The Japanese Geotechnical Society

No. 1771

温泉余土と基礎工

Foundation Works in Solfataric Clay Areas

落合英俊* 松下博通**
江頭和彦*** 一瀬久光****

1. 温泉余土とは

温泉は九州を代表する景観である。この温泉に伴うのが温泉変質粘土である。温泉変質粘土は，後火山作用である温泉作用の熱水，蒸気，硫気によって，周囲の岩石が変質して粘土化したものであり，いわゆる“地獄”に典型的にみられる。生成される粘土鉱物は変質が行われる環境によって異なり，酸性の環境下ではカオリナイトを主体とした鉱物，弱酸性ないしは中性の環境下ではモンモリロナイトを主体とした鉱物が生成される。この温泉変質粘土は，温泉余土と通称されているが，緑色，黒色の岩石で膨張性を示すもの，あるいは酸性環境下で生成された粘土が温泉余土と呼ばれることもある[1),2)]。これらは変質環境を限定した狭義の呼び方といえる。いずれにしろ，“余土”という言葉からは“余りものの土”，“やっかいものの土”という印象を受け，取扱いに困っていたことがうかがえる。温泉余土地帯における土木・建築上の問題点としては，粘土化による地盤強度の低下，温泉地すべりの発生，酸性化に伴うコンクリート構造物の腐食があげられる。

2. 九州における温泉余土の分布

九州には白山火山帯と，これと直交して霧島火山帯が走り，このふたつの火山帯に沿って，活火山，温泉，地熱帯が分布する。九州の温泉はすべて火山性温泉に属し，火山帯に沿って多くの温泉がみられるが，そのうち主な温泉地帯は雲仙・小浜，阿蘇，九重，別府・湯布院，霧島，指宿である。九州の温泉地帯は主要な地熱帯でもあり，地熱変質帯の分布をもって温泉余土の分布とみなすと，各地域における温泉余土の分布面積について，概略次のような値がえられる。

雲仙地域(雲仙)：0.5 km²
阿蘇地域(湯の谷，垂玉—地獄)：0.5 km²
九重地域(大岳，八丁原)：3 km²
別府(鶴見・由布)地域（別府，塚原，湯布院)：25 km²
霧島地域（白馬，えびの，栗野，大霧—手浜，林田，丸尾—栗川，新湯，湯之野)：80 km²
薩南（開聞）地域（指宿，伏目)：25 km²

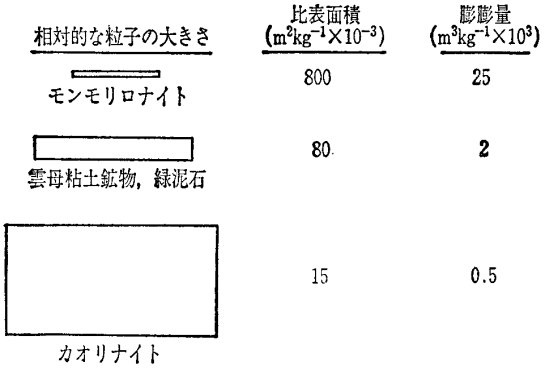
6地域合わせて約135 km²であり，九州全域（44 413 km²）に占める面積は約0.3%である。別府地域，霧島地域および薩南地域では，温泉余土の比較的広範囲な分布がみられ，土木工事上しばしば避けて通れない場合があると予想される。一方，雲仙，阿蘇，九重地域では分布も限られており，地域内での建造物の直接的な被害のほかは，それほどの影響はなさそうである。

3. 温泉余土の一般諸性質

3.1 鉱物学的性質

温泉余土は，安山岩，流紋岩，凝灰岩，集塊岩などが熱水，蒸気，硫気によって変質，粘土化したものであり，変質鉱物の生成や産状は，熱水変質作用でみられるものと基本的には同じである。岩石の熱水変質は，地熱地帯において，地熱探鉱との関連で明らかにされ[3),4)]，九州では九重地域[5)]，霧島地域[6)]，薩南地域[7)]において詳細に調べられている。詳細は文献に譲るとして，得られている結果を概括的に述べれば，酸性の熱水ではカオリナイトが主要な変質鉱物であり，強酸性では明ばん石，シリカ鉱物が生成する。一方，弱酸性ないし中性の熱水変質鉱物はモンモリロナイト，緑泥石，雲母である。

