

活用事例①：凍害により材料劣化が生じた橋梁下部工（橋脚）の評価事例

1. 概要

1.1 対象構造物の概要

構造形式：2 径間単純非合成鋼鈹桁橋，張出し式 RC 橋脚
 橋 長：50.0m， 支間長：2@24.0m
 供用開始：1985 年（昭和 60 年）
 設計基準：昭和 55 年道路橋示方書
 環境条件：積雪寒冷地に架橋された国道橋
 スパイクタイヤの使用規制に伴い，1991 年から凍結防止剤が本格的に散布
 使用材料：AE 普通ポルトランドセメント（下部工）
 交差条件：河川（桁下空間の利用なし）

1.2 維持管理計画

設計耐用期間：100 年
 維持管理区分：構造物や路線の重要度，残存供用期間等を考慮して事後維持管理と設定

1.3 全体的な流れ

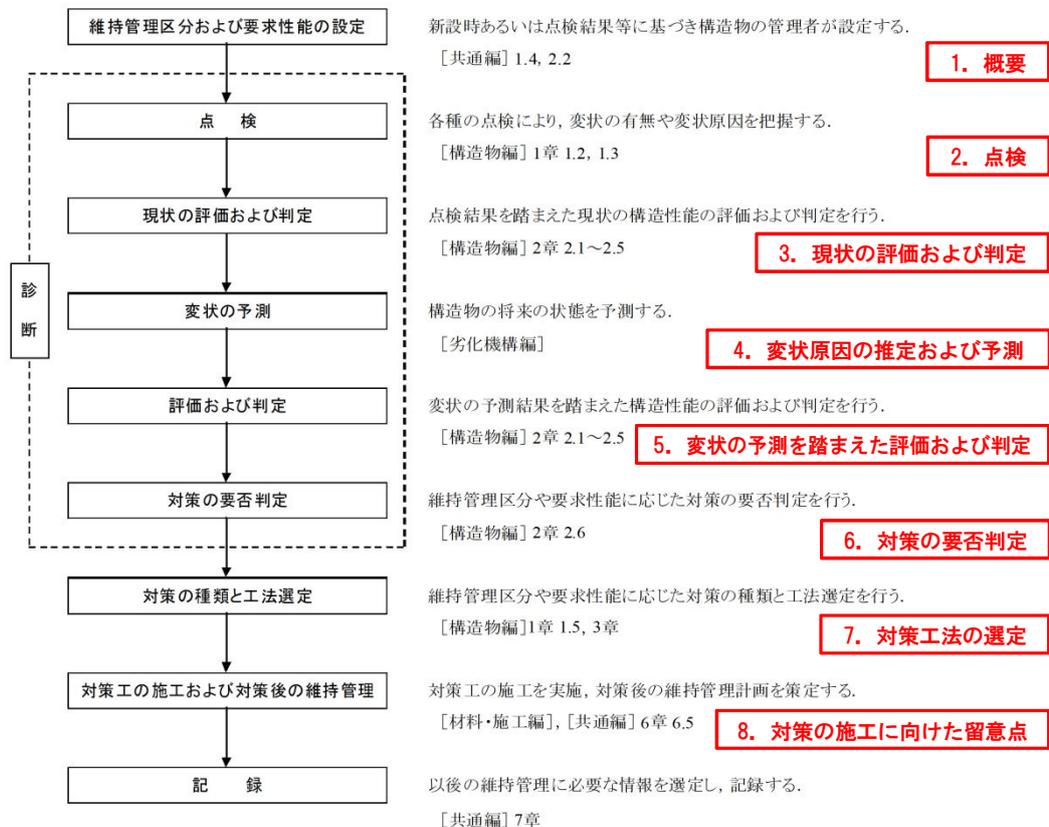


図 1.1 対策に至るまでの全体的な流れ※1

※1 本指針 [構造物編] pp.1. 図-1.1.1

2. 点検

2.1 点検概要

近接目視点検を実施して、外観変状を調査した。ここで、点検を実施するにあたっては、本指針〔構造物編〕の重点点検箇所に留意して行った。

2.2 点検結果（橋脚の上梁および沓座）

橋脚の上梁部や沓座面でコンクリートに微細なひび割れやスケーリングが確認されたが、粗骨材が全面に露出するような状態には至っていない(図 2.1 参照)。

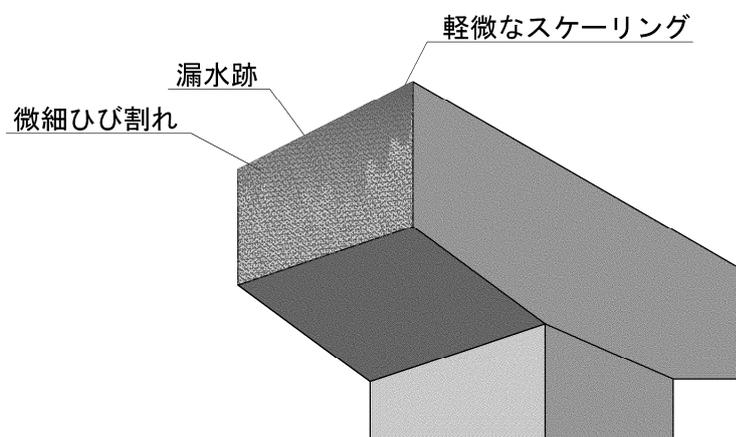


図 2.1 橋脚部で確認された外観変状

3. 現状の評価および判定

3.1 評価および判定の概要

近接目視点検の結果に基づいて、本指針[構造物編]の「2.5 構造性能の評価および判定」に示した構造性能評価判定表により行う(表 3.1 参照)。

表 3.1 構造性能評価判定表[橋脚]※2

構造性能評価判定		橋脚		[c : 材料劣化による変状]		現状の構造性能に対する評価										構造性能レベル (レベル=1~4)		
構造物	部位	変状パターン	変状内容	想定される変状原因	外観変状の程度	安全性										安全性	使用性	
						部材の破壊・損傷			機能上の安全性			使用性						
						断面破壊	疲労破壊	安定限界	走行性限界	第三者影響度限界	走行性限界	外観障害	騒音振動数の限界	機能性	水密性限界			気密性限界
