

4) 調査結果と診断

橋台前面から骨材を採取し、骨材の試験を実施した。結果、損失重量は12%以下であるが、吸水率が5%以上で耐凍害性骨材の限界値を超えていた。よって骨材の凍結膨張によるポップアウトが原因であると推定した。

② 擁壁の劣化(スケーリング)

1) 劣化状況

竣工から40年以上経過した沿岸部の擁壁である(図-2.3.19)。右上部角が激しいスケーリングによる断面欠損を起こしている。鉄筋は、腐食の進行はないが露出しており、劣化、損傷度はきわめて大きい。現状の劣化グレードは状態Ⅲの加速期である。スケーリングは隅角部のほかに擁壁天端でも認められた。

2) 凍害環境

海岸部の豪雪厳寒地域であり、最低気温は-20℃、11月初旬から3月末まで0℃以下の気温が続く強風地域である。

3) 調査内容

コンクリートの耐凍害性を把握するため、以下の詳細調査も含めた項目の調査を行う。

- ・ 目視による外観調査 スケーリング範囲、スケーリング深さ
- ・ 圧縮強度試験 凍害の進行によるコンクリート強度の低下の有無を確認
- ・ 静弾性係数試験 セメントペースト内のマイクロクラックによる劣化の確認
- ・ 細孔径分布 深さごとの細孔径分布の変化を測定
- ・ 気泡間隔係数 気泡間隔 200~250 μm で耐凍害性があると判断

4) 調査結果と診断

圧縮強度の低下は見られなかったが、弾性係数は若干の低下が認められた。細孔径分布は、表面から20mmまでの区間と深度100mmの区間を比較して、表面部の細孔容積は約2倍の数値を示しており凍害に対する抵抗性が低下している。また、気泡間隔係数は390 μm であるため耐凍害性が期待できない。

以上を考慮し、対象構造物は凍害に対する抵抗性が低いコンクリートであると判断した。

(3) アルカリ骨材反応により劣化した構造物

a) 調査対象となる変状事例^{6), 11)}

セメントに含有されるアルカリ (Na_2SO_4 および K_2SO_4) は、セメントの水和反応の過程でコンクリートの空隙内の水溶液に溶解し、水酸化アルカリ (NaOH および KOH) を主成分とする強アルカリ性 ($\text{pH}=13$) を呈する。アルカリシリカ反応性鉱物を含有する骨材 (反応性骨材) は、コンクリート中の高いアルカリ性を示す水溶液と反応して、コンクリートに異常な膨張およびそれに伴うひび割れを発生することがある。これがアルカリ骨材反応と呼ばれる現象である。アルカリ骨材反応には、アルカリシリカ反応 (以下、ASR と記す)、アルカリ炭酸塩反応およびアルカリシリケート反応の3種類があり、我が国で被害が主に報告されているのは ASR である。我が国における ASR の損傷は、反応性骨材が分布する、関西、中国、四国、九州、北陸などの地域で報告されている。北陸電力の調査⁶⁾によると、**図-2.3.24** に示すように富山県東部のいくつかの水系の水力発電所に ASR による劣化が数多く見られることが解っている。**図-2.3.25** に設置標高との関係を、**図-2.3.26** に竣工年代別の発生率を示す。これらの図から、ASR の発生は標高や竣工年代と関係がないことが解る。



