

地層処分場設計のための 地質環境基本特性

～第2次取りまとめ「地層処分の工学技術」
の検討で用いる岩盤物性の設定～

(研究報告)

1999年11月

核燃料サイクル開発機構
東 海 事 業 所

本資料の全部または一部を複写・複製・転写する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33
核燃料サイクル開発機構 東海事業所
運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Information Section,
Administration Division,
Tokai Works,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

地層処分場設計のための地質環境基本特性

～第2次取りまとめ「地層処分の工学技術」の検討で用いる岩盤物性の設定～

(研究報告)

谷口 航*, 長谷川宏**,
岩佐健吾**, 佐藤稔紀***

要　　旨

わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分場の設計検討においては、現在のところ、サイトが未定であるため、わが国の長期的安定性を備えた幅広い地質環境を考慮に入れる必要がある。また、地層処分システムの技術的信頼性および実現可能性を明示するためには、わが国の自然環境に即した地質環境モデルの構築および地層処分システムの仕様の検討が必要となる。これら検討に当たっては、解析による設計が必要であり、その解析において入力値とする岩盤物性データ、特に空洞の力学的安定性等の力学的解析において入力物性となる岩盤静的力学物性、および温度評価解析において入力物性となる岩盤熱物性が必要不可欠である。また、耐震安定性の検討を行うための岩盤動的力学物性も必要である。

本報告は、核燃料サイクル開発機構による地層処分研究開発の第2次取りまとめ「地層処分の工学技術」の検討にて用いる岩盤物性について、わが国の幅広い地質環境を考慮に入れ、その分類、設定の考え方および設定を行ったものである。

岩盤物性を検討するに当たり、まず、公開文献の調査によりデータの抽出を行い、動力炉・核燃料開発事業団による「地層処分研究開発第1次取りまとめ」時に作成した岩石・岩盤物性データベースと合わせて、第2次取りまとめにおける岩石・岩盤物性データベースを作成した。次いで、岩盤の物性が工学的に同等なグループに岩種を分類し、その分類ごとに基本的な力学特性等を指標に、解析に必要な岩盤静的力学物性、および熱物性を設定した。また、静的力学物性および動的力学物性に関しては、その深度依存性についても検討を行った。

本報では、以下を考慮し分類・設定を行った。

- (1) 岩石の一軸圧縮強度や割目頻度等を指標に、硬岩系岩盤と軟岩系岩盤とに分類した。
- (2) 岩石の一軸圧縮強度と、岩石の変形定数、強度定数および物理特性の相関を検討した。
- (3) 岩盤の深度依存性を有する弾性波速度と岩石の弾性波速度から、岩盤良好度を設定し、岩石静的力学特性から深度依存性を有する岩盤静的力学物性を設定した。
- (4) 深度依存性を有する岩盤の弾性波速度から、深度依存性を考慮した岩盤動的力学物性を設定した。また、動的力学物性と静的力学物性との比を検討した。
- (5) 岩石の物理特性と熱物性の相関を検討し、静的力学特性と熱物性の関係を検討した。

* 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究 Gr.

** 東京事務所 2000年レポートチーム 統合化 Gr.

*** 東濃地科学センター 地質環境情報 Gr.

Fundamental Properties of Geoenvironment for Design Study of Repository

Wataru Taniguchi*, Hiroshi Hasegawa**, Kengo Iwasa**, Toshinori Sato***

ABSTRACT

To develop appropriate designs, as well as the manufacture, installation and construction technologies for the engineered barrier system and disposal facilities, it is necessary to evaluate physical properties of the rock mass that relate to mechanical stability analysis, thermal analysis, and seismic analysis (hereinafter referred to as "mechanical properties", "thermal properties", and "dynamic properties"). Since H3 Report, these physical properties have been broadly collected from the open literature, including field measurement data, as well as in-situ data obtained in the Tono area and at the Kamaishi Mine, in order to obtain more reliable data and to promote understanding of the deep geological environment for the purpose of design. These collected data have been added to databases on rock properties developed in H3.

Thus, this report contains the upgraded databases on rocks, which include the features from a wide range of geological environments in Japan. In this report, rock types are classified into groups that have equivalent properties from the viewpoint of engineering, based on these databases of rocks. Then, design values of physical properties for the classified rock groups are determined by considering the correlation between each physical property. To date, the mechanical properties and thermal properties have been generally treated separately from each other. Here, the mechanical properties and thermal properties are determined by applying relationships between effective porosity and both mechanical and thermal properties. For the mechanical properties and dynamic properties, depth dependence are also taken into consideration.

* Tokai Works, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Waste Isolation Research Division,
Barrier Performance Group

** Tokyo Office, Geological Isolation Research Project, Integration and Reporting Group

*** Tono Geoscience Center, Geological Environmental Research Group

目 次

1. はじめに	1
2. わが国 の 地質環境を幅広く考慮した岩盤分類	3
2-1 岩石データベースの作成	3
2-2 地層処分システムの全体的評価を考慮した岩盤分類	3
2-3 人工バリアや処分施設の設計を考慮した岩盤分類	4
2-4 検討の前提条件としての地質構造	6
2-5 人工バリアや処分施設の設計で取り扱う岩種	6
3. 設定の考え方および検討方法	11
3-1 静的力学物性	11
3-2 動的力学物性	13
3-3 熱物性	16
4. 検討結果および設定	18
4-1 静的力学物性	18
4-2 動的力学物性	38
4-3 熱物性	50
5. まとめ	59
謝辞	61
参考文献	62

1.はじめに

地層処分研究開発第2次取りまとめ（以下、第2次取りまとめ）では、人工バリアと処分施設の設計、製作・施工、建設などに関し、安全性を実現するための信頼性の高い人工バリア並びに処分施設についての設計要件を提示するとともに、これらが現実的な工学技術によって合理的に構築ができるることを示すことが求められている（原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会、1997）。核燃料サイクル開発機構では、第2次取りまとめでのこの要求に対して、人工バリアや処分施設の設計の考え方や要件を示し、これらに基づき人工バリアおよび処分施設の試設計を行い、さらに試設計された仕様に対し種々の検討を行い、それらの技術的実現性を示すことにより応えることとしている。

本報告は、上記試設計を行うための前提条件として、岩盤物性について検討・設定を行ったものである。

わが国における地層処分概念は、諸外国と同様、多重バリアの概念に基づき、人工バリアを地下数百メートル以深に定置することとしており（原子力委員会、1994），その検討ではわが国の地質環境の特徴を踏まえたものである必要がある。現段階では、地層処分施設のサイトが未定のため、わが国の幅広い地質環境を考慮した概念の検討を行っており、この観点から地質環境の幅に対して性能に余裕を持たせた人工バリアを考えている。したがって、試設計に用いる地質環境の特性についても、わが国での特性を表現し、かつその幅を十分に考慮し設定する必要がある。また、現段階での設計では、主に力学および熱伝導の観点からの検討を行っているため、地質環境特性のうち、力学および熱伝導に関わる岩盤物性の設定が重要である。

ここでは、力学および熱伝導に関わる岩盤物性として、空洞の力学的安定性解析（黒木ほか、1999）において入力物性となるもの（以後、岩盤静的力学物性）、熱伝導に関わる解析（谷口・岩佐、1999：谷口ほか、1999a、千々松・谷口、1999）において入力物性となるもの（以後、岩盤熱物性）、および耐震安定性解析（黒木ほか、1999：谷口ほか、1999b）において入力物性となるもの（以後、岩盤動的力学物性）について検討・設定を行った。

検討手順としては、まず、動力炉・核燃料開発事業団による「地層処分研究開発第1次取りまとめ」（以下、第1次とりまとめ）（動力炉・核燃料開発事業団、1992）で用いた岩石・岩盤物性データベース（佐藤ほか、1992）を基に、それ以降新たに公開された文献等からデータを追加し、上記データベースを更新した（佐藤ほか、1999）。次いで、本データベースに基づき、日本の地質環境を幅広く考慮した岩盤分類を行い、その分類毎に、岩石の基本的力学特性で

ある一軸圧縮強度と各静的力学物性の相関関係を求め、一軸圧縮強度を基に岩石の静的力学物性の設定を行った。ここで、従来個々に扱われてきた岩石の静的力学物性と熱物性に有効間隙率を介したリンクを持たせて設計解析用入力物性のデータセット（様々な物性の組み合わせ）とした。また、岩石の静的力学物性を岩盤の静的力学物性に換算するとともに、岩盤の静的力学物性および動的力学物性については、両者の関係および深度依存性を考慮した。

本報で検討・設定された物性は、地層処分研究開発第2次取りまとめ「地層処分の工学技術」（以下、人工バリアや処分施設の設計）における各種力学的、熱的解析にて用いている。

2.わが国の地質環境を幅広く考慮した岩盤分類

2-1 岩石データベースの作成

第1次取りまとめにおいては、岩盤物性値の分布の幅、あるいはそのような物性値の岩石の種類や深度との関係を把握するために、土木工学、地質、鉱山、水資源等に関する公開文献の調査を実施し、データの収集を行い、岩盤としての物性データベースを作成した（佐藤ほか、1992）。さらに、第1次取りまとめ以降、上記データベースを基に、新たに公開された文献等からのデータを追加し、上記データベースを更新した（佐藤ほか、1999）。また、これらデータベースでは、後述する6岩種毎にデータ整理を行った。表2-1にデータ整理結果を示す。なお、本データベースでは、岩石・岩盤のデータを可能な限り掲載しているが、主に岩石（コア）でのデータが多いため、以下の検討では、一律に岩石（コア）のデータとして扱うこととした（以下、本データベースを岩石データベースと呼ぶ）。

2-2 地層処分システムの全体的評価を考慮した岩盤分類

第1次取りまとめにおける「人工バリアおよび処分施設の技術的検討」では、工学的な観点から、結晶質岩系岩盤と堆積岩系岩盤とに分類し、検討を行った（動力炉・核燃料開発事業団、1992）。

本検討では、岩石データベースにおいて、第1次取りまとめでの結晶質岩と堆積岩の2分類を、「堆積岩は固結度（強度や間隙率）の違いにより大きく軟岩（主に新第三紀以降の堆積岩）と硬岩（主に古第三紀以前の堆積岩）に分けられる。」こと、「鉱物化学的な観点から、結晶質岩は酸性岩（花崗岩など珪長質岩）と塩基性岩（玄武岩などの苦鉄質岩）に大別される。また、堆積岩は、吸着能力の低い石英や長石を主成分とする砂質岩と吸着能力の高い雲母鉱物や粘土鉱物を多く含む泥質・凝灰質岩に分けられる。」こと等により、地層処分システムの設計および性能評価に必要となる核種収着等の化学的影響を考慮して、さらに以下の6岩種に分類した。

①結晶質岩（酸性岩）

代表岩種

花崗岩類、流紋岩類、片岩

②結晶質岩（塩基性岩）

代表岩種

斑レイ岩，玄武岩類

③新第三紀堆積岩（砂質岩）

代表岩種

新第三紀堆積岩・砂岩，新第三紀堆積岩・れき岩

④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）

代表岩種

新第三紀堆積岩・泥岩，新第三紀堆積岩・凝灰岩

⑤先新第三紀堆積岩（砂質岩）

代表岩種

先新第三紀堆積岩・砂岩，先新第三紀堆積岩・れき岩

⑥先新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）

代表岩種

先新第三紀堆積岩・泥岩，先新第三紀堆積岩・凝灰岩

2-3 人工バリアや処分施設の設計を考慮した岩盤分類

1 「はじめに」で記述したように、現段階の設計に関しては、主に力学および熱伝導の観点からの検討を行っている。また、地層処分システムが成立する前提条件として、人工バリアの設置、およびそれに関わる運搬を行うための地下空間の確保が必要であることを考慮すれば、まずは力学的な観点からの岩盤分類を行うことが妥当である。地下空間の確保という観点からの空洞の力学的安全性評価では、トンネル掘削の検討など、従来の土木工学での考え方を参考になるが、そこでの岩盤を分類する基本的な指標として、岩種、一軸圧縮強度等の強度特性、弾性波速度、割れ目の間隔や状態、ボーリングコアの連続性、地山強度比（一軸圧縮強度と土被り圧の比）等があり、さらにこれらを用いて岩盤の等級を区分している（日本道路公団、1997：日本鉄道建設公団、1996：土木学会、1992）。また、海外でも、岩石の強度、ボーリングコアの連続性、割れ目の間隔や状態などを指標とした岩盤分類が提案されている（Deere, 1963 : Bieniawski, 1974 : Barton et al., 1974 : Hoek and Brown, 1997）。なかでも、一軸圧縮強度は基本的な力学特性であり、古くは Deere & Miller (1966) が一軸圧縮強度を用いて岩盤分類を行っている。また、ISRM (International Society for Rock Mechanics) の指針 (1978) や Hoek and Brown (1997) 等、多くの研究で一軸圧縮強度による分類が試みられ、提案されてきている。以上より、人工バリアや処分施設の設計での力学的検討においては、一軸圧縮強度を指標として

岩盤を分類することとした。

図 2-1 に岩石データベースにおける岩種毎の岩石の一軸圧縮強度の分布を示す。これによると、結晶質岩（①結晶質岩（酸性岩），②結晶質岩（塩基性岩））および先新第三紀堆積岩（⑤先新第三紀堆積岩（砂質岩），⑥先新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩））については、中央値からデータ数が±25%の範囲（図 2-1 中の各ボックス）において、一軸圧縮強度は 45～195 MPa 程度に分布している。一方、新第三紀堆積岩（③新第三紀堆積岩（砂質岩），④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩））については、中央値からデータ数が±25%の範囲の一軸圧縮強度は 5～55 MPa 程度に分布している。このように、一軸圧縮強度の分布の傾向は、結晶質岩および先新第三紀堆積岩のグループと、新第三紀堆積岩のグループとに分かれることがわかる。その他の力学特性についても、ポアソン比など一部の特性値を除いて、ほぼ結晶質岩および先新第三紀堆積岩のグループと、新第三紀堆積岩のグループに分類できることが確かめられている（佐藤ほか, 1999）。

さらに、ISRM の指針（1978）によれば、一軸圧縮強度 25 MPa 以下の岩盤は軟岩（Very Low and /or Low Strength）に、25 MPa 以上の岩盤は硬岩（High and/or Very High）に区分される。図 2-1 の一軸圧縮強度の分布に関してこの指針を当てはめてみると、結晶質岩（①結晶質岩（酸性岩），②結晶質岩（塩基性岩））および先新第三紀堆積岩（⑤先新第三紀堆積岩（砂質岩），⑥先新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩））は硬岩に、新第三紀堆積岩（③新第三紀堆積岩（砂質岩），④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩））は、軟岩に分類されるものが多く含まれていることが分かる。

また、割れ目の分布についても、図 2-2 に示すように、新第三紀堆積岩における割れ目頻度は、結晶質岩および先新第三紀堆積岩に比べて小さい傾向が認められている（井尻ほか, 1999a）。

したがって、本検討での力学的岩盤分類では、結晶質岩および先新第三紀堆積岩を硬岩、新第三紀堆積岩を軟岩とし、上記「地層処分システムの全体的評価を考慮した岩盤分類」での 6 分類を「人工バリアや処分施設の設計を考慮した力学的岩盤分類」としての 2 分類にした。

熱的岩盤分類に関しては、岩石の熱物性は、岩石の鉱物組成、密度、組織、空隙率、水分含有量および圧力に依存する（島田・幾世橋, 1987）ことから、硬岩と軟岩での区別よりむしろその組成（鉱物組成、空隙率、水分含有量とのバランス）によって変わるものと考えられる。したがって、岩基質部の組成の区別として、結晶質岩と堆積岩とに分類し検討することとした。

表 2-2 に第 1 次取りまとめおよび本検討で考慮した岩盤分類を示す。

2-4 検討の前提条件としての地質構造

処分場の設計に際して、岩盤の空間的広がり、割れ目や断層の分布、地形等の地質構造要素や地理的条件は、処分場の位置やレイアウトの設定、建設・操業時の工学的対策を検討するために必要となる。

本検討でのこれら条件に関しては、岩盤の物性を設定するための前提条件として扱い、以下の仮定を設けた。

・硬岩として検討する岩盤の前提条件（硬岩系岩盤）

単一岩種（結晶質岩）からなる岩体とし、地表部に数mの厚さの表土が存在するものとした。

・軟岩として検討する岩盤の前提条件（軟岩系岩盤）

複数の地層が単斜構造をなして成層するものとした。つまり、新第三紀堆積岩（泥質岩）が処分深度付近（300～700m）に存在し、その上部と下部には新第三紀堆積岩（砂質岩）が分布するものとした。

2-5 人工バリアや処分施設の設計で取り扱う岩種

人工バリアや処分施設の設計で用いる硬岩および軟岩の静的力学岩盤物性値（除く、岩石（コア）の弾性波速度および側圧係数）の設定に際しては、全体的観点から分類した6岩種の中で、技術の適用範囲を幅広く示すために各種静的力学物性が低めの値を示す岩種のデータを用い検討することとし、また、岩種によらず各種静的力学物性の値が同等の場合は、データ数が豊富で信頼性が高いと考えられる方の岩種のデータを用いることとした。つまり、2-2で示した6岩種の内、硬岩では①結晶質岩（酸性岩）の、軟岩では④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）のデータを用いた。

動的力学物性および岩石（コア）の弾性波速度の設定に際しては、データ数が少ないとこと、2-4で前述したように軟岩系岩盤では、砂質岩と泥質岩の互層と仮定したこと、岩盤（地山）の弾性波速度との整合性等から、硬岩では①結晶質岩（酸性岩）および②結晶質岩（塩基性岩）のデータを、軟岩での砂質岩層では③新第三紀堆積岩（砂質岩）、泥質岩層では④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）のデータを用いた。

側圧係数の設定に際しては、硬岩、軟岩の分類はせず、全てのデータから深度との関係を求めた。

熱物性に関しては、データ数が少ないとこと、3「設定の考え方および検討方法」で後述するように岩基質部の熱物性と有効間隙率を検討することにより設定することから、2-3で上述したように、岩基質部の組成の区別として、結晶質岩と堆積岩とに分類し検討することとした（4-3（1）「岩基質部の熱伝導率および比熱」項 参照）。すなわち、結晶質岩では①結晶質岩（酸性岩）および②結晶質岩（塩基性岩）のデータを、堆積岩では③新第三紀堆積岩（砂質岩）、④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）、⑤先新第三紀堆積岩（砂質岩）および⑥先新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）のデータを用い検討を行った。

表 2-1 岩盤の諸特性統計量一覧表

佐藤ほか (1992) に加えて、新たに文献調査等を実施し、岩種ごとの物性の統計量を求めた (佐藤ほか, 1999)。

岩種	物性	熱			空隙・水			弾性波速度					密度			強度					
		熱伝導率 Wm ⁻¹ K ⁻¹	比熱 kJkg ⁻¹ K ⁻¹	線膨張係数 ×10 ³ K ⁻¹	吸水率 %	含水率 %	有効 間隙率 %	超音波速度		動ボアソン比	動弾性係数	地山の 弾性波 速度 km s ⁻¹	飽和 密度 gcm ⁻³	自然 密度 gcm ⁻³	乾燥 密度 gcm ⁻³	一軸圧縮強度 MPa	弾性係数 GPa	ボアン比	圧裂引張強度 MPa	三軸圧縮試験	
								P 波 km s ⁻¹	S 波 km s ⁻¹										せん断強度 MPa		
結晶質岩 (酸性岩)	個数	102	71	70	402	105	315	748	160	0.10	193	73	250	643	307	493	495	171	259	216	119
	最大値	5.38	1.08	1.29	27.9	38.7	58.2	9.30	4.03	0.50	88.7	6.00	3.12	3.60	3.11	405.7	136.2	0.56	94.1	52.2	62.0
	最小値	1.10	0.73	0.04	0.1	<0.1	0.0	1.04	<0.1	0.02	<0.1	0.33	1.76	1.05	1.48	0.4	<0.1	0.04	0.1	0.0	4.6
	平均値	2.86	0.99	1.05	1.0	2.0	4.0	5.03	2.38	0.28	40.8	3.61	2.67	2.63	2.64	115.8	35.0	0.25	8.2	14.7	38.5
	中央値	2.76	1.03	1.18	0.5	0.4	1.3	5.05	2.37	0.28	41.7	4.30	2.67	2.65	2.66	107.8	28.1	0.23	7.1	13.2	40.0
	標準偏差	0.62	0.01	0.46	2.1	6.3	7.7	1.15	0.56	0.10	20.9	1.82	0.18	0.22	0.20	70.5	27.3	0.10	9.4	9.9	11.8
結晶質岩 (塩基性岩)	個数	183	55	50	433	37	248	662	190	183	310	149	125	529	230	529	448	68	238	191	60
	最大値	4.23	1.28	1.29	12.3	11.5	25.2	8.08	4.13	0.42	123.4	5.20	3.09	3.37	3.06	437.5	160.7	0.50	23.1	53.6	55.3
	最小値	0.68	0.72	0.03	0.1	0.1	0.1	1.50	0.67	0.10	<0.1	0.14	2.15	1.56	1.84	3.9	<0.1	0.07	0.5	1.0	5.5
	平均値	2.36	0.96	0.82	1.9	4.2	7.0	4.79	2.38	0.26	24.7	1.51	2.66	2.63	2.60	134.0	26.5	0.25	9.9	22.8	36.3
	中央値	2.39	1.06	0.81	1.2	4.1	5.4	4.86	2.32	0.26	18.4	1.11	2.66	2.65	2.63	127.4	20.7	0.23	9.6	20.9	39.0
	標準偏差	0.77	0.17	0.22	2.1	3.4	5.7	1.19	0.61	0.06	25.7	1.11	0.24	0.24	0.25	72.1	27.8	0.09	4.7	9.9	10.0
新第三紀 堆積岩 (砂質岩)	個数	75	1	1	16	22	110	220	31	1	8	409	87	277	108	78	70	23	15	30	31
	最大値	4.74	0.77	0.70	24.4	53.6	55.1	6.85	2.99	0.25	68.6	6.13	2.64	2.98	2.78	205.8	82.2	0.45	31.4	30.0	62.1
	最小値	0.47	0.77	0.70	0.2	1.1	0.1	0.70	0.25	0.25	<0.1	0.41	1.74	1.28	1.09	0.2	<0.1	0.11	0.1	0.1	22.0
	平均値	1.56	0.77	0.70	7.3	21.2	17.9	2.83	1.49	0.25	30.7	3.75	2.27	2.20	2.01	31.2	11.0	0.32	7.9	5.2	35.8
	中央値	1.30	0.77	0.70	4.1	18.8	16.1	2.70	1.25	0.25	23.6	3.74	2.29	2.25	1.98	17.2	3.2	0.33	6.7	3.5	32.0
	標準偏差	0.78	-	-	7.8	14.4	13.7	1.20	0.99	-	30.3	0.76	0.25	0.36	0.39	36.8	19.6	0.12	7.6	6.3	10.8
新第三紀 堆積岩 (泥質/凝灰質岩)	個数	90	6	6	91	106	203	412	57	5	21	61	155	537	183	380	364	61	93	132	149
	最大値	3.63	0.93	2.44	125.0	60.0	55.4	6.40	3.51	0.31	20.3	5.30	2.62	2.99	2.66	377.6	58.8	0.50	54.8	98.0	60.0
	最小値	0.35	0.77	0.83	0.7	0.6	0.2	0.70	0.30	0.21	1.9	0.64	1.40	1.05	0.68	<0.1	<0.1	0.07	0.1	<0.1	7.0
	平均値	1.62	0.85	1.42	14.9	21.7	20.0	2.58	1.38	0.28	15.0	2.52	2.23	2.02	1.99	25.8	6.7	0.27	3.7	5.1	25.8
	中央値	1.37	0.85	1.36	10.3	19.9	20.0	2.32	1.30	0.30	17.5	2.38	2.29	1.98	2.01	9.1	4.1	0.28	1.8	1.1	26.0
	標準偏差	0.87	0.07	0.56	19.5	11.6	12.8	1.07	0.59	0.04	5.4	0.81	0.28	0.35	0.41	38.0	9.4	0.11	6.4	11.7	10.8
先新第三紀 堆積岩 (砂質岩)	個数	16	4	4	215	9	124	420	102	47	82	35	48	333	95	355	493	25	72	92	124
	最大値	4.48	1.08	1.08	3.4	4.7	40.0	7.00	4.22	0.45	87.5	5.40	2.79	2.98	2.80	414.5	150.9	0.32	22.1	78.0	61.6
	最小値	2.38	1.05	0.65	0.1	0.0	0.0	1.08	1.39	0.17	<0.1	0.50	1.23	1.60	2.45	0.3	<0.1	0.10	0.5	<0.1	14.0
	平均値	3.19	1.08	0.93	0.7	1.3	6.5	4.57	3.05	0.28	35.1	2.15	2.58	2.52	2.61	134.4	18.6	0.20	8.7	16.9	38.4
	中央値	2.97	1.08	1.00	0.5	1.1	3.1	4.61	3.21	0.26	43.0	1.90	2.63	2.58	2.56	127.4	13.7	0.20	7.6	15.8	39.0
	標準偏差	0.59	0.01	0.19	0.6	1.4	9.0	1.24	0.75	0.07	26.0	1.38	0.28	0.26	0.08	83.6	19.7	0.07	5.4	15.5	8.3
先新第三紀 堆積岩 (泥質/凝灰質岩)	個数	14	6	5	58	3	53	201	26	19	68	16	18	214	35	178	321	16	40	85	78
	最大値	3.65	1.04	1.09	2.6	0.9	46.0	7.80	3.96	0.39	97.7	5.50	3.05	3.05	3.04	344.0	105.8	0.39	24.7	98.0	45.0
	最小値	1.88	1.09	0.80	0.1	0.6	0.4	1.07	1.46	0.20	1.8	0.90	1.90	1.41	2.08	1.5	0.2	0.06	0.1	0.4	7.0
	平均値	2.68	1.06	0.96	0.6	0.8	7.7	4.59	2.69	0.30	42.9	2.82	2.69	2.48	2.72	104.9	17.8	0.26	7.6	15.9	25.5
	中央値	2.68	1.06	0.94	0.4	0.8	1.8	4.95	2.53	0.29	45.6	2.26	2.70	2.66	2.74	89.7	8.2	0.30	5.4	1.8	25.5
	標準偏差	0.48	0.02	0.11	0.5	0.2	11.4	1.64	0.60	0.05	24.3	1.60	0.25	0.38	0.19	76.4	19.9	0.09	6.6	20.8	10.9

