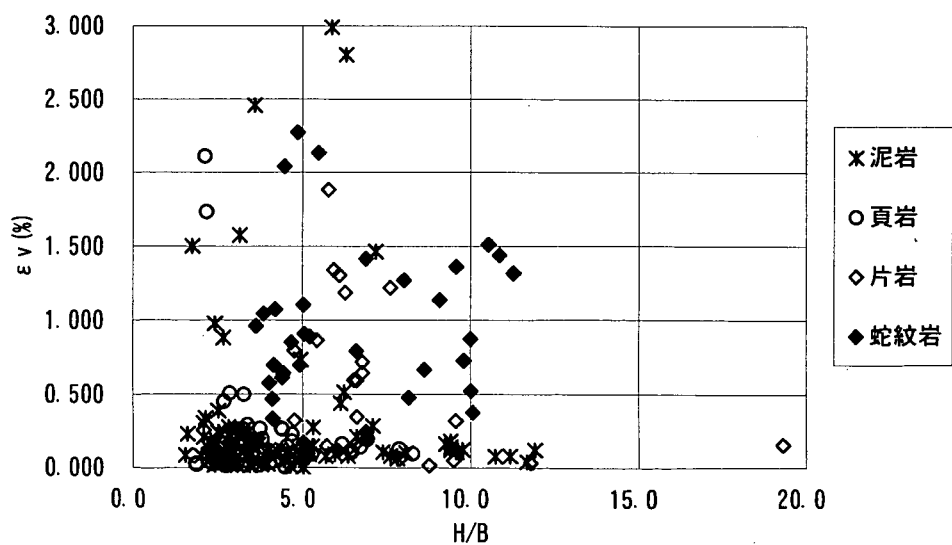


図-3. 4. 3 ε_v -H/B (変位の大きい岩石のグループ)

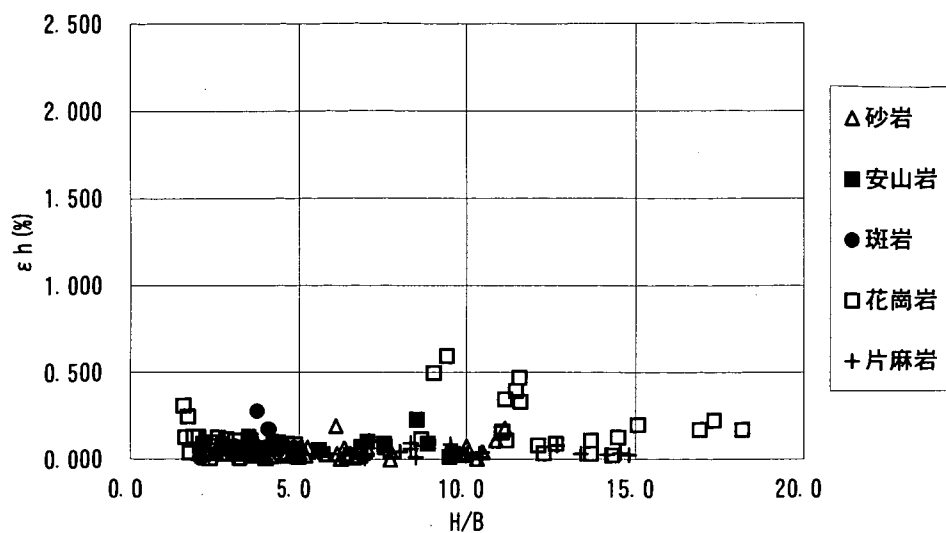


図-3. 5. 1 ϵ_h - H/B (変位の小さい岩石のグループ)

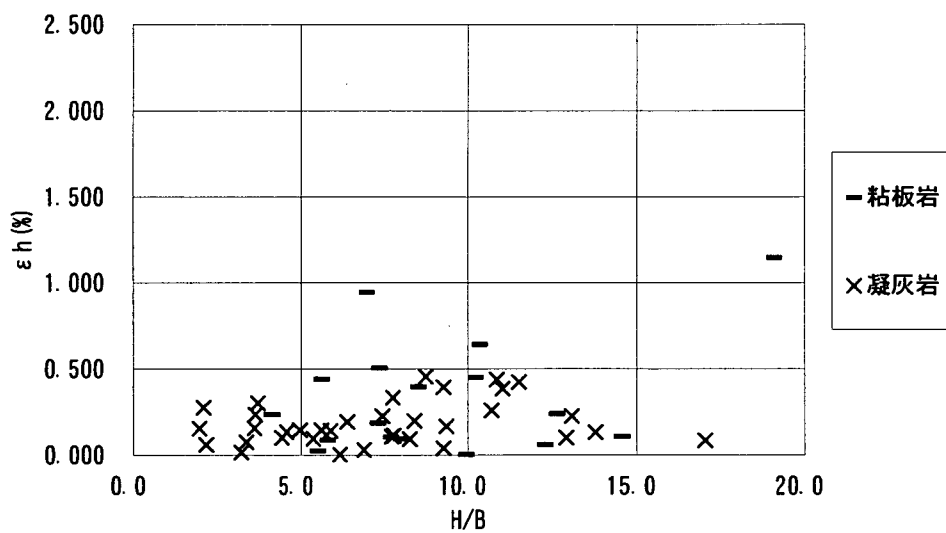


図-3. 5. 2 ϵ_h - H/B (変位が増加する岩石のグループ)

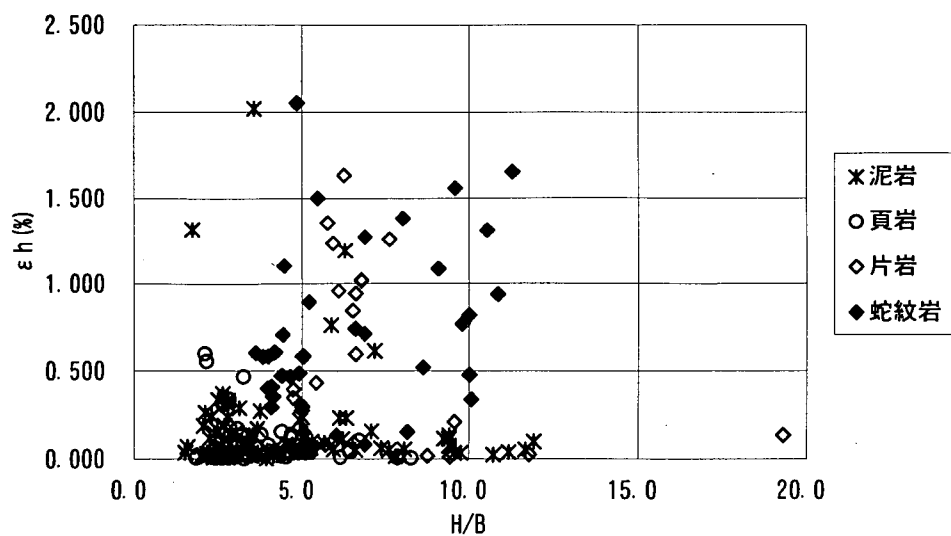


図-3. 5. 3 ϵ_h - H/B (変位の大きい岩石のグループ)

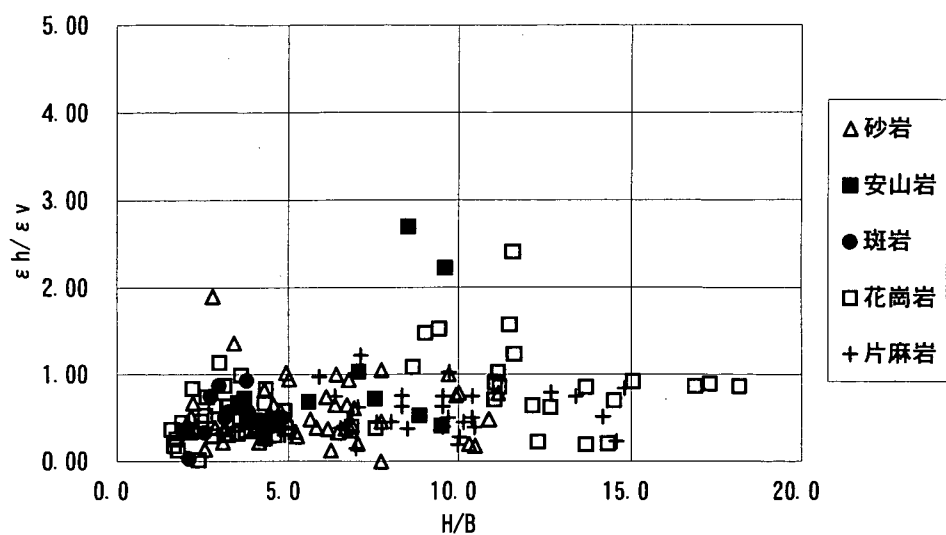


図-3. 6. 1 $\epsilon_h / \epsilon_v - H/B$ (変位の小さい岩石のグループ)

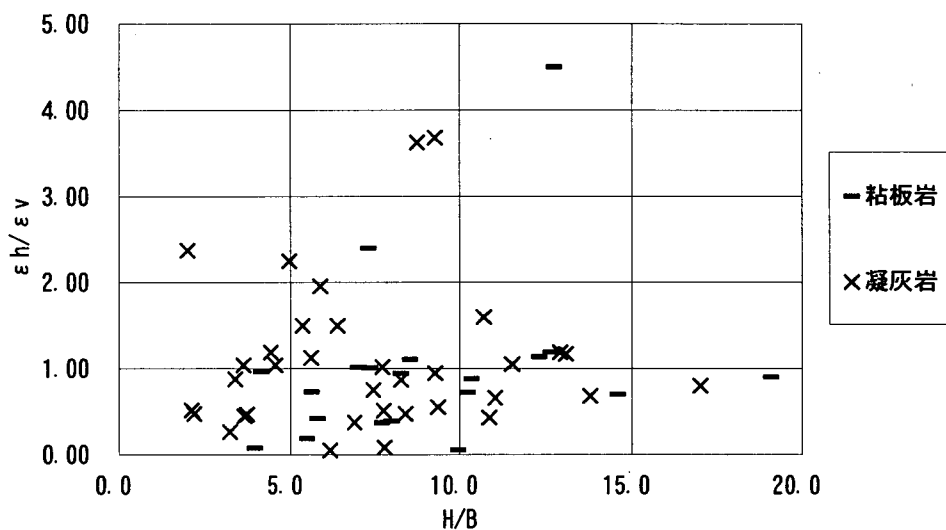


図-3. 6. 2 $\epsilon_h / \epsilon_v - H/B$ (変位が増加する岩石のグループ)

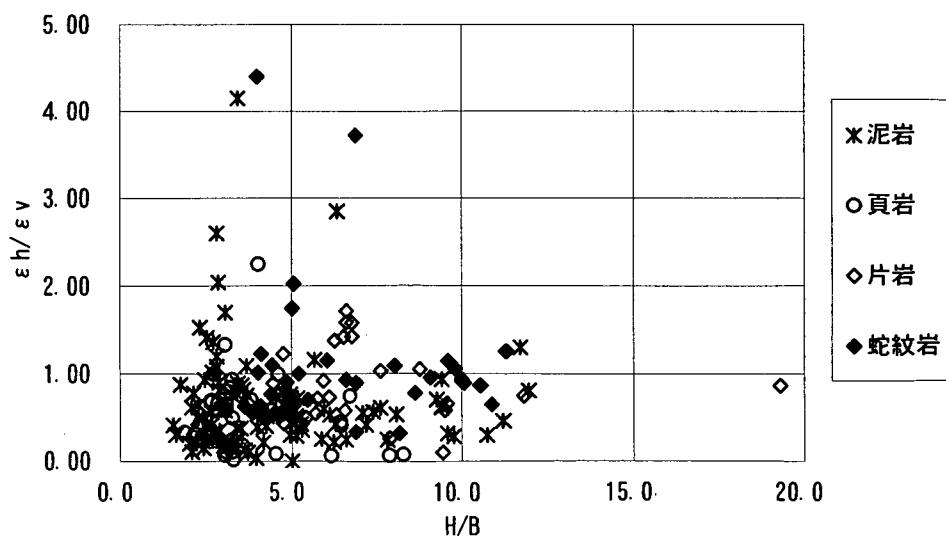


図-3. 6. 3 $\epsilon_h / \epsilon_v - H/B$ (変位の大きい岩石のグループ)

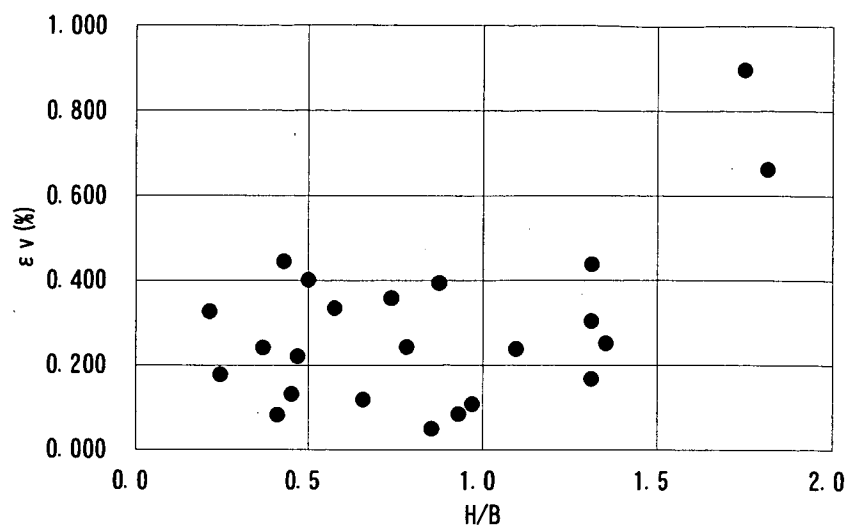


図-3.7 天端変位率 ε_v -H/B (土被り小の沖積層・洪積層地山)

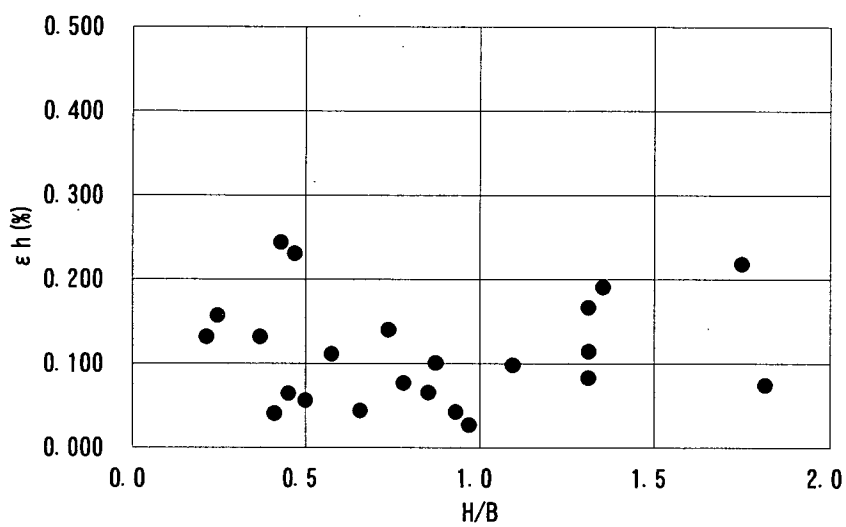


図-3.8 内空変位率 ε_h -H/B (土被り小の沖積層・洪積層地山)

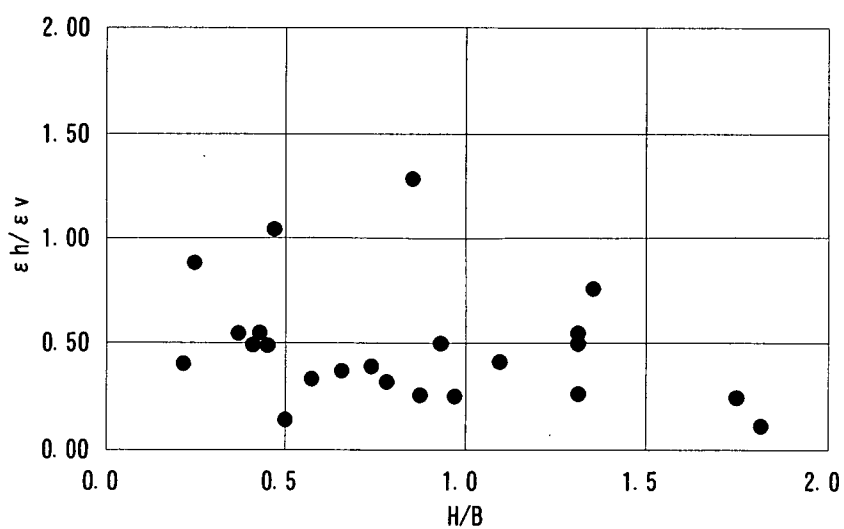


図-3.9 $\varepsilon_h / \varepsilon_v$ -H/B (土被り小の沖積層・洪積層地山)

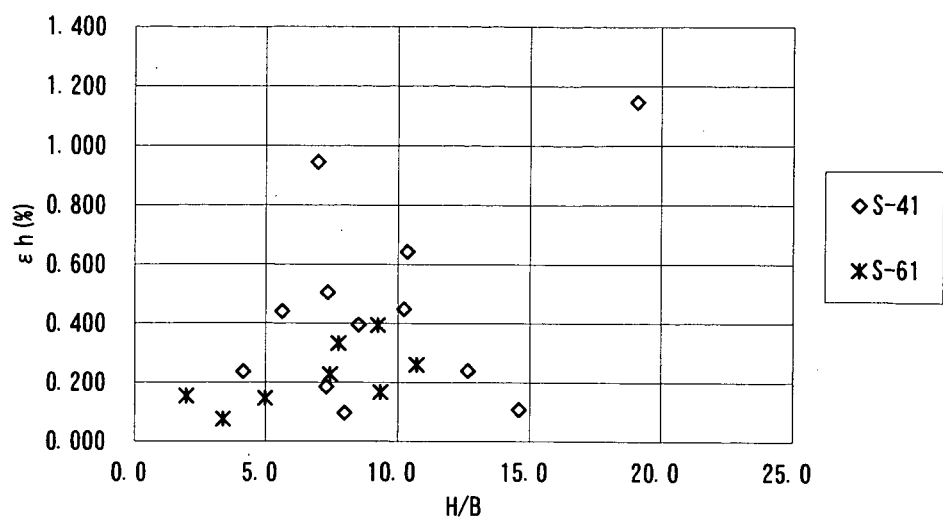


図-3.10.1 連続体地山の例 (内空変位率 ϵ_h - H/B)

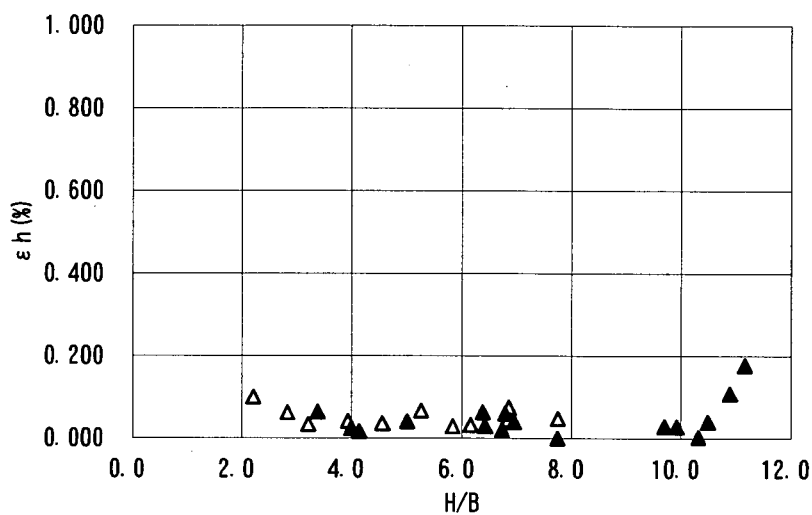


図-3.10.2 不連続体地山の例 (その1) (内空変位率 ϵ_h - H/B)

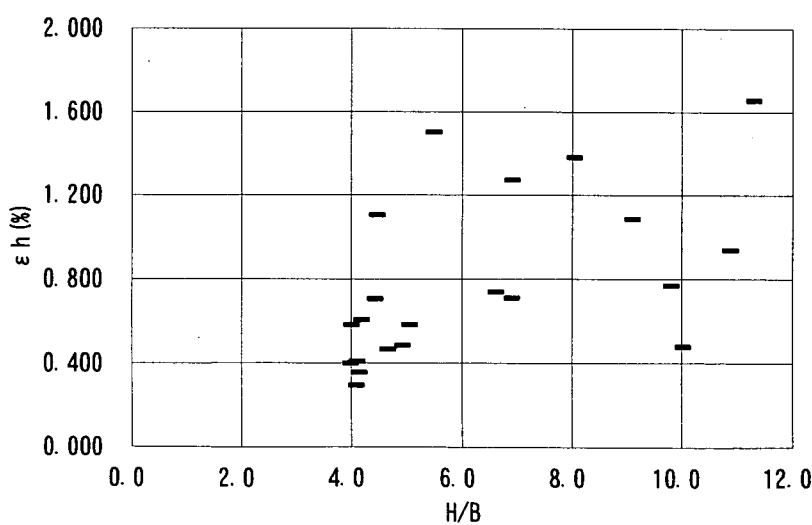


図-3.10.3 不連続体地山の例 (その2) (内空変位率 ϵ_h - H/B)

4. 解析結果

4.1 2次元有限要素法の解析結果

4.1.1 地山分類別と荷重の関係

2次元有限要素法により解析を行った結果について、地山の分類、および岩種等に基づいて諸数値および算定した荷重等の値について考察を行った。以下にそれらについて述べる。

(1) 通常程度の土被りを持つ地山

表-4.1 に通常程度の土被りを持つ地山についての見かけの弾性係数と見かけの側圧係数の最大値および最小値を示す。また、解析結果について以降に述べる。

表-4.1 有限要素解析の結果 (通常程度の土被りを持つ地山)

トンネル No.	岩種名	見かけの弾性係数 Ea (GPa)		見かけの側圧係数 λa	
		最小	最大	最小	最大
S-01	泥岩	0.042	0.830	0.56	0.64
S-02	泥岩	0.036	0.560	0.72	0.89
S-03	泥岩	1.000	2.150	0.59	1.12
S-04	泥岩	0.350	1.550	0.94	1.28
S-05	砂層混じり泥岩	0.330	1.420	1.08	1.24
S-21	頁岩	1.140	3.300	0.39	0.43
S-22	頁岩	0.640	2.300	0.40	0.47
S-23	頁岩	0.575	-	0.63	-
S-24	砂岩・頁岩	0.311	0.760	0.45	1.00
S-25	頁岩	0.400	1.900	0.44	0.72
S-26	砂岩・頁岩	0.285	0.323	0.41	1.06
S-30	頁岩	0.680	7.500	0.00	0.58
S-41	砂岩・粘板岩	0.365	3.200	0.71	1.84
S-42	粘板岩	0.690	5.300	0.34	1.23
S-51	砂岩・泥岩互層 (砂岩優勢)	1.450	22.800	0.52	1.10
S-52	砂岩・泥岩互層 (砂岩優勢)	0.700	6.300	0.62	1.24
S-54	砂岩	0.325	2.300	0.65	0.90
S-55	砂岩	0.127	1.450	0.51	1.00
S-61	凝灰岩	0.278	1.070	0.87	2.25
S-62	凝灰岩	0.150	1.250	0.09	1.38
S-63	凝灰岩	0.096	1.160	0.60	1.94
S-65	凝灰角礫岩	1.100	4.500	0.31	1.10
S-66	凝灰角礫岩	0.200	3.300	0.63	1.10

I-01	安山岩	0.480	0.620	0.71	1.03
I-02	安山岩	1.700	15.000	0.67	1.70
I-11	花崗岩	0.345	2.240	0.64	1.43
I-12	花崗岩	0.348	2.450	0.83	1.59
I-13	花崗岩	0.245	0.760	0.67	0.80
I-14	花崗岩	0.350	1.550	0.94	1.28
I-15	花崗閃緑岩	0.018	0.387	0.55	0.93
I-20	花崗斑岩	0.435	1.275	0.65	1.06
I-31	斑岩	0.520	2.900	0.72	1.00
I-41	緑色岩	1.460	3.650	0.42	0.45
I-42	緑色岩	1.650	4.850	0.48	1.05
M-01	黒色片岩(泥質片岩)	1.750	14.000	0.82	1.54
M-02	黒色片岩・緑色片岩	0.790	4.100	0.39	1.03
M-11	蛇紋岩	0.030	1.300	0.72	1.35
M-21	片麻岩	2.550	12.000	0.56	1.07
M-22	片麻岩	0.930	18.000	0.65	1.15
M-31	千枚岩	0.222	0.362	0.44	1.06
M-32	千枚岩	0.225	0.367	0.56	0.75

①見かけの弾性係数

図-4.1.1に、岩種毎で分類した有限要素解析に基づく地山の見かけの弾性係数 E_a と H/B の関係、さらに図-4.1.2～4.1.12に H/B が15以下において岩種毎に E_a と H/B の関係を記した場合を示す。これらより、泥岩および蛇紋岩については、 E_a は概ね0.01～1GPa 程度となっている。また粘板岩および凝灰岩については0.1～5GPa 程度となっているものが多い。それ以外の岩種については、花崗岩については土被りが小さい断面で一部が小さいがあるものの、概ね1～10GPa の分布となっているものが多いと考えられる。また、片岩については、他の岩に比較してばらつきが非常に大きい結果が得られた。

以上より、頁岩、砂岩、安山岩、斑岩、花崗岩および片麻岩といった地山では、 E_a が0.1GPa～10GPa の範囲にほとんどのデータが分布しているが、泥岩、凝灰岩、片岩および蛇紋岩といった軟質系や変成岩から成る地山では E_a が0.01GPa～1GPa の範囲で分布していることが多く、解析上では大きく分けて2つの傾向を示しており、両者では解析上で概ね10倍程度の E_a の差が生じている。

②見かけの側圧係数

図-4.2.1に、岩種毎で分類した有限要素解析に基づく地山の見かけの側圧係数 λ_a と H/B の関係、さらに図-4.2.2～4.2.12に、 H/B が15以下で岩種毎に λ_a と H/B の関係を記した場合を示す。これらより λ_a については頁岩が他の岩種に比較して若干低めの分布となっており、また凝灰岩ではばらつきが大きいといった特徴が見られる以外は概ね0.5～1.5の範囲で分布していると考えることができ、岩種による大きな差は見受けられなかった。

③支保に作用する荷重

支保に作用する荷重の形態は種々考えられるが、ここでは、地山特性曲線の概念に基づいて、天端に作用

すると考えられる鉛直方向の荷重 P_v 、および内空変位の計測点、すなわちスプリングラインより概ね 1.5m 上に作用する水平方向の荷重 P_h について、弾性有限要素解析を行った結果を用いて考えた。図-4.3.1 に、岩種毎で分類した支保に作用する鉛直方向の荷重 P_v と H/B の関係、さらに図-4.3.2~4.3.12 に H/B が 15 以下で岩種毎で示した P_v と H/B の関係を示す。 H/B が 15 以下においては、支保に作用する荷重の最大値の観点から考えると、泥岩、粘板岩、片岩および蛇紋岩に見られるような最大で 1.0MPa 程度の値となる地山、また凝灰岩、花崗岩に見られるような最大で 0.5~0.6MPa となるような地山、さらに頁岩、砂岩、安山岩、斑岩および片麻岩に見られるような 0.2~0.3MPa 程度の値となる地山に分類できる。なお、花崗岩の P_v について、 H/B が 10.0 程度で他の部分に比較して高めの値が得られているが、これについては ε_v が小さいものの、 ε_h が大きいことから E_a の値が小さくなり、荷重が大きく算定されていると考えられる。また、蛇紋岩の場合については H/B が増加するにつれて、 P_v が増加する傾向が見られた。

また、図-4.4.1~4.4.12 では、水平方向に作用する荷重 P_h と H/B の関係を示している。これより、泥岩、頁岩、凝灰岩、粘板岩、片岩および蛇紋岩については最大値が 1.0~1.5MPa 程度となっており、また粘板岩、花崗岩では概ね 0.7~0.8MPa、砂岩、安山岩、斑岩では概ね 0.5MPa となっていた。

以上より、荷重に関しては鉛直方向または水平方向のどちらに着目して算定するか、また土被りが $H/B > 15$ の範囲といった土被りが非常に大きい範囲を考慮するかといったことによって一概に言えないものの、大まかな傾向として泥岩、頁岩、粘板岩、凝灰岩、片岩および蛇紋岩といった軟質系の地山や変成岩においては、支保に作用する荷重は概ね 1.0MPa 程度となっており、それ以外では最大値として 0.2~0.5MPa 程度となっているケースが多いと考えられる。

以上を踏まえ、 E_a 、 λ_a 、 P_v 、および P_h に関して H/B との関係を示した図について、3 章で分類した変位の小さい岩石、変位が増加する岩石、および変位の大きい岩石といったグループで分類した場合の図を、それぞれ図-4.5.1~4.5.3、図-4.6.1~4.6.3、図-4.7.1~4.7.3、および図-4.8.1~4.8.3 に示す。 E_a については、変位の小さい岩石のグループでは概ね 0.1~10GPa 程度であり、変位が増加する岩石のグループでも同様に分布は概ね 0.1~10GPa 程度ではあるが、 E_a の値の分布自体で考えると、変位の小さい岩石のグループに比較して変位が増加する岩石のグループでの分布の範囲は若干低めになっている、すなわち E_a が低めであると考えられる。また、変位の大きい岩石のグループについては 0.01~1GPa 程度であると考えられ、変位の小さい岩石のグループと変位の大きい岩石のグループでは、概ね 10 倍程度の差が生じていることが分かる。次に λ_a については、変位の大きい岩石のグループについては 0.50~1.50 に分布しているデータが多く、また変位の小さい岩石のグループについても 0.50~1.50 に分布しているデータが多い。変位が増加する岩石ではそれら 2 つのグループより若干ばらつきが大きいように見受けられる程度であった。また P_v については、変位の小さい岩石のグループでは花崗岩の一部で最大値が 0.6MPa 程度となっているものもあるが、それ以外では最大値は 0.3MPa 程度であると考えられる。また変位が増加する岩石のグループでは最大で 0.8MPa 程度であり、変位の大きい岩石のグループでは 1.0MPa 程度となっていた。さらに P_h については、変位の小さい岩石のグループでは最大値で 0.5~0.6MPa 程度となっていた。また変位が増加する岩石のグループおよび変位の大きい岩石のグループでは最大値はともに 1.4MPa 程度となっていたものの、全体的な値の分布を考えた場合は、変位が増加する岩石のグループの方が変位の大きい岩石のグループよりも値の分布は低めに分布して

いる傾向が見受けられた。

なお、本節で解析の対象とした地山は、大規模な補助工法が必要と判断されるような極端に悪い地山を除外している場合の値であることに注意を要する。また今後さらにデータを蓄積して検討を重ねていく必要があると考えられる。

④作用荷重と初期土圧の関連

次に、初期土圧に対する作用している荷重の比、すなわち、掘削前に作用している土圧をその断面の単位体積重量に土被りを乗じた値と考え、それに対して解析的に算定した支保に作用している荷重の比を考えた。

図-4.9.1に、岩種毎で分類した初期土圧、すなわち、単位体積重量に土被り厚を乗じた値 γH に対する作用荷重 P_v の比、すなわち $P_v/\gamma H$ と H/B の関係、さらに図-4.9.2～4.9.12に、 H/B が15以下における岩種毎に分類した $P_v/\gamma H$ と H/B の関係を示す。さらに、変位の小さい岩石のグループ、変位が増加する岩石のグループ、および変位の大きい岩石のグループで分類した $P_v/\gamma H$ と H/B の関係を図-4.10.1～3に示す。これより、変位の小さい岩石のグループでは、花崗岩の一部のデータを除いて、土被りが小さいうちは0.2～0.3程度で、 H/B が増加するにつれて減少する傾向が見受けられる。また変位が増加する岩石のグループでは、 H/B が小さいうちは最大0.3程度であり、 H/B が増加しても、 $P_v/\gamma H$ の減少の度合いが変位の小さい岩石のグループの変化の度合いよりも小さい傾向が見られた。変位の大きい岩石のグループでは特に H/B が10以下程度では H/B に無関係で幅を持った分布となっており、最大で0.5程度であった。

⑤Terzaghiによる緩み荷重との比較

次に解析で得られた荷重とTerzaghiによる土荷重⁵⁾の関連性を比較した。Terzaghiによると、表-4.2に示すような支保工天端に作用する土荷重の値が提案されている。この土荷重の高さは堅硬な地山や、膨張性地山に挙げられる特殊地山を除いて、掘削高さ H_t と掘削幅 B の和の倍数で提案されている。

表-4.2 Terzaghiの支保工に作用する土荷重の表

岩盤の状態	土荷重の高さ (m)	摘要
1. 堅硬で侵されていないもの	0	肌落ちや山はねのある場合は軽易な支保工を要する
2. 堅硬で層状または片岩状のもの	0～0.5B	軽易な支保工を用いる。荷重は場所毎に不規則に変化する。
3. 大塊状で普通程度の節理のあるもの	0～0.25B	
4. 普通程度に塊状で割れ目のあるもの	0.25B～0.35 (B+H _t)	
5. はなはだしく小塊で割れ目の多いもの	(0.35～1.10) (B+H _t)	側圧は小さいかまたはない。
6. 完全に破碎されているが、化学的には侵されていないもの	1.10 (B+H _t)	相当の側圧。漏水によりトンネル下部が軟弱になるときは支保工下部に通し土台をするか、円形支保工とする必要がある。
7. 徐々に押し出してくるもの (中程度のかぶり)	(1.10～2.10) (B+H _t)	大きな側圧、インバートストラットが必要で、円形支保工が推奨される。
8. 徐々に押し出してくるもの (大きなかぶり)	(2.10～4.50) (B+H _t)	
9. 膨張性の地質	(B+H _t)の値にかかわらず 80以上	円形支保工を要する。激しい場合は可縮支保工を用いる。

(備考) Bはトンネル掘削断面の幅、H_tはトンネル掘削断面の高さ

そこで、有限要素解析で得られた断面毎の荷重の値をそれぞれの単位体積重量で除することにより解析で得られた換算土荷重高さを算定した。また、断面の大きさを除外して検討する目的のため、その値をさらに掘削高さ $\div$ 掘削幅の和、すなわち $Ht+B$ で除することにより、Terzaghi によって示された土荷重高さの倍数との比較を岩種毎に行った。

図-4. 11. 1 に岩種毎で分類した土荷重高さ $\div$ ($B+Ht$) の値と H/B の関係、図-4. 11. 2~4. 11. 12 に、 H/B が 15 以下で岩種毎に分類した図を示す。Terzaghi により示された表によると土荷重高さ $\div$ ($B+Ht$) の値は、大きな変状等が発生しないと考えられる通常の地山の場合は、それぞれ 0. 35、1. 10 および 2. 10 の値で考えることが出来る。図より最大値で考えれば、片麻岩は 0. 35 であるため、表-4. 2 による 4 のカテゴリーに、頁岩、砂岩、安山岩および斑岩は 1. 10 であり、5 ないしは 6 のカテゴリーに、泥岩、粘板岩、凝灰岩、花崗岩および片岩は 2. 10 であり 7 のカテゴリーに、また蛇紋岩は膨張性の地質であることが明らかなため、9 のカテゴリーであると考えることが出来る。しかし、一部のデータを除けば、0. 35 程度を考えればよい岩石については、頁岩、砂岩、安山岩および片麻岩、1. 10 程度を考えればよい岩石については、斑岩および花崗岩、2. 10 程度を考えればよい岩石については、泥岩、粘板岩、凝灰岩および片岩、それ以外については蛇紋岩という傾向が解析に基づく分析から分かる。また、図-4. 12. 1~3 に変位の小さい岩石のグループ、変位が増加する岩石のグループ、および変位の大きい岩石のグループで分類した土荷重高さ $\div$ ($B+Ht$) と H/B の関係を示す。これより変位の小さい岩石のグループでは、平均で 0. 35 程度、最大で 1. 10 程度の値の分布であり、また変位が増加する岩石のグループでは平均で 1. 10 程度、最大で 2. 10 程度、さらに変位の大きい岩石のグループでは平均で 2. 10 程度、最大はそれ以上の値の分布であると考えられる。これらの分類についても、データの蓄積を図り、また種々の解析モデルを用いることにより引き続き検討する必要がある。

(2) 土被りの小さい地山

表-4. 3 に土被りの小さい地山についての見かけの弾性係数と見かけの側圧係数の最大値および最小値を示す。また、解析結果について以降に述べる。

表-4. 3 有限要素解析の結果 (土被り小の洪積層・沖積層地山)

トンネル No.	基盤となる岩種名	見かけの弾性係数 (GPa)		見かけの側圧係数	
		最小	最大	最小	最大
DA-1	風化砂岩	0. 075	0. 120	0. 80	0. 80
DA-2	風化砂岩	0. 022	0. 132	0. 70	0. 99
DA-3	洪積粘土層・砂層	0. 009	0. 024	0. 58	0. 74
DA-4	強風化花崗閃緑岩、斑状花崗岩	0. 042	0. 188	0. 67	1. 03
DA-5	シルト混じり砂礫	0. 028	0. 265	0. 54	1. 11

①見かけの弾性係数

図-4. 13に地山の見かけの弾性係数 E_a と H/B の関係を示す。これより E_a については、概ね 0. 3GPa 以下と

っており、また0.2GPa以下程度になっている断面が多数を占める。また E_a の値は土被り厚や基盤となる岩種とはほぼ無関係であった。

②見かけの側圧係数

図-4.14に見かけの側圧係数 λ_a と H/B の関係を示す。これより、見かけの側圧係数はおおむね0.5~1.0の範囲で分布しており、通常程度の土被りの部分で得られた結果よりは若干低めとなっている。1.0以下の結果が多いことは、土被りが小さいほど、天端からの沈下の影響が大きくなることを示していると考えられる。

③支保に作用する荷重

図-4.15に支保に作用する鉛直方向荷重 P_v と H/B の関係を示す。これより、 E_a や λ_a にはほぼ無関係で、天端沈下に着目して支保に作用する荷重を算定した場合、土被りに比例して支保に作用する荷重は増加していることが分かる。

また図-4.16に支保に作用する水平方向荷重 P_h と H/B の関係を示す。これより、 H/B と P_h の間に概ね比例関係が成立しているといえるものの、荷重の値自体は鉛直方向荷重より大きめの値が得られた。理由としては、 P_h が P_v より大きく算定される傾向は通常程度の土被りの場合にも見受けられたが、ここでは初期土圧の算定が土被り厚に内空高さを加えた値で算定するため、通常程度の地山よりも土被り厚が小さい分、内空高さに相当する分の初期土圧の影響が大きいために考えられる。

④作用荷重と初期土圧の関連

図-4.17に、初期土圧 γH に対する作用荷重 P_v の比と H/B の関係を示す。土被りが小さいほど初期土圧に対する比は高くなり、最大で概ね0.6程度の値が得られた。また H/B が0.5以上では $P_v/\gamma H$ は概ね0.3~0.4の幅で分布していた。

4.1.2 支保パターンと荷重の関係

支保に作用する荷重を考えていく上では、実績的に支保にどの程度の荷重が作用しているかを把握する必要がある。そこで岩盤種別によらず、支保パターン毎にどの程度の荷重が作用するかについて分析を行った。なお、今まで述べてきたとおり、地山には連続体の傾向を示す地山および不連続体の傾向を示す地山に大別できると考えられるため、直線を用いて H/B と P_v の近似式を得ることは困難であるが、参考として検討することとした。

