凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化判定と その補修技術に関する基礎的研究[†]

月 永 洋 一* 庄 谷 征 美**
菅 原 隆*** 土 門 勝 司****

Assessment of Frost Damage of Concrete and its Repair Technique

by

Yoichi TSUKINAGA*, Masami SHOYA**, Takashi SUGAWARA***
and Katsushi DOMON****

The deterioration caused by freeze-thaw action seems to develop gradually from the surface to the inner part. When the frost damage is limited in the cover, the weakened portion is chipped off and the recovering is made by using some repairing material. In this case, it is very important to make a perfect removal of the weakened portion, but its thickness is usually determined empirically by the chipping force and so on.

In this study, experimental investigations were made on the assessing technique to the thickness of damage portion and on the performance of repairing materials to bond tightly on the concrete surface and to protect it from the frost damage.

The degree of damage at different levels of depth was assessed fairly well from the mechanical degradation by applying the improved pull-off test method. The rebound number and depth of pin penetration could be also used as its measure. The rapid air permeability and water absorption tests were useful for getting the information on the changes of air and water tightness caused by the deterioration due to freeze-thaw action.

By using two kinds of repairing material in nine different repairing procedures, the performance after repair was examined to evaluate the refraining effect from suffering the subsequent damage. Furthermore, four types of surface coating material were examined and their ability to prevent the freeze-thaw damage was experimentally confirmed.

Key words : Frost damage, Depth of deteriorated portion, Pull-off method, Rebound number, Depth of pin penetration, Rapid air permeability, Water absorption, Repairing material, Coating material

1 ま え が き

凍害による劣化症状は表面的なものが多く、劣化が表層部に止まる場合では、その程度によって表面被覆や塗布含浸による表面処理工法、あるいは表層部の脆弱化したコンクリートを除去して断面修復材を充填する部分交換法といった補修工法が採用されている。

補修工法の採用にあたっては、まず第一に劣化部を判定する必要がある、特に劣化深さ、すなわち脆弱化した深さを定量的に評価することは、極めて重要な診断作業となる。しかしながら、脆弱部の深さは斫り力

によって判定されるなど、定性的に決定されることが多く、現場での経験や感に頼るところが大きい。脆弱部の深さを定量的に判定し、斫り深さを明確に決定する診断技術が開発されれば、経済的で信頼性の高い補修が可能になると思われる。

一方、表面被覆材や塗布含浸剤、断面修復材などの補修材料は、補修目的に合致した高い性能を有する多くの材料が開発されている。しかしながら、歴史が浅く、補修材料としての基本的な物性はほぼ明らかにされているが、補修材と基材コンクリートの界面挙動に

[†] 原稿受理 平成5年10月29日 Received Oct. 29, 1993

* 正 会 員 八戸工業大学工学部建築工学科 〒031 八戸市妙字大開, Dept. of Architectural Eng., Hachinohe Inst. of Tech., Myo, Hachinohe, 031

** 正 会 員 八戸工業大学工学部土木工学科 〒031 八戸市妙字大開, Dept. of Civil Eng., Hachinohe Inst. of Tech., Myo, Hachinohe, 031

*** 八戸工業高等専門学校 〒039-11 八戸市田面木上野平, Dept. of Civil Eng., Hachinohe National College of Tech., Tamonoki, Hachinohe, 039-11

**** ショーボンド建設(株)エンジニアリング本部 〒101 東京都千代田区神田錦町, Structural Eng. Division, Sho-Bond Corp., Chiyoda-ku, Tokyo, 101

注目した研究なども重要であることが指摘されている。³⁾ 補修材は、基材コンクリートとの付着性が高く、耐凍害性上問題のないものでなければならず、補修後の性能確認も重要な評価項目の一つである。

本研究は、以上のような観点から、主として凍害による劣化深さを定量的に判定するための手法と、補修材の付着性および凍害防止効果などの補修後の性能について実験的に検討したものである。