図-2.3.24 ASR の劣化マップ⁶⁾

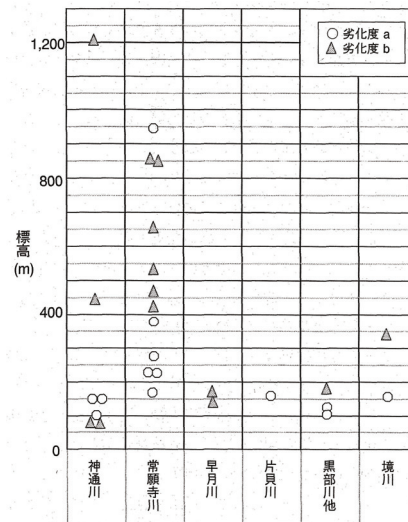
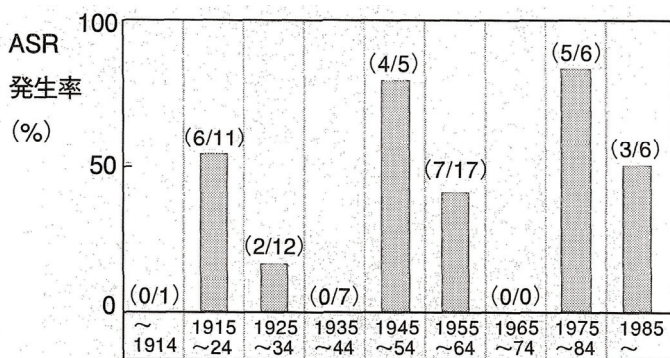


図-2.3.25 標高との関係⁶⁾



※ () は、発生数/発電所数

図-2.3.26 竣工年代との関係⁶⁾

ASRによる劣化の兆候としては、表-2.3.7に示すように、ひび割れ、変位・変形、変色、ゲルの滲出、ポップアウトなどがある。ASRによるひび割れは一樣ではなく、構造物の置かれた環境条件（温度、湿度、日射、水掛りなど）、鋼材量や外部拘束の有無による拘束条件の影響を大きく受ける。無筋コンクリートなど拘束を受けていないコンクリートでは、互いに120°の角度で発生する網目状のひび割れが発生し（図-2.3.27）、鉄筋量の多いRC・PCの梁・柱では拘束によって生じる主応力の方向を反映した方向性の強いひび割れ（図-2.3.28）が生じる。

表-2.3.7 ASRによる劣化の特徴¹⁾

箇所	損傷の種類	損傷の特徴
コンクリート	(1) ひび割れ	拘束を受けていないコンクリート（無筋コンクリート）では、互いに120°の角度で発生する網目状のひび割れが発生する。しかし、同様なひび割れは凍害でも生じることがある。一方、鉄筋量の多いRCやPCの梁や柱では、軸方向鉄筋やPC鋼材に沿った方向性のあるひび割れが生じる。
	(2) 変位・変形	コンクリートの膨張によるコンクリート構造物全体の移動の差違により変位・変形を生じることがある。
	(3) ゲルの滲出	アルカリシリカ反応によって劣化したコンクリートのひび割れには白色のゲルが滲出していることがある。
	(4) 変色	アルカリシリカ反応が進行すると、コンクリートの表面が茶褐色に変色することがある。
	(5) ポップアウト	湿度の高い条件下において、骨材のポップアウトが生じることがある。しかし、我が国ではポップアウトの事例は極めて希である。
	(6) かぶりコンクリートの剥離・剥落	橋梁の梁端部などの鉄筋拘束の小さい部分や著しいひび割れ損傷が生じた箇所では、かぶりコンクリートの剥離・剥落が生じる可能性がある。
	(7) コンクリートの強度低下	アルカリシリカ反応が長期にわたって進行すると、鉄筋の内側のコンクリートにもひび割れが発生し、コンクリートの強度が低下することがある。
鉄筋	(1) 鉄筋の腐食	アルカリシリカ反応によって発生したひび割れは、鉄筋腐食を促進させる可能性がある。しかし、アルカリシリカゲルによるひび割れの充填効果および不動態被膜の保護効果により、鉄筋腐食が抑制されたとの報告もある。
	(2) 鉄筋の降伏および破断	アルカリシリカ反応によってコンクリートが膨張すると、コンクリートには圧縮応力、鉄筋には引張応力が発生する。アルカリシリカ反応によって過大な膨張が生じたとき、鉄筋の降伏や破断を生じる可能性がある。