表 2-2 本検討での岩盤分類

第1次取りまとめ における分類	本検討での分類				
	岩種分類	岩種分類	全体の観点 からの分類	設計の観点からの分類	
力学的分類			熱的分類		
花崗岩類	花崗岩類	結晶質岩 (酸性岩)	硬岩	結晶質岩	
流紋岩類	流紋岩類				
片岩	片岩				
斑レイ岩類	斑レイ岩類				
玄武岩類	玄武岩類	(塩基性岩)	軟岩	堆積岩	
新第三紀堆積岩	新第三紀堆積岩・砂岩				
	新第三紀堆積岩・れき岩				
	新第三紀堆積岩・泥岩				
	新第三紀堆積岩・凝灰岩				
先新第三紀堆積岩	先新第三紀堆積岩・砂岩	新第三紀堆積岩 (砂質岩)	軟岩	堆積岩	
	先新第三紀堆積岩・れき岩				
	先新第三紀堆積岩・泥岩	新第三紀堆積岩 (泥質/凝灰質岩)	硬岩		
	先新第三紀堆積岩・凝灰岩				

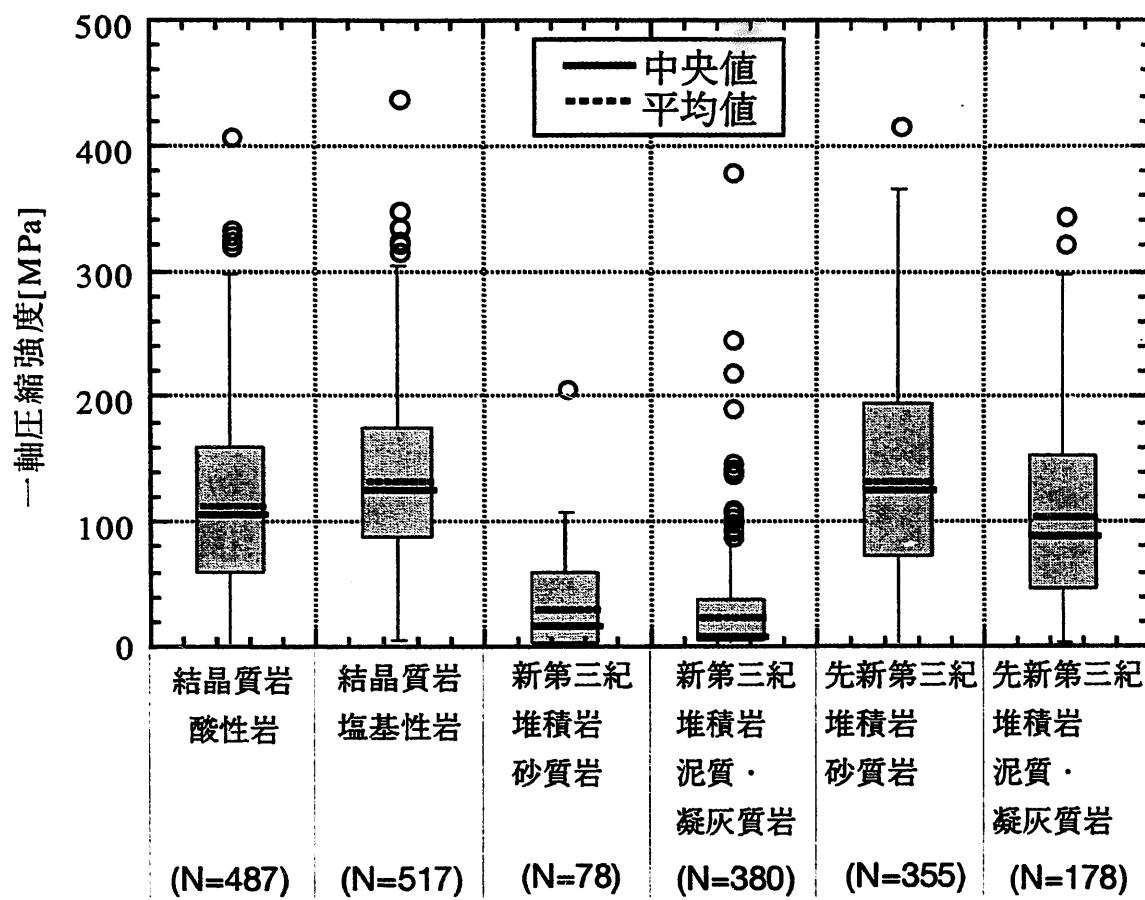


図 2-1 岩種ごとの一軸圧縮強度の分布

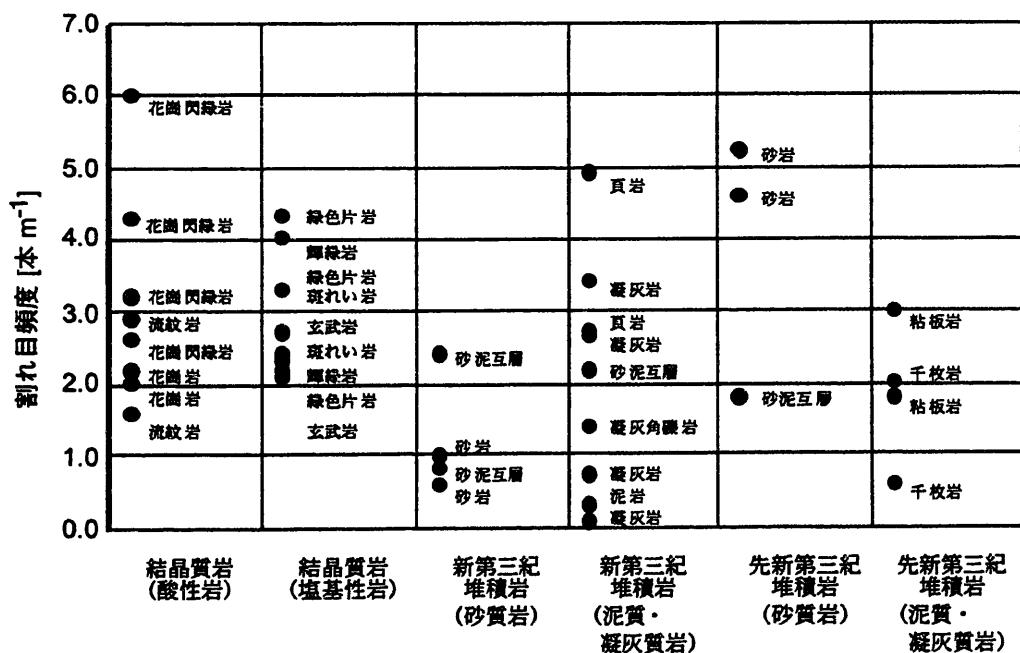


図 2-2 露頭調査による岩種ごとの割れ目頻度（井尻ほか, 1999a）

3. 設定の考え方および検討方法

3-1 静的力学物性

空洞の力学的安定性（黒木ほか, 1999）等の設計解析において必要となる岩盤の静的力学物性としては、単位体積重量、粘着力、内部摩擦角、引張強度、弾性係数およびポアソン比が挙げられる。また、地質環境条件として必要なものは、初期の土被り圧を設定するための側圧係数、および亀裂の発達程度を考慮し、岩石（コア）の変形・強度特性から各深度での岩盤（地山）の変形・強度特性を推定するための弾性波速度である。単位体積重量に関しては、ニアフィールド岩盤の含水状態は飽和状態であると想定されるため、飽和単位体積重量を用いることとした。

岩石・岩盤の静的な力学的物性は、基本的な力学物性である一軸圧縮強度との相関で論じられている事例が多い。赤井ほか (1973) や吉中ほか (1989), 菊地ほか (1984), 桑原 (1984) は一軸圧縮強度と弾性係数との相関について報告している。このほか、菊地ほか (1984) は一軸圧縮強度とせん断強度（粘着力）との相関、桑原 (1984) は一軸圧縮強度と弾性波速度や有効間隙率、吸水率との相関についても報告している。本検討においては、これらの報告に基づき、岩石データベースにおいて、一軸圧縮強度と弾性係数、粘着力、内部摩擦角、および有効間隙率との関係を用い、岩石（コア）としての静的力学物性の設定を行うこととした。また、単位体積重量に関しては、一軸圧縮強度との関係から設定された有効間隙率との相関関係を用い設定した。表 3-1 に設計用岩盤物性の設定において考慮した各物性間の関係を示す。

側圧係数に関しては、初期鉛直応力と初期水平応力が揃っているデータを整理し、既往の研究例（斎藤ほか, 1988）を参考に深度と側圧係数の関係式を導き、深度依存性を有する側圧係数を設定することとした。

一般に岩盤の強度・変形特性は割れ目の影響や寸法効果等により岩石の強度・変形特性に比べて低減すると言われている（例えば、Goodman, 1984；菊地, 1990）。ここでは、これらの影響を考慮するために、岩石データベースおよび上記相関関係を用い設定した岩石（コア）の一軸圧縮強度、引張強度、粘着力および弾性係数に、(3-1) 式で示される岩盤良好度（土木学会, 1987）を乗じ、岩盤としての物性を設定することとした。岩盤良好度の計算に用いる弾性波速度については、有効間隙率との相関（竹内ほか, 1970）から求められた岩石（コア）の弾性波速度 V_p と、後述の動的力学物性で設定される拘束圧（土被り圧）つまり深度との関係（Wepfer and Christensen, 1991）から求められる

岩盤（地山）の弾性波速度 v_p を用いることとした。

$$\text{岩盤良好度 : } D' = (v_p/V_p)^2 \quad (3-1)$$

v_p : 岩盤（地山）の弾性波速度（P 波）

V_p : 岩石（コア）の弾性波速度（P 波）

なお、上記相関関係の検討においては、東濃地域および釜石鉱山での実測値（例えば、佐藤ほか、1999）が得られているものに関して、実測値と各々の相関関係を比較し、その妥当性を隨時確認した。

表 3-1 岩盤静的力学物性設定において考慮した相関関係

設定する物性	設定に際して考慮する物性間の関係
引張強度	一軸圧縮強度-引張強度
弾性係数	一軸圧縮強度-弾性係数
粘着力	一軸圧縮強度-粘着力
内部摩擦角	一軸圧縮強度-内部摩擦角
有効間隙率	一軸圧縮強度-有効間隙率
飽和単位体積重量	一軸圧縮強度-有効間隙率-飽和単位体積重量*
弾性波速度 (v_p , V_p)	岩盤（地山）: v_p 深度-弾性波速度 岩石（コア）: V_p 一軸圧縮強度-有効間隙率-弾性波速度*
側圧係数	深度-側圧係数

*飽和単位体積重量および岩石（コア）の弾性波速度に関しては、一軸圧縮強度-有効間隙率の関係から導かれた有効間隙率の値から検討を行った。

3-2 動的力学物性

坑道およびニアフィールドの耐震安定性解析（黒木ほか, 1999, 谷口ほか 1999b）で必要となる岩盤の動的力学物性は、単位体積重量、動的せん断弾性係数、動的ポアソン比、および減衰定数である。これら動的物性に関しては、処分深度での地震波の特性を検討する（黒木ほか, 1999, 谷口ほか, 1999b）ために、深度依存性を考慮した値が必要となる。

動的せん断弾性係数および動的ポアソン比は、以下の(3-2), (3-3)式で示されるように、弾性波速度(v_p, v_s)によって定義される。本検討においては、岩盤（地山）の弾性波速度(v_p, v_s)に深度依存性を導入することによって、深度毎の動的せん断剛性 G_d および動的ポアソン比 ν_d を設定することとした。

$$\nu_d = [1 - 0.5(v_p/v_s)^2] / [1 - (v_p/v_s)^2] \quad (3-2)$$

$$G_d = \gamma v_s^2 \quad (3-3)$$

v_p : 縦波 (P 波) 弹性波速度

v_s : 横波 (S 波) 弹性波速度

γ : 単位体積重量

一般に岩盤（地山）の弾性波速度には深度依存性があることが知られている（例えば、地盤工学会, 1997）。この深度依存性は、土被りが大きい高圧縮応力下では、岩盤内の割れ目等の間隙が閉塞し、弾性波の散乱や減衰が抑制されることによって生ずる現象と考えられている。Wepfer and Christensen (1991) は、比較的大きな等方圧 (1GPa 程度まで) で岩石の弾性波速度を取得し、弾性波速度の等方圧依存性を表す式として以下に示す(3-4)式を提案している。

$$v = A(P/100)^a + B(1 - \exp(-bP)) \quad (3-4)$$

v : 縦波 (P 波) あるいは横波 (S 波) の弾性波速度

P : 等方圧,

A, B, a, b : 実験により求められる定数

(3-4) 式において、既往のデータ等から定数 (A, B, a, b) について検討した

結果, a の値は極めて小さく 0 として扱ってもよいと判断とした。例えば, Wepfer and Christensen (1991) らによって求められた (3-4) 式における定数 : A, B, a , b を表 3-2 に示す。また, P を土被り圧とすると, (3-4)式は以下のようになる。

$$v = A + B \{1 - \exp(-b \gamma h)\} \quad (3-5)$$

γ : 単位体積重量

h : 深度

(3-5) 式において, A は地表面近傍での弾性波速度, $A+B$ はある深度以上で収束する弾性波速度を表すことになる。本検討では, (3-5) 式に基づいて, 弾性波速度 (v_p, v_s) の深度依存性を求ることとした。

なお, 上式においても必要となる単位体積重量に関しては, 静的力学物性で設定した飽和単位体積重量とした。

減衰定数に関しては, 少ないデータではあるが, 既往の耐震設計や動的特性試験等を参考に値を設定した。

なお, 設定された動的せん断弾性係数および動的ポアソン比に関しては, 同じく設定された静的せん断弾性係数およびポアソン比と比較し, その妥当性を確認した。

表 3-2 近似式中の定数一覧 (Wepfer and Christensen, 1991)

Figure No. and Sample	A(km/sec)	α	B(km/sec)	b(1/Mpa)	SSR	n	r.m.s.	dV/dP (km/sec/GPa)		
							Error	20 MPa	100M Pa	500 MPa
3A, Igneous, V_p										
Dunite	7.16±0.02	0.012±0.002	0.21±0.04	0.0054±0.0007	0.0023	27	0.03	5.0	1.48	0.24
Pillow basalt	5.29±0.03	0.026±0.002	0.42±0.04	0.013±0.001	0.041	22	0.05	10.9	2.86	0.29
Andesite	4.21±0.02	0.035±0.001	1.25±0.03	0.0075±0.0002	0.483	22	0.16	15.0	5.89	0.54
3B, Igneous, V_s										
Granite	3.45±0.05	0.0073±0.0009	0.42±0.05	0.32±0.004	0.010	27	0.02	8.3	0.81	0.05
Basalt	3.06±0.03	0.012±0.001	0.56±0.03	0.0107±0.0007	0.021	20	0.04	6.6	2.42	0.10
Diabase	2.988±0.005	0.048±0.001	-	-	0.014	21	0.03	6.7	1.79	0.31
3C, Metamorphic, V_p										
Amphibolite	5.57±0.06	0.0231±0.0008	1.46±0.06	0.087±0.004	0.079	23	0.06	28.4	1.31	0.27
Grenstone	6.31±0.02	0.016±0.002	0.28±0.04	0.0069±0.0009	0.031	20	0.04	6.7	2.00	0.27
Gneiss	5.66±0.02	0.020±0.001	0.24±0.03	0.008±0.001	0.019	27	0.03	7.2	2.01	0.27
3D, Metamorphic, V_p										
Hornblendite	3.67±0.03	0.027±0.002	0.27±0.04	0.018±0.003	0.027	21	0.04	8.2	1.80	0.21
Schist	3.00±0.03	0.025±0.001	0.12±0.03	0.018±0.004	0.005	27	0.02	5.0	1.10	0.15
Phyllite	2.26±0.04	0.025±0.001	0.49±0.04	0.024±0.002	0.011	33	0.02	9.9	1.62	0.12
3E, Sedimentary, V_p										
Dolomite	5.44±0.05	0.017±0.001	1.05±0.05	0.025±0.001	0.139	21	0.09	20.5	3.04	0.19
Shale	6.074±0.005	0.0159±0.0007	-	-	0.009	18	0.02	4.7	0.96	0.20
Sandstone	3.76±0.04	0.072±0.002	1.64±0.04	0.0198±0.0006	0.303	22	0.13	33.9	7.20	0.61
3F, Sedimentary, V_s										
Sandstone	2.61±0.04	0.071±0.002	1.06±0.04	0.0210±0.0009	0.134	22	0.09	22.8	4.57	0.41
Dolomite	3.58±0.04	0.011±0.001	0.16±0.04	0.028±0.005	0.007	22	0.02	4.6	0.68	0.08
Limestone	3.17±0.03	0.011±0.002	0.17±0.04	0.019±0.004	0.004	22	0.02	4.0	0.84	0.07
4 Metagreywacke										
1st run	5.04±0.05	0.0267±0.0007	0.91±0.05	0.036±0.002	0.731	33	0.16	22.4	2.25	0.28
2nd run	5.41±0.05	0.0240±0.0007	0.55±0.05	0.037±0.004	0.095	31	0.06	16.1	1.81	0.27
6 Phyllite										
[Z]	3.877±0.003	0.1240±0.0005	-	-	0.140	33	0.07	19.7	4.81	1.17
[Y]	6.890±0.004	0.0224±0.0003	-	-	0.053	32	0.04	7.5	1.55	0.32
[X]	5.87±0.02	0.026±0.001	0.55±0.02	0.0103±0.0006	0.113	34	0.06	11.9	3.54	0.35
7 Gneiss										
[Z]	4.08±0.03	0.047±0.001	1.46±0.03	0.0127±0.0003	0.384	35	0.11	23.4	7.15	0.45
[Y]	5.25±0.02	0.037±0.001	0.86±0.03	0.0101±0.0004	0.267	28	0.11	16.2	5.09	0.47
[X]	5.03±0.02	0.016±0.002	1.09±0.03	0.0080±0.0002	0.227	28	0.10	11.3	4.73	0.32
[Z](Y)	2.71±0.03	0.034±0.002	0.84±0.03	0.00168±0.0008	0.016	30	0.03	14.5	3.57	0.20
[Y](X)	3.17±0.02	0.021±0.002	0.59±0.03	0.0119±0.0007	0.033	32	0.04	8.8	2.80	0.16
[Y](Z)	2.56±0.03	0.023±0.002	0.93±0.03	0.0140±0.0006	0.051	30	0.04	12.7	3.79	0.13
V_p averaged	4.81±0.02	0.0337±0.0006	1.10±0.02	0.0103±0.0003	0.000	46	0.00	16.9	5.67	0.41
V_s averaged	2.81±0.03	0.0267±0.0008	0.78±0.03	0.0144±0.0006	0.000	46	0.00	12.0	3.41	0.16
Granulite										
Pts to 1000MPa	5.69±0.04	0.0251±0.0006	0.74±0.04	0.012±0.001	0.244	21	0.12	16.6	3.53	0.30
Pts to 600MPa	5.66±0.04	0.020±0.002	0.81±0.04	0.017±0.001	0.285	21	0.13	15.2	3.69	0.24

3-3 热物性

热伝導解析（谷口・岩佐, 1999, 谷口ほか, 1999a, 千々松・谷口, 1999）等設計解析において必要となる岩盤の热物性は、単位体積重量、热伝導率、および比热である。また、地質条件として必要なものは、初期条件としての地温を設定するための地表面温度および深度方向の地温勾配である。

単位体積重量に関しては、上記3-1「静的力学物性」と同様に検討・設定を行った。一般に岩盤や土質材料における热伝導率および比热は间隙率および含水比に大きく依存することが知られている（島田・幾世橋, 1987）。従って、本検討でも、この考えに基づき、以下の(3-6)～(3-8)式で示すように热伝導率および比热は岩盤における岩基質部、水、空気の体積比および重量比によって定義されるとものと仮定した。具体的には、岩石データベースより、热伝導率-有効间隙率-含水比、比热-有効间隙率-含水比の組み合わせで記載されているものを抽出し、岩基質部の热伝導率、比熱を求ることにより、3-1「静的力学物性」で設定した各々の有効间隙率に対する岩盤热物性を求めた。つまり、有効间隙率を介して、静的力学物性と热物性を関係付けた。ここで、热物性に関しては、岩石データベース中に上記組み合わせで示されているものが少ないため、東濃地域および釜石鉱山での実測値（例えば、佐藤ほか、1999）も加え検討を行った。なお、ニアフィールドの岩盤の含水状態は飽和状態であると想定されるため、ここでの設定も飽和状態の値とした。

以下の式において、(3-6)式は積層複合材料において板面に平行な方向の有効热伝導率を表す（日本複合材料学会, 1989）。(3-7)式は岩、土質材料等の複合材料（水、空気を含むため）での理論式である（島田・幾世橋, 1987；小坂, 1978；地盤工学会；1997）。(3-8)式は3-1「静的力学物性」で単位体積重量を設定したときに用いたものである。

$$\lambda = (1-n_w-n_a) \lambda_R + n_w \lambda_w + n_a \lambda_a \quad (3-6)$$

$$\rho C = (1-n_w-n_a) \rho_R C_R + \rho_w n_w C_w + \rho_a n_a C_a \quad (3-7)$$

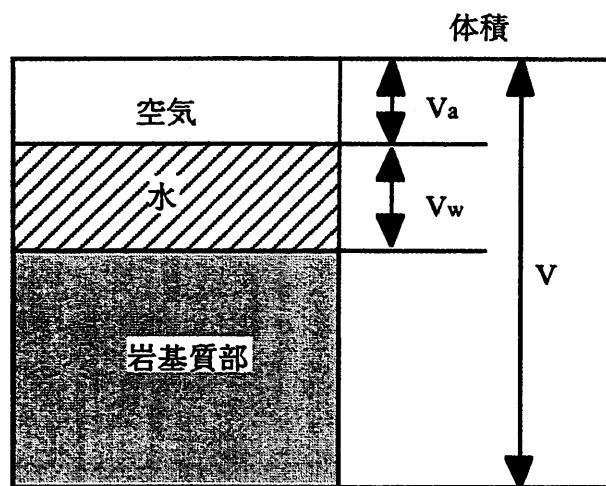
$$\rho = (1-n_w-n_a) \rho_R + \rho_w n_w + \rho_a n_a \quad (3-8)$$

$$n_a = V_a/V$$

$$n_w = V_w/V$$

$n_a + n_w$: 有効空隙率 λ : 岩の熱伝導率 λ_R : 岩基質部の熱伝導率 λ_w : 水の熱伝導率 λ_a : 空気の熱伝導率

C : 岩の比熱

 C_R : 岩基質部の比熱 C_w : 水の比熱 C_a : 空気の比熱 ρ : 岩の単位体積重量 ρ_R : 岩基質部の単位体積重量
(岩の真比重) ρ_w : 水の単位体積重量 ρ_a : 空気の単位体積重量

なお、上記式における水および空気の熱物性に関しては、伝熱工学資料（日本機械学会、1986）により 300 (K) での値を用い、 $\lambda_w=0.61$ (W/mK) , $\lambda_a=0.024$ (W/mK) , $C_w=4.18$ (kJ/kgK) , $C_a=1.01$ (kJ/kgK) とし、単位体積重量に関しては、後述する静的力学物性での検討結果、および一般的な値を考慮し、 $\rho_R=2.7$ (g/cm³) , $\rho_w=1.0$ (g/cm³) , $\rho_a=0$ とした。

地質条件として必要な深度方向の地温勾配に関しては、矢野ほか (1999) による検討および既往の文献等を参考に設定した。地表面温度に関しても、既往の文献等による平均気温および恒温層での地下水の温度を参考に設定した。

4. 検討結果および設定

4-1 静的力学物性

前述したように、ここでの検討手順としては、まず指標とする岩石の一軸圧縮強度の設定を行い、それに対応する岩石の各々の力学的および物理物性を設定した。ついで、岩石の弾性波速度と深度依存性を考慮した岩盤の弾性波速度を用い、岩石の変形・強度特性値から深度依存性を有する岩盤の変形・強度特性値に換算した。

(1) 岩石（コア）の一軸圧縮強度の設定

図 4-1 に硬岩および軟岩で検討に用いる岩種の岩石（コア）の一軸圧縮強度の分布を示す。

硬岩において検討に用いるデータ（前述 6 岩種の内①結晶質岩（酸性岩））での岩石の一軸圧縮強度については、その平均値と中央値はほぼ一致している。したがって、ここでは、以下に述べる静的力学物性の指標となる硬岩の岩石の一軸圧縮強度として、硬岩において検討に用いるデータの平均値 115 MPa を適用することとした。以下、115MPa の一軸圧縮強度を基に設定した硬岩のデータセット（様々な物性の組み合わせ）を HRcore と呼ぶこととする。

軟岩において検討に用いるデータ（前述 6 岩種の内④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩））での岩石の一軸圧縮強度については、前述 ISRM の指針（1978）を適用すると、軟岩領域から硬岩領域まで連続的に幅広く分布している。その平均値は約 26 MPa、中央値は約 9 MPa を示し、両者の乖離が認められる。このような一軸圧縮強度の幅広い分布の特徴を考慮し、ここでは、以下に述べる静的力学物性の指標となる軟岩の岩石の一軸圧縮強度として、上記平均値と中央値が含まれる範囲内で 5 種の値を設定した。つまり、軟岩系岩盤データセットでの岩石の一軸圧縮強度を 5MPa 刻みで 5 通りの値（25, 20, 15, 10, 5 MPa）に設定することとした。以下、これら一軸圧縮強度を基に設定した軟岩のデータセットを一軸圧縮強度の大きい順に SRcore-A, -B, -C, -D, -E と呼ぶこととする。なお、軟岩のデータセットを 5 種設定した理由としては、上述した一軸圧縮強度の分布状況の他に、空洞の力学的安定性の観点からより厳しくなる低強度データセットでの設計解析パラメータスタディー（黒木ほか、1999）に対応するためである。

