

(126) 岩石質材料の原位置曝露試験

建設省土木研究所 正会員 ○ 矢萩賢仁
同 同 豊田光雄
同 同 中村 昭

In-situ Exposure Test for Deterioration of Rockfill Materials

Takahito YAHAGI, Public Works Research Institute, MOC
Mituo TOYODA, Public Works Research Institute, MOC
Akira NAKAMURA, Public Works Research Institute, MOC

Abstract

It is sometimes difficult to find good rockfill materials in construction of fill dams, although an intensive search should be made to obtain the best possible rock within reasonable distance from the dam. In case of poor quality rocks, their deterioration properties are of importance.

The authors conducted in-situ exposure test for compacted rock embankment and rock particles for altered Mesozoic green schist up to the 2,410 days. The rock particles being subjected to dry and wet cycles at the surface of embankment show more deterioration as the result of decrease of dry density, point loading strength and dynamic modules of elasticity, in comparison with particles in the surrounding of narrow temperature range and loading of confining pressure. In contrast to this, both the X-ray diffraction and cation exchange chromatography (CEC) data are not very much change in this exposure test period.

1. はじめに

ゾーン型ロックフィルダムの堤体は、遮水性ゾーン・半透水性ゾーン・透水性ゾーンで構成される。このうち透水性ゾーンはフィルダム堤体の力学的安定を分担しており、材料としては、堅硬で強度が大きく排水性が良く、かつ、耐久性がある岩石質材料（ロック材料）が望ましい。しかし、近年ではダム近傍に良好な材料が得られないダムサイトが増加しており、材料の有効活用を図る観点から、その劣化特性を把握し、耐久性に関する評価基準を確立していく必要がある。

岩石質材料が劣化する要因としては、温度変化、凍結融解、水浸・乾燥の繰返し、拘束応力、表面の日射や風雨などが考えられる。筆者らは、フィルダムに用いる材料の経時的劣化の可能性を既設ダムの劣化事例等により整理検討し、劣化に関する試験法を提案した¹⁾。さらに、岩石質材料に乾湿状態を繰返し与えることによって、材料の重量損失・強度の変化と飽和度・拘束圧の関係を室内試験によって検討した^{2), 3)}。本報告は、粘土鉱物を含む岩石質材料（緑色片岩）を用いて7年間にわたる原位置曝露試験を実施し、各種の環境条件が劣化に与える影響を岩石質材料の劣化度形態、粒度、重量損失、点載荷圧裂強度、超音波伝播速度、含水量、粘土鉱物の含有量などの変化に着目して検討したものである。

2. 曝露試験の概要

(1) 試験材料

試験には、中生代の名護累層に属する緑色片岩を用いた。表-1に示す試験材料の平均的物性値より、緑色片岩は、比重、吸水率および一軸圧縮強度からはフィルダムの岩石質材料として十分適用できるが、締固めによる粒子破碎が顕著であり、コンクリート骨材の基準値では安定性・耐久性に劣る材料と判断される。

(2) 曝露環境

曝露試験は、締固めたを盛土を用いた盛立曝露試験、材料の要素試験として粒子および岩塊を自然環境下に曝露する小規模曝露試験および岩塊曝露試験に分けて実施した。いずれの曝露試験も7年間、2,410日間にわたって実施し、経時的に観察・試験を行った。

- ① 盛立曝露試験：緑色片岩で図-1に示す盛土を築造し曝露した。転圧後の盛土の水置換法による密度 γ_d は2.22~2.26tf/m³、間隙比 e は0.30~0.32である。また、粒度および重量損失の経時変化を把握するために、事前に粒度調整をおこなった試料を網カゴに入れて天端面に埋め込んだ。盛土には天端面表層、深度0.5mおよび1.0mに温度計を埋設し温度変化の経時測定を行った。地中温度は気温に連動して年変化を示すが、その変動幅は、気温14.7~37.8℃のとき、表層で14.3~52.1℃、深度0.5mで15.7~37.6℃、深度1.0mで18.0~32.5℃であり、深度が深くなると変動の幅が小さくなっている。

- ② 小規模曝露試験：粒度調整試料を粒経毎（101.6~63.5、63.5~50.8、50.8~38.1、38.1~25.4、25.4~19.1、19.1~9.52、9.52~4.76mm）に図-2に示す試験容器に入れて曝露した。また、超音波伝播速度測定用としてφ5cm×高さ10cm程度の円柱形整形供試体も曝露した。