図-4.18に、B~DⅡの6パターンについて、支保へ作用する荷重 P_v と H/B の関係、さらに図-4.19に支保へ作用する荷重 P_h と H/B の関係を示す。またその中で比較的解析データの多いCⅠ、CⅡ、DⅠ、DⅡの4パターンについて、作用荷重と H/B の関係を示す近似曲線を算定した。なお、近似曲線については原点を通るようにして算定した。図-4.18より P_v のうち、CⅡについては比較的精度の良い H/B と P_v の関係の近似式が得られた。DⅠ、DⅡの2パターンについては、 H/B すなわち土被りが増加するにつれて連続体の挙動を示すように線形で変位が増加する場合と不連続体の挙動を示して変位の増加の度合いの程度にばらつきがあるといった2つの傾向があると考えられ、そのため変位ひいては支保に作用する荷重にばらつきが多くなってしまい精度の良い近似式は得られなかった。CⅠについては、相関係数が著しく低く、 H/B と P_v を直

線で近似しようとした場合は相関がないと考えられる。表-4.4 に C I、C II、D I、D II における P_v の最大値、最小値、平均値および分散を示す。これより C II ~ D II パターンに比較して、C I の P_v は分散が小さくなっており、作用している荷重が土被りに無関係で、ある決まった幅で分布していることが多いためと考えられる。すなわち、C I パターンについては、荷重は土被り厚に無関係で支保への作用荷重の最大値を考慮することにより、設計等に用いる荷重が算定できるものと考えられる。

表-4.4 P_v の解析による値

支保パターン	最小	平均	最大	分散
C I	0.005	0.039	0.135	0.001
C II	0.011	0.146	1.027	0.022
D I	0.054	0.272	1.327	0.046
D II	0.224	0.573	1.007	0.047

また、図-4.19 に Ph と H/B の関係について、同様の分析を行った結果を示す。 Ph については、各支保パターンで精度の良い近似式は得ることが出来なかった。

次に図-4.20 に ε_v と P_v の関係を示す。さらに、支保パターン毎に原点を通る近似曲線を考えた。これらの近似直線の傾きは、解析における支保の剛性の相対的な関係を示すものと考えられる。しかし、実際には C I、C II の近似直線のみが相対的に精度良く求まった程度であり、しかも C II と D I では剛性は D I の方が大きいと考えられるが、本研究結果では逆になっていた。C I と C II にのみ限って考えれば傾きの差が概ね 2 倍程度であった。また、D II や D III については原点を通る近似曲線を考えると精度が非常に悪く、特に D II については、近似曲線の相関係数が -1 以下であった。これは ε_v と P_v の関係で近似曲線を考えていることから近似曲線が原点を通るといった仮定を設けたためであると考えられる。精度の悪い理由の一つとして、断面の大きさの差が支保全体をアーチの系として考えた場合の剛性に影響を与えるためと考えられる。また、同様に図-4.21 に ε_h と Ph の関係を示す。これらについてはさらに精度が悪いことから、データを増やしてさらに検討を加えていく必要がある。

4.1.3 計測 B の結果との比較

これまで支保に作用する荷重や解析により得られた諸定数を検討した。これらを算定するためには計測 A のデータを用いてきた。そこで本項では計測 A を用いた解析結果における支保のひずみが、計測 B によって得られた支保のひずみとどの程度の差があるかについて検討した。

①計測 B を実施した断面

計測 B は主として使用している補助工法や支保パターンの妥当性を判断するものとして用いられることが多く、実際には特殊な地山条件で行われる場合がほとんどである。本研究で対象とした補助工法が行われなような地山での実施例についてはさらに少ないものの、トンネル S-41 で 1 断面実施されていたため、それと比較することを試みた。

②計測 A に基づいた解析結果との比較

表-4.5 に計測 A の計測結果および解析結果を示す。また表-4.6 に計測 B の計測結果を示す。解析では支保を梁要素として仮定したため、軸力と曲げモーメントが算定されている。そのため、梁部材の縁応力を軸力や曲げモーメントから換算する必要がある。しかし、実際には鋼アーチ支保工と吹付けコンクリートで梁が構成されていることから、部材の弾性係数が異なるため、単純に比較は出来ない。そこで、ひずみで比較することと考え、断面力から縁応力を算定し、さらにその縁応力を梁の弾性係数 ($E=7.63\text{GPa}$) で除することにより、ひずみ値で示した。

表-4.5 計測 A 結果と解析結果

トンネル	S-41	
地質	強風化砂岩・粘板岩	
支保パターン	D I	
土被り	72.5m	
計測 A 結果	天端沈下	39mm
	内空変位	57mm
解析結果	見かけの弾性係数	0.19GPa
	見かけの側圧係数	0.93
	支保に作用する荷重	0.51MPa
	天端の縁ひずみ	3.847E-03 / 3.827E-03
	肩部の縁ひずみ	3.672E-03 / 3.632E-03
	S.L. の縁ひずみ	-1.650E-03 / 4.481E-03

ひずみは内側/外側を示し、圧縮を正とする

また、表-4.6 に計測 B にて得られた吹付けコンクリートのひずみ量と鋼アーチ支保工の縁ひずみの量を示す。下段は、計測 A の解析結果との比率を示している。なお、吹付けコンクリートの応力測定は断面の重心で行われていると仮定し、吹付応力の結果に基づくひずみと解析によるひずみの比較については、表-4.5 の縁ひずみの内側と外側の平均値を取ることによって曲げ応力による影響をなくし、その値と計測値を比較した。また、鋼アーチ支保工のひずみについては内側および外側それぞれの値を比較した。これより、吹付応力については天端部分を除いて値は比較的一致している部分もあるが、鋼アーチ支保工については、非常に精度が悪い。理由の一つとして、吹付けコンクリートおよび鋼アーチ支保工を解析上では組み合わせられた梁要素として見なしており、その中で吹付けコンクリートについては、梁要素として帰着させやすいと考えられるが、鋼アーチ支保工を梁要素として見なしたことで形状の点から若干の差違を生じていると考えられる。

表-4.6 計測Bの結果に基づくひずみ

(a) 吹付応力に基づくひずみ

	計測結果	解析と実測の比率
天端	3.571E-04	0.09
左肩	1.836E-03	0.50
右肩	1.914E-03	0.52
左 SL	1.529E-03	1.08
右 SL	1.250E-03	0.88

(b) 鋼アーチ支保工縁応力に基づくひずみ

	計測結果		解析と実測の比率	
	外側	内側	外側	内側
天端	1.965E-04	7.108E-04	-0.05	-0.05
左肩	3.558E-04	2.413E-03	-0.10	-0.10
右肩	-6.732E-04	2.491E-04	0.18	0.19
左 SL	2.874E-04	-6.881E-04	0.17	-0.06
右 SL	4.031E-06	1.068E-03	0.00	0.00

4.1.4 ロックボルトを考慮した場合の解析

本研究において支保に作用する荷重の評価は吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工のみを考慮して検討してきた。そのため、ロックボルトを考慮した場合についても、解析結果に及ぼす影響を検討しておく必要がある。そのため、2つの支保パターンの異なるトンネルを取り上げ、ロックボルトがある場合とない場合において、見かけの弾性係数、見かけの側圧係数および支保に作用する荷重の比較を行った。

方法は2章で述べた有限要素解析および地山特性曲線の基礎的な考え方に従って荷重を算定した。すなわち、支保には梁要素として吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の両者を組み合わせた等価な部材を考えるとともに、トラス要素としてロックボルトを取り入れた。また、素掘時の変位として、図-2.2中に示す δ_3 については、全断面を掘削した後に、ロックボルトのみを考慮した部分の変位を考えた。これにより、ロックボルトの有無によって影響される分の地山の影響のみを考えて比較できるためである。

表-4.7に解析結果を示す。これよりロックボルトを考慮した場合は見かけの弾性係数が最大で10%程度低下する。すなわち、ロックボルトにより地山の弾性係数が概ね10%低下した分を補える効果があると考えられる。また見かけの側圧係数については、ボルトの有無によらず概ね一定であることが解析的に分かった。また、支保に作用する荷重については、ロックボルトを考慮した場合は最大で14%程度少なくなった。これらの傾向としては、ボルトの本数が多く、また地山の見かけの弾性係数が低い方が支保に作用する荷重は小さくなった。すなわち、I-11とS-41を比較した場合、S-41の場合、すなわちロックボルトの本数の多い支保パターンD Iのほうが、効果が高くなっており、また、S-41の①と②を比較した場合、地山の見かけの弾

性係数の低い①のケースの方が、支保に作用する荷重が少なくなっていた傾向が見られた。

表-4.7 ロックボルトの解析結果に及ぼす影響

トンネル	断面	支保パターン	岩質	ボルト 配置		ボルト なし	ボルト あり	あり/なし
I-11	①	C II	花崗岩	上半 12 本、 下半 2 本	見かけの弾性係数 (GPa)	1. 810	1. 800	0. 99
					見かけの側圧係数	1. 155	1. 155	1. 00
					支保に作用する荷重 (MPa)	0. 134	0. 130	0. 97
I-11	②	C II	花崗岩	上半 12 本、 下半 2 本	見かけの弾性係数 (GPa)	0. 873	0. 858	0. 98
					見かけの側圧係数	1. 240	1. 235	1. 00
					支保に作用する荷重 (MPa)	0. 341	0. 328	0. 96
S-41	①	D I	砂岩・ 粘板岩	上半 17 本、 下半 2 本	見かけの弾性係数 (GPa)	0. 192	0. 173	0. 90
					見かけの側圧係数	0. 924	0. 945	1. 02
					支保に作用する荷重 (MPa)	0. 510	0. 437	0. 86
S-41	②	D I	砂岩・ 粘板岩	上半 17 本、 下半 2 本	見かけの弾性係数 (GPa)	1. 695	1. 650	0. 97
					見かけの側圧係数	1. 241	1. 230	0. 99
					支保に作用する荷重 (MPa)	0. 324	0. 309	0. 95

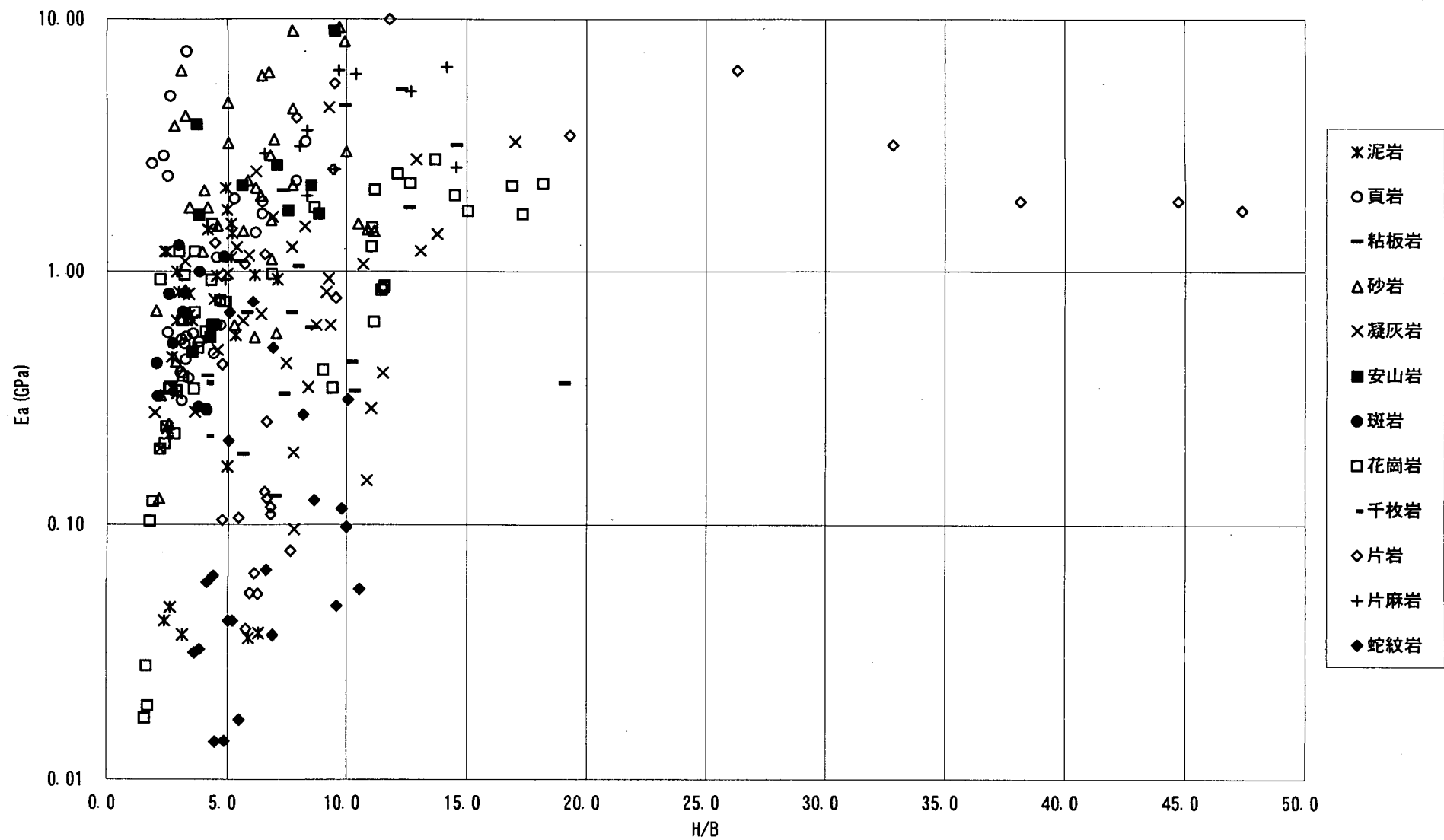


図-4.1.1 見かけの弾性係数 E_a - H/B (全岩種)

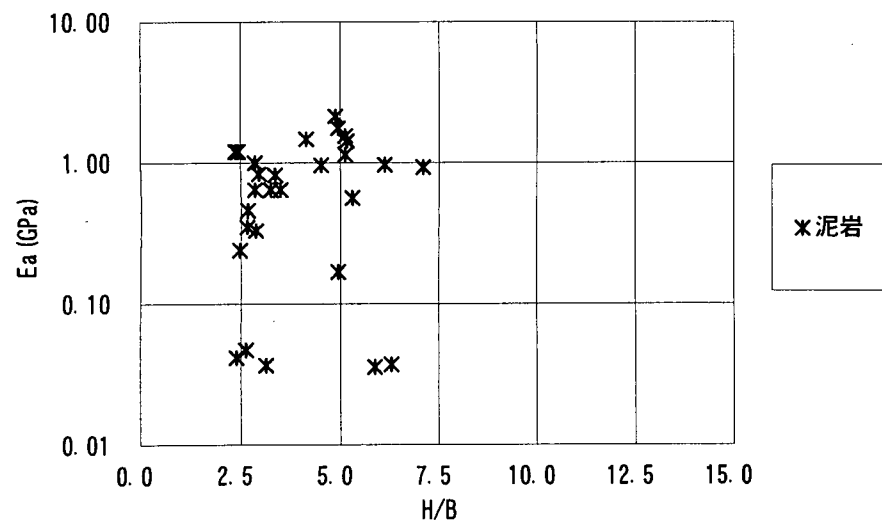


図-4.1.2 見かけの弾性係数 E_a - H/B (泥岩)

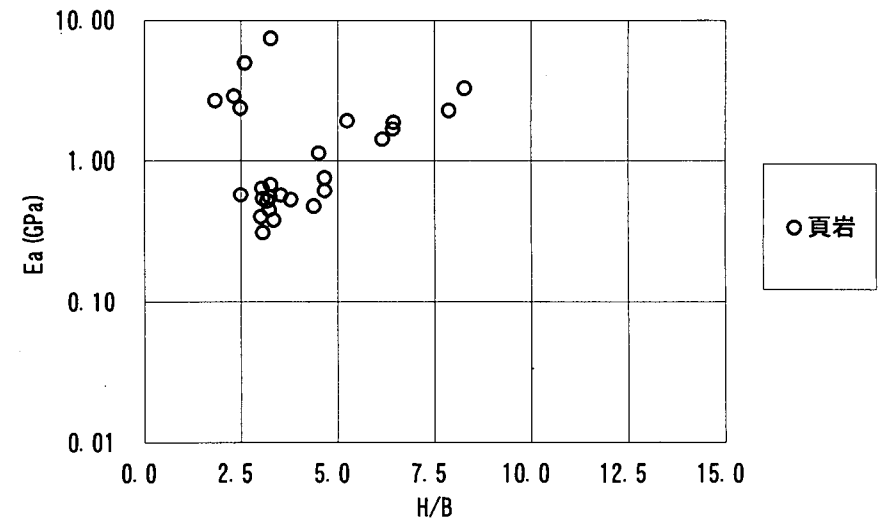


図-4.1.3 見かけの弾性係数 E_a - H/B (頁岩)

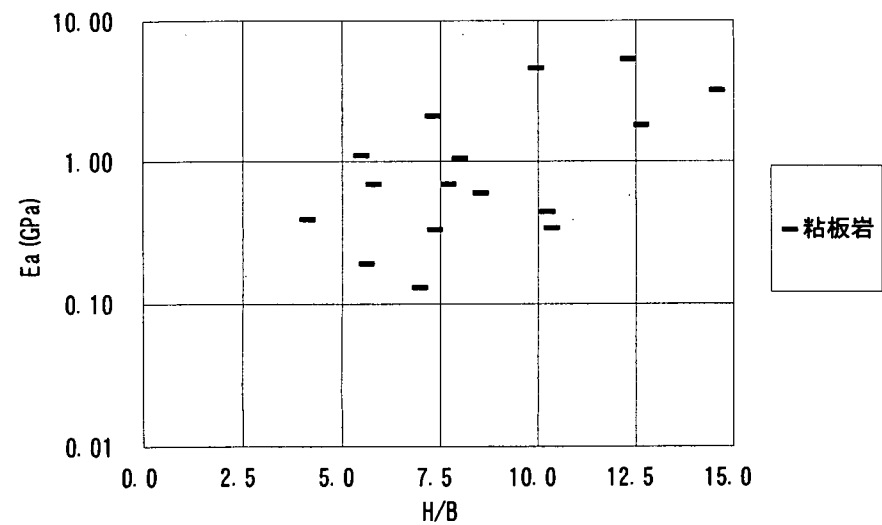


図-4.1.4 見かけの弾性係数 E_a - H/B (粘板岩)

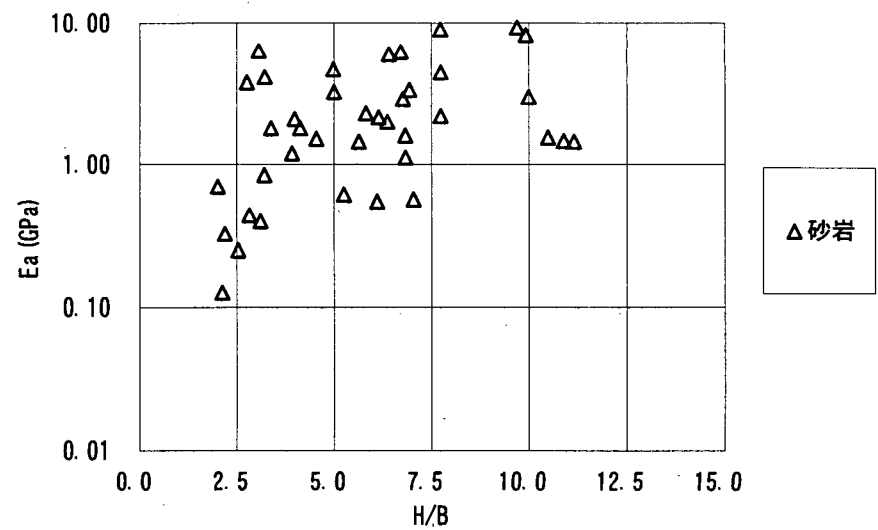


図-4.1.5 見かけの弾性係数 E_a - H/B (砂岩)

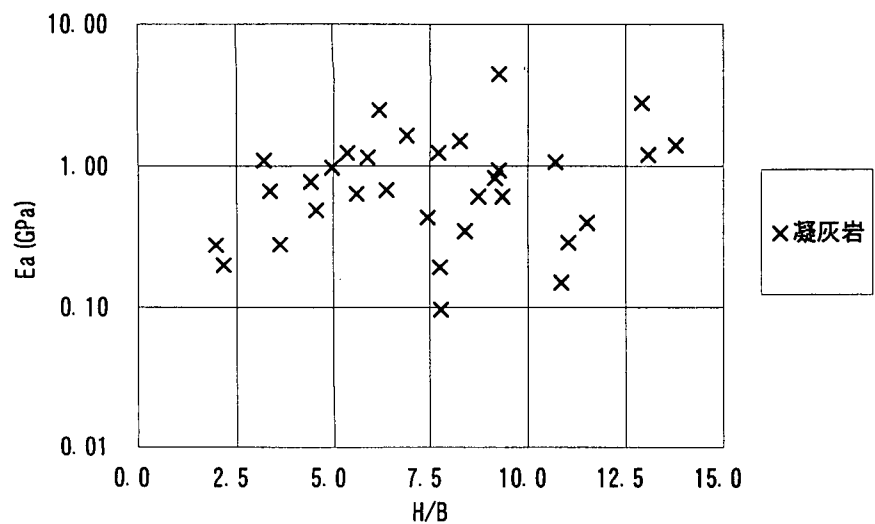


図-4.1.6 見かけの弾性係数 E_a - H/B (凝灰岩)

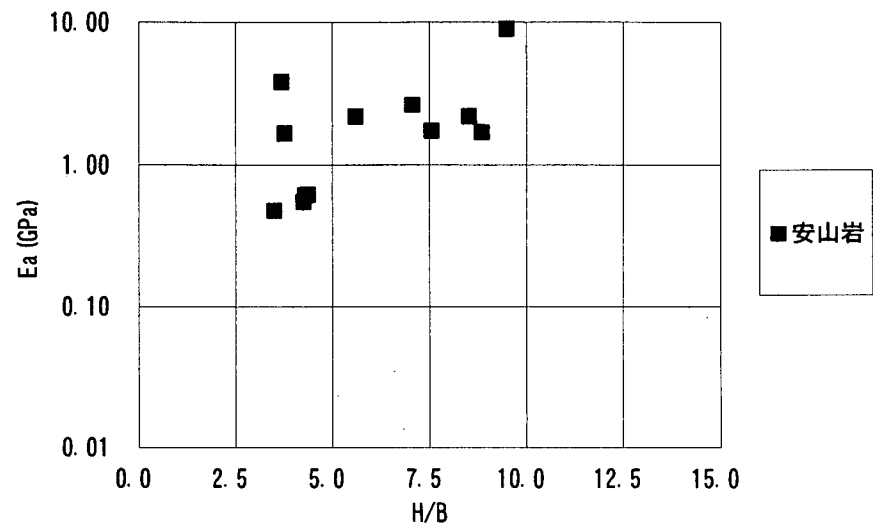


図-4.1.7 見かけの弾性係数 E_a - H/B (安山岩)

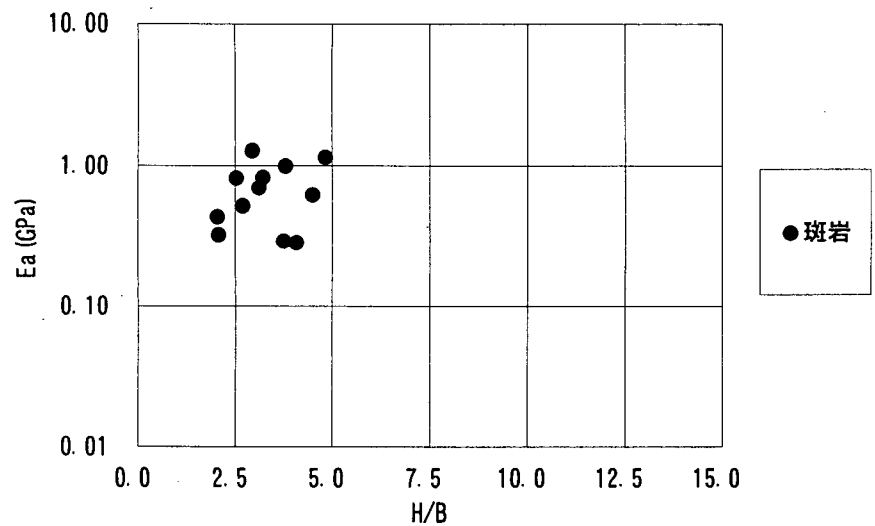


図-4.1.8 見かけの弾性係数 E_a - H/B (斑岩)

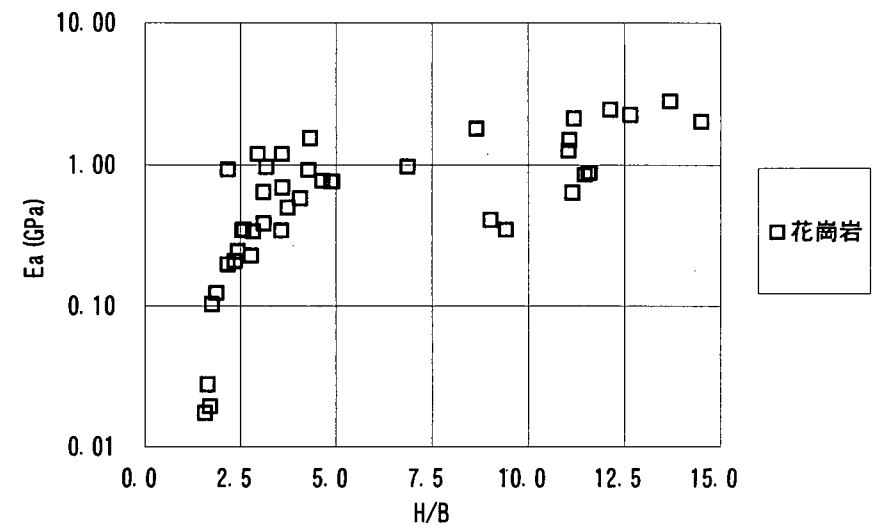


図-4.1.9 見かけの弾性係数 E_a - H/B (花崗岩)

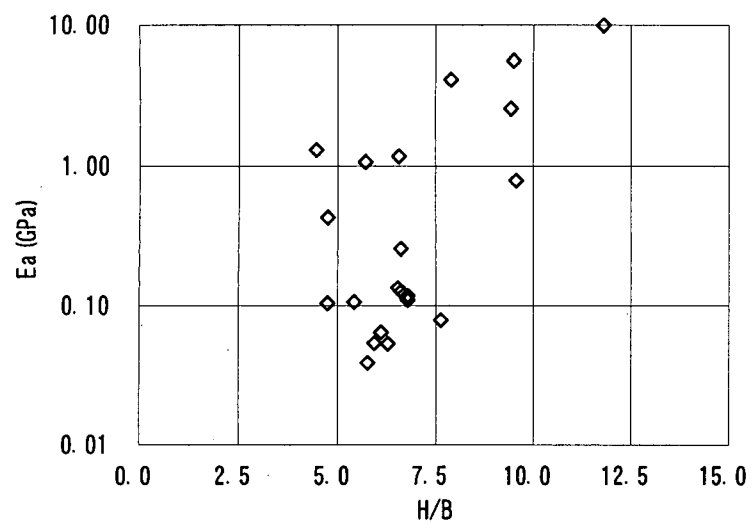


図-4.1.10 見かけの弾性係数 E_a - H/B (片岩)

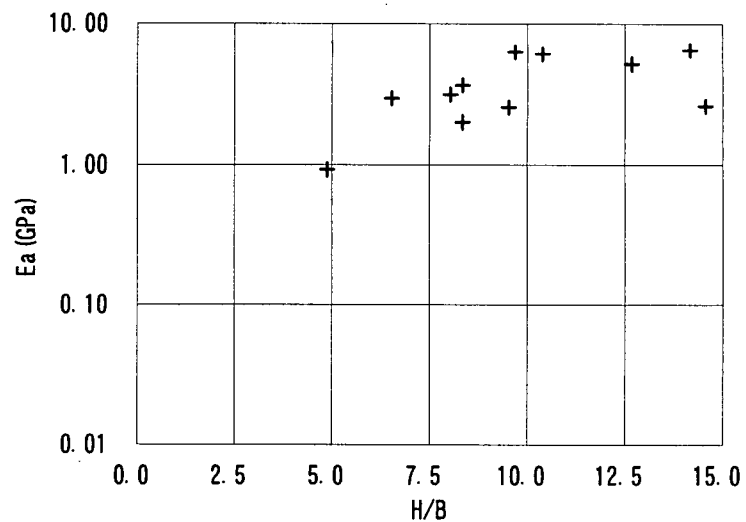


図-4.1.11 見かけの弾性係数 E_a - H/B (片麻岩)

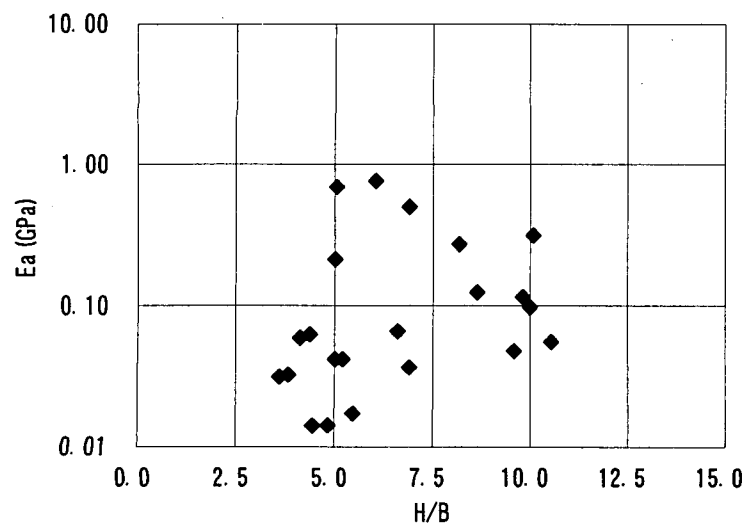


図-4.1.12 見かけの弾性係数 E_a - H/B (蛇紋岩)

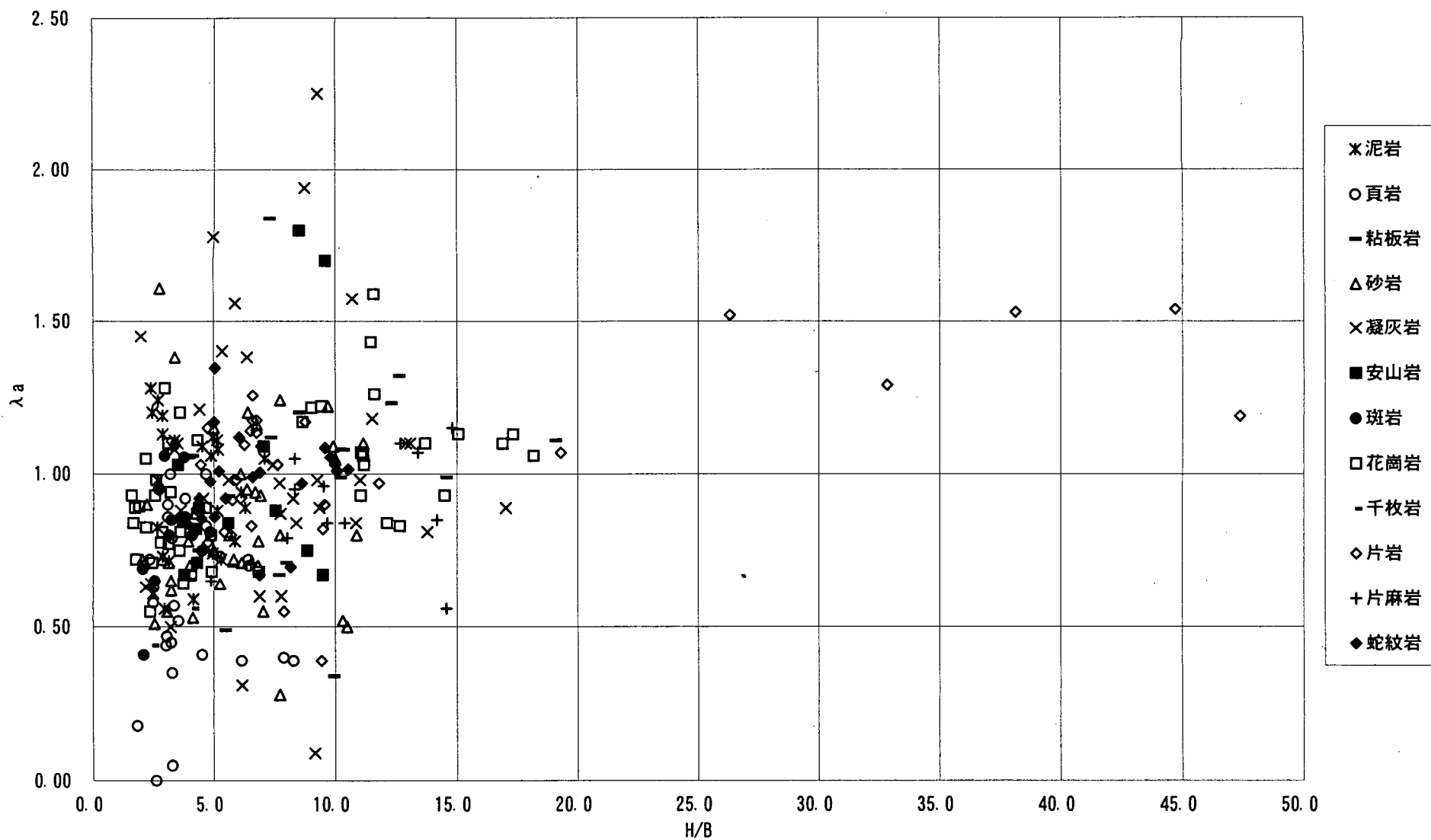


図-4. 2. 1 見かけの側圧係数 λ_a - H/B (全岩種)

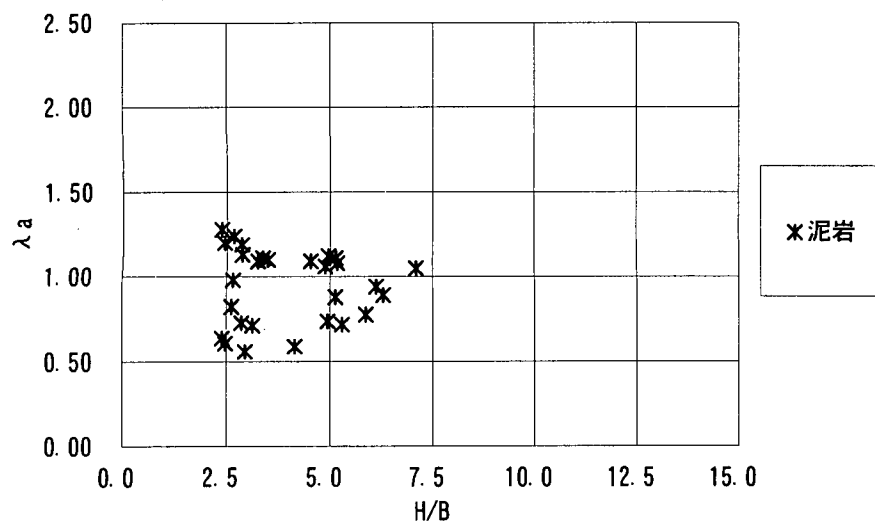


図-4.2.2 見かけの側圧係数 λ_a - H/B (泥岩)

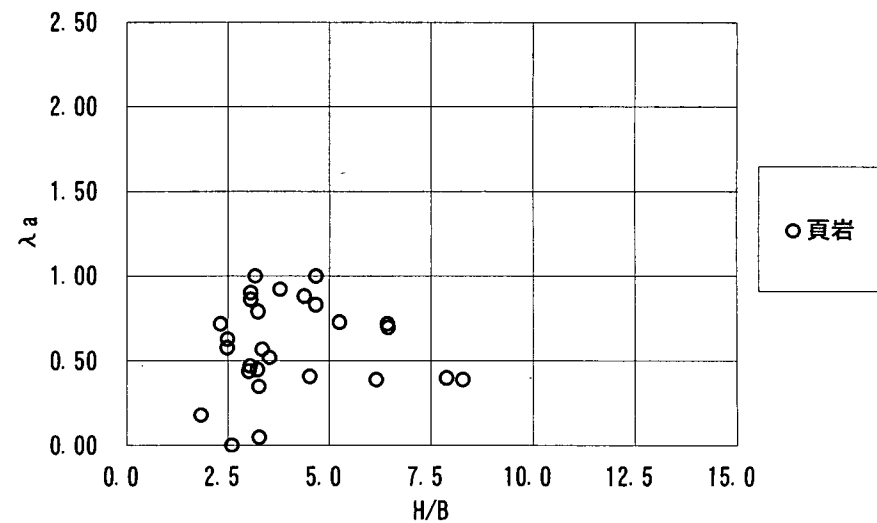


図-4.2.3 見かけの側圧係数 λ_a - H/B (頁岩)

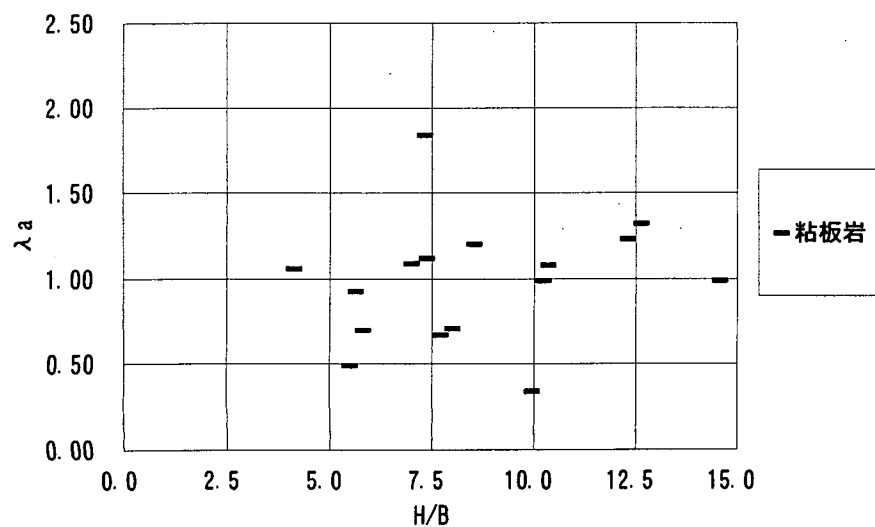


図-4.2.4 見かけの側圧係数 λ_a - H/B (粘板岩)

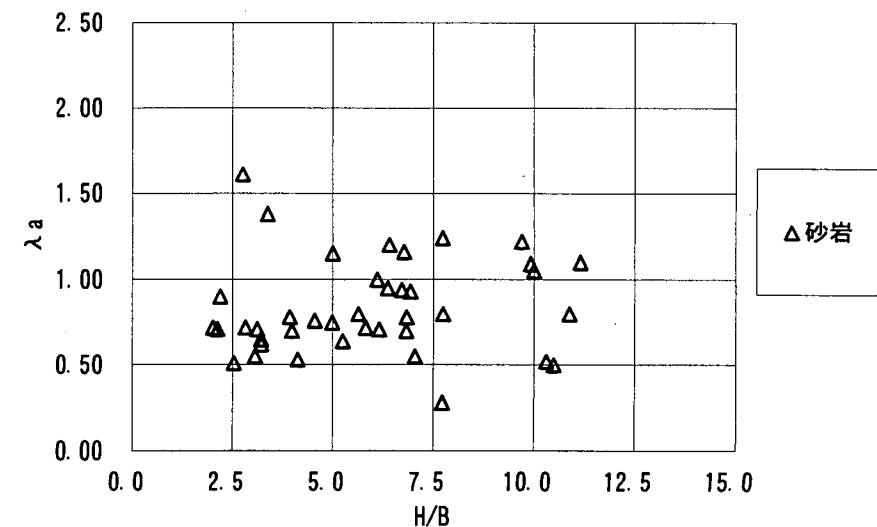


図-4.2.5 見かけの側圧係数 λ_a - H/B (砂岩)

