

鉄筋腐食による RC 覆工におけるかぶりコンクリートのはく落現象の目視点検評価手法の検討

A study on evaluation method of visual inspection for exfoliation phenomenon of cover concrete for RC lining by reinforcement corrosion

小田和伸¹, 乾川尚隆², 木村定雄³

Kazunobu Oda, Naotaka Inuikawa and Sadao Kimura

¹ 金沢工業大学大学院 工学研究科環境土木工学専攻 (921 - 8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

E-mail: kazunobu@venus.kanazawa-it.ac.jp

² 金沢工業大学大学院 工学研究科環境土木工学専攻 (921 - 8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

E-mail: a6600172@venus.kanazawa-it.ac.jp

³ 金沢工業大学教授 環境・建築学部環境土木工学科 (921 - 8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

E-mail: s.kimura@neptune.kanazawa-it.ac.jp

Potential Exfoliation caused by reinforcement corrosion in a tunnel tends to increase. In the manned tunnel in road and railway tunnel, exfoliation is one of the most important items for safety's sake. This paper experimented with reinforcement corrosion that modeled RC lining.

The mechanism of exfoliation due to the reinforcement corrosion was clarified. Then, it proposed evaluation method by visual inspection to predict exfoliation from the deformed externals.

Key Words : tunnel, lining, exfoliation, maintenance, visual inspection

1. はじめに

高度経済成長時代に建設された土木構造物は老朽化してきている。また、人口減少などによる税収の減少により公共事業費が削減される傾向にある。このような現状から今後必要となる既存の構造物を延命化し、長く供用する必要がある。とくにトンネル構造物は一度構築すると再構築が困難となる場合が多い。このため、構造物の耐久性能や使用性能を精査し、種々の性能を確保するための維持管理を適切に行うことが重要となる。開削トンネルやシールドトンネルの覆工は、一般に鉄筋コンクリート構造であり、中性化の進行などの要因で鉄筋腐食が進行し、それに伴ってコンクリート片のはく落現象が生じることが懸念される。なかでも、道路トンネルや鉄道トンネルなどの有人のトン

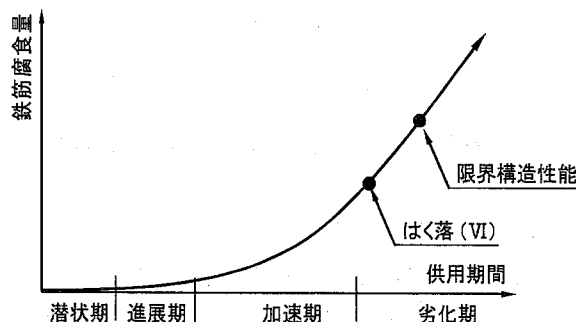


図-1 鉄筋腐食を目安としたはく落現象と限界構造性能

ネルにおいては、コンクリート片などはく落現象が重要な使用上の安全性能の一つと考えられる。また、

はく落現象後の曲げ耐力やせん断耐力などの構造性能が低下することも想定される。図-1 ははく落現象と限界構造性能の関係を想定したものである。しかしながら、はく落現象のメカニズムに関する研究は少ない現状にある。このため、はく落現象を簡易な方法で事前に予測し、適切な補修時期や工法などを意思決定するための技術の確立が求められている。

本報告は、開削工法で構築された地下鉄駅部軌道階の上床版を想定し、鉄筋腐食によるかぶりコンクリートのはく落現象を実験により模擬し、その結果から主にはく落現象の簡易予測手法を検討するものである。

2. 実験概要

(1) 供試体概要

開削トンネルの床版をモデル化した供試体を作製した。図-2 は供試体の概要を示したものである。引張側の主鉄筋として D16 を 2 本、スターラップとして D13 を 6 本配筋した。下面から主鉄筋の芯かぶりは 60mm であり、図-3 に示すように下面からスターラップまでの純かぶりは 39mm となる。なお、使用した鉄筋の鋼種は SD345 である。コンクリートの材料特性は、材齢 28 日の圧縮強度が 29.5N/mm^2 、また、静弾性係数が 21900N/mm^2 である。