図—1に，モンモリロナイト，雲母粘土鉱物・緑泥石，カオリナイトの相対的な粒子の大きさ，比表面積，膨潤量を対比して示す[8)]。物理的，工学的な立場からみたモンモリロナイト，雲母粘土鉱物・緑泥石，カオリナイト間の性質の差は，構造型の違いに起因するc軸方向の厚さの違いによるものであり，その差が比表面積や膨潤量の違いとな



図—1 粘土の相対的な粒子の大きさ，比表面積，膨潤量

*九州大学教授 工学部水工土木学科
**九州共立大学教授 工学部土木工学科
***九州大学助教授 農学部農芸化学科
****日本道路公団大分工事事務所 構造工事長

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

って現れている。モンモリロナイトの薄膜状の形態および高い膨潤能は，相対的に低いせん断強さをもたらし，ひいては温泉地すべりの発生と密接に結びついている。

3.2 化学的性質

温泉余土の重要な化学的性質は，硫酸生成による土壌の酸性化である。粘土はそれ自身酸的性格をもち，特にアルミニウムで飽和した粘土は比較的強い酸性を示す。しかし，粘土自身に起因する酸性ではpH 4以下になることはまれであるのに対し，温泉余土ではしばしばpH 1.5～2までの低い値が報告され[9),10)]，土中に埋設したコンクリート腐食の主要な原因となっている[9)]。

硫酸の給源は，火山ガス中に含まれる亜硫酸ガス(SO_2)と硫化水素(H_2S)である。これらは空気中の酸素で酸化されたのち水と反応し，水に溶解後酸化され，あるいはH_2SO_3の自己酸化還元反応により，硫酸を生成する[11)]。生成した硫酸は周囲の岩石と反応して明ばん石 $\{(K\cdot Na)Al_3(SO_4)_2(OH)_6\}$ を形成し，シリカ鉱物をあとに残す。

温泉余土中の硫酸のもうひとつの給源は硫化物である。例えば黄鉄鉱(FeS_2)は，化学的にあるいは微生物的に酸化され，次のように硫酸を生成する。

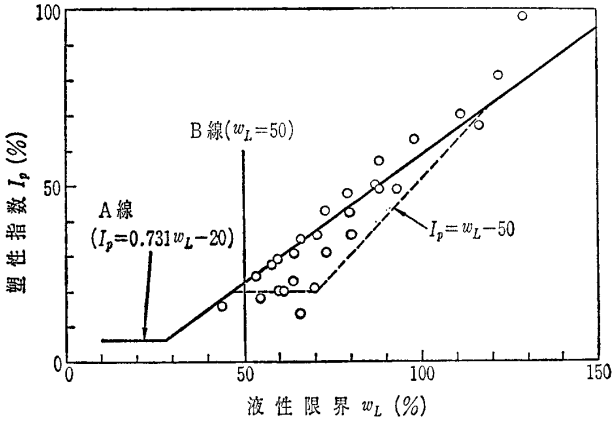
$$FeS_2+\frac{15}{4}O_2+\frac{7}{2}H_2O\longrightarrow Fe(OH)_3+2\,SO_4^{2-}+4\,H^+$$

黄鉄鋼の酸化に起因する土壌の酸性化は，温泉余土に限らず，石炭採掘に伴って排出されたぼた[12)]や酸性硫酸塩土壌[13)]においても広くみられ，土木・建築上あるいは農業上の重要な問題となっている。

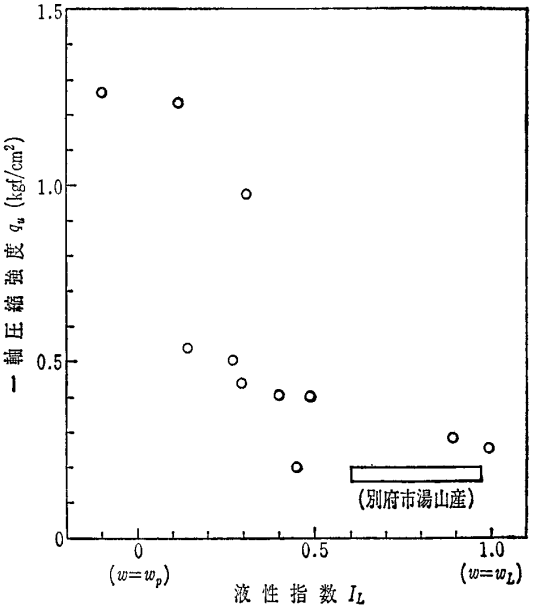
3.3 物理的，力学的性質

前述のように，温泉余土では，変質条件に応じて種々の粘土鉱物が生成される。そして，変質鉱物に対応して，明ばん石帯では酸性による被害が大きく，カオリナイト帯では酸性に加えて地盤の軟弱性が問題となり，モンモリロナイトを主とする地帯では軟弱性に加えて温泉地すべりや膨張性押出しによる地圧の発生が予想される。したがって，温泉余土の工学的性質を論じる場合には，鉱物学的，化学的性質も併せて検討しておくことが望まれる。