- ③ 岩塊曝露試験：重量3~8kgの非整形の岩塊を直接地表面に置いた状態（地上試料）、地表面から高さ50cmの木製曝露試験台上に置いた状態（台上試料）および水槽内で常に水面下に置いた状態（水浸試料）の3状態で曝露した。

3. 試験結果

(1) 観察による劣化度

劣化度の判定は、土木学会の「簡易スレーキング試験における劣化度指数基準」を一部細分化した表-3の基準によった。図-3に示す盛立曝露試験では2,410日経過時点での劣化度指数3-1を示す粒子が全体の5%となるのに対して、小規模曝露試験では同時点で劣化度指数3-1を示す粒子が26%となり、排水条件が良く拘束されていない小規模曝露試験のほうが劣化の進行が促進されている。岩塊曝露試験の地上および台上での試料の劣化度指数の変化は、ほぼ同様な劣化の進行を示し2,410日経過時点で劣化度指数3-1を示す粒子が地上試料では全体の25%、台上試料では50%となり、小規模曝露試験試験よりも更に劣化の進行が促進されている。一方、図-4に示す水浸試料は台上と地上の試料に比べて劣化の進行が遅く、2,410日経過時点での劣化度指数は1-1~2程度である。

表-1 試験材料の物性値

項 目	試 験 結 果
絶 乾 比 重 Gb	2.80 ~ 2.95
吸 水 率 Q	1.5 % 以下
硫酸ナトリウムによる 損失重量百分率 P	55 ~ 83 %
ロサンゼルス試験機による すりへり減量 R	32 ~ 47 %
一軸圧縮強度 qu	350 kgf/cm ² 程度

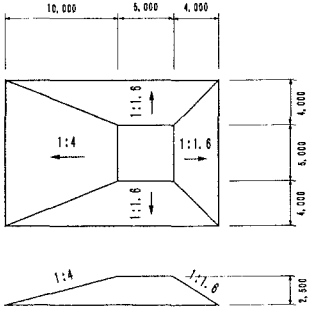


図-1 曝露試験盛土

表-2 気温と地中温の変動

測定地点	最高温度 (℃)	最低温度 (℃)	変動幅 (℃)
気 温	37.8	14.7	23.1
表 層	52.1	14.3	37.8
深度 0.5m	37.6	15.7	21.9
深度 1.0m	32.5	18.0	14.5

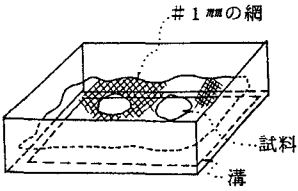


図-2 小規模曝露試験容器

表-3 劣化度指数基準

劣化度指数	形 状	状 態
0-0		変化なし。
0-1		光沢がなくなる。細く酸化する等、岩片表面の色調に変化が認められる。
1-0		部分的に鱗片状の小岩片が露き上り、小粒の小片の剥離が認められる。
1-1		潜在割れ目が明瞭あるいは開口気味となるものの、分離するまでには至っていない。
2		全体的に、小片（鱗片状）の剥離が進む。または、割れ目が開口し、小岩塊が分離する。しかし、鱗片化までには至っていない。
3-0		多数の小岩塊に分割し、原形を留めていない。
3-1		分割した小岩塊が鱗片状となり、部分的に砂～泥状化が認められる。
4		完全に砂～泥状となる。