(2) 鉄筋腐食の方法

鉄筋腐食を短期間で模擬するため、図-2 に示したリード線を主鉄筋側を陽極、銅板側を陰極としてはんだ付けし、直流電流を通電させて強制的に鉄筋を腐食させた。図-4 および図-5 は電食実験の概要を示したものである。濃度 3% の塩水に供試体を浸漬し、単位鉄筋表面積あたりの電流密度を 3.8A/m^2 として¹⁾通電した。したがって、電食を生じさせる電気的回路は、図-4 および図-5 のとおりとなる。

3. はく落現象の予測に着目した目視点検方法

(1) 目視点検基準の設定

はく落現象の予測は、日常点検として細かい頻度で実施することが可能であり、その上、安価である目視点検によるものとした。しかしながら、目視点検は点検を実施する者の技能に応じて健全度評価にバラツキが生じるものと考えられた。そこで、まず、簡易的な目視点検基準を検討した。わが国では各機関から目視点検基準^{2), 3), 4)}が示されている。例えば、鉄道構造物

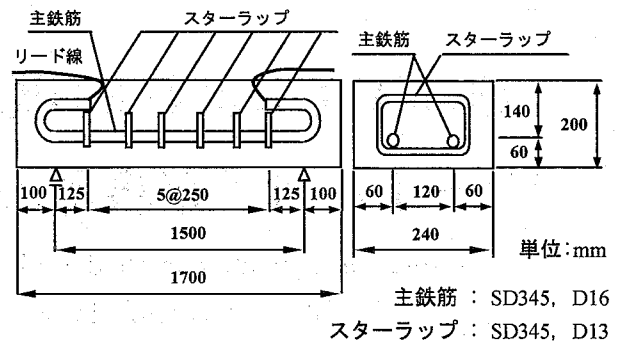


図-2 供試体の概要

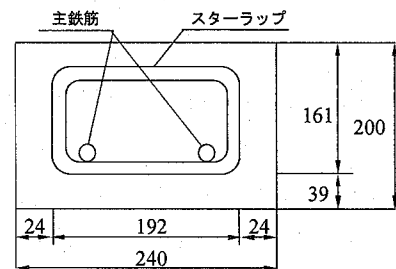


図-3 純かぶりを示した図

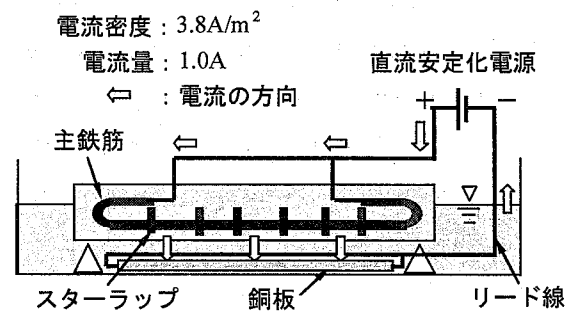


図-4 電食概要 (側面図)

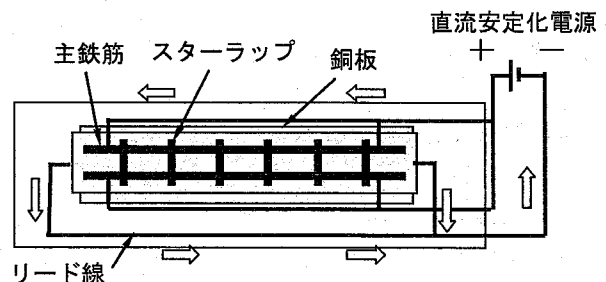
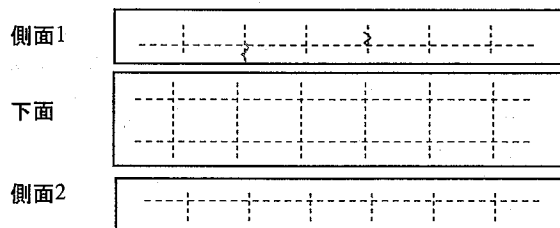


図-5 電食概要 (平面図)

