

施工面から見た軟岩

2. 軟岩の種類とその特性

くわ 桑 はら 原 けい 啓 ぞう 三*

2.1 軟岩の種類

地山を施工面から見た時、大まかに、その掘削性から土砂、軟岩、硬岩に分類される。軟岩には1で述べたように、堆積軟岩、風化軟岩、火山軟岩および亀裂性軟岩等がある。軟岩の範囲は物性的には岩片の強度（一軸圧縮強度）、亀裂の状態等によって変るため、広範囲にわたるが、弾性波速度は片麻岩、花崗岩、砂岩、安山岩等の均質岩で2 km/s程度まで、片岩、頁岩、泥岩、凝灰岩等の片理、層理等異方性のある岩で3 km/s程度までとされている。一方、一軸圧縮強度では続成作用、変形係数等の他の指標も考慮しておおむね200 kgf/cm²程度までとされている。各種の軟岩のうち亀裂性軟岩は、断層破碎帯や亀裂の多い岩盤であり、施工面からみると重要ではあるが、その分布は局所的であることが多いので、本章では取扱わない。

土砂、硬岩に対して呼ばれる軟岩は、土砂から硬岩への移行過程、硬岩からの風化過程あるいは岩石の変質過程にあたるため、土と岩との中間的な性質を示し、土砂と軟岩、軟岩と硬岩との境界は曖昧である。土砂と軟岩の境界は、前述のように地盤を材料としてみるかあるいは地質工学的なとらえ方をするかでも異なり、前者の場合ではリップビリティ、後者では堆積軟岩の場合には地盤が圧密領域にある間は土砂の領域であろう。また風化岩の場合には、岩が風化して移動しない。すなわち岩の組織を残している時には軟岩の領域と思われる。軟岩と硬岩の境界は堆積軟岩にあってはセメンテーションが生じた領域は硬岩領域と考えられる。

堆積軟岩は、主として新第三紀の泥岩、砂岩のような碎屑岩および凝灰岩のような火山碎屑岩であり、第四紀更新世の地層の1部も含まれる。前述のように、堆積軟岩は土砂の圧密領域からセメンテーションの領域に至る途中の過程であり、層理面による異方性を有するが、節理等の割れ目も少なく、比較的等方均質な性状を示す。

堆積岩は、いわゆるグリーンタフ地域と太平洋側の非グリーンタフ地域に広く分布しているが、前者は凝灰質岩が多いのに比べて、後者は砂岩、泥岩およびその互層のような碎屑性軟岩となっている。グリーンタフ地域の軟岩は、生成時から変質を受けていることが多く（グリーンタフ変

質または続成変質と呼ばれる）、また熱水変質作用を受けていることが多い。特に凝灰質岩は緑色を呈するところから緑色凝灰岩（グリーントフ）と呼ばれている。

非グリーントフ地域の軟岩は、成層構造が著しく、また変質を受けていることも少なく、埋没深度や地質時代と物性値との相関が深い。

風化岩は、硬岩から土砂へ移行する過程である。風化岩はすべての岩種に見られるが、花崗岩ないしは花崗岩系統の粗粒岩に著しい。また、日本では更新世の間氷期に高温になった時代（リス-ウルム間氷期とウルムⅠ～Ⅱ亜間氷期）があり、赤色土が形成されていることでも分かるように厚い風化殻を形成している。この厚い風化殻は日本各地に点在している。著しい風化を示す花崗岩類は比較的均質な風化を示すことが多いが、風化は割れ目にそって進むため、未風化の玉石状の硬岩を中に挟むことがある。

火山軟岩は、低溶結の溶結凝灰岩に代表されるような第四紀の火山活動に伴う火山碎屑物や溶岩の急冷破碎部、溶岩の1部が固結した後も他の部分へ流動するために固結部が破碎された自破碎溶岩等がこれに当たる。分布は比較的狭く、不規則で、また物性の変化の著しい不均質な岩である。

2.2 軟岩の生成過程

2.1では、軟岩の種類に堆積軟岩、風化軟岩、火山軟岩があることを示し、その生成過程に続成作用、風化作用、変質作用があると述べた。ここではその各作用を下に軟岩の生成過程を見てみる。

堆積軟岩は主に続成作用で形成される。土が岩に変化する固結過程を物性の変化で見えてみると、図-2.1に示すようになる。すなわち、固結過程を一軸圧縮強度と間隙率で見た場合、①の領域すなわちまだ土と呼ばれる領域では、上載荷重の増加に伴い、間隙は減少するとともに強度も急激に増加するが、この段階では粒子間の骨格構造が弱く、強度は小さい。上載荷重による間隙の減少、すなわち体積の減少、密度の増加は、地層に作用する全圧力 P が骨格構造にかかる有効応力 σ' と間隙水圧 u とに分担され、図-2.2に示されるように $e-\log p$ 曲線で直線となる。この縮り方は地層を構成する土の粒径で異なり、図-2.2で分かるように土粒子の粒径の小さい粘土の方が圧縮性が大きい。

