

風化を模擬した強制劣化試験における岩石の物性評価

河村 祥一* 嶋本 敬介* 川越 健*

Evaluation of Physical Properties of Rocks in Forced Deterioration Experiments

Shoichi KAWAMURA Keisuke SHIMAMOTO Takeshi KAWAGOE

To investigate deterioration rate of rocks, the authors conducted measurements of physical properties of naturally weathered Kimachi sandstone and forcedly deteriorated Kimachi sandstone. The naturally weathered Kimachi sandstone was obtained by boring from an excavation surface where it passed about 100 years since the last digging. From the measurement results of physical properties of the naturally weathered Kimachi sandstone, the relationships between the properties and depth or time were obtained. The forced deterioration experiments were carried out by the repetitions of drying-wetting and drying-wetting-freezing-thawing. As the experiment results, it was revealed that the ultrasonic wave speed decreases with the cycle of the curve approximated well with logarithmic function.

キーワード：岩石，風化，強制劣化試験

1. はじめに

落石，岩盤斜面の崩壊等の災害に対して，鉄道沿線の斜面では，検査により危険箇所をあらかじめ抽出することで，未然の対策を実施している。一方で，検査によりすべての災害を事前に予測することは現状で不可能であり，実際には少なからず鉄道沿線で斜面災害が発生している。災害の発生の予測が困難な一因としては，これらの検査が現状の危険箇所の抽出等，場所に基づく予測であり，いつ災害が発生するか等の時期的な予測の手法については確立されていないことが挙げられる。これらの災害の発生時期を予測するためには，風化による岩盤の強度低下速度を明らかにすることが必要である。しかし，風化は長期的に進行するものであり，自然状態における風化の進行を経時的に計測するのは困難である。

そこで，風化を模擬した乾湿繰り返しや凍結融解等の方法によって岩石を強制的に劣化させて，物理試験を行った結果が先行研究にて報告されている¹⁾。一方で，これらの強制劣化試験における，サイクル数と物性値の変化との関係については，十分に明らかにされていない。強制劣化試験の結果を実際の斜面に適用して，災害の発生時期予測に活用するためには，さらに，サイクル数を時間に換算して，物性値の変化の速度を求める必要がある。

そこで，筆者らは，乾湿繰り返し試験や乾湿凍結融解繰り返し試験の二通りの強制劣化試験を実施し，物性値の変化に関する評価を行った。ここでは，岩盤が割れ目と岩石部分で構成されると考えて，特に岩石部分の劣化

について検討することとした。本研究では，まず，大気への曝露期間が既知の来待砂岩の試料を採取し，各物性値の測定を行った。これにより，自然の風化による物性値の変化について検討を行った。次に，来待砂岩の供試体を用いて強制劣化試験を行い，サイクル数毎に物性値の測定を実施し，物性値の変化について検討を行った。また，経時的な物性の変化を評価するために，得られた試験結果と現地測定の結果から強度低下速度について検討を試みた。

2. 対象とした来待砂岩の一般的特性

強制劣化試験の各サイクルにおいて一軸圧縮試験のような破壊試験を行い，サイクルの増加に伴う物性値の変化を評価する場合，初期状態における供試体の性状や物性値が統一されていることが望ましい。特に供試体が亀裂等の力学的な不連続面を有する場合，供試体の物理的性質が，それらによって決定されてしまう可能性がある。したがって，力学的な不連続面を有さない均質・塊状の岩石が強制劣化試験の供試体に適していると考えられる。この条件に適合する岩石として，本研究では来待砂岩を使用することとした（図1）。来待砂岩は上記の性質を有するために，疲労試験や三軸圧縮試験等，様々な岩石力学的研究に用いられている実績がある^{2) 3)}。

来待砂岩は島根県松江市宍道町来待地区に産出する新第三紀中新世の凝灰質砂岩である。一般的に層理面が認められるものもあるが，試験に用いた来待砂岩のブロックの層理面は不明瞭であり，均質で等方性を有しているとみなせる。やや軟質で風化されやすく，採石直後は青みを帯びた灰色であるが，徐々に褐色を帯びていく⁴⁾。