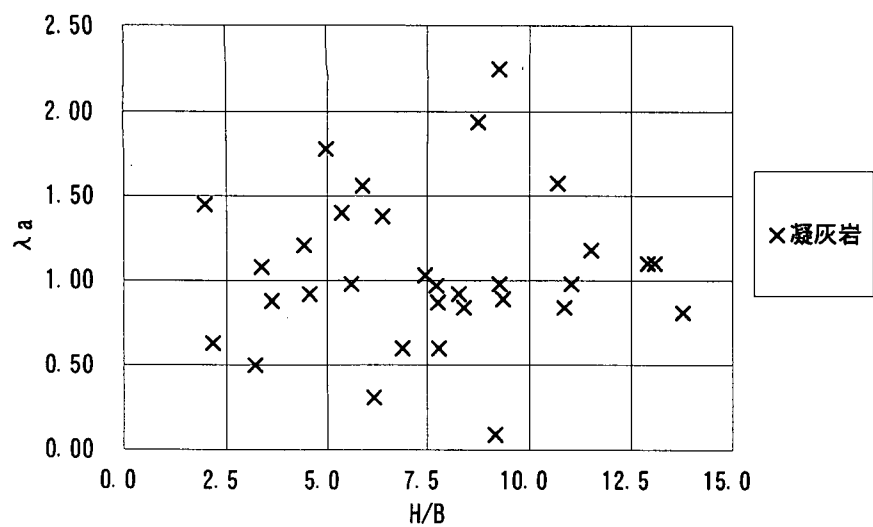


図-4.2.6 見かけの側圧係数 λ_a - H/B (凝灰岩)

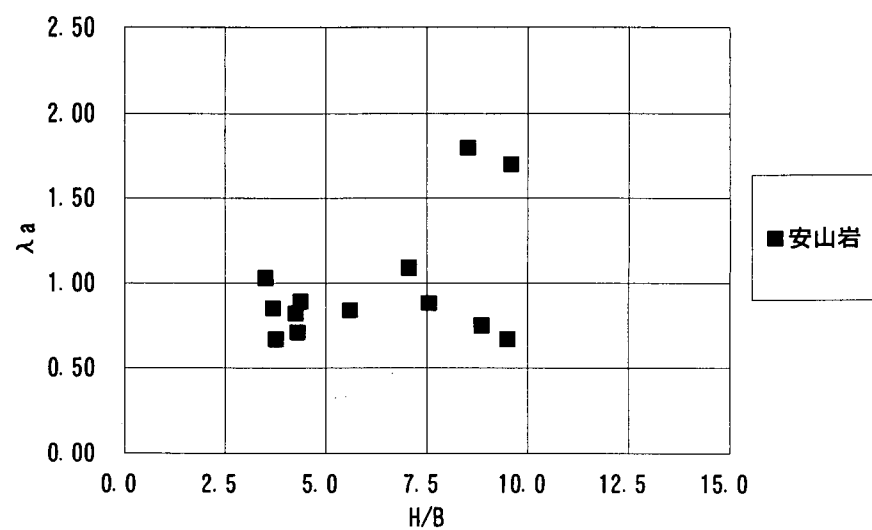


図-4.2.7 見かけの側圧係数 λ_a - H/B (安山岩)

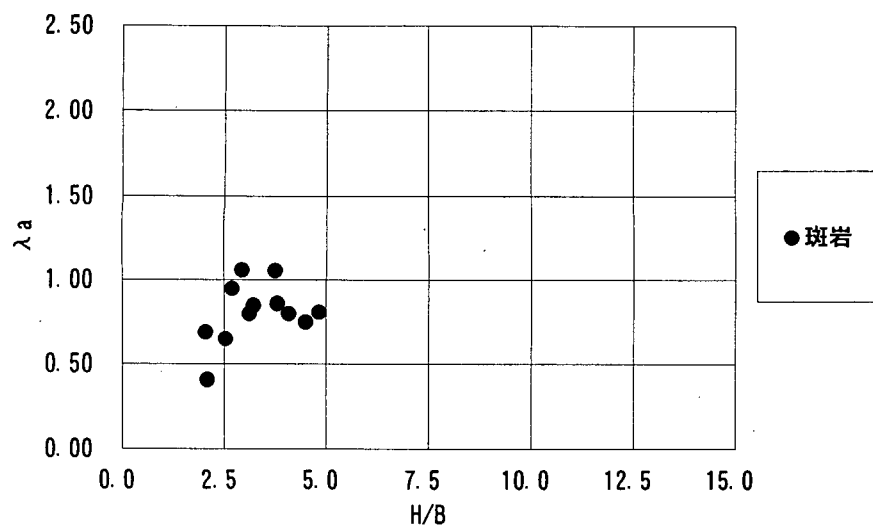


図-4.2.8 見かけの側圧係数 λ_a - H/B (斑岩)

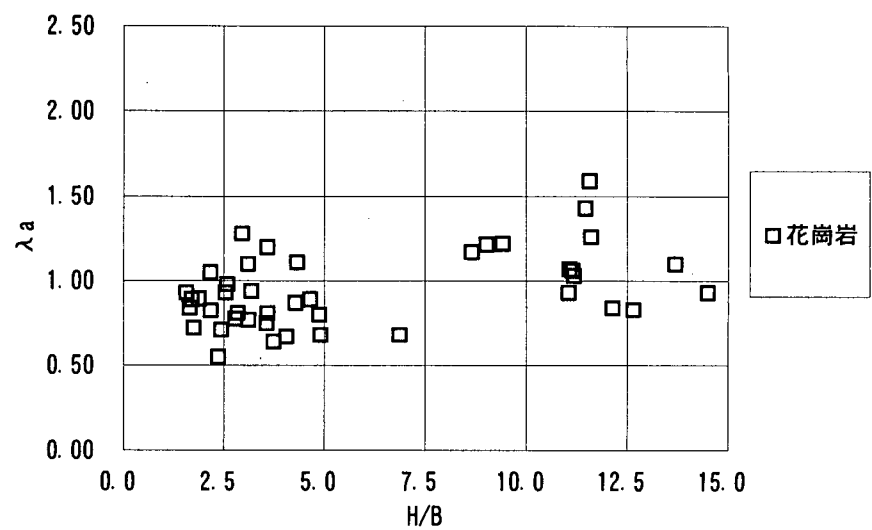


図-4.2.9 見かけの側圧係数 λ_a - H/B (花岗岩)

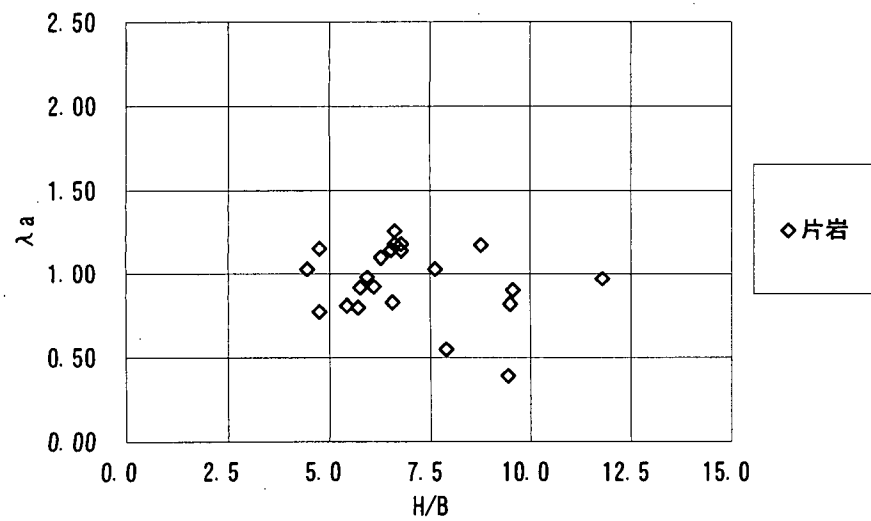


図-4.2.10 見かけの側圧係数 $\lambda a-H/B$ (片岩)

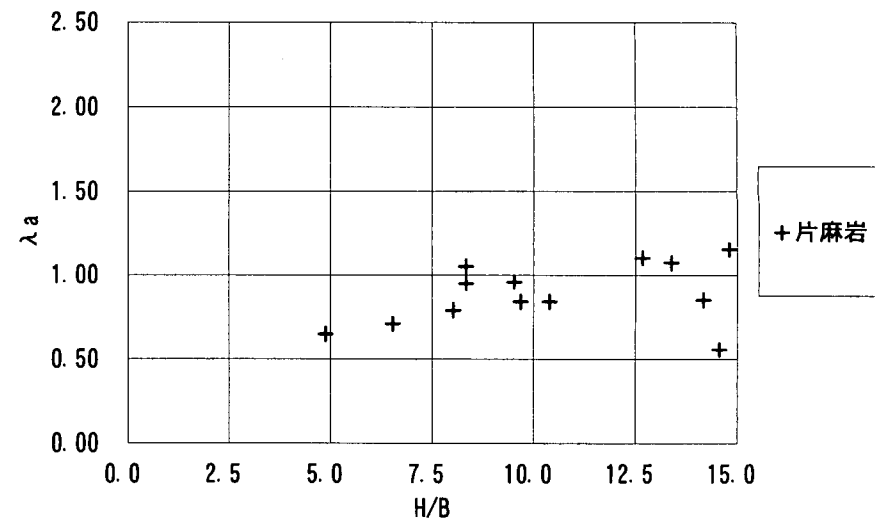


図-4.2.11 見かけの側圧係数 $\lambda a-H/B$ (片麻岩)

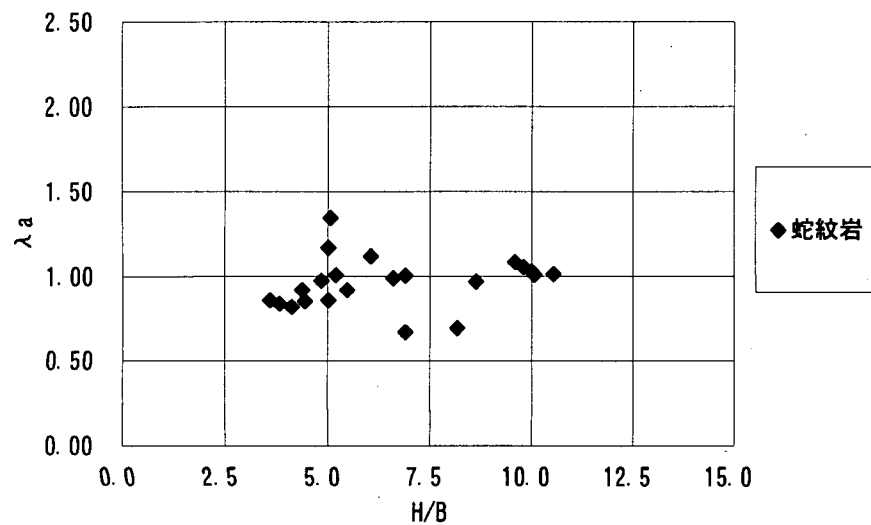


図-4.2.12 見かけの側圧係数 $\lambda a-H/B$ (蛇紋岩)

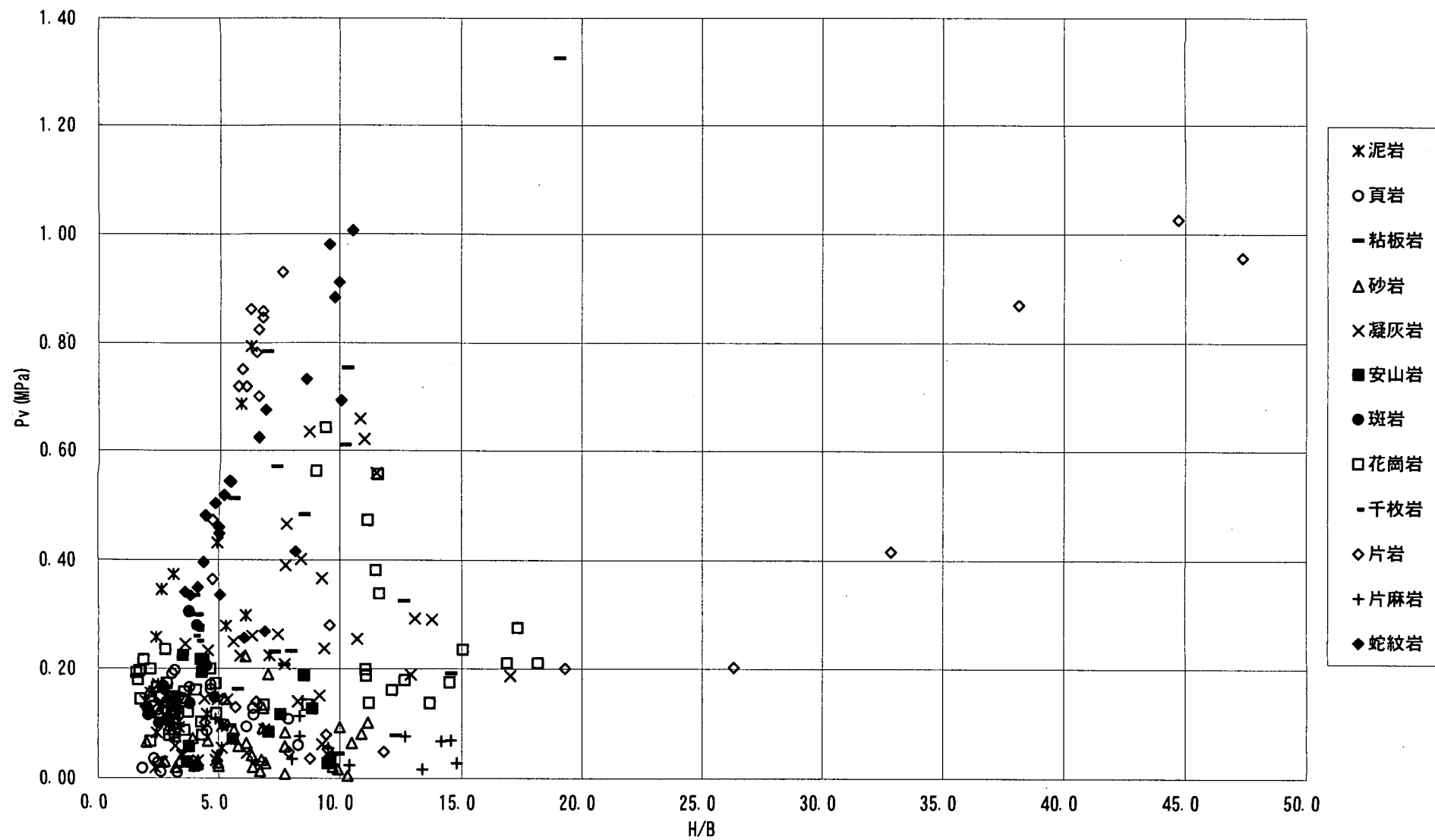


図-4.3.1 支保に作用する荷重 P_v - H/B (全岩種, 天端沈下に着目)

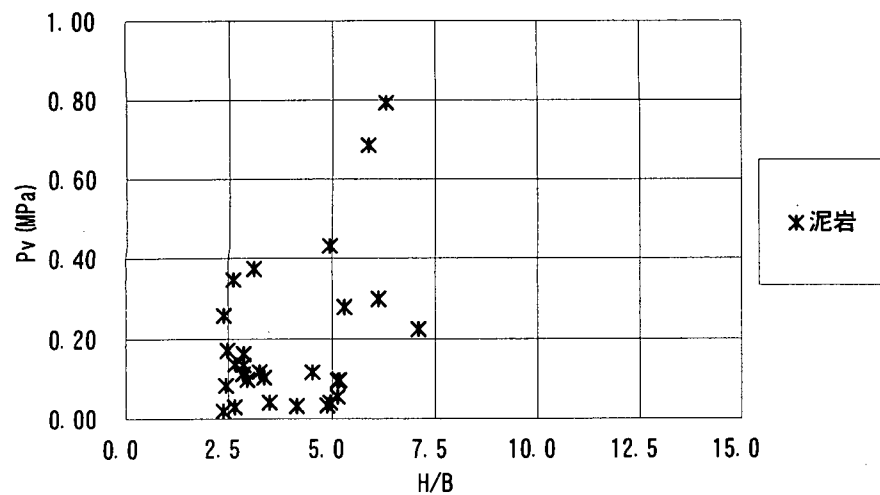


図-4.3.2 支保に作用する荷重 P_v - H/B
(泥岩, 天端沈下に着目)

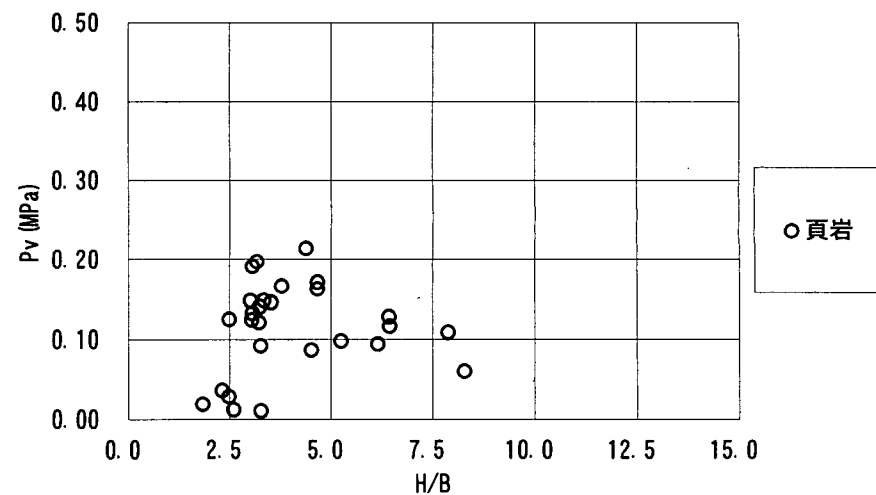


図-4.3.3 支保に作用する荷重 P_v - H/B
(頁岩, 天端沈下に着目)

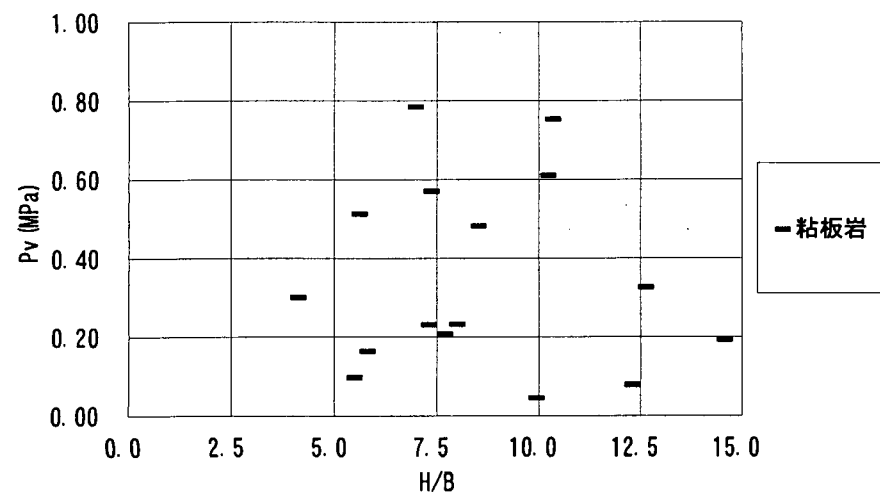


図-4.3.4 支保に作用する荷重 P_v - H/B
(粘板岩, 天端沈下に着目)

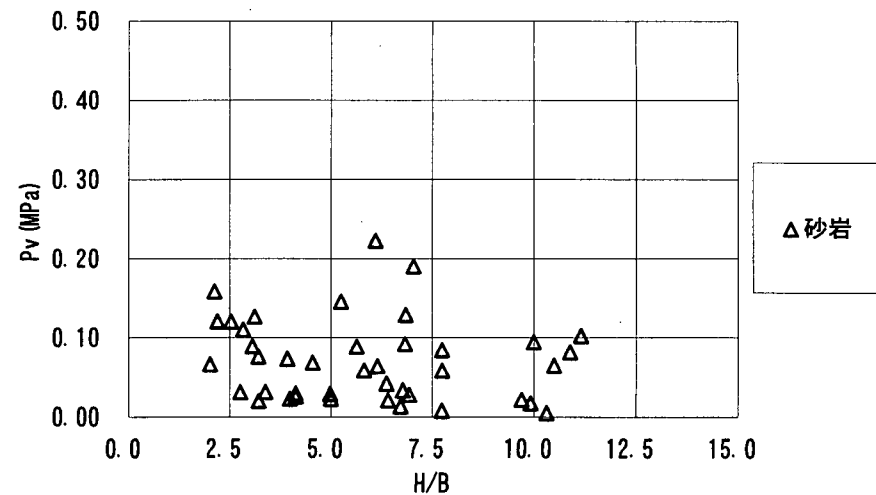


図-4.3.5 支保に作用する荷重 P_v - H/B
(砂岩, 天端沈下に着目)

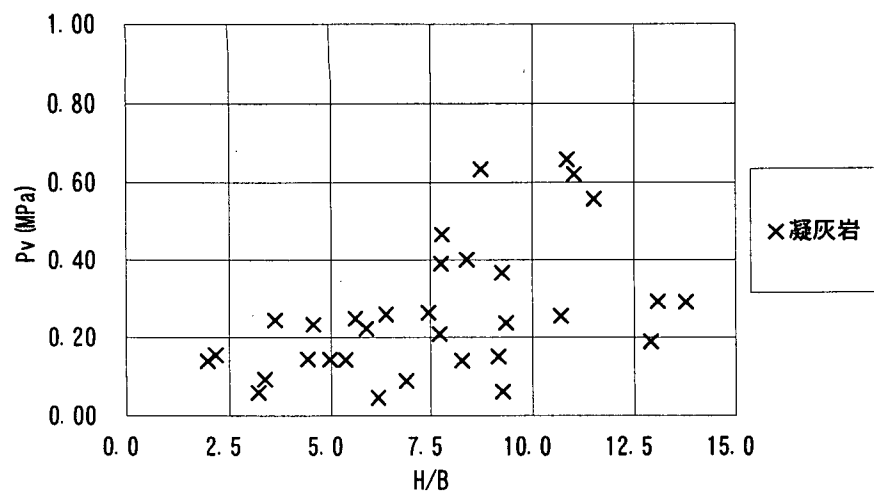


図-4.3.6 支保に作用する荷重 P_v - H/B
(凝灰岩, 天端沈下に着目)

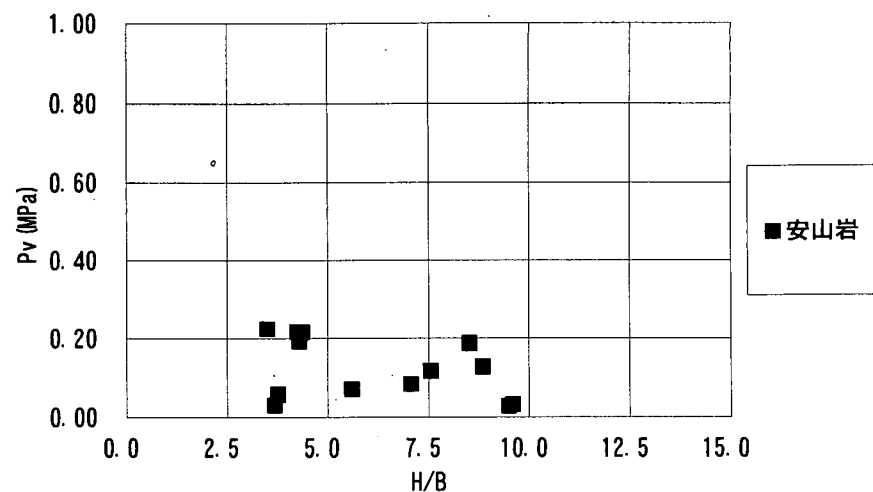


図-4.3.7 支保に作用する荷重 P_v - H/B
(安山岩, 天端沈下に着目)

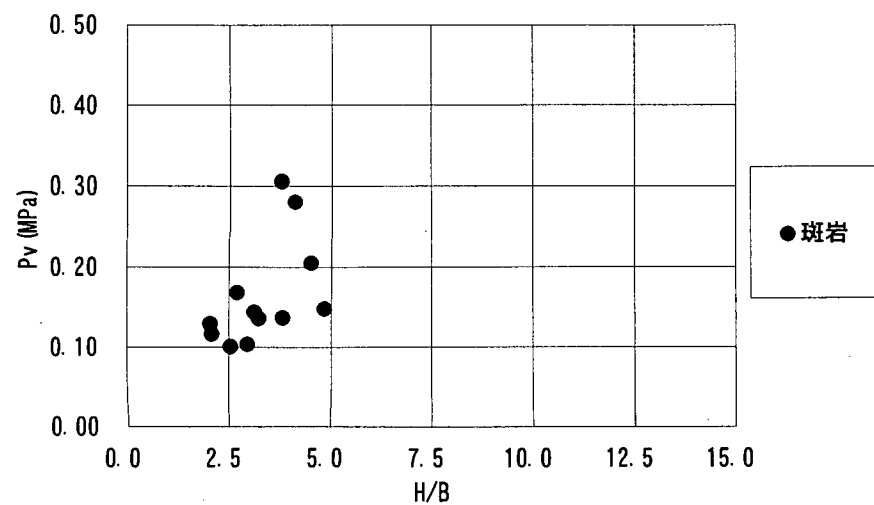


図-4.3.8 支保に作用する荷重 P_v - H/B
(斑岩, 天端沈下に着目)

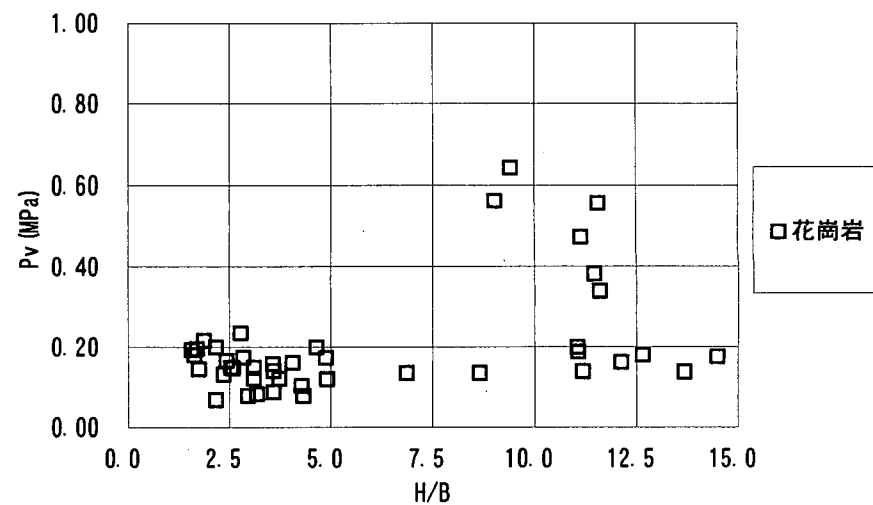


図-4.3.9 支保に作用する荷重 P_v - H/B
(花岗岩, 天端沈下に着目)

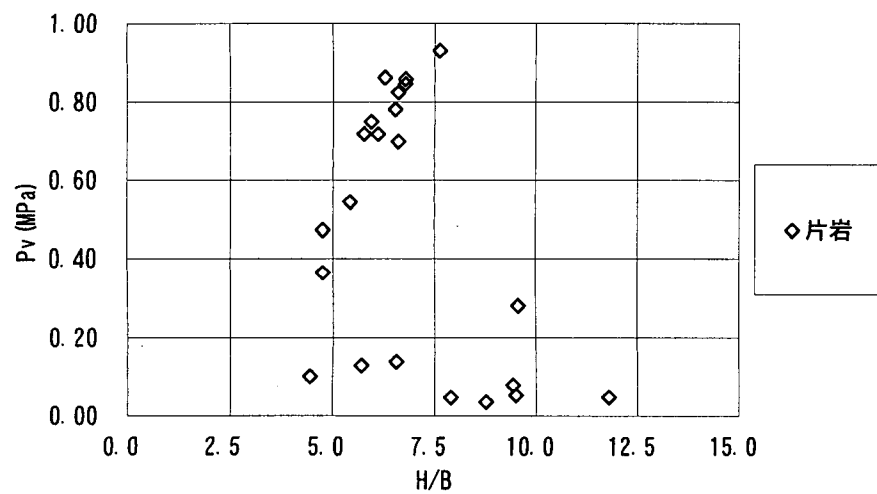


図-4.3.10 支保に作用する荷重 P_v - H/B
(片岩, 天端沈下に着目)

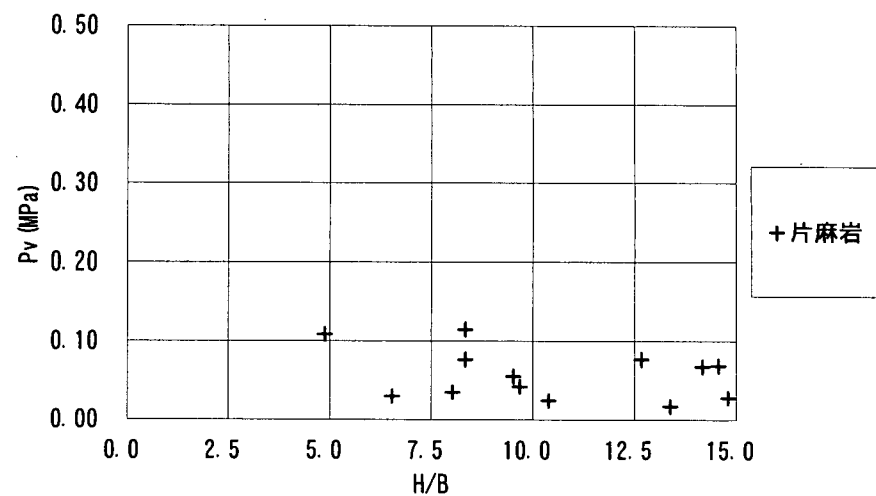


図-4.3.11 支保に作用する荷重 P_v - H/B
(片麻岩, 天端沈下に着目)

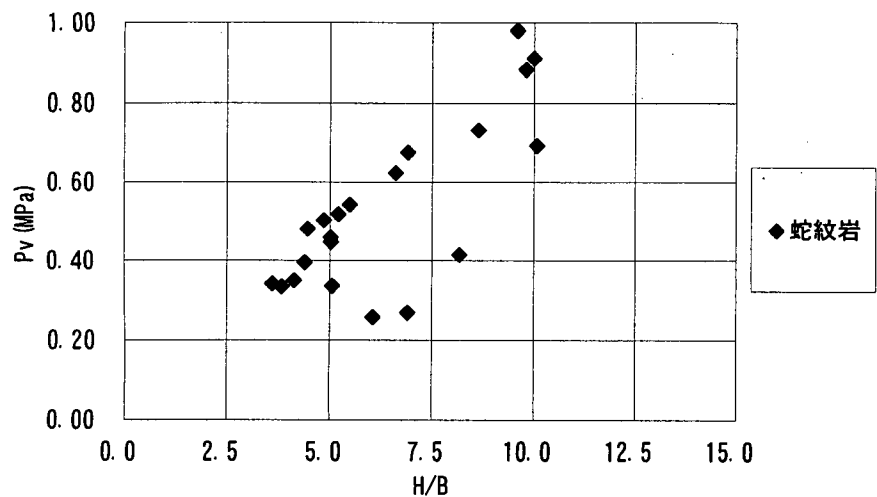


図-4.3.12 支保に作用する荷重 P_v - H/B
(蛇紋岩, 天端沈下に着目)

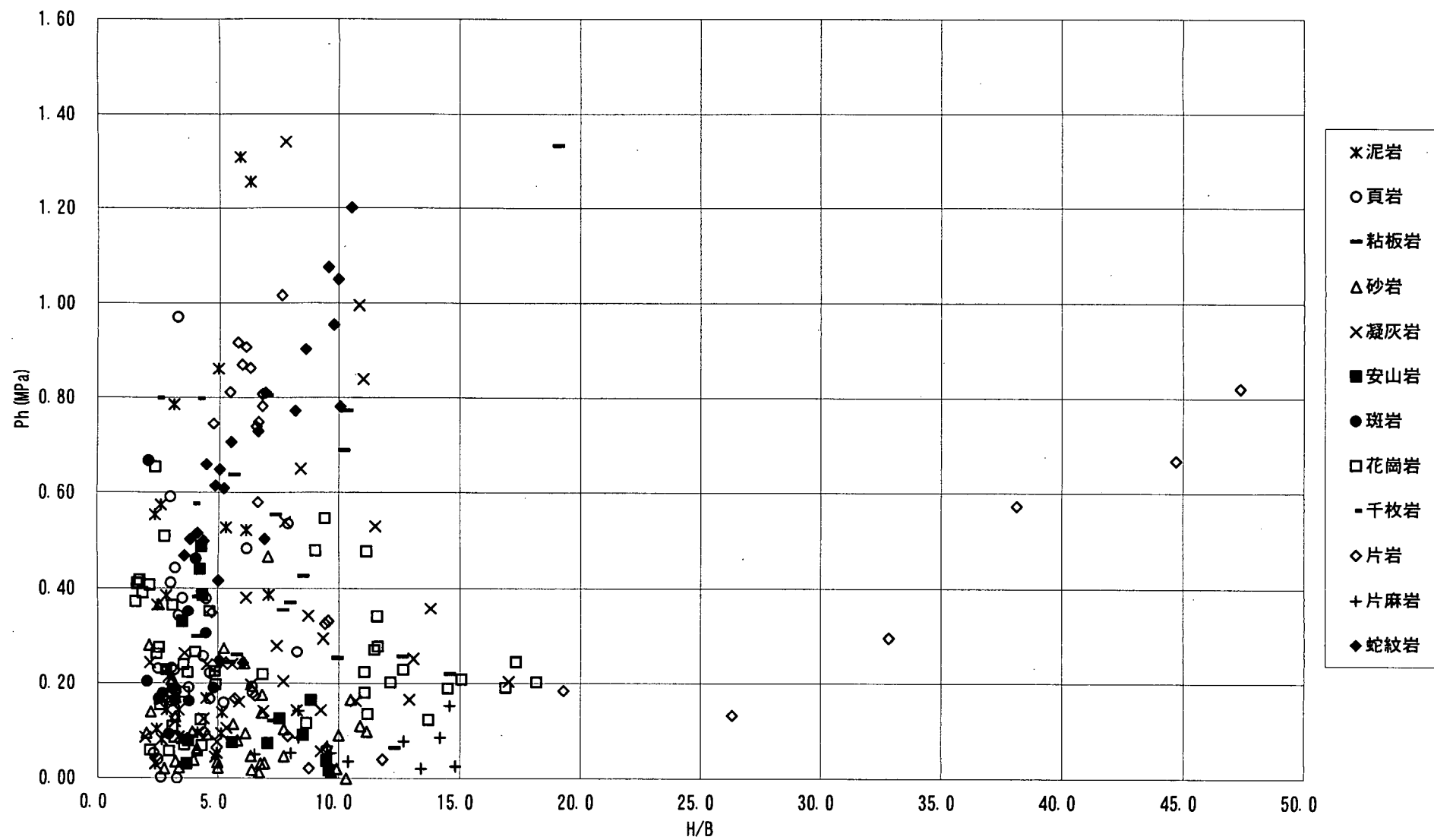


図-4.4.1 支保に作用する荷重 $Ph-H/B$ (全岩種, 内空変位に着目)

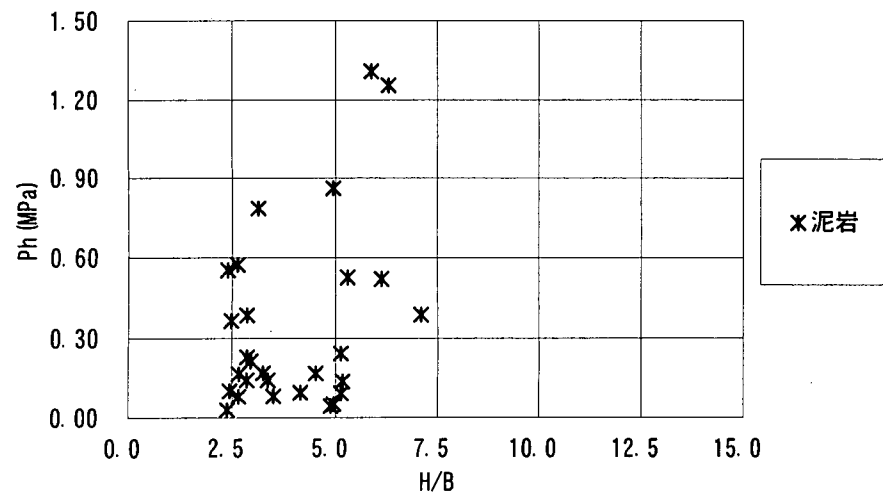


図-4.4.2 支保に作用する荷重 $Ph-H/B$
(泥岩, 内空変位に着目)

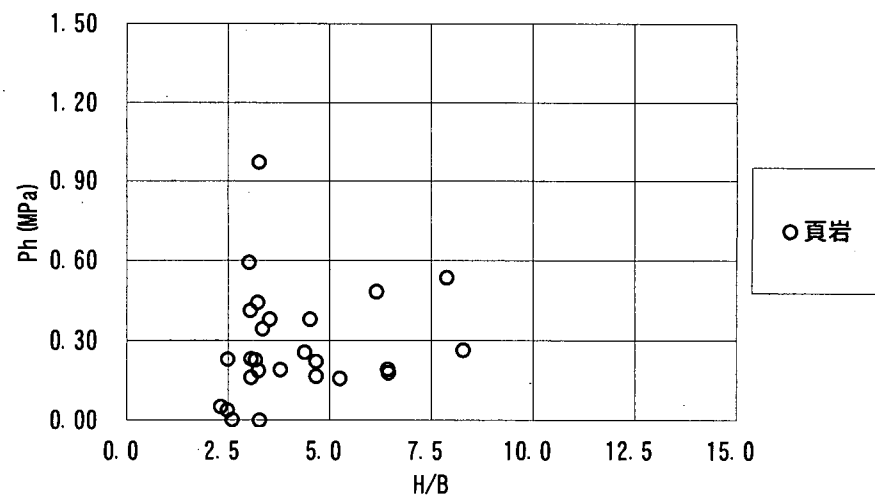


図-4.4.3 支保に作用する荷重 $Ph-H/B$
(頁岩, 内空変位に着目)

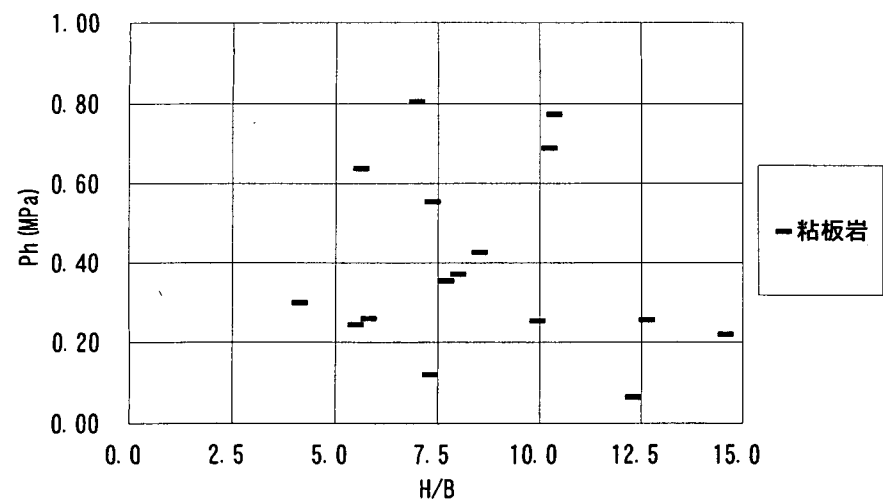


図-4.4.4 支保に作用する荷重 $Ph-H/B$
(粘板岩, 内空変位に着目)