*建設省土木研究所 地質研究室長

講座

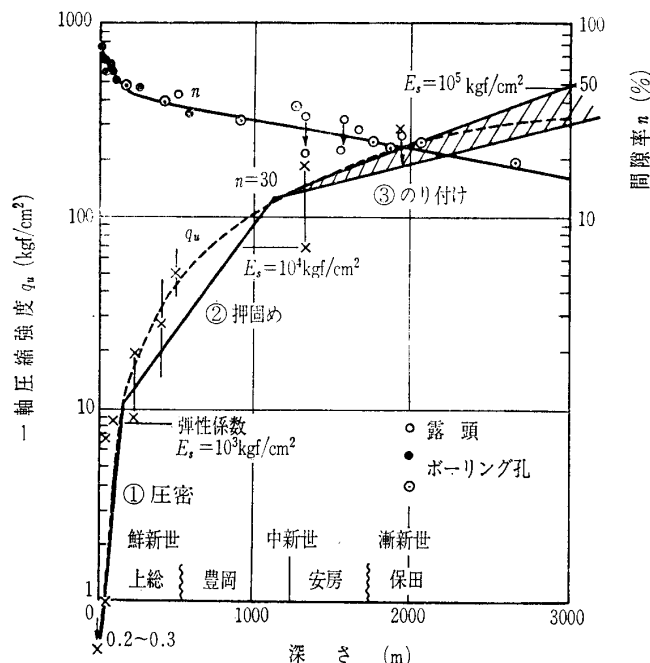


図-2.1 堆積物(泥)の埋没に伴う物性の変化(千葉県房総半島のボーリング資料による)¹⁾

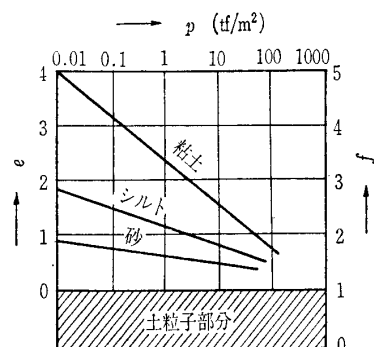


図-2.2 圧力-間隙比(体積比)の関係²⁾

これに対し、②の領域では土粒子の骨格構造が主として荷重を受け持ち、上載荷重による体積変化は①は領域に比べて極端に小さくなる。そして強度は、密度の増加に伴って著しく増加するが、図-2.3に示すように一軸圧縮強度 q_u の増加は間隙率 n の減少に比例し、その関係は q_u が 200 kgf/cm^2 以下ではおおむね一次関数的である。体積の減少は粒径によって異なり、粒径の大きいものほど間隙率の変化は小さい。この領域が軟岩と呼ばれている領域であり、土のように均質な連続体に準じた扱いができ、含水比の変化による物性値の変化が大きく、また土工によって著しく性質が変化する領域でもある。

③の領域では、十分押し固めが行われており、もはや荷重の増加による体積が減少は極小になる。そして粒子間の間隙は SiO_2 や CaCO_3 等の沈着、粒子の再結晶等によって小さくなっていき、岩石の強度は沈着物質の種類や沈着の程度によってばらつきが大きく、また岩盤として見た時、割れ目が多くなり、割れ目が物性に与える影響が大きくなる。この領域は、硬岩と呼ばれる領域である。