(2) 岩石（コア）の一軸圧縮強度と引張強度の関係および引張強度の設定

硬岩および軟岩で検討に用いる岩種の岩石（コア）の一軸圧縮強度と圧裂引張強度の関係をそれぞれ図 4-2-1, 4-2-2 に示す。

これらの図より、一軸圧縮強度の増加とともに岩石の引張強度も増加することがわかる。一般に岩石のせい性度（一軸圧縮強度と引張強度の比）は 10~20 程度（山口・西松, 1989）と言われており、収集したデータの多くはほぼその範囲内に含まれている。本検討では、直線関係で一軸圧縮強度と引張強度の相関を求め、(1) 「岩石（コア）の一軸圧縮強度の設定」で設定した硬岩、軟岩データセットそれぞれの一軸圧縮強度に対応する岩石の引張強度を設定した。

(3) 岩石（コア）の一軸圧縮強度と静弾性係数の関係および静弾性係数の設定

硬岩および軟岩で検討に用いる岩種の岩石（コア）の一軸圧縮強度と静弾性係数の関係をそれぞれ図 4-3-1, 4-3-2 に示す。これらの図より、一軸圧縮強度の増加とともに岩石の静弾性係数も増加することがわかる。菊地ほか（1984）は、軟岩から硬岩まで幅広い岩石を対象に、一軸圧縮強度と静弾性係数の関係を整理し、上記関係が両対数軸で直線になることを示している。ここでも、同様に両対数の直線関係で両者の相関を求め、(1) 「岩石（コア）の一軸圧縮強度の設定」で設定した硬岩、軟岩データセットそれぞれの一軸圧縮強度に対する岩石の静弾性係数を設定した。

(4) 岩石（コア）の一軸圧縮強度と粘着力（せん断強度）の関係および粘着力（せん断強度）の設定

硬岩および軟岩で検討に用いる岩種の岩石（コア）の一軸圧縮強度と粘着力（せん断強度）の関係をそれぞれ図 4-4-1, 4-4-2 に示す。

これらの図より、一軸圧縮強度の増加とともに岩石の粘着力も増加することがわかる。菊地ほか（1984）は、幅広い岩石を対象に、一軸圧縮強度と粘着力の関係を整理し、上記関係が両対数軸で直線になることを示している。ここでは、同様に両対数の直線関係で両者の相関を求め、(1) 「岩石（コア）の一軸圧縮強度の設定」で設定した硬岩、軟岩データセットそれぞれの一軸圧縮強度に対する岩石の粘着力を設定した。

(5) 岩石（コア）の一軸圧縮強度と内部摩擦角の関係および内部摩擦角の設定

硬岩および軟岩で検討に用いる岩種の岩石（コア）の一軸圧縮強度と内部摩擦角の関係をそれぞれ図 4-5-1, 4-5-2 に示す。

これらの図より、一軸圧縮強度の増加とともに内部摩擦角も増加することが

わかる。ここでは、片対数の直線関係で両者の相関を求める、(1)「岩石（コア）の一軸圧縮強度の設定」で設定した硬岩、軟岩データセットそれぞれの一軸圧縮強度に対する岩石の内部摩擦角を設定した。

(6) 岩石（コア）の一軸圧縮強度とポアソン比の関係およびポアソン比の設定

一般にポアソン比は、変形性の大きな材料では大きく、せい性材料では小さいと言われている（地盤工学会、1997）。ここでは、岩石データベース中から岩種ごとに一軸圧縮強度とポアソン比、静弾性係数とポアソン比の関係を整理した。硬岩および軟岩で検討に用いる岩種の岩石（コア）の一軸圧縮強度とポアソン比の関係をそれぞれ図4-6-1、4-6-2に示す。これらの図から、一軸圧縮強度とポアソン比の間には相関関係は認められなかった。また、同様に静弾性係数との相関関係も認められなかった。この理由としては、ポアソン比の値自体の取りうる範囲が小さいことなどが考えられる。

ここでは、花崗岩などの硬岩で0.25～0.35、泥岩などの軟岩で0.30～0.40とされている（日本材料学会、1993）ことも勘案し、硬岩で検討に用いたデータ（①結晶質岩酸性岩）の最頻値0.25を、軟岩で検討に用いたデータ（④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩））の最頻値0.30を岩石のポアソン比としてそれぞれ設定した。

(7) 岩石（コア）の一軸圧縮強度と有効間隙率の関係および有効間隙率の設定

硬岩および軟岩で検討に用いる岩種の岩石（コア）の一軸圧縮強度と有効間隙率の関係をそれぞれ図4-7-1、4-7-2に示す。

図より、一軸圧縮強度の増加とともに有効間隙率は減少するという傾向を示すことがわかる。桑原（1984）は、複数の岩種について、これらの関係が双曲線で包絡されることを示している。したがって、ここでは、双曲線を用いて両者の相関を求め、(1)「岩石（コア）の一軸圧縮強度の設定」で設定した硬岩、軟岩データセットそれぞれの一軸圧縮強度に対する岩石の有効間隙率を設定した。

(8) 岩石（コア）の有効間隙率と飽和単位体積重量の関係および飽和単位体積重量の設定

硬岩および軟岩で検討に用いる岩種の岩石（コア）の有効間隙率と飽和単位体積重量の関係および(3-8)式で示される関係をそれぞれ図4-8-1、4-8-2に示す。ここで(3-8)式における岩基質部の単位体積重量（岩の真比重）： ρ_R は、既往の文献等（例えば、地盤工学会、1997：地盤工学会、1999、土質工学会

1974) で示されている値が $2.7 \pm 1\%$ であることより 2.7 とした。

収集したデータの有効間隙率と飽和単位体積重量は、図 4-8-1, 4-8-2 に示すように、硬岩、軟岩によらず岩石の真比重を 2.7 とした (3-8) 式と良い一致を示している。したがって、ここでは、岩石の真比重を 2.7 とした (3-8) 式を用いて、(7) で設定した硬岩、軟岩データセットそれぞれの有効間隙率に対応する岩石の飽和単位体積重量を求めた。

なお、地層処分システムの安全評価においては、花崗岩、あるいは新第三紀堆積岩を対象とした検討をおこなっている (井尻ほか, 1999b; 澤田ほか, 1999)。これらの検討でも、各岩種の有効間隙率と乾燥密度のデータが必要となるが、その設定にあたっては、佐藤ほか (1992) のデータベースに基づいて検討を行っている (井尻ほか, 1999b; 澤田ほか, 1999)。ここでは、上記岩石の真比重を 2.7 とした (3-8) 式が、佐藤ほか (1992) のデータベースにおける花崗岩、および新第三紀堆積岩でも成り立つことを確認した (図 4-8-3 参照)。

(9) 岩石 (コア) の有効間隙率と弾性波速度 (V_p) の関係および弾性波速度 (V_p) の設定

硬岩および軟岩で検討に用いる岩種の岩石 (コア) の有効間隙率と弾性波速度の関係をそれぞれ図 4-9-1, 4-9-2 および 4-9-3 に示す。なお、2-4 「検討の前提条件としての地質構造」で示したように、軟岩系岩盤では、新第三紀堆積岩泥質岩と砂質岩の互層を前提条件としたため、ここでは、③新第三紀堆積岩 (砂質岩) と④新第三紀堆積岩 (泥質/凝灰質岩) 各々で相関関係を検討した。

これらの図より、岩石の弾性波速度は、有効間隙率が大きくなるほど小さくなり、既往の文献等で示された傾向 (例えば、竹内ほか, 1970) と同様な傾向を示している。ここでは、指数関数で有効間隙率と岩石の弾性波速度の相関を求め、硬岩、軟岩データセットそれぞれの有効間隙率に対応する平均的な岩石 (コア) の弾性波速度 (V_p) として、硬岩データセットでは約 5km/sec に、軟岩データセットでは、約 1~3 km/sec の範囲で設定した。

(10) 岩盤としての静的力学物性

上記 (1) ~ (9) において、岩石 (コア : core) としての静的力学物性を設定した。ここでは、前述 3. 「設定の考え方および検討方法」で示したように、岩盤および岩石の弾性波速度を用いて (3-1) 式で表せる岩盤良好度を、設定された岩石 (コア) としての強度・変形特性 (一軸圧縮強度、引張強度、静弾性係数、粘着力) に乘じ、岩盤としての強度・変形特性を設定した。なお、有効間隙率、飽和単位体積重量、内部摩擦角およびポアソン比には岩盤良好度を考

慮せず岩石（コア）としての物性をそのまま岩盤としての物性として扱った。

岩盤良好度を求めるのに必要な、岩盤の弾性波速度は後述 4-2 「動的力学物性」で設定したもの用いた。なお、この岩盤の弾性波速度は深度依存性を有しているため、岩盤良好度も深度依存性を有することになる。また、前述までで、軟岩に関しては、岩石（コア）の物性として 5 種のデータセットを設定してきたが、4-2 で後述するように、深度と岩盤（地山）の弾性波速度の関係では、そのデータ数が少ないと等により、1 種類のみを設定した。したがって、軟岩に関しては、5 種の岩石（コア）の弾性波速度および 1 種の岩盤（地山）の弾性波速度を用い、5 種の岩石（コア）各々に対する岩盤良好度を設定した。

図 4-10-1 に硬岩における深度と岩石（コア）・岩盤（地山）の弾性波速度および岩盤良好度の関係を、図 4-10-2 に軟岩における同様なものを示す。

図に示すように、硬岩系岩盤における岩盤良好度は、岩盤（地山）の弾性波速度が一定となる深度 250 m 付近まで 1 を下回り、それ以深では 1 となった。したがって、硬岩（HRcore）を基に設定する硬岩系岩盤においては、深度 250 m 以浅の物性に対して低減率（岩盤良好度）を考慮することとし、これまでに設定された硬岩の岩石の強度・変形特性に各深度における岩盤良好度を乗じたものを硬岩系岩盤データセットの各深度における強度・変形特性とした。以降、硬岩の岩石（コア）としてのデータセット（HRcore）を基に岩盤良好度を考慮し設定した岩盤としての物性および岩盤（地山）自体の特性のデータセットを HR と呼ぶこととする。表 4-1-1 に設定された硬岩系岩盤（HR）の物性を示す。

軟岩系岩盤における岩盤良好度に関しては、深度 300~700m に存在する泥質岩層において、一部データセット（SR-A, -B）で 1 を下回る結果となった。しかしながら、岩盤良好度が 1 を下回るのは 1 部データセットのみでありさらにその値も比較的 1 に近いこと、軟岩では一軸圧縮強度を基に 5 種の物性を設定していること、岩盤良好度は割れ目を含んだ岩盤（地山）に対する低減率として考慮されている（土木学会, 1987）が軟岩の物性は割れ目などの不連続面よりは岩石自体の物性に比較的左右される（土木学会, 1987）こと等から、岩盤良好度は考慮しないこととした。つまり、これまでに設定した軟岩の岩石（コア）としてのデータセット（SRcore-A, B, C, D, E）をそのまま岩盤としての物性として扱うこととした。したがって、軟岩系岩盤の物性は深度依存性を有しないこととなる。以降、軟岩の岩盤としての物性および岩盤（地山）自体の特性のデータセットを SRcore-A, B, C, D, E 各々に対応して SR-A, B, C, D, E と呼ぶこととする。表 4-1-2 に設定された軟岩系岩盤（SR-A, B, C, D, E）の物性を示す。

(11) 深度と側圧係数の関係

側圧係数に関しては、岩石データベースにおいて初期鉛直応力と初期水平応力が揃っているデータを整理し、深度と側圧係数の関係式を設定した。図 4-11 に深度と初期応力の関係（佐藤ほか, 1999）を示す。図中下段の深度と側圧係数の関係より、深度とともに側圧係数は小さくなり、地下深部では 1 よりも小さい値に漸近する傾向が認められた。このような傾向は、理論的にも説明がなされており（たとえば、日本材料学会, 1993；松本・西岡, 1987），それを支持する結果となった。算出した深度と側圧係数の関係式は、斎藤ほか（1988）によってわが国の地下深部を対象として整理された関係式とほぼ同様となった。

以上より、本分冊における側圧係数は上記関係式で定義することとした。

表 4-1-1 硬岩系岩盤 (HR) における静的力学物性

種別 HR	岩石 (コア) 弾性波 速度 Vp(km/sec)	岩盤 (地山) 良好度 (低減率) D' = (vp/Vp) ²	岩石 (コア) 一軸圧縮 強度 qu(MPa)	岩石 (コア) 引張 強度 σt(MPa)	岩石 (コア) 弾性 係数 E(MPa)	岩石 (コア) 粘着 力 C(MPa)	岩盤 (地山) 一軸圧縮 強度 qu(MPa)	岩盤 (地山) 引張 強度 σt(MPa)	岩盤 (地山) 弾性 係数 E(MPa)	岩盤 (地山) 粘着 力 C(MPa)	内部 摩擦角 φ (deg)	ボアン 比 ν	有効 間隙率 ne(%)	飽和単位 体積重量 ρ _s (g/cm ³)
0		2.10	0.18				20	1	6,527	3				
2		2.22	0.20				23	2	7,289	3				
4		2.33	0.22				25	2	8,059	3				
6		2.44	0.24				27	2	8,834	4				
8		2.55	0.26				30	2	9,610	4				
10		0.00	0.28				32	2	10,385	4				
12		2.75	0.30				35	2	11,157	5				
14		2.84	0.32				37	3	11,922	5				
16		2.93	0.34				39	3	12,680	5				
18		3.01	0.36				42	3	13,429	5				
20		3.09	0.38				44	3	14,168	6				
30		3.45	0.48				55	4	17,665	7				
40		3.75	0.56				65	4	20,782	8				
60		4.18	0.70				80	6	25,818	10				
80		4.46	0.80				91	6	29,425	12				
100		4.64	0.86				99	7	31,923	13				
125		4.79	0.92				106	7	33,951	14				
150		4.88	0.95				109	8	35,180	14				
175		4.93	0.97				112	8	35,917	15				
200		4.96	0.98				113	8	36,357	15				
225		4.97	0.99				114	8	36,619	15				
250		4.98	0.99				114	8	36,774	15				
275		4.99	1.00				115	8	37,000	15				
300		4.99	1.00				115	8	37,000	15				
325		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
350		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
375		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
400		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
425		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
450		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
475	5.0	5.00	1.00	115	8	37,000	15	45	0.25	2	2.67			
500		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
525		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
550		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
575		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
600		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
625		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
650		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
675		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
700		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
725		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
750		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
775		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
800		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
825		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
850		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
875		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
900		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
925		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
950		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
975		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
1000		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
1025		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
1050		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
1075		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
1100		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
1125		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
1150		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
1175		5.00	1.00				115	8	37,000	15				
1200		5.00	1.00				115	8	37,000	15				

表 4-1-2 軟岩系岩盤 (SR-A, B, C, D, E) における静的力学物性
 (深度依存性なし, 岩石(コア)の物性: SRcore-A~E と同等)

種別	一軸圧縮強度 qu(MPa)	引張強度 σ_t (MPa)	弾性係数 E(MPa)	粘着力 C(MPa)	内部摩擦角 ϕ (deg)	ポアソン比 ν	有効間隙率 net(%)	飽和単位体積重量 ρ_w (g/cm ³)
SR-A	25	3.5	5,000	5.0	30	0.3	15	2.45
SR-B	20	2.8	4,000	4.0	29	0.3	20	2.35
SR-C	15	2.1	3,500	3.0	28	0.3	30	2.20
SR-D	10	1.4	2,500	2.0	27	0.3	45	1.95
SR-E	5	0.7	1,500	1.0	25	0.3	60	1.70

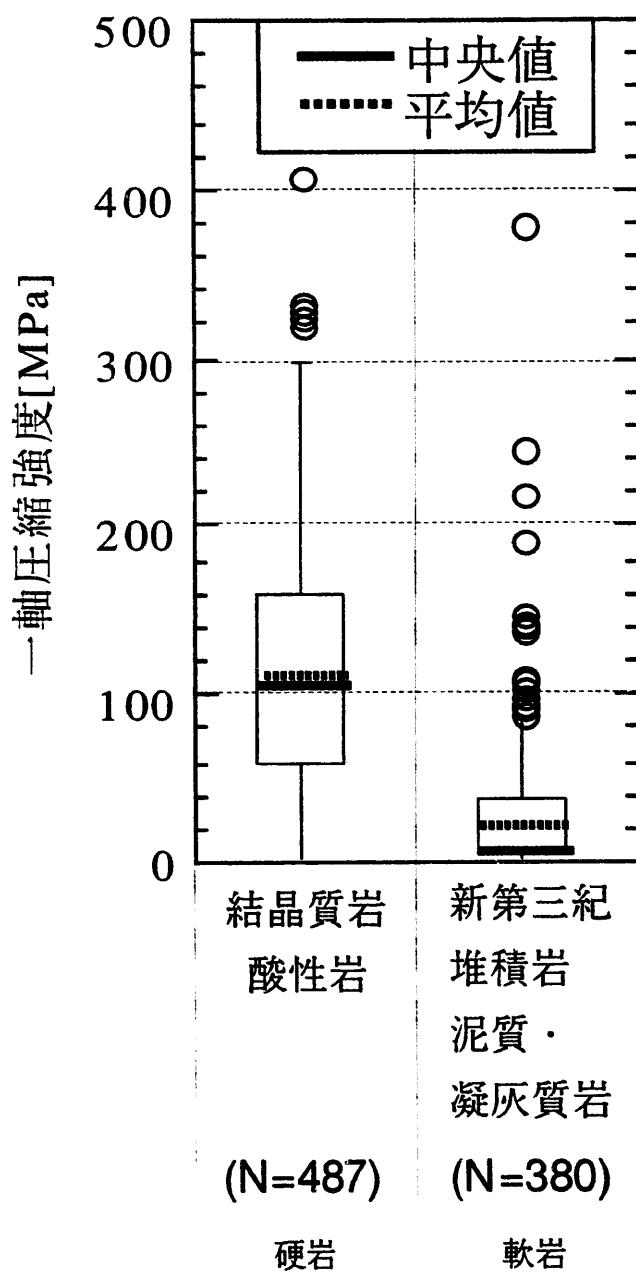


図 4-1 検討に用いる岩種の岩石（コア）の一軸圧縮強度の分布

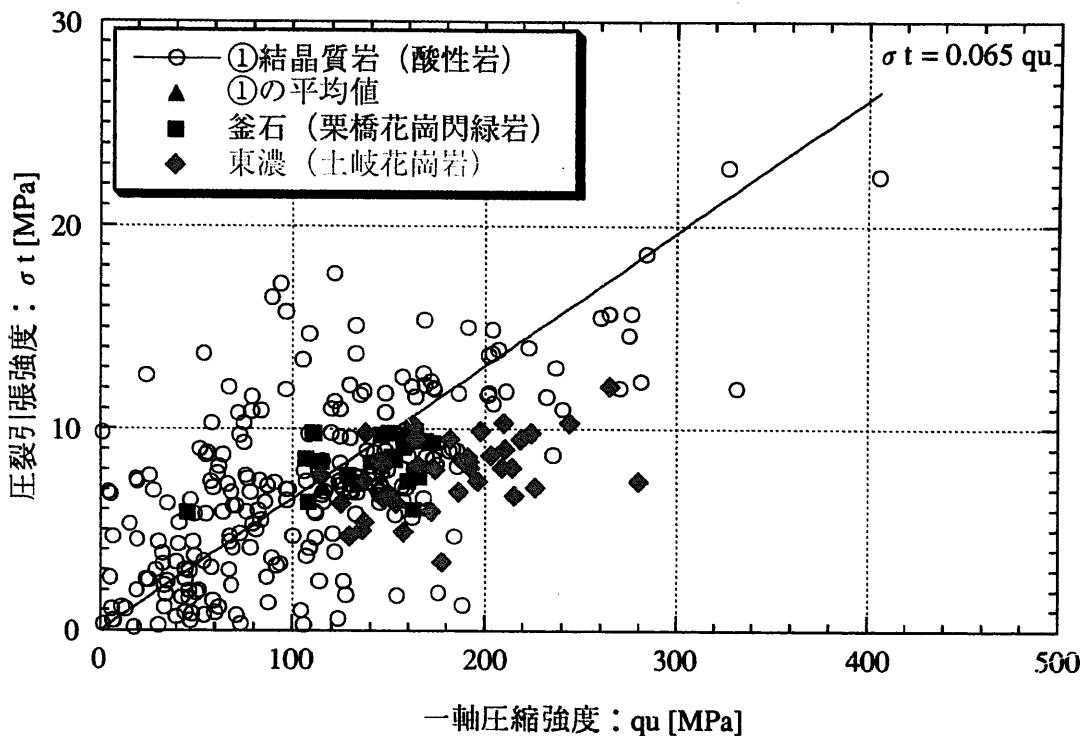


図 4-2-1 岩石の一軸圧縮強度と引張強度の関係
(硬岩 ; ①結晶質岩 (酸性岩))

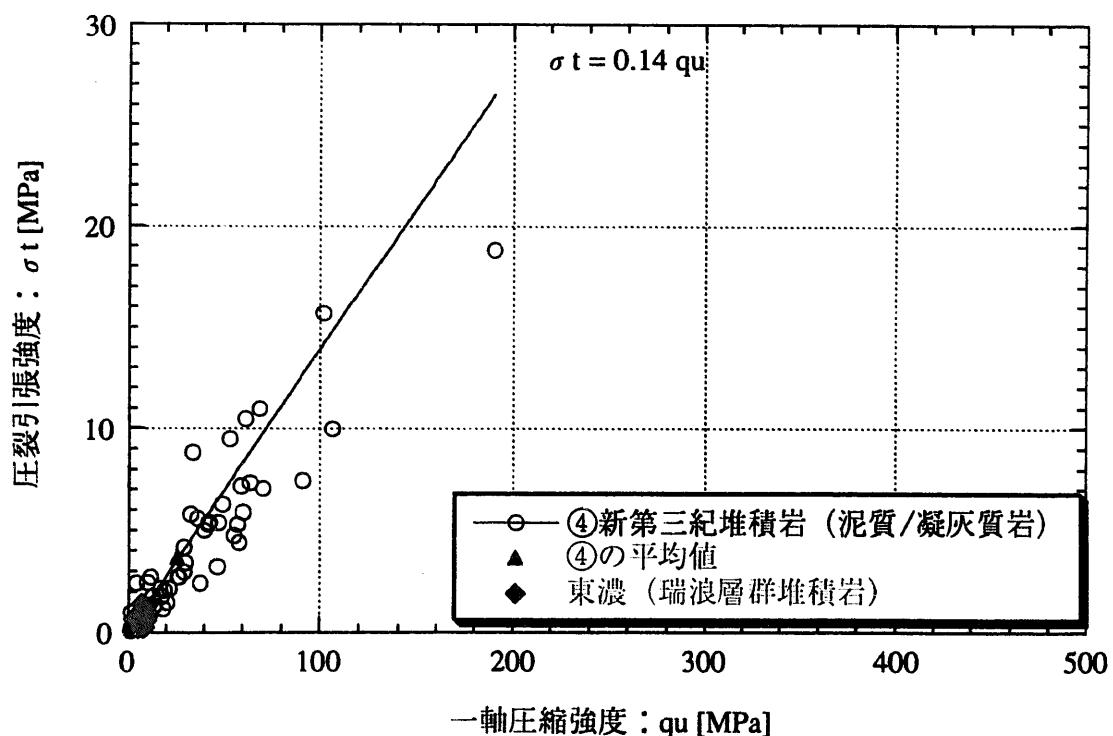


図 4-2-2 岩石の一軸圧縮強度と引張強度の関係
(軟岩 ; ④新第三紀堆積岩 (泥質/凝灰質岩))

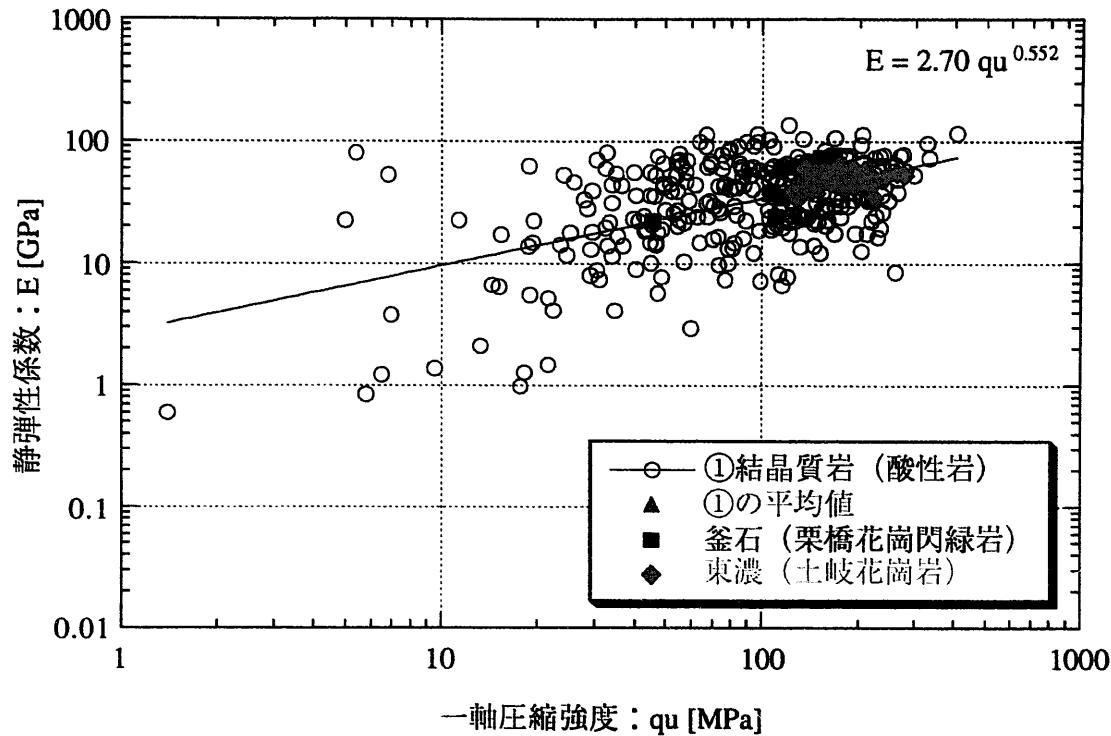


図 4-3-1 岩石の一軸圧縮強度と静弾性係数の関係
(硬岩；①結晶質岩（酸性岩）)