橋脚	上梁 (付け根上側) (中央下側) 音産 (支座付近) 柱・壁 (前面、側面)	c-1	不規則なひび割れ (水分供給がある部位)	材料劣化 (凍害) 【誘因】・排水装置破損 (水供給)・伸縮装置破損 (水供給)	外観変状なし (微細ひび割れ発生するが外観確認不能)	●	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-	1	1
					スケーリング、ひび割れ、ポップアウト、砂利化の発生	●	-	-	-	-	-	▲	-	-	-	-	1	2
					骨材の露出、骨材の剥落	▲	-	-	-	-	-	▲	-	-	-	-	2	2
	※上記以外の部位は「外観」のみ評価対象とする。ただし「破壊」への影響有無の判断が難しい部位の場合は、「破壊」に対しても評価すること。	c-2	不規則なひび割れ (膨張) (水分供給がある部位)	材料劣化 (アルカリシリカ反応) 【誘因】・排水装置破損 (水供給)・伸縮装置破損 (水供給)	外観変状なし (微細ひび割れ発生するが外観確認不能)	●	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-	1	1
					外観変状なし	▲	-	-	-	-	-	▲	-	-	-	-	2	2
					ひび割れ・変色の発生	▲	-	-	-	-	-	▲	-	-	-	-	2	3
					過大なひび割れの発生 浸透・スレの発生	▲	-	-	-	-	-	×	-	-	-	3	3	

写真c-1(1) 凍害 (壁)

写真c-1(2) 凍害 (上梁・音産)

写真c-1(3) 凍害 (上梁・音産)

写真c-2(1) アルカリシリカ反応 (壁)

写真c-2(2) アルカリシリカ反応 (上梁側面、音産付近)

写真c-2(3) アルカリシリカ反応 (上梁正面)

要求性能に対する評価(構造性能への影響度)

- : 影響なし (要求性能を満足している)
- ▲ : 影響あり (性能が低下している)
- × : 性能不足 (性能が不足しているか、その可能性がある)

構造性能レベル

- レベル1 : 性能に影響はないが、外観変状が認められる
- レベル2 : 性能は低下しているが、補修で性能回復が可能
- レベル3 : 性能は低下しているが、大規模補修や補強で性能回復が可能
- レベル4 : 性能が低下し、性能不足となっている

