

Q

蛇紋岩とはどんな岩石で、どのような土木的な問題が想定されるのですか？

また、蛇紋岩はアスベストを含むそうですが、人間や環境への影響はあるのでしょうか？

A

蛇紋岩は上部マントルを構成するかんらん岩が水の影響により変質してできた岩石で、構造運動の影響から、割れ目が発達し、破碎していることが多く、膨潤性粘土鉱物を含むこともあります。そのため地すべりや崩壊などを起こしやすく、トンネルでは地圧増大などの可能性があります、施工時には十分な注意が必要です。

また、蛇紋岩は程度の差はあれアスベストを含むので、トンネル等の工事では、事前の調査と飛散防止等の対処が望まれます。膨潤性粘土を含むことも併せ、蛇紋岩地帯でトンネルを計画する場合は、難工事になることを意識すべきです。

（１）蛇紋岩とは

地球は表層より地殻、マントル、核（液体の外核と固体の内核）から構成され（図-1）、このうち上部マントルは、かんらん岩からなると考えられています。マントル対流により海底近くに上昇してきたかんらん岩が、水と反応してできた岩石が蛇紋岩です。

蛇紋岩は日本各地に分布していますが、中国地方では中央部から山陰にかけて、四国地方では主に黒瀬川構造帯（秩父帯の一部）などに点在しています。

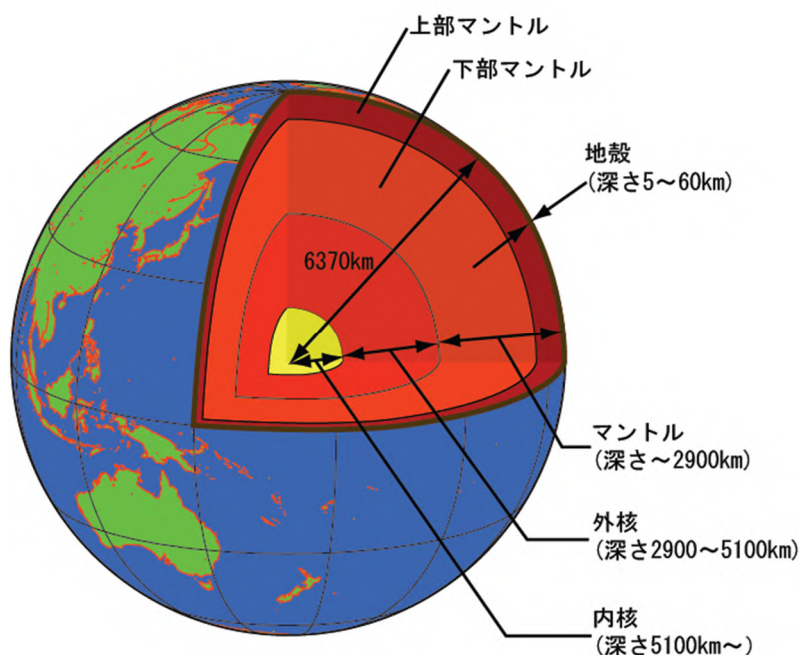


図-1 地球の内部構造¹⁾

蛇紋岩はその性状から「塊状」、「葉片状」、「粘土状」に分けられ、一つの露頭の中でも状況は変化に富んでいます（写真-1, 2）。



＜葉片状＞



＜塊状＞

写真-1 蛇紋岩の露頭状況（徳島県阿南市）



＜粘土状＞

写真-2 蛇紋岩のボーリングコアの状況（徳島県阿南市）

(2) アスベストとは

蛇紋岩中には、石綿肺（じん肺と同様な症状）やガンなどの健康被害を及ぼすアスベストが含まれています。アスベスト（石綿）は天然の繊維状の鉱物で、表-1 に示すような種類があります。世界保健機関（WHO）では、形状として「長さ $5\mu\text{m}$ 以上、幅 $3\mu\text{m}$ 以下で、長さとの比が3対1以上のもの」と定義されています。蛇紋岩にアスベストが含まれていても、そのままでは有害とならず、粉碎して繊維状のアスベストが飛散し、それを人が吸い込むことで健康被害が発生します。