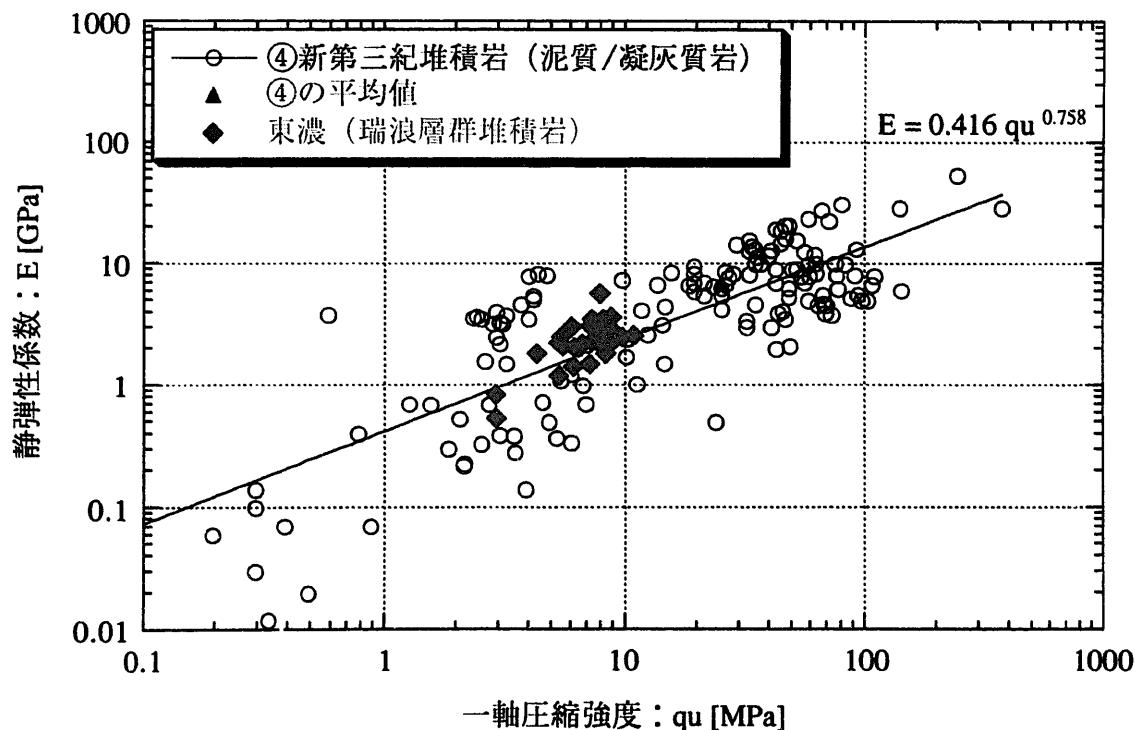


図 4-3-2 岩石の一軸圧縮強度と静弾性係数の関係
(軟岩；④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）)

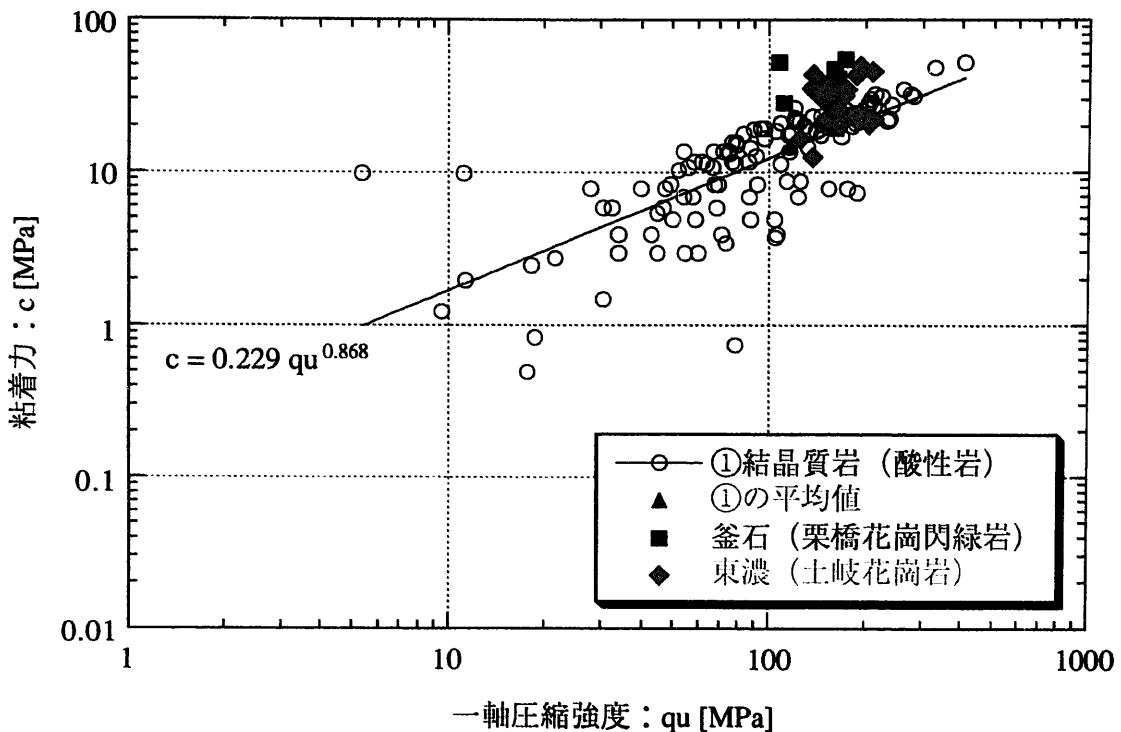


図 4-4-1 岩石の一軸圧縮強度と粘着力（せん断強度）の関係
(硬岩 ; ①結晶質岩 (酸性岩))

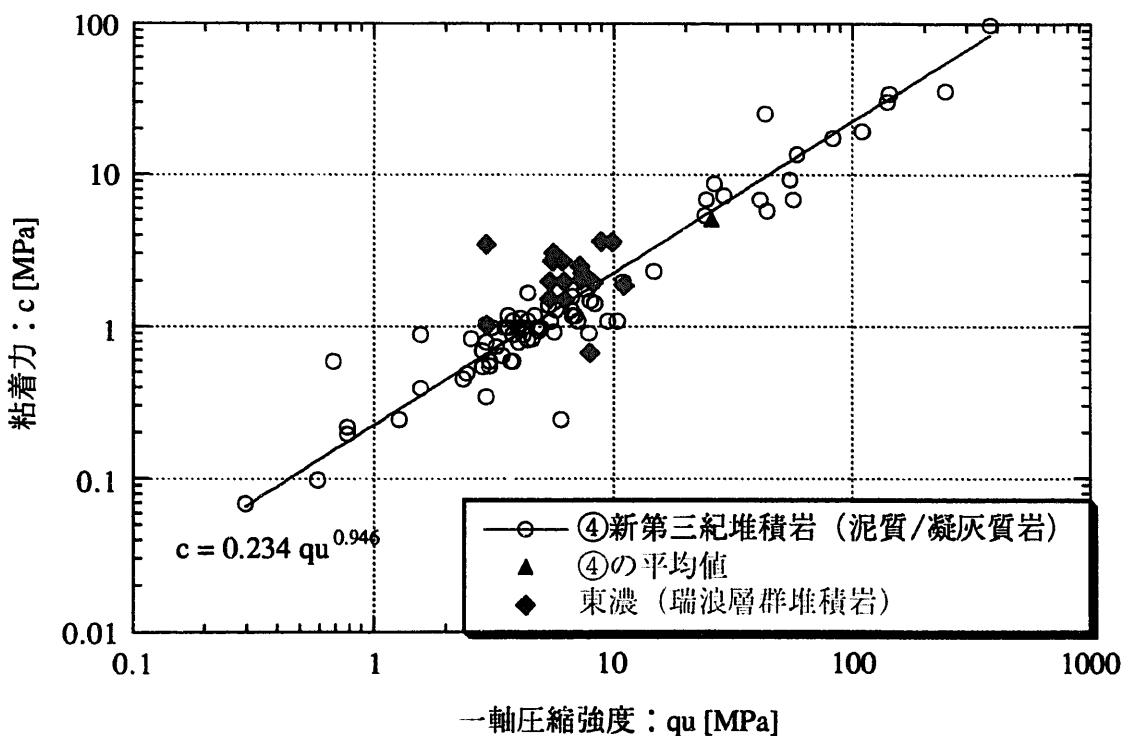


図 4-4-2 岩石の一軸圧縮強度と粘着力（せん断強度）の関係
(軟岩 ; ④新第三紀堆積岩 (泥質/凝灰質岩))

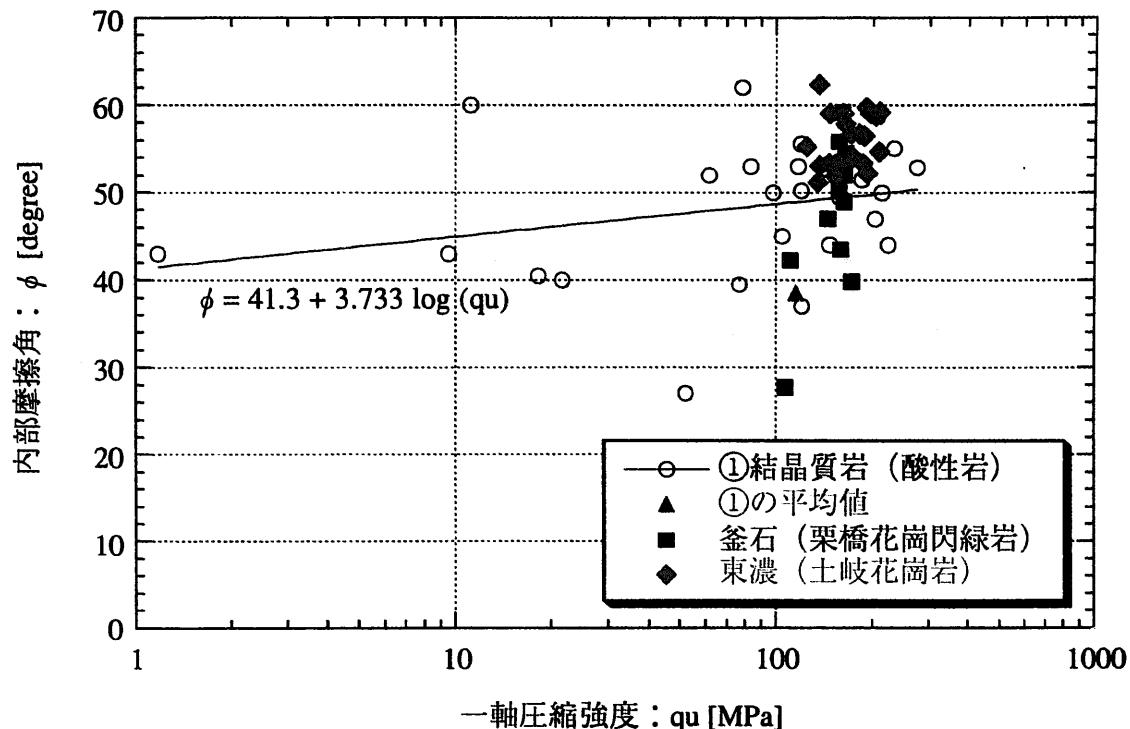


図 4-5-1 岩石の一軸圧縮強度と内部摩擦角の関係
(硬岩；①結晶質岩（酸性岩）)

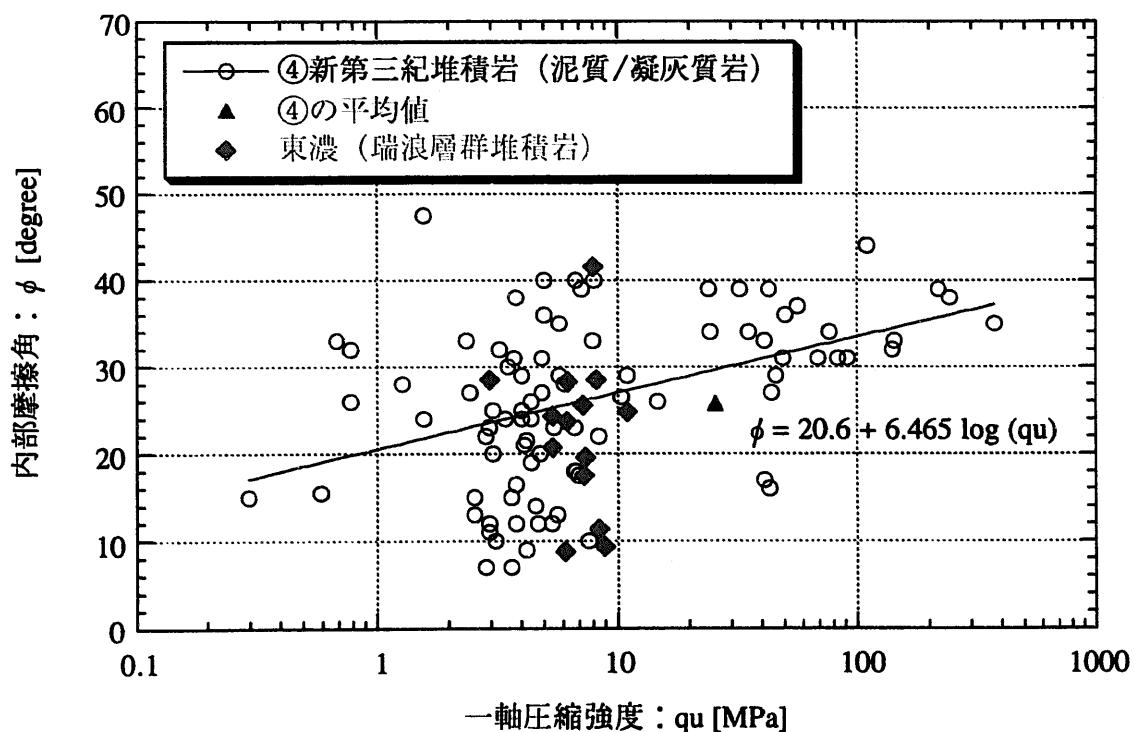


図 4-5-2 岩石の一軸圧縮強度と内部摩擦角の関係
(軟岩；④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）)

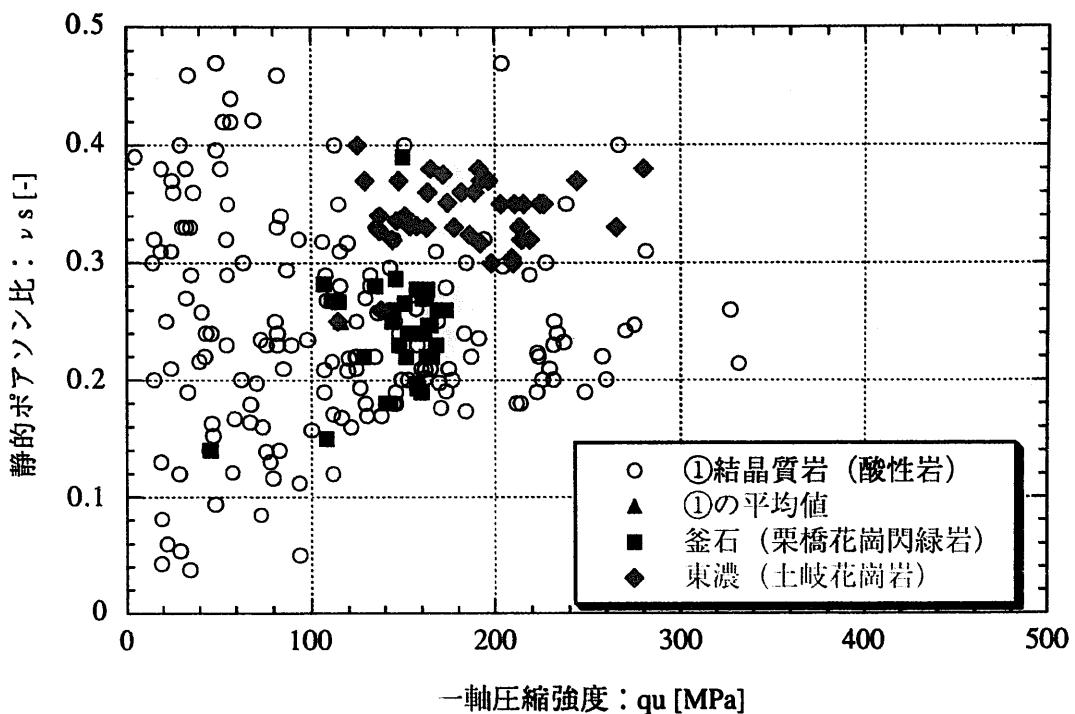


図 4-6-1 岩石の一軸圧縮強度とポアソン比の関係
(硬岩 ; ①結晶質岩 (酸性岩))

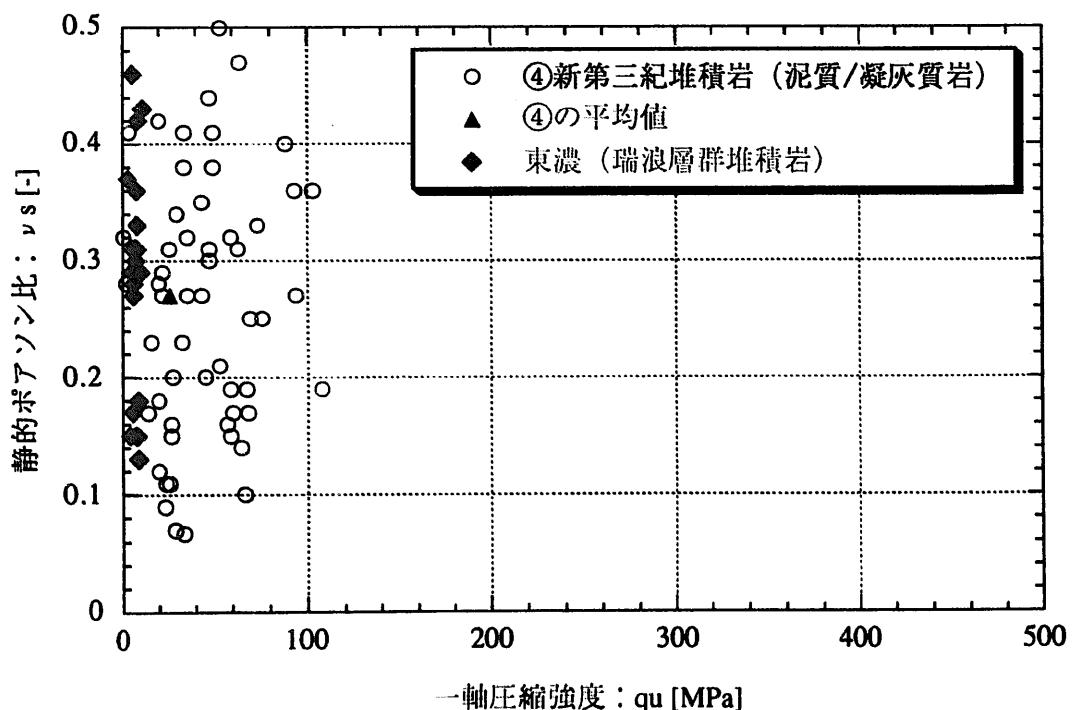


図 4-6-2 岩石の一軸圧縮強度とポアソン比の関係
(軟岩 ; ④新第三紀堆積岩 (泥質/凝灰質岩))

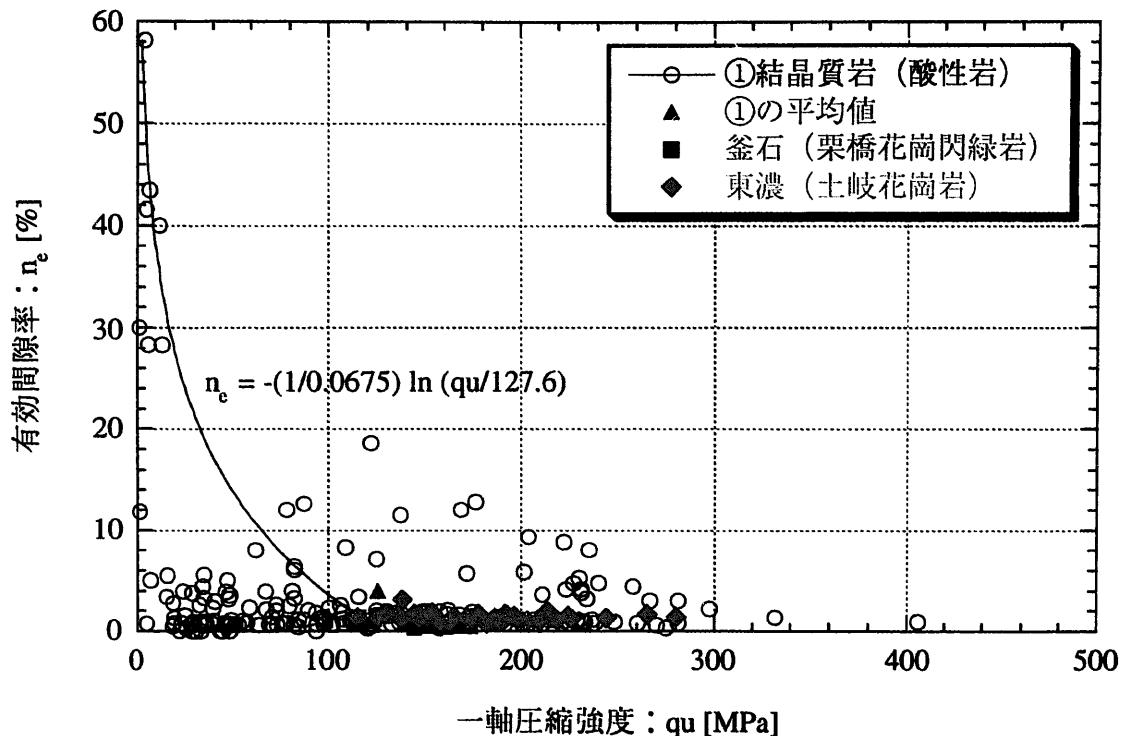


図 4-7-1 岩石の一軸圧縮強度と有効間隙率の関係
 (硬岩 ; ①結晶質岩 (酸性岩))

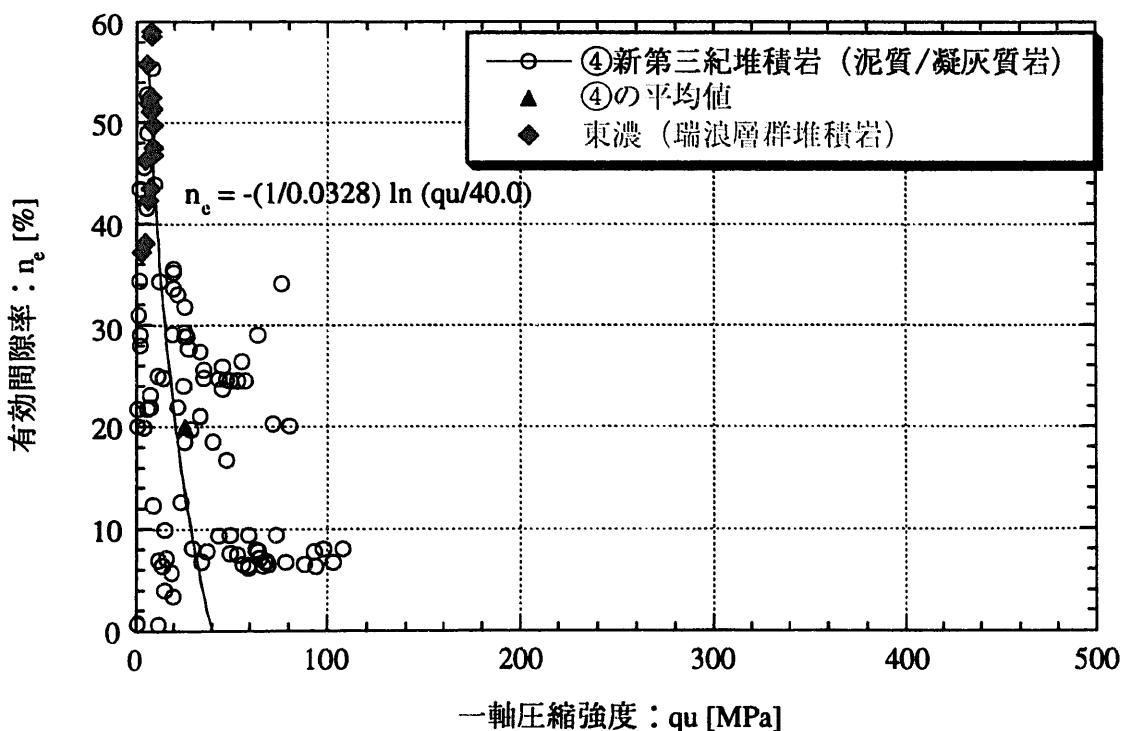


図 4-7-2 岩石の一軸圧縮強度と有効間隙率の関係
 (軟岩 ; ④新第三紀堆積岩 (泥質/凝灰質岩))