※2 本指針 [構造物編] pp.139. 図一解 2.5.11(9)構造性能評価判定表 (橋脚 : 材料劣化)

3.2 評価および判定結果

桁端部の伸縮装置等からの漏水により、コンクリートに微細ひび割れやスケーリングが発生しているが、骨材や鋼材の露出までは至っていない。

したがって、表 3.1 に基づいて評価した場合には、安全性に対して影響はなく、使用性に対しては性能が低下している状態であると判断される。

この評価をもとに構造性能のレベルを判定すると、安全性に対してはレベル1、使用性に対してはレベル2となる。

4. 変状原因の推定および予測

4.1 変状原因の推定

変状の原因としては、①初期欠陥による変状、②外力や構造条件の変化等による変状、③環境作用による変状が考えられる。本変状の主な原因は③の環境作用で、桁端部の伸縮装置等から漏水に起因する凍結融解作用の繰り返しによって変状が生じたと推定される。

4.2 変状の予測

変状原因が環境作用に起因するため、本指針[劣化機構編]の「2章 凍害」に基づいて変状予測を行う。変状予測を実施するにあたり、詳細調査を実施した。詳細調査は定量的なデータ取得を基本としており、スケーリング量に関しては式(4.1)に示す剥離度¹⁾を調査した。

$$D_m = D \times A_s \quad (4.1)$$

ここに、

D_m : 剥離度 (mm)

D : 平均剥離深さ (mm)

A_s : 調査対象範囲に占めるスケーリング発生面積の割合

なお、剥離度の調査方法に関しては本指針[劣化機構編]2.3.4を参照されたい。

2016年と2018年に剥離度を調査して表4.1を得た。

ここで、スパイクタイヤの使用規制前に供用を開始した道路橋は、凍結防止剤の散布量が供用途中で増加に転じるため、スケーリングの進行速度は規制前後で異なる。よって、スケーリングの進行を安全側に評価するため、表中の凍結融解履歴は供用開始時を起点とせず、凍害の顕在化が始まった凍結防止剤が本格的に散布開始された1991年を起点とした。

表 4.1 剥離度の調査結果

調査年次	2016年	2018年
凍結融解履歴 t (年)	25	27
剥離度 D_m (mm)	1.6	2.0

表4.1に示した調査結果を、指針に示す予測式にフィッティングさせて、Excel回帰により係数を求めると剥離度の予測式として式(4.2)が得られる。

$$D_m = 0.27e^{6.68 \log \frac{t}{14}} \quad (4.2)$$

ここに、

t : 凍結融解履歴 (ここでは経過年数)

4.3 外観に対する評価

既往の研究²⁾では、スケーリング量と外観（目視評価点）の関係について調べている。

表 4.2 はこの知見を参考に、目視評価点に対応するスケーリング量の範囲について、おおよそ整理したものである。

表 4.2 既報²⁾を参考に整理した外観（目視評価点）に対応するスケーリング量の範囲

コンクリートの条件		外観（目視評価点）				
セメント	部 位	1	2	3	4	5
普通 ポルト	打設面	0～0.14	0.14～0.24	0.24～0.75	0.75～1.42	1.42 以上
	型枠面	0～0.07	0.07～0.17	0.17～0.37	0.37～0.71	0.71 以上
高炉 B 種	打設面	0～0.33	0.33～0.41	0.41～0.59	0.59～0.87	0.87 以上
	型枠面	0～0.07	0.07～0.17	0.17～0.29	0.29～0.43	0.43 以上

スケーリング量の単位は g/cm²

写真 4.1 ASTM C 672 における外観（目視評価）

点	劣化事例写真	点	劣化事例写真
0	 なし	1	 粗骨材の露出なし、深さ3mm以下の剥離
2	 評価1と評価3の中間程度の剥離	3	 粗骨材がいくつか露出する程度の剥離
4	 評価3と評価5の中間程度の剥離	5	 粗骨材が全面露出する程の激しい剥離