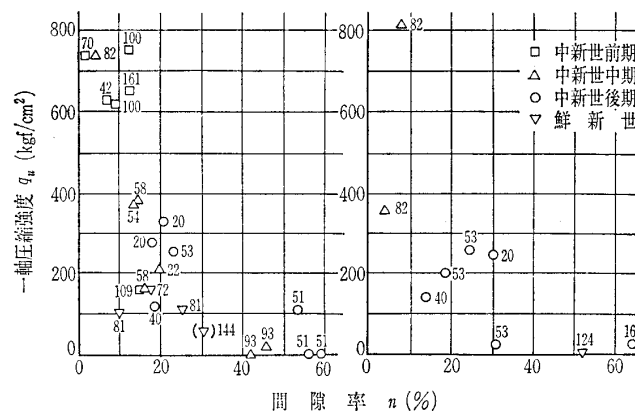


図-2.3 一軸圧縮強度と間隙率の関係³⁾に1部加筆

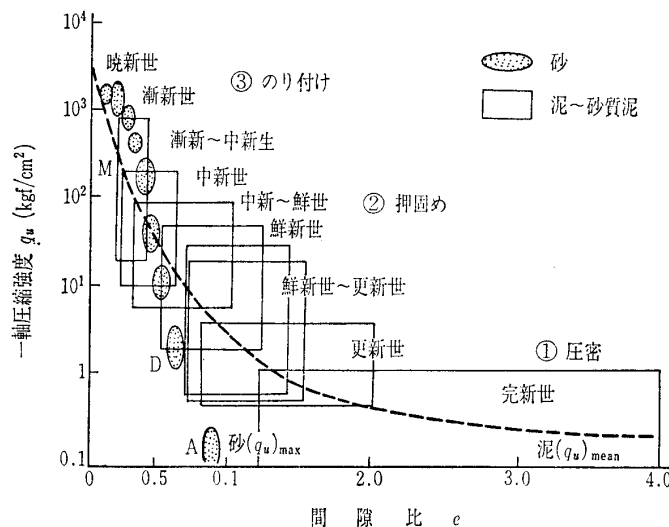


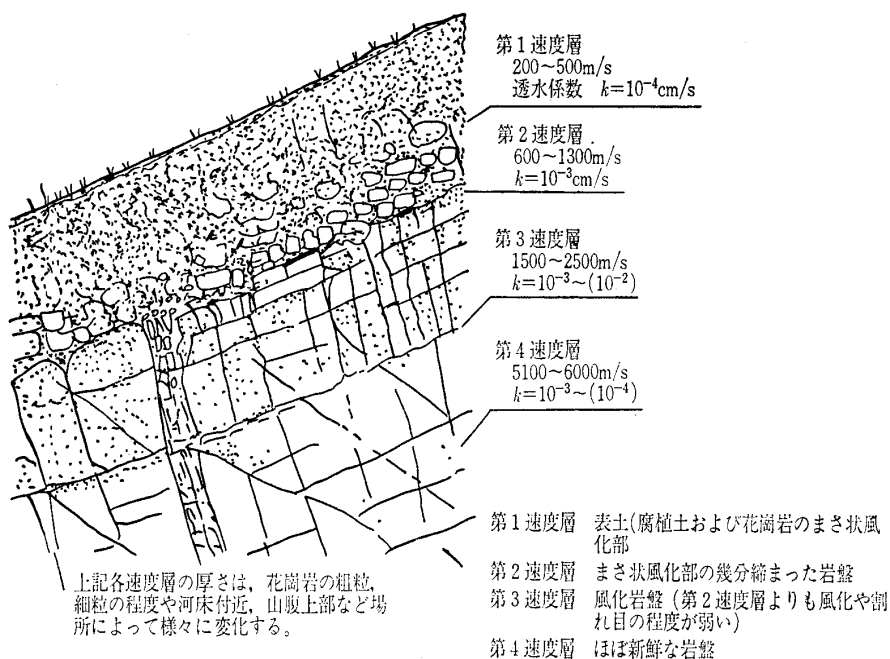
図-2.4 岩化に伴う日本の新生代堆積物の物理的性質の変化¹⁾に1部加筆

間隙比 e と一軸圧縮強度 q_u との関係が地質時代ごとにどのように変化するかを示したのが図-2.4である。図-2.4は、泥～砂質泥をみると、完新世～更新世の一部では間隙の減少が顕著であり、逆に漸新世以前の地層では強度の増加が著しく、その両者を継ぐ領域に更新世～中新世の地層では間隙の減少と強度の増加が生じている。

このように堆積軟岩は圧密領域からセメンテーションに至る中間の領域である。

堆積軟岩の施工面から見た問題点は、吸水膨張による強度低下をきたすこと、膨張圧を発生すること、スレーキングを起こすこと、乱した場合、性状の変化が著しいこと等がある。

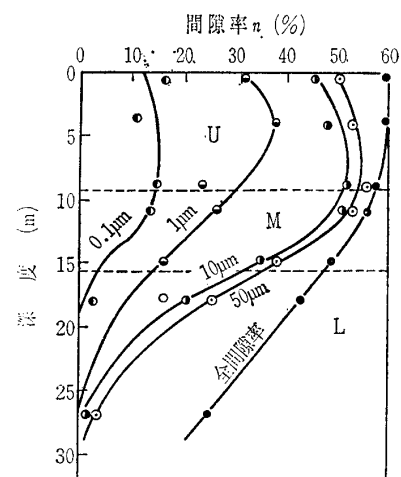
風化軟岩は、硬岩あるいは軟岩が風化してさらにぜい弱になるもので、地表近くに存在し、地表に近くなるほど風化が進みぜい弱化は著しい。花崗岩は最も風化しやすい岩石の1つであり、花崗岩の風化は、図-2.5のように模式的に示される。すなわち、花崗岩の風化の進行は、無亀裂塊状の新鮮な花崗岩が地表近くに露出すると、応力解放により節理が見られるようになり(この除荷応力解放による節理の典型例が地表に平行な節理、すなわちシーティング



図—2.5 花崗岩の一般的な風化状況⁹⁾

ジョイント (= 地表に平行な節理) である), この節理の生成と同時に節理に浸み込んだ水の凍結融解作用等の機械的作用によってますます間隙を広げ, 水の化学的作用によって節理にそって風化が進む。さらに日射等の温度変化により岩造鉱物の膨張率の違いにより岩盤内に間隙ができ, 節理, 間隙に浸み込んだ水の酸化, 還元, 炭酸化等の化学的風化作用により溶脱が生じ, 鉱物自体が粘土鉱物に変化してまき化する。したがって, 花崗岩の風化は節理等によって支配され, 同一地域にあっても選択的である。

前述のように, 花崗岩が風化を受けると節理や間隙の拡大, 水による溶脱・分解作用を受け, 緩んでくる。この過程を深度に置きかえて示したのが図—2.6である。図—2.6は風化が進めば, すなわち上位になるほど全間隙率は増加し, 特に深度15m付近より0.1 μ mの粒子内間隙と思われる間隙が増大する。また, 表—2.1に示されるように, 風化の進行は間隙の増加 (密度の減少) ばかりでなく, 弾性