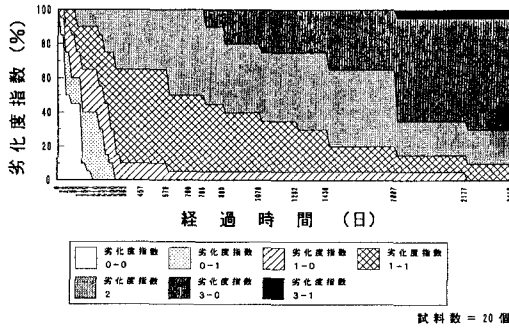


図-3 盛立曝露試験の劣化度指数

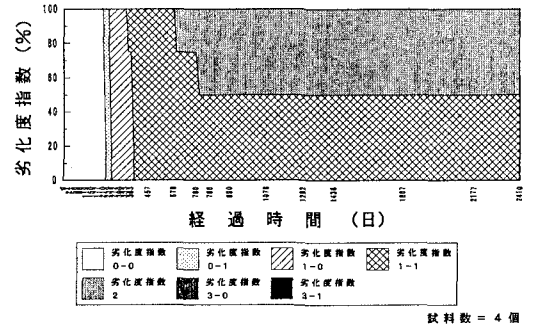


図-4 岩塊曝露試験 (水浸試料) の劣化度指数

(2) 粒度

盛立曝露試験では、調整粒度試料と盛立各面の表層試料を用い経時的に粒度試験を行った。調整粒度試料の粒度変化は図-5の粒度分布曲線に示すように、経時的に細粒側に移行している。ふるい時のエネルギーが付加され、より細粒化を促進していることも考えられるが、図-6に示す調整粒度試料のMarsalの破砕率は、2,410日経過時点で13.6%となっている。

(3) 重量損失

粒子の重量損失率は次式によって求める。図-7は、各曝露試験の重量損失率の経時変化を示したものである

$$\text{重量損失率 (\%)} = \frac{W_0 - W_t}{W_t} \times 100$$

ここに、 W_0 : 試験開始前の40℃炉乾重量

W_t : 測定時の40℃炉乾重量

る。2,410日経過時点において、盛立曝露試験および小規模曝露試験における粒子の重量損失率は20%程度であるが、岩塊曝露試験の地上試料・台上試料での重量損失率は30%程度となり、劣化度指数の傾向と同様に排水条件が良く拘束のない曝露環境においては乾湿の繰返し等による劣化の進行が促進されていることがわかる。また、以上の曝露試験の重量損失率の経時変化曲線は、なだらかな階段状を示す。この変化曲線を示す岩石の耐久性は、岩石の基質を構成する鉱物自体の劣化に加えて、岩石に含まれる亀裂の付着力に支配されているといえる⁴⁾。一方、岩塊曝露試験の水浸試料における重量損失率は、2,410日経過時点でも1%程度であり、劣化の進行は緩慢である。

(4) 点載荷圧裂強度

盛立曝露試験の天端面の表層部、深度0.5mおよび1.0m地点において、ポイントロードを用いて1回当たり20個の粒子の点載荷圧裂強度を求めた。図-8に示すように圧裂強度を7段階(0~20、20~40、40~60、60

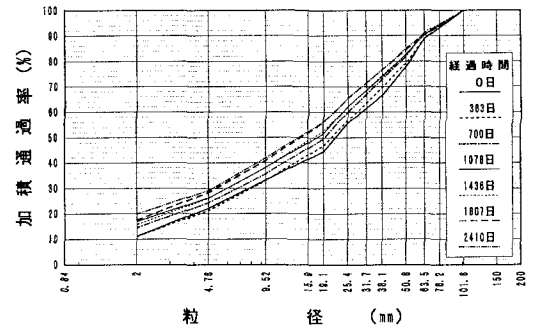


図-5 調整粒度試料の粒度変化

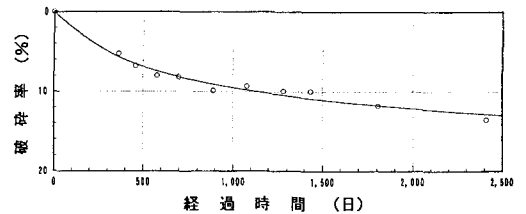


図-6 調整粒度試料のMarsalの破砕率

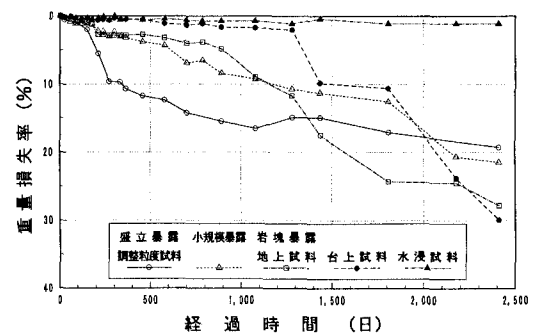


図-7 重量損失率の経時変化

～80、80～100、100～200kgf/cm²、200kgf/cm²以上)の区分に分け、その頻度から深度毎の圧裂強度の経時変化を比較した。表層部は、 $\sigma_t=10\sim60\text{kgf/cm}^2$ 間の圧裂強度を示すものが全体の56～83%を占め、時間経過と共に若干だが圧裂強度が低下する傾向が窺える。また、表層部は、深度0.5mおよび1.0m地点に比べ40kgf/cm²以下の圧裂強度の頻度が高く、岩石の強度低下が認められる。なお、深度0.5mと1.0mの圧裂強度には有意な差が認められない。