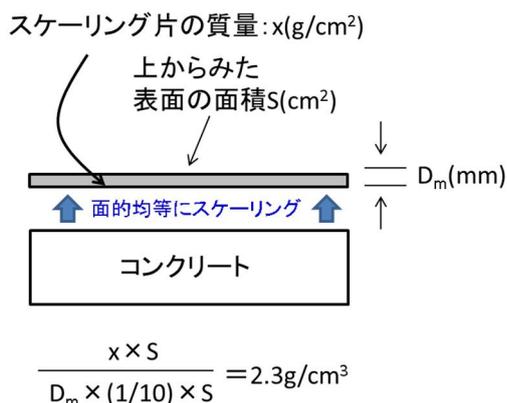


図 4.1 スケーリングが表面全域にわたって均等に発生した状態の概念図

現場では、スケーリングの程度を「剥離度」で定量的に整理している。

安全側に評価するため、スケーリングが表面全域で均等に発生しているものと仮定すると、スケーリング量と剥離度の関係は図 4.1 より、式 (4.3) で表せる。

$$D_m = x \times 10 \div 2.3 \quad (4.3)$$

ここに、 x はスケーリング量 (g/cm^2) である。

先に示した表 4.2 に式 (4.3) を適用すると、表 4.3 に示すような、目視評価点に対応する剥離度の範囲をまとめた一覧表を得ることができる。

表 4.3 外観（目視評価点）に対応する剥離度の範囲

コンクリートの条件		外観（目視評価点）				
セメント	部 位	1	2	3	4	5
普通 ポルト	打設面	0~0.6	0.6~1.0	1.0~3.2	3.2~6.2	6.2 以上
	型枠面	0~0.3	0.3~0.8	0.8~1.6	1.6~3.1	3.1 以上
高炉 B 種	打設面	0~1.4	1.4~1.8	1.8~2.6	2.6~3.8	3.8 以上
	型枠面	0~0.3	0.3~0.8	0.8~1.3	1.3~1.9	1.9 以上

※剥離度の単位は mm

図 4.2 は式 (4.2) をグラフ化し、かつ表 4.3 の値を書き入れたものである。

ここでは、概要で述べた条件にあわせて、「普通ポルトランドセメント」、「型枠面」の値を書き入れている。

この図から、目視評価 5 点に達するのは 31 年目以降であることがわかる。よって、現時点（凍結防止剤散布より 27 年目）から 4 年後の 2022 年（竣工後 37 年）に、目視評価 5 点（粗骨材が全面露出する程の激しい剥離）に達するものと評価される。

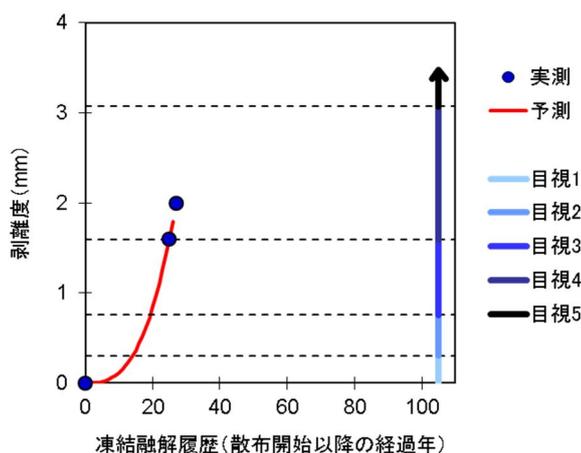


図 4.2 剥離度の予測および目視に関する評価の結果

4.4 鋼材露出に関する評価

既往³⁾は、スケーリング量と最大スケーリング深さの関係について調べ図 4.3 に示す概念のグラフを得ている。一般に高炉セメント B 種を使用すると、普通ポルトランドセメントを使用した場合よりも面的広範にスケーリングが発生しやすい傾向にある。