図—2.6 風化と間隙率⁹⁾

波速度の低下, 変形係数の低下となって現れることが分かる。

花崗岩の風化は, 物理的性質の変化のみならず, 前述のように化学的にも

変化している。木宮は領家帯の花崗岩の調査を行い⁶⁾, 肉眼によって新鮮な花崗岩から土壌までを, 表—2.2に示すように7帯に分帯した。各帯の鉱物組成を示したのが図—2.7で, 1次鉱物である石英, カリ長石は新鮮な花崗岩か

	zone I	zone II	zone III	zone IV	zone V	zone VI	zone VII
石英							
カリ長石							
斜長石							
黒雲母							
緑泥石							
イライト							
加水雲母							
パーミキュライト							
カオリン鉱物							
ギブサイト							

図—2.7 各風化分帯における鉱物組成の変化⁶⁾

表—2.1 室内岩石試験結果 (大三島・伯方島)⁹⁾

岩区分	硬 軟 の 程 度	密度 ρ_c (g/cm ³)	一軸圧縮 強度 q_u (kgf/cm ²)	P波速度 V_{pc} (km/s)	S波速度 V_{sc} (km/s)	動的ポア ソン比 σ_{dc}	静的ポ アソン 比 σ_{sc}	動的ヤング率 E_{dc} (kgf/cm ²)	静的ヤング率 E_{sc} (kgf/cm ²)
A	硬 ハンマーで叩くと金属音。 D・Bで2cm/min以下	2.76<	—	4.3<	3.0<	0.1>	—	7.5 $\times 10^5$ <	—
B	硬 ハンマーで軽い金属音。 D・Bで2~4cm/min	2.62~2.94	1000<	3.1~5.9	2.0<	0.13>	—	2.4 $\times 10^5$ ~1.8 $\times 10^6$	—
C _H	中硬 ハンマーで叩くと濁音。 小刃で傷つく硬さ。D・Bで 3cm/min以上	2.45~2.77	250~1650	1.8~4.6	1.1~3.0	0.06~0.27	0.12<	8.0 $\times 10^4$ ~6.0 $\times 10^5$	2.5 $\times 10^4$ ~5.8 $\times 10^5$
C _L	軟 極くぜい弱で指で割れつ ぶれる。M・Cで掘進可	2.13~2.45	—	2.2>	1.9>	0.23~0.47	—	8.0 $\times 10^3$ ~6.5 $\times 10^4$	—
C _M	やや軟~硬 ハンマーで叩く と軽く割れる。爪で傷つくこ とあり。D・Bで掘進可	2.29~2.62	200>	0.6~3.4	0.4~2.5	0.13~0.40	0.32<	2.5 $\times 10^4$ ~2.0 $\times 10^5$	1.8 $\times 10^5$
D	軟極 粉体になりやすい。M・ Cで無水掘可	2.30>	—	1.0>	—	0.40~0.49	—	2.0 $\times 10^3$ >	—

講座

表—2.2 野外における肉眼観察を主とする風化分帯表⁶⁾

風 化 分 帯	野 外 で の 特 徴	平均的厚さ
zone VII 土 壤 (soil)	露頭最上部に存在し草や木の根が密集している。まさBとの間にクリーピングまさ* の存在する場合もある。	1 m以下
zone VI まさB (masa B)	全体が一様に風化し砂状を呈する。長石、黒雲母はかなり粘土化している、軽く手で握るとかたまりとなる。本帯を欠く場合もある。まさAとの境ははっきりしている。	2 m以下
zone V まさA (masa A)	全体が一様に風化し砂状を呈する。粘土分はまさBに比べて少なく、軽く手で握ってもかたまりとならない。節理面の跡は厚さ1 cm程度の粘土層となっている。風化花崗岩Bとの境ははっきりしている。	10~20m 時に40~50m
zone IV 風化花崗岩B (weathered granite B)	長石は指頭で粉砕できるほど風化し、岩石全体としてもかなり風化しているが、一様な風化ではなく、節理面は残っている。粘土分はほとんどなく、ハンマーで軽くたたくと砂状となり、岩塊とならない。風化花崗岩Aとは漸移する。	5~10m
zone III 風化花崗岩A (weathered granite A)	長石は白濁するが、岩盤としての組織を残しており、節理面もはっきりしている。ハンマーで軽打してもくいこまず、軟らかい部分は砂状になるが、硬い部分は10cm程度の岩塊となる。花崗岩Bとは漸移する。	20~30m
zone II 花崗岩B (granite B)	黒雲母の周辺に鉄さび色のくまが生じているが、ハンマーで軽打したくらいでは割れない。花崗岩Aとは、漸移する。	20~40m
zone I 花崗岩A (granite A)	新鮮なもので、風化作用の影響を全く、またはほとんど受けていない。	

*まさがクリーピングにより移動したもの、または地表水、風などの営力によりリワークして再堆積したもの

表—2.3 続成作用における鉱物組合せ⁶⁾

生成鉱物	帯	I	II	III	IV	V
火山ガラス			=====			
斜方輝石			=====			
モルデン石			=====			
エリオン石			=====			
菱 沸 石			=====			
方 沸 石			=====			
輝 沸 石			=====			
濁 沸 石			=====			
ワイラケ沸石				=====		
トムソン沸石				=====		
曹 長 石				=====		
カリ長石				=====		
蛋 白 石				=====		
石 英				=====		
モンモリロン石				=====		
セラドナイト				=====		
緑泥石/モンモリロン石				=====		
混合層粘土鉱物				=====		
絹雲母/モンモリロン石				=====		
混合層粘土鉱物				=====		
緑 泥 石				=====		
絹 雲 母				=====		
方 解 石				=====		
苦 灰 石				=====		
黄 鉄 鉱				=====		