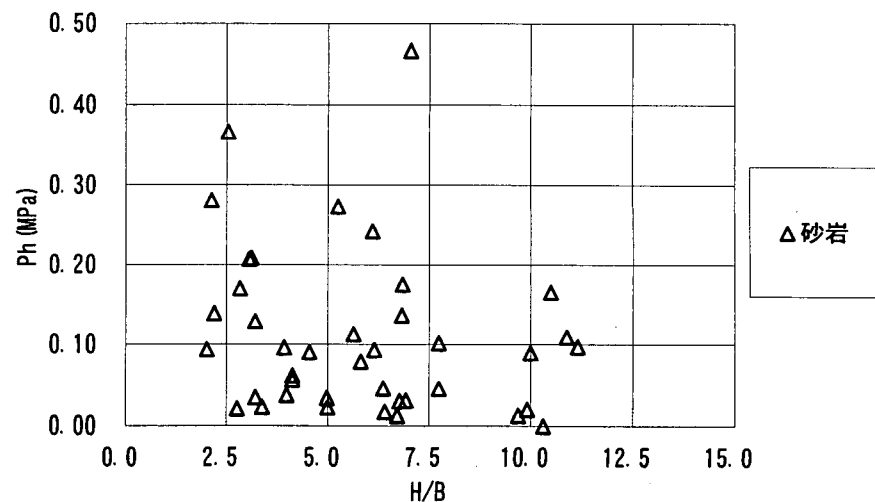


図-4.4.5 支保に作用する荷重 $Ph-H/B$
(砂岩, 内空変位に着目)

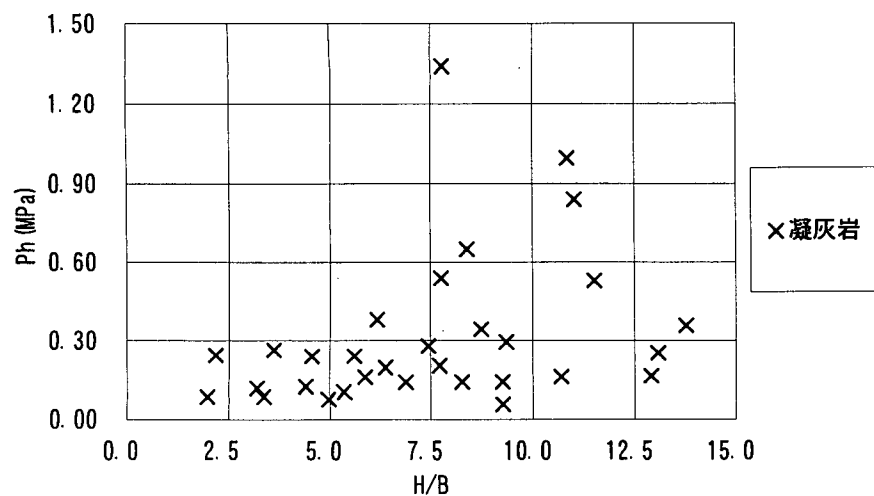


図-4.4.6 支保に作用する荷重 Ph - H/B
(凝灰岩, 内空変位に着目)

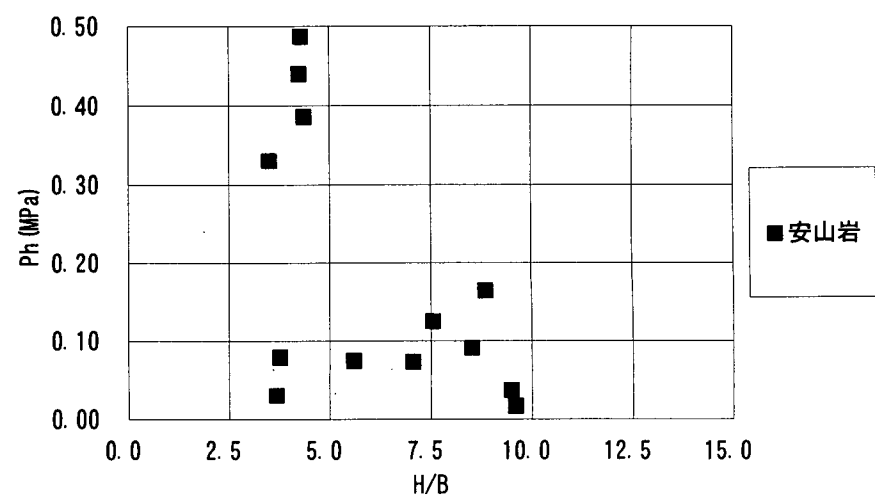


図-4.4.7 支保に作用する荷重 Ph - H/B
(安山岩, 内空変位に着目)

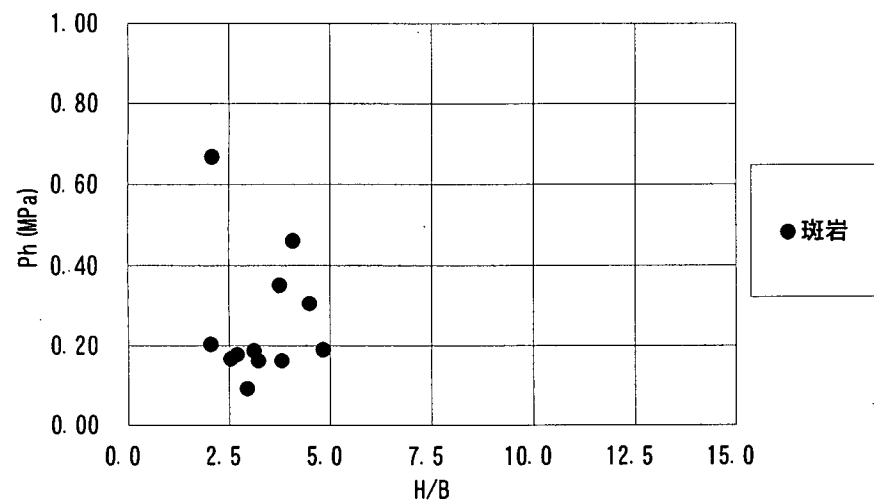


図-4.4.8 支保に作用する荷重 Ph - H/B
(斑岩, 内空変位に着目)

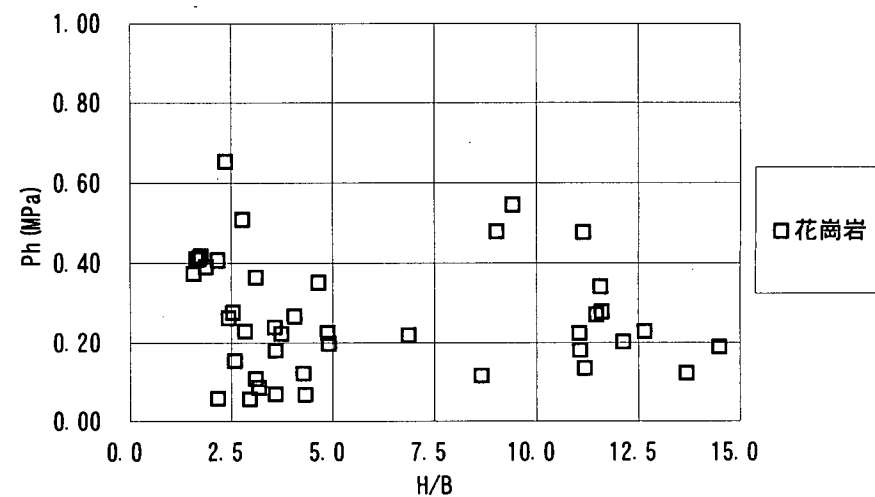


図-4.4.9 支保に作用する荷重 Ph - H/B
(花岗岩, 内空変位に着目)

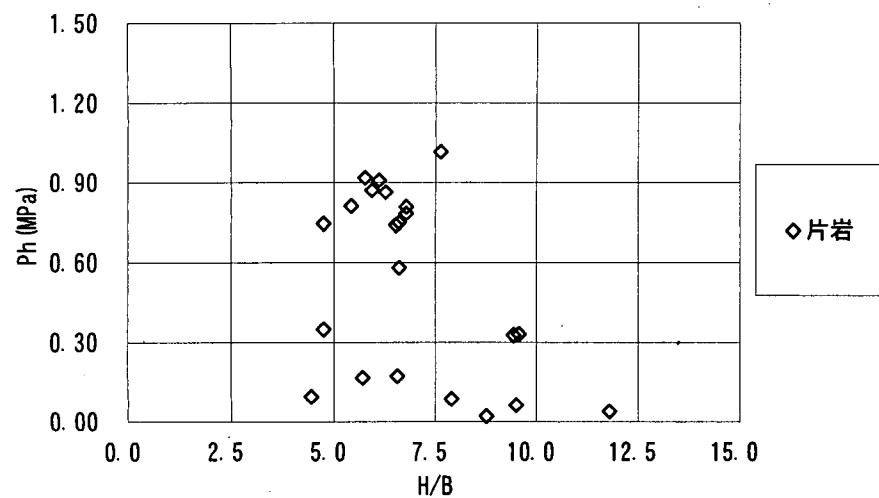


図-4. 4. 10 支保に作用する荷重 $Ph-H/B$
(片岩, 内空変位に着目)

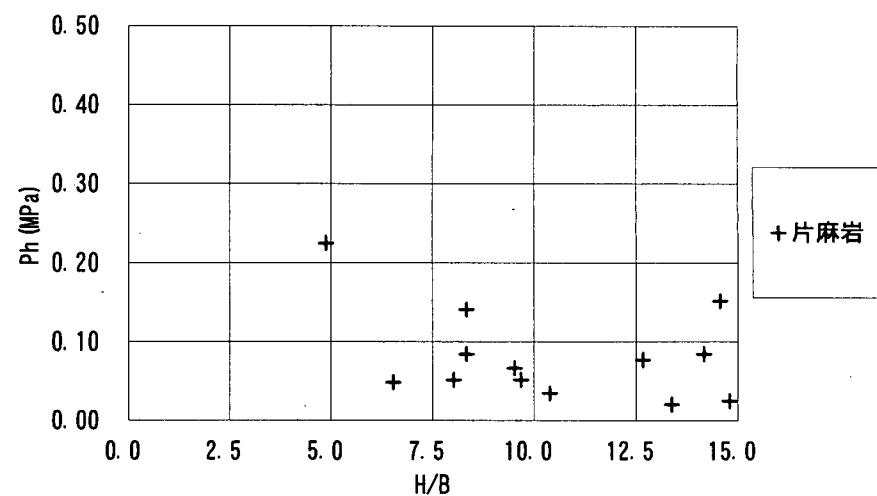


図-4. 4. 11 支保に作用する荷重 $Ph-H/B$
(片麻岩, 内空変位に着目)

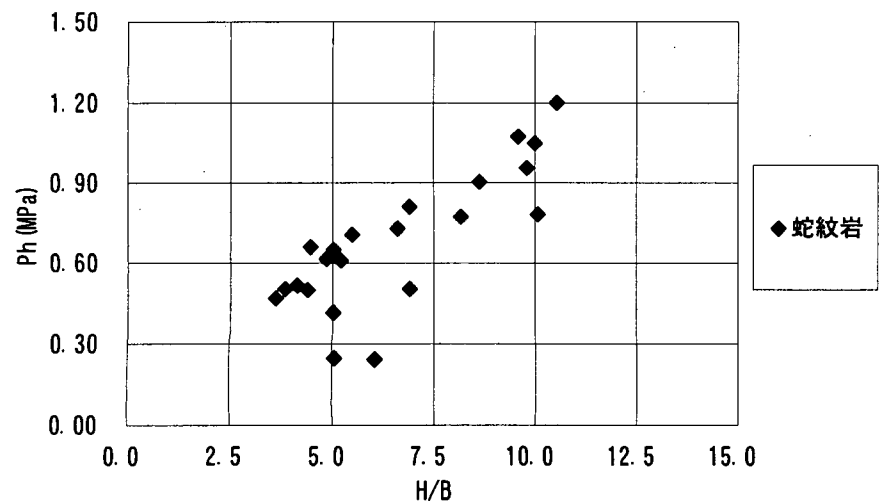


図-4. 4. 12 支保に作用する荷重 $Ph-H/B$
(蛇紋岩, 内空変位に着目)

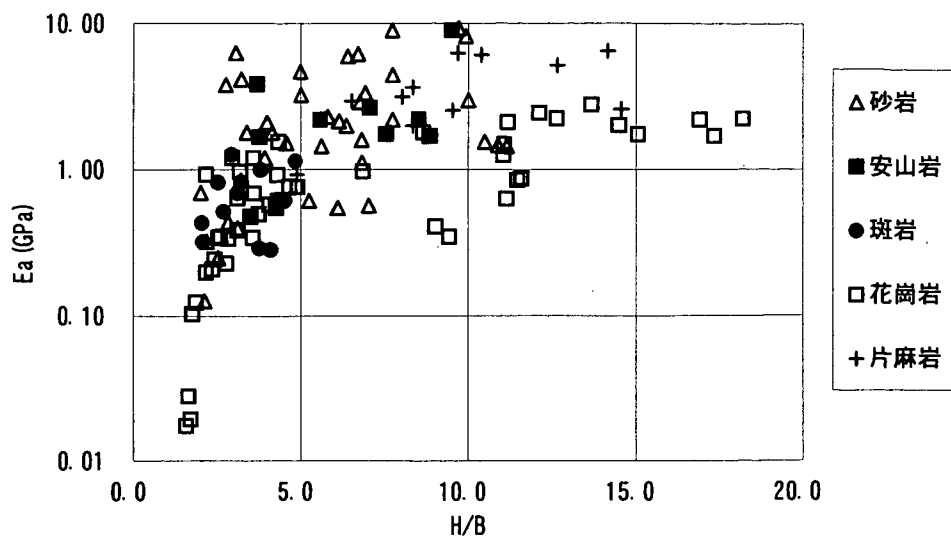


図-4.5.1 E_a -H/B (変位の小さい岩石のグループ)

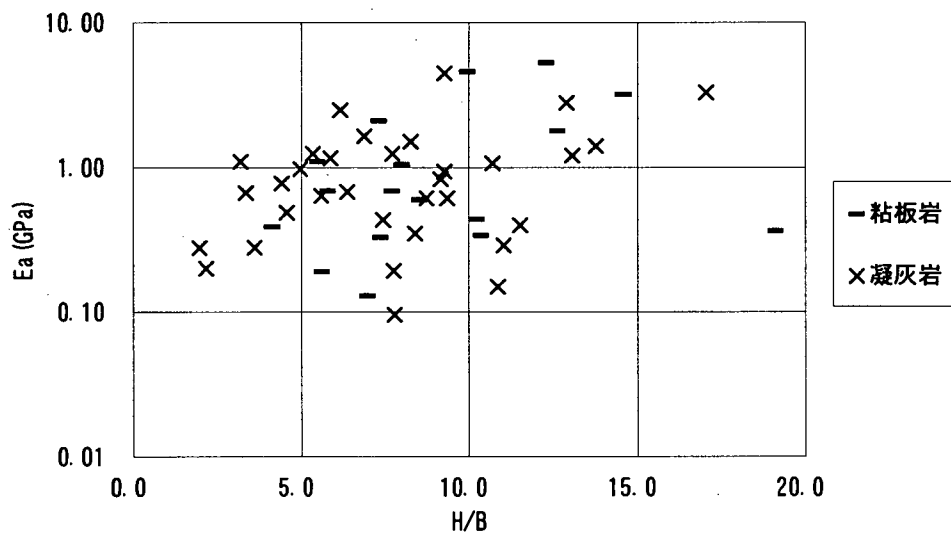


図-4.5.2 E_a -H/B (変位が増加する岩石のグループ)

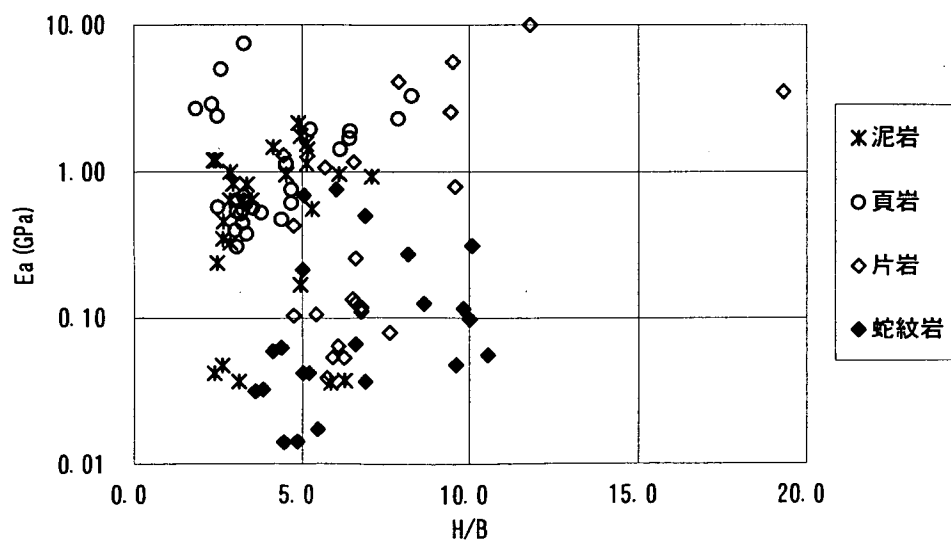


図-4.5.3 E_a -H/B (変位の大きい岩石のグループ)

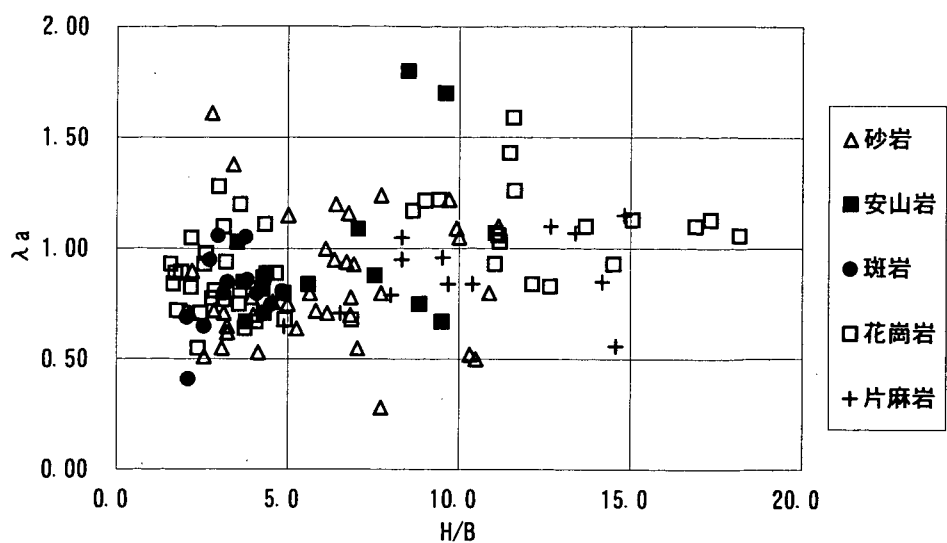


図-4.6.1 λa -H/B (変位の小さい岩石のグループ)

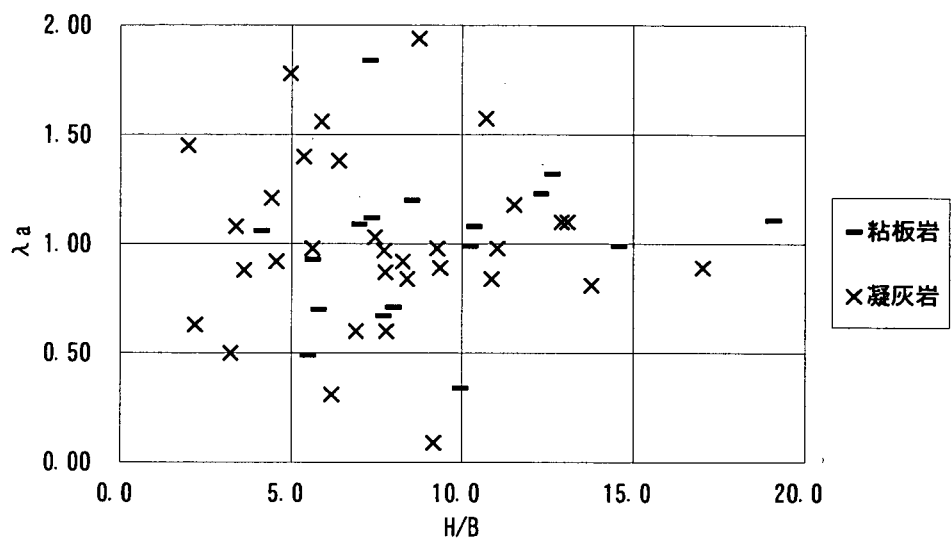


図-4.6.2 λa -H/B (変位が増加する岩石グループ)

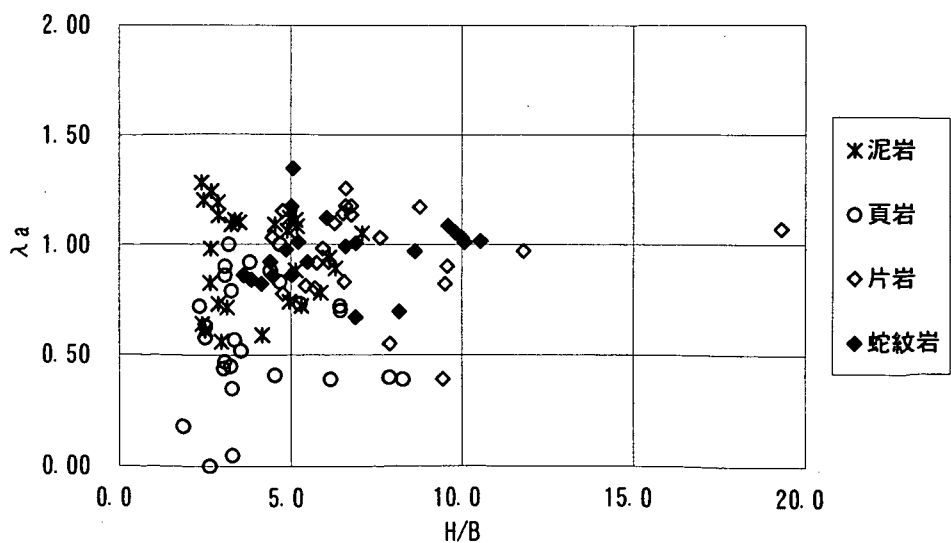


図-4.6.3 λa -H/B (変位の大きい岩石のグループ)

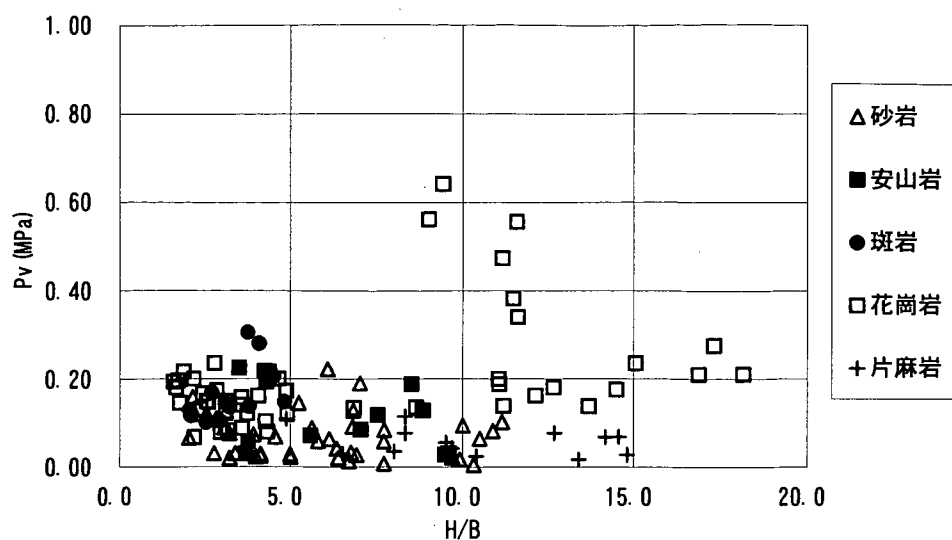


図-4.7.1 Pv-H/B (変位の小さい岩石のグループ)

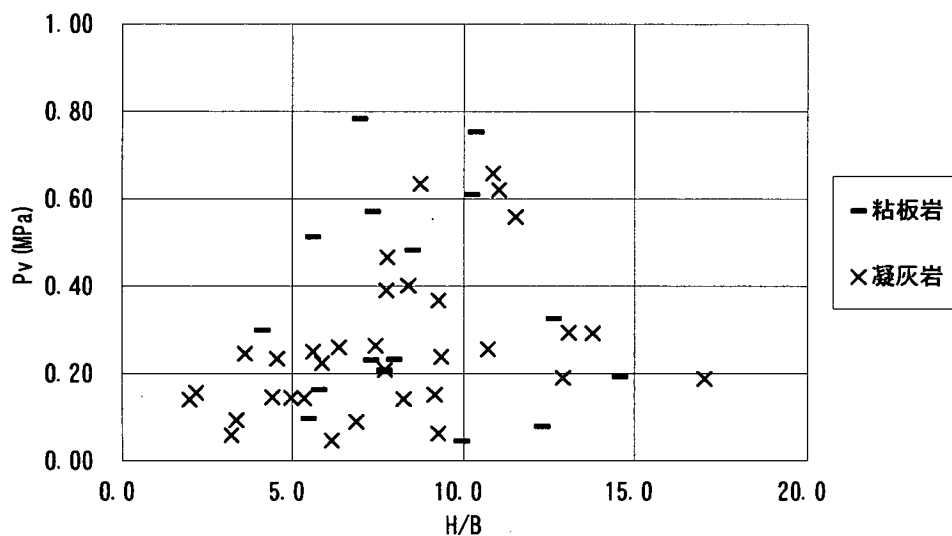


図-4.7.2 Pv-H/B (変位が増加する岩石のグループ)

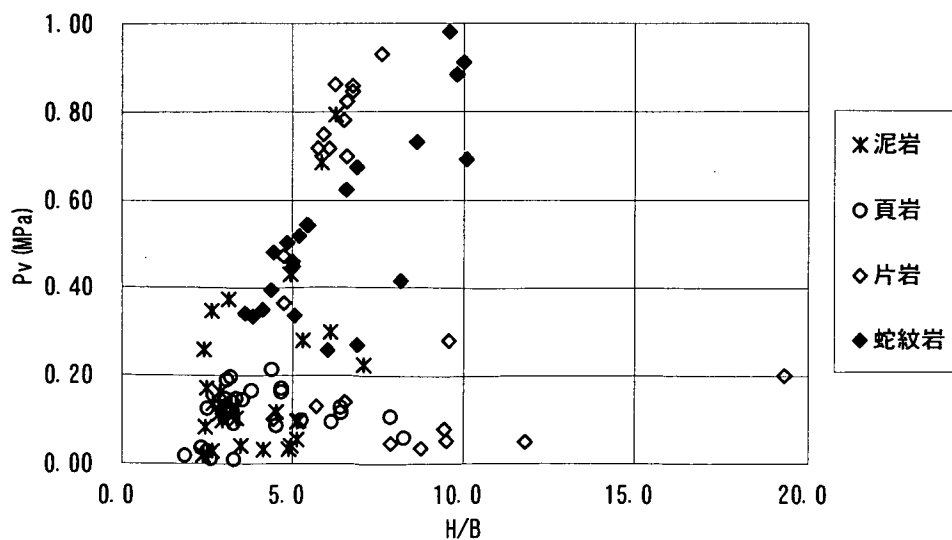


図-4.7.3 Pv-H/B (変位の大きい岩石のグループ)

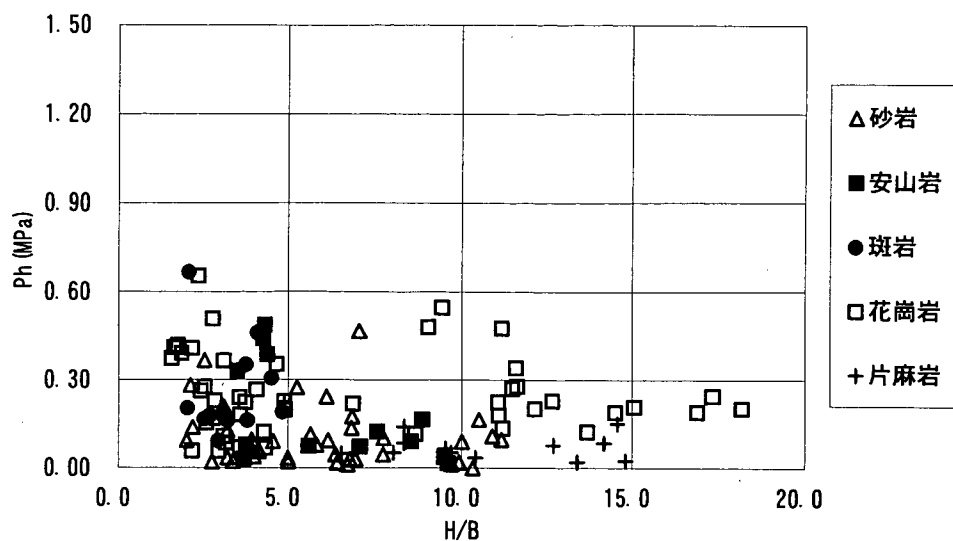


図-4.8.1 Ph-H/B (変位の小さい岩石のグループ)

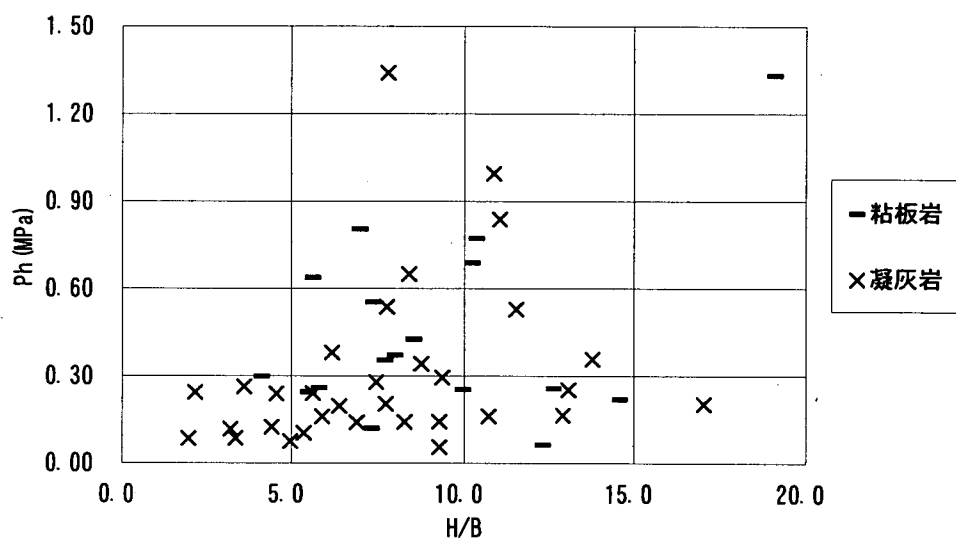


図-4.8.2 Ph-H/B (変位が増加する岩石のグループ)

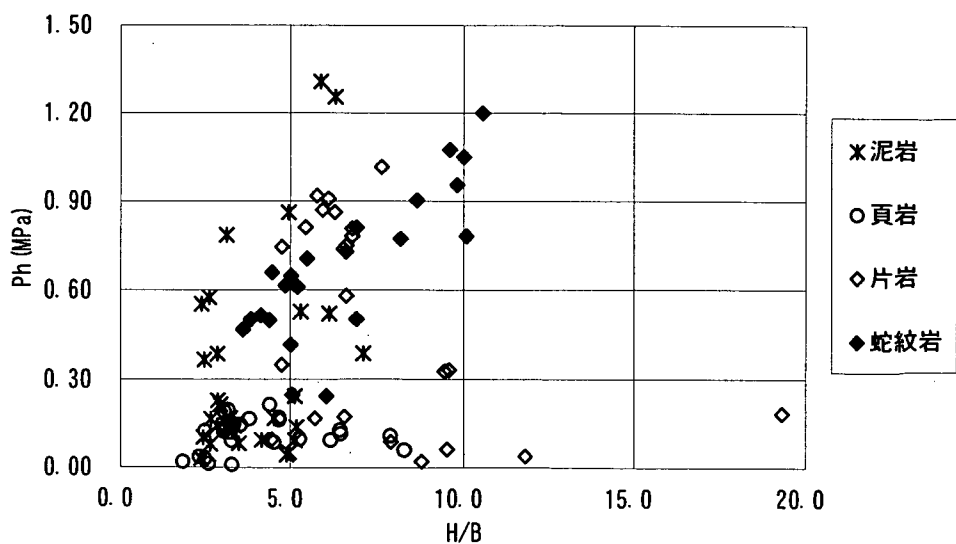


図-4.8.3 Ph-H/B (変位の大きい岩石のグループ)

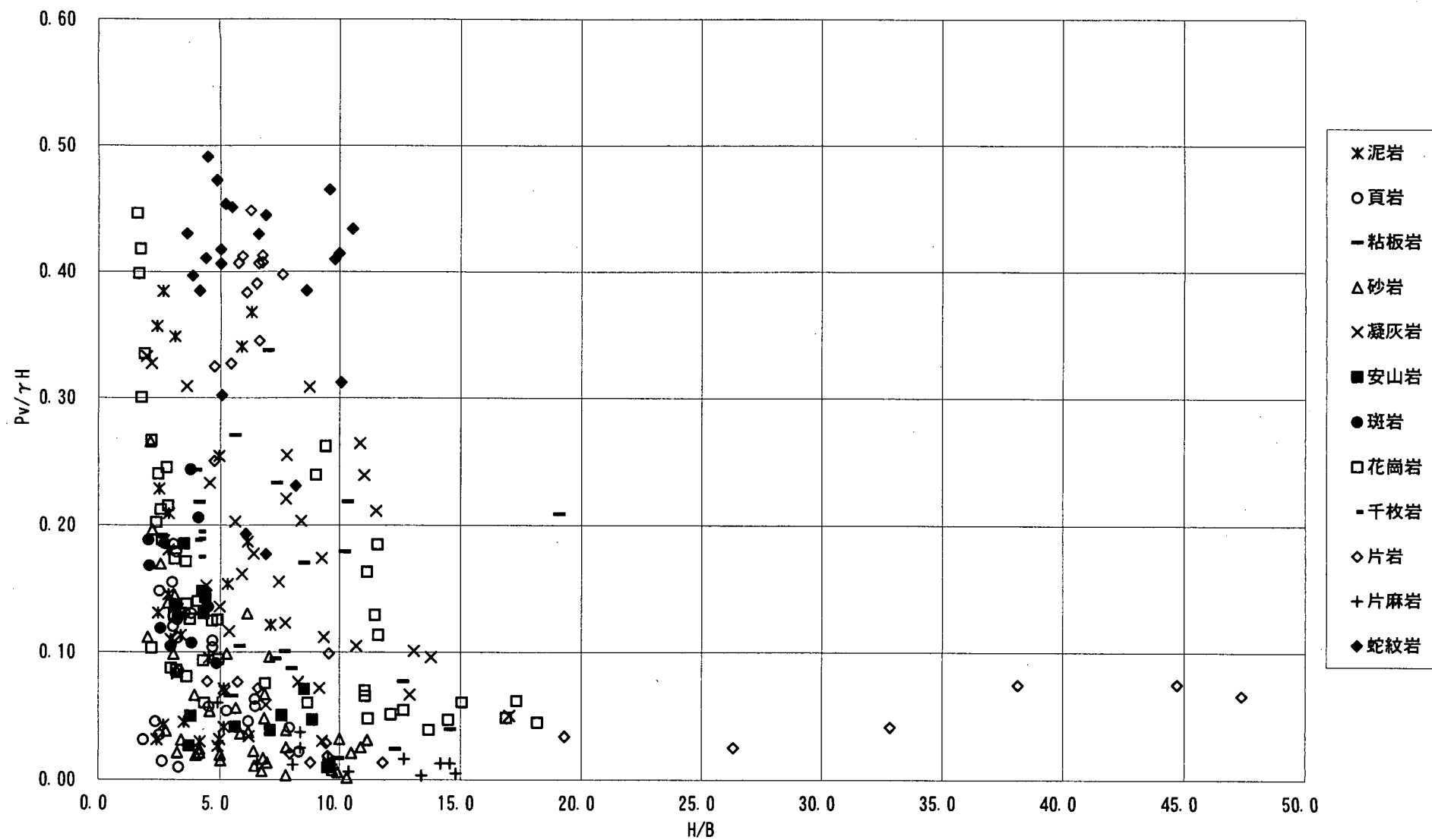


図-4.9.1 初期土圧 γH に対する作用荷重 P_v の比 H/B (全岩種)

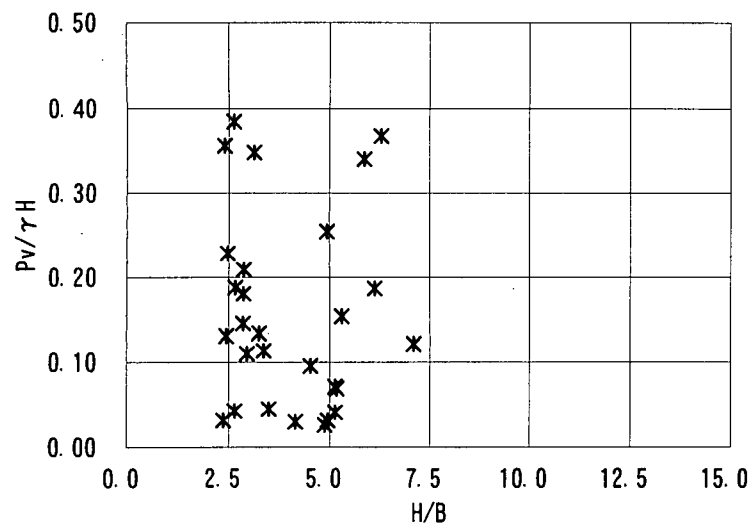


図-4. 9. 2 初期土圧 γH に対する作用荷重 P_v の比- H/B (泥岩)

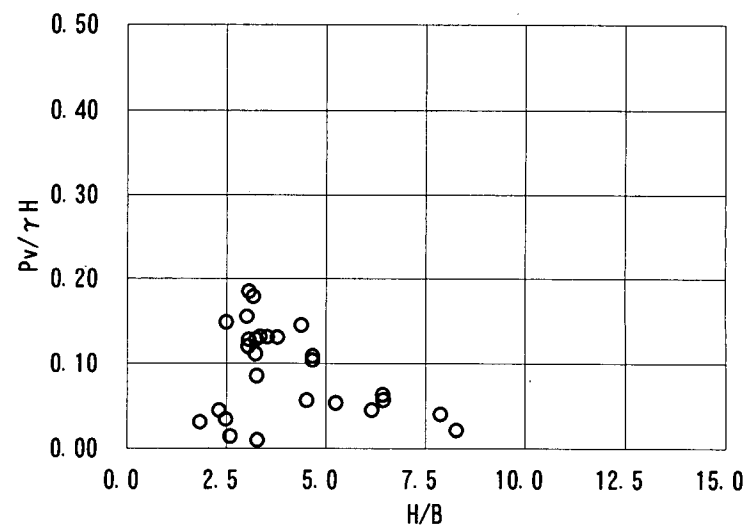


図-4. 9. 3 初期土圧 γH に対する作用荷重 P_v の比- H/B (頁岩)

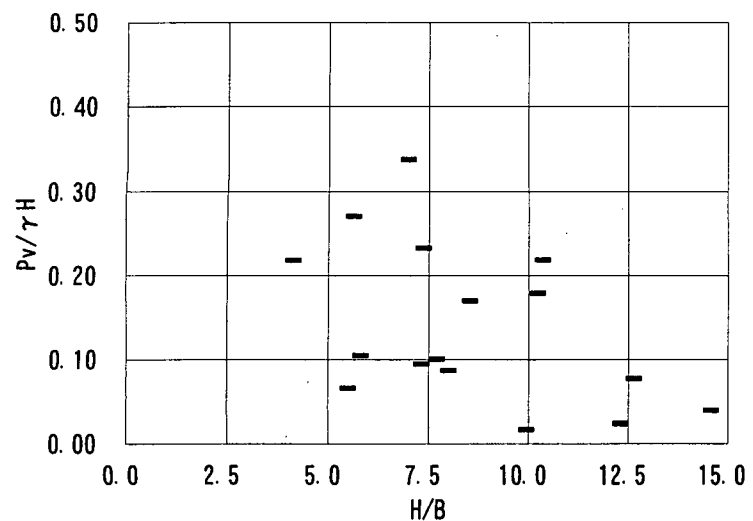


図-4. 9. 4 初期土圧 γH に対する作用荷重 P_v の比- H/B (粘板岩)