(5) 動弾性係数

超音波伝播速度より求めた小規模曝露試験における整形供試体の動弾性係数の経時変化を図-9に示す。動弾性係数は、363日経過時点までに急激に低下し初期値に対する低下率は40～70%までとなるが、それ以降は1,000日および1,400日前後経過した時点で段階的に低下し、2,410日経過時点での低下率は60～85%程度となる。動弾性係数の経時変化曲線は、重量損失率の変化曲線と同様にゆるやかな階段状の低下傾向を示している。

(6) 含水量

盛土曝露試験の天端面表層部、深度0.5mおよび1.0mの含水量の変化を図-10に示す。含水量は、次式に示す相対含水比で評価するものとした。

$$\text{相対含水比 (\%)} = \frac{\omega_{100} - \omega_n}{\omega_{100} - \omega_d} \times 100$$

ここに、 ω_n : 測定時の自然重量
 ω_{100} : 測定時の飽和重量
 ω_d : 測定時の炉乾重量

なお、炉乾燥温度は40℃と110℃で実施した。相対含水比の変化幅は、40℃炉乾重量の場合、表層部で0.3～48.9%、0.5mで0.2～31.3%、1.0mで0.5～26.1%となり、110℃炉乾重量の場合、表層部で0.3～31.4%、0.5mで0.5～17.4%、1.0mで0.2～19.0%となっている。表層部の相対含水比の変化幅に対して、深度0.5mおよび1.0mの変化幅は小さくなる傾向にある。また、相対含水比は、各曝露状態とも2,410日経過時点において0.5%以下となり、劣化の進行に伴い岩石内の亀裂等による間隙が増加していることを示している。