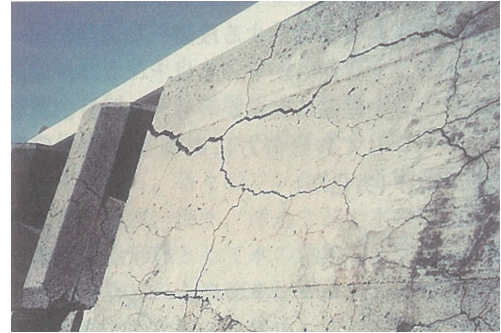


図-2.3.27 ASRによるひび割れの例¹⁾
(拘束が小さい)



図-2.3.28 ASRによるひび割れの例¹⁾
(拘束が大きい)

b) 変状に対する調査事例^{11), 12)}

ASR の調査項目を表-2.3.8 に示す。原因を ASR であると特定する調査と劣化の現状と劣化予測の調査に分かれる。ASR は、根本的に進行を抑制する技術がないこと、最終的に耐荷力まで影響を及ぼす可能性もあること、詳細調査の費用や時間がかかることから「ASR が劣化の原因であるか？」をまず判別することが重要となる。

表-2.3.8 ASR の調査項目¹¹⁾

	調査項目
構造物の目視観察	ひび割れ (拘束方向, 亀甲状), 剥離・剥落, ポップアウト, 変位・変形, 変色, 段差, ゲルの滲出
構造物の現地計測	ひび割れ幅の進展 (コンタクトゲージ法など), 膨張量および変位量 (変位計など) 非破壊検査 (反発硬度, 超音波パルス速度など)
構造物から採取したコアによる各種試験	骨材の岩種および反応性鉱物の種類 (偏光顕微鏡観察, X線回折, SEM-EDXA, 赤外線吸収スペクトル分析など) 骨材のアルカリシリカ反応性 (化学法 (JIS A 1145) およびモルタルバー法 (JIS A 1146), 迅速法 (JIS A 1804), 促進モルタルバー法 (ASTM C 1260) など) アルカリシリカゲルの判定 (化学成分分析, SEM-EDXA, 酢酸ウラニル蛍光法など) アルカリ量 (水溶性アルカリ, 酸溶性アルカリなど) 力学的性質 (圧縮強度, 引張強度, 弾性係数, 超音波パルス速度など) 残存膨張量 (JCI-DD 2 法, カナダ法, デンマーク法など)

① ASR の判定

日本道路公団北陸支社 (現 中日本高速道路) で使用された ASR の判定フローを図-2.3.29 に示す。原因を特定する調査では、使用されている骨材の産地、種類、セメントメーカー、プラントの調査とともに、構造物の外観調査が重要となる。外観調査は表-2.3.7 に示した特徴のほか、表-2.3.9 に示す項目に着目して行う必要がある。また、これらの調査でも判定が微妙な場合は、表-2.3.9 に示した判定調査の4つの試験のうち、一つでも基準値をオーバーしているとしたら、「ASR である」とする。さらに、判定調査でも判定できない場合は、表-2.3.10 に示す補足試験を実施し判定することになる。