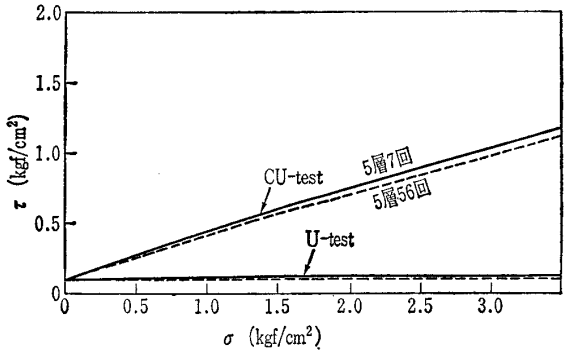
九州に分布する温泉余土については，別府地域において，温泉地すべり対策や高速道路建設のための調査が行われている[10),14),15)]。この地域の温泉は酸性泉であり，調べられている温泉余土の主要粘土鉱物はカオリナイトである。塑性図を**図—2**に示す。ほとんどの試料がB線の右側で，かつA線沿いでA線の上，およびA線と点線($I_p=20$ならびに$I_p=w_L-50$)に囲まれた範囲に分布しており，CHおよびC'Hに分類される粘土である。明ばん地すべり地内の地表面付近でシンウォールチューブを用いて採取された試料の一軸圧縮強度q_uと液性指数$I_L(=(w-w_p)/I_p)$の関係を**図—3**に示す。自然含水比が塑性限界w_pにほぼ等しい液性指数$I_L=0$付近を除くと，一軸圧縮強度は0.2～0.5 kgf/cm²程度と小さく，また，自然含水比が液性限界w_L



図—2 温泉余土の塑性図



図—3 一軸圧縮強度と液性指数の関係（別府市明ばん地すべり地内の地表面付近試料）

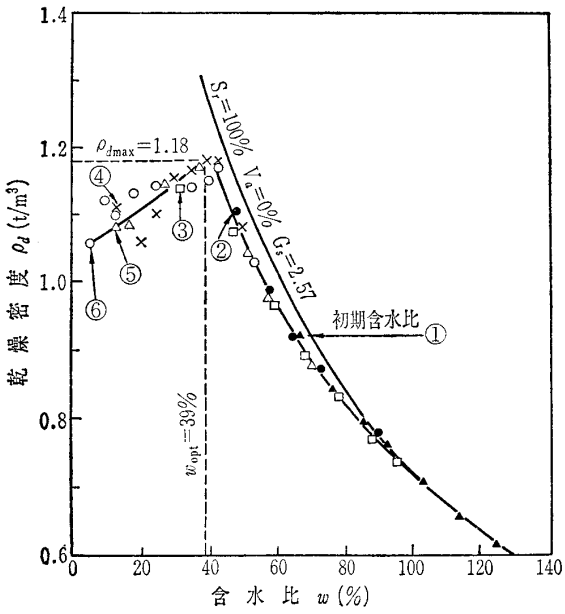


図—4 三軸圧縮試験による破壊包絡線（別府市湯山産試料）[10)]

に近い値を示す場合もある。別府市湯山産の温泉余土(pH=1.8～2.0，主要粘土鉱物はカオリナイトで9～21%含有)について，自然含水比状態の試料をモールド内で2.5 kgランマーにより5層7回および5層56回で締め固めた供試体の三軸圧縮試験(U-testおよびCU-test)結果を**図—4**に示す。U-testでの強度はかなり小さく，この結果を前述の明ばん地すべり地内の試料と比較すると，**図—3**中に示すようになり，さらに悪い非排水強度特性を示す。しか

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society



図—5 試験開始時の初期含水比が締固め結果に及ぼす影響[10]

し，CU-test の結果によれば，圧密によってかなりの強度増加は期待できる。なお，締固めエネルギーの差による強度の差がほとんどみられないのも特徴的である。また，練返し後の強度の経時変化を CBR 試験とコーン指数試験によって調べた結果によると，温泉余土では，関東ロームや灰土などの火山灰質粘性土でみられるようなシキソトロピー効果による強度の増加をほとんど期待できないことが示されている。図—5 は別府市湯山産試料について，締固め時の初期含水比を変えて行った締固め試験の結果である。火山灰質粘性土でみられる初期含水比による締固め曲線の相違はなく，一般の砂質土のように試験開始時の初期含水比が変化しても同一の締固め曲線が得られ，乾燥密度による締固めの管理が可能であるとされている。また，主要粘土鉱物がカオリナイトの温泉余土については，自然含水比状態で締め固めた供試体の吸水膨張量はそれほど大きくないことが指摘されている。