劣化度および補修後の性能を評価するための試験は、現場で簡便に実施できるものであることが望ましく、ここでは特に簡易性を重視した試験⁴⁾を採用して検討した。劣化深さは、pull-off 試験法⁴⁾を応用した任意深さの強度測定を可能とする試験方法により強度面から判定した。これに加え、反発度⁶⁾、ピン貫入深さ⁷⁾および Figg 法⁷⁾を発展させた笠井らが提案する簡易透気性試験⁵⁾と簡易吸水性試験^{5), 8)}も実施して、総合的に劣化程度を調べると共に、これら試験の有用性についても検討した。補修材は、主に高分子系材料から構成される2種類の断面修復材と4種類の表面被覆材について補修後の性能を評価した。

2 実験概要

2.1 実験計画

本実験は、Ⅱシリーズよりなる。Table I に、実験

シリーズの内容を示す。シリーズⅠでは、凍結融解試験後に劣化度を評価し、断面修復を施した供試体を再度凍結融解試験に供して、補修部分の性能を評価した。

Table II. Repairing materials.

Sym.	Repairing materials	Coating (Table III)
RA	Non repair	A
RB	Polymer cement mixed glass fiber	A
RC	Prepacked polymer cement	A

シリーズⅡでは、表面被覆材を塗布後、凍結融解試験を行い被覆材の性能を評価した。

2.2 使用材料

セメントは早強セメント、粗骨材は碎石（最大寸法 20 mm, 粗粒率 6.95, 比重 2.70）、細骨材は陸砂（粗粒率 2.73, 比重 2.59）、混和剤は AE 剤（ヴィンソル）を使用した。シリーズⅠで用いた断面修復材は、Table II に示す2種類とし、シリーズⅡで用いた表面被覆材は、Table III に示す4種類とした。

2.3 コンクリートの調(配)合および供試体

コンクリートの調(配)合は、劣化を早めるため、水セメント比 65%、目標空気量 2.5% とした。調(配)合を Table IV に示す。供試体は、10×10×40 cm の角柱とし、材齢 14 日まで水中 (20°C) 養生後、材齢 16 日まで気中 (20°C, 60% RH) 養生とした。材齢 16 日には、シリーズⅠにおいて、劣化促進面とした供試体側面 10×40 cm の面を除いた5面に Table III に示す塗装仕様 A を施し、シリーズⅡにおいては、供試体の全面に Table III に示す塗装仕様 A~D の4種類を施して、封緘状態で材齢 28 日まで気中に静置した。

供試体の強度および気泡組織の測定結果を Table V に示した。

2.4 凍結融解試験

凍結融解試験は、前掲 Table I に示したとおり、シリーズⅠでは ASTM C666 B 法および A 法、シリーズⅡでは ASTM C666 A 法に準拠して実施し、所定サイクルごとに相対動弾性係数と質量変化率を求めた。

2.5 劣化度評価試験

2.5.1 ブルオフ強度^{4), 5)} 試験概要を Fig. 1 に示す。Fig. 1(a) の試験方法は、pull-off 法⁴⁾を応用した試験であり、パイプ型円形鋼片を用いることにより、任意深さの引張強度の測定を可能としたものである。試験は、供試体に乾式コアビットを用いて径 75 mm、深さ 5, 15, 30, 50 mm の円形溝をそれぞれあけ、コンクリ

Table III. Coating materials.

Sym.	Primer	Putty	Under	Second	Finish	Thickness (μm)
A	Epoxy resin	Epoxy resin	Polyurethane resin	Polyurethane resin	Polyurethane resin	150
B	Epoxy resin	Epoxy resin	—	Epoxy resin	Polyurethane resin	190
C	Epoxy resin	—	Polymer cement	Polymer cement	Polyurethane resin*	760
D	Epoxy resin	—	Polymer cement	Polymer cement	—	700

*: Two times coating.

Table IV. Mix proportion of concrete.

W/C (%)	Target slump (cm)	Target air (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE
65	8.0	2.5	47.5	188	396	857	986	0.040

Table V. Strength and air-void characteristics of concrete.

Compressive strength 28 days (kgf/cm ²)	Splitting tensile strength 28 days (kgf/cm ²)	Air content		Mean of air void diameter (μm)	Spacing factor (μm)
		Fresh (%)	Hardened (%)		
287	29	2.4	1.9	72.5	493

Fig. 1. Test apparatus for pull-off tensile strength.