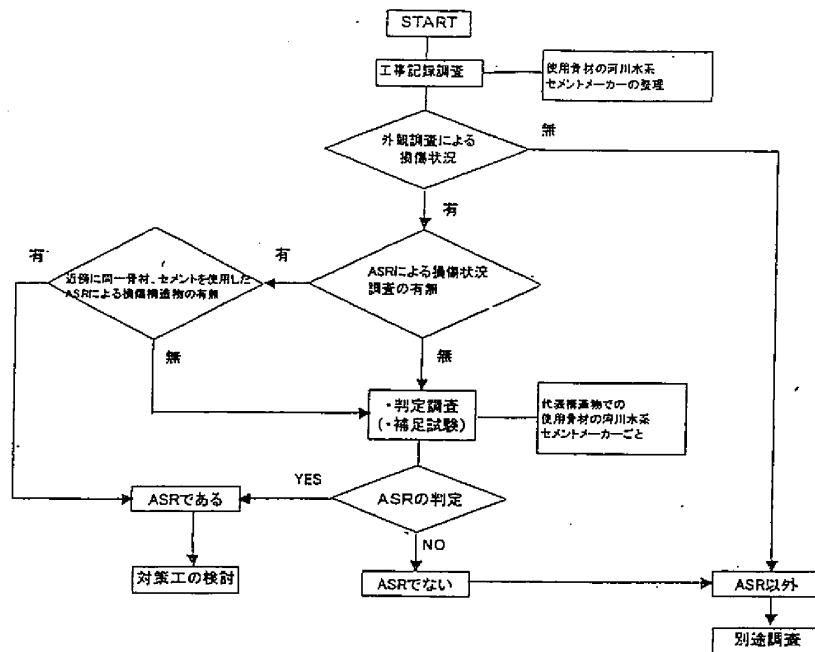


図-2.3.29 ASR の判定フロー¹²⁾

表-2.3.9 ASR の調査および判定基準¹²⁾

調査種別	試験方法	基準値	備考
外観調査	目視	以下の現象が複合していれば ASR 反応の疑いあり <ul style="list-style-type: none"> ・ 無筋:間隔 5-50cm の亀甲状のひび割れ、ひび割れ幅 0.5mm 以上。 ・ 有筋:主鉄筋方向にのびる広いひび割れ、亀甲状のひび割れで、乾湿繰返しを受ける所や隅角部に多い。 ・ 目地のふさがり、目地のはみ出し、隣接間の競り合い。 ・ 浸出物 (シリカゲル) があり、濡れ色、乾燥して白濁色 	
判定条件	アルカリ分析	コンクリート中のアルカリ・塩素イオン量分析	コンクリート深さ方向に 2cm 程度間隔でアルカリ・塩素イオン量分析を行う。
	促進養生試験	カナダ法 (ASTM C 1260)	21日:0.1%以上
	及び外観調査	デンマーク法	91日:0.1%以上
	コアの外観	<ul style="list-style-type: none"> ① 白色の反応生成物がある。 ② 半透明なゲル、特定の骨材 (安山岩、流紋岩、流紋岩質溶結凝灰岩) の周辺が濡れて、なかなか乾燥しない。 ③ 骨材にひび割れ ④ 骨材に反応リム ⑤ 反応性骨材が含まれている。 	1N NaOH 溶液、80℃浸漬 飽和 NaCl 溶液、50℃浸漬

表-2.3.10 補足試験¹²⁾

試験種別	試験方法	基準値	備考
アルカリ量分析	EPMA により未水和セメント中のアルカリ量分析	0.6%以上	コンクリート中の未水和セメント粒子を採し出し、EPMA 分析によるアルカリ量を推定する。
岩石学的試験	目視による岩種判定	—	反応性岩種の同定 粗骨材の構成比 反応リムの確認
	偏光顕微鏡観察	—	岩種の同定 反応リムの確認
	X線回折	—	反応性鉱物の同定

② 現状評価と劣化予測

ASR と判定された場合は、①で実施した外観調査結果をもとに現状の劣化の状況をグレーディングする必要がある。表-2.3.11 にグレーディング例を示す。グレーディングでは、将来の膨張予測が現状の判断にも重大な影響を及ぼすので、残存膨張量試験の結果も重要な判断材料となる。

ASR の劣化過程と構造物の安全性能、使用性能および周辺環境への影響性の限界状態は表-2.3.12 に示すような関係がある。したがって、構造物が潜伏期、進展期、加速期および劣化期のどの時期にあるかをコアの促進養生試験または構造物のひび割れの進展の点検などにより評価し、点検の結果に基づいて、構造物が要求される性能について限界状態に達しているかどうかを明らかにした上で評価および判定を行うことが基本である。