===== 流紋岩質、石英安山岩質、安山岩質の場合
----- 玄武岩質の場合

ら土壌に至るまで見られるが、黒雲母、斜長石はV帯になると分解して消滅し、逆に風化に伴って緑泥石、イライト、加水雲母等が生存しはじめ、最後にカオリナイト、パーミキュライト、ギプサイトが生成される。化学成分的には、 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 等が風化により減少し、またFeはFeOと Fe_2O_3 で傾向は異なるが総量では減少する。

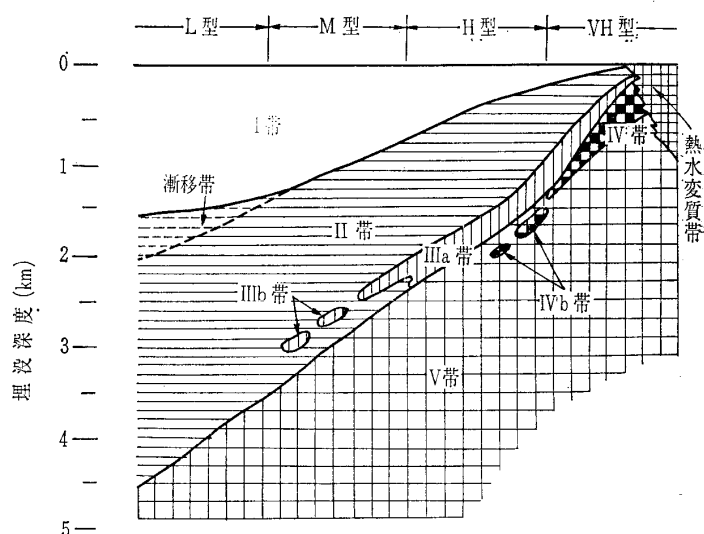
花崗岩以外の岩石の風化もほぼ同様な過程をたどり、化学成分的には SiO_2 、 K_2O 、 MgO 等の減少となるが、その過程は花崗岩ほど単純ではない。

施工面から見た風化軟岩の問題は深度方向、水平方向の性状の変化が著しいこと、岩としての組織を壊すため、

性状の変化があること等である。

軟岩の生成の1つである変質作用は、硬岩あるいは軟岩が地層水のため、あるいは熱水変質作用のためぜい弱化しているものである。変質作用には、風化変質、続成変質、熱水変質作用がある。風化変質作用による軟岩の生成については既に述べたので、以下に続成変質作用、熱水変質作用による軟岩の生成について述べる。

続成変質作用は、堆積物が埋没する過程で、岩圧と地中の温度に適応した鉱物組合せが変化する作用(歌田 1980)⁶⁾であり、続成作用によって生ずる鉱物の組合せは、表—2.3に示すように、いくつかの帯に分類できる。この分帯は、温度条件によって決まり、I帯は低温、V帯は高温を示している。この鉱物分帯と埋没深度との関係は、図—2.8のようになり、地下増温率の高い方から、VH—H—M—Lと区分され、地下増温率の高い帯ほどより埋設深度の浅い所で高温の鉱物組合せが現れる。



図—2.8 続成作用における4つの型、4つの型の帯の重なり方と深度との関係を模式的に示した⁶⁾

表—2.4 熱水変質帯の分類⁹⁾

酸性帯	硫酸塩系	明ばん石・蛋白石帯		明ばん石-石英帯	
	珪酸塩系	ハロイサイト帯	カオリナイト帯		デイカイト・ナクライト帯
中性帯	カリ系	モンモリロン石帯		絹雲母帯	カリ長石帯
	カルシウム-マグネシウム系			プロピライト帯	
アルカリ性帯	カルシウム系	東沸石帯	輝沸石帯	濁沸石帯	ワイラケ沸石帯
	ソーダ系	Na-モルデン沸石帯	方沸石帯	曹長石帯	

アルカリ・アルカリ土類イオン活動度
水素イオン活動度

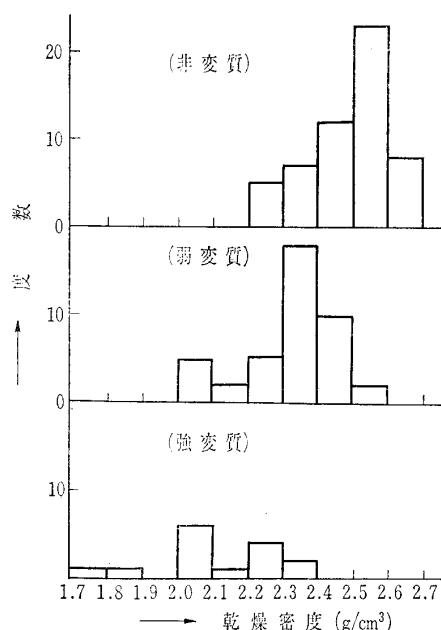
→ 温度

熱水変質作用は、広域的な地下増温率で与えられる温度より高温の溶液の関与によってもたらされる変質作用で、熱水の起源としてはマグマ水、變成水、天水がある。歌田は続成作用と同様に、熱水溶液のイオン比および温度条件を考慮して熱水変質帯を表—2.4のように分類し、それぞれの帯に生成する鉱物組合せを示した。