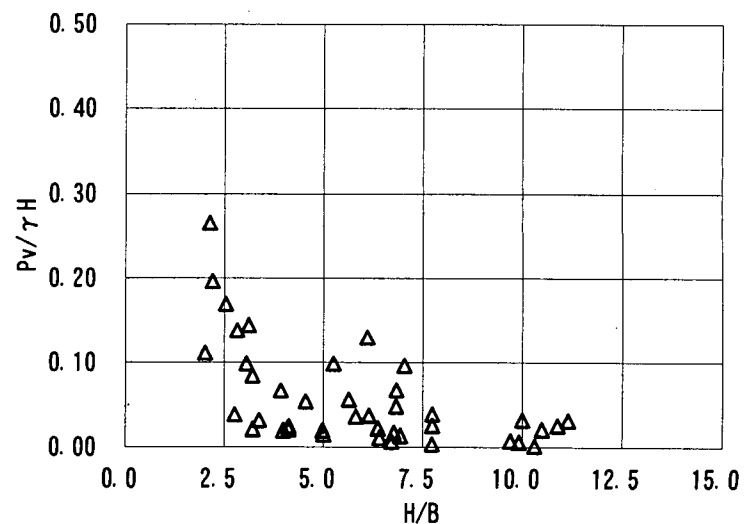


図-4. 9. 5 初期土圧 γH に対する作用荷重 P_v の比- H/B (砂岩)

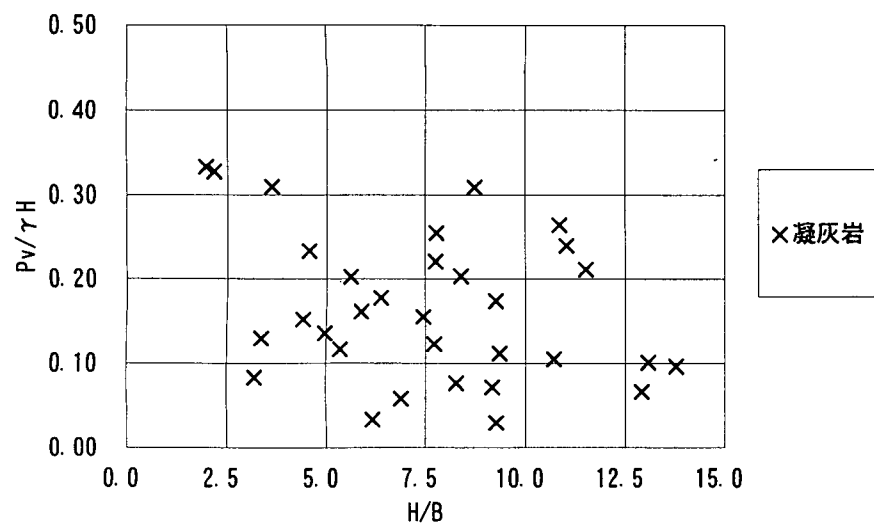


図-4.9.6 初期土圧 γH に対する作用荷重 P_v の比 H/B (凝灰岩)

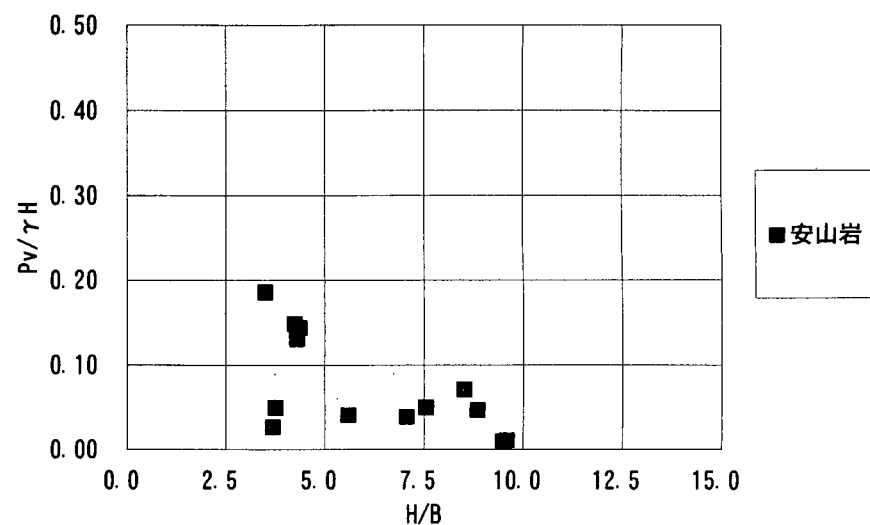


図-4.9.7 初期土圧 γH に対する作用荷重 P_v の比 H/B (安山岩)

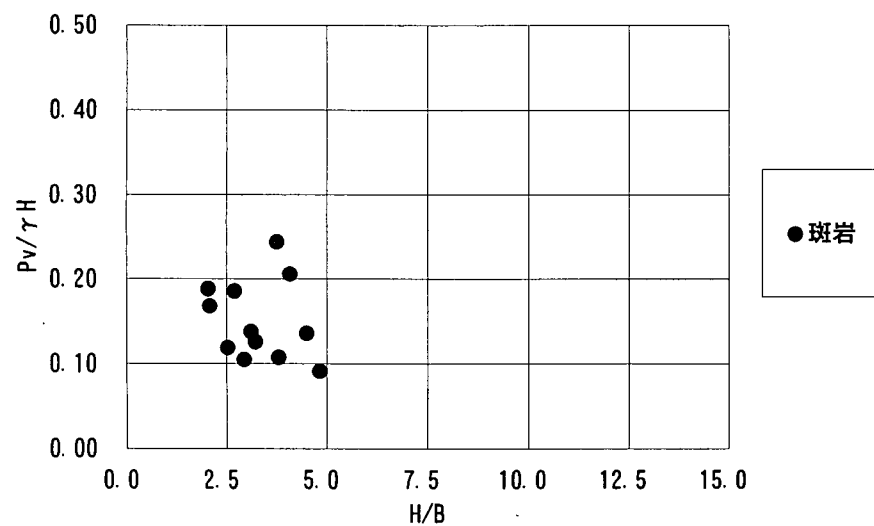


図-4.9.8 初期土圧 γH に対する作用荷重 P_v の比 H/B (斑岩)

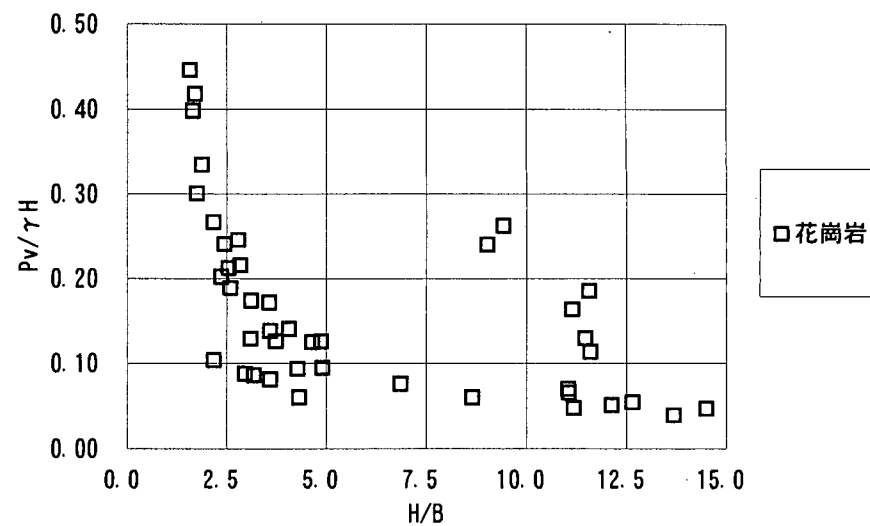


図-4.9.9 初期土圧 γH に対する作用荷重 P_v の比 H/B (花崗岩)

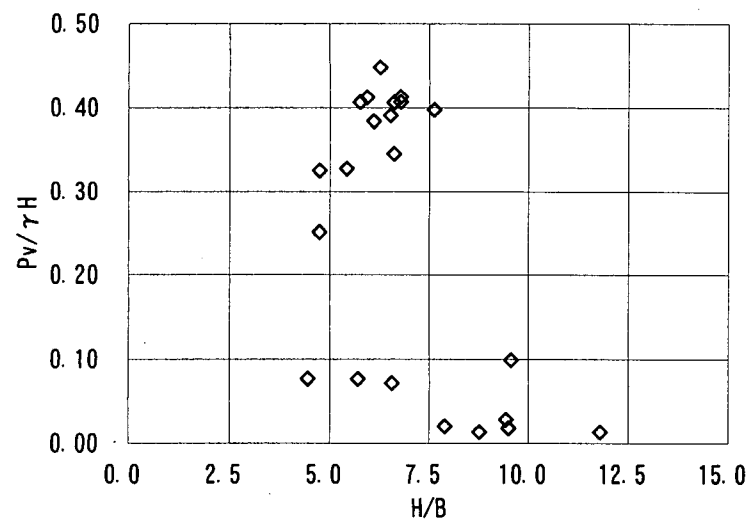


図-4.9.10 初期土圧 γH に対する作用荷重 P_v の比- H/B (片岩)

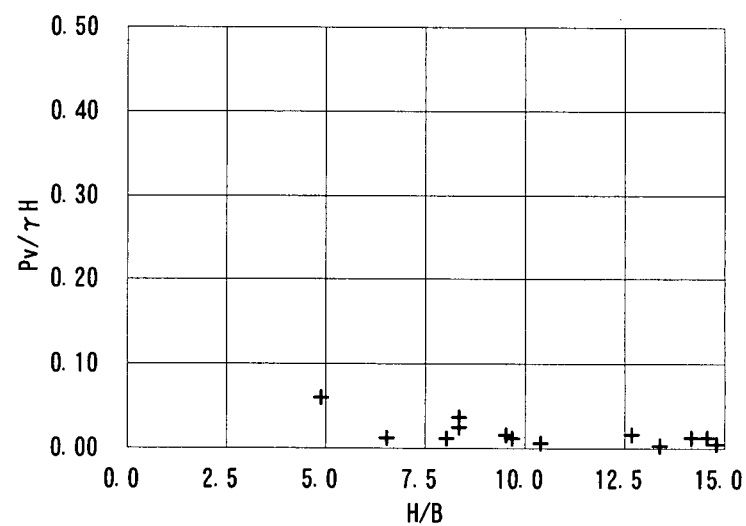


図-4.9.11 初期土圧 γH に対する作用荷重 P_v の比- H/B (片麻岩)

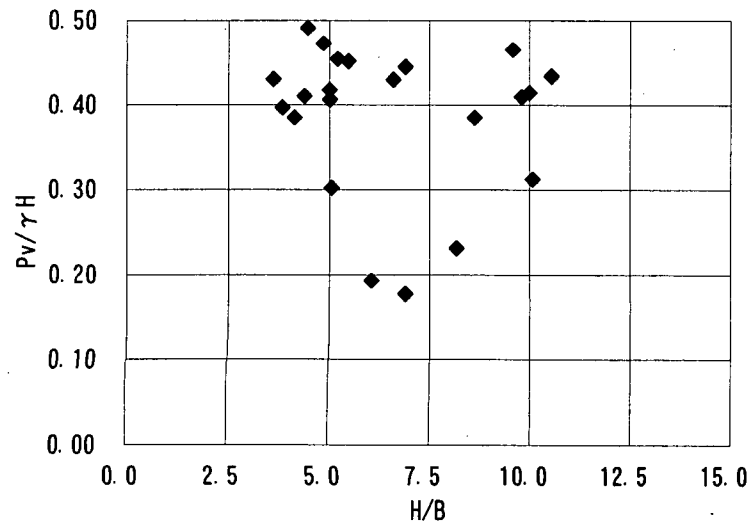


図-4.9.12 初期土圧 γH に対する作用荷重 P_v の比- H/B (蛇紋岩)

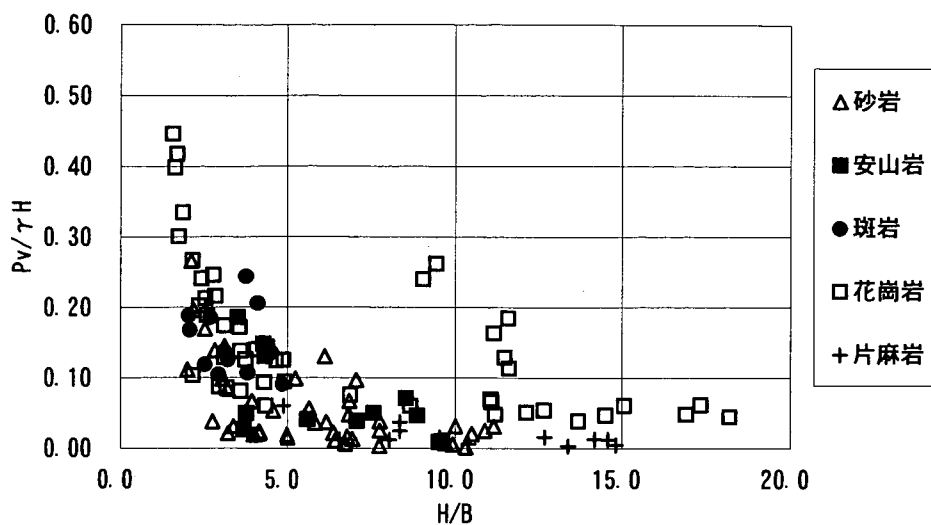


図-4. 10. 1 $P_v/\gamma H-H/B$ (変位の小さい岩石のグループ)

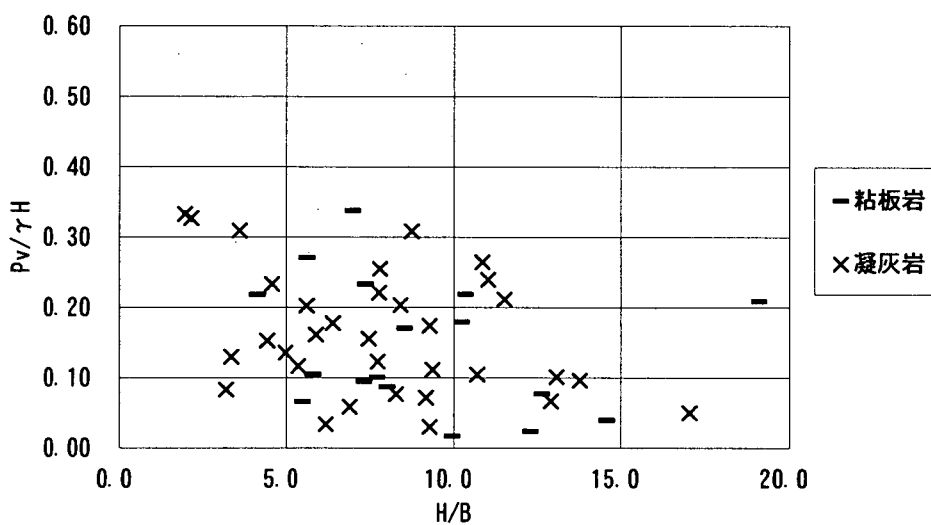


図-4. 10. 2 $P_v/\gamma H-H/B$ (変位が増加する岩石のグループ)

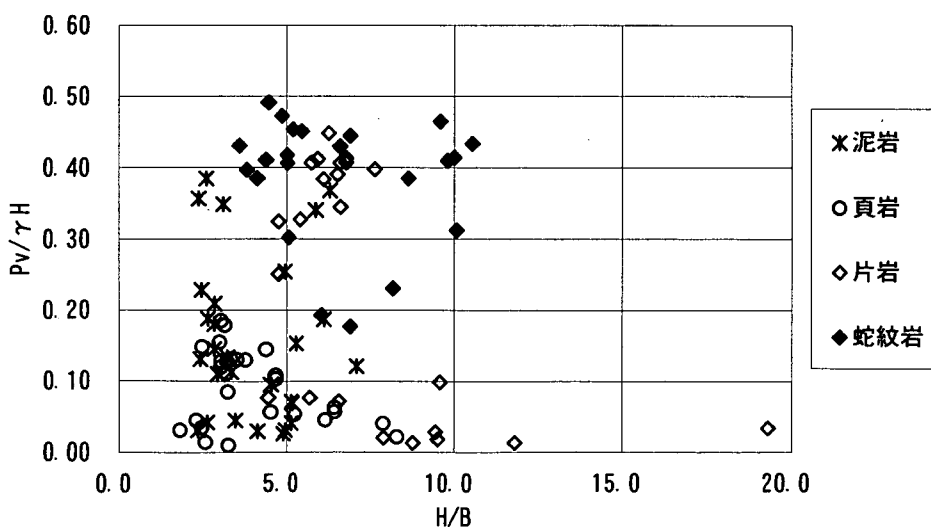


図-4. 10. 3 $P_v/\gamma H-H/B$ (変位の大きい岩石のグループ)

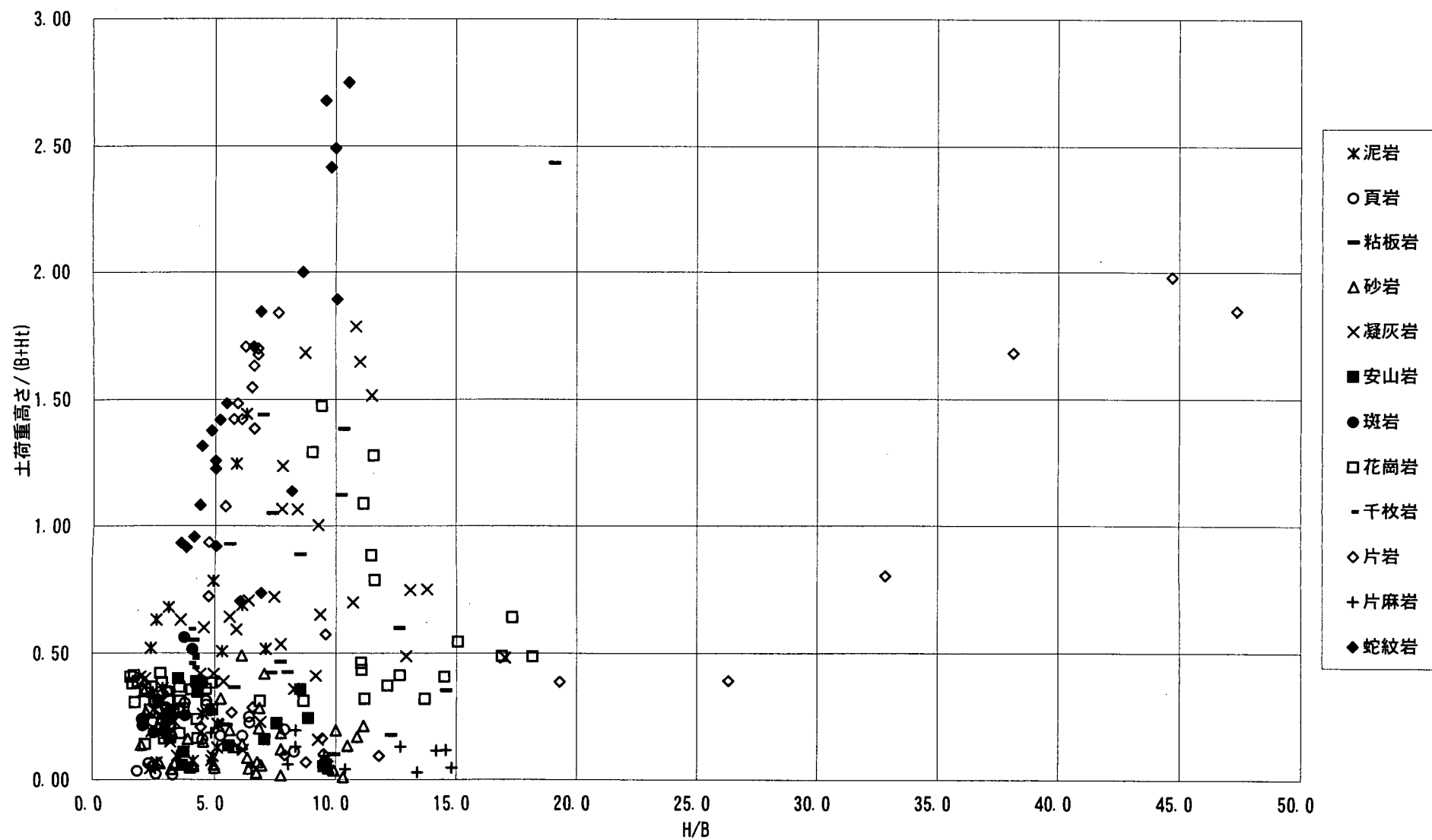


図-4.11.1 土荷重高さ/(B+Ht)-H/B (全岩種)

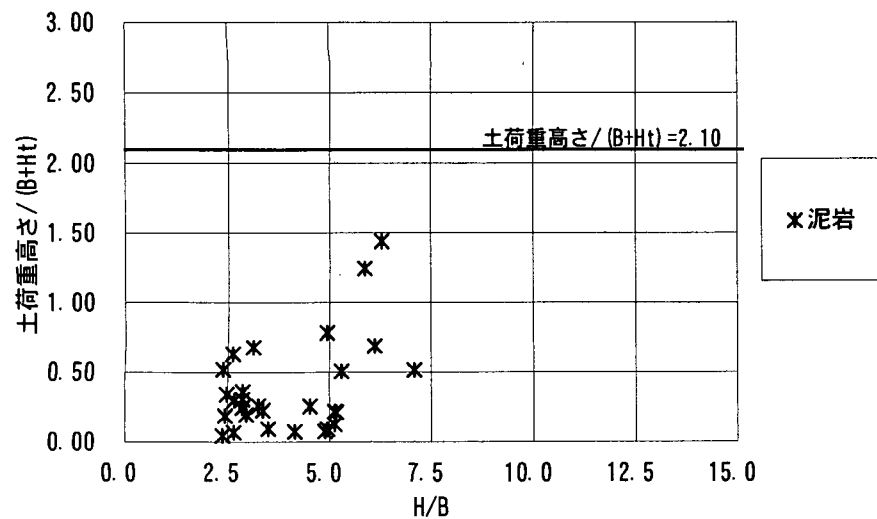


図-4.11.2 土荷重高さ / (B+Ht) - H/B (泥岩)

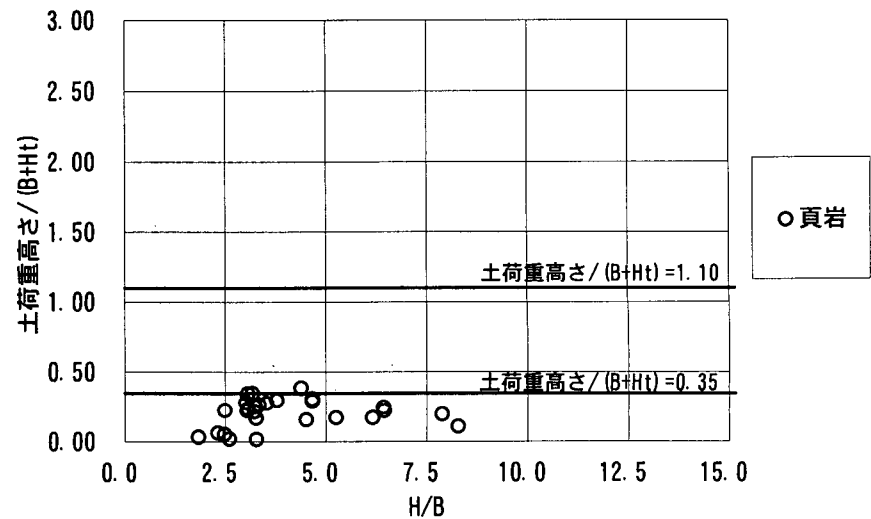


図-4.11.3 土荷重高さ / (B+Ht) - H/B (頁岩)

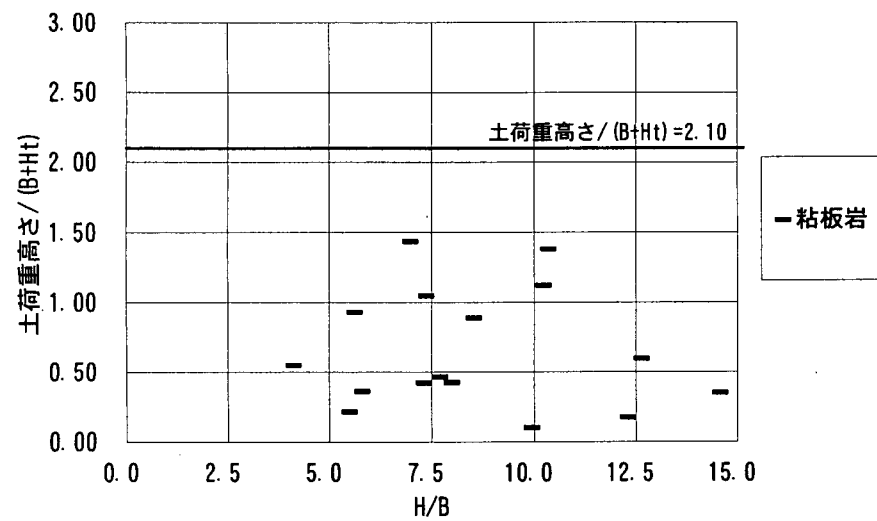


図-4.11.4 土荷重高さ / (B+Ht) - H/B (粘板岩)

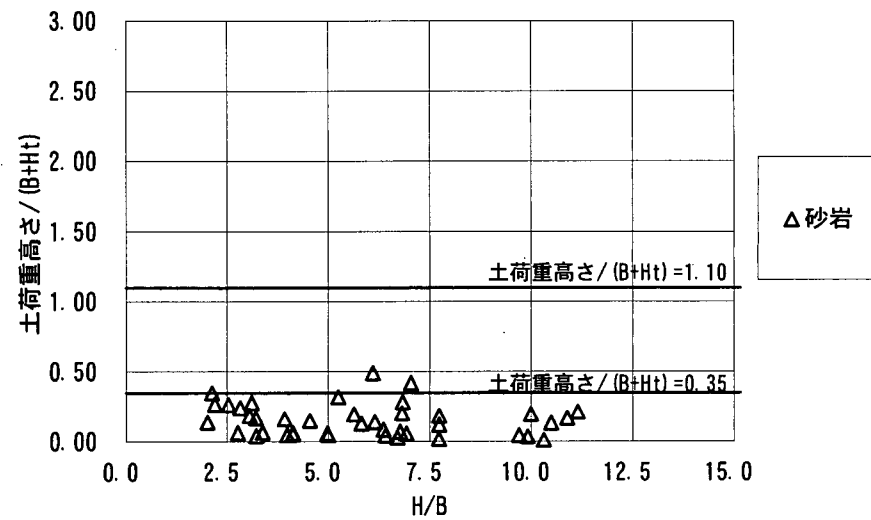


図-4.11.5 土荷重高さ / (B+Ht) - H/B (砂岩)

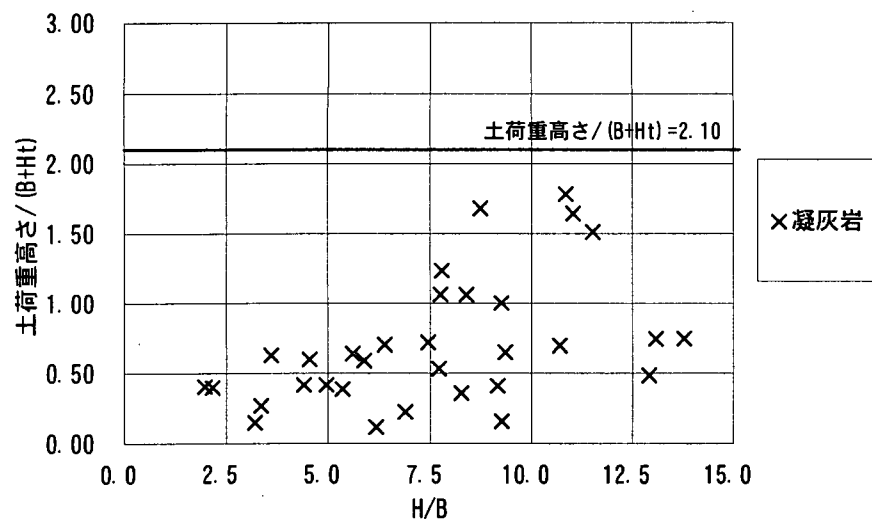


図-4.11.6 土荷重高さ/(B+Ht) - H/B (凝灰岩)

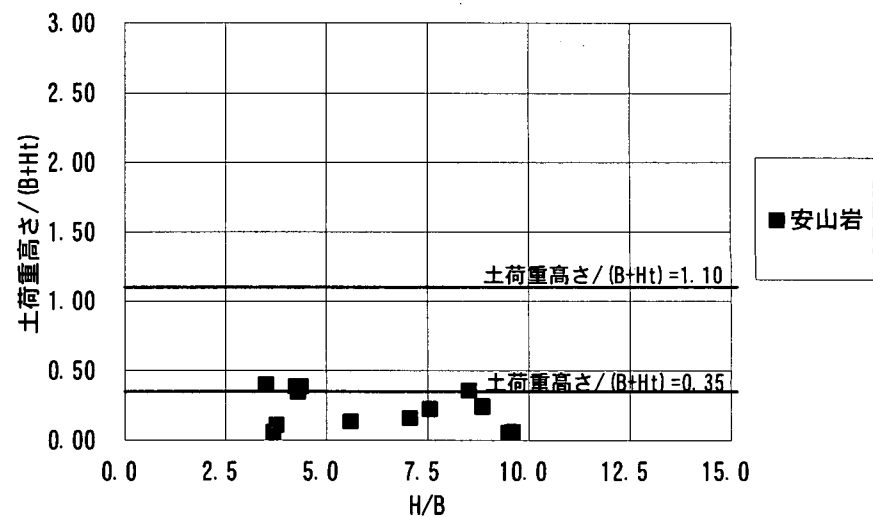


図-4.11.7 土荷重高さ/(B+Ht) - H/B (安山岩)

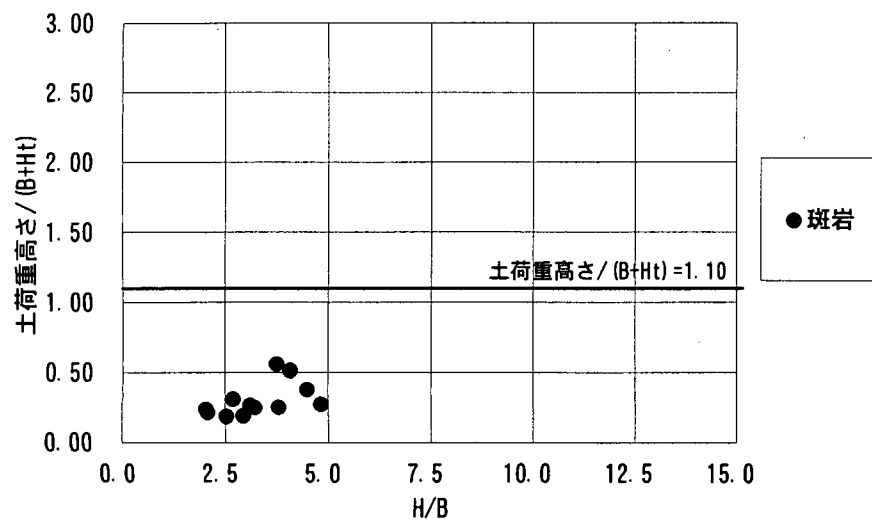


図-4.11.8 土荷重高さ/(B+Ht) - H/B (斑岩)

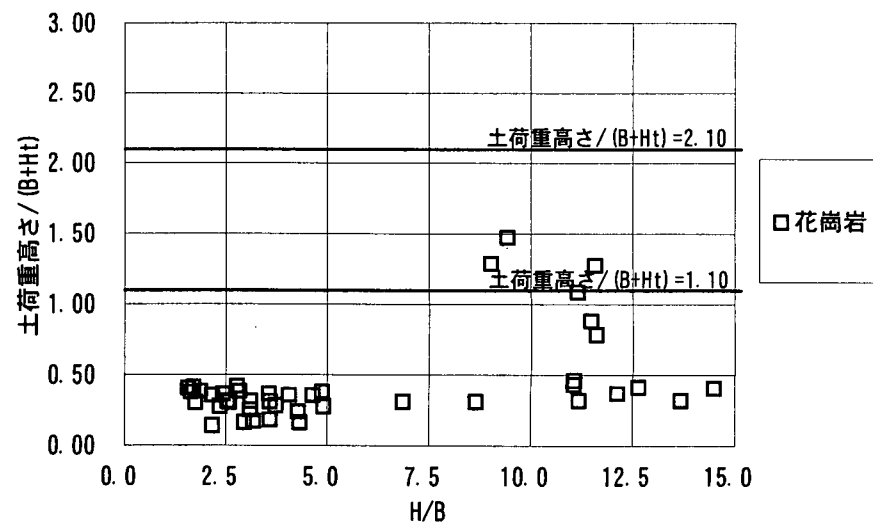


図-4.11.9 土荷重高さ/(B+Ht) - H/B (花崗岩)

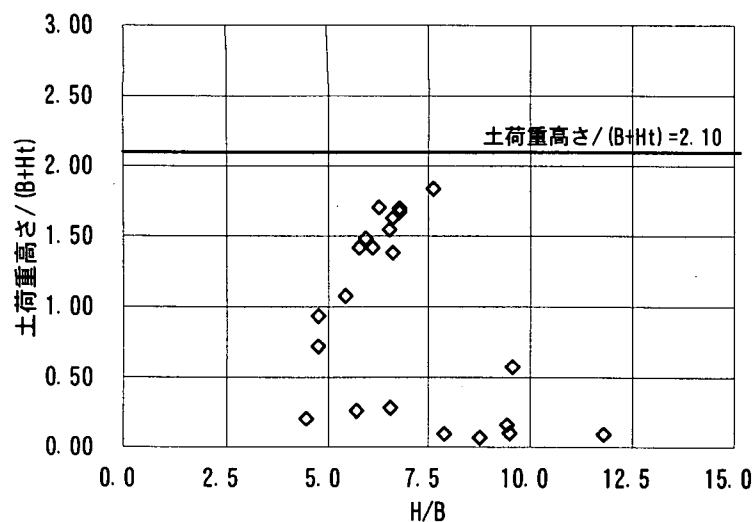


図-4.11.10 土荷重高さ/(B+Ht)-H/B (片岩)

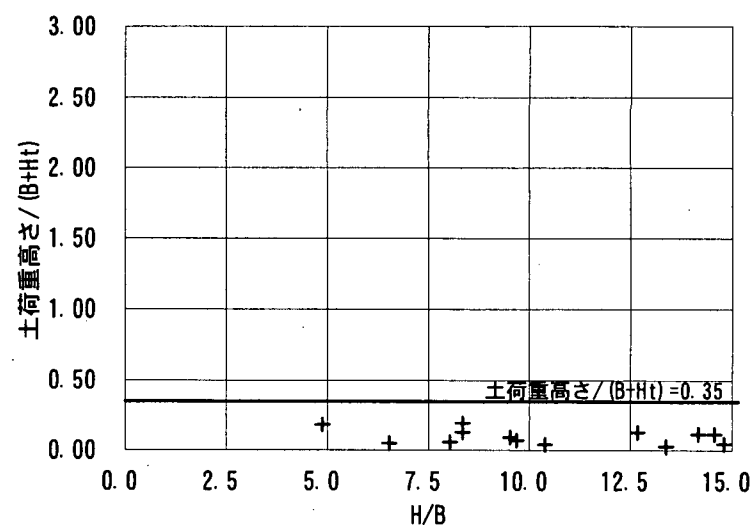


図-4.11.11 土荷重高さ/(B+Ht)-H/B (片麻岩)

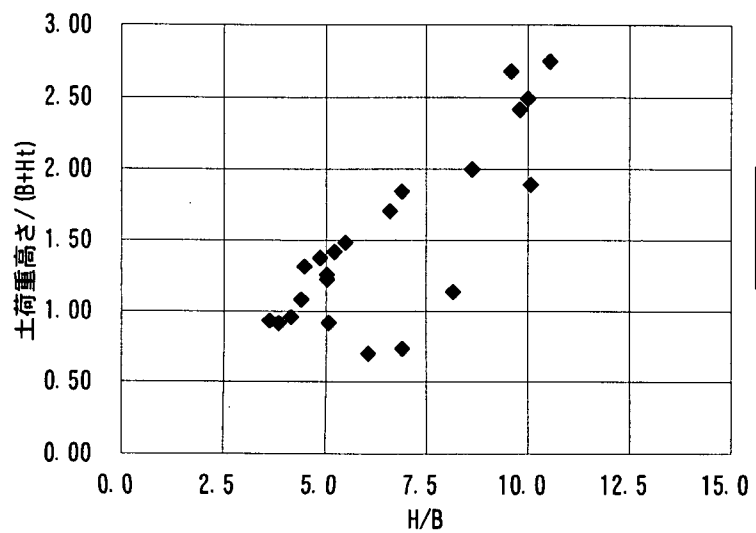


図-4.11.12 土荷重高さ/(B+Ht)-H/B (蛇紋岩)

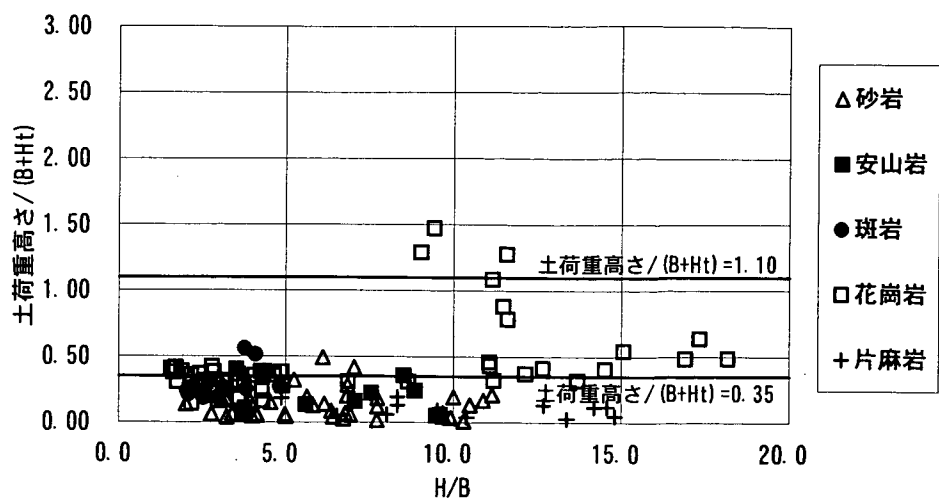


図-4.12.1 土荷重高さ / (B+Ht) - H/B
(変位の小さい岩石のグループ)