表-2.3.11 グレーディング例¹⁾

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態Ⅰ (潜伏期)	ASR による膨張およびそれに伴うひび割れがまだ発生せず、外観上の変状が見られない。
状態Ⅱ (進展期)	水分とアルカリの供給下において膨張が継続的に進行し、ひび割れが発生し、変色、アルカリシリカゲルの滲出が見られる。しかし、鋼材腐食による錆汁は見られない。
状態Ⅲ (加速期)	ASR による膨張速度が最大を示す段階で、ひび割れが進展し、ひび割れの幅および密度が増大する。また、鋼材腐食による錆汁が見られる場合もある。
状態Ⅳ (劣化期)	ひび割れの幅および密度がさらに増大し、段差、ずれや、かぶりの部分的な剥離・剥落が発生する。鋼材腐食が進行し錆汁が見られる。外力の影響によるひび割れや鋼材の損傷が見られる場合もある。変位・変形が大きくなる。

表-2.3.12 劣化過程と性能低下¹⁾

構造物の外観上のグレード	安全性	使用性	第三者影響度	美観・景観
状態Ⅰ (潜伏期)	—	—	—	—
状態Ⅱ (進展期)	—	水密性などの低下 ・ひび割れ 鋼材の腐食発生	第三者への影響 ・剥離 ・剥落	美観の低下 ・ひび割れ ・変色 ・アルカリシリカゲルの滲出
状態Ⅲ (加速期)	靱性の低下 ・鋼材の腐食 耐荷力の低下 ・本来の照査:耐荷力 簡易な照査:コンクリートの強度低下, 鋼材の付着力低下, 鋼材の損傷	ひび割れ 構造物の変位・変形 ・たわみ ・ずれ ・段差		
状態Ⅳ (劣化期)				

c) 調査に基づく診断事例^{11), 12)}

調査に基づく診断では、グレーディング結果から補修・補強の必要性を判断し、補修・補強方法を選定することとなる。表-2.3.13 に、各グレーディングに対する適当な補修・補強工法を示す。ただし、構造物ごとに残存膨張量の測定を実施しグレーディングを決定することはコストもかかるため、表-2.3.14 に示すように外観調査結果を用い、簡易的に補修材料の適用区分を決定している事例もある。

表-2.3.13 グレーディングに対応する補修・補強工法¹¹⁾

要求性能	潜伏期		進展期		加速期		劣化期	
	適用性	工 法	適用性	工 法	適用性	工 法	適用性	工 法
劣化因子の遮断	◎	表面被覆 (表面からの水分の侵入防止)	◎	表面被覆 (表面からの水分の侵入防止)	◎	表面被覆 (表面からの水分の侵入防止、および剥落防止)	○	表面被覆 (表面からの水分の侵入防止、および剥落防止)
		—	◎	ひび割れ補修 (ひび割れからの腐食性物質の侵入防止)	◎	ひび割れ補修 (ひび割れからの腐食性物質の侵入防止)	○	ひび割れ補修 (ひび割れからの腐食性物質の侵入防止)
劣化速度の抑制	○	拘束 (FRP・鋼板巻立て、PC巻立てなど)	○	拘束 (FRP・鋼板巻立て、PC巻立てなど)	○	拘束 (FRP・鋼板巻立て、PC巻立てなど)		—
	○	含浸材塗布 (リチウム系化合物の塗布含浸)	△	含浸材塗布 (リチウム系化合物の塗布含浸)	△	含浸材塗布 (リチウム系化合物の塗布含浸)		—
劣化因子の除去	◎	含浸材塗布 (コンクリート中の水分の蒸発が可能な含浸処理)	◎	含浸材塗布 (コンクリート中の水分の蒸発が可能な含浸処理)	◎	含浸材塗布 (コンクリート中の水分の蒸発が可能な含浸処理)	○	断面修復 (劣化部分の除去と鉄筋の防食を目的とした断面修復)
耐荷力、変形性能の改善		—		—		—	◎	補強 (FRP・鋼板接着や巻立てなど)
		—		—		—	○	打換え (劣化した部材のコンクリートによる打換え)
工法選定の理由 (要求性能)	ひび割れが発生しておらず、残存膨張量は最大となる。この段階では表面被覆あるいは撥水系の表面含浸処理をまず検討する。 被覆材選定には、遮水性、水蒸気透過性、ひび割れ追従性などが重視される。		ひび割れが発生しており、膨張速度が大きくなる。潜伏期で記述した工法にひび割れ補修を組み合わせたものが一般的であるが、膨張量が大きい場合には、拘束工法を適用してもよい。補強材への要求性能としては、コンクリートとの一体性が挙げられる。		既に膨張速度は収束しつつある。耐荷力や変形性能の低下が懸念されるような場合には、拘束効果も期待した補強工法が推奨される。そのような懸念のない場合は、表面被覆や表面含浸処理を適用する。		膨張は終了しているので、膨張に対する対策は必要ない。コンクリートの物理的な劣化状況により、ひび割れ注入、断面修復、補強などを使い分ける。	