表-1 アスベスト(石綿)の種類について²⁾

分類	石綿名	備考
蛇紋石族	クリソタイル (白石綿)	ほとんど全ての石綿製品の原料として使用されてきた。世界で使われた石綿の9割以上を占める。
角閃石族	クロシドライト (青石綿)	吹付け石綿として使用されていた。他に青石綿は石綿セメント高圧管、茶石綿は各種断熱保温材に使われてきた。
	アモサイト (茶石綿)	
	アンソフィライト石綿	他の石綿やタルク（滑石）、蛭石などの不純物として含まれる。アンソフィライト石綿は熊本県旧松橋町に鉱山があった。トレモライト石綿は吹付け石綿として一部に使用されていた。
	トレモライト石綿	
	アクチノライト石綿	

蛇紋岩の主要構成鉱物である蛇紋石には、アンチゴライト・リザーダイト・クリソタイルの3種類があり、このうちクリソタイルがアスベスト（石綿）に相当します。クリソタイルはカンラン岩が蛇紋岩化する時生じた岩体の割れ目に霜柱のように繊維軸が直交する状態で結晶成長します（写真-3）。

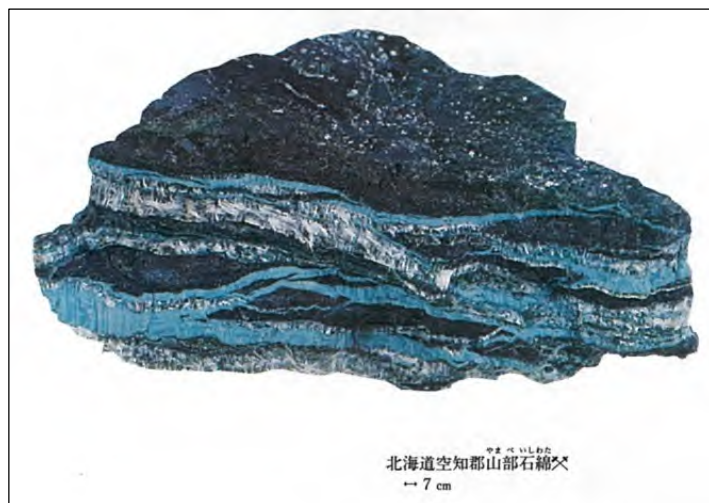


写真-3

石綿鉱石³⁾（北海道山部鉱山）
帯灰青白色繊維状の脈がクリソ
タイル、青緑色の脈がアンチゴラ
イト

アスベストは、その物理・化学的特性から耐火材料、保温材、ブレーキ等の摩擦材、および各種建築材料として使われてきましたが、アスベスト繊維による健康障害が明らかになってからは使用の禁止や規制が行われています（表-2）。

表-2 アスベストに関する法規制

- | | |
|----------------|--|
| ・昭和 49 年（1974） | ：吹付け石綿施工の禁止。
工業製品におけるクロシドライトの使用禁止。 |
| ・昭和 62 年（1987） | ：クロシドライトの使用禁止。 |
| ・昭和 63 年（1988） | ：作業環境評価基準により、石綿の管理濃度を規定。
(2 本/cm ³ 、その後改正された。) |
| ・平成 1 年（1989） | ：大気汚染防止法改正。
石綿を「特定粉塵」、石綿製品製造施設を「特定粉塵発生施設」とし、規制を開始（敷地境界濃度：10 本/L）。 |
| ・平成 7 年（1995） | ：法的に <u>アモサイト、クロシドライトの使用禁止</u> 。 |
| ・平成 16 年（2004） | ：クリソタイルの使用禁止（含有率 1wt%以上）。
<u>クリソタイルの管理濃度を 2 本/cm³から 0.15 本/cm³に改正</u> 。 |
| ・平成 17 年（2005） | ：「石綿障害予防規則」の施行。 |
| ・平成 18 年（2006） | ：労働安全衛生法施行令および石綿障害予防規則の改正。
<u>石綿および石綿をその重量の 0.1%を超えて含有する全ての物の使用禁止</u> 。 |