* 防災技術研究部 地質研究室

来待砂岩の物性値については、先行研究では比重がおおよそ 2.54、一軸圧縮強さが 60-70MPa、空隙率がおおよそ 20%、十分に浸水させた場合の吸水率がおおよそ 11% と報告されている^{5) 6)}。以降で示す、強制劣化試験に先立ち、購入した来待砂岩のブロックから直径 25mm、高さ 50mm の供試体を作製し、3 供試体の各物性値の平均値を調べた。密度の平均値が 1.98g/cm³、P 波速度の平均値が 2.8km/s、S 波速度の平均値が 1.9km/s、一軸圧縮強さの平均値が 54MPa となった（表 1）。

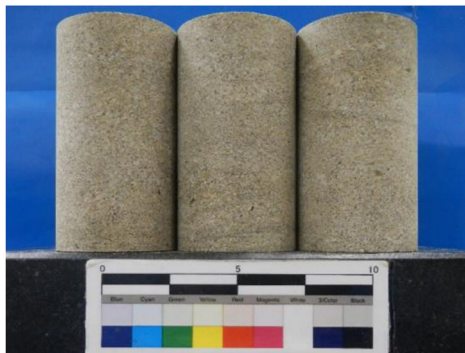


図 1 来待砂岩の外観

表 1 試験に用いた来待砂岩の物性値および鉱物組成

物性値	密度 [g/cm ³]	P波速度 [km/s]	S波速度 [km/s]	一軸圧縮強さ [MPa]
	1.98	2.83	1.86	54
鉱物組成	石英、斜長石、輝石、沸石、ス멕タイト			

3. 自然に風化した試料の測定

3.1 ボーリングと物性値の測定方法

自然の風化による物性値の変化について検討を行うため、大気への曝露期間が既知ののり面において、ボーリングによる試料の採取を実施した。ボーリングによる試料の採取は、島根県松江市宍道町東来待の採石場にて実施した。本研究では、最後の切り出しから約 100 年経過した掘削面を選定し、掘削面に対して直角方向にボーリングを実施した。この経過年数は、掘削面が風化の作用を受けた年数として解釈できる。これは、当時稼働していた採石場の掘削面は、常に新鮮な面が露出していたとの仮定に基づくものである。なお、この経過年数は、採

石場の所有者へのヒヤリングにより得た値である。

採取した直径約 4cm、長さ約 156cm のボーリングコアを長さ約 5cm ごとに切断して、測定用の供試体を作製した。作製した供試体について、自然乾燥後に、超音波伝播速度を測定した。超音波伝播速度測定は地盤工学会基準「パルス透過法による岩石の超音波伝播速度測定方法」(JGS 209)に、密度測定は「岩石の密度試験方法(ノギスを用いる)」(JGS 2123)に準じて実施した。

3.2 測定結果

約 100 年経過した掘削面から得られたボーリングコアを図 2 に示す。なお、深度は、供試体中心での掘削面からの深度を表している。ボーリングコアには、亀裂や顕著な層理は認められなかった。ボーリングコアの色彩は、掘削面表面に近い深度 0～33cm では褐色を呈する一方で、33cm 以深の部分は青灰色を呈する。褐色部と青灰色部の境界は明瞭である。

また、ボーリングコアから作成した供試体について測定した超音波伝播速度の値を図 3～図 4 に示す。図 3 に示した深度に対する P 波速度の値からは、深度 0～85cm 間では 2.7～3.0km/s の範囲に収まっており、深度に対してわずかに減少する傾向が認められる。また、深度 90cm 以深の部分での P 波速度は、3.0～3.3km/s の範囲にあり、深度約 85～90cm 間に値のギャップが認められる。一方で図 4 からは、深度に対する S 波速度の依存性は認められない。