温泉余土は変質条件によって性質がかなり異なり，工学的諸特性値のばらつきも大きい。このための工事に際しては，土質性状の慎重な把握が望まれる。

4. 温泉余土地帯におけるコンクリートの劣化と一般的な対策工

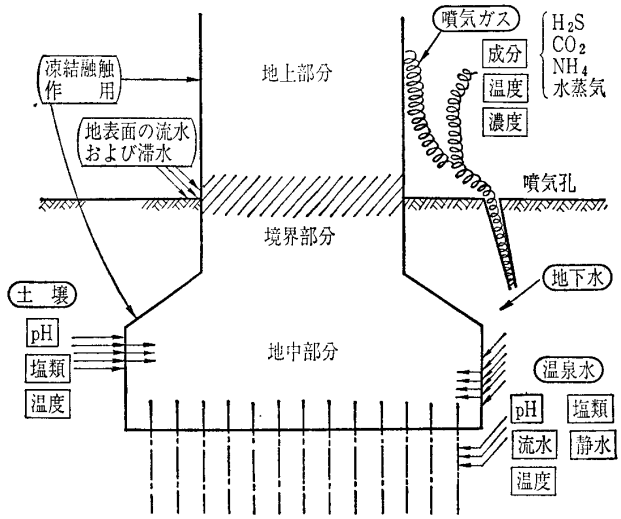
4.1 コンクリートの劣化要因

岩石が熱水，蒸気，硫気などの作用によって変質粘土化され，いわゆる温泉余土が生成されるような地帯では，当然ながら，コンクリートも化学的な変化を受け，なんらかの劣化を起こす。

コンクリートの劣化の要因として，温泉余土地帯特有のものとしては，次のようなことが考えられる。

① 土壌の含有成分による化学的侵食作用

② 地熱によるコンクリートの温度応力の発生および化学的侵食の促進



図—6 温泉余土地帯のコンクリート構造物の劣化要因

図—6 は，一般的なものも含めた温泉余土地帯におけるコンクリートの劣化要因のモデル図を示したものである。

4.2 コンクリートの劣化機構

前述したように，温泉余土地帯では，土壌の pH は酸性を示し，また，土壌中には，硫酸イオンを多量に含有する。これらの影響のため，コンクリートは劣化する。

ポルトランドセメントの水和生成物中には，強アルカリ性の水酸化カルシウム $Ca(OH)_2$ が多量に存在するので，当然ながら，酸に接すると中和反応を起こし，その結果として塩を生成する。コンクリートは，これらの塩の溶出や結晶化によって侵食・崩壊するほか，強酸に接する場合には，コンクリート中の水硬性化合物であるアルミン酸カルシウムやケイ酸カルシウムまでも分解する。

一方，硫酸塩は次式に示すように，セメントの水和によって生じた水酸化カルシウムと反応して，硫酸カルシウム(石膏)を生成し，これがコンクリートの表面を軟化させる。

$$Ca(OH)_2+Na_2SO_4\cdot10H_2O \rightarrow CaSO_4\cdot2H_2O+2NaOH+8H_2O$$

更に，この石膏がセメントの水硬性化合物の一つであるカルシウムアルミネート(C_3A)と次式に示すように反応して，カルシウムサルホアルミネート（エトリンガイトともいう）の大きな結晶を生成するため，そのときの大きな体積膨張によってコンクリートは著しい損傷を受け，崩壊する。

$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot12H_2O+3(CaSO_4\cdot2H_2O)+13H_2O \rightarrow 3CaO\cdot Al_2O_3\cdot3CaSO_4\cdot31H_2O$$

このほか，鉄筋コンクリート構造物が硫酸性地盤中にあれば，コンクリートの中性化速度が大きくなるため，鉄筋が発錆しやすい。また，例え鉄筋の周囲のコンクリートが中性化を起こしてなく，アルカリ性を保持している場合でも，コンクリートの配合が貧配合であるほど，内部に埋め込まれている鉄筋が，硫酸塩の影響により，電気化学的に，早期に発錆することもあることが報告されている。このよ