（３）蛇紋岩中のアスベストの問題点

前述のとおり、現在ではアスベストの使用は禁止されています。今後はアスベストを使用した古い建築物の補修・解体やアスベストを含む産業廃棄物の処理が問題となりますが、蛇紋岩地山を掘削するトンネル工事や切土工事においても問題が発生する可能性が考えられます。

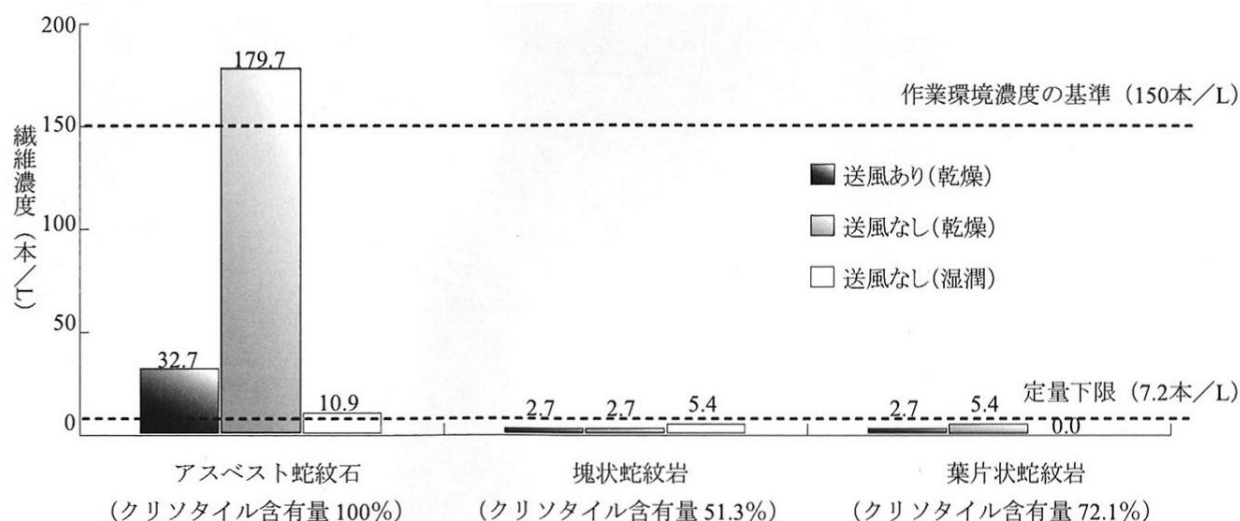
蛇紋岩のトンネル掘削等において、地山を破壊する時にアスベスト繊維がどの程度発生するかについては不明な点が多いですが、以下に示す調査例があります。

重量約 5g の蛇紋岩試料の粉碎中に、口にフィルターをかぶせた吸引装置により大気捕集を行い、フィルターに付着した繊維状粒子の数を計数し、繊維濃度の測定を実施したものです⁴⁾。

下記の 3 状態で試験を実施した結果を図-2 に示します。

- ① ドラフトを使用しない状態
- ② ドラフトを使用して吸引（送風）を行う状態
- ③ ドラフトを使用せず、霧吹きで散水する状態

塊状・葉片状蛇紋岩では定量下限値以下であり、粉碎の過程で粒状の形態を示すようになり、繊維状結晶が減少したものと判断しています。一方、アスベスト蛇紋石（脈状のクリソタイル）では、①の場合のみ作業環境濃度基準（150 本/L）を超えており、「蛇紋岩粉碎時に送風・散水を行うことが有効である」と結論付けています。