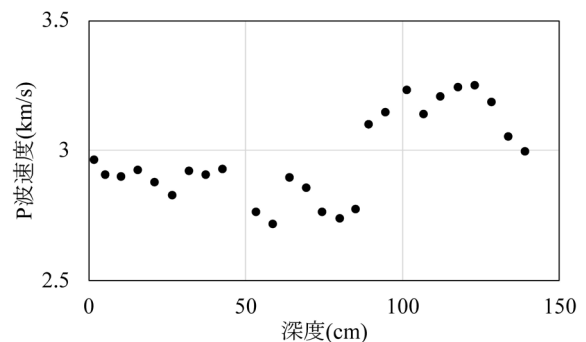


図 3 深度に対する P 波速度



図 2 ボーリングコアの写真

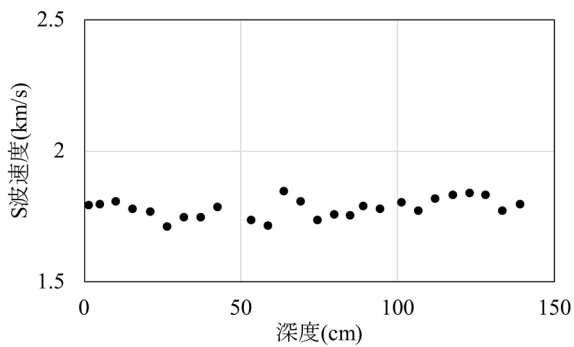


図4 深度に対する S 波速度

4. 強制劣化試験

4.1 試験方法

強制劣化試験は、来待砂岩の購入ブロックから作製した直径 50mm、高さ 100mm の供試体を用いて実施した。また、乾湿繰り返し試験および乾湿凍結融解繰り返し試験の 2 通りの方法で実施した。表 2 に、各試験の試験条件を示す。乾湿繰り返し試験は、24 時間の浸水後に 110℃、24 時間の炉乾燥を実施することを 1 サイクルとして実施した。乾湿凍結融解繰り返し試験は、24 時間の浸水後に凍結融解を行い、その後 110℃、24 時間の炉乾燥を実施することを 1 サイクルとして実施した。凍結融解については、日本工業規格「コンクリートの凍結融解試験方法」(JIS A 1148)を参考として実施した。ただし、温度管理用供試体は作製せず、試験槽内の温度による管理とした。両試験を 40 サイクルまで実施した。

強制劣化試験の 1, 2, 4, 10, 20, 40 サイクルにおいて、超音波伝播速度、乾燥質量、乾燥密度、吸水率、一軸圧縮強さ、変形係数の測定を実施し、サイクル数の増加に伴う変化を調べた。ここでは、主に物理的風化作用に焦点を当てるため、上記の物性値の測定を行うこととした。各サイクルにおける測定のタイミングについて、超音波伝播速度、乾燥質量、乾燥密度の測定は浸水前に、吸水率の測定は浸水後に、一軸圧縮強さと変形係数の測定は炉乾燥後にそれぞれ実施した。ここで、超音波伝播速度、乾燥質量、乾燥密度、吸水率についてはそれぞれ同じ供試体を用いて各サイクルの測定を行っているが、一軸圧縮強さと変形係数を測定するために行う一軸圧縮試験については、破壊試験であるため、測定を行うサイクル毎に異なる供試体を用いて実施している。

4.2 試験結果

乾湿繰り返し試験と乾湿凍結融解繰り返し試験におけるサイクル数と各物性値の関係を図 5～図 11 にまとめた。各サイクルにおける各物性値の平均値は、3 供試体から算出したものである。図 5、図 6 から、P 波速度・S 波速度ともにサイクル数に伴って曲線的に減少する傾向が認められる。サイクル数が小さいほど、サイクル数の増加に伴う超音波伝播速度の減少量は大きく、サイクル数の増大に伴ってその量は小さくなる。一軸圧縮強さと変形係数についても、図 7～図 8 からサイクル数の増加に伴って減少する傾向が認められるが、超音波伝播速度の結果と比べると、値のばらつきが大きい。これは、一軸圧縮強さや変形係数の測定では、測定するサイクル毎に異なる供試体を使用していること等が原因となったと考えられる。また、図 9 において、20 サイクルまではサイクル数の増大に伴って乾燥質量が増大する傾向が認められるが、20 サイクルから 40 サイクルにかけては転じて減少している。乾燥密度は、図 10 からサイクル数の増大に伴って減少する傾向が認められる。吸水率は、図 11 から基本的にサイクル数の増大に伴って増大する傾向が認められるが、乾湿凍結融解繰り返し試験の場合のみ、20 サイクルから 40 サイクルにかけて減少する傾向が認められた。

乾湿繰り返し試験と乾湿凍結融解繰り返し試験との間の傾向を比較すると、一軸圧縮強さ、変形係数、乾燥質量、乾燥密度においてほとんど差異が認められない。P 波速度、S 波速度、吸水率については、20 サイクルから 40 サイクルの比較的多くのサイクルを経た後の段階において差異が表れている。特に P 波速度、S 波速度については、乾湿凍結融解繰り返し試験において、より顕著な減少が 20 サイクル以降で認められる。