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

表—1 九州の温泉余土地帯におけるコンクリート構造物の被害例

	別府温泉			雲仙温泉	霧島温泉(I)	霧島温泉(II)(新湯)	霧島川(みょうばん)
	塚原温泉	明ばん温泉	堀田温泉				
泉質	含みょうばん緑ばん酸性泉	酸性硫化水素泉	単純泉	硫黄泉	おおむね硫化水素泉，一部食塩泉緑ばん泉	—	—
pH	1.75	2.25	6.60	2.1	6.2	3.08	3.75
泉温	62℃	82℃	54℃	90℃	66.3℃	80℃	34℃
Cl^- (ppm)	0.49	1.07	16.70	18.93	6.727	4.26	21.54
SO_4^{2-} (ppm)	3700	550	63	1075.1	52.84	53.9	294
HCO_2^- (ppm)	0	0	204	—	160.9	—	—
H_2S (ppm)	0.34	6.05	0.88	—	12.06	—	—
被害例	塚原地区の砂防堤などでは低pHの流水の影響により泉源水槽よりも侵食が激しい。	明ばん橋，および各泉源地の水槽，マンホールは硫酸塩による化学的侵食もさることながら，かなりのスピードで物理的侵食を受けている。	2年間の浸漬試験では侵食深さ（消先深さ＋中性化深さ）は1mm程度で，ほとんどコンクリートの侵食は見られない。	清七地獄の前のコンクリート舗装道路は噴出するガスと熱と亜硫酸ガス蒸気のため，ぼろぼろに侵されている。	コンクリートの外観はあまり変化しないが内部中性化は早く，普通5年ほどで中性化が鉄筋に達する。	風呂その他のコンクリート構造物にひび割れ，石膏およびセメントバチルスと思われる白い粉をふいたものが見られた。	床固めコンクリートの流水部分は2～3年で赤褐色に変化し，骨材が現れている。

うに，温泉余土地帯の場合，鉄筋コンクリート構造物に対しては，単にコンクリートのみの劣化のほかに，内部の鉄筋の腐食が助長されることがあることに注意しなければならない。

また，温泉余土地帯では，地熱によりコンクリート構造物に温度応力が発生し，これによってコンクリートにひび割れが発生し，構造物の機能を低下させたり，ひび割れ発生部から硫酸塩が浸透し，コンクリートの劣化を助長する。

4.3 温泉余土地帯のコンクリート構造物の被害例

九州における温泉余土地帯のコンクリート構造物の被害例を，過去の報告からとりまとめて表—1に示す。

4.4 コンクリート構造物の劣化防止対策

温泉余土地帯のコンクリート構造物の劣化対策としては，図—7に示すように種々の対策工が考えられる。以下，それぞれについて簡単に列記すると，

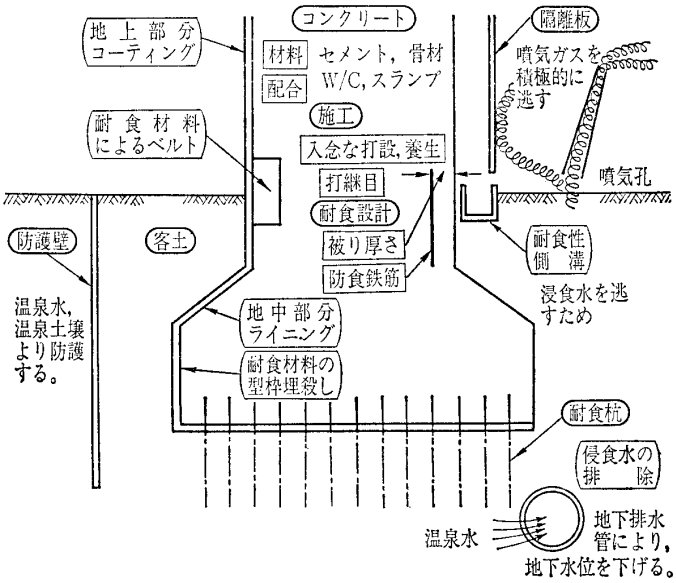
① 密実で耐食性のあるコンクリートによって有害成分の浸透や侵食作用を防止するため，耐酸性セメントあるいは高炉セメントを使用した水セメント比の小さい粗骨材の最大寸法の小さい配合のコンクリートとする。

② 十分な被り厚さを確保し，鉄筋の防食に配慮する。

③ コンクリートの施工においては，コンクリートに欠陥部を作らないように配慮して施工する。しかも，適当な養生によって十分な強度を発現させ，ひび割れの発生防止に努める。