図-2 アスベスト繊維濃度⁴⁾

また、近鉄志摩線青峰トンネルの施工にあたり、対象地山の蛇紋岩の分析によりクリソタイルを確認したため、作業員全員に電動ファン付き呼吸用保護具を装着させ作業に従事させた、という事例が報告されています⁵⁾。

このように、事前の地質調査において対象地の蛇紋岩中にアスベストが含まれることがわかった場合は、飛散防止等の対応をすることが望まれます。

(4) 蛇紋岩の土木的問題点

蛇紋岩は新第三紀の泥岩や凝灰岩と並んで、吸水膨張の著しい膨張性岩盤として知られています。その原因として、以下の事柄が考えられます。

- ① 岩石強度を越える応力を受けることによる塑性流動化
- ② 岩石の風化や吸水に伴う膨張、脆弱化
- ③ 地質構造的運動等に起因する潜在応力の解放

もともと蛇紋岩は地下深部で形成され、激しい構造運動の影響を受けているため、割れ目が発達し破砕していることが多く、地表に露出しているものは応力解放しやすい性質があります。変質の過程でスメクタイトのような吸水膨張しやすい粘土鉱物が生成されることがあり、乾湿繰り返しによって急激に固結力を喪失する「スレーキング現象」がみられることもあります。さらに、塊状部、葉片状部、粘土状部が不規則に分布する特徴がみられます。

このように蛇紋岩はトンネル工事に当たって問題のある地質とみなされ、新第三紀の泥岩・凝灰岩と同様に、スメクタイト含有量や浸水崩壊度などを事前に調査し、膨圧発生の可能性を判断するようにしています(表-3, 4)。

表-3 膨圧発生の判断指標例⁶⁾

膨圧を示す指標	地圧発生の可能性が非常に大きいもの	膨圧発生の可能性あり
岩石中の主要粘土鉱物	モンモリロナイト (スメクタイト)	モンモリロナイト (スメクタイト)
2 μ m以下粒子含有率	30%以上	20%以上
塑性指数	70以上	25以上
CEC (cmol _c /kg)	35以上	20以上
浸水崩壊度	D	—
ボーリングサンプルの状況	破碎部多い	—

表-4 地山の膨張性を示す指標の例⁷⁾

	仲野(1975)	日本鉄道建設公団 (1977)	大塚ほか(1980)	佐藤ほか(1980)	吉川ほか (1988)
膨張性を示す指標	地山強度比 $G_n = \sigma_c / (\gamma H)$ σ_c : 一軸圧縮強度 γ : 単位体積重量 H : 土被り厚 ① $G_n \leq 2$ 押出し性～膨張性 ② $2 < G_n \leq 4$ 強度の押出し性～ 地圧が大きいと推定 される ③ $4 < G_n \leq 6$ 地圧が大きいと推 定可 ④ $6 < G_n \leq 10$ 地圧があると推定 可 ⑤ $10 < G_n$ 地圧がほとんどな いと推定可	地圧発生の可能性が非常に大きいもの ① 岩石中の主要粘土 鉱物がモンモリロナ イト ② 2 μ m以下粒子含有 率 $\geq 30\%$ ③ 塑性指数 ≥ 70 ④ CEC $\geq 35\text{meq}/100\text{g}$ (※1) ⑤ 浸水崩壊度 D ⑥ ボーリングサンプ ル中破碎部多い 膨圧発生の可能性あり ① 岩石中の主要粘土 鉱物がモンモリロナ イト ② 2 μ m以下粒子含有 率 $\geq 20\%$ ③ 塑性指数 ≥ 25 ④ CEC $\geq 20\text{meq}/100\text{g}$	① 変形係数 $\leq 8000\text{kgf}/\text{cm}^2$ ② 一軸圧縮強度 $\leq 40\text{kgf}/\text{cm}^2$ ③ 単位体積重量 $\leq 2.05\text{gf}/\text{cm}^3$ ④ 自然含水比 $\geq 20\%$ ⑤ 液性限界 $\geq 100\%$ ⑥ 塑性指数 ≥ 70 ⑦ 流動指数 ≥ 20 ⑧ 2 μ m以下粒子含有 率 $\geq 30\%$ ⑨ CEC $\geq 35\text{meq}/100\text{g}$ ⑩ 膨張率 $\geq 2\%$ (Ex)	① 自然含水比 $\geq 20\%$ ② 単位体積重量(乾燥) $\leq 1.8\text{gf}/\text{cm}^3$ ③ (第1回吸水量/自然 含水比) ≤ 2.0 ④ 浸水崩壊度 C～D ⑤ モンモリロナイト 含有量 $\geq 30\%$ ⑥ RQD $\leq 30\%$	著しい膨張性を呈する地山 ① ボーリング時 ・無水掘りが必要 ・コア膨張が顕著 ② $G_n \leq 1.5$ (<0.5で顕著) ③ モンモリロナイト 含有量 $\geq 20\%$ かつ 自然含水比 $\geq 20\%$ ④ 浸水崩壊度 D 膨張性を呈する地山 ① ボーリング時 ・コア採取率低い ・コアディスキング が顕著(※2) ② $1.5 \leq G_n < 2.0$ ③ モンモリロナイト 含有量 $\geq 20\%$ または 自然含水比 $\geq 20\%$
備考	新第三紀泥岩	赤倉トンネル(北越 急行ほくほく線) 新第三紀中新世の椎 谷層 第四紀更新世の灰爪 層	鍋立山トンネル(北 越急行ほくほく線) 新第三紀中新世の椎 谷層 定性的に①～⑤、⑩ は膨張性との相関あ り。⑦、⑨等は相関 性低い。	青函トンネル算用師 工区 新第三紀中新世泥岩	新第三紀泥岩