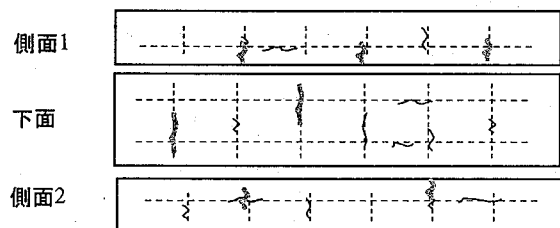
等維持管理標準・同解説⁵⁾では、はく落現象が生じる覆工表面の性状を、ひび割れに関するものでは、①放射状に伸びるひび割れ、②閉合・交差・平行するひび割れ、および③網目上あるいは亀甲状のひび割れが存在すると示している。また、材料の劣化として、鉄筋

表－１ 版構造の目視評価基準

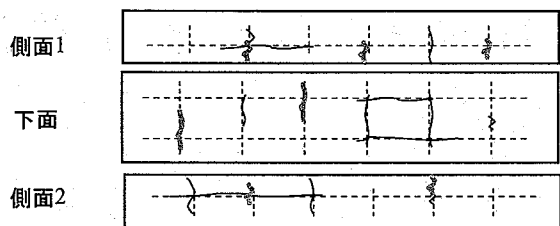
グレード	外観の状態
状態Ⅰ	底面に鉄筋(最もかぶりの小さい鉄筋、一般にスターラップ)に沿ったひび割れと腐食痕が見られる
状態Ⅱ	底面に鉄筋に沿ったひび割れが複数本確認でき、腐食痕が拡大している
状態Ⅲ	底面に鉄筋に沿ったひび割れが進展しそれと交わる方向の鉄筋に沿うひび割れと腐食痕が見られる
状態Ⅳ	底面に鉄筋に沿ったひび割れとそれに交わる方向のひび割れがつながる
状態Ⅴ	底面に鉄筋に沿ったひび割れとそれに交わる方向のひび割れがつながり、閉じている



状態Ⅰ



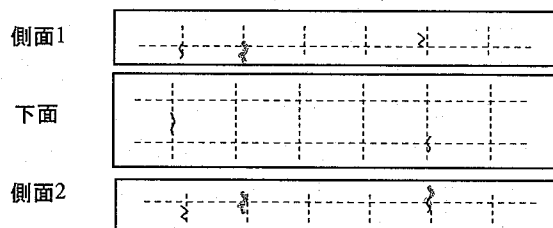
状態Ⅲ



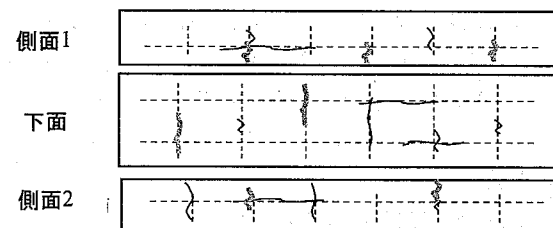
状態Ⅴ

表－２ 梁構造の目視評価基準

グレード	外観の状態
状態Ⅰ	鉄筋(最もかぶりの小さい鉄筋、一般にスターラップ)に沿ったひび割れと腐食痕が見られる
状態Ⅱ	鉄筋に沿ったひび割れが複数本確認でき、腐食痕が拡大している
状態Ⅲ	鉄筋に沿ったひび割れが進展しそれと交わる方向の鉄筋に沿うひび割れと腐食痕が見られる
状態Ⅳ	鉄筋に沿ったひび割れとそれに交わる方向のひび割れがつながる
状態Ⅴ	鉄筋に沿ったひび割れとそれに交わる方向のひび割れがつながり、閉じている



状態Ⅱ



状態Ⅳ

—: 腐食痕
—: ひび割れ
--: 鉄筋

図－６ 外観グレードと外観状態の例

の露出、および錆汁が主鉄筋や配力筋方向に見られると表記している。しかしながら、はく落現象が生じるまでの外観変化を段階的に表現されておらず、劣化の進行過程となる外観のグレードが明確に示されていない。このような現状からはく落現象が発生するまでの健全度低下の進行を段階的に示し、現在状態から先の劣化進展を予測するための目視点検基準を表－１および表－２に示すように定めた。表－１は鉄筋腐食の進行に伴うはく落現象の発生が一方方向となる版構造の場合を対象とし、表－２はそれが二方向となる梁構造の場合を対象とした基準である。図－６は表－１および