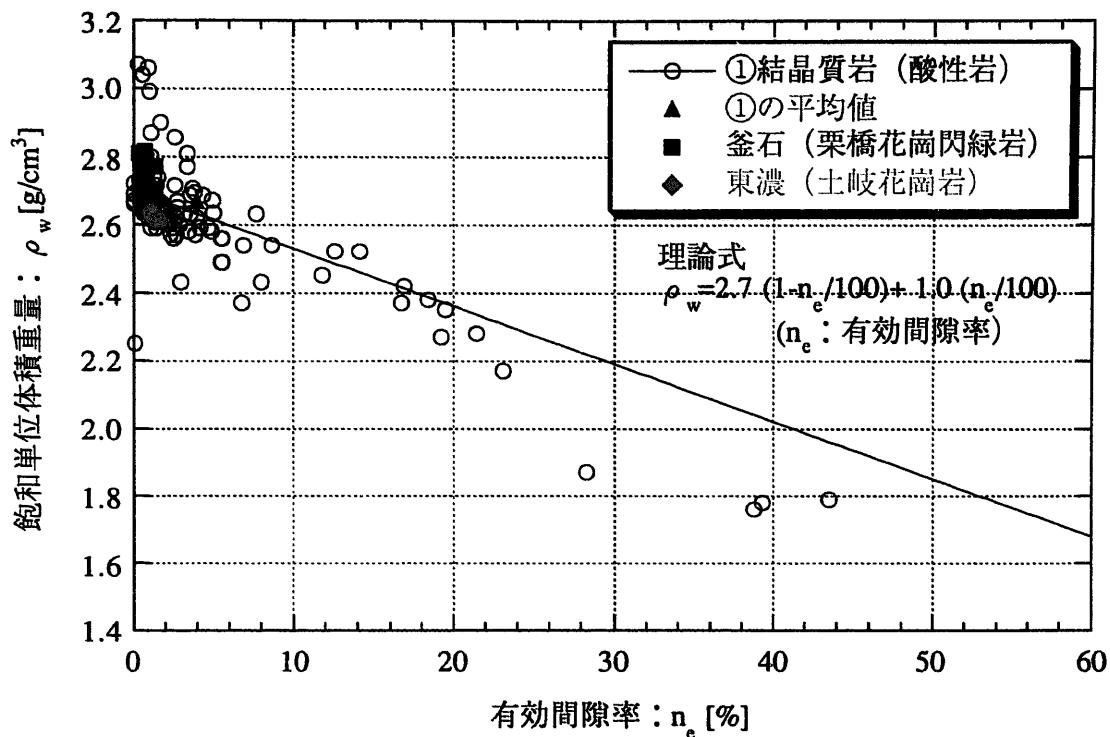


図 4-8-1 岩石の有効間隙率と飽和単位体積重量の関係
(硬岩；①結晶質岩（酸性岩）)

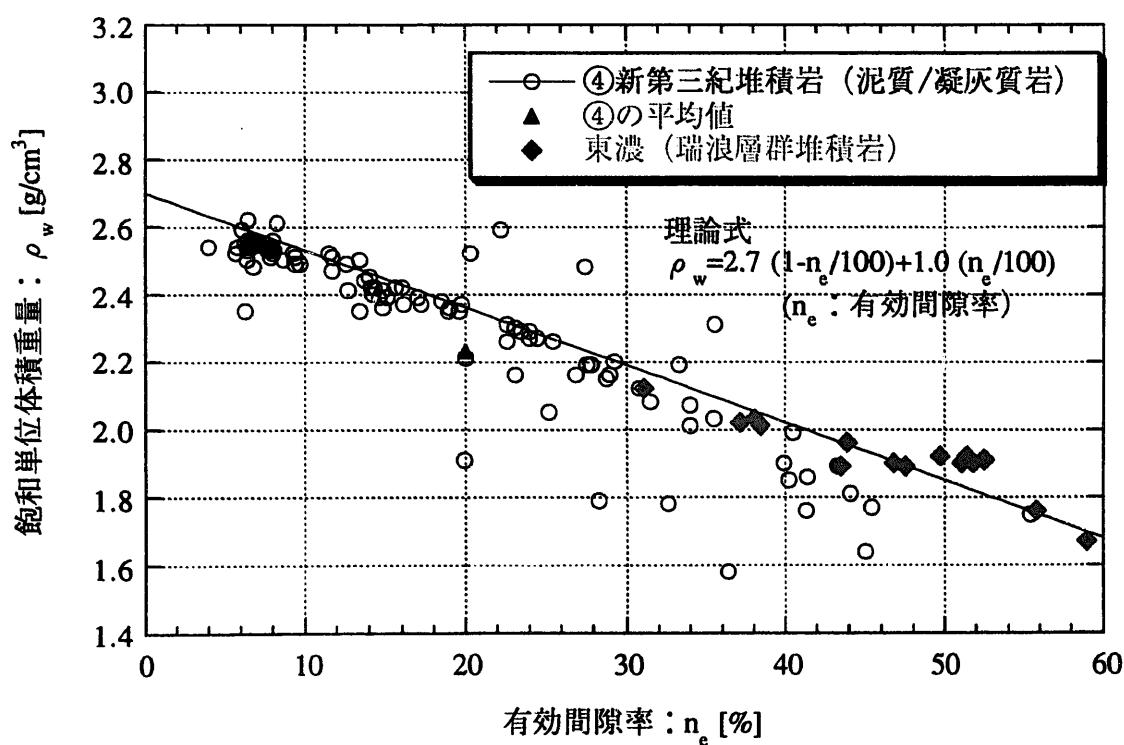


図 4-8-2 岩石の有効間隙率と飽和単位体積重量の関係
(軟岩；④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）)

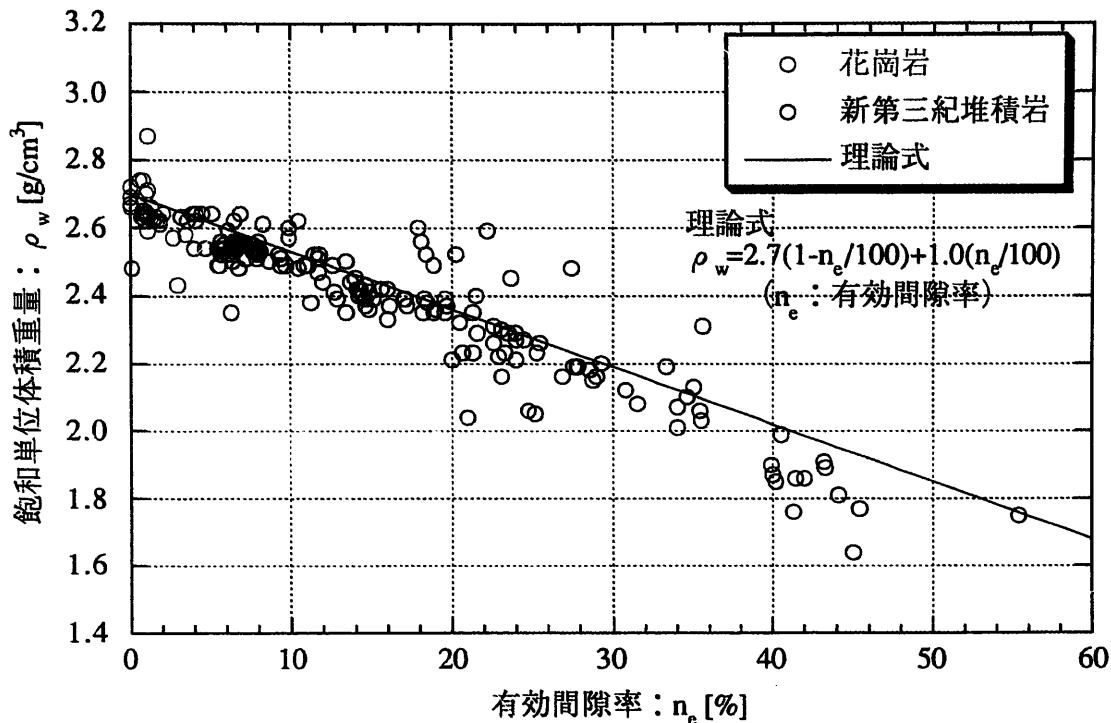


図 4-8-3 岩石の有効間隙率と飽和単位体積重量の関係
(第1次取りまとめ時におけるデータベース(佐藤ほか, 1992)に基づいた検討)

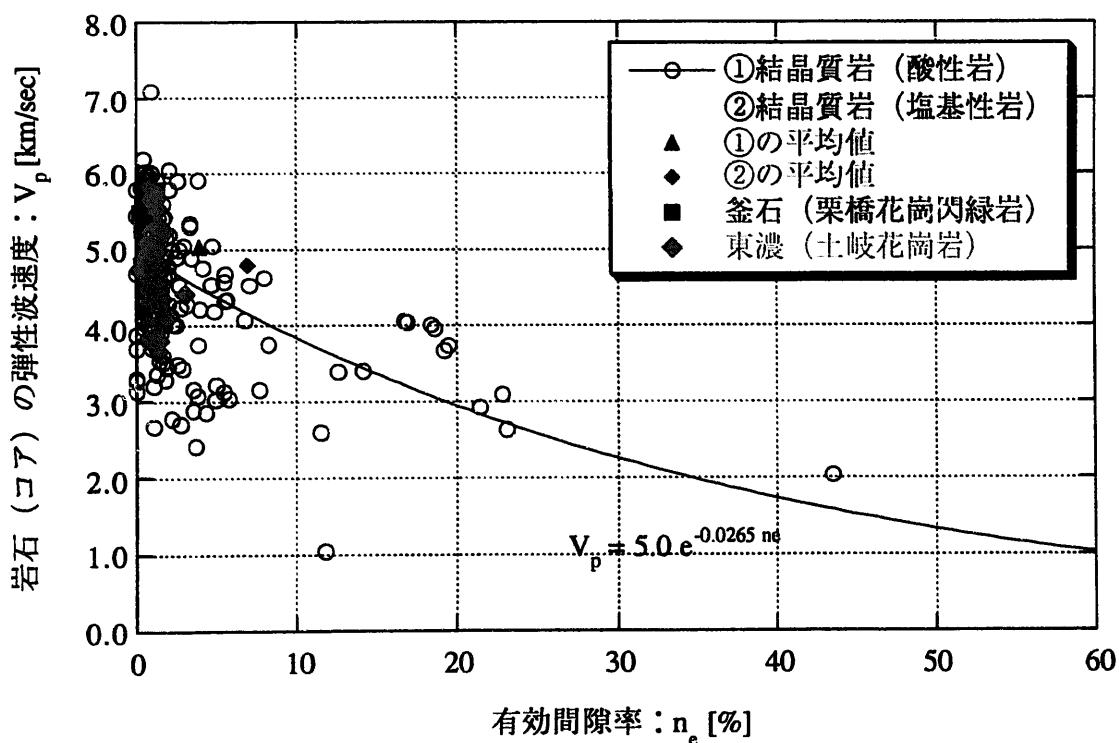


図 4-9-1 岩石の有効間隙率と弾性波速度の関係
(硬岩; ①結晶質岩(酸性岩), ②結晶質岩(塩基性岩))

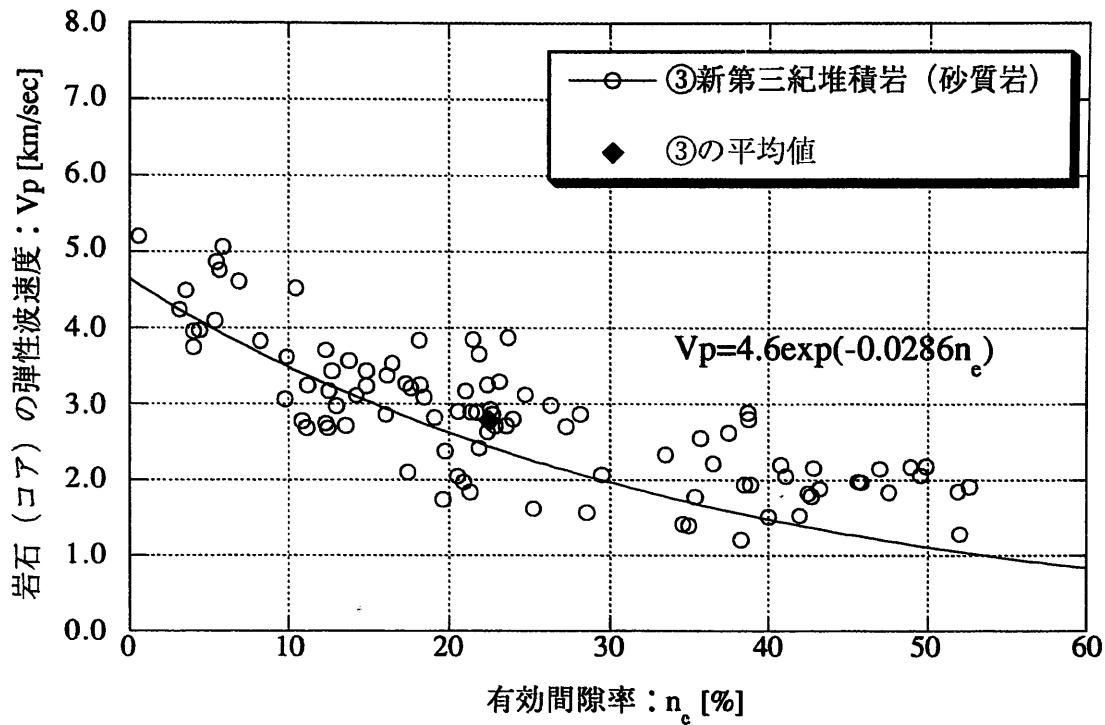


図 4-9-2 岩石の有効間隙率と弾性波速度の関係
(軟岩; ③新第三紀堆積岩 (砂質岩))

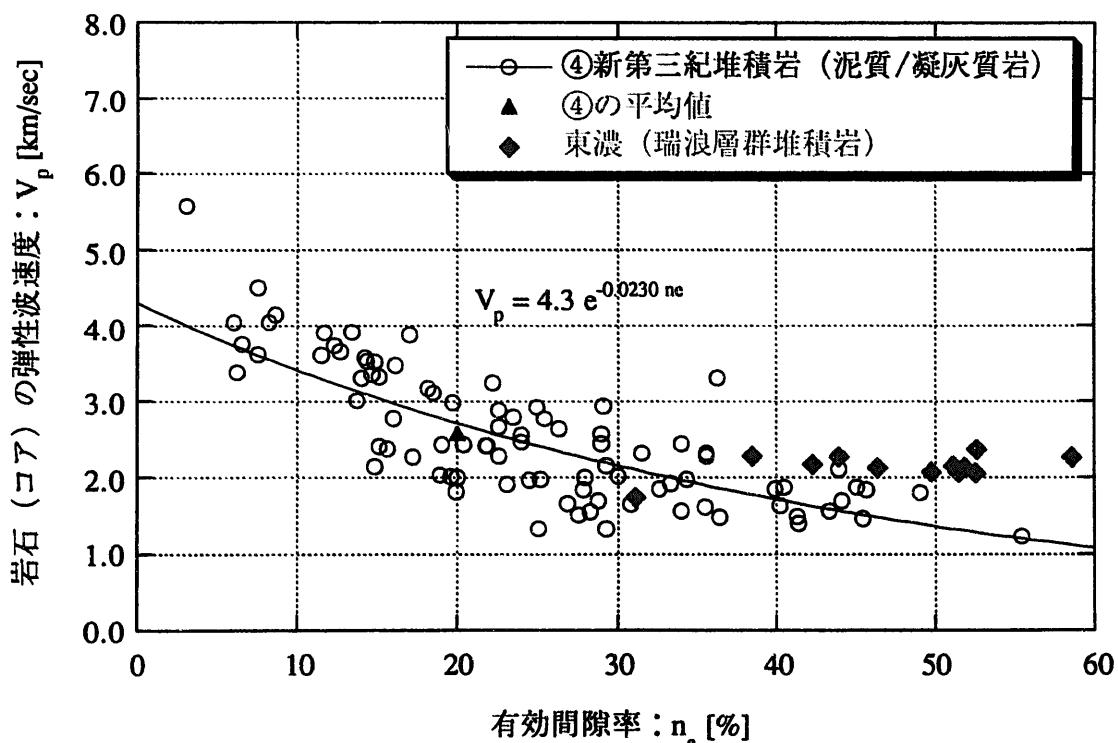


図 4-9-3 岩石の有効間隙率と弾性波速度の関係
(軟岩; ④新第三紀堆積岩 (泥質/凝灰質岩))

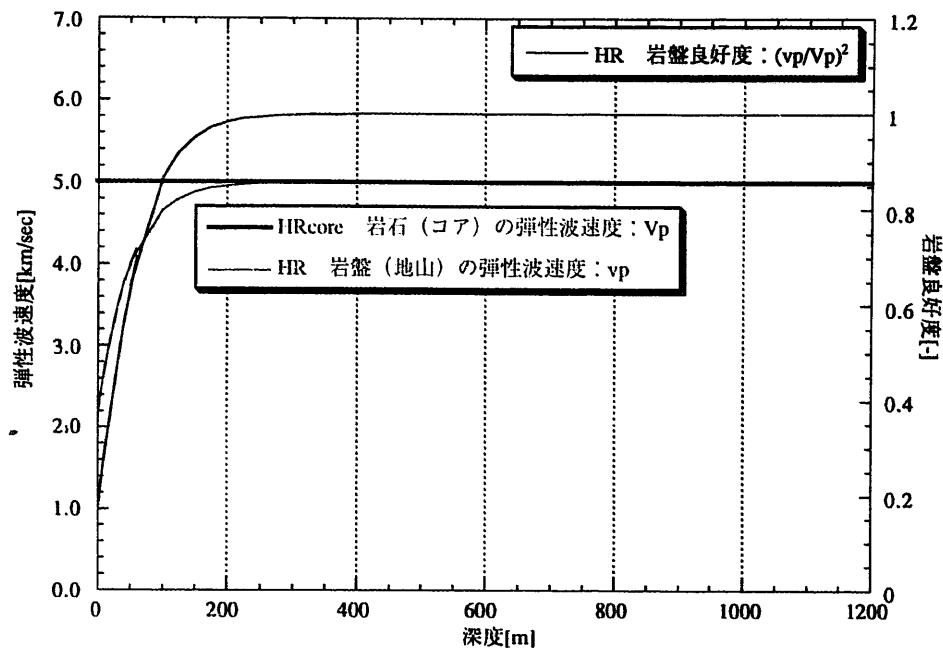


図 4-10-1 深度と岩石・岩盤の弾性波速度および岩盤良好度の関係
(硬岩; ①結晶質岩(酸性岩), ②結晶質岩(塩基性岩))

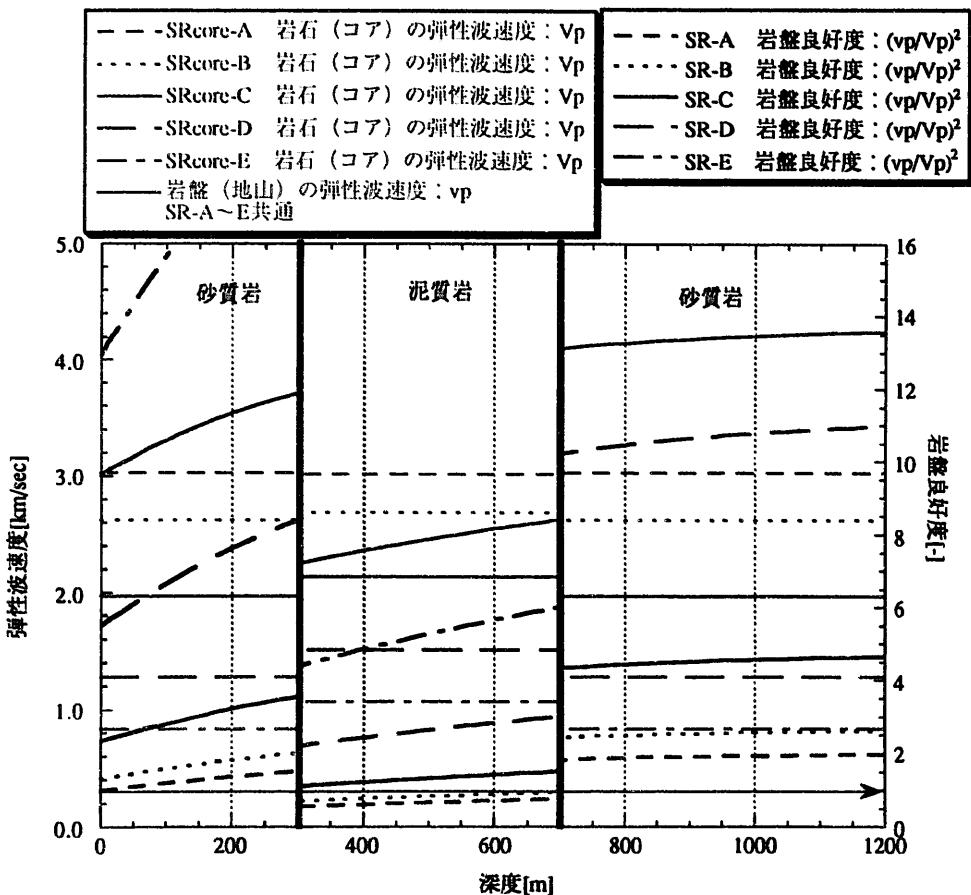


図 4-10-2 深度と岩石・岩盤の弾性波速度および岩盤良好度の関係
(軟岩; ③新第三紀堆積岩(砂質岩), ④新第三紀堆積岩(泥質/凝灰質岩))

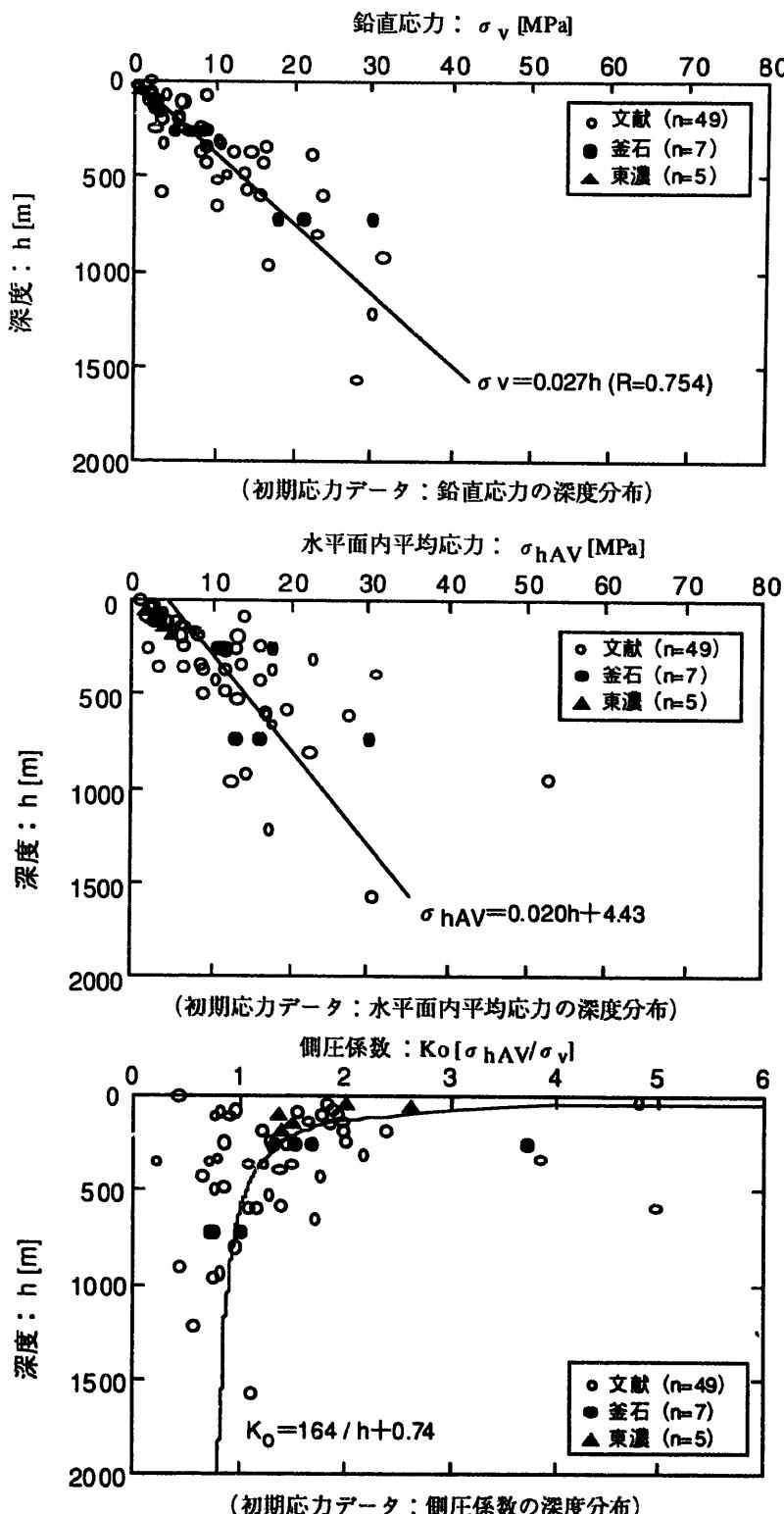


図 4-11 初期応力データ (佐藤ほか, 1999)

齊藤ほか (1988) とそれ以降の文献を収集するとともに東濃地域や釜石鉱山で測定を実施し初期応力のデータを取得した。文献調査では、鉛直応力で 108 件、水平面内応力で 178 件、側圧係数で 71 件のデータが収集された。このうち鉛直応力と水平面内応力の両方が揃っているデータは 49 件であった。これらのデータによると、鉛直応力は岩石の単位体積重量を勾配とした直線で近似され、側圧係数は深度の増加とともに 1 より小さい値に漸近する (佐藤ほか, 1999)。

4-2 動的力学物性

(1) 岩盤（地山）の弾性波速度（ v_p , v_s ）

前述の（3-5）式に基づき、データベース中で深度と岩盤（地山）弾性波速度の組み合わせで示されているものを抽出し定式化した。なお、軟岩系岩盤に関しては、2-4「検討の前提条件としての地質構造」で前述したように、地質構造としてを泥質岩と砂質岩の互層に設定している。したがって、④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）、③新第三紀堆積岩（砂質岩）それぞれに対して定式化を行った。硬岩における深度と岩盤（地山）弾性波速度（ v_p , v_s ）の関係を図4-12に、軟岩中砂質岩における深度と岩盤（地山）弾性波速度（ v_p , v_s ）の関係を図4-13に、泥質岩における深度と岩盤（地山）弾性波速度（ v_p , v_s ）の関係を図4-14に示す。ただし、硬岩に関しては、深度と岩盤（地山）弾性波速度（ v_p , v_s ）の関係で示されているデータが少なかったため①結晶質岩（酸性岩）と同様な力学特性を示すと考えられる②結晶質岩（塩基性岩）も含めて示している。また、本定式化における単位体積重量に関して、硬岩では静的力学物性で設定された飽和単位体積重量を用いた。軟岩では静的力学物性において5種（SR-A～E）設定したが、深度と岩盤（地山）弾性波速度の関係で示されているデータが少ないと等により、動的力学物性については1種のみの設定にとどめ、5種の中間の値であるSR-Cでの飽和単位体積重量を用いた。したがって、ここで設定する軟岩系岩盤の動的力学物性は前述静的力学物性のSR-Cと対応するものとなる。