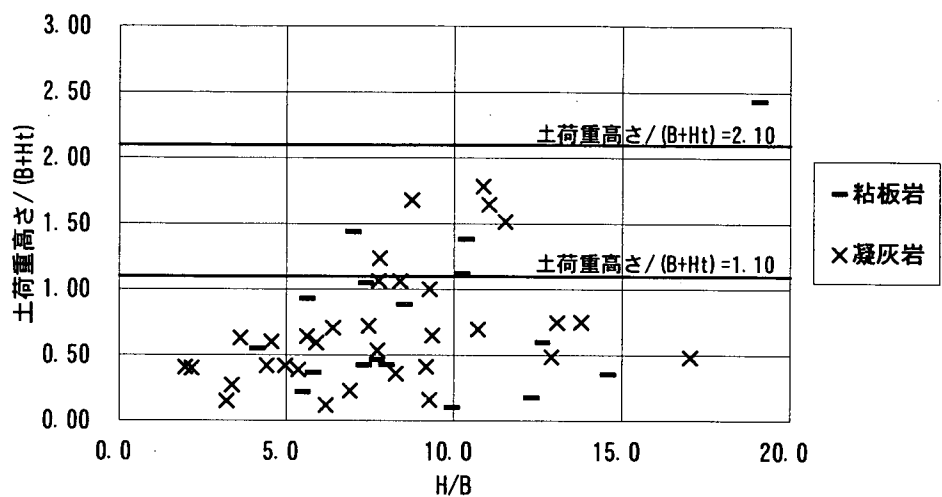


図-4.12.2 土荷重高さ / (B+Ht) - H/B
(変位が増加する岩石のグループ)

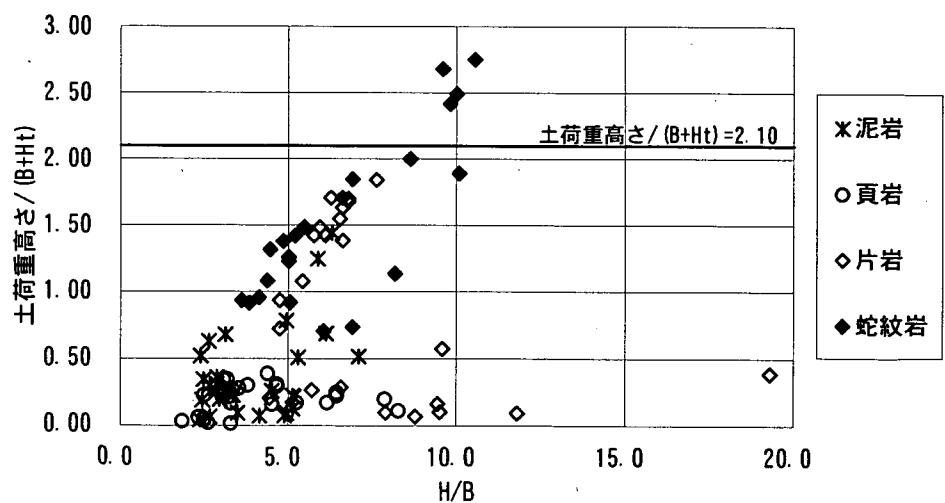


図-4.12.3 土荷重高さ / (B+Ht) - H/B
(変位の大きい岩石のグループ)

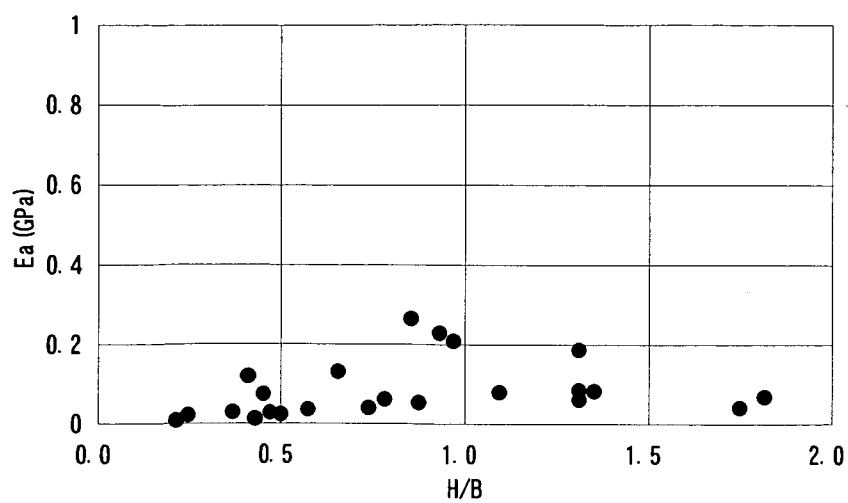


図-4.13 見かけの弾性係数 E_a - H/B
(土被り小の沖積層・洪積層地山)

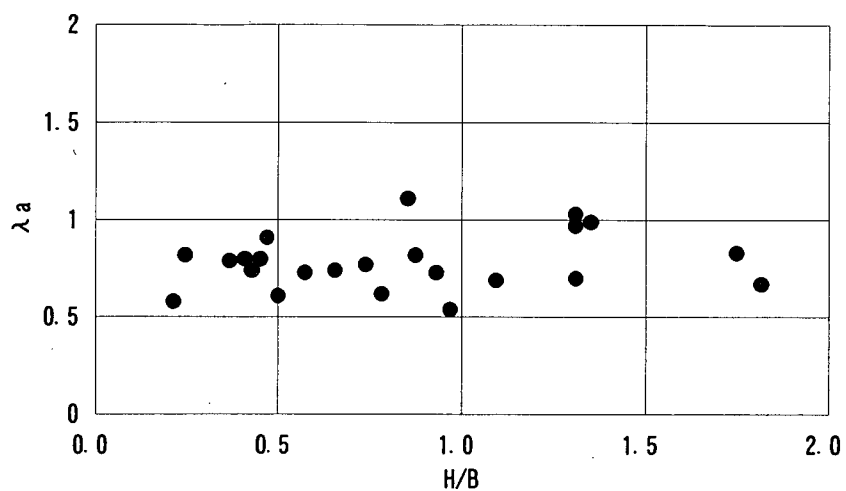


図-4.14 見かけの側圧係数 λ_a - H/B
(土被り小の沖積層・洪積層地山)

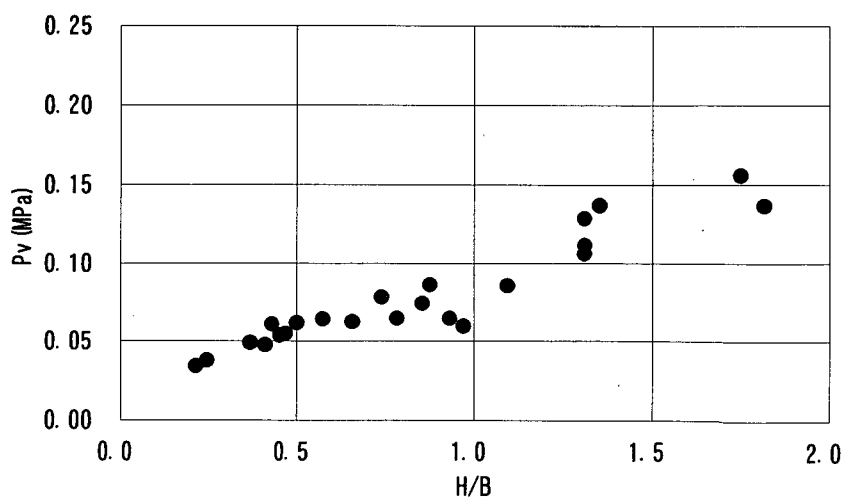


図-4.15 支保に作用する荷重 P_v - H/B
(土被り小の沖積層・洪積層地山)

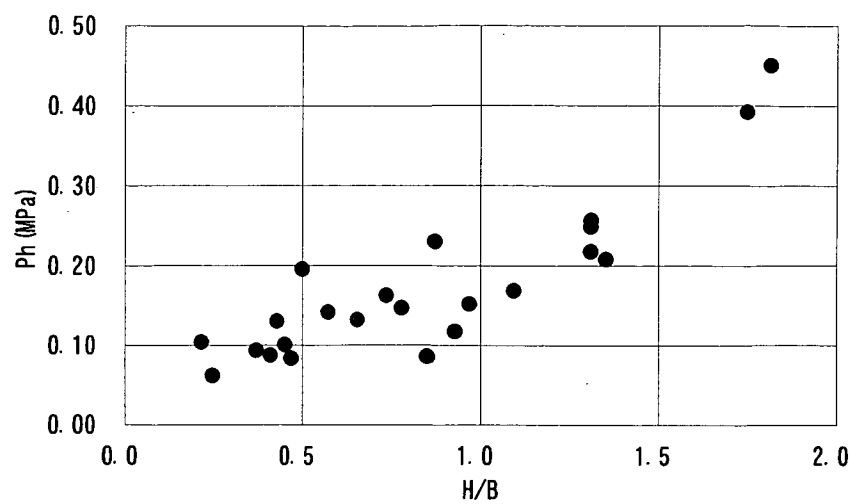


図-4.16 支保に作用する荷重 P_h - H/B
(土被り小の沖積層・洪積層地山)

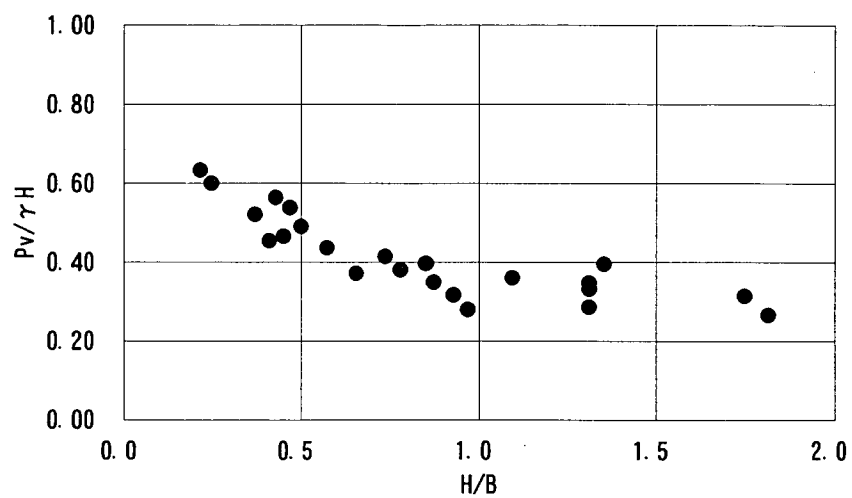


図-4.17 初期土圧 γH に対する作用荷重 P_v の比- H/B
(土被り小の沖積層・洪積層地山)

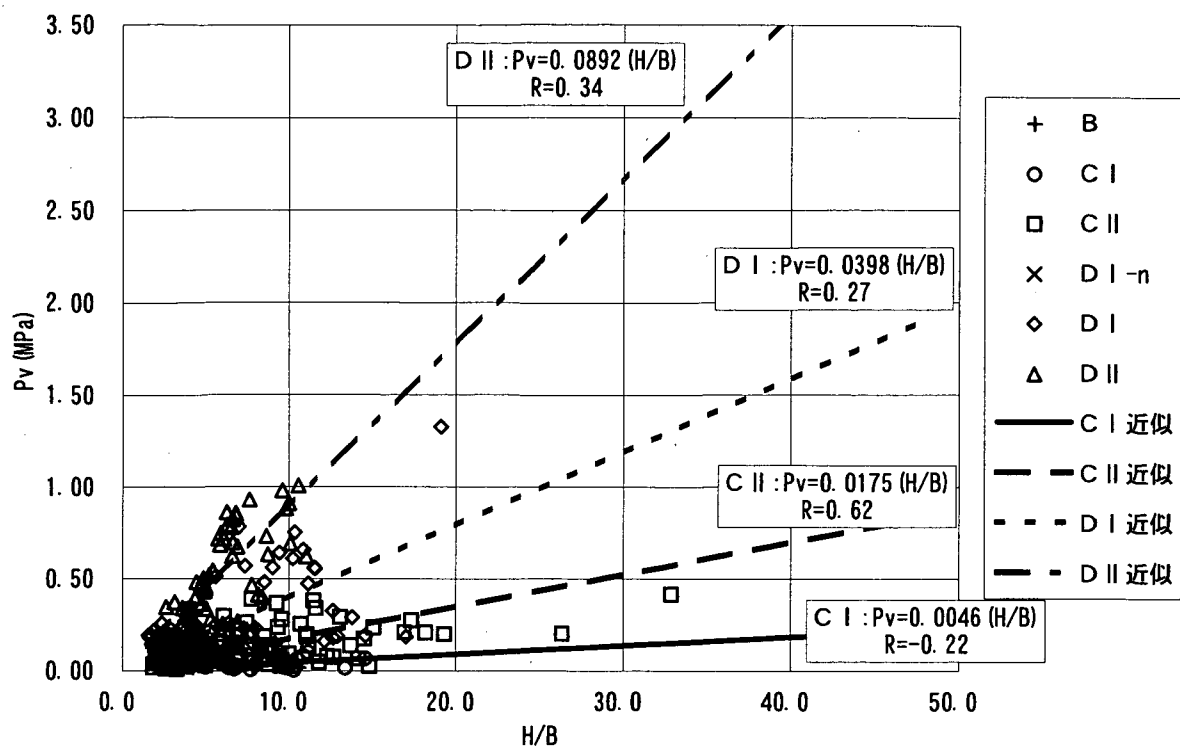


図-4.18 支保に作用する荷重 P_v - H/B (支保パターン毎)

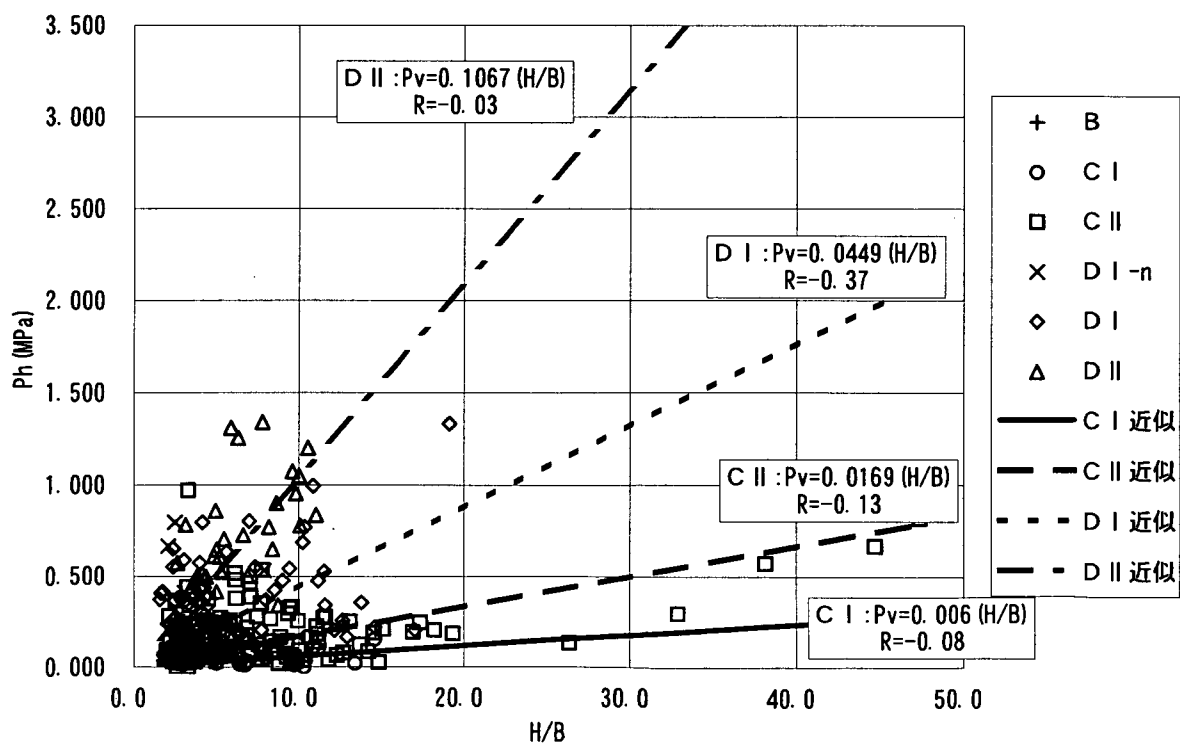


図-4.19 支保に作用する荷重 P_h - H/B (支保パターン毎)

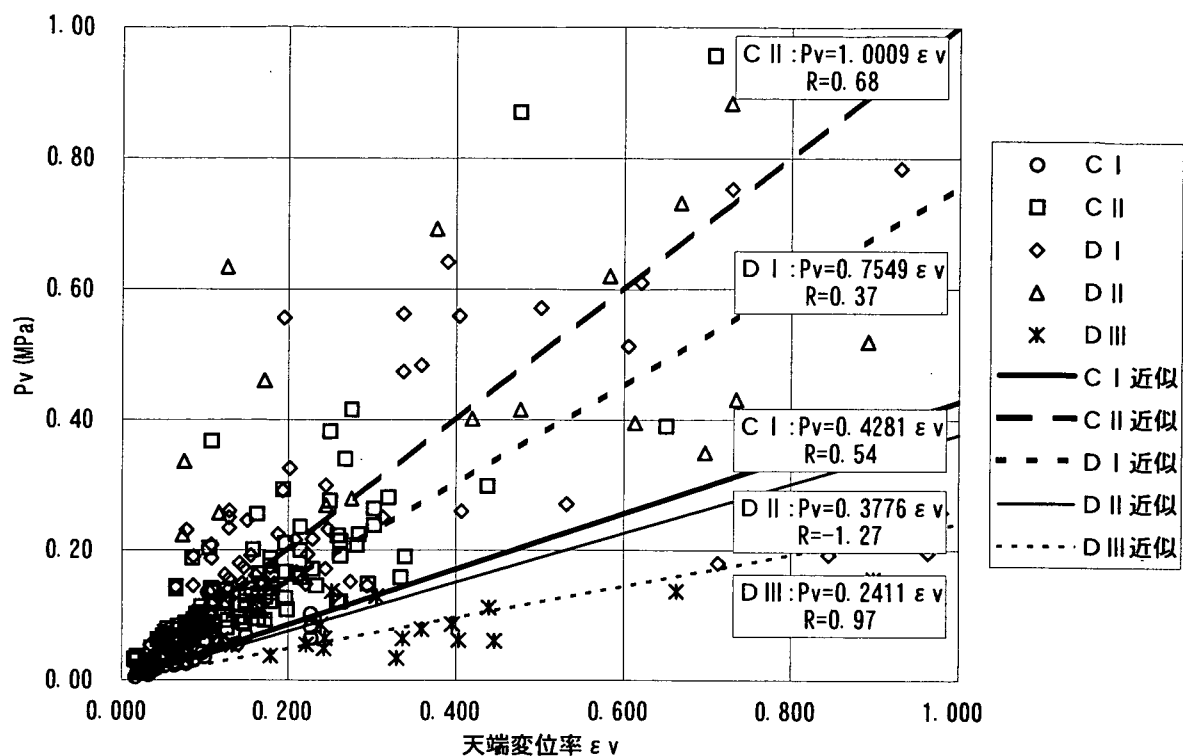


図-4.20 支保に作用する荷重 P_v -天端変位率 ε_v (支保パターン毎)

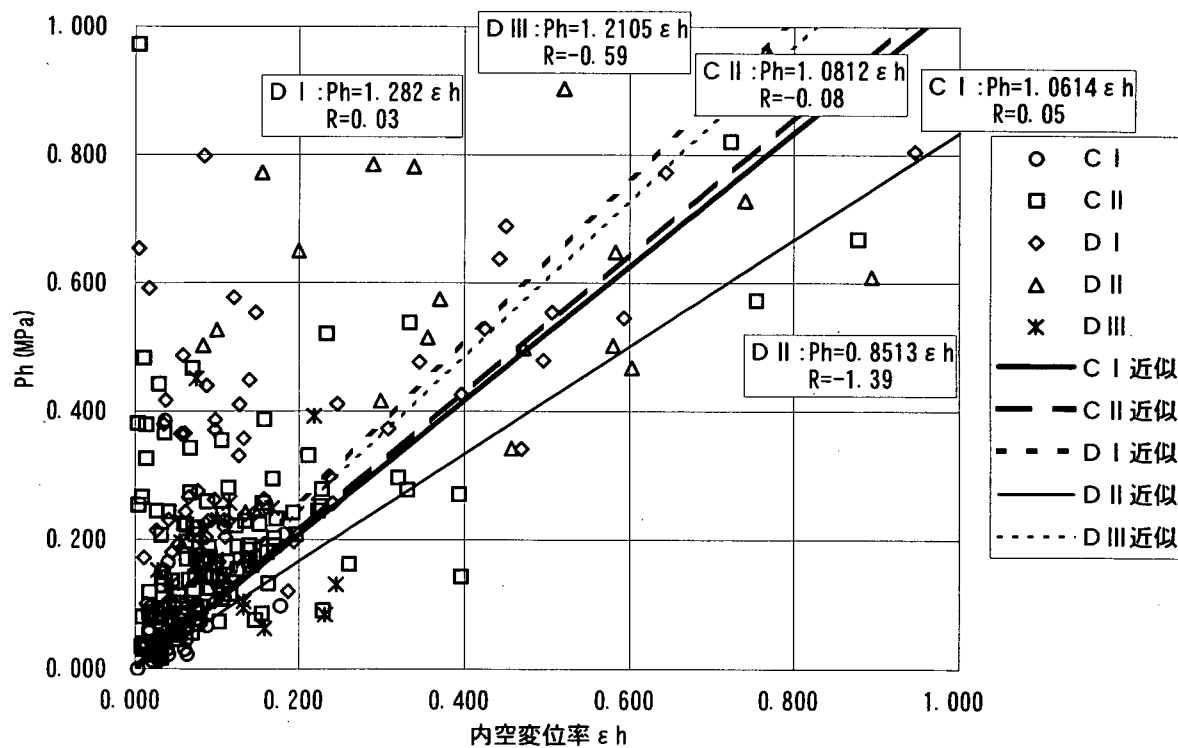


図-4.21 支保に作用する荷重 P_h -内空変位率 ε_h (支保パターン毎)

4.2 解析結果と切羽観察表の評価指標との関連性

施工中のトンネルでは日常的に切羽観察が行われており、支保パターン等の見直しや施工時の安全性の向上等に用いられている。そこで、本項では、切羽観察表に記された代表的な指標と実際の計測で得られている値、およびここでは有限要素解析により得られた結果の間に存在する相関を検討することとした。

分析の対象とする切羽観察の指標は解析方法で説明したとおり、圧縮強度、風化変質、および割目の状態をとりあげた。また、それらの指標と関連性を考える項目として、施工中の事象として、天端変位率 ε_v 、内空変位率 ε_h および内空変位 $\div (2 \times \text{天端沈下})$ $\varepsilon_h / \varepsilon_v$ 、また解析に基づくものとして、地山の見かけの弾性係数 E_a 、見かけの側圧係数 λ_a 、および支保への作用荷重 P_v を考えた。

図-4.22 に圧縮強度と諸定数の関係を示す。図中の●印は平均値を表し、棒線はその値の分布している範囲を示す。これより、圧縮強度の指標が高くなる、すなわち圧縮強度が低下していると観察された場合ほど、天端変位率や内空変位率は増加し、支保への作用荷重も増加することが分かる。さらに、有限要素解析における見かけの弾性係数については圧縮強度が低下するほど低下していくことが分かる。

次に、図-4.23 に風化変質と諸定数の関係を示す。見かけの弾性係数と支保への作用荷重については指標4を除いて、風化変質の程度が激しくなると弾性係数は低下、作用荷重は増加する傾向が見受けられる。それ以外については、特に大きな傾向は見受けられなかった。

さらに、図-4.24 に割目の状態と諸定数の関係を示す。見かけの弾性係数と支保への作用荷重については指標4を除いて、割目が開口する傾向が見られてくるにつれて弾性係数は低下、作用荷重は増加する傾向が見受けられる。それ以外については、特に大きな傾向は見受けられなかった。

以上より、岩の圧縮強度は天端沈下や内空変位に関連性が深く、また見かけの弾性係数や支保への作用荷重は本項で取り上げた3つの評価指標において比較的関連性があることが分かった。また、地山の挙動が緩みによるものであれば、内空変位よりも天端沈下が多くなると一般的には考えられることから、風化変質の程度が激しくなる場合や、割目が開口する傾向が見られてくるにつれて、 $\varepsilon_h / \varepsilon_v$ や λ_a の値は減少していく傾向が見受けられるのではないかと考えたが、それ以上に地山の挙動に影響を及ぼす要因があると考えられるためか、本解析では明確な傾向を見出すことは出来なかった。

以上より、圧縮強度に関して指標が高くなる、すなわち圧縮強度が低下していると観察された場合ほど、天端変位率や内空変位率は増加し、支保への作用荷重も増加することが分かる。さらに、有限要素解析における見かけの弾性係数についても圧縮強度が低下するほど低下していくことが分かる。

4.3 解析結果と原位置試験の結果との関連性

切羽近傍において実施した原位置試験のうち、ポイントロード試験およびシュミットハンマー試験を行った結果について、解析により得られた見かけの弾性係数と比較を行った。シュミットハンマー試験では反発値から予め得られている式を用いることにより強度や弾性係数を求めることが出来る。また、ポイントロード試験について得られる強度は算出方法の違いにより圧裂強度と呼ばれる引張強度に関連した強度と圧縮強度

の両者の取り扱いが可能⁶⁾であるが、ここではシュミットハンマー試験の結果と比較するために後者の考え方を採用した。

見かけの弾性係数 E_a については、解析から得られた弾性係数をそのまま採用するが、シュミットハンマー試験およびポイントロード試験から得られた強度値を弾性係数に換算する必要がある。

シュミットハンマー試験の反発値からは弾性係数を算定する式が得られている⁷⁾。すなわち、

$$E_s = 10^{0.0331x+3.7032} / 10000 \quad \dots (2)$$

ここに、

E_s : シュミットハンマー試験に基づく弾性係数 (GPa)

x : シュミットハンマー反発度

本研究ではデータ数に限りがあることと簡便のため、シュミットハンマー試験に基づく弾性係数を式 (2) で算定した。

また、ポイントロード試験に基づく弾性係数 E_p の算定については、軟岩に対する変形係数と一軸圧縮強度の関係⁸⁾や火成岩と堆積岩に対する変形係数と一軸圧縮強度の係数比の範囲⁹⁾を参考とし、ポイントロード試験で得られた強度を単純に 100 倍することで、弾性係数を算定した。ポイントロード試験とシュミットハンマー試験を実施したトンネルを表-4.8 に示す。なお、S-21、S-22 および S-23 と S-61、S-62 および S-63 のデータについては、支保パターンは異なるが、同一のトンネルのデータであるため同一のグラフで取り扱うこととした。

表-4.8 原位置試験を実施したトンネル

トンネル No.	岩種名	支保 パターン	原位置試験	
			ポイント ロード試験	シュミット ハンマー試験
I-01	安山岩	D I		○
I-19	花崗閃緑岩	D I		○
S-05	砂層混り泥岩	C II	○	○
S-21	頁岩	C II		○
S-22	頁岩	D I -n		○
S-23	頁岩	D I		○
S-30	頁岩	C II	○	○
S-61	凝灰岩	C II		○
S-62	凝灰岩	D I		○
S-63	凝灰岩	D II		○

図-4.25. 1～6 にそれぞれのトンネルの見かけの弾性係数 E_a 、シュミットハンマー試験結果に基づく弾性係

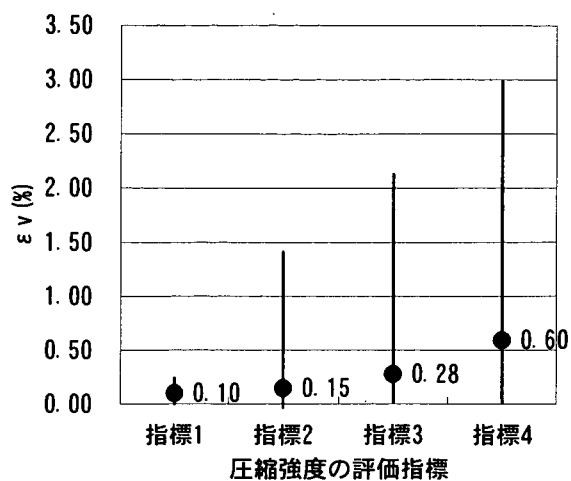
数 E_s 、ポイントロード試験結果に基づく弾性係数 E_p 、および H/B の変化を示す。また、図-4. 26. 1~6 に天端変位率、内空変位率および H/B の関係を示す。

本研究では、有限要素解析により得た地山の見かけの弾性係数 E_a は地山が連続体であるといった仮定を設けて算定されている。その一方で、原位置試験結果より算定された E_s や E_p は、地山が連続体であるかどうかといったこととは無関係に算定されている。この仮定の下で対象としている地山全体にわたって考えた場合、 E_s または E_p と E_a の変化の傾向が同一であると考えられるのであれば、土被り、すなわち H/B の変化に関わらず、その地山は連続体であると考えられる。しかし、 E_s や E_p の変化の傾向が、連続体と仮定して得られた E_a の変化の傾向と見合わない場合は、その地山は連続体の挙動を示しているとは言い難いと考えられる。同様に、 E_s や E_p が変化しているにもかかわらず、 E_a が一定である傾向を示す場合についてもその地山は連続体の挙動を示すとは言い難いと考えられる。

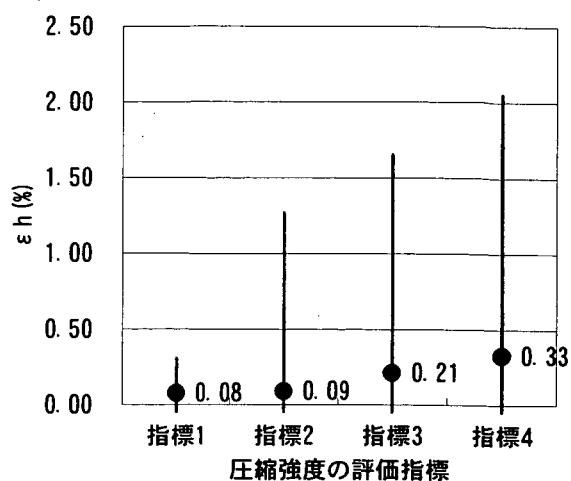
図-4. 25. 1 について考えると、トンネルを延長全体で見た場合、 E_a の変化の傾向と E_s の変化の傾向が個々でばらつきがあるものの類似していると考えることができ、このことから地山は連続体に近い挙動を示していると判断できる。 E_p についてはデータ数が少ないこともあり、 E_s と傾向が類似しているとは判断できなかった。変位の観点から考えれば図-4. 26. 1 より変位は土被りに比例して増加しているとは言えないが、理由として地山の弾性係数が断面毎で異なっているためと考えられる。図-4. 25. 2 については E_a と E_s の変化の傾向が概ね類似していると考えられ、この地山についても連続体に近い挙動を示すものであると考えられる。この 2 つのトンネルについては、坑口からの距離が大きくなる、すなわち坑口から離れていくに従って E_a や E_s が徐々に大きくなっていく傾向があることが分かる。

また、図-4. 25. 3 については、 E_s の値が大きく 2 つのグループに分布していると考えられるが、その分布は E_a や E_p の変化の傾向と一致しているとは考えにくい。図-4. 25. 4 については E_a および E_s とともに全体的にばらついており、 E_a および E_s の変化の傾向が一致するとは言い難い。また図-4. 25. 5 および図-4. 25. 6 は同一のトンネルであるが、岩質が異なるため、別のグラフに表記したが、これについても E_s は大きい幅を持って分布しているが、 E_a についてはほぼ一定と考えることができる。以上より図-4. 25. 3~4. 25. 6 に示した 4 つのトンネルについては地山全体として連続体とは言い難い挙動になっていると考えられる。

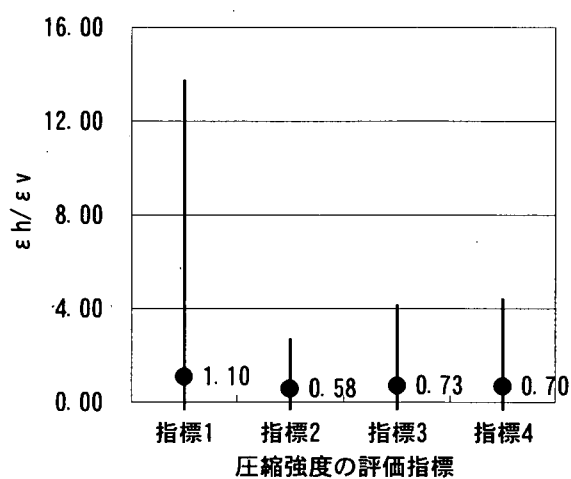
以上より、データ数が少ないものの、 E_a と E_s については岩質によっては類似の変化の傾向が見い出せる地山もあった。原位置試験については断面の点としての情報であり、ばらつきが大きいと考えられるため、引き続きシュミットハンマー試験およびポイントロード試験のデータを蓄積し、実際の一軸圧縮強度のデータや支保に作用する荷重、また切羽観察表の指標を照合していくことでより客観的な岩判定指標および地山挙動の特性を検討していく必要がある。