※1 陽イオン交換容量(CEC)の $\text{meq}/100\text{g}$: 風乾試料100g当たりのミリグラム当量(milli-equivalent)のこと。試料中の交換性イオンがどのくらいアンモニウムイオンで置き換わったかを示す。膨潤性を示さないゼオライトも大きな陽イオン交換容量を示す。現在は、 cmol_c/kg という単位を使用する。

※2 コアのディスキング : ボーリングコアがほぼ均等に、かつ板状に分離する現象のこと。コアが地下深部で受けていた応力が解放され、引張応力が発生して起こると考えられている。

また切土工事においても、蛇紋岩は風化が速く、割れ目が多い岩として注意を要する地質と認識されています。とくにスメクタイトのような膨潤性粘土鉱物を含む場合は、掘削後の吸水膨張により急激に強度低下を来とし、崩壊することがあります。そのため、切土の施工実績の検討に基づき、表-5の岩質区分に応じて図-3のような安定のり面勾配の目安が示されています⁸⁾。

表-5 蛇紋岩質区分⁸⁾

あまり片理が発達していないもの（塊状）				片理が発達しているもの（片状）			
区分	亀裂間隔	岩の見かけ	ハンマーの打撃	区分	亀裂間隔	岩の見かけ	ハンマーの打撃
1	50～10cm	カンラン石は全て蛇紋石に変化しているが、まだカンラン岩等の組織構造を残し、色は暗褐色が多い。	普通程度の打撃によって、割れ目に沿って割れる。打診によって澄んだ音、時に少し濁った音を出す。	1	50～10cm	片理面間隔は粗で、片理面は密着してはがれづらい。	普通程度の打撃で割れる。割れ目は片理面にあまり関係なく、塊状に割れることが多い。
2	10～2cm 亀裂開口	原組織はほとんど認められない。色は脱色して帯褐色であることが多い。	普通程度の打撃で割れる。打診によって澄んだ音、濁った音を出す。	2	10～2cm	片理面間隔は3～30mmで、はがれやすい。	容易に小片になって割れる。
M3			容易に小片になって割れる。	S3	10～2cm		
M4		風化または破碎によって、礫状部と基質部に分かれる。基質粒度は砂～粘土サイズになっている。	容易に崩れ、一部ハンマーの先端が突き刺さる。岩はもろく指先で容易に壊れる。	S4		片理面間隔は非常に薄く1～5mm程度。粘土質で、水を含むと軟弱になる。	容易に崩れ、一部ハンマーの先端が突き刺さる。岩はもろく指先で容易に壊れる。
5	ほとんど砂分の入らない軟質粘土			5	ほとんど砂分の入らない軟質粘土		
6	ラテライト質土壌			6	ラテライト質土壌		