(注) 記号は以下の意味をもつ

◎：主工法として適用すべき工法

○：主工法に次いで適用性の高い工法

△：構造物の劣化状況等に応じて適用を検討する工法

表-2.3.14 補修材料区分¹²⁾

損傷状況			ひび割れ幅(mm)	ひび割れ部の処置		被覆		その他
				注入	充填	露出部位	埋立部位	
錆汁が出ている			—	—	—	ひび割れの進行度に応じて適用		はつり、防錆処理、断面修復
進 行 度	C	ひび割れが進行している	0.2～5.0	エポキシ樹脂注入材3種	—	塗装材 1-II種	塗装材 2-II種	* ひび割れ幅が5mm以上で劣化状況が著しい場合については、はつり調査の上、防錆処理、断面修復を検討する。
			5.0以上	—	シーラント系			
	B	ひび割れの進行が止まった保証なし	0.2～5.0	エポキシ樹脂注入材2種	—			
			5.0以上	—	シーラント系			
	A	ひび割れの進行が止まった	0.2～5.0	<ul style="list-style-type: none"> ・ エポキシ樹脂注入材1種 ・ 超微粒子無機系 ・ ポリマーセメントスラリー系 	—	塗装材 1-I種	塗装材 2-I種	
			5.0以上	—	ポリマーセメントスラリー系, シーラント系			

コンクリート塊の落下により、第三者被害が想定される箇所については、シートの塗布および上記のひび割れ部の処理、被覆を行うものとする。また、必要に応じて、はつり、防錆処理、断面修復を行うものとする。

*進行度は、コアの促進膨張試験、外観変状、ひび割れパターン、ひび割れ幅（コンタクトポイント）調査により判断する。

d) 診断事例の紹介

昭和 50 年代に施工された減勢工建屋に現れた変状の診断事例である。ひび割れの発生は建設から 10 年後の昭和 60 年頃と言われており、ひび割れ発生に対して壁に 15cm 程度の増し打ち（メッシュ筋）を実施している。ひび割れの原因としては、過去の外観調査や使用された骨材やセメントの調査から ASR と予想された。



図-2.3.30 減勢工建屋に現れた変状

① 調査項目

事前の目視調査や施工報告書など資料調査から、劣化原因はアルカリ骨材反応と予想された。そこで、外側壁面を中心に以下の調査、試験を実施した。なお、今回の調査は発電所の運転中に実施したため、減勢工外部の壁面と屋上を中心に実施し、内部についての調査は実施していない。

- ・外観調査、打音検査：ひび割れ、はく離状況の確認
- ・アルカリ骨材反応調査（残存膨張量、アルカリ量）：アルカリ骨材反応の可能性、進行状況の確認
- ・強度試験（シュミットハンマー測定）：コンクリート強度の確認
- ・はつり試験（中性化、鉄筋など）：中性化および鉄筋の腐食状況の確認