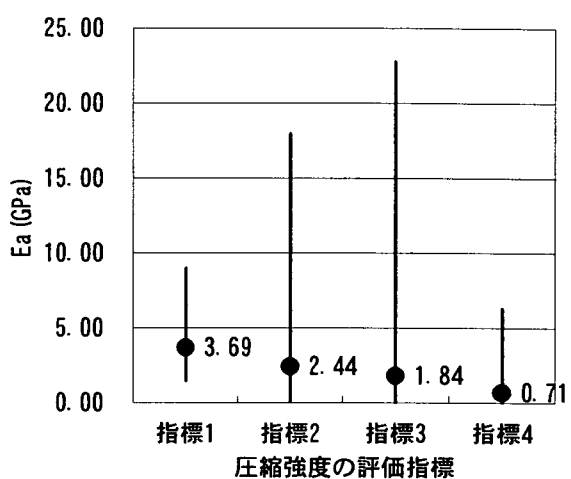
①天端変位率 ε_v



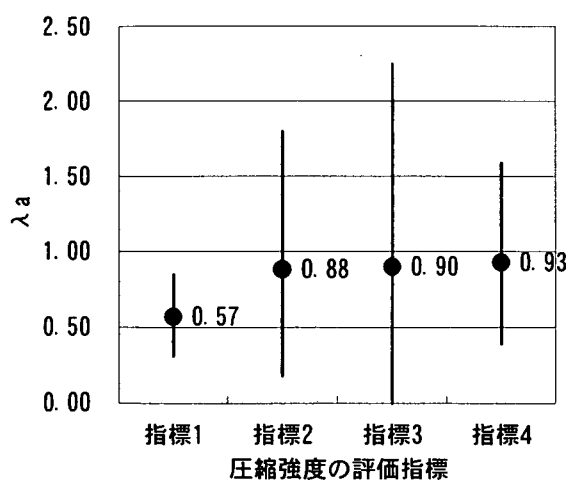
②内空変位率 ε_h



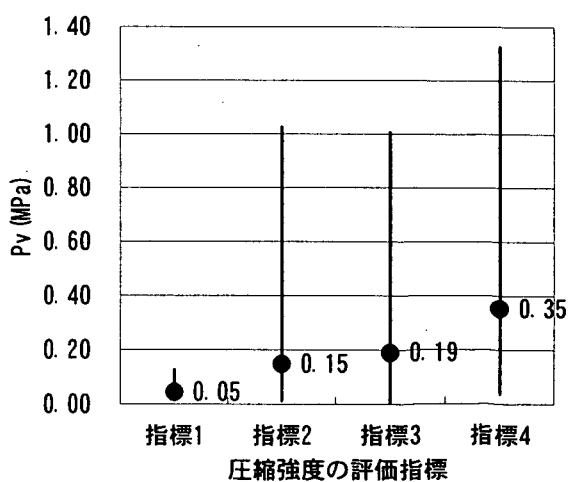
③ $\varepsilon_h / \varepsilon_v$



④見かけの弾性係数 E_a

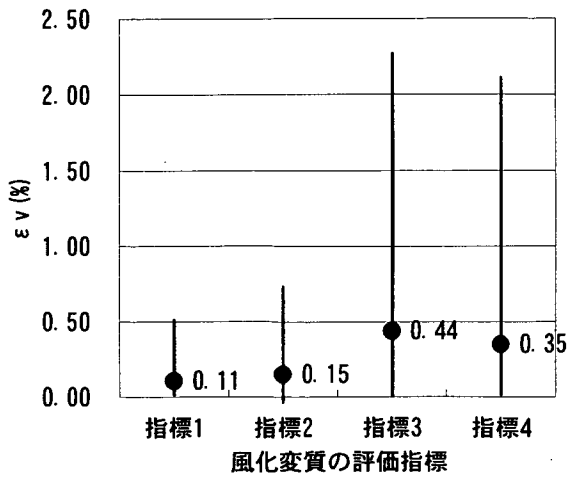


⑤見かけの側圧係数 λ_a

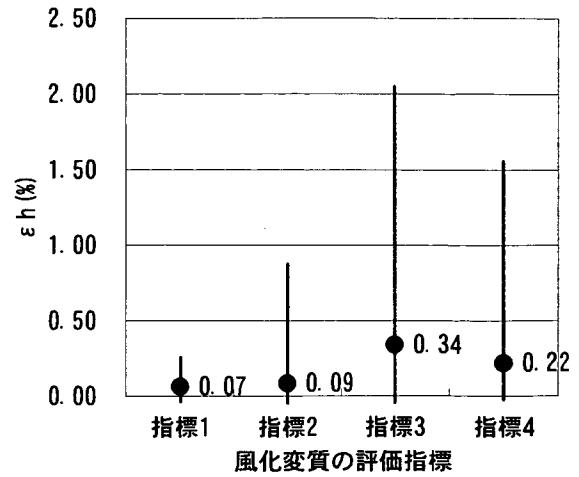


⑥支保に作用する荷重 P_v

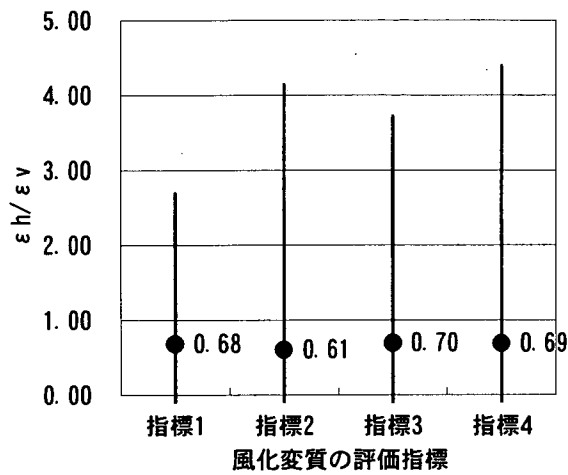
図-4.22 圧縮強度の評価指標と計測・解析結果との比較



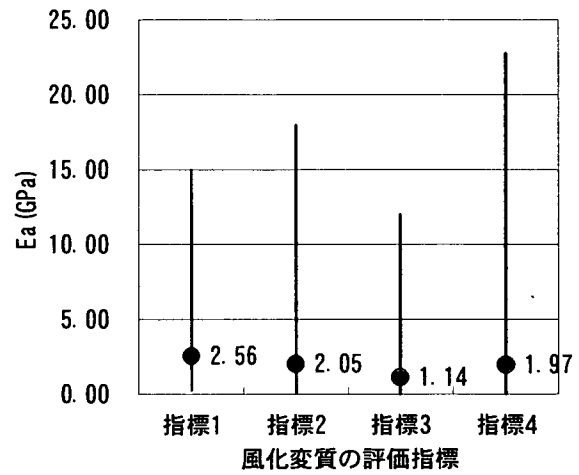
①天端変位率 ε_v



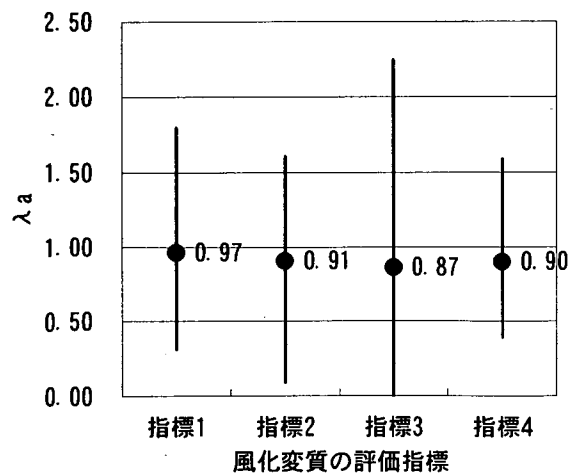
②内空変位率 ε_h



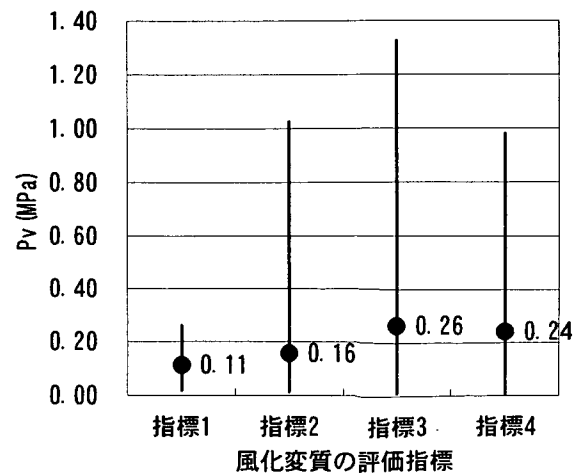
③ $\varepsilon_h / \varepsilon_v$



④見かけの弾性係数 E_a

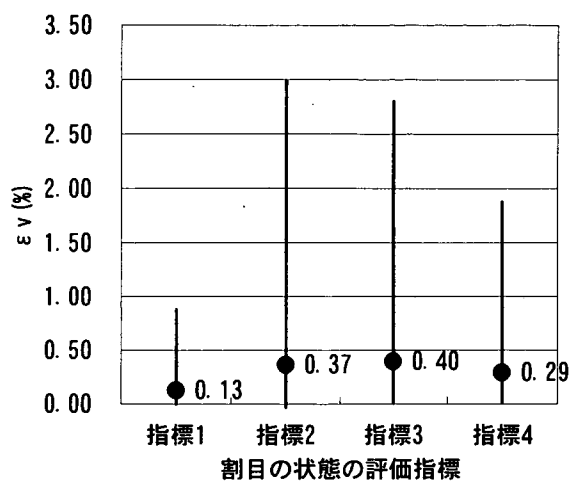


⑤見かけの側圧係数 λ_a

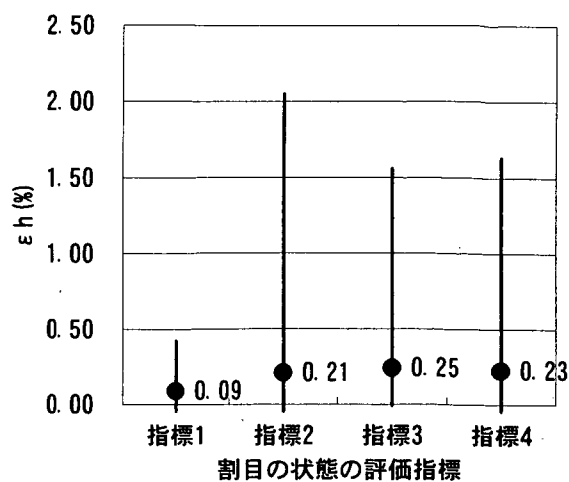


⑥支保に作用する荷重 P_v

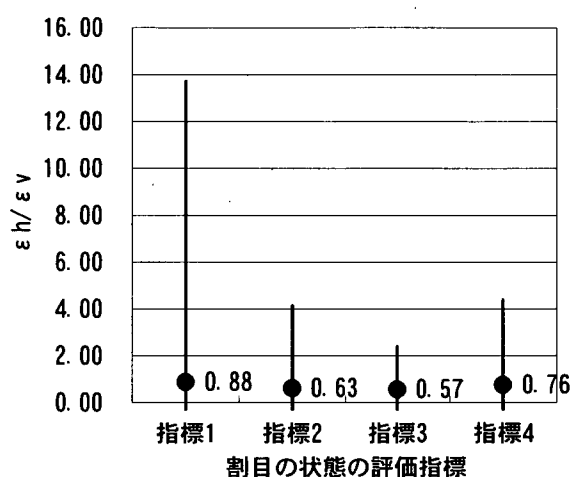
図-4.23 風化変質の評価指標と計測・解析結果との比較



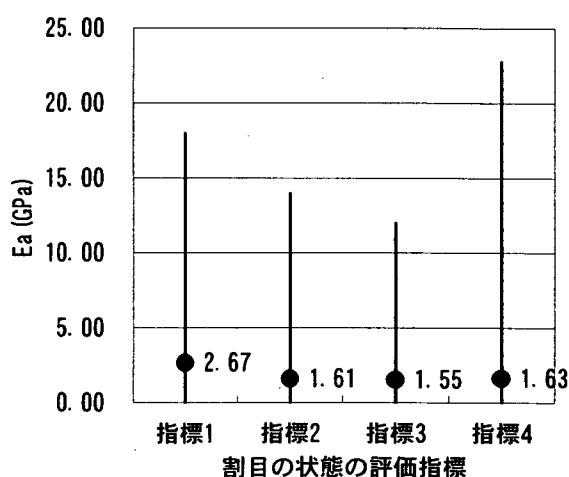
①天端変位率 ε_v



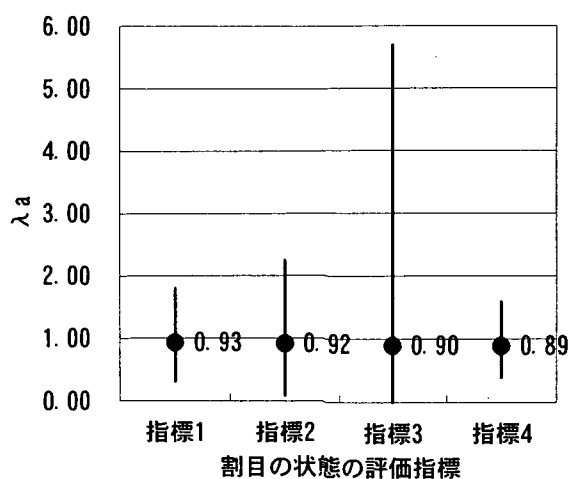
②内空変位率 ε_h



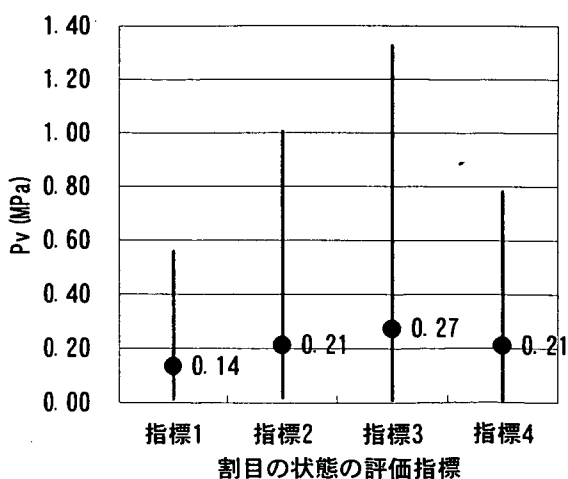
③ $\varepsilon_h / \varepsilon_v$



④見かけの弾性係数Ea



⑤見かけの側圧係数 λ_a



⑥支保に作用する荷重Pv

図-4.24 割目の状態の評価指標と計測・解析結果との比較

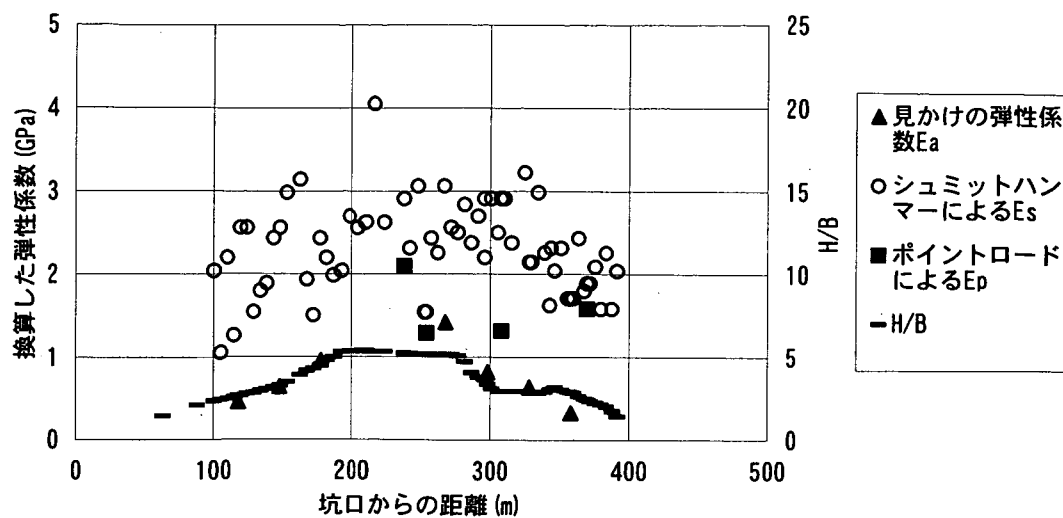


図-4. 25. 1 原位置試験と解析上の弾性係数の関係 (S-05 : 砂層混じり泥岩)

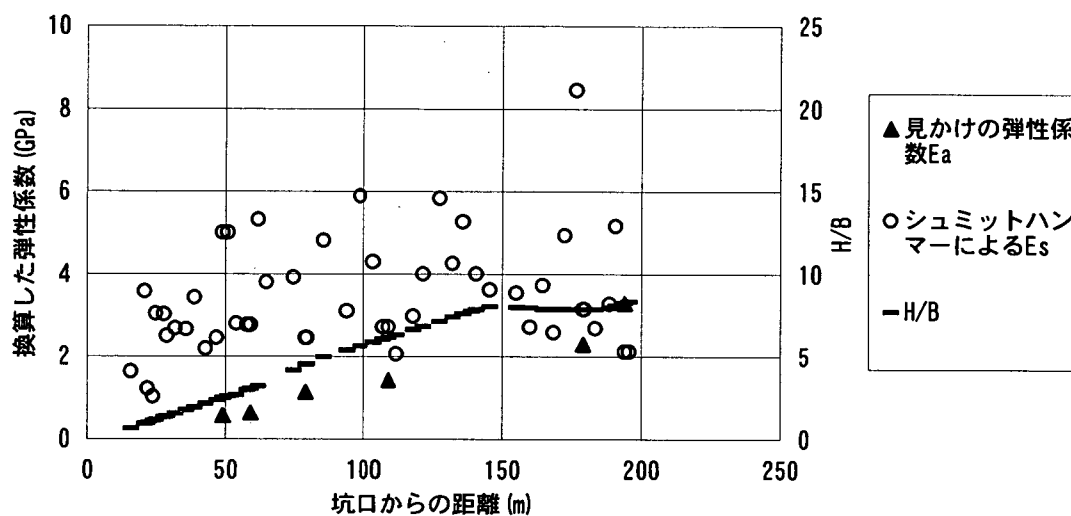


図-4. 25. 2 原位置試験と解析上の弾性係数の関係 (S-21～23、頁岩)

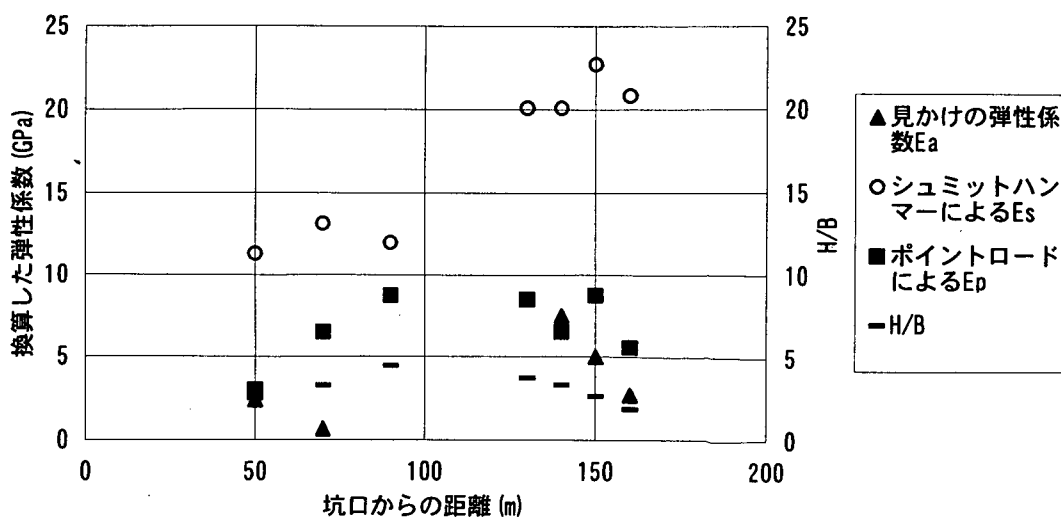


図-4. 25. 3 原位置試験と解析上の弾性係数の関係 (S-30、頁岩)

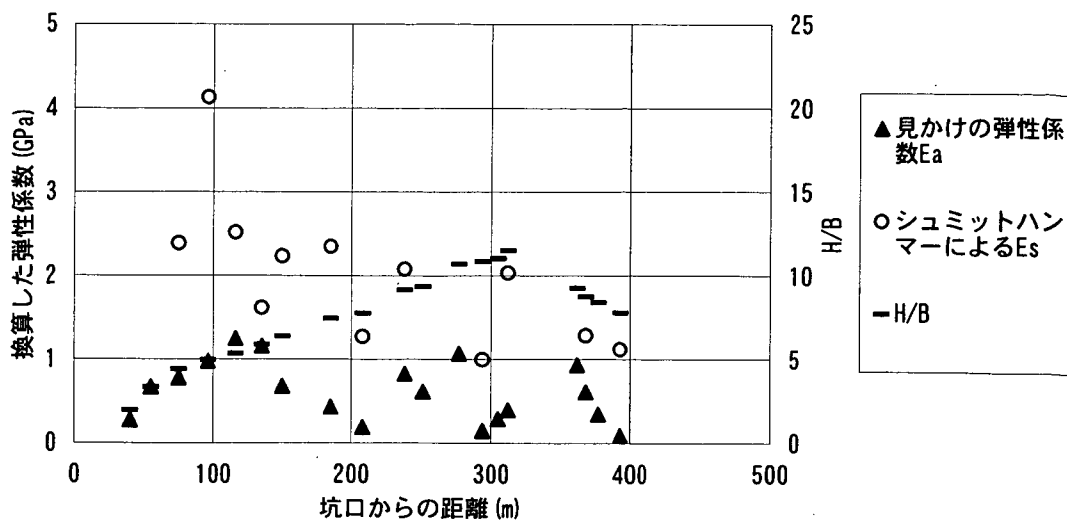


図-4. 25. 4 原位置試験と解析上の弾性係数の関係 (S-61~63 : 凝灰岩)

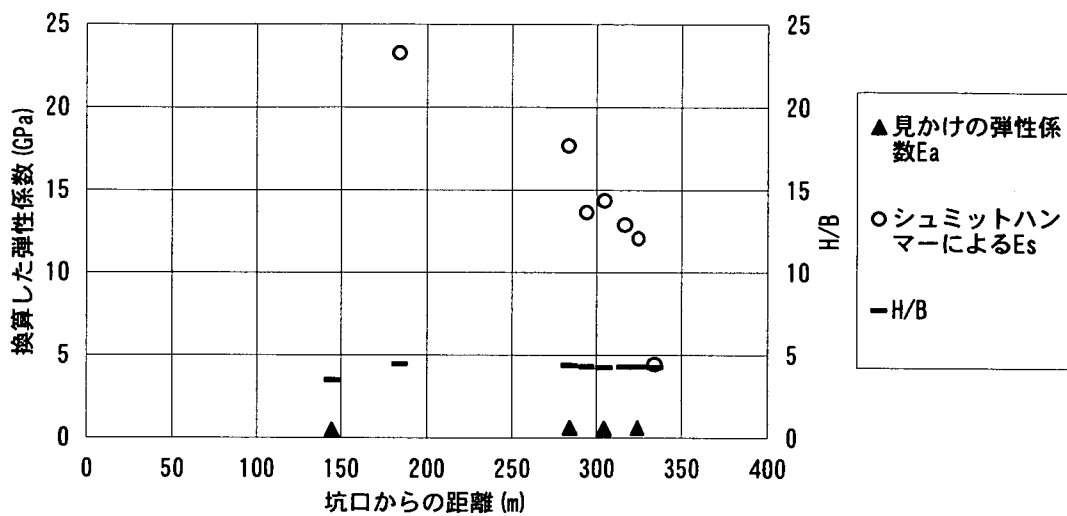


図-4. 25. 5 原位置試験と解析上の弾性係数の関係 (I-01 : 安山岩)

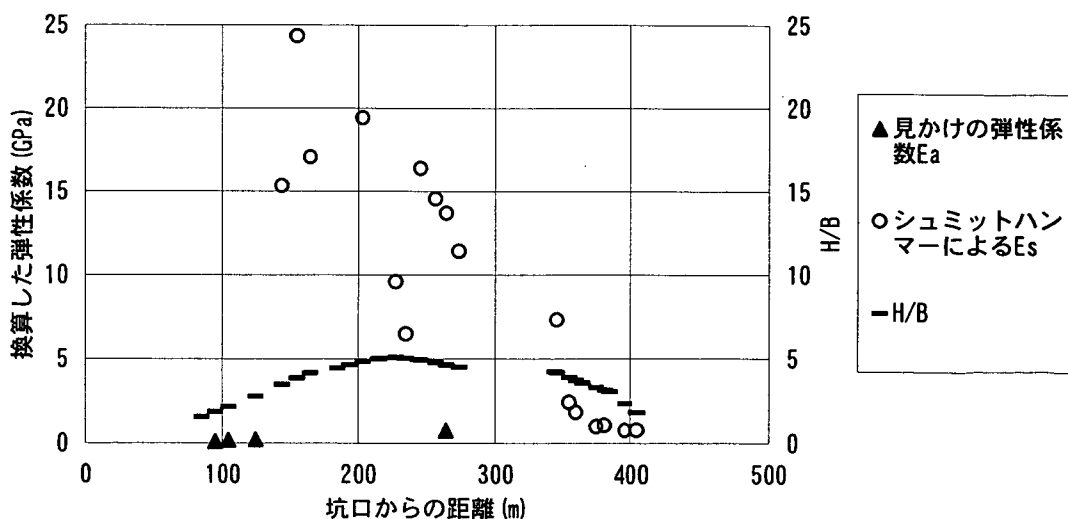


図-4. 25. 6 原位置試験と解析上の弾性係数の関係 (I-19 : 花崗閃緑岩)

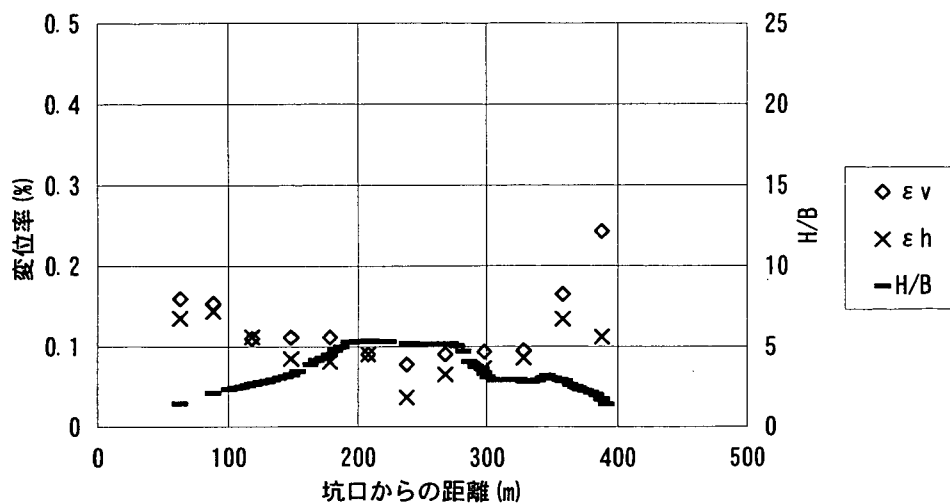


図-4. 26. 1 H/Bと変位率の関係 (S-05 : 砂層混じり泥岩)

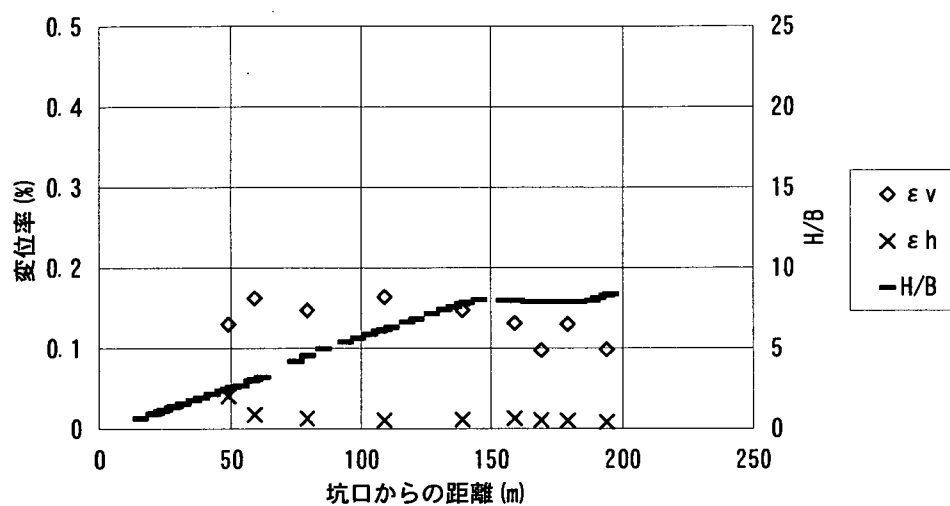


図-4. 26. 2 H/Bと変位率の関係 (S-21～23 : 頁岩)

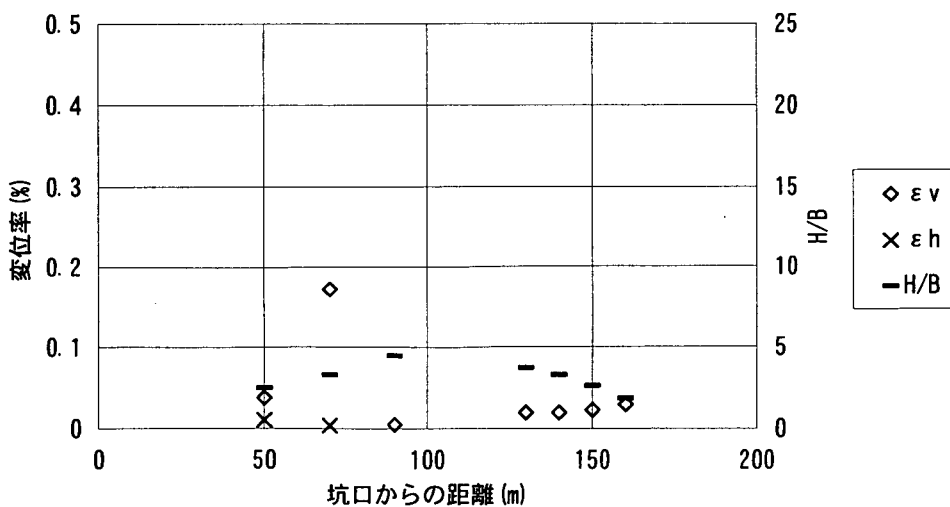


図-4. 26. 3 H/Bと変位率の関係 (S-30 : 頁岩)

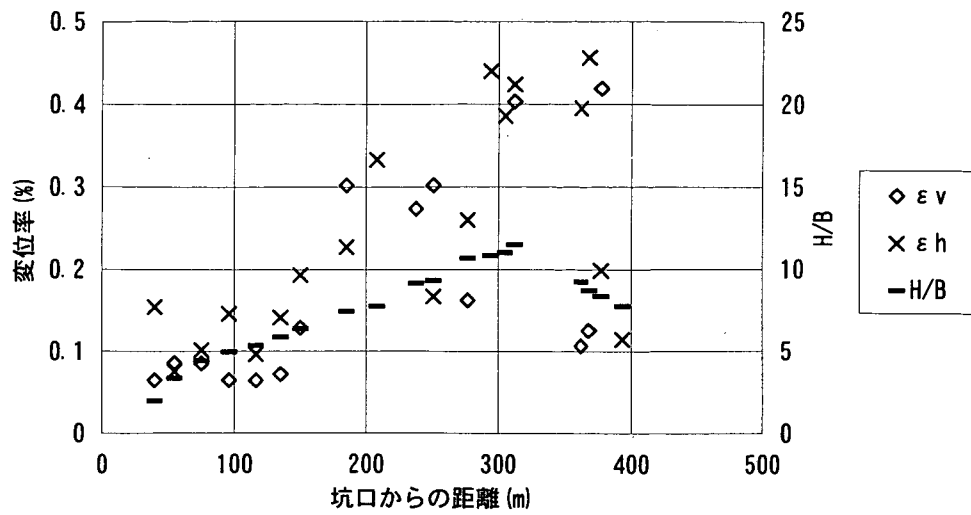


図-4. 26. 4 H/Bと変位率の関係 (S-61~63 : 凝灰岩)

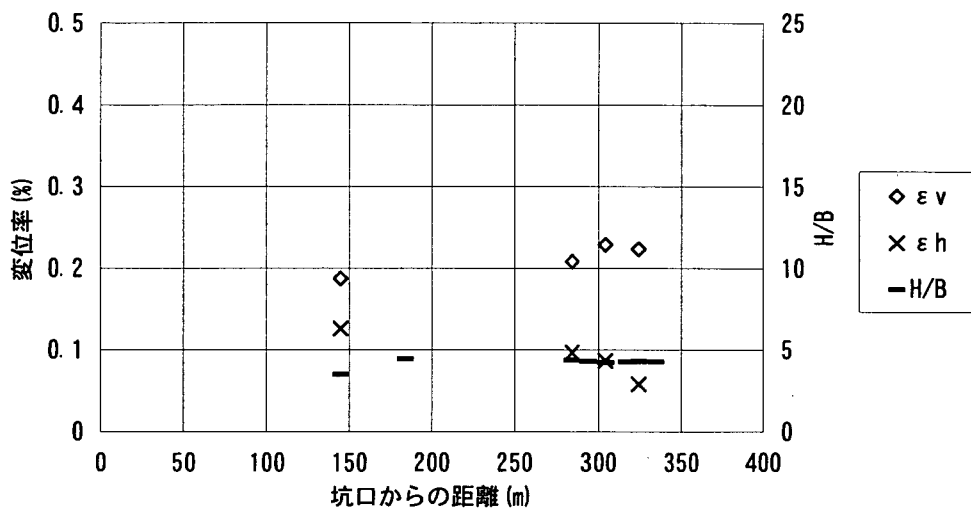


図-4. 26. 5 H/Bと変位率の関係 (I-01 : 安山岩)

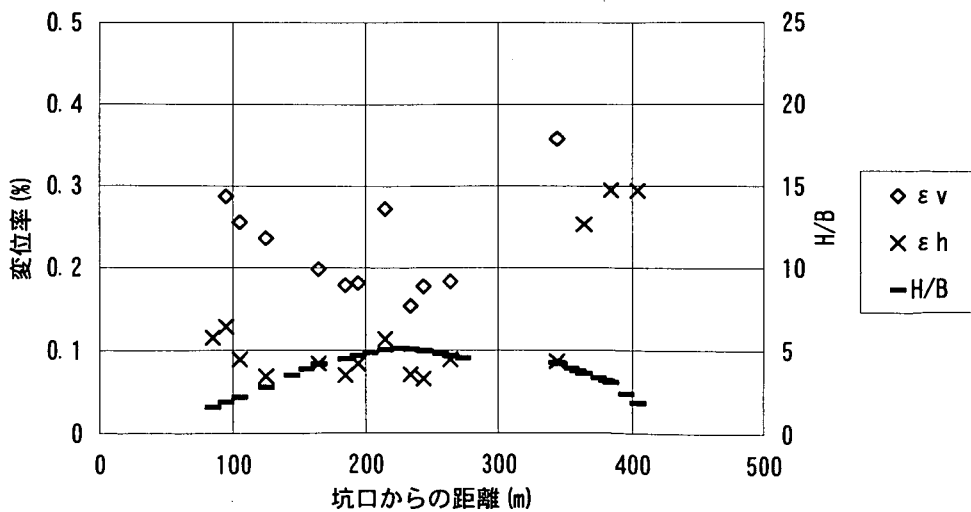


図-4. 26. 6 H/Bと変位率の関係 (I-19 : 花崗閃緑岩)

5. 結論

本研究では、実際のトンネルの施工で得られた変位計測結果をとりまとめ、それらの傾向を把握した。その結果に基づいた場合の支保に作用する荷重を評価する試みを地山が連続体であるという仮定を設けて2次元弾性有限要素解析および地山特性曲線の基礎的な考え方に基づき検討した。また、それらの結果と切羽観察や原位置試験結果との関連性を考察した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 変位計測結果の分析の結果、通常程度の土被りを持つ地山では、天端変位率および内空変位率に着目した場合、土被りに関係なく変位の小さい岩石から成るグループ、土被りが増加するに従って変位が増加する岩石から成るグループ、および土被りに関係なく変位の大きい岩石から成るグループに大別できた。
- (2) H/B が 2.0 以下といった土被りが小さい地山では、基盤となる岩種に依存せずに、また土被りとは無関係に変位は概ね一定の幅で変化していることが分かった。
- (3) 2次元弾性有限要素解析の結果および地山特性曲線の概念から得られた支保に作用する鉛直方向からの荷重は、最大値で、変位の大きい岩石から成るグループでは概ね 1.0MPa 程度、変位の小さい岩石から成るグループでは概ね 0.2MPa 程度となっており、支保に作用する荷重の最大値の傾向を解析的に把握することができた。
- (4) H/B が 2.0 以下といった土被りが小さい地山では、土被りと支保に作用する荷重が概ね比例関係にあり、最大で 0.15MPa 程度であることが分かった。
- (5) 解析結果と切羽観察表の関連性を分析したところ、特に「圧縮強度」に関する指標が、天端変位や内空変位、および支保に作用する荷重といった値との関連性が高いことが分かった。

また、今後の課題としては以下のことが挙げられる。

- ①変位率や荷重を算定する際に用いた計測 A 結果についてはデータ数をさらに増加させることでより明確な傾向が生じるものもあると考えられるため、引き続きデータの蓄積を行っていく必要がある。
- ②有限要素解析では、種々の仮定の下での荷重値の大まかな傾向の把握を試みた。特に地山を弾性体とした解析を行っており、地山が不連続体の挙動を示す場合を考慮した解析を行っていない。また大規模な補助工法を必要とするような悪い地山についても分析を行っていないため、解析手法の妥当性も含めて、支保に作用する荷重をさらに分析する必要がある。
- ③荷重の算定では、支保部材として吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工を考慮して解析を行ったが、ロックボルトによる影響も若干考えられることから、種々の異なった地山状態での傾向について把握する必要がある。
- ④計測 B による応力計測データとの照合を 1 断面にて行ったが、これについて別途データを増やして行い、計測 A 結果を用いた場合との支保に作用する荷重の大きさを評価する必要がある。

- ⑤原位置試験と解析結果との関連を考えた場合、さらに異なった地山・岩種毎で分析を行い、データの蓄積を図ることにより、客観的な地山評価手法の検討を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 砂金 伸治・真下 英人・鈴木 正彦：トンネル掘削時の地山挙動に関する一考察、土木学会第 52 回年次学術講演会概要集、Ⅲ (B) -pp. 96～97、平成 9 年 9 月
- 2) 道路トンネル技術基準 (構造編)・同解説、pp. 41～45、(社) 日本道路協会、平成元年 6 月
- 3) 日本道路公団設計要領、第三集トンネル、平成 9 年 10 月
- 4) 池口 正晃・真下 英人・宮川 順一・大杉 一郎：観察・計測による地山評価に関する研究、トンネル工学研究論文・報告集、第 6 巻、pp. 269～274、平成 8 年 11 月
- 5) Karl Terzaghi : Introduction to Tunnel Technology, Rock Tunneling with Steel Support, 1946
- 6) 土質工学会、岩の調査と試験、p. 293、平成元年 9 月
- 7) 土質工学会、岩の調査と試験、p. 303、平成元年 9 月
- 8) 吉中龍之新、山辺正、軟岩の変形特性について、埼玉大学建設系研究報告、vol. 11、pp. 65～85、昭和 56 年
- 9) 江崎哲朗、松井紀久男訳、岩盤工学の基礎と応用、p. 11、昭和 63 年 9 月

謝辞

本報告は建設省各地方建設局道路部道路工事課ならびに該当工事事務所、および県道を所轄されている県土木事務所をはじめとする多数のトンネル現場における切羽観察表、計測 A データの計測結果を基にとりまとめたものであり、データ収集や整理に関して多くの関係者に対しご協力いただいた。ここに、深甚の謝意を表する。

また、トンネル研究室に交流研究員として在籍した藤井邦男氏(在籍期間平成 10～11 年度)、高根努氏(在籍期間平成 10 年度)の両名には有限要素解析の際のアドバイスおよび解析に協力いただいた。ここにあわせて謝意を表する。

参考資料 岩石グループ毎の支保に作用する荷重の傾向

○岩石グループ毎の支保に作用する荷重の傾向

本研究では、参考として日本道路公団の設計要領に基づく分類についても検討することとし、得られた地山のデータを表-参1に示すような岩石グループに分類を行い、それに基づき検討を行った。なお、設計要領中では硬質岩の塊状岩盤、中硬質岩の塊状岩盤および軟質岩の層状岩盤では弾性波速度を基に準じた分類がなされているが、本研究では、軟質岩の塊状岩盤および中硬質岩の層状岩盤についても分類を行うこととし、合計 10 分類で検討を行った。

表-参1 岩種・強度による岩石グループ

	H (硬質岩)		M (中硬質岩)		L (軟質岩)	
塊状岩盤	①	花崗岩 花崗閃緑岩	①	安山岩	①	蛇紋岩
	②	砂岩 (中古生層) 片麻岩	②	砂岩 (第三紀層)	②	凝灰岩 凝灰角礫岩
層状岩盤			①	粘板岩	①	千枚岩 黒色片岩 緑色片岩
			②	頁岩 (中古生層)	②	泥岩 頁岩 (第三紀層)

(備考) 各岩盤・強度間の分類で①と②の間の太線は弾性波速度による分類、細線は本研究で独自に分類

上表に基づいた岩石グループ毎の分類に基づき、通常程度の土被りを持つ地山について、変位率-H/B の関係を検討することとした。図-参 1.1 に天端変位率 ε_v -H/B の関係を、また図-参 1.2～参 1.11 に、H/B を 15 以下の部分で拡大し、10 種類のグループ毎で分類した図を示す。これらより、塊状岩盤の硬質岩や中硬質岩では、H/B が 2 以下といった土被りが小さい部分を除いて、土被りに無関係で天端の変位率は概ね 0.4% 以下であり、 ε_v と H/B との関係は見出すこと困難であった。また、層状岩盤の中硬質岩では、特に分類①である粘板岩では ε_v が 1.0% 程度発生している断面もあり、中硬質岩の中では変位が大きく発生することもあることが分かる。また、軟質岩においては、塊状や層状といったことには無関係で、 ε_v が大きい断面も多数見受けられた。

次に図-参 2.1 に、岩石グループ毎で分類した内空変位率 ε_h -H/B の関係、さらに図-参 2.2～参 2.11 に、H/B を 15 以下の部分で拡大し、10 種類のグループ毎で分類した図を示す。これらより、塊状岩盤の硬質岩では、一部で ε_h が相対的に大きい断面もあるものの、多くの断面で 0.3% 以下となっていた。また、塊状岩盤の中硬質岩では、ほとんどの断面で 0.3% 以下となっていた。しかし、中硬質岩の層状岩盤では、 ε_v の場合と同様に、粘板岩の分類で ε_h が 1.0% 程度発生している断面もあった。軟質岩においては、土被りに無関係で変位が大きく出ているところも多い。塊状の硬質岩においては、ある程度の土被りを越えると、変位率の

上限が0.2%程度となっていることが分かる。

以上のグラフから総合すると、塊状岩盤で硬質岩や中硬質岩では変位については比較的小さいものが多いことが分かる。しかし、層状岩盤で中硬質岩については変位が比較的大きく発生したり、塊状岩盤で軟質岩においても、凝灰岩と蛇紋岩に見られるように傾向が地山によっては異なる場合もあるため、注意を要すると考えられる。

また図-参3に天端沈下に着目し、岩石グループ毎に分類した支保に作用する荷重と H/B の関係を示す。これより、塊状岩盤の硬質岩や中硬質岩については、一部のデータを除いて0.20~0.30MPa程度の荷重が作用していると考えられる。また、中硬質岩を比較した場合は、層状岩盤の方が荷重は若干大きめであった。また軟質岩については、層状塊状に関わらず、荷重値はもっとも大きく、例外を除いて1.0MPa程度であった。

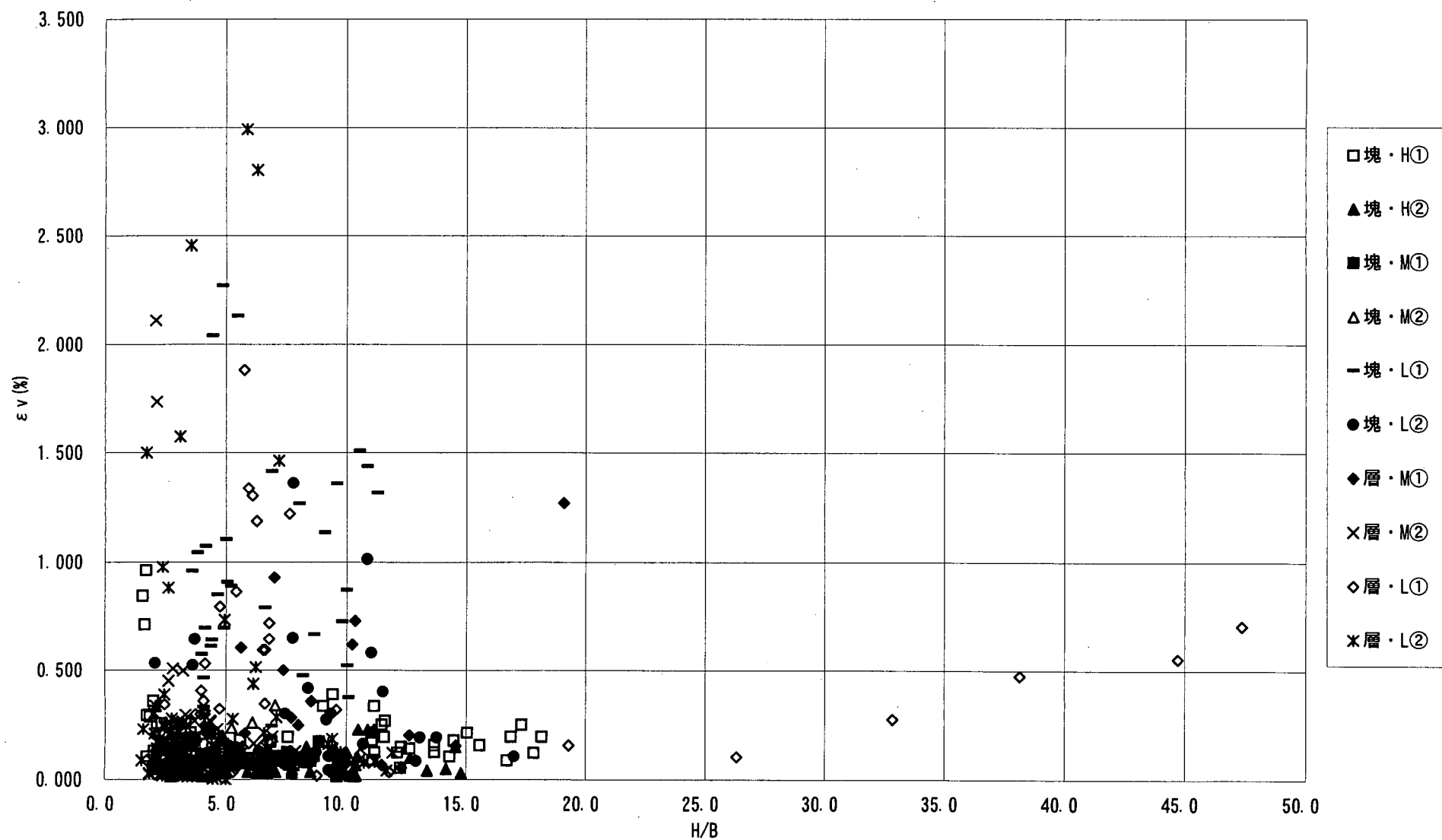


図-参. 1.1 天端変位率 $\varepsilon v-H/B$ (全岩種, 岩石グループ毎)