④ コンクリートの打継目は弱点部になりやすくなるため，できるだけ継目の数を少なくし，特に，地表面付近では劣化速度が大きいことから，この部分に打継目を設けない。一般には，この地表面付近から上下それぞれ50cmの区間は水平打継目を避けることが必要である。

⑤ コンクリートの表面にライニング，コーティングを施し，温泉余土と遮断し，硫酸塩のコンクリートへの浸透を防止する。



図—7 温泉余土地帯のコンクリート構造物の劣化防止対策

⑥ 地下水位を基礎より低下させたり，地表流出水を側溝などで排除し，硫酸塩を含む地下水が直接コンクリート部と接しないようにする。

5. 温泉余土地帯における基礎工事例

温泉余土地帯における大型基礎構造物の工事例として，現在工事中の大分自動車道別府橋の橋台工事がある。別府橋は，大分県別府市の北西，いわゆる“地獄”と呼ばれる明ばん温泉に隣接しており，幅600mの大きなU字谷を高さ50mで通過する橋長411mのコンクリートアーチ橋である。ここでは，基礎底面寸法が44m×35mの起点側アーチアバットの基礎地盤の検討例[16),17)]を紹介する。

5.1 地形・地質の概況

本橋架設位置は主要地方道別府院内線に沿った谷あいの平坦地とこれに続く丘陵斜面部から成り，標高300～330m

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

である。付近には古くから湯治場として知られている明ばん温泉，鉄輪温泉がある。地質は新世代第四紀洪積世の山陰系火山噴出物が主体で，表層部に扇状堆積物および崖錐堆積物が堆積している。山陰系火山岩は角せん石と輝石を多く含有する安山岩と凝灰角礫岩より成り，侵食，堆積を繰り返して複雑な地層構成をなしている。また，明ばん，鉄輪温泉に沿った位置には温泉変質帯があり，地層の境界に沿って変質が進行している。この温泉腐食作用によって地盤は弱化し，粘土化した地層が深部にも存在し，複雑な地質構成をいっそう複雑なものにしている。**口絵写真—8**はこのような地層断面を示すものである。

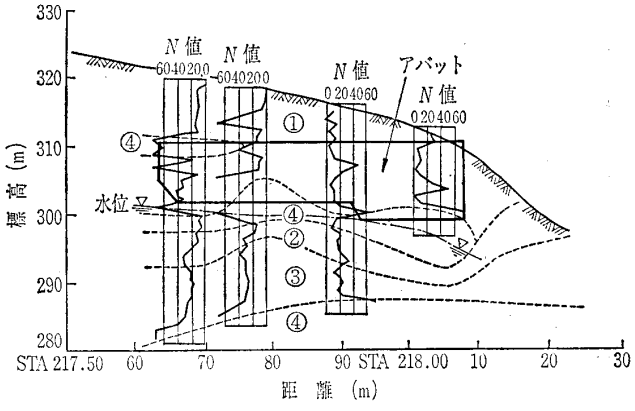
5.2 地層の区分

本アーチアバットの設置位置の地層は，前述のように，角せん石，輝石安山岩と各々の凝灰角礫岩より構成されているが，いずれも温泉作用により著しく変質している。また、3. でも述べたように変質条件によって生成される粘土鉱物は異なり，工学的性質も異なるために，岩種によって地層の区分を行った場合には土性値のばらつきが非常に大きくなる。そこで，N値をもとにして，地層を次の4種に分類し，検討がなされた。