ートの円形溝と同じ深さのパイプ部を持つ円形鋼片をエポキシ樹脂接着剤で接着する。接着剤硬化後、建研式接着力試験機を用いて鋼片に接着されたコンクリートを引張り、所定の深さで破断させて、最大荷重 P と破断面積 A との関係からブルーフ強度 σ_t を求めた。

$$\sigma_t = P/A \quad (1)$$

ここで σ_t : ブルーフ強度 (kgf/cm²)

P : 最大引張荷重 (kgf)

A : 破断面積 (cm²)

なお、シリーズⅠにおける断面修復後の強度評価は、Fig. 1(b)に示すように、円形溝を基材コンクリート面から深さ 10 mm まで設け、パイプ部を持たないフラットな円形鋼片を接着して試験を行った。また、シリーズⅡで試験した表面被覆材の付着強度は、フラット型円形鋼片を被覆材に接着し、円形鋼片の外周に沿って被覆材とコンクリートとの界面まで切込みを入れて試験を行った。

2・5・2 反発度 供試体を 25 kgf/cm² の拘束加圧力で圧定し、シュミットハンマー法により測定した。

2・5・3 ピン貫入深さ⁷⁾ ピン貫入試験機により、径 3.6 mm、長さ 30.5 mm、先端角度 22.5° の鋼製ピ

Fig. 2. Test apparatus for rapid air permeability and water absorption.

ンを約 11 kgf・m のスプリング反発エネルギーでコンクリートに打込み、ダイヤルゲージでピンが貫入した深さを測定した。

2・5・4 簡易透気性 試験概要を Fig. 2 に示す。試験は、供試体に設けた径 10 mm、深さ 35 mm の試験穴の真空度が 60 mmHg から 80 mmHg までの 20 mmHg 低下する時間 T を計測して、単位時間当たりの真空度低下量を式 (2) より求め、この値を簡易透気速度 S として透気性の指標値とした。本試験は、Figg 法を発展させた笠井らが提案する試験方法⁸⁾で、試験穴への空気透過量を間接的に真空圧力変化として測定するものである。

$$S = 20 \text{ mmHg} / T \quad (2)$$

ここで S : 簡易透気速度 (mmHg/sec)

T : 真空度が 20 mmHg 低下する時間 (sec)

2・5・5 簡易吸水性 試験概要を Fig. 2 に併示する。簡易透気性試験終了後、試験穴に水を注入して、コンクリートの吸水量をメスピペットの中の水の低下量として読み取り、吸水量 W と吸水時間 T を計測する。試験穴単位面積当たりの累積吸水量 W/A と吸水時間の平方根 $\sqrt{T}$ との直線回帰から係数 a を求め、この値を簡易吸水係数として吸水性の指標値とした。本試験方法は笠井らの文献⁸⁾に詳しいが、円柱状ソースからの累積吸水 (サクション) 量が近似的には、式 (3) で表示できることによっている。なお、式中係数 a は、sorptionity を表し、水分拡散係数や不飽和透水係数と密接に関連した材料定数の意味を有する。

$$W/A = a \cdot \sqrt{T} \quad (3)$$

ここで W : 吸水量 (cm³)

A : 試験穴有効面積 (cm²)

a : 簡易吸水係数 (cm/sec^{1/2})

T : 吸水時間 (sec)

3 試験結果および考察

3・1 劣化度の評価と断面修復 (シリーズⅠ)

3・1・1 劣化度の評価 Fig. 3 に、相対動弾性係

Fig. 3. Relative dynamic modulus of elasticity and weight change versus freeze-thaw cycle.

Fig. 4. Pull-off tensile strength versus freeze-thaw cycle.

Fig. 5. Ratio of pull-off tensile strength versus freeze-thaw cycle.

数および質量変化率と凍結融解サイクル数の関係を示す。相対動弾性係数は、試験終了時の360サイクルで80%強まで低下したが、質量はほとんど変化が認められず、5面塗装による一面暴露の影響も関与していると考えられる。

Fig. 4に、ブルオフ強度と凍結融解サイクル数の関係を示す。サイクル数の増加に伴い、ブルオフ強度は低下し、表面からの深さ5mmの位置で最も低下が大きいことが示されている。両者の関係は、指数関数的に表わすことができ、凍結融解作用による強度低下を深さごとに推定し得る。Fig. 5は、0サイクル時のブルオフ強度を100%とした時のブルオフ強度変化率と凍結融解サイクル数の関係を示したもので、Fig. 6は、Fig. 5に示した関係より、ブルオフ強度変化率が80%、

Fig. 6. Depth of deteriorated portion versus freeze-thaw cycle.