以上の結果から、強制劣化試験において P 波速度、S 波速度、一軸圧縮強さ、変形係数、乾燥質量、乾燥密度、吸水率は全て、サイクル数の増加に伴って変化するといえる。ただし、乾燥質量は、岩石の劣化が進むことで、粒子の流出や鉱物の溶解が進み、減少することが期待されるが、反して試験結果では増大している。このことについては、鉱物の酸化や吸水時に使用した水中の水溶性成分が析出して残留した等の理由が考えられる。したがって、乾燥質量の変化については、強制劣化試験における岩石の劣化以外の要素が及ぼす影響を考慮する必要があると考えられる。これは、乾燥質量を用いて算出される乾燥密度、吸水率についても同様である。

表 2 各強制風化試験の試験条件

試験種別	1サイクルの内容
乾湿繰り返し	密度・超音波伝播速度測定→吸水(24h以上)→吸水率測定→炉乾燥(110℃, 24h)→室温養生
乾湿凍結融解繰り返し	密度・超音波伝播速度測定→吸水(24h以上)→吸水率測定→凍結融解→炉乾燥(110℃, 24h)→室温養生

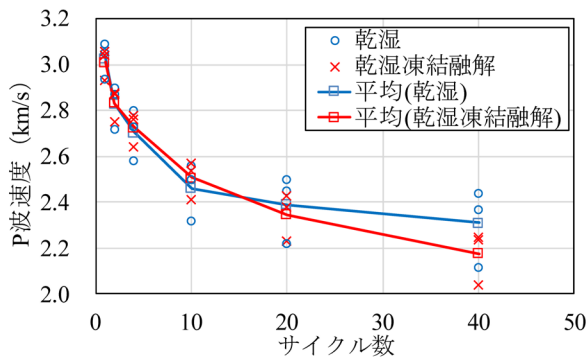


図5 強制劣化試験における P 波速度の測定結果

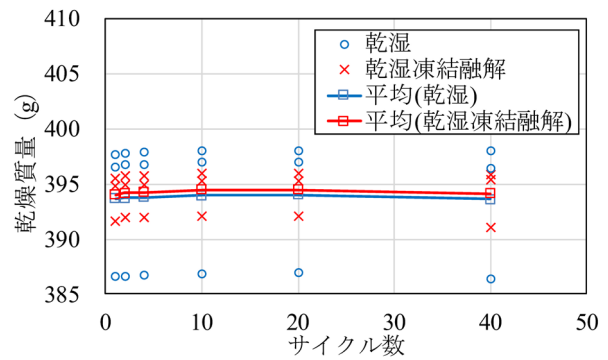


図9 強制劣化試験における乾燥質量の測定結果

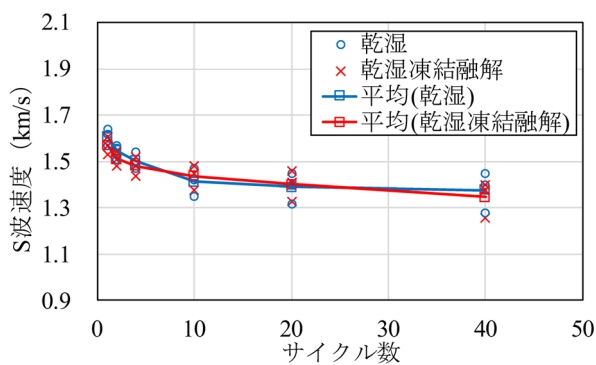


図6 強制劣化試験における S 波速度の測定結果

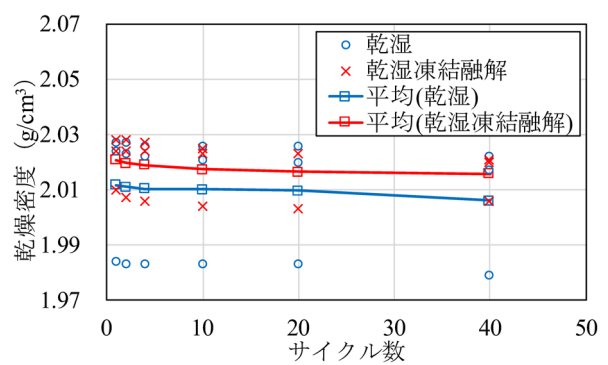


図10 強制劣化試験における乾燥密度の測定結果

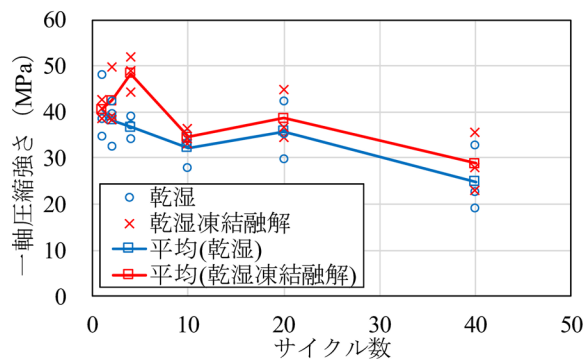


図7 強制劣化試験における一軸圧縮強さの測定結果

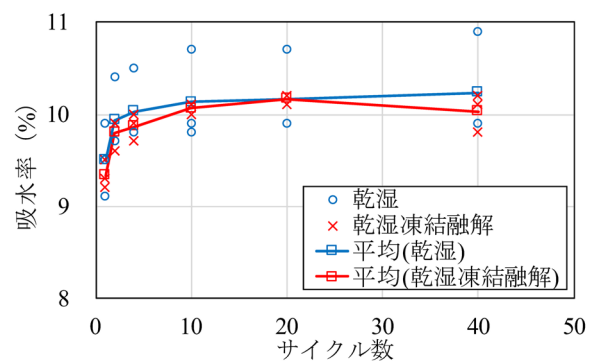