(7) X線回折・陽イオン交換量

粘土鉱物含有量の経時変化を定方位法によるX線回折および陽イオン交換量(CEC)試験にて求めた。陽イオン交換量試験は、乾燥試料100g当りの粘土鉱物

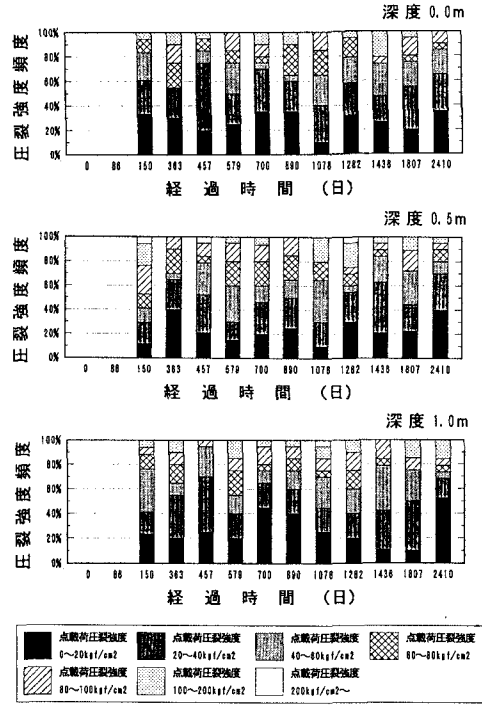


図-8 深度毎の点荷重圧裂強度の頻度分布

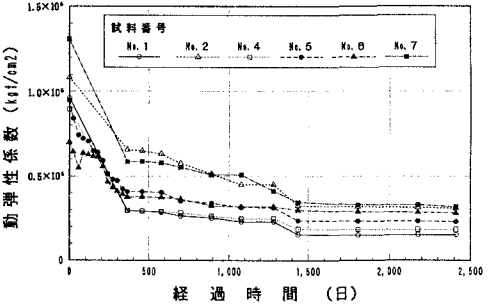


図-9 動弾性係数の経時変化

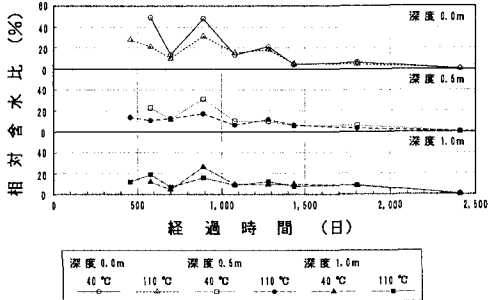
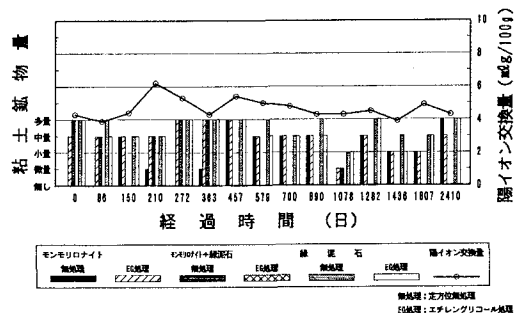


図-10 深度毎の相対含水比の経時変化

の陰イオンに反応した酢酸アンモニウムの陽イオンのミリ当量数 (mEq/100g) で粘土鉱物含有量の相対変化を求めるものである。図-11に示す盛立曝露試験、また、小規模曝露試験とも、今回の試験法では粘土鉱物の含有量の増加および新鉱物の出現も認められなかった。



4. まとめ

- (1) 表層部における盛立曝露試験、小規模曝露試験および岩塊曝露試験では、劣化度指数は3段階を示す粒子が全体の50~75%、重量損失率は20~30%に達している。小規模曝露試験における動弾性係数の低下率は85%に達している。環境条件が厳しく、拘束を受けていない条件下での劣化は著しいものがある。この条件での劣化の経時変化曲線は、なだらかな階段状を示し、劣化の進行が緑色片岩に含まれる亀裂の付着力に影響されているといえる。
- (2) 厳しい環境下である表層部に比べて、深度0.5m以深になると温度および相対含水比などの環境条件はかなり安定し、それに伴って劣化の進行も緩やかになっている。このことは、飽和度が安定するとともに、拘束圧が作用して劣化進行の速度が遅くなることを示している。また、岩塊曝露試験のうち水浸試験は、劣化度において色調の変化が認められる程度であり、その重量損失は1%程度で岩石の劣化は極めて緩慢である。粘土鉱物(モンモリロナイト)を含む岩石の室内乾湿繰返し試験による劣化は、岩石内部の飽和度が高いほど安定し、また、拘束圧が高いほど小さい^{2), 3)}。同様に、原位置曝露試験においても拘束圧がある程度ある場合や、飽和度が常に100%の場合の劣化の進行は緩慢であるといえる。
- (3) 今回の曝露試験において、粒度、重量損失、点載荷圧強度および動弾性係数などの物理的劣化を示す指標では劣化の進行形態を的確に評価できるが、X線回折および陽イオン交換量などの化学的劣化を示す指標では顕著な傾向は認められなかった。なお、動弾性係数の低下傾向は岩石の劣化特性と密接な関連を有しているが、超音波伝播速度は岩石内の亀裂等の空隙に影響がされるため、動弾性係数のみで耐久性を評価すると岩石の劣化を過大評価する可能性もある。

5. おわりに

7年間にわたる現地曝露試験の結果、岩石の劣化に及ぼす大きな要因には、岩石内部の含水量の変化、温度の変化および岩石が受けている拘束の状態が挙げられることが判明した。このことは、低質な岩石質材料でも、拘束された状態で、かつ温度等の安定した堤体内部では使用できる可能性があるといえよう。今後は、曝露試験と室内乾湿繰返し試験との関連について検討するとともに、曝露されて劣化した後の材料の集合体としてのせん断強さについて、更に研究が必要である。

参考文献

- 1) 松本徳久・渡辺和夫・豊田光雄：フィル材料の経時的劣化とその試験方法，粗粒材料の変形・強度特性とその試験方法に関する関するシンポジウム，土質工学会，pp. 157~160，1986年10月。
- 2) 松本徳久・渡辺和夫：ロック材料の長期強度特性，第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，岩の力学連合会，pp. 124~129，1984年12月。
- 3) 豊田光雄・松本徳久：ロック材料の劣化に関する室内試験，第22回土質工学研究発表会講演集，pp. 969~970，1987年6月。
- 4) 中村康夫・石塚克己：岩石の耐久性試験の比較，応用地質，Vol. 25，No. 4，pp. 21~31，1984年4月。