図より、硬岩に関しては、地表面近傍で急激に弾性波速度が増加し、深度250m程度で収束した値となっている。ある深度（拘束圧）になると弾性波速度が収束する、すなわち間隙、亀裂等が十分に閉塞する傾向は、Press（1966）の岩石（コア）による拘束圧依存性室内実験、また、福島第一原子力発電所サイトでの原位置調査（東京電力、1993）等でも示されている。一方、軟岩では、硬岩に比較して、弾性波速度が収束する深度が大きく、また、緩やかに弾性波速度が増加することが分かる。

2-4「検討の前提条件としての地質構造」で示したように、本検討での硬岩系岩盤は、地表部に数mの厚さの表土が存在する单一の岩種（花崗岩）で構成されていることを仮定した。したがって、ここでは、上記図4-12で示された①結晶質岩（酸性岩）および②結晶質岩（塩基性岩）の岩盤（地山）の弾性波速度深度依存性を、そのまま硬岩系岩盤の弾性波速度として設定した。

一方、軟岩系岩盤は、複数の地層が単斜構造をしており、单一岩種の軟岩としての泥岩が処分深度付近（300～700m）に分布し、その上下に砂質岩が存在

する構成を仮定した。したがって、ここでは、上記軟岩系岩盤の深度方向の地層分布に合わせて、上記図 4-13, 4-14 で示された③新第三紀堆積岩（砂質岩）、④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）の岩盤（地山）弹性波速度深度依存性を組み合わせて、軟岩系岩盤の弹性波速度として設定した。軟岩系岩盤の弹性波速度の深度依存性を図 4-15 に示す。

(2) 動的せん断弾性係数、動的ポアソン比および減衰定数

1) 動的せん断弾性係数、動的ポアソン比

(1) で示した深度と岩盤の弹性波速度 (v_p , v_s) の関係、および(3-2), (3-3) 式を用い、硬岩系岩盤 (HR), 軟岩系岩盤 (SR-C) それぞれの動せん断弾性係数と動ポアソン比を設定した。

2) 減衰定数

波動が岩盤内部を伝搬する過程において生じる減衰の主な要因としては以下のものが挙げられる。

- ・岩盤内部の非弾性的性質（例えば粒子間の摩擦、間隙を満たす粘性流体の運動等）によるもの。材料減衰と呼ばれる。
- ・岩盤の不均質や不連続による境界面（例えば微小クラック等）における反射などの波動の散乱によるもの。散乱減衰と呼ばれる。
- ・幾何学的な波面の拡散によるもの。幾何減衰と呼ばれる。

岩盤自体が有している減衰は内部減衰と呼ばれ、上述のうち材料減衰と散乱減衰とを組み合わせたものである。

岩石・岩盤の内部減衰を実測した例として、砂岩を対象とした動的三軸圧縮試験による減衰定数と S 波検層による減衰定数を求めた（嶋ほか、1983）例がある。これより、動的三軸圧縮試験による減衰定数はひずみ依存性を有しており、ひずみが $10^{-5} \sim 10^{-4}$ では減衰定数は 1~2% であり、ひずみが 10^{-3} では 3% 程度となっている。一方、S 波速度による減衰定数は微小ひずみレベル (10^{-5} 以下) における値であるが、概ね 2~4% となっていて、動的三軸圧縮試験による微小ひずみレベルでの減衰定数より若干大きい。これは、動的三軸圧縮試験による減衰定数は岩石（コア）の減衰定数であり、そこに含まれてるのは材料減衰のみであるが、S 波速度による減衰定数は岩盤の減衰定数であり、材料減衰に散乱減衰が加わったものとなっているためと考えられる。

花崗岩を対象とした岩石（コア）の動的三軸圧縮試験（吉川ほか, 1984）や泥岩を対象とした岩石（コア）の動的三軸圧縮試験（電力中央研究所, 1985）の例では、ひずみレベル $10^{-5} \sim 10^{-4}$ の範囲において、花崗岩の材料減衰はおよそ1%，泥岩の材料減衰はおよそ2%であり、微小クラック等による散乱減衰を考えると、岩盤の内部減衰としては2~3%程度と考えるのが妥当である。

また、釜石鉱山での原位置試験における解析では、岩盤の減衰定数を1%程度で考慮している（資源・素材学会, 1998）。

このような事例から、ここでの減衰定数は、硬岩系岩盤、軟岩系岩盤とともに2%に設定した。

3) 動的物性のひずみ依存性

一般に地盤を構成する土や岩盤はそれが受けるひずみの大きさにより、その動的特性は異なる（石原, 1976）。ここでは、一例を挙げ、岩盤のひずみがその動的特性に及ぼす影響を考察する。

原子力発電所の基礎岩盤（ $vs=0.5\text{km/sec}$ の泥岩を主としている）を対象として行われた動的解析の例示（結果）（日本電気協会, 1987）によると、地震時のひずみは、最大でも 3×10^{-4} 程度となっている。電力中央研究所（1985）によって取得された泥岩および凝灰岩の動的せん断弾性係数のひずみ依存性に上記ひずみレベルを当てはめると、せん断弾性係数の低下は5%以下であり、 $vs=0.5\text{km/sec}$ 以上の岩盤では、さらにひずみ依存の影響は小さくなると考えられる。

減衰定数に関しても、上記電力中央研究所（1985）による泥岩の動的三軸圧縮試験では、ひずみレベル $10^{-5} \sim 10^{-4}$ の範囲において減衰定数の変動幅は小さい。

このような事例より、本検討では、動的物性のひずみ依存性は考慮しないこととした。

設定した硬岩系岩盤（HR）における動的力学物性を表4-2-1および図4-16-1に、軟岩系岩盤（SR-C）における動的力学物性を表4-2-2および図4-16-2に示す。

(3) 設定された静的力学物性と動的力学物性の相関関係

表4-3に硬岩系岩盤：深度1000m、軟岩系岩盤：深度500m、それぞれにおける静的力学物性と動的力学物性（弾性係数、ポアソン比）の比較を示す。ただし、せん断弾性係数と弾性係数の関係は以下の（4-1）式に従った。

本検討で設定した動-静的弾性係数の比（ Ed/Es ）は、硬岩系岩盤データセッ

ト (HR) で 1.3, 軟岩系岩盤データセット (SR-C) で 2.2 となった。

静的弾性係数と動的弾性係数を比較した既往の研究例 (Fujiyama and Hibino, 1981; 小野寺ほか, 1962; 石川ほか, 1985) をまとめて表 4-4 に示す。ただし、これらに示す動的弾性係数は岩盤の弾性波速度測定により得られたものであり、静的弾性係数は平板載荷試験により測定したものとし、孔内載荷試験により得られた静的弾性係数は Takeuchi and Suzuki (1981) によって示された孔内載荷試験と平板載荷試験による静的変形係数の関係を用い補正したものとした。

これによると、岩盤が軟質なほど、動 - 静的弾性係数の比 (E_d/E_s) は大きくなり、本検討で設定した地質条件および静的弾性係数の範囲では、硬岩系岩盤での動 - 静的弾性係数の比 (E_d/E_s) は 2~4、軟岩系岩盤での比は 3~9 程度となる。したがって、本検討で設定した動的弾性係数は、若干小さめの値となるが、静的弾性係数との関係は概ね整合していると考えられる。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4-1)$$

G : せん断弾性係数

E : 弾性係数

ν : ポアソン比

表 4-2-1 硬岩系岩盤 (HR) における動的力学物性

深度 (m)	層No.	モデル化層圧 (m)	岩種	飽和 単位体積重量 ρ_w (g/cm³)	弾性波速度 vp(km/sec)	弾性波速度 vs(km/sec)	動的 せん断弾性係数 Gd(MPa)	動的 弾性係数 Ed(MPa)	動的 ボアン比 ν_d	減衰定数 h (%)
2.67	1	2	結晶質岩	2.219	0.298	240	717	0.491		
	2	2		2.333	0.392	416	1237	0.485		
	3	2		2.443	0.483	630	1864	0.480		
	4	2		2.548	0.569	876	2583	0.474		
	5	2		2.649	0.652	1151	3377	0.468		
	6	2		2.746	0.732	1449	4236	0.462		
	7	2		2.838	0.808	1767	5145	0.456		
	8	2		2.927	0.882	2102	6096	0.450		
	9	2		3.012	0.952	2450	7080	0.445		
	10	2		3.094	1.019	2810	8087	0.439		
	11	10		3.455	1.317	4692	13278	0.415		
	12	10		3.747	1.559	6572	18341	0.395		
	13	20		4.177	1.914	9910	27095	0.367		
	14	20		4.459	2.148	12482	33671	0.349		
	15	20		4.644	2.303	14337	38339	0.337		
	16	25		4.790	2.424	15883	42182	0.328		
	17	25		4.875	2.495	16837	44536	0.323		
	18	25		4.926	2.538	17417	45958	0.319		
	19	25		4.956	2.563	17765	46810	0.317		
	20	25		4.974	2.578	17973	47319	0.316		
	21	25		4.985	2.587	18098	47621	0.316		
	22	25		4.991	2.592	18172	47801	0.315		
	23	25		4.995	2.595	18215	47908	0.315		
	24	25		4.997	2.597	18242	47972	0.315		
	25	25		4.998	2.598	18257	48009	0.315		
	26	25		4.999	2.599	18266	48032	0.315		
	27	25		4.999	2.599	18272	48045	0.315		
	28	25		5.000	2.600	18275	48053	0.315		
	29	25		5.000	2.600	18277	48057	0.315		
	30	25		5.000	2.600	18278	48060	0.315		
	31	25		5.000	2.600	18279	48062	0.315		
	32	25		5.000	2.600	18279	48063	0.315		
	33	25		5.000	2.600	18279	48063	0.315		
	34	25		5.000	2.600	18279	48064	0.315		
	35	25		5.000	2.600	18279	48064	0.315		
	36	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	37	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	38	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	39	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	40	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	41	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	42	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	43	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	44	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	45	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	46	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	47	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	48	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	49	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	50	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	51	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	52	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	53	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	54	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	55	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	56	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	57	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	58	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		
	59	25		5.000	2.600	18280	48064	0.315		2.0

表 4-2-2 軟岩系岩盤 (SR-C) における動的力学物性

深度 (m)	層No.	モデル化層厚 (m)	岩種	飽和 単位体積重量 ρ_w (g/cm³)	弾性波速度 vp(km/sec)	弾性波速度 vs(km/sec)	動的 せん断弾性係数 Gd(MPa)	動的 弾性係数 Ed(MPa)	動的 ボアン比 ν_d	減衰定数 h (%)
50	1	15	砂質岩	2.2	3.050	1.445	4690	12712	0.355	2.0
	2	15			3.099	1.489	4977	13437	0.350	
	3	15			3.146	1.531	5260	14147	0.345	
	4	15			3.190	1.571	5538	14843	0.340	
	5	15			3.234	1.609	5812	15524	0.335	
	6	15			3.275	1.646	6081	16188	0.331	
	7	15			3.315	1.681	6344	16836	0.327	
	8	15			3.353	1.715	6602	17467	0.323	
	9	20			3.402	1.758	6937	18283	0.318	
	10	20			3.448	1.798	7260	19068	0.313	
	11	20			3.492	1.837	7573	19823	0.309	
	12	20			3.533	1.873	7875	20548	0.305	
	13	20			3.573	1.907	8166	21244	0.301	
	14	20			3.610	1.940	8446	21910	0.297	
	15	20			3.646	1.970	8715	22548	0.294	
	16	20			3.679	1.999	8973	23159	0.291	
	17	20			3.711	2.027	9220	23743	0.288	
300	18	10	泥質岩	2.2	2.252	0.963	2082	5780	0.388	2.0
	19	10			2.264	0.972	2122	5885	0.387	
	20	10			2.276	0.981	2161	5991	0.386	
	21	10			2.288	0.990	2201	6095	0.385	
	22	10			2.299	0.999	2240	6199	0.384	
	23	10			2.310	1.008	2279	6303	0.383	
	24	10			2.321	1.016	2318	6405	0.381	
	25	10			2.332	1.025	2357	6507	0.380	
	26	10			2.343	1.033	2395	6608	0.379	
	27	10			2.354	1.041	2433	6708	0.378	
	28	10			2.365	1.049	2471	6808	0.377	
	29	10			2.375	1.057	2509	6907	0.376	
	30	10			2.385	1.065	2546	7005	0.376	
	31	10			2.395	1.073	2583	7102	0.375	
	32	10			2.406	1.080	2620	7198	0.374	
400	33	10	泥質岩	2.2	2.415	1.088	2657	7294	0.373	2.0
	34	12			2.427	1.097	2700	7408	0.372	
	35	12			2.439	1.105	2743	7520	0.371	
	36	12			2.450	1.114	2786	7632	0.370	
	37	12			2.462	1.122	2828	7742	0.369	
	38	12			2.473	1.131	2870	7851	0.368	
	39	12			2.483	1.139	2911	7958	0.367	
	40	12			2.494	1.147	2952	8065	0.366	
	41	12			2.505	1.155	2993	8171	0.365	
	42	12			2.515	1.162	3033	8275	0.364	
	43	12			2.526	1.170	3072	8378	0.363	
	44	12			2.536	1.177	3112	8480	0.363	
	45	12			2.546	1.185	3150	8580	0.362	
	46	12			2.555	1.192	3189	8680	0.361	
	47	12			2.565	1.199	3227	8778	0.360	
580	48	12	泥質岩	2.2	2.575	1.206	3264	8875	0.360	2.0
	49	12			2.584	1.213	3301	8971	0.359	
	50	12			2.593	1.219	3338	9066	0.358	
	51	12			2.602	1.226	3374	9159	0.357	
	52	12			2.611	1.232	3410	9252	0.357	
	53	12			2.620	1.239	3445	9343	0.356	
	54	25	砂質岩	2.2	4.108	2.357	12467	31288	0.255	2.0
	55	25			4.121	2.366	12571	31326	0.254	
	56	25			4.132	2.375	12667	31748	0.253	
	57	25			4.143	2.384	12757	31957	0.252	
	58	25			4.153	2.392	12842	32152	0.252	
	59	25			4.162	2.399	12921	32334	0.251	
	60	25			4.171	2.406	12995	32504	0.251	
	61	25			4.179	2.412	13064	32664	0.250	
	62	25			4.187	2.418	13128	32813	0.250	
	63	25			4.194	2.424	13189	32952	0.249	
	64	25			4.201	2.429	13245	33083	0.249	
	65	25			4.207	2.434	13297	33204	0.249	
	66	25			4.213	2.438	13347	33318	0.248	
	67	25			4.219	2.442	13392	33425	0.248	
	68	25			4.224	2.446	13435	33524	0.248	
	69	25			4.229	2.450	13475	33617	0.247	
	70	25			4.233	2.453	13513	33704	0.247	
	71	25			4.238	2.457	13547	33785	0.247	
	72	25			4.242	2.460	13580	33861	0.247	
1200	73	25			4.245	2.462	13610	33931	0.247	

表 4-3 静的力学物性と動的力学物性の比較

岩種	弾性係数 : E [MPa]		ポアソン比 : ν [-]	
	静的 : Es	動的 : Ed	静的 : ν s	動的 : ν d
硬岩系岩盤 : HR (深度 1000m)	37,000	48,064	0.25	0.315
軟岩系岩盤 : SR-C (深度 500m)	3,500	7,742	0.30	0.369

表 4-4 既往の研究等による静的弾性係数と動的弾性係数の比較

静的弾性係数 : Es による分類	結晶質岩系岩盤			堆積岩系岩盤		
	岩種	静的弾性係数 : Es [Mpa]	Ed/Es	岩種	静的弾性係数 : Es [Mpa]	Ed/Es
グループ1 10000~20000[Mpa]	花崗岩*	11000	2.1~3.8	凝灰岩	10000~16000	3.3
	安山岩	10000	3.2		10000	4.5
				粘板岩	15000~25000	1.9
				凝灰岩	12100	2.1
グループ2 5000~10000[Mpa]	花崗岩*	7000	3.0~5.4	粘板岩	9000	4.9
	安山岩	4800~7100	4.2~6.3	凝灰岩	6200~8900	3.0~4.8
グループ3 1000~5000[Mpa]	細粒石英岩	2520	17.2	礫岩	3670~4390	7.9
	花崗岩	2900~5000	5.8	凝灰岩	3000~3500	12.8
	花崗岩	500~2500	17.2	1800~2400	1.5	
	花崗岩*	2200	6.4~16.0	泥岩と砂岩の互層	1300~1750	4.0
	花崗閃綠岩	1300~2300	6.1~13.1		1240~1990	4.4
	安山岩	1000~1500	5.3~16.7	砂岩	1200~2200	3.6~5.0
				砂岩と泥岩の互層	1400~5200	3.6~6.0
				凝灰岩	2800~3200	6.3~8.9
グループ4 1000[Mpa]以下	輝綠岩	910	61.5	凝灰岩	1900~4200	3.8~8.4
	細粒石英岩	300~1000	20.5~24.1	砂岩	500~1650	13.4
	花崗岩	200~900	39.3	泥岩と砂岩の互層	830~860	5.9
	花崗岩*	700	20~37	頁岩と砂岩の互層	420~580	13.3

*Tkeuchi and Suzuki (1981) によって示された関係を用い、孔内載荷試験より得られた静的弾性係数を平

板載荷試験により得られる静的弾性係数に換算

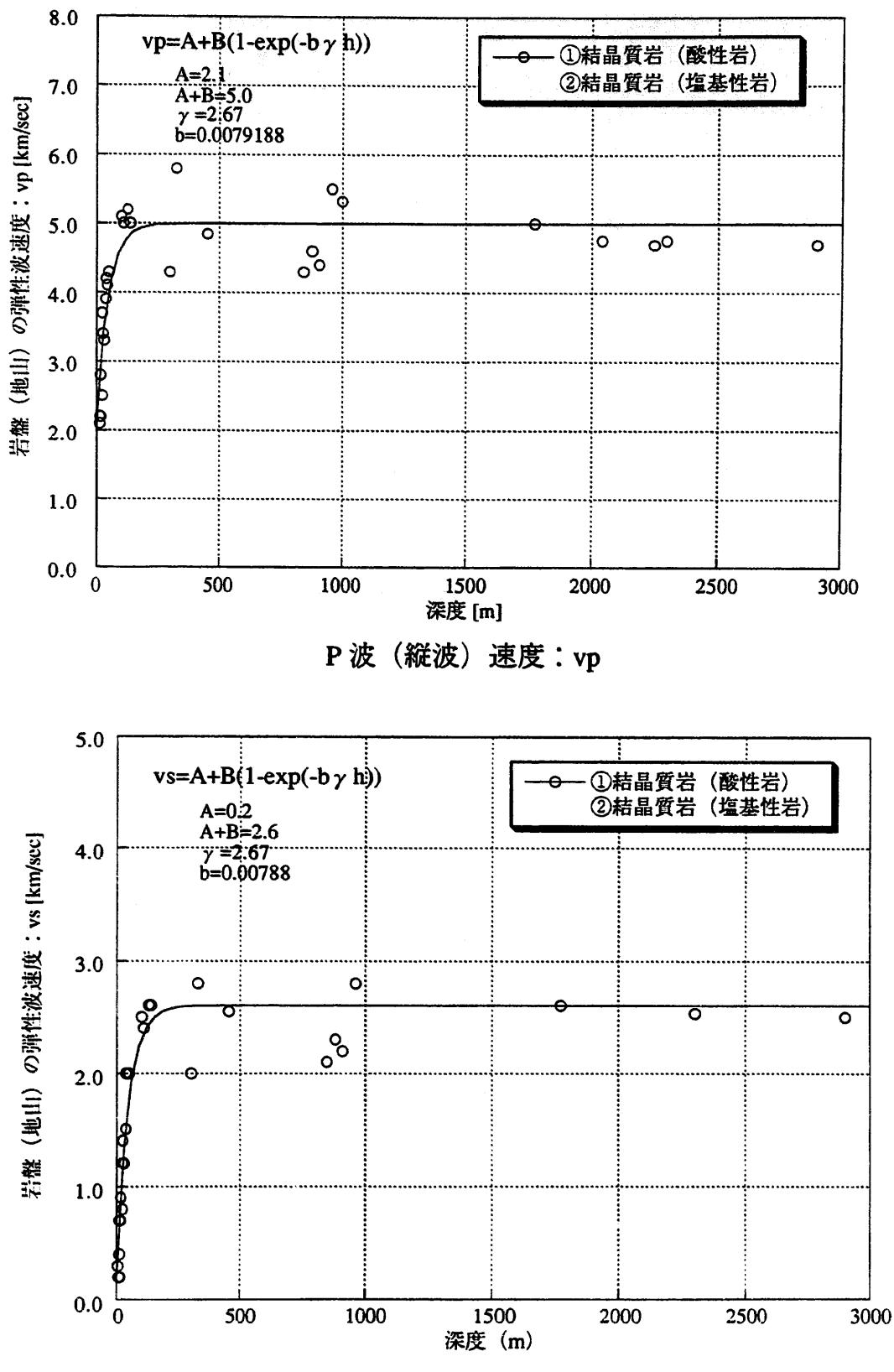


図 4-12 深度と岩盤 (地山) の弾性波速度の関係
(硬岩 ; ① 結晶質岩 (酸性岩), ② 結晶質岩 (塩基性岩))

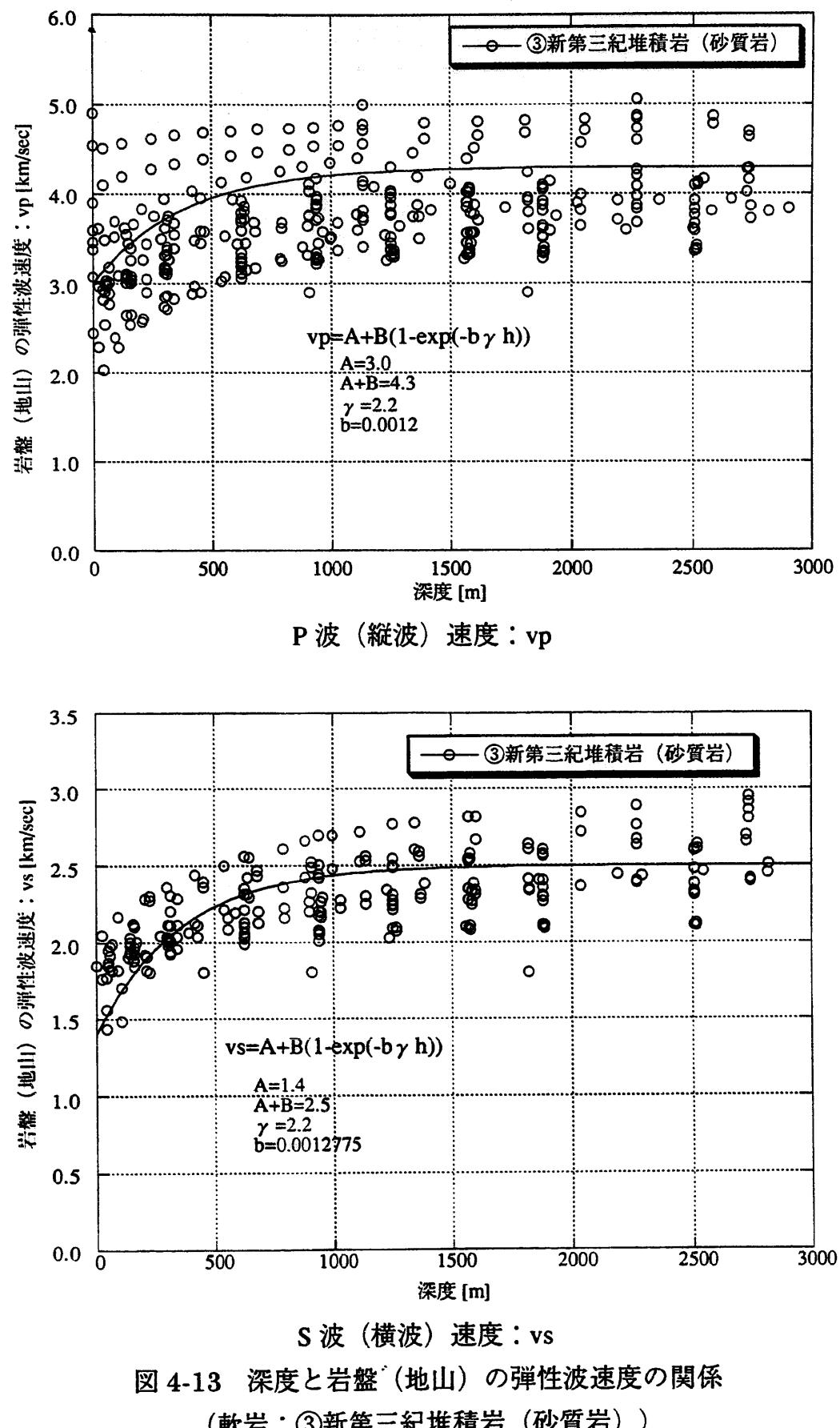


図 4-13 深度と岩盤（地山）の弾性波速度の関係
(軟岩; ③新第三紀堆積岩（砂質岩）)