60% および40% となる時の劣化深さをサイクル数との関係から推定した図である。劣化深さと凍結融解サイクル数の関係は増殖型のべき乗式によって表示できることが認められ、凍結融解作用による内部への劣化進行メカニズムに関しては未解明な部分が多いものの、所定のサイクル数における劣化深さを強度面から推定できる可能性があることを示唆している。

Fig. 7に、反発度およびピン貫入深さと凍結融解サイクル数の関係を示す。反発度はサイクル数の増加に伴い徐々に低下し、360サイクル時では初期値(0サイクル時)に対して70%まで低下した。ピン貫入深さはサイクル数の増加に伴い徐々に増大し、360サイクル時では初期値に対し136%まで増大した。反発度およびピン貫入深さは、凍結融解作用による表層部の品質低下を捉え得ることが分かり、表層部の劣化診断

Fig. 7. Rebound number and depth of pin penetration versus freeze-thaw cycle.

Fig. 8. Recovering speed versus freeze-thaw cycle.

Fig. 9. Coefficient of water absorption versus freeze-thaw cycle.

のための指標値として有用である。凍結融解作用を受けたコンクリートを強度面から診断する場合には、まず、反発度またはピン貫入深さの測定によって劣化部分を判定し、つぎにプルオフ強度の測定によって劣化深さを判定するという手法を用いれば、精度の高い診断が可能になると思われる。

Fig. 8 に、簡易透気速度と凍結融解サイクル数の関係を示す。Fig. 9 に、簡易吸水係数と凍結融解サイクル数の関係を示す。簡易透気速度および簡易吸水係数とも、サイクル数の増加に伴い増大傾向を示しており、プルオフ強度や反発度、ピン貫入深さの変化率に比べると増大率は大きい。両指標値はポロシチーと密接に関係することが分かっており、両指標値の増大傾向は、凍結融解作用による表層部の組織の緩みを極めて敏感に反映していると考えられる。本試験は、凍害による劣化程度を強度面に加えて気密性および水密性の側面から現場で簡易に評価し得る有効な手法であると思われ、劣化基準値の設定などが課題である。

3.1.2 断面修復 Table VI に、断面修復内容を示す。修復レベルは 9 種類を設定した。修復レベルは、断面修復材の付着強度が文献 2) に示されている 7 kgf/cm^2 以上、文献 11) に示されている 15 kgf/cm^2 以上を参考として、表面からの深さ 5 mm のプルオフ強度が 17.2 kgf/cm^2 を示した凍結融解 180 サイクル時を健全状態、 10.8 kgf/cm^2 を示した 300 サイクル時を中間状態とし、深さ 5 mm の強度が 9.6 kgf/cm^2 を示した 360 サイクル時では、表面部(深さ 0 mm)の強度が 9.6 kgf/cm^2 以下と推定されることから表面部を対象に劣化状態として設定した。180 サイクル時および 300 サイクル時では、表面から深さ 5 mm までコンクリートをカッターで除去し、360 サイクル時での表面処理はワイヤーブラシ掛けのみとして、それぞれ前掲 Table II に示した RA, RB, RC の材料で断面修復を行った。修復時期は、すべての供試体について 360 サイクル終了時から 1 週間後に実施し、それまで供試体は封緘状態として 20°C 恒温室に静置した。

Fig. 10 に、断面修復を行った供試体の相対動弾性

Repair time	RA ^{※1}	RB ^{※1}	RC ^{※1}
After 180 cycles $\sigma_t = 17.2^{\text{※2}}$	Sym. 180RA (5-0) ^{※3} Cut of 5mm	Sym. 180RB (5-5) ^{※3} Cut of 5mm	Sym. 180RC (5-15) ^{※3} Cut of 5mm Cut of 10mm
After 300 cycles $\sigma_t = 10.8^{\text{※2}}$	Sym. 300RA (5-0) ^{※3} Cut of 5mm	Sym. 300RB (5-5) ^{※3} Cut of 5mm	Sym. 300RC (5-15) ^{※3} Cut of 5mm Cut of 10mm
After 360 cycles $\sigma_t = 9.6^{\text{※2}}$	Sym. 360RA (0-0) ^{※3} Brush with a wire brush Cut of 5mm	Sym. 360RB (0-5) ^{※3} Brush with a wire brush Cut of 5mm	Sym. 360RC (0-15) ^{※3} Brush with a wire brush Cut of 15mm

※1: Refer to Table II.