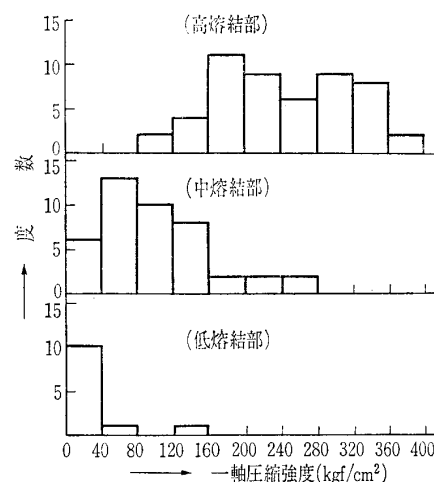
熱水変質作用により出現する変質帯は、一般ゾーニングをなし、その組合せや形態にはいろいろな場合があり、そのゾーニングを知ることによって熱水の方向、次に出現する変質物質を知ることができる。

続成変質、熱水変質を被ると、一般にモンモリロン石、緑泥石、各種沸石等鉱物が生成され、ぜい弱化する（逆に珪化作用によって堅硬になる場合がある）。ぜい弱化の程度は、生成された粘土鉱物の種類、量、埋没深度（封圧の程度）、含水の程度等によって異なるが、一般には粘土鉱物量が多いほど、また埋没深度が浅いほど工学的性質は劣る。変質の有無による乾燥密度の違いを図—2.9に示す。

火山軟岩は、続成作用の進んでいない第四紀火山噴出物



図—2.9 変質の違いによる密度の変化（変質はP-C₆H₅N₂による呈色による）



図—2.10 溶結凝灰岩の溶結度の違いによる強度の違い

のうち、低～未固結の溶結凝灰岩、自破碎溶岩等で火山性のため熱水変質、自変質等を被っていることもある。分布も狭く、不規則で、強度変化も大きい。高溶結凝灰岩と中～未固結凝灰岩の一軸圧縮強度の違いを図—2.10に示す。

変質を受けた岩の施工性から見た特徴は、粘土化が著しく吸水膨張が著しいこと、強度低下が著しいこと、スレーキングを生じること等である。

2.3 軟岩の分布

生成過程から見た岩盤、すなわち固結過程における堆積軟岩、風化過程における花崗岩類を主とする風化軟岩は地質学的にその分布を示すことができるが、火山軟岩、花崗岩類以外の風化岩、亀裂性岩盤は、分布が狭く不規則であるので、本節では割愛する。

堆積軟岩は、新第三紀層の大部分と固結度の高い更新世層（洪積層）である。新第三紀層中にも固結度が進み、火薬を用いないと掘削施工できない岩も存在するが一括して図—2.11に示した。また更新世層も掘削面からみると土砂に分類されるものもあるが、一括して図に示した。堆積軟岩は、前述のようにグリーンタフ地域と非グリーンタフ地域に分けられ、前者は日本海側、伊豆半島等に分布し、後