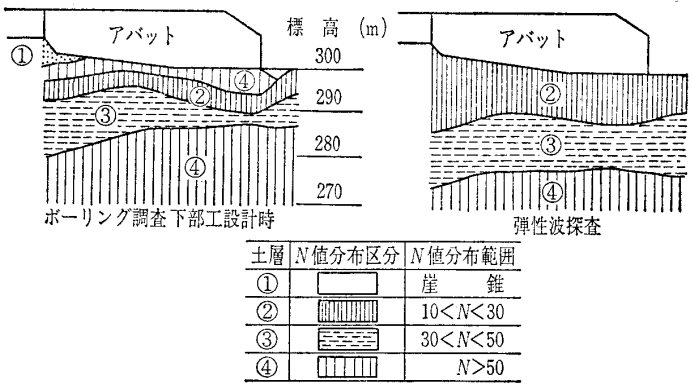
土性①：崖錐　　土性②：$10<N<30$

土性③：$30<N<50$　　土性④：$N>50$

図—8は本アーチアバットの縦断方向センター位置におけるN値の分布と，上記分類に従う地層区分を示している。$N>50$の基盤は地表面下30～50mの位置にあり，岩質的にも基礎の支持層としては信頼性はあるが，50℃前後の高温地であるとともに，地表面下20m付近に存在する温泉脈を遮断する可能性があるために，支持層とするには不可能と判断され，下部構造の設計時点では中間の土性④層を支持層とすることにされた。しかし，地層構成が極めて複雑であり，また，本アーチアバットの基礎断面積が1 540 m²という大型であるために，基礎全体の地層構成を把握するために，弾性波探査と電気探査が実施された。その結果，アバット直下の基礎地盤の弾性波速度は4つの層に大別でき，各速度層の境界面は起伏が少なく，調査範囲でほとんど平坦とみなせることが分かった。**図—9**はこれらの調査結果



図—8 アバット設置地点のN値の分布と地層の区分



土層	N値分布区分	N値分布範囲
①		崖　錐
②		10<N<30
③		30<N<50
④		N>50

図—9 アバット設置地点の地層区分

を総合的に判断して決められた地層区分であり，基礎地盤としての最終的な評価は基礎構造施工段階で試験，調査を実施して行われることにされた。

5.3 支持力および変位量の検討

本アバットの掘削を終了した段階で，原位置において実施された調査，試験結果に基づき，**表—2**に示す土質定数が決定された。その決定法の詳細については省略するが，参考のために，用いられた試験，調査名を表中の最下欄に示す。

基礎床付地盤の状況の一例を**口絵写真—9**に示す。当初からの予想どおりかなり変質を受けた地盤であり，基礎底面下は変質を受けた粘性土のまわりに未変質の岩塊が点在しており，地盤構成はかなり不均質である。

支持力の検討では，安全側にみて，この未変質の岩塊の影響を無視し，比較的軟質な②層が支持層全体にあるものと仮定した。基礎地盤を②層の単一地盤とした場合と，②層と③層の複合地盤とした場合についての静力学的公式による検討の結果，鉛直支持力には問題がないことが確認された。また，水平方向支持力およびすべりについても所要の安全率が確保できることが確かめられた。しかし，基礎の変位は避けられないため，土のクリープ特性を考慮して，上部構造の応力に影響する変位量の推定がなされた。変位量の算定には，**表—2**に示した土質定数値を用い，土のクリープ特性を考慮できる粘弾性FEM解析によった。得られた解析値を上部構造の支点移動量として詳細設計に反映するとともに，施工にあたっては，アバット下面に沈下計，土圧計を配置して動態観測を行い，実際の沈下量を確認しながら施工が進められた。アーチアバット完了時点での沈下量は計算値の1/2～1/3程度であったが，この差の原因としては，

1) 解析では無視した粘性土中の岩塊の影響が想定以上に大きかったこと。
2) 粘性土層（②層）の変形係数の決定に際し，平板載荷試験，孔内載荷試験，三軸圧縮試験，標準貫入試験の4種の方法より得られた値のうち，安全側にみて，

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

表—2 原位置での調査，試験により決定された土質定数

対象土層	単位体積重量 γ_t (tf/m³)	せん断定数 c (tf/m²)	せん断定数 ϕ (°)	ポアソン比 ν	変形係数 E (kgf/cm²)	体積圧縮係数 m_v (cm²/kgf)	クリープ特性 クリープ係数 α	クリープ特性 遅延係数 β (1/d)
② 層	1.75	7.9	17	0.45	435	8.76×10^{-3}	0.540	0.134
③ 層	2.00	8.5	20	0.40	1300	—	0.540	0.134
④ 層	2.20	10.0	40	0.35	4500	—	—	—
利用された調査，試験法	室内密度試験	三軸圧縮試験 平板載荷試験 標準貫入試験 ブロックせん断試験		弾性波探査	平板載荷試験 孔内載荷試験 標準貫入試験 三軸圧縮試験	繰返し圧密試験	原位置クリープ試験 室内三軸クリープ試験	

表—3 腐食環境区分

腐食環境区分			Aランク（非常に厳しい）	Bランク（厳しい）	Cランク（穏やか）	Dランク（通常）
コンクリート腐食程度			非常に大きい	大きい	小さい	ない
腐食要因	酸性度 (pH)		4以下	4～5	5～6	6以上
	硫酸イオン(SO_4^{-2})濃度	土中	0.5% 以上	0.5～0.25	0.25～0.05	0.05%以下
		水中	2000 ppm 以上	2000～1000	1000～200	200 ppm 以下