② 調査結果

1) 外観調査、打音検査

壁面には、不規則なひび割れおよびひび割れからの白色析出物がほぼ全面に見られた。

2) アルカリ骨材反応調査

アルカリ骨材反応の可能性および反応の状況を調査するため、コアの外観調査、アルカリ量、残存膨張量試験を実施した。コアは発電所側壁面の 4 箇所採取した。その中から残存膨張量試験に適切なコアを選び、試験を実施した。

- ・コアの外観調査

骨材の多くは花崗岩および花崗片麻岩であった。片麻岩は結晶質（石英）であってもひずんだ結晶格子を持つものであり、ASR の可能性がある。一部骨材から、粘性のある液体が浸出しており、これはアルカリ骨材反応で生じたゲルと思われる。また、白色析出物も見られ、これは細骨材のアルカリ骨材反応で生じたものと思われる。図-2.3.31 は、コアを割裂させ、断面を観察したものである。細骨材から析出したものと予想された白色析出物が観察された。



図-2.3.31 コア割裂面の状況

・アルカリ量試験

コンクリート中のアルカリ量は 0.24kg/m^3 と非常に少なく（国交省通達のアルカリ総量規制は 3.0kg/m^3 ）、今後アルカリ骨材反応が継続する可能性は低いものと思われる。

表-2.3.15 コンクリート中の水溶性アルカリ元素の測定結果

試料名	Z_{Na} (mg/g)	Z_{K} (mg/g)	絶乾単位 容積質量 (kg/m^3)	Na_2O (kg/m^3)	K_2O (kg/m^3)	R_2O (kg/m^3)
コンクリートコア	0.0549	0.0462	2200	0.16	0.12	0.24

・残存膨張試験

図-2.3.32 に示すように、残存膨張は全膨張量が 28 週で 0.05%未満であることから、今後アルカリ骨材反応の進行はないか、あってもわずかである。

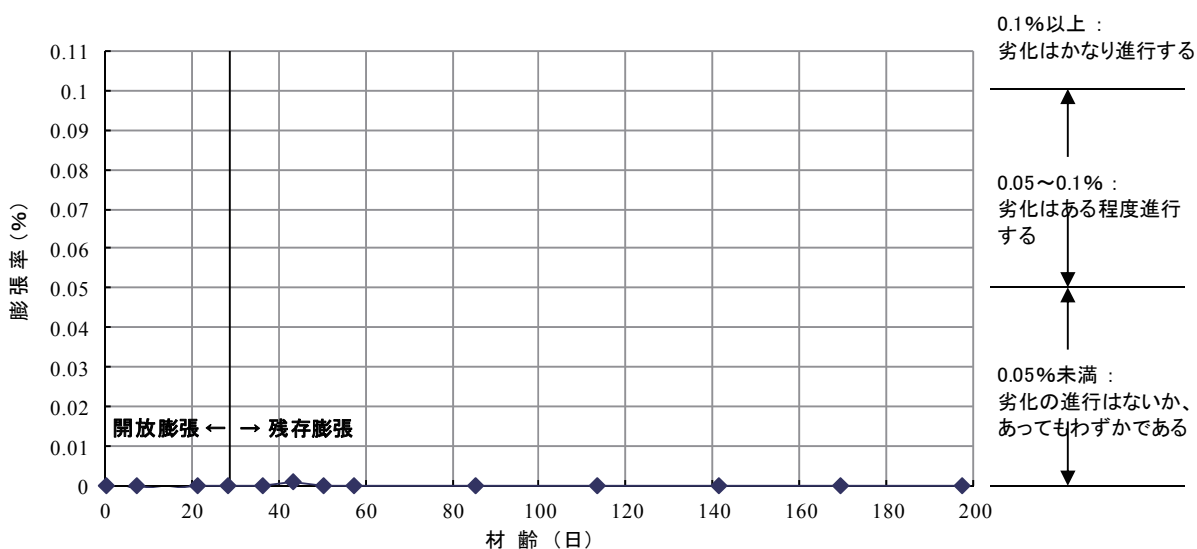


図-2.3.32 促進膨張試験結果