安全側に評価するため、鋼材露出の評価は、最大スケーリング深さで行うこととした。

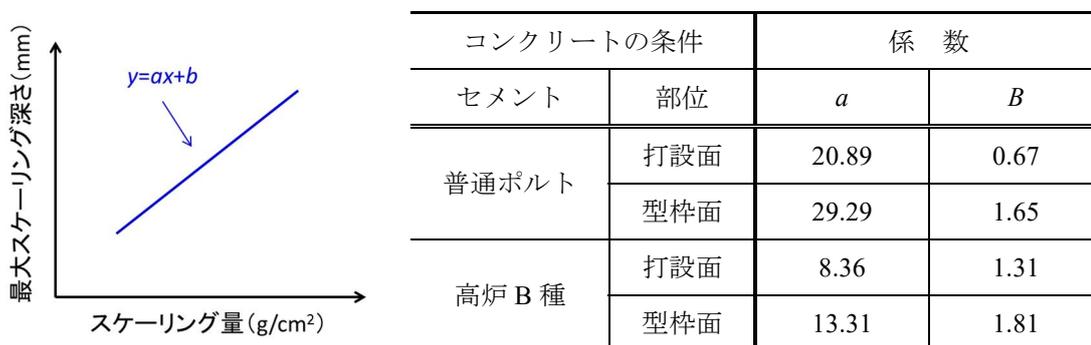


図 4.3 スケーリング量と最大スケーリング深さの関係の概念³⁾

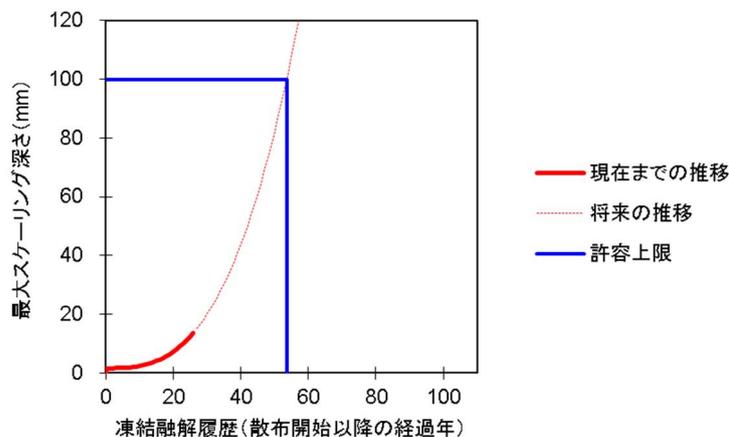


図 4.4 最大スケーリング深さが鋼材位置に達するまでの期間の評価の結果

式(4.3)より剥離度からスケーリング量, 図 4.3 (「普通ポルトランドセメント」, 「型枠面」)よりスケーリング量から最大スケーリング深さを調べ, 最大スケーリング深さが橋脚のかぶり厚である 100mm に達するまでの期間を予測した。

図 4.4 に予測結果を示す。

この図より, 最大スケーリング深さは, 凍結防止剤の散布開始から 54 年目に 100mm に達することがわかる。よって, 現時点(凍結防止剤散布から 27 年目)から 27 年後の 2045 年(竣工後 60 年)に鋼材露出に至るものと評価される^{注)}。

注) この予測は, 2016 年と 2018 年の 2 カ年の調査で得たデータの範囲で決定したものである。予測の精度を高めるには, 複数年にわたって多くの測定値を集める必要がある。このため, データが蓄積されたら適宜, 予測式の見直しや修正を行うことが望ましい。

【参考文献】

- 1) 佐伯昇, 鮎田耕一, 前川静男: 北海道における海岸および港湾コンクリート構造物の凍害による表面剥離損傷, 土木学会論文報告集, 第 327 号, pp.151-162, 1982.11
- 2) 遠藤裕丈: 凍結融解と塩化物の複合作用によるスケーリングに対する耐久性設計法に関する研究, p.54, 北海道大学博士学位論文, 2011.3
- 3) 文献 2), pp.48

5. 変状の予測を踏まえた評価および判定

5.1 評価および判定の概要

変状の予測結果を踏まえ、本指針[構造物編]の「2.5 構造性能の評価および判定」に示した構造性能評価判定表により行う(表 5.1 参照)。

5.2 評価および判定の結果

前述 4.3 より、剥離度を指標とした予測を行った結果、4 年後(竣工後 37 年)に剥離度が目視評価 5 点(粗骨材が全面的に露出するほどの激しい剥離)まで達するものと評価された。したがって、表 3.1 に基づいて評価した場合、安全性と使用性のいずれも性能が低下している状態であると判断され、支承部位あるいは張り出し部などの構造部位による重要度に考慮して構造性能レベルを判定すると安全性、使用性ともにレベル 2 となる。