表－２に示した外観グレードと外観状態の例を示したものである。

(2) 目視点検方法の概要

電食経過時間に伴って変化する外観グレードを確認するため、供試体の目視点検を電食期間 64 日目までは 1 回/3 日の頻度で、64 日以降は 1 回/7 日の頻度で実施した。また、毎回、供試体表面に析出された腐食痕を外観撮影をした後に除去し、ひび割れ状況をスケッチした。

4. 実験結果およびその考察

(1) 電食環境

図-7に電食経過日数に伴って変化する電流および電圧の状態を示す。初期の電圧は6.35V、電食期間10日目で電圧は7.66Vまで増加したが、電食期間38日目で6.15Vまで減少した。しかしながら、その後38日経過後に電圧は再び増加傾向に転じ、134日経過後に電流の増減が見られた。159日経過後に電流、電圧ともに安定した状態となった。電食開始から10日目までの電圧の増加は酸化鉄を主とする腐食生成物が生成され、コンクリート中の細孔を埋めたことで、かぶりコンクリート中の抵抗が増加したものと考えられる。電食期間が約10日目にひび割れが発生し、約40日目までそれらのひび割れの進展が認められた。電食期間10日以降の電圧の低下は、ひび割れを通してコンクリート中に塩水が浸入し、かぶりコンクリート中の抵抗が低下したためと考えられる。また、40日経過後にひび割れの拡大がほぼ停止していることから、腐食生成物が拡大したひび割れを閉塞したため、コンクリート中の抵抗が再び増加したものと想定される。

(2) 外観変化

a) 腐食痕およびひび割れの発生状況

電食開始後、3日目で側面1および下面に腐食痕を確認した。5日目に両側面および下面に一定の間隔で腐食痕を確認した。これはスターラップが配筋された位置と一致していることから最もかぶりの小さいスターラップの腐食が進行したためと考えられる。その後、主鉄筋に沿った腐食痕がコンクリート表面に析出され、スターラップの間隔でひび割れが確認された。図-8にひび割れ開口幅の変化の一例を示す。電食期間約116日目でひび割れの拡大進展がほぼ停止した。図-9に腐食痕とひび割れの発生位置の概観を示す。腐食痕が多量に析出している位置のひび割れは大きくなっていることが分かる。腐食痕はひび割れ幅が約0.2mm以上となる段階から確認されている。これは、ひび割れ幅が微小な場合は腐食痕が析出しにくいためであると考えられる。

b) 外観グレードによる目視点検評価

図-10に外観の経時的変化を、写真-1に下面のみを対象とした外観グレードの例を示す。電食開始後、約3日目で状態Ⅰとなり、底面に鉄筋（最もかぶりの小さい鉄筋、一般にスターラップ）に沿ったひび割れと腐食痕が認められた。約5日目で状態Ⅱとなり、底面および側面に複数本のひび割れが確認され、腐食痕の拡大が認められた。約11日目で状態Ⅲとなり、底面および側面に鉄筋に沿ったひび割れが進展しそれと交