最も小さい値を採用したこと。

などによるものと考えられる。

5.4 コンクリートの腐食対策

温泉地帯における基礎構造物建設の大きな問題の一つとして，コンクリートおよび内部鋼材の腐食がある。本橋の建設にあたり，コンクリート構造物の設計，施工の基礎資料を得る目的で，種々の腐食環境調査の実施とともに，約10年間，現地において腐食試験が行われた(**口絵写真—10**)。その結果，コンクリートの腐食は酸性度と暴露期間に比例して進行し，特に地表面上50 cmから地表面下100 cmの範囲で著しいことが分かった。これらの調査結果の分析，検討に基づき，**表—3**に示すように腐食要因の程度によって腐食環境区分がなされ，それぞれの区分に応じて，**図—7**に示した一般的対策工のうち，コンクリートによる増厚工法と防食材工法の組合せで対策工が講じられた。

なお，昭和60年9月に着工された別府橋工事は，下部工工事をすべて完了し，現在，アーチリングの張出し施工が行われている。基礎地盤の変位も予想を下回る量になっており，特に問題もなく順調に工事が進んでいる。

6. あとがき

九州には多くの火山系列が相交錯し，活火山が多く，地熱帯がよく発達している。このような地帯では地下深所より熱水溶液が上昇し，温泉となって湧出している。本文では，九州の代表的温泉地の一つである別府地域において，高速道路建設に伴って行われた調査結果を主に参考にし，温泉余土の一般的性質，コンクリートの劣化機構とその対策工について述べ，さらに現在建設中の別府橋アーチアバットの基礎地盤の検討例を紹介した。

九州では道路や新幹線など九州を縦横断する土工事が今後とも予定されており，温泉地帯における工事も増えてくるものと予想される。それらに伴い様々な温泉余土の性質が明らかにされていくものと期待される。

参考文献

1) 粘土ハンドブック：技報堂出版，p.944，1967.
2) 大木靖衛：温泉余土—温泉と粘土鉱物—，土と基礎，Vol.23，No.9，pp.63～64，1975.
3) 柳本 裕・木谷清一・指宿敦志：粘土ハンドブック(第二版)，Ⅲ.4.2. 地熱探鉱と粘土鉱物，技報堂出版，pp.1018～1039，1987.
4) 林 正雄：地熱帯の粘土鉱物と産状，鉱物学雑誌，Vol.17，特別号，pp.9～16，1986.
5) Hayashi, M.: Hydrothermal Alteration in the Otake Geothermal Area, Kyushu, J. Japan Geoth. Energy Assoc., Vol.10, No.3, pp.9～46, 1973.
6) 山崎達雄・林 正雄・田口幸洋：霧島地熱地域の地質と変質分帯に関する研究—とくに調査1，2号井について—，九州電力株式会社総合研究所研究期報，Vol.49，1978.
7) 吉村雄三郎・柳本 裕・中込 理：鹿児島県伏目地区の地熱構造について，地熱，Vol.22，No.3，pp.167～194，1985.
8) Yong, R. and Warkentin, B.P.: Soil Properties and Behaviour, Elsevier, pp.46～48, 1975.
9) 七沢和男：別府温泉におけるコンクリートの腐食試験について，日本道路公団第20回業務研究発表会，pp.769～773，1978.
10) 大住明夫・今川史郎：温泉余土の土質工学的特徴について—主として室内試験結果の示唆する問題点—，日本道路公団試験所報告，pp.14～27，1976.
11) 岩崎岩次：火山化学，講談社，pp.101～102，145～146，1970.
12) 落合英俊・松下博通・林 重徳：硫酸イオンを含む地盤における住宅基礎，土と基礎，Vol.34，No.6，pp.45～50，1986.
13) 久馬一剛：東南アジア低地の土壌—その1 マングローブ下の堆積物に由来する土壌—，東南アジア研究，Vol.20，No.3，pp.405～424，1982.
14) 三嶋信雄・小林 勝：湯布院・明ばん地区の温泉余土に関する試験報告，日本道路公団第18回業務研究発表会，pp.188～192，1976.
15) 大分県土木部砂防課：明ばん地すべりの調査と工事，1969.
16) 高速道路技術センター：九州横断自動車道湯布院～大分間コンクリート構造物の温泉腐食対策調査研究報告書，1984.
17) 日本道路公団大分工事事務所：九州横断自動車道明ばん橋基本詳細設計総括報告書，1985.

(原稿受理 1987.12.23)

NII-Electronic Library Service