また、前述 4.4 より、現時点から 27 年後(竣工後 60 年)に鋼材露出に至ると評価された。その場合、同様に表 3.1 に基づいて構造性能レベルを評価すると、安全性、使用性ともにレベル 3 となる(表 5.1 参照)。

表 5.1 変状の予測結果を踏まえた構造性能判定

	安全性		使用性	
	要求性能に対する評価	構造性能レベル	要求性能に対する評価	構造性能レベル
現時点	● (満足)	1	▲ (性能低下)	2
現時点から 4 年後 (竣工後 37 年) 粗骨材全面露出	▲ (性能低下)	2	▲ (性能低下)	2
現時点から 27 年後 (竣工後 60 年) 鋼材露出	▲ (性能低下)	3	× (性能不足)	3

表 5.2 構造性能評価判定表[橋脚]※3

構造性能評価判定		橋脚		[c : 材料劣化による変状]		現状の構造性能に対する評価														
構造物	部位	変状パターン	変状内容	想定される変状原因	外観変状の程度	安全性			機能上の安全性			使用性			構造性能レベル (レベル=1~4)					
						断面破壊	疲労破壊	安定限界	走行性限界	第三者影響度限界	走行性限界	外観阻害	騒音振動数の限界	水密性限界	気密性限界	遮断性限界	安全性	使用性		
橋脚	上梁 (付け根上側) (中央下側) 音産 (支索付近) 柱・壁壁 (前面、側面)	c-1	不規則なひび割れ (水分供給がある部位)	材料劣化 (凍害) 【誘因】 ・排水装置破損 (水供給) ・伸縮装置損傷 (水供給)	外観変状なし (無視ひび割れ発生するが外観確認不能)	●	—	—	—	—	—	—	●	—	—	—	1	1		
					ステーリング、ひび割れ、ポップアウト、砂利化の発生	●	—	—	—	—	—	▲	—	—	—	—	—	—	2	2
					骨材の露出、骨材の剥落	▲	—	—	—	—	—	▲	—	—	—	—	—	—	—	2
	※上記以外の部位は「外観のみ評価対象とする。ただし「破壊」への影響有無の判断が難しい部位の場合には、「破壊」に対しても評価すること。	c-2	不規則なひび割れ (膨張) (水分供給がある部位)	材料劣化 (アルカリシリカ反応) 【誘因】 ・排水装置破損 (水供給) ・伸縮装置損傷 (水供給)	外観変状なし (無視ひび割れ発生するが外観確認不能)	●	—	—	—	—	—	—	—	●	—	—	—	—		
					外観変状なし (無視ひび割れ発生するが外観確認不能)	▲	—	—	—	—	—	—	▲	—	—	—	—	—	2	2
					ひび割れ・変色の発生	▲	—	—	—	—	—	—	▲	—	—	—	—	—	—	2
					過大なひび割れの発生 段差・ズレの発生	▲	—	—	—	—	—	×	—	—	—	—	3	3		

写真c-1(1) 凍害 (壁)

写真c-1(2) 凍害 (上梁・音産)

写真c-1(3) 凍害 (上梁・音産)

写真c-2(1) アルカリシリカ反応 (壁)

写真c-2(2) アルカリシリカ反応 (上梁側面、音産付近)

写真c-2(3) アルカリシリカ反応 (上梁正面)

要求性能に対する評価(構造性能への影響度)

- 影響なし (要求性能を満足している)
- ▲ 影響あり (性能が低下している)
- × 性能不足 (性能が不足しているか、その可能性がある)

構造性能レベル

- レベル1 : 性能に影響はないが、外観変状が認められる
- レベル2 : 性能は低下しているが、補修で性能回復が可能
- レベル3 : 性能は低下しているが、大規模補修や補強で性能回復が可能
- レベル4 : 性能が低下し、性能不足となっている

※3 本指針 [構造物編] pp.139. 図一解 2.5.11(9)構造性能評価判定表 (橋脚 : 材料劣化)

6. 対策の要否判定

以上より、今から4年後（竣工後37年）に構造性能レベルが2となり、今から27年後（竣工後60年）には構造性能レベルが3となる。

耐用期間内に構造性能レベルが3となり、大規模補修が必要となる可能性があるため、レベル2の段階で安全性(断面破壊)と使用性(外観阻害)に対する性能の回復を目的とした対策を講じるものとする(表6.1参照)。