図11 強制劣化試験における吸水率の測定結果

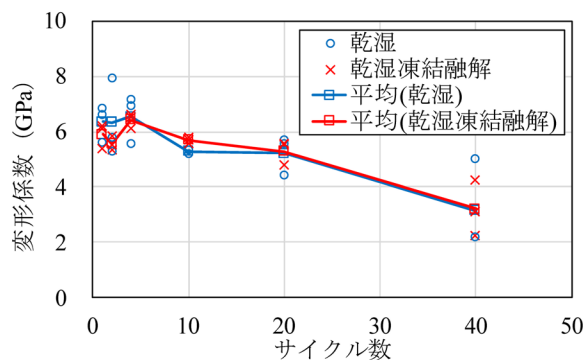


図8 強制劣化試験における変形係数の測定結果

5. 経時的な物性値の変化に関する評価

5.1 サイクル数に対する P 波速度の変化について

強制劣化試験の結果から、サイクル数に対する物性値の変化の速度を概算することを試みる。ここでは、4章の試験結果より、サイクル数に対して滑らかな変化を示した P 波速度を取り上げて議論を行うこととする。

まず、先行研究から、サイクル数と P 波速度の関係を推定する。Sunamura は、自然における風化作用のもとで、微小時間 Δt における強度低下 ΔS はその時点での強度 S と非負の係数 k を用いて式 (1) で表すことができると仮定した⁷⁾。

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = -kS \quad (1)$$

ここで、 $t=0$ における強度の初期値を $S=S_0$ とすると、強度の低下速度は式 (2) で表すことができる。

$$S = S_0 \exp(-kt) \quad (2)$$

さらに、強制劣化試験における、サイクル数に対する強度低下速度を考える場合、強制劣化試験におけるサイクル数 N と再現する風化時間 t が線形関係にあるとすれば、非負の係数 k_n を用いて式 (3) が得られる。

$$S = S_0 \exp(-k_n N) \quad (3)$$

ここで、上記の強度を一軸圧縮強さと解釈して、一軸圧縮強さと超音波伝播速度の関係について考える。井上・大見は、種々の岩石における測定結果から、一軸圧縮強さ S (kg/cm^2) と P 波速度 V_p (km/s) の間の経験式として式 (4) を提案している⁸⁾。