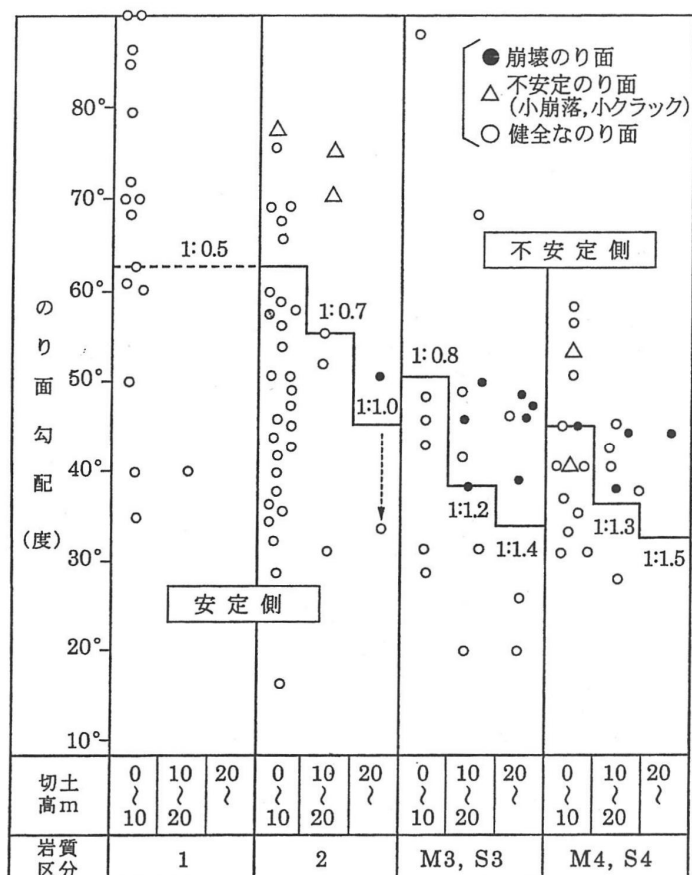


図-3

蛇紋岩類の岩質区分と実績のり面勾配⁸⁾

【引用文献】

- 1) 気象庁：「地球の内部構造」，
https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/jishin/about_eq.html (2019. 4. 6 閲覧)
- 2) 独立行政法人 環境再生保全機構：「アスベスト（石綿）の種類について」，
<https://www.erca.go.jp/asbestos/what/whats/whatAsbestos.html> (2019. 4. 6 閲覧)
- 3) 堀 秀道 (1992)：楽しい鉱物図鑑，草思社，185p.
- 4) 加藤欣也・加藤孝幸・岡村 聡・和田 哲 (2007)：蛇紋岩のクリソタイル含有量とアスベスト繊維の飛散量－岩石中のアスベスト測定法の比較－，日本応用地質学会北海道支部，研究発表会講演要旨.
- 5) 坂本成彦・都司 尚・金口正幸・大黒昭久 (1993)：かぶりの浅い蛇紋岩地山を掘る 近鉄志摩線青峰トンネル，トンネルと地下，Vol. 24, No. 3, pp. 229-233.
- 6) 地盤工学会 (1989)：岩の調査と試験，521p.
- 7) 土木学会 (2006)：トンネル標準示方書[山岳工法]・同解説，37p.
- 8) 日本道路協会 (2009)：道路土工 切土工・斜面安定工指針，142p.

(回答者 住友 徹)