表 6.1 維持管理区分と構造性能レベルに応じた対策工の関係※4

		維持管理区分		
		維持管理区分A (予防維持管理)	維持管理区分B (事後維持管理)	維持管理区分C (観察維持管理)
構造性能 のレベル	レベル1	予防維持管理の場合には、補修時期や効果を検討した後に、予算等の制約条件を考慮した上で最適な対策工を選択する。	①	①
	レベル2		②	① 4年後(竣工後37年)
	レベル3		③	①, ④ 27年後(竣工後60年)
	レベル4		④	④

ここに、

1) 構造性能レベル

レベル1：性能に影響はないが、外観変状が認められるレベル。

レベル2：性能は低下しているが、補修で性能回復が可能なレベル。

レベル3：性能は低下しているが、大規模補修や補強で性能回復が可能なレベル。

レベル4：性能が低下し、性能不足となっているレベル。

2) 対策の種類

①：経過観察（無処置）・点検強化

②：補修（軽微）

③：補修（大規模）

④：供用制限・解体撤去（または更新）

※4 本指針 [構造物編] pp.10. 表一解 1.5.1

■注記

本橋では、凍害による材料劣化のほか、凍結防止剤が散布されているため塩害による材料劣化も懸念される。よって、本来であれば塩害に対する将来の状態も予測した上で構造性能評価が行われるべきである。

しかし、本例では、塩害による影響は小さいと仮定し、あくまでも凍害に対する橋脚の評価事例を紹介するにとどめている。

7. 対策工法の選定

7.1 対策の種類

構造性能レベルに応じた対策の種類は、維持管理区分を「事後維持管理」とした場合には、レベル2では補修（軽微）となる。

補修（軽微）の場合の主たる適用範囲は、①構造物や部材の変状（ひび割れ、剥離等）に対して行う修復・復旧、②第三者被害予防対策、③構造物の外観を向上する目的で行われる修景、④変状の防止あるいは進行の抑制を目的とした劣化抑制対策である。

本例では構造物における桁下空間の利用がないことから、②および③の対策は不要となる。

よって、①構造物や部材の変状（ひび割れ、剥離等）に対して行う修復・復旧と④変状の防止あるいは進行の抑制を目的とした劣化抑制対策を講じるものとする。

7.2 補修工法の選定

1) 変状の修復・復旧

変状の種類は「微細ひび割れ」と「スケーリング」である。コンクリートの表面に発生したひび割れは微細なものであるが、スケーリングが生じていることから、劣化部の除去と表面保護を目的として断面修復工法を適用する。

表 7.1 変状毎の補修工法の選定例^{※5}

コンクリート構造物に適用される主な補修工法		コンクリート構造物に生じる代表的な変状				
		ひび割れ	剥離・剥落	鉄筋の露出・腐食	変色・遊離石灰	スケーリング
ひび割れ補修工法	表面被覆工法	○			△	
	ひび割れ注入工法	○			△	
	充填工法	△			△	
	浸透性防水材塗布工法	○			△	
表面保護工法	表面被覆工法	△	△	△	△	△
	表面含浸工法	△	△	△	△	△
	断面修復工法	△	○	○	△	○
電気化学的防食工法	電気防食工法			□		
	脱塩工法			□		
	再アルカリ化工法			□		
	電着工法	△		□		

○:一般的に適用される補修工法

△:要求性能によって適用されることがある補修工法

□:劣化機構によって適用されることがある補修工法

※5 本指針【構造物編】pp.156. 表一解 3.1.1

ここで、凍害によるひび割れは凍害の進行過程の初期に見受けられる変状であり、ひび割れ幅が増大した場合にはコンクリート表面の浮きや剥離・スケーリング等を伴っている場合も多いため、ひび割れ補修だけを単独で行うケースは殆どないことに留意する必要がある。

断面修復工法は、左官工法、吹付工法および充填工法に分類されるが、本例の補修対象は部分的な「スケーリング」であるため、人力施工が可能な左官工法を適用する。なお、補修工法の詳細や留意点については、本指針〔構造物編〕の「3.2 各種補修工法の概要」を参考にするとよい。