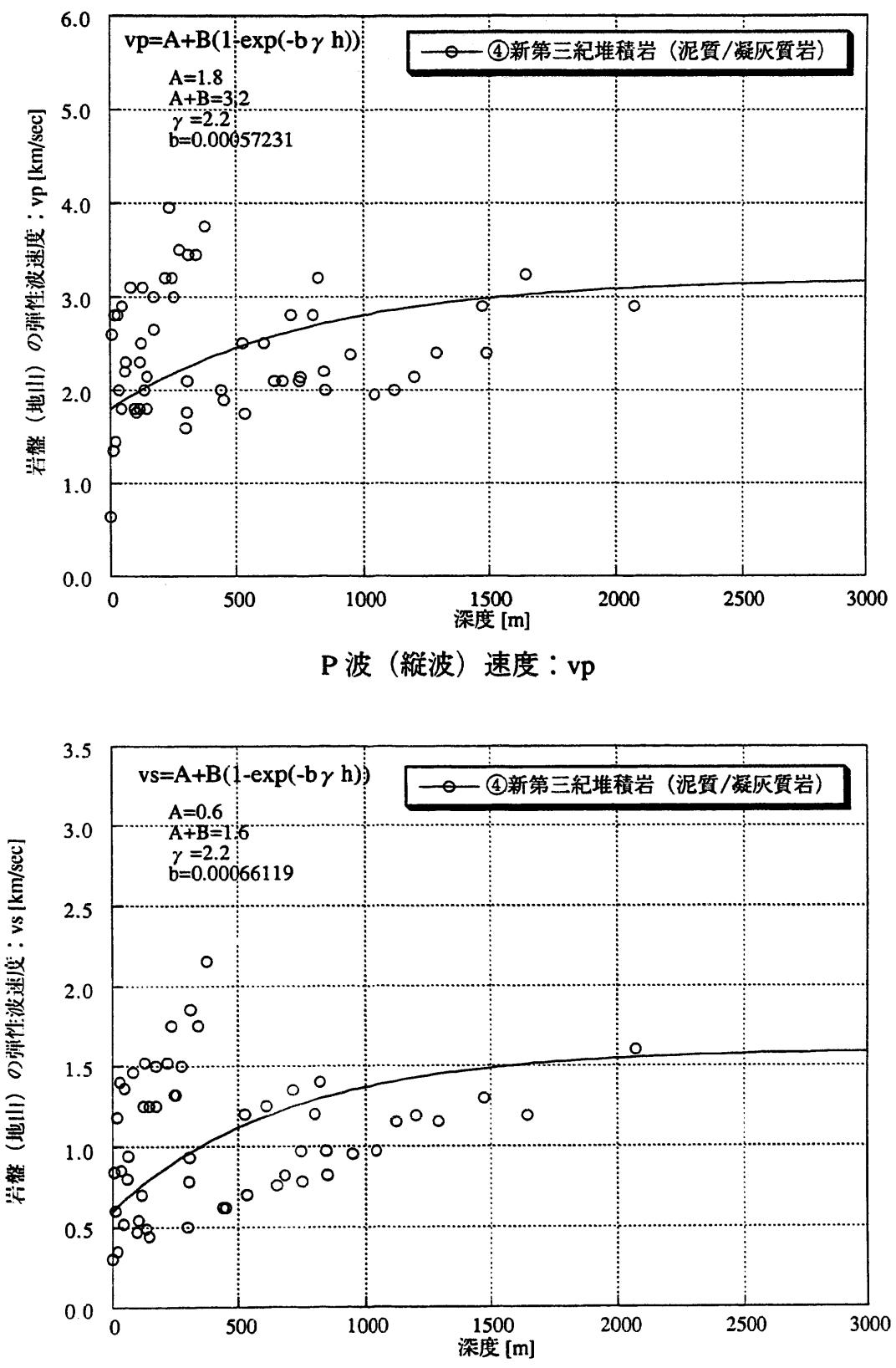


図 4-14 深度と岩盤（地山）の弾性波速度の関係

(軟岩；④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）)

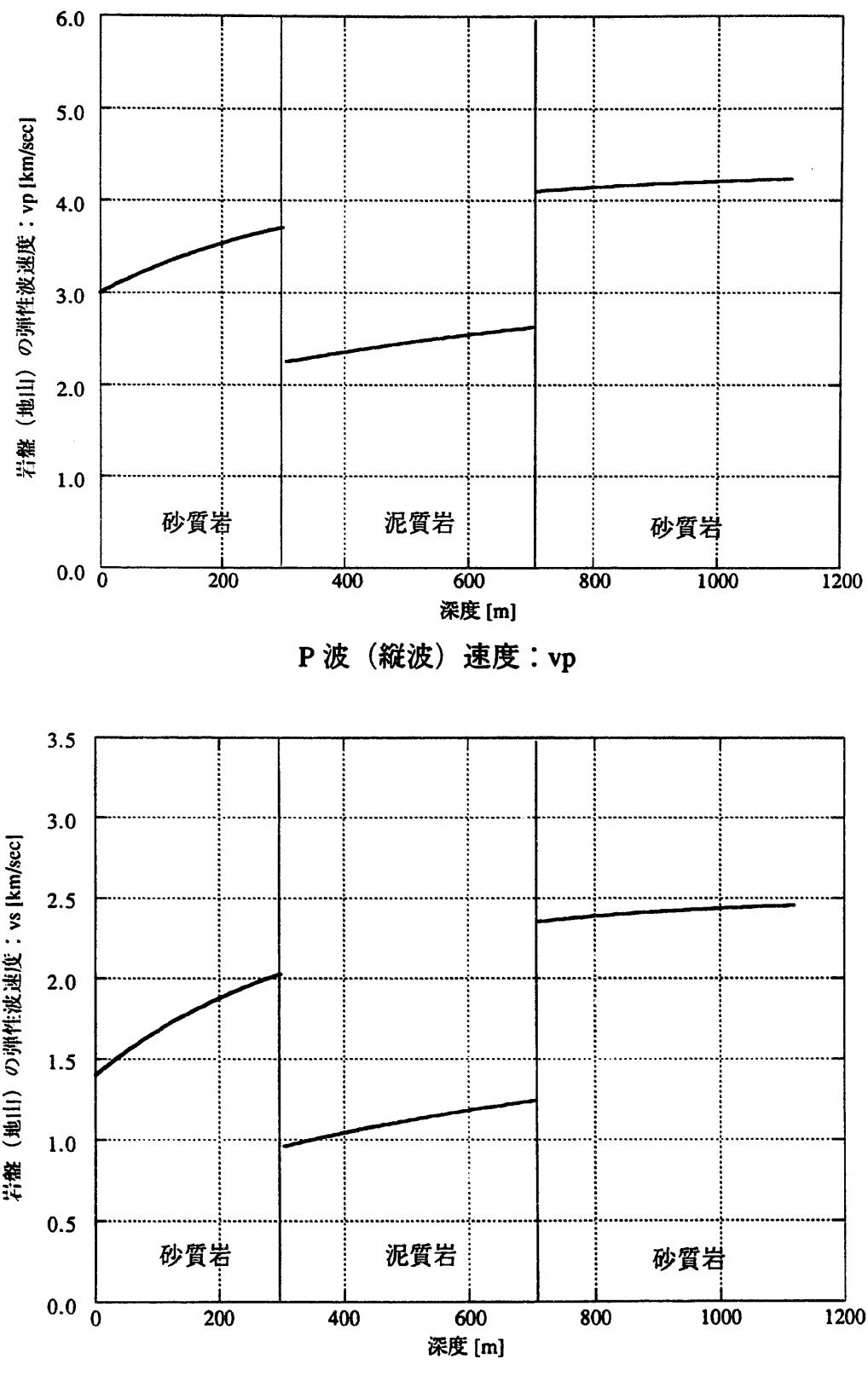


図 4-15 深度と岩盤（地山）の弾性波速度の関係

(軟岩系岩盤; ③新第三紀堆積岩（砂質岩）, ④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）)

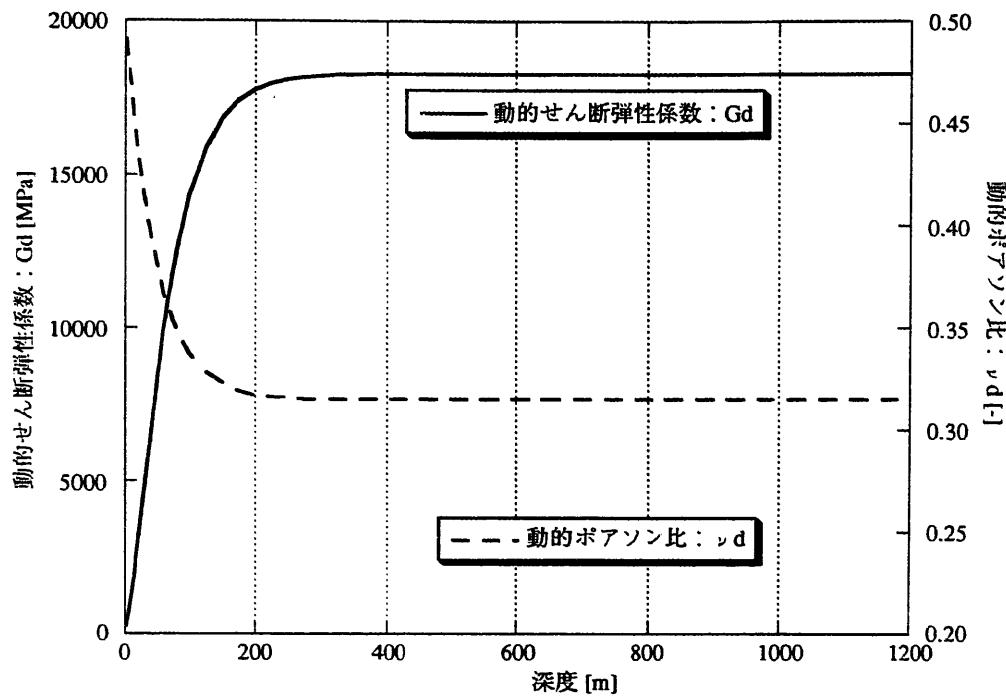


図 4-16-1 深度と岩盤（地山）の動的物性の関係（硬岩系岩盤：HR）

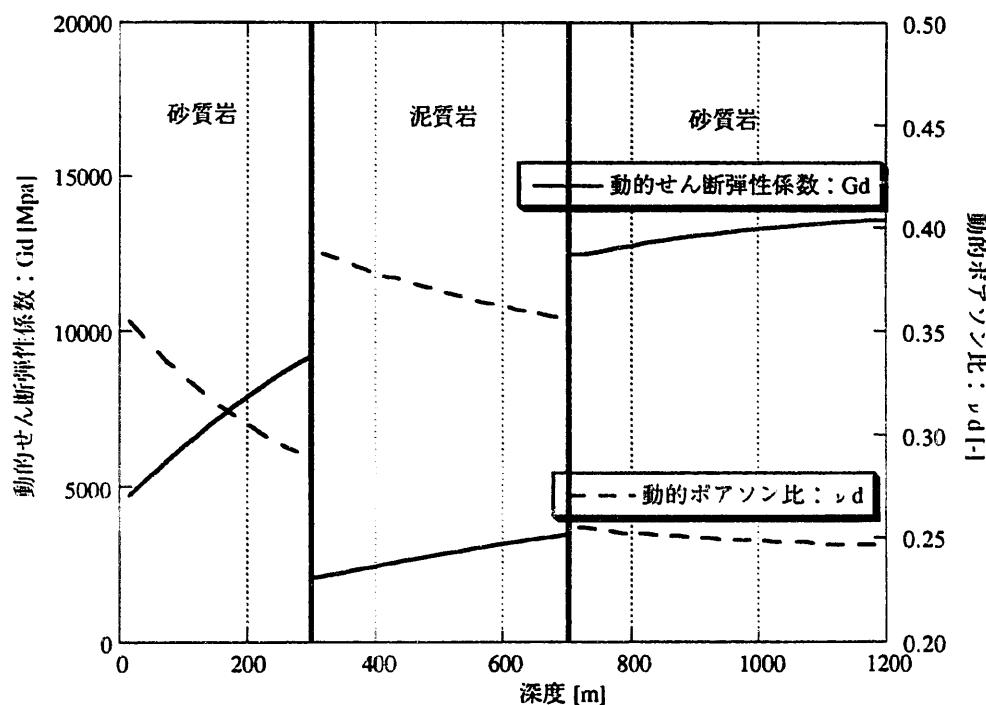


図 4-16-2 深度と岩盤（地山）の動的物性の関係（軟岩系岩盤：SR-C）

4-3 热物性

(1) 岩基質部の熱伝導率および比熱

岩石の热物性は、岩石の鉱物組成、密度、組織、空隙率、水分含有量および圧力に依存する（島田・幾世橋、1987）。したがって、岩基質部の热物性は硬岩と軟岩での区別よりもむしろその鉱物組成によって変わるものと考えられる。よって、ここでは結晶質岩（前述の表2-2での①結晶質岩（酸性岩）、②結晶質岩（塩基性岩））と堆積岩（③新第三紀堆積岩（砂質岩）、④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）、⑤古第三紀堆積岩（砂質岩）、⑥古第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩））に分類し、(3-6)～(3-8)式に基づいて岩基質部の热物性（熱伝導率、比熱）を求めた。以下に、岩石データベース中で検討に用いたデータ数、つまり岩石（コア）の热物性-含水率-有効間隙率の組み合わせで記載されているデータ数を示す。

・結晶質岩（①結晶質岩（酸性岩）、②結晶質岩（塩基性岩））

熱伝導率（熱伝導率-含水率-有効間隙率の組み合わせで記載されているもの）

①結晶質岩（酸性岩）・・・107

（このうち土岐花崗岩（東濃地域での実測値）は38）

②結晶質岩（塩基性岩）・・・51

計・・・158

比熱（比熱-含水率-有効間隙率の組み合わせで記載されているもの）

①結晶質岩（酸性岩）・・・108

（このうち土岐花崗岩（東濃地域での実測値）は38）

②結晶質岩（塩基性岩）・・・31

計・・・139

・堆積岩（③新第三紀堆積岩（砂質岩）、④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）、

⑤先新第三紀堆積岩（砂質岩）、⑥先新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩））

熱伝導率（熱伝導率-含水率-有効間隙率の組み合わせで記載されているもの）

③新第三紀堆積岩（砂質岩）・・・0

④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）・・・0

⑤先新第三紀堆積岩（砂質岩）・・・16

⑥先新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）・・・11

計・・・27

比熱（比熱-含水率-有効間隙率の組み合わせで記載されているもの）

③新第三紀堆積岩（砂質岩）	0
④新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）	0
⑤先新第三紀堆積岩（砂質岩）	4
⑥先新第三紀堆積岩（泥質/凝灰質岩）	6
計	10

これらのデータを用い岩基質部の熱物性を求めた。ただし、(3-6)～(3-8)式を用いた検討に際し、明らかに検討対象外（例えば、計算中に空隙部分や含水部分の体積が負となるもの、および求めた岩基質部の熱物性が明らかに想定外と判断できるもの）となるデータは除外している。その結果である岩基質部の熱物性の範囲および頻度を図4-17～4-20に示す。これらの図より、岩基質部の熱伝導率に関しては、その分布範囲および頻度分布を考慮し、結晶質岩、堆積岩各々に対して図中に示すような検討範囲を設け、その上限（最大）、下限（最小）および平均値を設定した。また、岩基質部の比熱に関しては、結晶質岩、堆積岩とも、平均値（1.0kJ/kg k）近傍にデータが集中しているため、平均値のみの取り扱いとした。表4-5にここで設定した岩基質部の熱物性を示す。

(2) 热拡散率の検討および岩盤熱物性の設定に用いる岩基質部の熱物性

一般に单一材料の非定常状態の熱の移動を表す係数として熱拡散率（熱伝導率を、比熱と単位体積重量の積で除したもの）が用いられる（日本機械学会、1986）。したがって、上記岩の岩基質部の熱物性、および結晶質岩、堆積岩それぞれの岩石データベース中における有効間隙率の範囲（0～60%）を用いて、熱拡散率の範囲を求めた。ただし、間隙中は地下水で完全に満たされている飽和状態を想定した。その結果を図4-21に示す。熱拡散率の範囲は結晶質岩では $3.26 \times 10^{-7} \sim 1.48 \times 10^{-6}$ (m²/s)、堆積岩では $3.59 \times 10^{-7} \sim 1.44 \times 10^{-6}$ (m²/s)となり、堆積岩の熱拡散率の幅は結晶質岩でのその幅に収まった。また、設定した岩基質部の比熱が結晶質岩と堆積岩で同値であるため、結晶質岩における岩基質部の熱伝導率の平均と比熱の平均から求めた有効間隙率に依存した熱拡散率の値は、堆積岩における同様な平均の組み合わせから求めた有効間隙率に依存した熱拡散率の値と比較して、若干小さいが、ほぼ一致した。したがって、ここでは

- ・堆積岩と比較して、結晶質岩の有効間隙率に依存した熱拡散率、つまり岩基質部の比熱が結晶質岩と堆積岩で同値なため有効間隙率に依存した熱伝

導率が小さいことは、人工バリアや処分施設の設計解析において保守的となる。また、その差は極めて小さい。

- ・岩基質部の熱物性を求めるにあたって用いたデータ数が、堆積岩と比較して結晶質岩のほうが極めて多い。

等の理由から、岩盤の熱物性は、岩種つまり結晶質岩および堆積岩にはよらず、有効間隙率および含水状態にのみ依存することとし、岩基質部の熱物性には結晶質岩（ただし、比熱は結晶質岩と堆積岩で同値）で求められたものを用いることとした。

(3) 有効間隙率を考慮した岩盤熱物性の設定

上記(1)の検討で設定した岩基質部の熱物性から、(3-6)および(3-7)式に基づいて各々の有効間隙率に対する熱物性を求めた。ただし、間隙中は地下水で完全に満たされている飽和状態を想定している。その結果を図4-22に示す。

なお、ここで設定する熱伝導率には、(2)で上述したように岩基質部の熱物性として結晶質岩で求められたものを用いることとし、上記図における結晶質岩の平均的な有効間隙率依存性の関係（図中黒実線）、比熱には上記図における有効間隙率依存性の関係に対し、4-1「静的力学物性」で設定した有効間隙率の値（表4-1-1、4-1-2 参照）を代入して、静的力学物性と有効間隙率を介したリンクを持たせた熱物性を設定した。表4-6に静的力学物性で設定した有効間隙率と合わせて設定した岩盤熱物性を示す。

(4) 地温勾配および地表面温度の設定

地質条件として必要な深度方向の地温勾配に関しては、矢野ほか（1999）によって検討が行われている。図4-23にその調査結果であるわが国の地温勾配分布および頻度分布を示す。それによると、わが国の地温勾配は火山周辺を除く大部分の地域で $5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以下、その多くは $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 前後である。この調査結果、また処分場のサイトは火山地域などを避けて選定されると考えられること、一般にわが国の地温勾配は $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 程度であると言われている（日本材料学会、1993；建設産業調査会、1998；畠中、1993）こと等により地温勾配は $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ に設定した。

地表面温度に関しては、既往の文献等（例えば、福井ほか、1985）により、わが国の年平均気温は 15°C 程度である。したがって、地表面も同程度の温度と考えられる。また、わが国のような温帯地域では、地下 10m 以深で地下水の温

度が気温等に影響を受けない、つまり一定の温度である恒温層となるといわれており（建設産業調査会, 1998），深度 50m でのわが国の地下水温度は 12~18°C 程度であることが報告されている（設産業調査会, 1998）。

これらの知見と地温勾配に基づけば、地温勾配の起点となる地表面での温度は年平均気温程度と考えることができる。以上より、地表面温度は 15°C に設定した。

表 4-5 設定した岩基質部の熱物性

	結晶質岩		堆積岩	
	熱伝導率 (W/mK)	比熱 (kJ/kgK)	熱伝導率 (W/mK)	比熱 (kJ/kgK)
最大値	4.0	-*	3.9	-*
平均	2.9	1.0	3.0	1.0
最小値	2.0	-*	2.3	-*

* 結晶質岩、堆積岩の岩基質部の比熱に関しては、平均値近傍にデータが集中しているため、平均値のみの取り扱いとした。

表 4-6 設定した有効間隙率と岩盤熱物性

*種別	有効間隙率 n_e (%)	飽和単位 体積重量 ρ_w (g/cm ³)	熱伝導率 λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	比熱 c (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)
HR	2	2.67	2.8	1.0
SR-A	15	2.45	2.5	1.2
SR-B	20	2.35	2.4	1.3
SR-C	30	2.20	2.2	1.4
SR-D	45	1.85	1.9	1.7
SR-E	60	1.70	1.5	2.1