$$S = 43V_p^{2.23} \quad (4)$$

式 (3)、式 (4) から、サイクル数と超音波伝播速度の関係は係数 α と係数 β を用いて、式 (5) のように指数関数の形で表される。

$$V_p = \alpha \exp(-\beta N) \quad (5)$$

式 (5) に基づき、乾湿繰り返し試験における P 波速度の測定結果に対して、最小二乗法による指数近似曲線を求めると図 12 に示す曲線となる。この指数近似曲線は、サイクル数が小さいほど減少量が大きく、サイクル数の増大に伴って減少量が小さくなる P 波速度の傾向を、十分に表していないといえる。一方で、繰り返し载荷による疲労試験において、破壊までのサイクル数と、繰り返し载荷の応力振幅の関係を表す際に用いられる対数関数に基づいて近似を行うと図 13 に示す曲線となる。この対数近似曲線は測定値との相関性も高く、強制劣化試験においてサイクル数と P 波速度の関係を表す形式として適していると考えられる。なお、本研究において実施した強制劣化試験の $N=1$ における P 波速度の測定値は、一度炉乾燥した供試体における測定値なので、ここでは P 波速度の初期値として考えることとする。これより、強制劣化試験において、サイクル数と P 波速度の関係は、P 波速度の初期値 V_0 と非負の係数 A を用いて式 (6) の関数形で示されると考えられる。

$$V_p = -A \ln(N+1) + V_0 \quad (6)$$

式 (6) における係数 A は岩石に固有の値と考えられるので、これを求めることができれば、強制劣化試験における P 波速度の変化を式 (6) により推定することができると考えられる。P 波速度は式 (4) のように強度との相関性が確認されていることから、間接的に強度の変化を推定することが可能である。

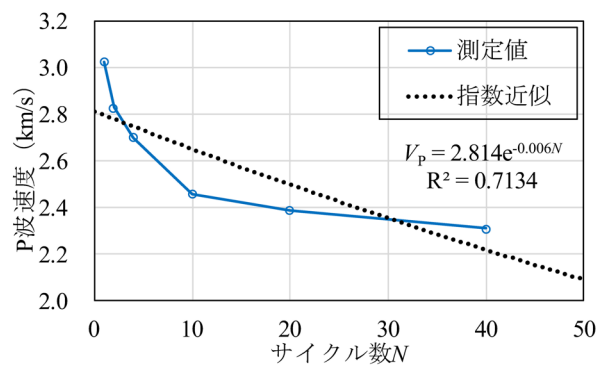


図 12 乾湿繰り返し試験における P 波速度の測定値に対する指数近似曲線

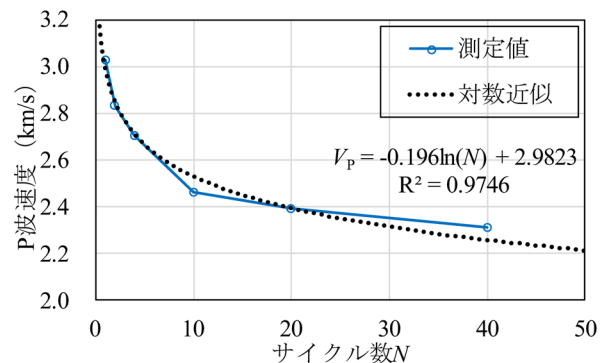


図 13 乾湿繰り返し試験における P 波速度の測定値に対する対数近似曲線

5.2 時間に対する P 波速度の変化について

強制劣化試験より求めた、サイクル数と P 波速度の関係から、実時間における P 波速度の低下速度を求める場合、サイクル数と実時間の関係を明らかにする必要がある。ここでは、現地での測定結果を図 13 の近似曲線に当てはめて、サイクル数と実時間の関係について検討を試みる。

図 3 より、実斜面における風化フロントが、P 波速度のギャップが認められた深度 85～90cm に位置していると仮定して検討を行う。ここで、85cm 以浅の部分は約 100 年の風化作用を受けた範囲として、90cm 以深の部分は風化作用を受けていない範囲として考える。

図3より、85cm以浅のP波速度の平均値は2.85km/s、90cm以深のP波速度の平均値は3.15km/sとなる。これらのP波速度の値を図13に示した対数関数に代入すると、強制劣化試験において、P波速度を3.15km/sから2.85km/sに低下させる場合に要するサイクル数 N は、約1.53となる。これを実時間に置き換えた場合は約100年に相当すると考えられる。したがって、サイクル数と実時間が線形関係にあるとする仮定に基づき、サイクル数 N と実時間 t の関係は式(7)で表すことができる。

$$N = t / 65 \quad (7)$$

式(6)、式(7)から、強制劣化試験結果から推定される、P波速度の低下速度は式(8)となる。

$$V_p = -A \ln\{(t/65) + 1\} + V_0 \quad (8)$$

今回の強制劣化試験結果に基づく、P波速度の低下速度は図14に示す曲線で表すことができる。この結果を強度に換算することで、強度低下速度を間接的に求めることができると考えられる。ただし、今回の結果から求められる強度低下速度は対数関数であるため、時間の増加に伴って、強度が0以下になる等の欠点がある。したがって、今回求めた強度低下速度は、本研究内で実施した強制劣化試験のサイクル数に対応する時間の範囲でのものであることに留意する必要がある。