2) 劣化抑制対策

伸縮装置を調査したところ、排水機能が損なわれている状況にあった。そこで、図 7.1 に示すように、乾式止水材を活用して伸縮装置を非排水化することとした。

その一方で、これまでに乾式止水材の劣化によって漏水が発生した例も確認されている。伸縮装置の耐用年数の不確実性に起因して漏水が発生した場合、劣化対策がなくなることになる。そこで、経年により伸縮装置から漏水が発生しても、直ちに対策を実施しなくても橋脚への水分の接触が抑えられる多重防護を行い、橋梁の耐久性能や維持管理に冗長性を持たせる対策を施すこととした。

伸縮装置の改善に加えて行う多重防護の内容として、本指針〔構造物編〕の「3.2.10 水仕舞い対策」には、導水工法、各種補修工法（例えば被覆など）が紹介されている。橋脚には既に水や塩化物イオンが多く供給・蓄積されているため、橋脚の表面を被覆材で覆うとこれらの劣化因子をコンクリート内部に閉じ込めることとなり、再劣化が懸念される。

したがって、橋脚は凍害を受けており、目視による部材表面の経年観察が今後も必要となるため、被覆材で覆う対応ではなく、伸縮装置直下の遊間部に「樋」を設置し、伸縮装置から再び漏水した水が下部と接触することを極力防ぐ導水工法で対応することとした(写真 7.1 参照)。

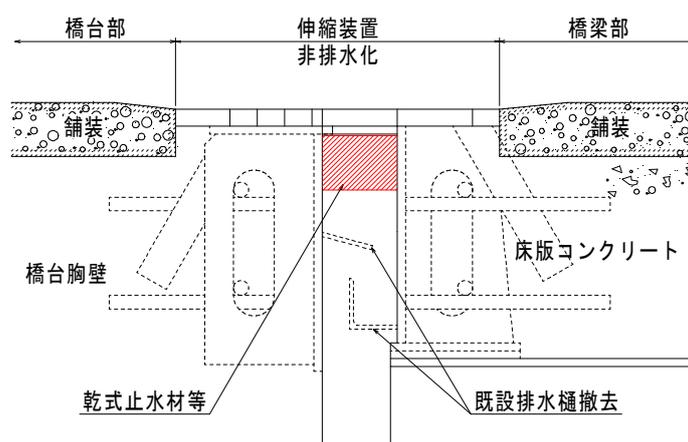


図 7.1 伸縮装置の見直し



写真 7.1 伸縮装置直下への樋の設置例（伸縮装置からの再漏水に備えた多重防護対策）

8. 対策の施工に向けた留意点

8.1 補修材料の選定に対する留意点

本指針[材料・施工編]の「3 章 材料の品質」より、施工時期の制約等によって補修材料に求められる性能は異なることに留意する必要がある。特に、低温環境下における左官工法では、「適応外気温」や「付着強度」の確認が重要となる。

左官工法では、常温時は主にポリマーセメントモルタルや樹脂モルタルが使用されるが、いずれの材料も温度依存性の大きいポリマー成分が含まれるため、施工時や養生期間中の外気温が品質に与える影響が大きい。特に厳しい低温環境下で施工する場合には、①現地における供試体の作成により効果特性を調査、②低温硬化特性に優れるアクリル樹脂系材料を使用、③低温環境下の室内試験が実施されている補修材を使用する等の対策を講じるのがよい。

補修材料の選定にあたっては、本指針[材料・施工編]の「参.1 材料の性能試験結果」を参考にするとよい。

8.2 施工方法に対する留意点

本指針[材料・施工編]の「4 章 施工の留意事項」より、施工は積雪寒冷地においても適切な施工環境および施工後の要求性能を十分に確保するように実施しなければならない。特に断面修復工法は、以下に示すような工程毎に留意すべき対策を指定する必要がある。

- ① 材料は適切に管理・保管しなければならない。
- ② 施工の実施においては、気象条件や作業環境に十分な留意が必要である。
- ③ はつり工および下地処理は入念に行い、良好な施工条件を準備することが重要である。
- ④ 材料や工具の取り扱いについては、十分に把握していなければならない。
- ⑤ 要求性能を十分に発揮するように、所定の期間、適切な養生を実施する。

なお、施工時の留意事項については、材料に対する要求性能とともに設計図書や仕様書等に明確に記載する必要がある。

以上（技術指針の活用事例①）