* 種別について 4-1 「静的力学物性」 参照

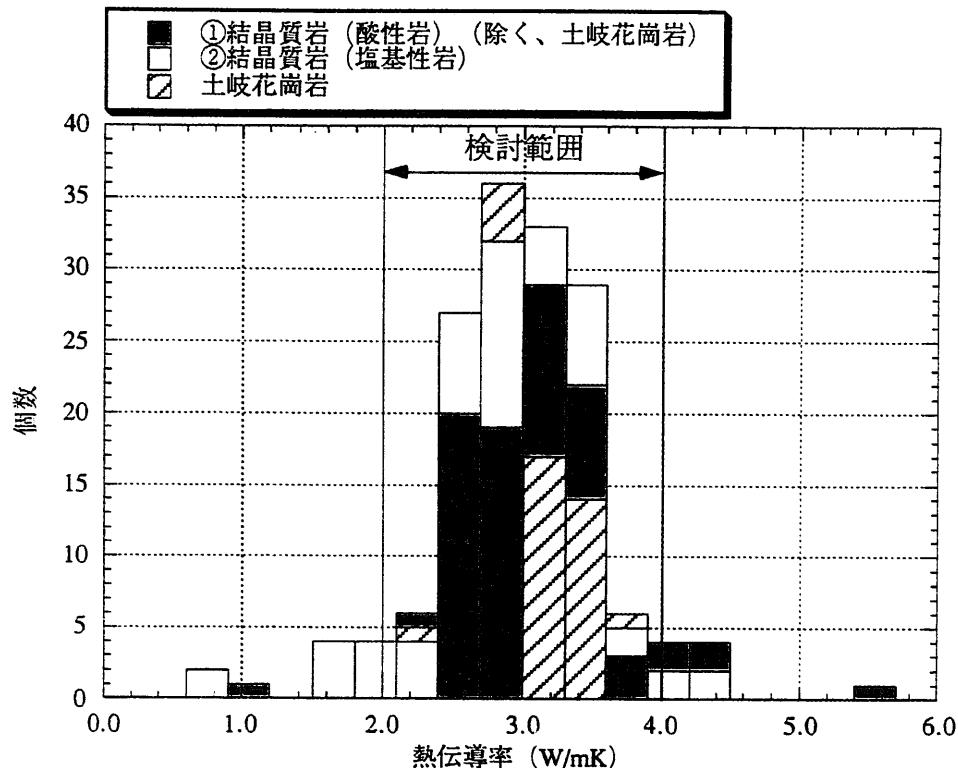


図 4-17 岩基質部の熱伝導率のヒストグラム（結晶質岩）

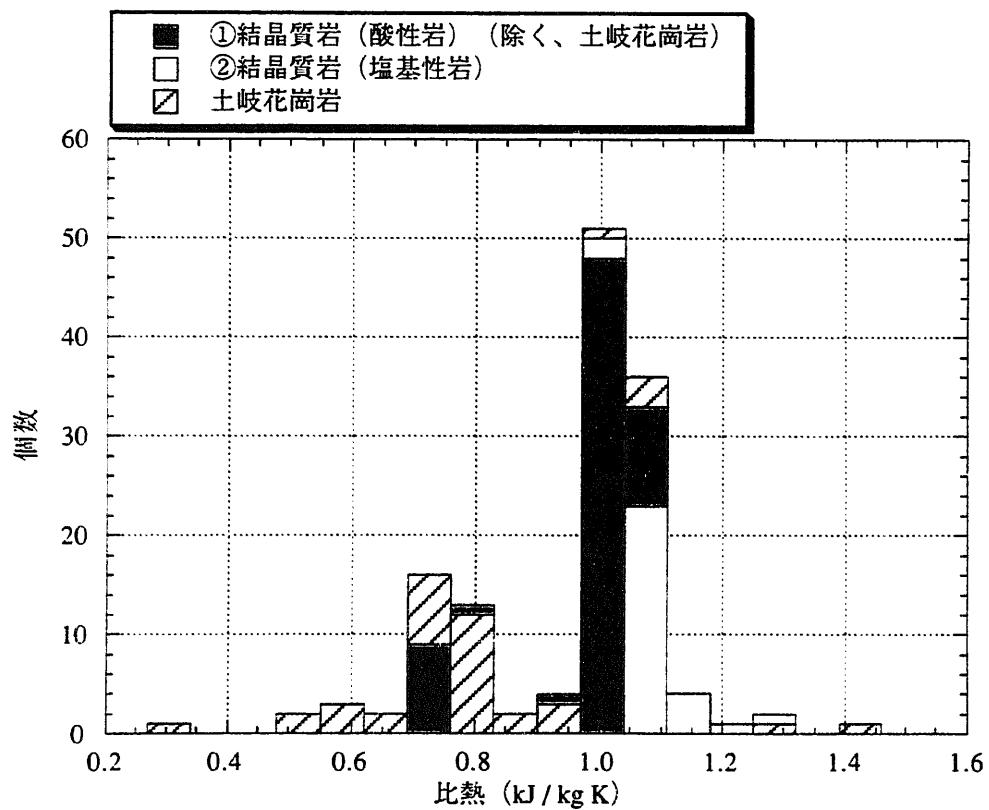


図 4-18 岩基質部の比熱のヒストグラム（結晶質岩）

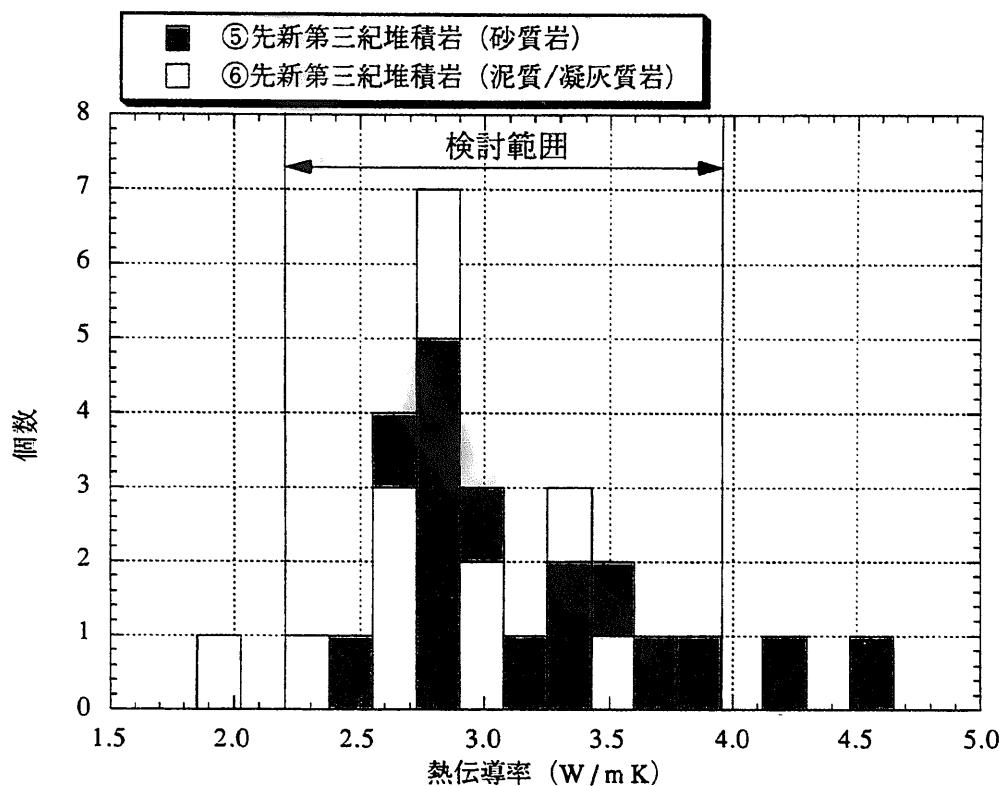


図 4-19 岩基質部の熱伝導率のヒストグラム（堆積岩）

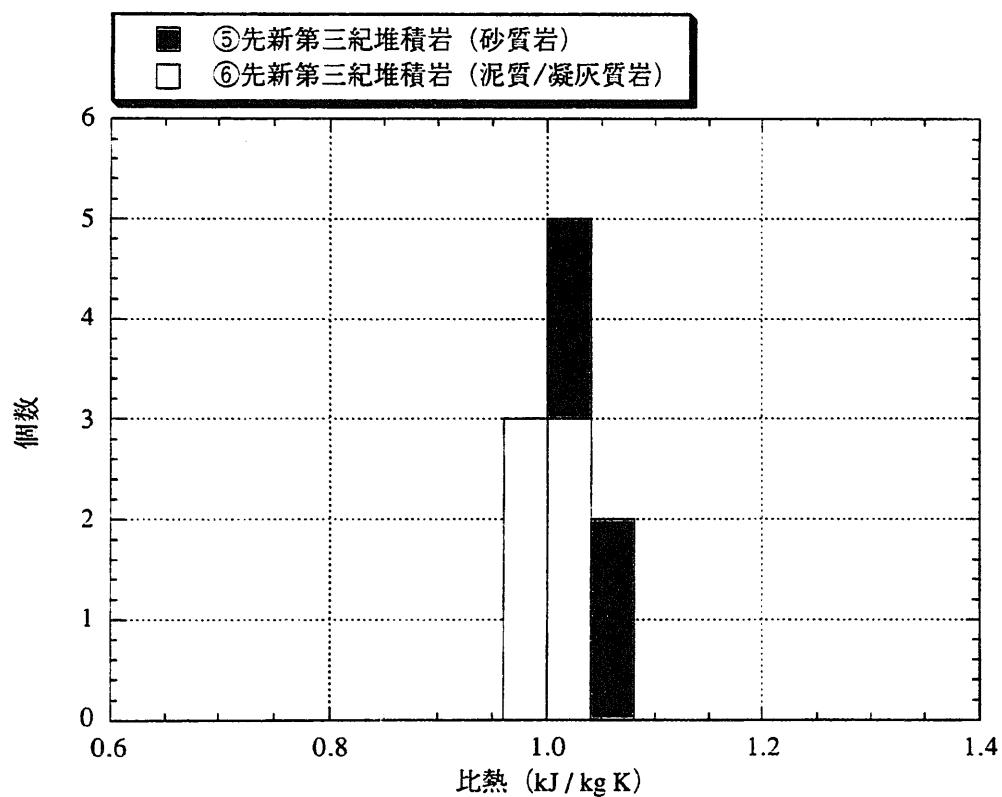


図 4-20 岩基質部の比熱のヒストグラム（堆積岩）

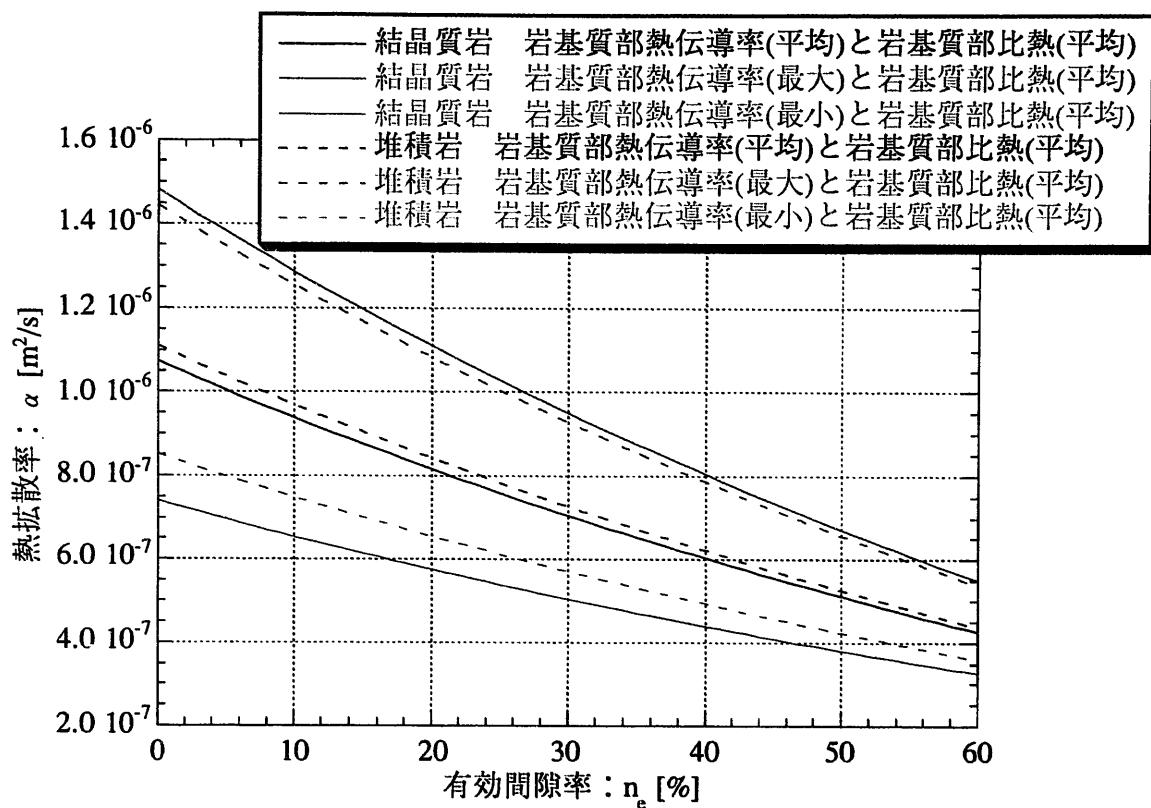


図 4-21 有効間隙率と熱拡散率

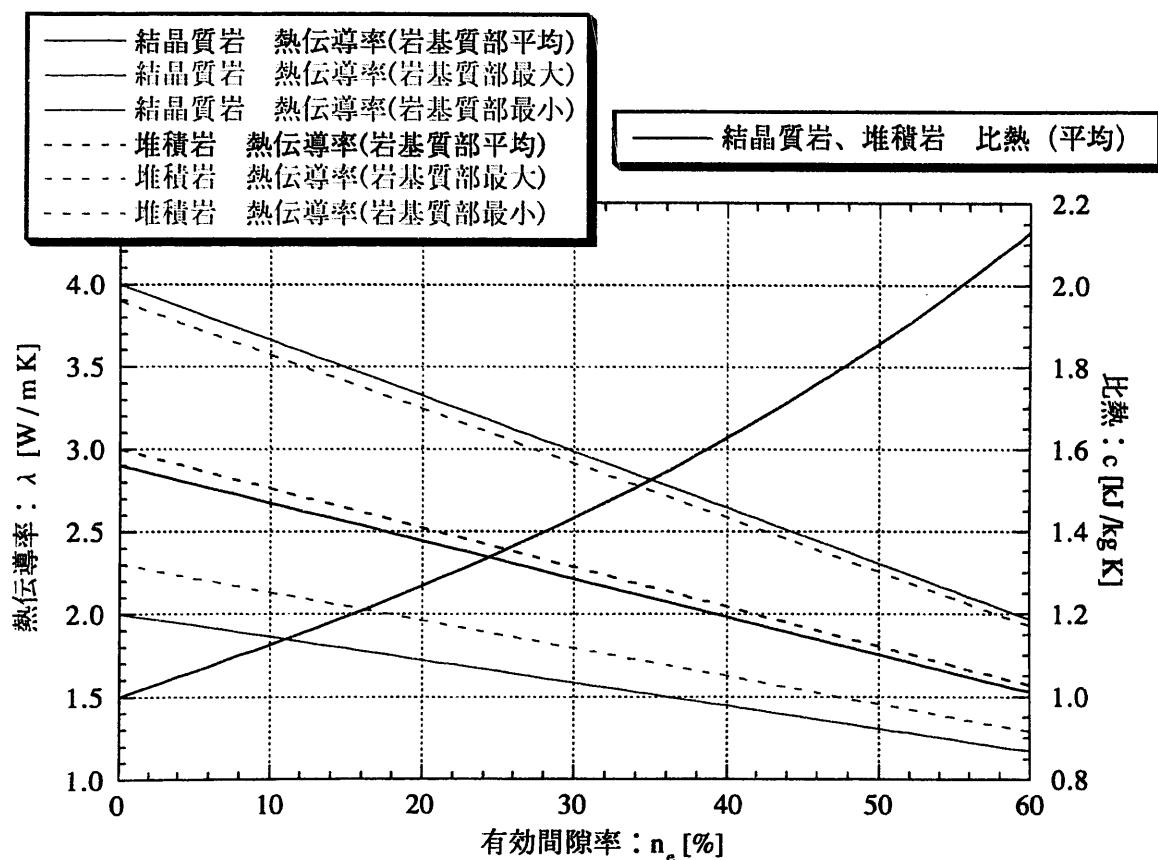
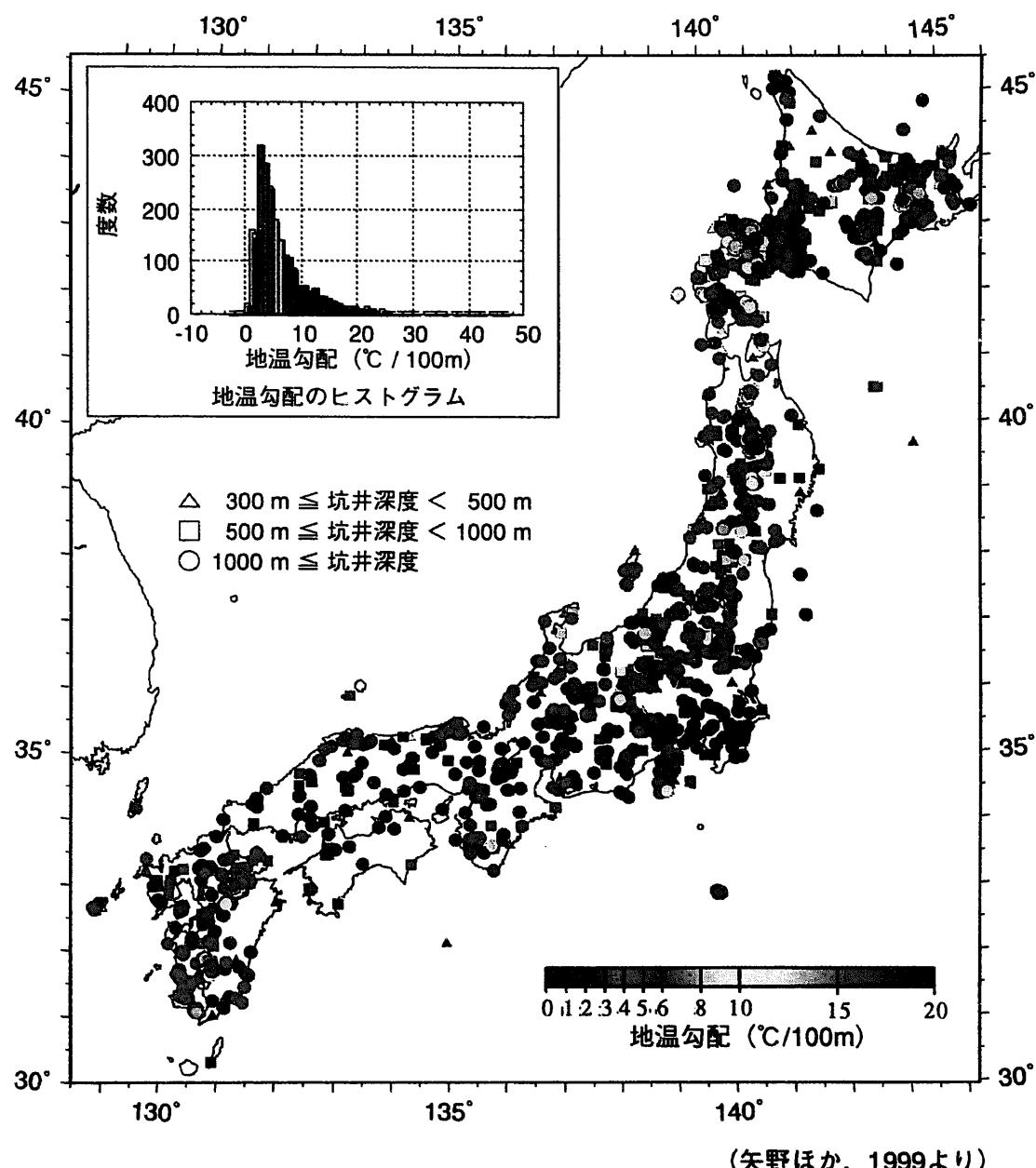


図 4-22 有効間隙率と熱伝導率および比熱



(矢野ほか、1999より)

日本全国の坑井データをもとに編集された地温勾配図。地温勾配が高い地域は第四紀火山の分布とほぼ一致する。第四紀火山の周辺を除く大部分の地域で地温勾配は5°C/100m以下である。

図 4-23 わが国の地温勾配分布と頻度分布

5.まとめ

地層処分場を設計するに際に必要な岩盤の特性は、本来、サイト特有かつ与条件である。しかしながら、現段階での地層処分研究開発では、岩種や地域を特定しないで、わが国の安定な幅広い地質環境を考慮した概念の検討を行っており、概念の実現性を示すために試設計が必要となる。したがって、わが国の幅広い地質環境を考慮した設計解析の入力物性となる岩盤物性を設定する必要がある。本報では、地層性分研究開発第2次取りまとめ「地層処分の工学技術」における設計解析に必要な物性を設定した。

設定のためのデータとしては、第1次取りまとめ時のデータベースにそれ以降に公開文献で報告されたデータを加えた「岩石データベース」を基とした。

設定に際しては、上記岩石データベースをもとに、物性値の分布等について統計的な検討を行ったうえで、わが国の岩盤を人工バリアや処分施設の設計上、硬岩系岩盤と軟岩系岩盤に分類して取扱うこととした。静的力学物性に関しては、一軸圧縮強度や有効間隙率、深度をパラメータとして各物性間の相関を検討し、岩石としての物性を示した。岩盤中の割れ目の影響や寸法効果を考慮して、弾性波速度に基づく岩盤良好度を用いて岩石としての物性を低減させ、深度に応じた岩盤としての物性を推定し、幅をもって設定した。この際に、東濃地域・釜石鉱山での試験研究において蓄積されたデータを用いて隨時設定したデータの妥当性を確認した。

動的力学物性に関しては、深度依存性を考慮して設定した。また、静的力学物性と動的力学物性との関係を検討した。

熱的物性に関しては、従来静的力学物性と個別に取扱われてきたが、ここでは有効間隙率を介して静的力学物性と関連づけ設定を行った。

岩盤の静的力学、動的力学および熱の各特性に関して設定した主要な岩盤物性を表5-1に示す。

本検討で設定された岩盤物性の値自体は、上記設計解析に用いたこと以外に意味を持たない。しかしながら、各々の物性の相関、およびその分布の幅を検討し、ある程度その傾向を考察できたこと、実際にあり得そうな岩盤物性のデータセット（様々な物性の組み合わせ）を設定したこと、およびこのデータセットを用いて人工バリアや処分施設の試設計を行い技術の適用範囲を幅広く示しておくことに意味があると考える。

表 5-1 設定された主要岩盤物性

対象岩盤モデル		硬岩系岩盤		軟岩系岩盤			
種別(略)		HR	SR-A	SR-B	SR-C	SR-D	SR-E
物理的特性	飽和単位体積重量 ρ_w [g/cm ³]	2.67	2.45	2.35	2.20	1.95	1.70
	有効間隙率 n_e [%]	2	15	20	30	45	60
静的力学物性	一軸圧縮強度 q_u [MPa] (深度1000m)	115	25	20	15	10	5
	弾性係数 E [MPa] (深度1000m)	37,000	5,000	4,000	3,500	2,500	1,500
	ポアソン比 ν	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
	粘着力 c [MPa] (深度1000m)	15	5	4	3	2	1
	内部摩擦角 ϕ [deg]	45	30	29	28	27	25
	引張強度 σ_t [MPa] (深度1000m)	8	3.5	2.8	2.1	1.4	0.7
	側圧係数 K_0	164/h+0.74 [h : 深度[m]]					
動的力学物性	動弾性係数 E_d [MPa] (深度1000m)	48,064			9,237 (深度500m)		
	減衰定数 h [%]	2			2		
	動ポアソン比 ν_d	0.315 (深度1000m)			0.369 (深度500m)		
熱物性	熱伝導率 λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	2.8	2.5	2.4	2.2	1.9	1.5
	比熱 c [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	1.0	1.2	1.3	1.4	1.7	2.1
	地温勾配 [°C/100m]	3					
	地表面温度 [°C]	15					

謝辞

岩石データベースの作成に関しては、大成建設（株）窪田茂氏に御協力頂いた。また、地質構造要素の設定に当たっては、核燃料サイクル開発機構 藤田朝雄氏に御協力頂いた。ここに感謝の意を表す。

—参考文献—

赤井浩一, 足立紀尚, 新城俊也 (1973) : 島尻層泥岩の力学特性, 京都大学防災研究所年報, No.16, pp.753-764.

Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. (1974) :Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, Rock Mechanics, Vol.6, No.4, pp.189-236.

Bieniawski, Z.T. (1974) : Geomechanics Classification of Rock Masses and Its Application in Tunneling, Proc. 3rd Int. Cong. ISRM, Vol.2, Part A, pp.27-32.

千々松正和, 谷口航 (1999) : 热-水-应力连成モデルを用いたニアフィールド解析評価, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-014.

Deere, D.U. (1963) :Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes, Rock Mechanics and Engineering Geology, Vol.1, No.1, pp.17-22.

Deere, D.U. and Miller, R.P. (1966) :Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock, Technical Report No. AFNL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, New Mexico.

電力中央研究所 (1985) : 振動載荷時における軟岩の動的強度-変形特性, 電力中央研究所報告, 研究報告 383050, 1985 年 1 月.

土木学会 (1987) : トンネルにおける調査・計測の評価と利用.

土木学会 (1992) : 軟岩評価 -調査・設計・施工への適用-.

動力炉・核燃料開発事業団 (1992) : 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書—平成 3 年度—, PNC TN 1410 92-081.

土質工学会 (1974) : 岩の工学的性質と設計・施工への応用

Fujiyama. Y, Hibino. S (1981) :Evaluation of dynamic properties of rock foundation by cyclic loading test, Proc. of the International Symposium on Weak Rock, Tokyo, pp1229-1234

福井英一郎ほか (1985) : 日本・世界の気候図, 東京堂出版.

原子力委員会（1994）：原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画、平成6年6月24日。

原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会（1997）：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発等の今後の進め方について、平成9年4月15日。

Goodman, R.E.; 大西有三, 谷本親伯 共訳 (1984)：わかりやすい岩盤力学、鹿島出版会, pp.60-62.

畠中武文（1993）：温度の発見－地質リモートセンシングの利用による－、地人書館

Hoek, E. and Brown, E.T. (1997) : Practical Estimates of Rock Mass Strength, Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.34, No.8, pp.1165-1186.

井尻裕二, 澤田淳, 赤堀邦晃 (1999a) : 我が国の岩盤における亀裂特性について, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-091.

井尻裕二, 澤田淳, 坂本和彦, 亘真吾, E.K.Webb, 中島研吾, 野邊潤 (1999b) : 多孔質岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行解析, JNC TN 8400 99-092.

石原研而（1976）：土質力学の基礎、鹿島出版会。

石川浩次, 城ヶ崎勝美ほか (1985) : 花崗岩（岩石及び岩盤）の静的及び動的弾性定数の関係について、第20回土質工学研究発表会（名古屋）。

ISRM (International Society for Rock Mechanics) (1978) : Suggested Method for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses, Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol.15.

地盤工学会 (1997) : 岩の調査と試験、第3刷、地盤工学会。

地盤工学会 (1999) : 地盤工学ハンドブック、地盤工学会。

建設産業調査会 (1979) : 地下水ハンドブック、建設産業調査会, pp.119-129.

菊地宏吉, 藤枝誠, 岡信彦, 小林隆志 (1984) : ダム基礎岩盤の耐荷性に関する地質工学的総合評価、応用地質特別号、日本応用地質学会, pp.103-118.

菊地宏吉 (1990) : 地質工学概論, 土木工学社.

小坂岑雄 (1978) : 定速昇温法による熱拡散率の測定 (第2報), 銅およびチタニウムへの適用, 名古屋工業技術試験報告, 第27卷, 4号.

黒木繁盛, 谷口航, 小尾繁, 長谷川宏, 杉野弘幸, 窪田茂, 出羽克之 (1999) : 地下空洞の力学的安定性評価, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-037.

桑原啓三 (1984) : 岩石の圧縮強度と剪断強度による分類の試み, 応用地質特別号, 日本応用地質学会, pp.25-33.

松本嘉司, 西岡隆 (1987) : トンネルの力学と覆工の設計方法 (4) 第4章 山岳トンネルの安定性の現状 (I), トンネルと地下, Vol.18, No.11, pp.33-41.

日本電気協会 (1987) : 原子力発電所耐震設計技術指針, 電気技術基準調査委員会.

日本道路公団 (1997) : 設計要領, 第三集 トンネル, pp.69-77, 91-92.

日本複合材料学会 (1989) : 複合材料ハンドブック.

日本機械学会 (1986) : 伝熱工学資料, 改定第4版

日本鉄道建設公団 (1996) : NATM 設計施工指針 (平成8年2月), pp.36-42, pp.62-68.

日本材料学会 (1993) : 岩の力学 基礎から応用まで, 丸善.

Onodera, T.F. (1963) : Dynamic Investigation of foundation rocks in-situ. 5th Symp. Rock Mech., pp.517-533.

Press, F (1966) : Seismic Velocities, Handbooc of Physical Constants. Geol. Soc. America Memoir No.97, 1996.

斎藤敏明, 石田毅, 寺田孚, 田中豊 (1988) : 実測結果に基づくわが国の地下岩盤内の初期応力状態の検討, 土木学会論文集, No.394, pp.71-78.

佐藤稔紀, 石丸恒存, 杉原弘造, 清水和彦 (1992) : 文献調査によるわが国の岩石の物理的特性に関するデータ収集, 動燃技術資料, PNC TN7410 92-018.

佐藤稔紀, 谷口航, 藤田朝雄, 長谷川宏 (1999) : 文献調査によるわが国の岩石の物理的特性に関するデータ収集 (その 2), サイクル機構技術資料, JNC TN7400 99-011.

澤田淳, 井尻裕二, 坂本和彦, 亘真吾 (1999) : 龜裂性岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行解析, JNC TN 8400 99-093

資源・素材学会 (1998) : 地震に関する調査研究 (XIV) 総合報告書.

島田莊平, 幾世橋広 (1987) : 岩盤および地盤の熱物性値に関する研究の展望, 資源・素材, '87 札幌分科研究会.

嶋悦三, 太田外気晴ほか (1983) : 鉛直アレー地震観測による地震動特性の研究 その 3 地盤の減衰調査, 日本建築学会大会学術講演集.

竹内均, 片山信夫, 森本良平, 木村敏雄 (1970) : 新版地学辞典 I 地球物理学・資源工学・土木地質学・気候学.

Takeuchi, T. and Suzuki, T. (1981) : On Evaluation of In Situ Deformation Coefficient and c, ϕ of Soft Rock by Borehole Load Test, Proc. of the International Symposium on Weak Rock, Tokyo, pp.417-422.

谷口航, 岩佐健吾 (1999) : ニアフィールドの熱解析, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-051.

谷口航, 鈴木英明, 杉野弘幸, 松本一浩, 千々松正和, 柴田雅博 (1999a) : 熱的特性の緩衝材仕様に与える影響, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-052.

谷口航, 高治一彦, 杉野弘幸, 森康二 (1999b) : ニアフィールドの耐震安定性評価, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-054.

東京電力株式会社 (1993) : 福島第一原子力発電所原子炉設置変更許可申請書.

Wepfer, W.W. and Christensen, N.I. (1991) : A Seismic Velocity-Confining Pressure Relation with Applications, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.28, No.5, pp.451-456.

山口梅太郎, 西松裕一 (1989) : 岩石力学入門 (第2版), 東大出版会.

矢野雄策, 田中明子, 高橋正明, 大久保泰邦, 笹田政克, 梅田浩司, 中司 昇 (1999) : 日本列島地温勾配図 (1:3,000,000), 地質調査所.

吉川宗治, 飯塚節夫ほか (1984) : 鉛直アレー地震観測による地震動特性に関する研究 (その4), 高圧動的三軸圧縮試験による岩の剛性と減衰性のひずみ依存性, 日本建築学会大会学術講演概要集 (関東), 1984年10月.

吉中龍之進, 桜井春輔, 菊地宏吉 (1989) : 岩盤分類とその適用, 岩盤工学体系 [1], 土木工学社.