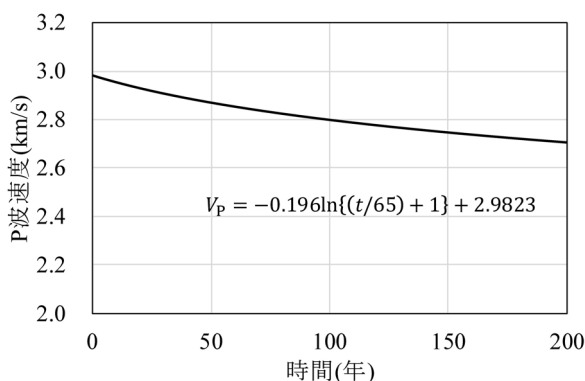


図14 強制劣化試験結果に基づくP波速度の低下速度

6. まとめと今後の課題

本研究では、風化による岩石の物性値の変化を評価するために、自然に風化した岩石と、強制劣化試験により劣化させた岩石について、物性値の測定を実施した。本研究により得られた結果を以下に示す。

- ・ 約100年間の風化作用を受けたと推定される、来

待砂岩の斜面についてボーリングコアを採取し、風化部と新鮮部でP波速度に差異が生じることを示した。

- ・ 来待砂岩の供試体を用いて、強制劣化試験を実施し、P波速度、S波速度、一軸圧縮強さ、変形係数、乾燥質量、乾燥密度、吸水率の各物性値のサイクル数に対する変化の傾向を示した。
- ・ 強制劣化試験におけるP波速度の変化について、サイクル数との関係を検討し、対数関数によって表される近似式を用いて推定可能なことを示した。
- ・ 現地での測定結果と強制劣化試験の結果から、強度低下速度を推定可能なことを示した。

今後の課題としては、複数岩種にて試験や測定を行うことで汎用的な強度低下速度式を検討することや、実際に風化した試料の測定から実時間と物性値の関係をより明確にすることが挙げられる。これらから、岩石の強度低下速度を明確にした後、岩盤中の割れ目における強度低下を考慮して、岩盤としての強度低下速度にまで議論を拡張する必要がある。

文 献

- 1) 日下部祐基, 伊東佳彦: 凍結融解試験による岩石の強度劣化の定式化と物性値との関係, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.71, No.1, pp.47-54, 2015
- 2) 堀部富雄, 小林良二, 池見保紘: 砂岩の疲労試験, 材料, 17巻, 181号, pp.914-918, 1968
- 3) 高橋直樹, 高橋学, 竹村貴人, 藤井幸泰, 朴赫: 三軸圧縮および三軸伸張条件における来待砂岩の強度・変形特性, 応用地質, 53巻, 3号, pp.121-128, 2012
- 4) 横田修一郎, 妹尾大輔, 西山賢一: 色彩値変化からみた来待石の風化速度, 応用地質, 第47巻, 第4号, pp.188-195, 2006
- 5) 高橋学, 藤井幸泰, 安昶完, 竹村貴人, 高橋直樹, 朴赫: 来待砂岩の水銀ポロシメータおよびX線CT構造解析から得られる空隙構造, 応用地質, 第52巻, 5号, pp.184-191, 2011
- 6) 中村大, 後藤隆司, 伊藤陽司, 山下聡, 川口貴之, 片岡沙都紀: 乾燥状態と湿潤状態における岩石の強度の差異に関する研究, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第52号, pp.157-164, 2012
- 7) Sunamura, T., "A physical model for the rate of coastal tafoni development," Jour. Geo.1, Vol.104, pp. 741-748, 1996.
- 8) 井上正康, 大見美智人: 岩石供試体の縦波伝播速度と一軸圧縮強さとの関係, 応用地質, 第12巻, 第3号, pp.136-141, 1971