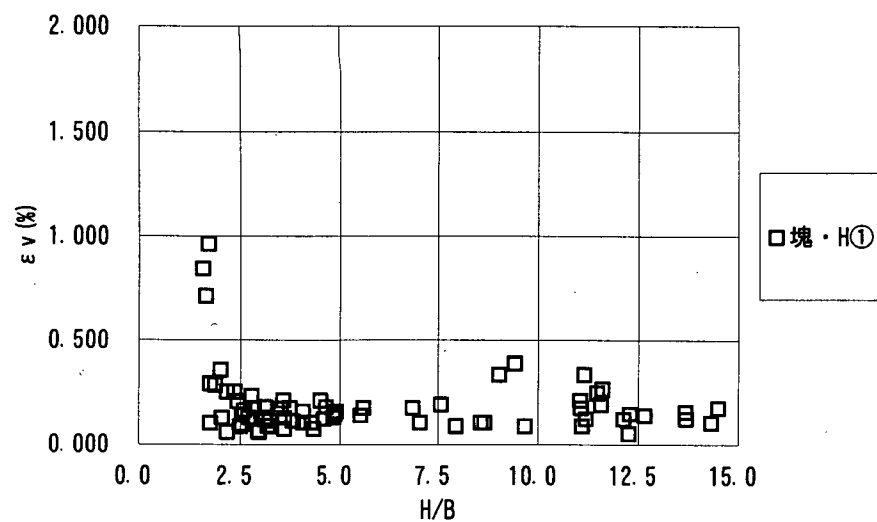


圖-參1.2 天端變位率 ε_v -H/B (塊狀岩盤, 硬質岩①)

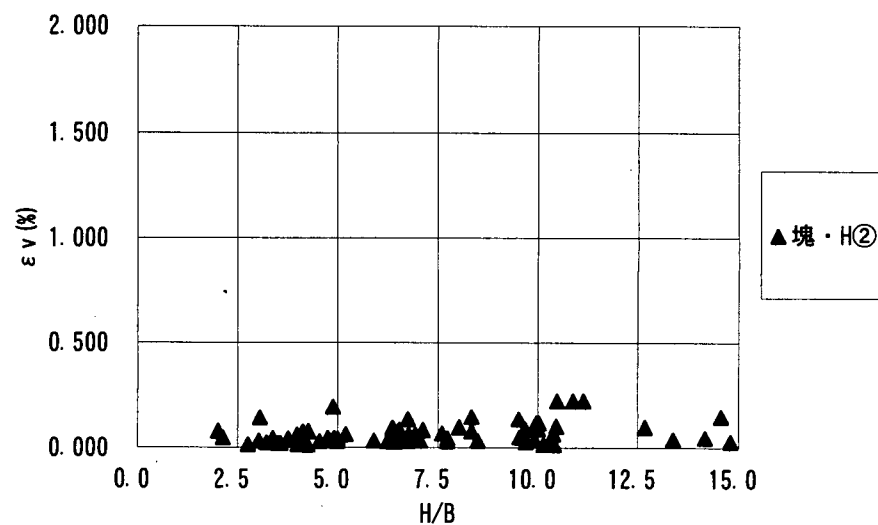


圖-參1.3 天端變位率 ε_v -H/B (塊狀岩盤, 硬質岩②)

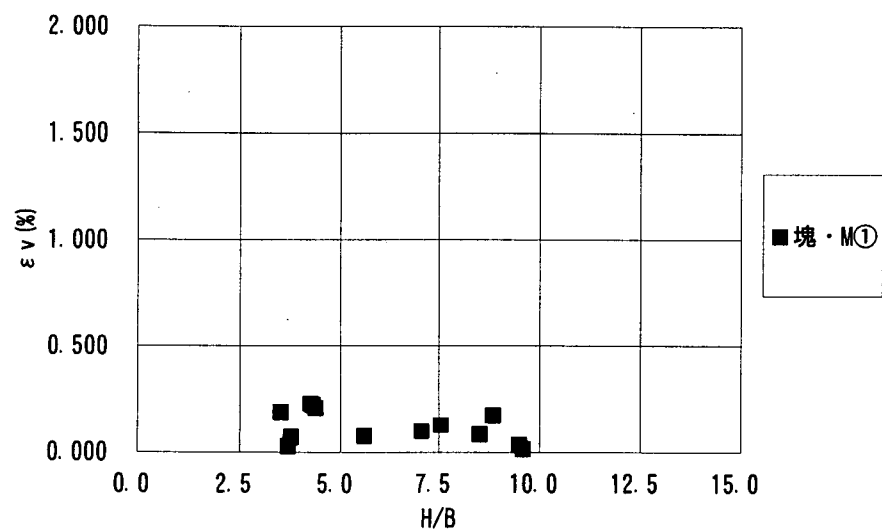


圖-參1.4 天端變位率 ε_v -H/B (塊狀岩盤, 中硬質岩①)

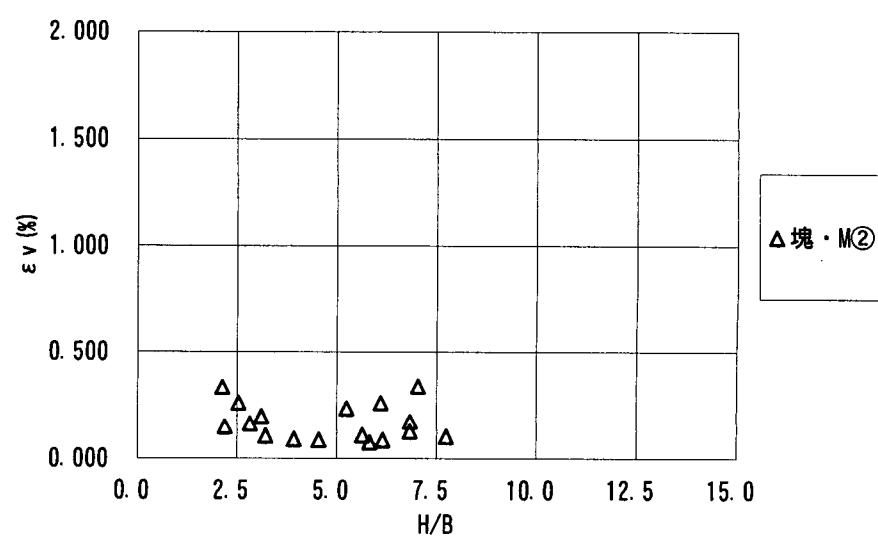


圖-參1.5 天端變位率 ε_v -H/B (塊狀岩盤, 中硬質岩②)

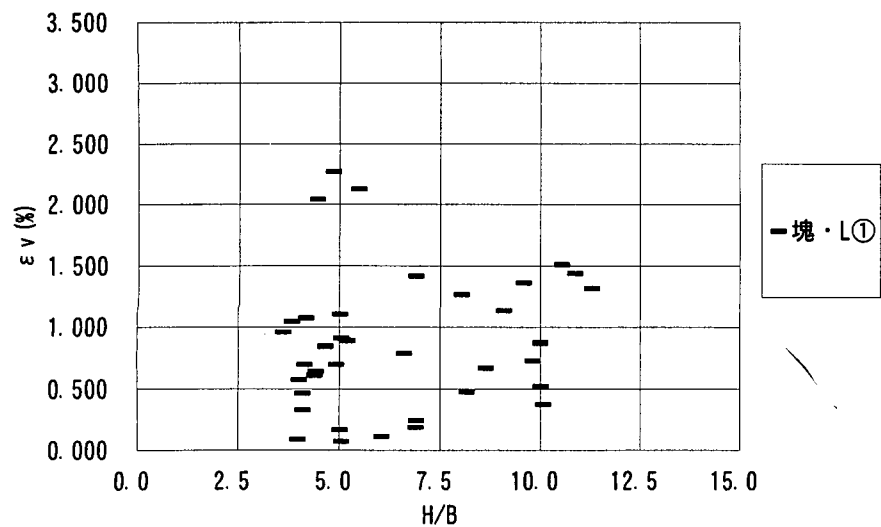


図-参1.6 天端変位率 ε_v - H/B (塊状岩盤, 軟質岩①)

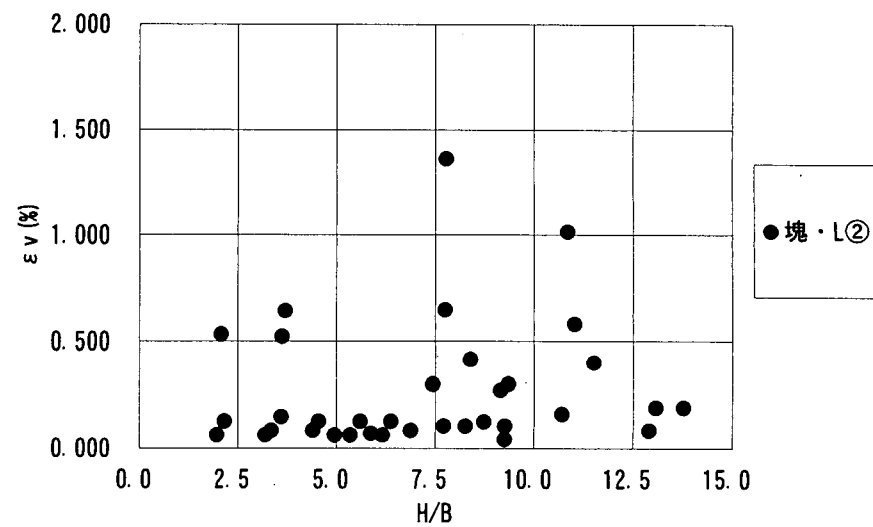


図-参1.7 天端変位率 ε_v - H/B (塊状岩盤, 軟質岩②)

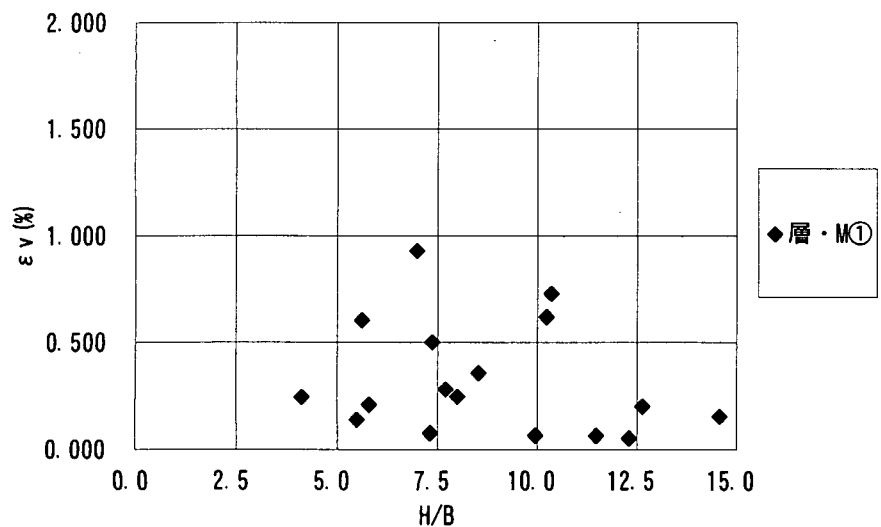


図-参1.8 天端変位率 ε_v - H/B (層状岩盤, 中硬質岩①)

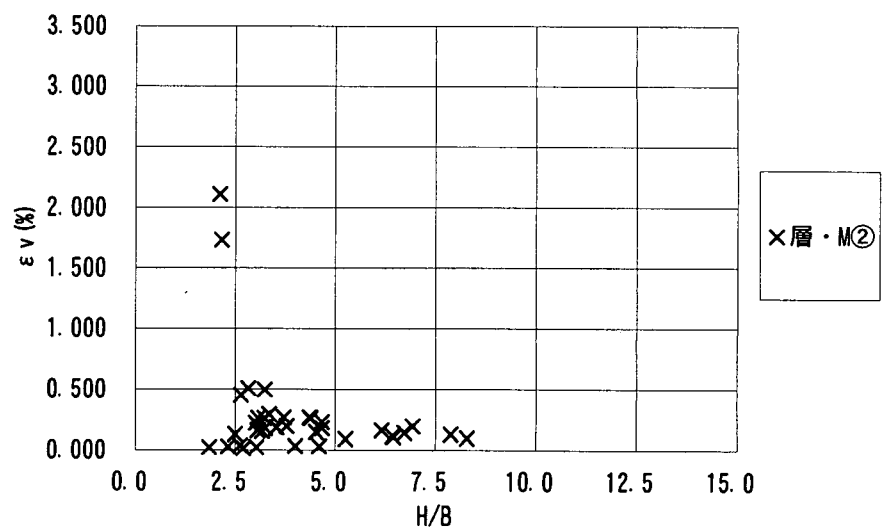


図-参1.9 天端変位率 ε_v - H/B (塊状岩盤, 中硬質岩②)

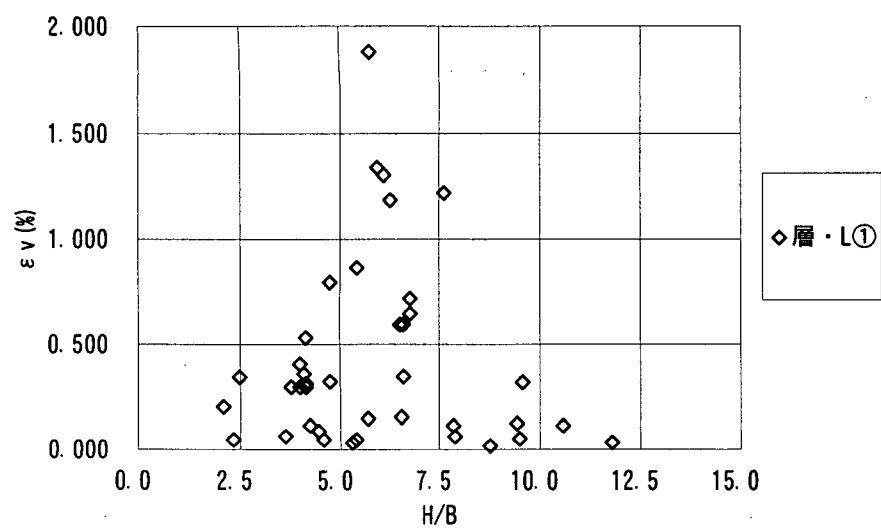


図-参1.10 天端変位率 ε_v - H/B (層状岩盤, 軟質岩①)

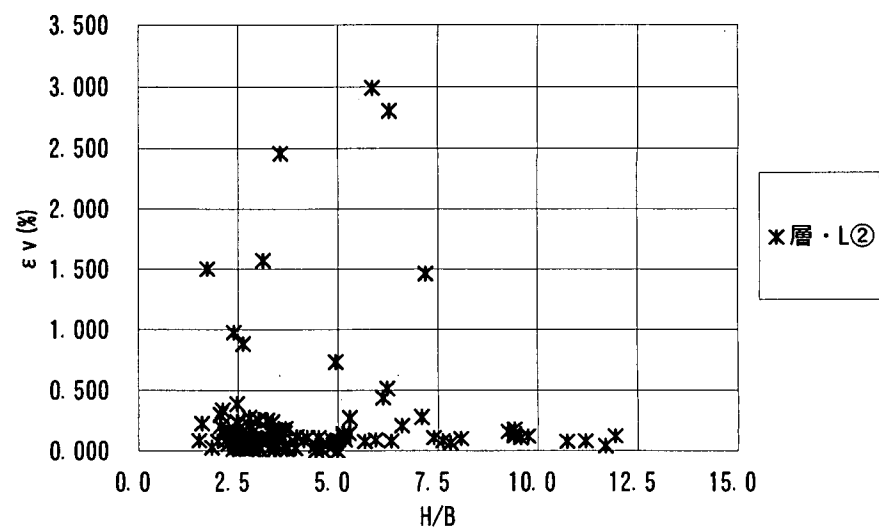


図-参1.11 天端変位率 ε_v - H/B (層状岩盤, 軟質岩②)

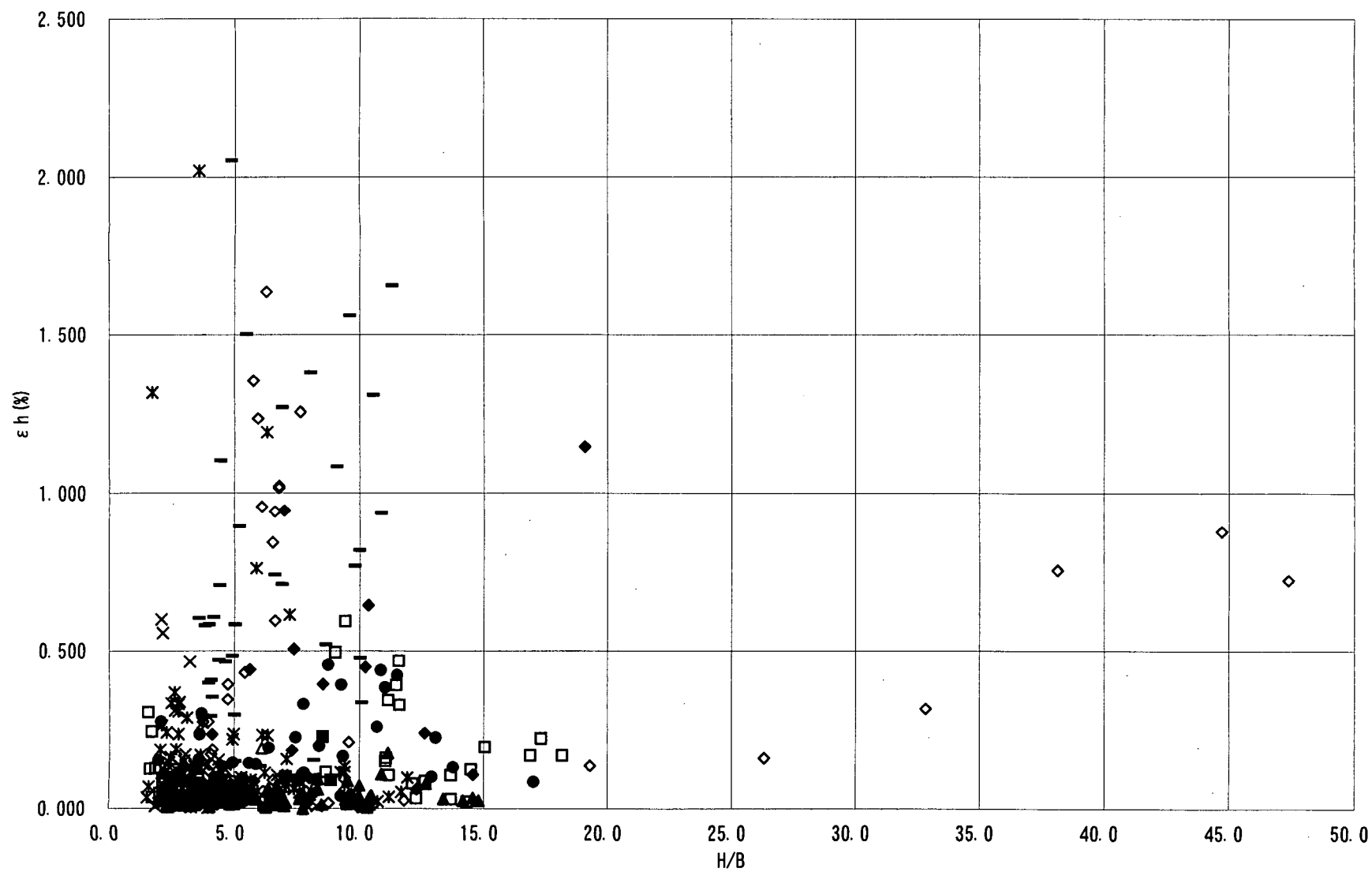


図-参2.1 内空変位率 ϵ_h - H/B (全岩種, 岩石グループ毎)

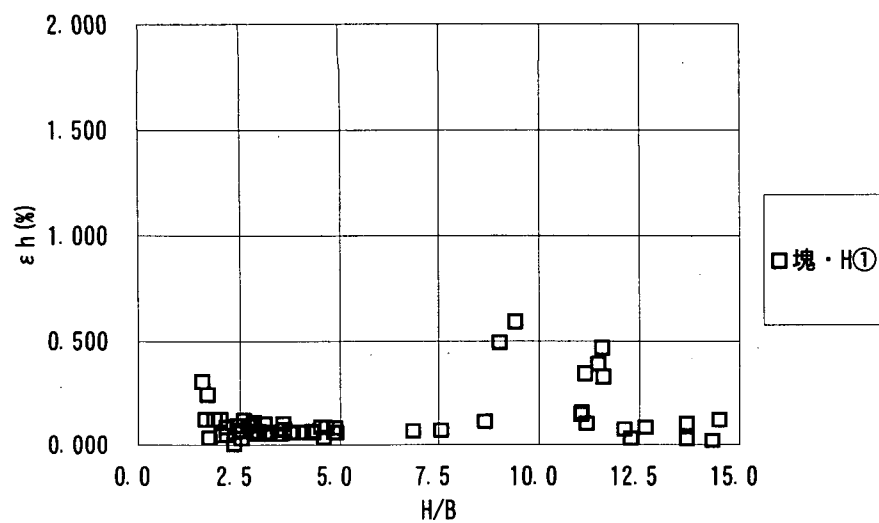


圖-參2.2 內空變位率 εh -H/B (塊狀岩盤, 硬質岩①)

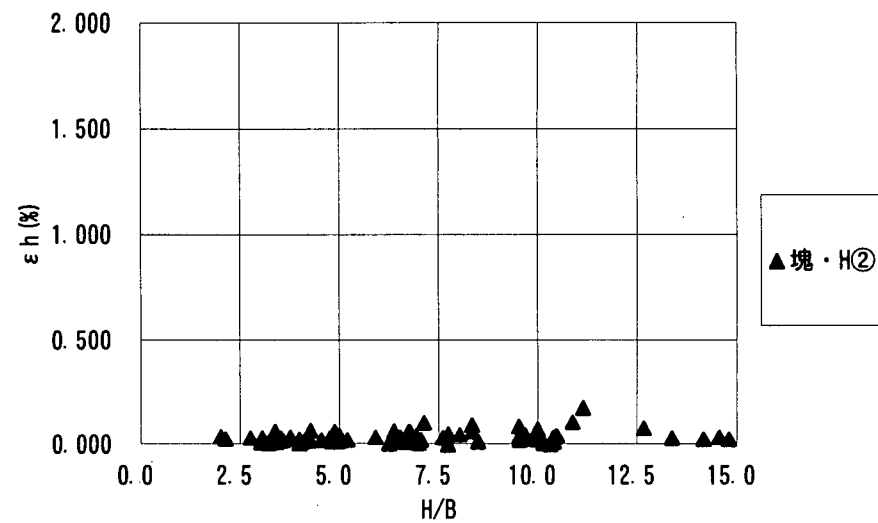


圖-參2.3 內空變位率 εh -H/B (塊狀岩盤, 硬質岩②)

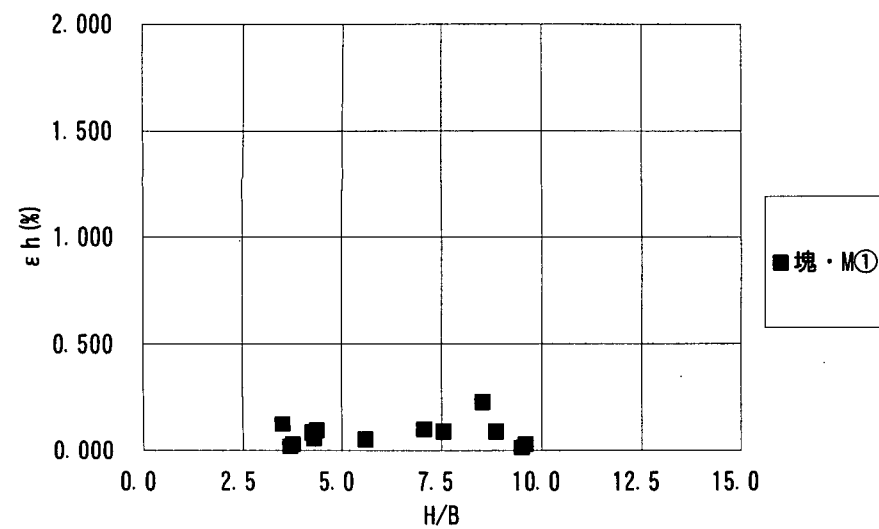


圖-參2.4 內空變位率 εh -H/B (塊狀岩盤, 中硬質岩①)

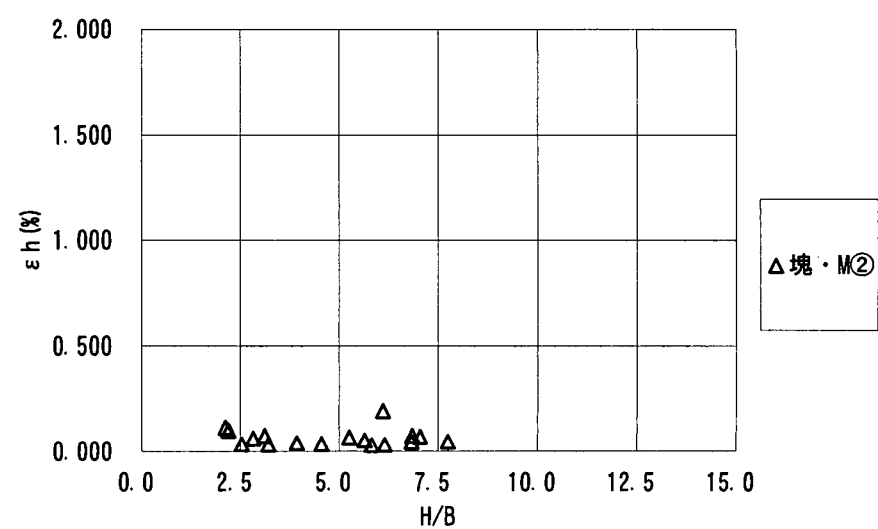


圖-參2.5 內空變位率 εh -H/B (塊狀岩盤, 中硬質岩②)

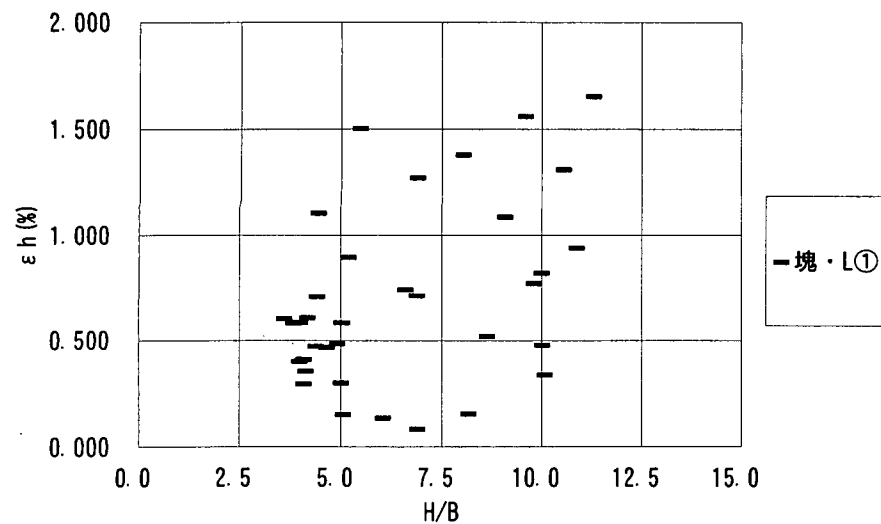


图-参2.6 内空变位率 ε_h -H/B (块状岩盤, 軟質岩①)

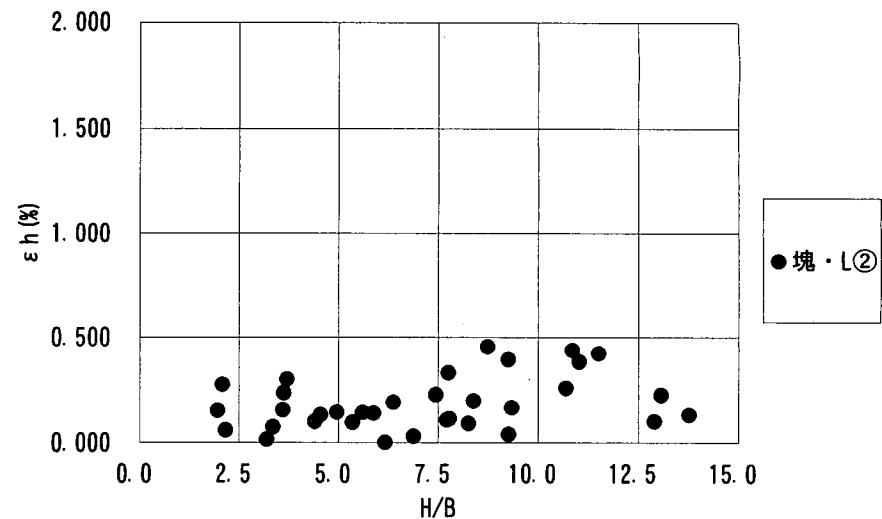


图-参2.7 内空变位率 ε_h -H/B (块状岩盤, 軟質岩②)

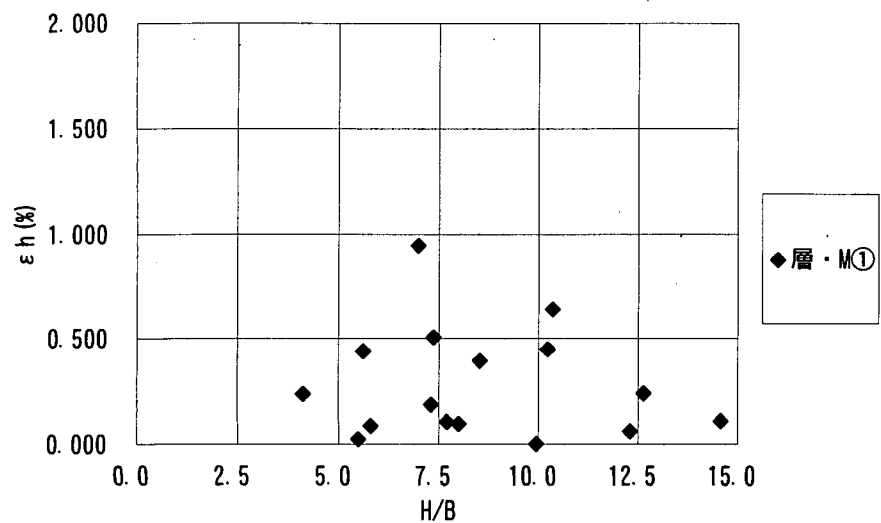


图-参2.8 内空变位率 ε_h -H/B (層状岩盤, 中硬質岩①)

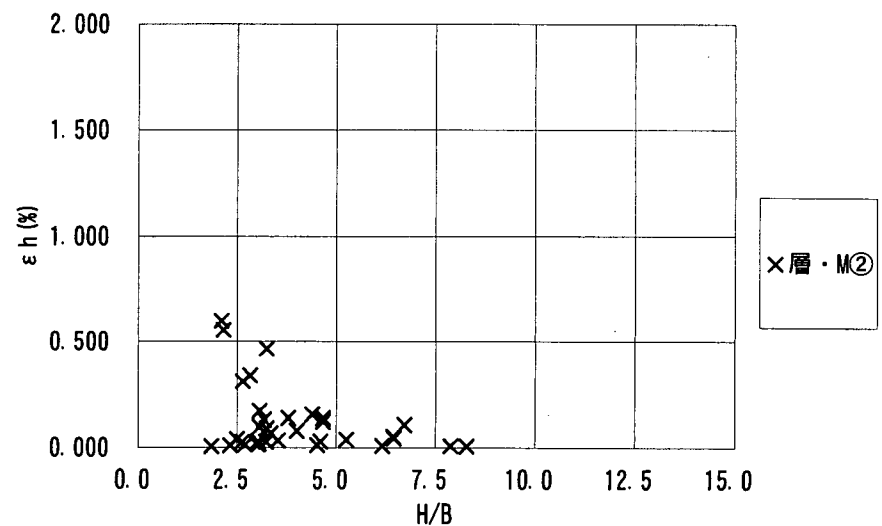


图-参2.9 内空变位率 ε_h -H/B (層状岩盤, 中硬質岩②)

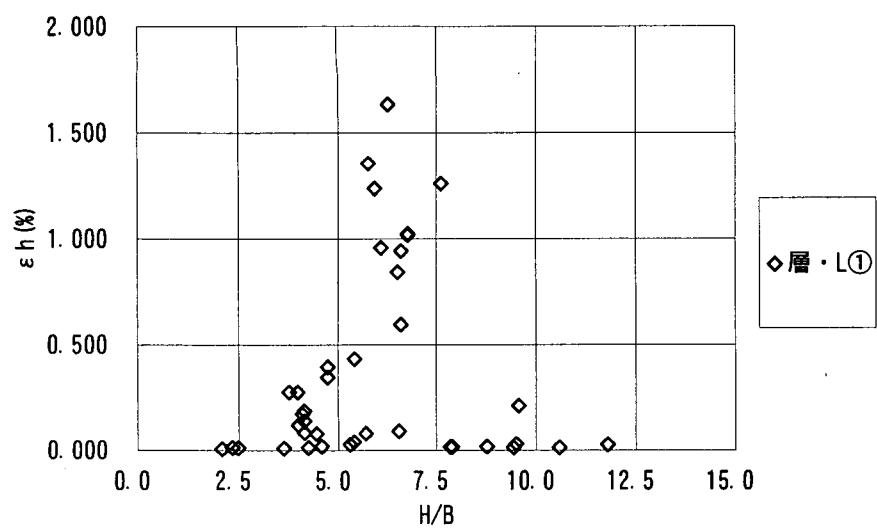


图-参2.10 内空变位率 ε_h - H/B (层状岩盤, 軟質岩①)

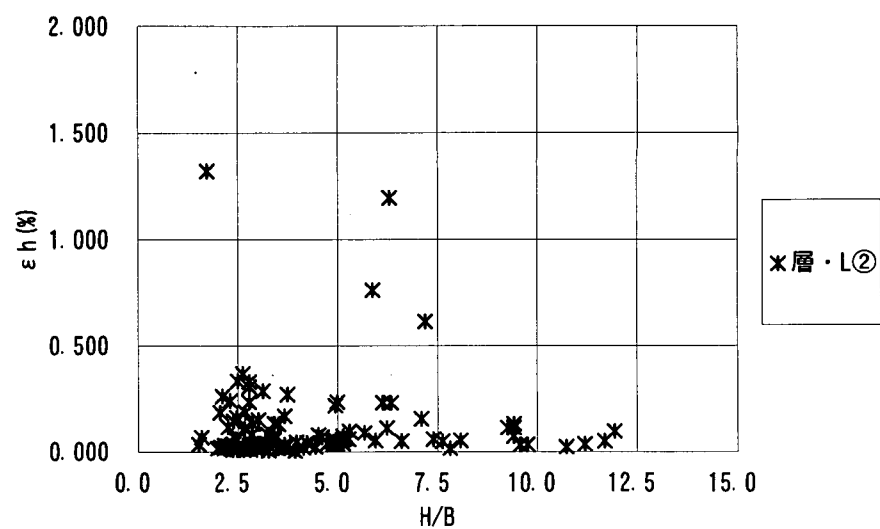


图-参2.11 内空变位率 ε_h - H/B (层状岩盤, 軟質岩②)

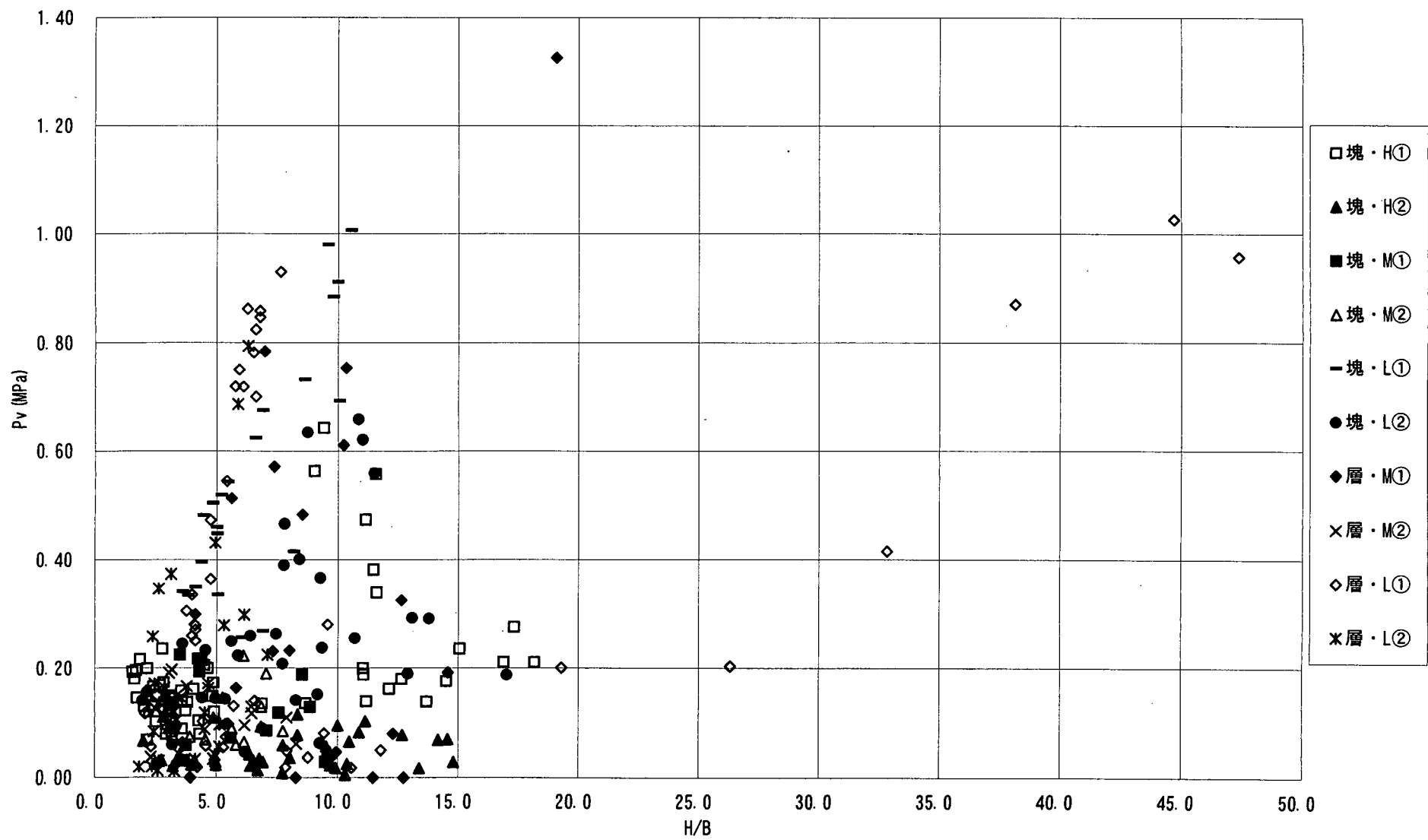


図-参3 支保に作用する荷重 P_v - H/B (全岩種, 岩石グループ毎)