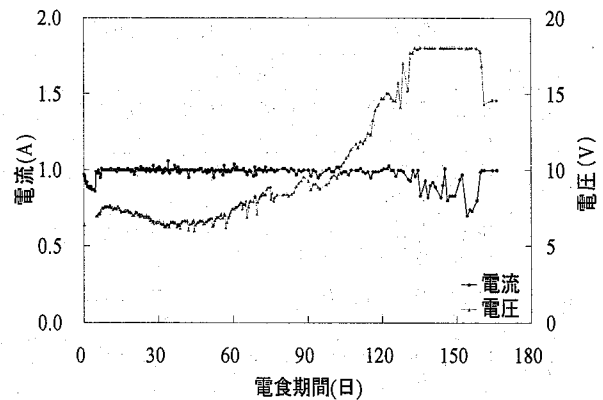


図-7 電流および電圧の経時変化

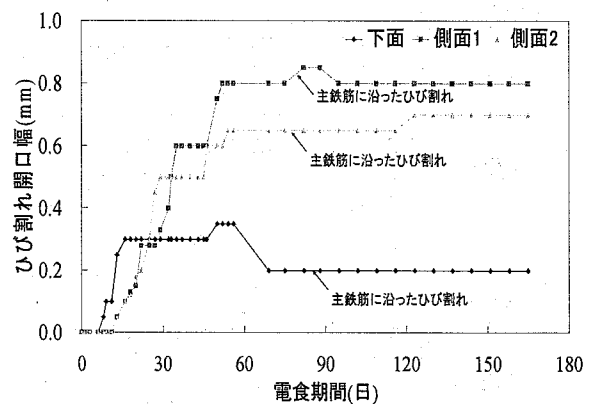
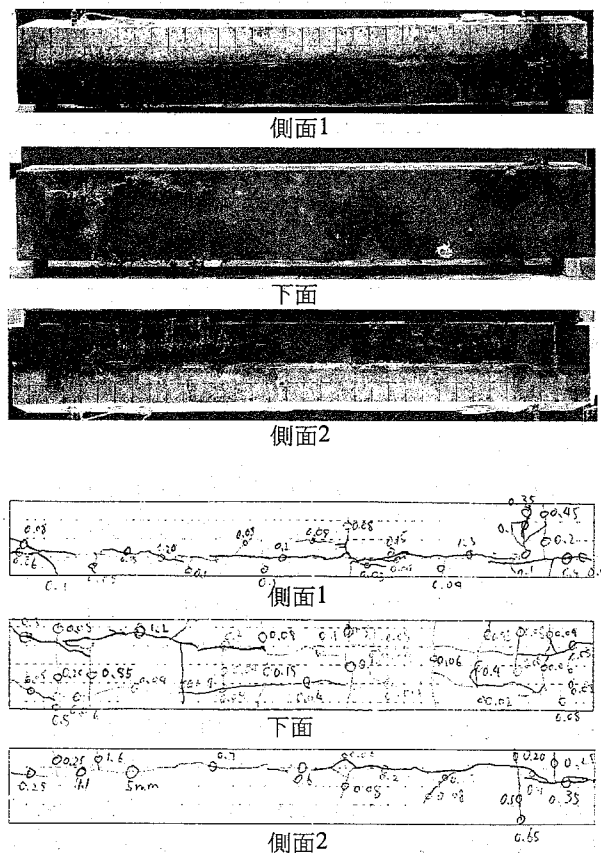


図-8 ひび割れ開口幅の変化



わる方向の鉄筋に沿うひび割れと腐食痕が確認された。約 13 日目で状態Ⅳとなり、底面および側面に鉄筋に沿ったひび割れとそれに交わる方向のひび割れがつながったのが確認された。約 75 日目ではく落の前段階である状態Ⅴとなり、底面および側面に鉄筋に沿ったひび割れとそれに交わる方向のひび割れがつながり閉合した。165 日目で状態Ⅵとなり、下面において最も腐食が進行していた箇所におけるかぶりコンクリートの一部がはく落した。

(3) はく落現象の簡易予測手法の検討

外観グレードの変化をみると、電食開始から約 16 日までに状態Ⅰから状態Ⅲまで急速に進行した。一方、その後の外観変化の進行は、側面および下面ともに状態Ⅳが約 40 日間、また、状態Ⅴが約 90 日間続き、その後、下面においてかぶりコンクリートの一部にはく落現象が確認された。したがって、本実験のように鉄筋の腐食速度が一定となる場合、外観グレードの状態Ⅲ以降の外観変化を適切に管理することで、はく落現象を事前に予測することが十分に可能であると考えられる。

本報告では当初、供試体の下面のみを対象とし外観変化を評価しようと考えたが、側面においてもひび割れや腐食痕が確認された。したがって、鉄筋腐食による劣化進展は梁構造に近いものとなり、下面および側面から多量の腐食生成物が析出された。このため、当初想定したはく落現象の発生時期と限界構造性能の発生時期との関係が逆転する可能性も考えられる。図-11にそれを模式的に示した。

今後、版構造および梁構造における劣化進展を評価するための一つの指標として考えられるのは側面および下面から析出される腐食生成物の量である。また、腐食生成物の発生量とはく落に至るまでの劣化進展について研究を進めることによってコンクリート内部に蓄積された鉄筋腐食による膨張圧とはく落現象との関係が明らかにできるのではないかと考えられる。

5. まとめ

開削トンネルの床版におけるかぶりコンクリートをモデル化し電食実験を行い、目視点検によるはく落現象の評価を行った。本実験により得られた知見を示すと以下のとおりである。