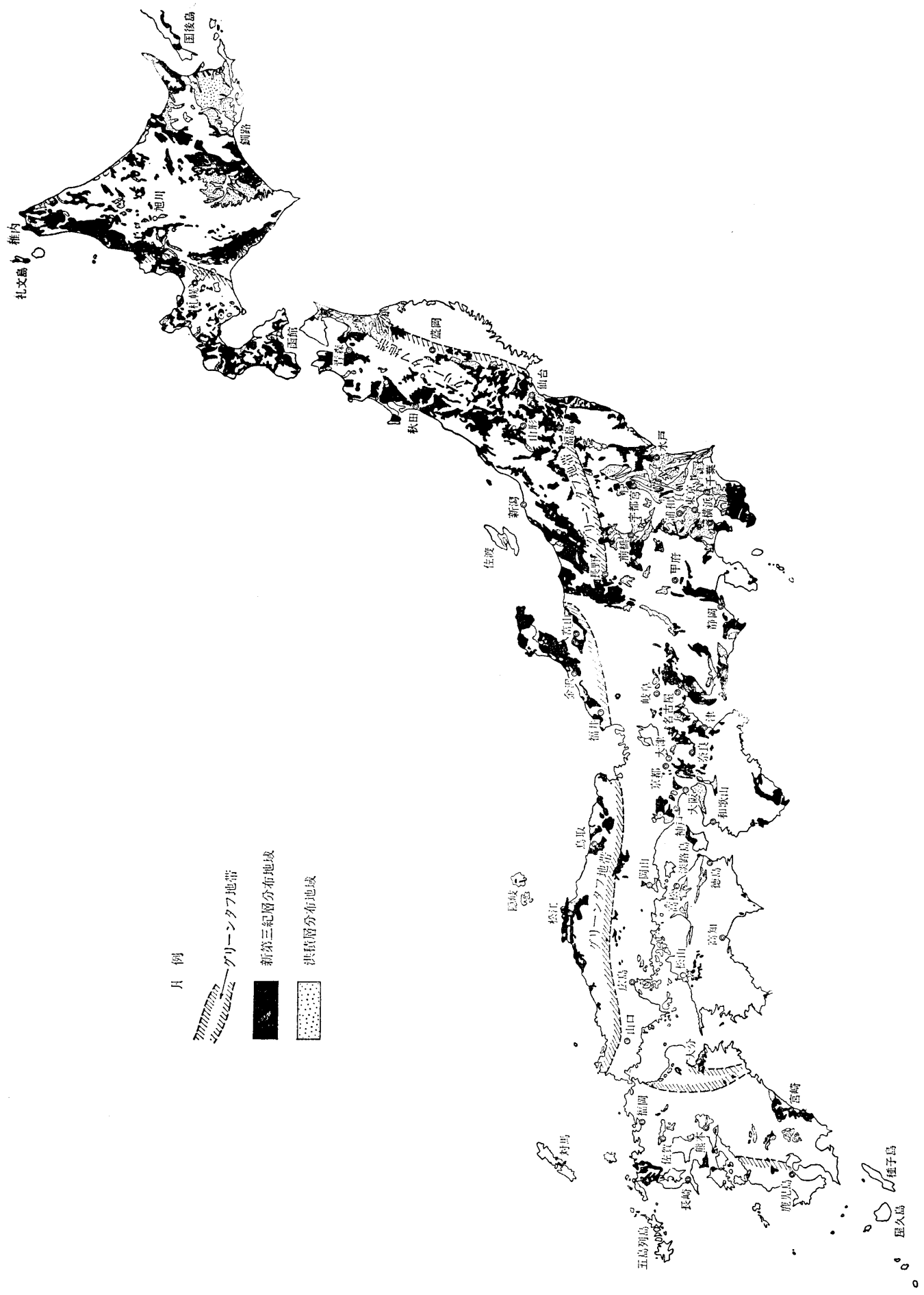
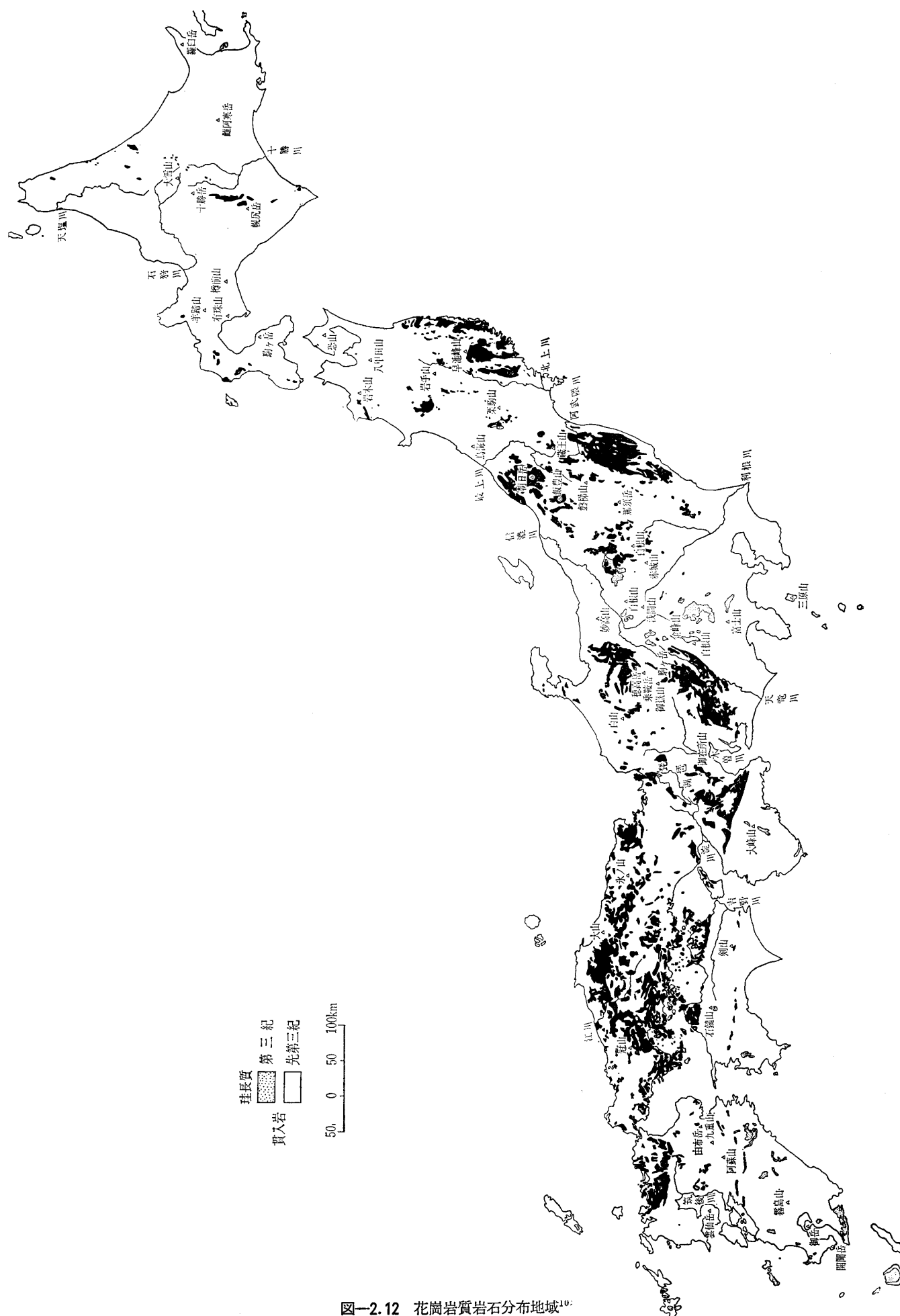