※2: Pull-off tensile strength of 5mm depth. Unit in "kgf/cm²".

※3 (x1-x2): x1: Depth of cutting.
x2: Depth of filling.

係数と凍結融解サイクル数の関係例を示す。相対動弾性係数は、修復レベルの違いに関わらずほとんど低下を示さなかった。

Fig. 11 に、断面修復 9 レベルのプルオフ強度の比較を示す。本試験での破断位置は、修復後 (0 サイクル時) および凍結融解 300 サイクル終了時の場合とも、ほとんどの場合が基材コンクリート部分で破断しており、極く一部については修復材と基材コンクリートの界面を含んで破断する場合があった。全体的な傾向として、プルオフ強度は健全状態として設定した 180 サイクル時の修復供試体が高く、ついで中間状態の 300 サイクル時修復供試体、劣化状態の 360 サイクル時修

Fig. 10. Relative dynamic modulus of elasticity versus freeze-thaw cycle of repaired concrete.

Fig. 11. Pull-off tensile strength of repaired concrete.

復供試体という序列関係にあるが、すべての修復レベルとも修復レベル設定値のプルオフ強度値を上回っており、修復までの期間の含水状態での封蔵静置による自己治癒効果あるいは修復材の浸透による強度付与効果もあったと考えられる。しかしながら、本図からは、断面修復時期が早ければ、研り深さも浅く経済的な修復が可能となり、脆弱化した部分を完全に除去しなければ修復効果が劣るということが分かる。修復レベルの違いでは、RAタイプがやや高いプルオフ強度を示し、設計時の容積を持った断面に修復する必要がない場合は、表層部の脆弱化した部分を除去して表面被覆材を塗布するだけで十分劣化の防止・抑制の効果があるということが指摘できる。また、RCタイプはRBタイプより若干高いプルオフ強度を示す傾向にあり、プレパックドポリマーセメント系による修復性能はグラスファイバー混入ポリマーセメント系より優れるようである。

3・2 表面被覆材の性能評価(シリーズⅡ)

Fig. 12 に、相対動弾性係数および質量変化率と凍結融解サイクル数の関係を示す。表面被覆を行っていない Non タイプは、相対動弾性係数および質量変化率がサイクル数の増加に伴って低下し、270 サイクルでは相対動弾性係数が 60% 以下となった。これに対し、表面被覆を行った A～D タイプの場合では、被覆材の種類による大差はみられず、全タイプとも相対

Fig. 12. Relative dynamic modulus of elasticity and weight change versus freeze-thaw cycle of coated concrete.

動弾性係数が 240 サイクルあたりから低下し始めたが、450 サイクル終了時でも 80% 以上を示し、質量変化率の低下も認められなかった。表面被覆材は、凍害の劣化因子である水の侵入を遮断する機能を有し、劣化を防止・抑制することが可能な材料である。本実験においても、相対動弾性係数および質量変化率の測定結果からこの効果は極めて高いことが確認できた。

Fig. 13 に、表面被覆材 4 タイプの付着強度を示す。コンクリートとの付着性が高いのは、A タイプおよび B タイプのポリウレタン樹脂系を塗布した場合で、両者とも約 20 kgf/cm² を示し、凍結融解 450 サイクル終了時での付着強度は 72% および 79% に低下した。C タイプおよび D タイプのエポキシ樹脂ポリマーセメント系の付着強度は両者とも約 15 kgf/cm² を示し、450 サイクル終了時では 56% および 60% まで低下した。表面被覆材の付着強度は、文献 2) では 4～5 kgf/cm² 以上、文献 10) および 11) では 10 kgf/cm² 以上と示されており、本実験で用いた A～D 4 タイプの付着強度はこの基準値を十分満足するが、凍結融解 450 サイクル終了時の付着強度は、C タイプおよび D タイプの両者とも約 8.6 kgf/cm² を示し、前掲の文献 10) および 11) の基準値をやや下回る結果となった。なお、試験終了後の供試体の外観は、全タイプとも異常が認められなかった。

Fig. 14 に、表面被覆材 4 タイプを用いた場合のプルオフ強度と表面からの深さの関係を示す。表面被覆材 4 タイプのプルオフ強度は種類による大差はみられ

Fig. 13. Bond strength of coated concrete.