- ①はく落を予測するための目視点検で概ね評価することができた。
- ②側面にひび割れや腐食痕が発生したことにより梁構

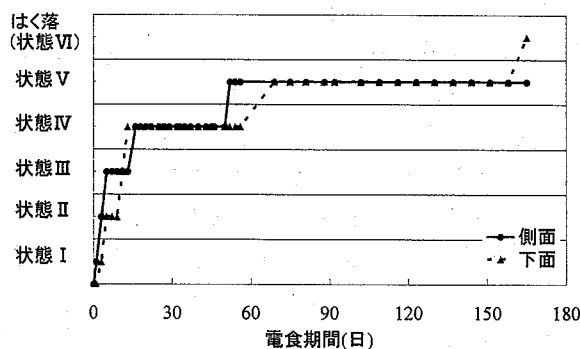


図-10 外観グレードの変化

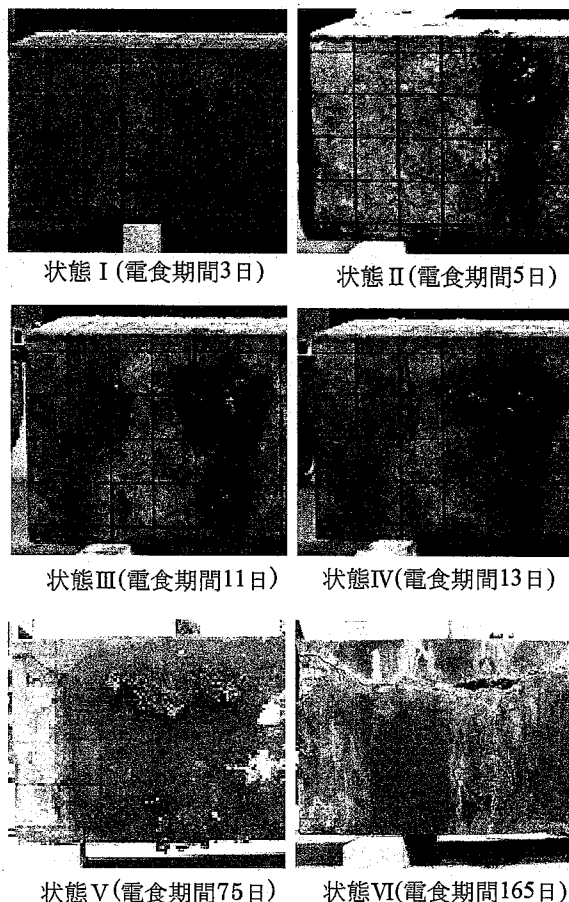


写真-1 状態Ⅰ～Ⅵの状態

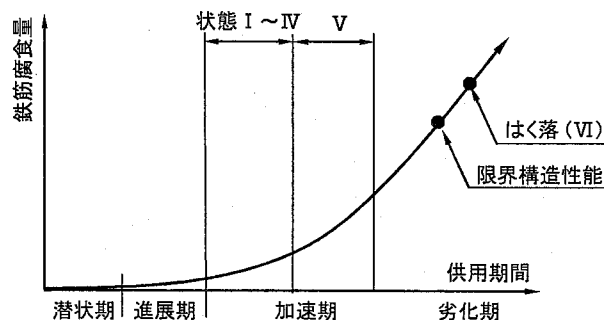


図-11 実験から想定されるはく落現象と限界構造性能の関係

造にちかいはく落の状態がみられた。

- ③本報告は構造性能の低下よりもはく落現象が先に起こると想定した。しかしながら、下面および側面に多数のひび割れが発生し、そのひび割れから多量に腐食生成物が析出されることでコンクリート内部の鉄筋腐食による膨張圧が増加せず、はく落現象よりも先に限界構造性能に至る可能性がある。それを今後、曲げ実験により明確にする予定である。これらのことから、はく落現象は配筋による影響も大きいと考えられる。

参考文献

- 1)花岡大伸, 矢野真義, 宮里心一: 鉄筋コンクリート梁の腐食形態と腐食量が曲げ性状に及ぼす影響, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.2, pp.300-312, 2007.6.
- 2)日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧, 1993.11.
- 3)土木学会: コンクリート標準示方書(維持管理編), 2001.1.
- 4)土木学会: トンネルの維持管理, トンネルライブラリー第 14 号, 2005.7.
- 5)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)トンネル, p.28, 2007