図-2.11 新第三紀層，洪積層分布図⁹⁾



圖一2.12 花崗岩質岩石分布地域¹⁰⁾

請 座

者は主として太平洋側に分布している。

風化軟岩は、花崗岩以外にももちろん存在するが、風化の形態から最も分布の広い花崗岩類の分布を図-2.12に示す。

一般に風化軟岩の発達起伏の緩い所で厚く、急傾斜の箇所では風化軟岩は剝離されて薄い。したがって、必ずしも花崗岩の分布する所が風化厚が厚いとは限らない。風化厚を確定するには地形をも考慮する必要があり、国土庁発行の土地分類図には風化厚を3段階にかえて表示してある。

参 考 文 献

- 1) 土木学会編：軟岩一調査・設計・施工の基本と実例一，pp. 1～6, 1984.

- 2) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，pp. 148～165, 1965.
3) 財国土開発技術研究センター：グリーンタフ地域におけるダム建設に関する調査解析業務，pp. 55～81, 1984.
4) 近畿地方土木地質図編纂委員会：近畿地方土木地質図解説書，財国土開発技術研究センター，p. 169, 1981.
5) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋大三島橋工事誌，pp. 20～27, 1983.
6) 木宮一邦：花こう岩類の物理的風化指標としての引張強度，地質学雑誌，Vol. 81, No. 6, pp. 349～364, 1975.
7) 青山千彰・遠山茂之・西田一彦：間ゲキ分布からみた不カク乱マサ土の土構造，第12回土質工学研究発表会概要集，pp. 217～228, 1960.
8) 歌田 実：新期造山帯にみられる変質作用，岩石鉱物鉱床学会誌特別号，第2号，pp. 347～360, 1980.
9) 土質工学会編：風化花崗岩とまき土の工学的性質とその応用，pp. 3～15, 1979.
10) 建設省：日本国勢地図帳 No. 3, 1977.

学会刊行物案内

土質工学会で制定された基準および関連している基準のうち単行本として現在発売している本を紹介するので是非御利用ください。

問合せ・申込み先：(社)土質工学会 図書販売係
電話 03-251-7661 内線 25, 32
東京都千代田区神田淡路町2-23 菅山ビル4F

クイの鉛直載荷試験基準・同解説

A 5判・252頁 定価¥2,500 会員特価¥1,900 千¥350

載荷試験の載荷装置，計測装置，試験の方法，結果の整理，報告書の作成について述べ，さらに基準の理解を助け，試験が容易に進められるように付録として実験装置の設計，実施，考察の例，積算の考え方を解説。(昭和47年3月発行)

アース・アンカー工法

—付・土質工学会アース・アンカー・設計・施工基準—

A 5判・236頁 定価¥3,300 会員特価¥2,500 千¥300

ここ数年の穿孔技術の急速な進歩により，アース・アンカー工法の経済性および信頼性に対する信頼度が高まり，施工件数の増加，その利用面でも多様化の傾向が見受けられるわが国の当工法の現状を把握し，現状に適した当工法の基準について解説。(昭和51年9月発行)

力計の使用指針

(付・土質工学会基準「土質試験機用力計基準」)

A 5判・29頁 定価¥800 会員特価¥600 千¥200

学会基準の「土質試験機用力計基準」をもとに，力計の正しい使い方，管理方法および検査方法など，力計の使用に当たって知っておかなければならない事項の最低限度を系統的に解説。(昭和57年10月発行)

土質工学会基準

地盤の平板載荷試験方法・同解説

A 5判・184頁 定価¥2,800 会員特価¥2,200 千¥300

構造物基礎の設計や施工に際しては，地盤の支持特性を調べるために，地耐力試験などと呼ばれる平板載荷試験が数多く実施されてきたが，このたび土質工学会基準「地盤の平板載荷試験方法」が制定されたのを機会に本書を出版。本書は「基準」「解説」および「付録」で構成。(昭和58年1月発行)

土質工学会基準

杭の水平載荷試験方法・同解説

A 5判・60頁 定価¥1,300 会員特価¥1,000 千¥300

杭の水平載荷試験基準作成に当たって，杭基礎の耐震設計を念頭におき，それに必要な基本的資料をできるだけ簡単な試験で得ること，および基準の内容は国際的に通用する一般的なものであることを目標に検討を行いながら，設計に一番密接な関係がある単杭の水平載荷試験を対象として解説。(昭和58年10月発行)