Fig. 14. Pull-off tensile strength versus distance from surface of coated concrete.

ず、凍結融解 450 サイクル終了時で深さ 5 mm の位置の場合、 10 kgf/cm^2 強の値を示し、劣化促進以前の強度に比べて約 40% まで低下した。前掲の断面修復材の付着強度を強度劣化の基準値としてみれば、文献 2) の 7 kgf/cm^2 以上は満足し、文献 11) の 15 kgf/cm^2 以上は下回ることになる。

本試験においては、相対動弾性係数および質量変化の低下がみられなくても、また、外見上異常がみられなくても、プルオフ強度の低下が認められており、プルオフ強度の測定によって被覆されたコンクリートの脆弱化を評価できるものと思われる。

4 結 論

凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化度評価と補修材の付着性および凍害防止効果の性能について検討した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 任意深さの強度測定を可能としたプルオフ強度試験は、凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化深さの判定および補修時の研り深さ判定に有効である。また、断面修復材および表面被覆材の付着強度評価に有効である。

(2) 反発度およびピン貫入深さは、凍結融解作用による表層部の劣化度判定に有効である。

(3) 簡易透気性試験および簡易吸水性試験は、凍結融解作用による劣化度を気密性および水密性の側面から現場で簡便に評価し得る有効な手法である。

(4) 凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化診断は、強度面から反発度またはピン貫入深さおよびプルオフ強度を測定し、気密性・水密性の面から簡易透気速度または簡易吸水係数を測定すれば、総合的な診断が可能になると思われる。

(5) 断面修復材は凍結融解作用による劣化部の修復に有効であり、修復時期が早ければ、研り深さも浅く経済的な修復が可能である。また、脆弱化した部分を完全に除去しなければ修復効果が劣り、設計時の容積を持った断面に修復する必要がある場合は、表層部の脆弱化した部分を除去し表面被覆材を塗布するだけで

劣化の防止・抑制効果が期待できる。

(6) 表面被覆材による凍害劣化の防止・抑制の効果は高いが、コンクリートとの付着強度はエポキシ樹脂ポリマーセメント系よりポリウレタン樹脂系が高い。また、相対動弾性係数および質量変化の低下がみられず、外見上異常がみられなくても、被覆されたコンクリートのプルオフ強度が低下する場合がある。

本研究を遂行するにあたり、日本大学笠井芳夫教授よりご指導を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 財国土開発技術センター・建築物耐久性向上技術普及委員会編，“鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術”，2 章（1986）技報堂出版
- 2) 岸谷孝一，西沢紀昭他編，長谷川寿夫，藤原忠司著，“コンクリート構造物の耐久性シリーズ凍害”，7 章・8 章（1988）技報堂出版
- 3) 岡本享久，井上 潔，コンクリート工学，**31**，7，94（1993）。
- 4) A. E. Long and A. McC. Murray, ACI SP82-17 (1984).
- 5) 月永洋一，庄谷征美，非破壊検査，**40**，598（1991）。
- 6) 日本建築学会，“コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル”，3 章（1983）。
- 7) M. Shoya, Y. Tsukinaga, S. Sugita, M. Matsui and T. Hara, Proc. of Int. Conf. on NDT in Civil Engineering, 379 (1993).
- 8) Y. Kasai, I. Matsui and M. Nagano, ACI SP82-26 (1984).
- 9) 平井和喜，成田 健，桐越一紀，コンクリート構造物の凍害とその対策—研究の現状と今後の課題—（シンポジウム論文集），49（1992）。
- 10) 建設省，“建設省総合技術開発プロジェクト，コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書〈第 2 編〉”，p. 223（1989）。
- 11) 日本道路公団，“維持修繕要領（橋梁編），第 3 編コンクリート構造物”，p. 5（1988）。