

山本 努^{*1}, 武藤 義彦^{*2}, 小椋 紀彦^{*3}, 葛目 和宏^{*4}, 大即 信明^{*5}

The Study on Occurrence Conditions of Chloride Induced Deterioration in the Subway Tunnel

Tsutomu YAMAMOTO^{*1}, Yoshihiko MUTOU^{*2}, Norihiko OGURA^{*3},
Kazuhiro KUZUME^{*4} and Nobuaki OTSUKI^{*5}

要旨：東京地下鉄の河川下のトンネルでは場所によっては漏水中の塩化物イオン濃度が高く、既に塩害劣化の兆候がみられる区間や、将来の塩害劣化が懸念される区間がある。そこで、主に感潮河川下の箱形RCトンネル（建設後36～55年経過）を対象に、漏水状況・塩化物イオン濃度・かぶり・鉄筋腐食度等の現地調査・測定を行った。その結果、地下鉄トンネル環境下での実構造物における塩害腐食が顕著となる条件として、塩化物イオン濃度が概ね 3.0kg/m^3 以上ではないかと考察した。また、現地調査で得られたひび割れ（浮き）の発生する限界腐食量は既往推定式より十分大きいことが分かった。

キーワード：塩害，地下鉄トンネル，塩化物イオン濃度，かぶり，鉄筋腐食度

1. はじめに

東京地下鉄株式会社（以下、「東京メトロ」という）は、現在9路線、約195kmの構造物を維持管理しており、そのうち約80%がトンネルである。トンネル区間の多くは都心に位置してお



図-1 各路線と主な河川等との交差状況

り、トンネルが河川・運河・堀・埋立地の下もしくは近接している箇所（以下、「河川下」という）が75区間ある。東京メトロの各路線と主な河川等との交差状況を図-1に示す。

75区間のうち49区間が箱形トンネル（開削工法および潜函工法）、29区間がシールドトンネルを含む区間である（両方を含むが3区間）。

一部の区間で、トンネル内への漏水の影響による塩害劣化が顕著になり、詳細調査、対策工事を施工した箇所もあるが、ほとんどの区間では塩害による変状は顕著に表れてはいない。

しかし、塩害は一般に進行すると急速に耐久性が低下するおそれがあることから、東京メトロでは現在変状が顕著ではない区間においても中長期的な観点から予防保全等を検討することとし、箱形トンネルを対象に現地調査と各種測定を実施した。

*1 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部 構造物担当課長

*2 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部 部長

*3 (株)国際建設技術研究所 東京支店 技術部

*4 (株)国際建設技術研究所 代表取締役社長

*5 東京工業大学大学院 理工学研究科 国際開発工学専攻 教授

その結果に基づき、地下鉄トンネル環境下での実構造物における、漏水の発生状況とその影響範囲、鉄筋腐食度と各種要因の相関、ひび割れ（浮き）が発生する腐食量について分析と考察を行ったので報告する。

2. これまでの経緯

2.1 塩害劣化の事例と対策経緯

初期のシールドトンネルの区間では、漏水の発生が多いために過去に塩害劣化が顕著になってきた区間があり、二次巻工事、ボルト交換工事、表面被覆工事を施工した実績がある¹⁾²⁾。

一方、箱形トンネルの区間では、感潮河川域（海の潮の干満の影響を受ける河川域）に潜函工法で建設された区間において、函体継手部からの漏水による塩害劣化が顕著になっており、断面修復工事、表面被覆工事を施工した実績がある³⁾。

2.2 過去の調査結果の概観

トンネル内の漏水中の塩化物イオン濃度の測定結果を表-1に示す。隅田川では河口から14km離れて交差するトンネル内でも漏水中に海水の約1/4の塩化物イオン濃度が検出された。一方で、河川下でない一般区間での濃度は低いことがわかる。

表-1 漏水中の塩化物イオン濃度

漏水採取位置	Cl濃度
東西線隅田川交差区間（河口から約3km）	16,100mg/l
千代田線隅田川交差区間（河口から約14km）	4,300mg/l

また、一般区間でのトンネル躯体コンクリート中の表面付近の塩化物イオン濃度を測定した結果は、平均で0.12kg/m³と低かったことから、河川下以外の区間では塩害の発生可能性は非常に低いと判断した。

2.3 漏水の供給経路

地盤中の地下水が箱形トンネル内に浸透して鉄筋腐食を誘発する経路は、以下の3通りが考えられる。

(1)地下水がトンネル背面の防水層の不良箇所および躯体コンクリートの貫通ひび割れや施工目地などを水みちとして、一旦トンネル内にしみだすことで壁面が湿潤して塩化物イオンの供給源となり、それがコンクリート内部に浸透することで鉄筋が腐食するケース。

(2)上記において貫通ひび割れ等と鉄筋が躯体中で交差する箇所で、塩分濃度の高い漏水が直接鉄筋に作用し、局部的に鉄筋が腐食するケース。

(3)狭隘環境など施工が困難な区間で、トンネル背面の防水層が完全に機能せず、トンネル背面側もしくは継手全体から地下水がコンクリート中に浸透し、広範囲に鉄筋が腐食するケース。

過去の調査結果では箱形トンネルでは(1)のケースによる塩害が大部分であることが確認されており、本稿ではこの経路による塩害発生条件の検討を行った。

3. 現地調査内容

平成20年度より、主に感潮河川下の箱形トンネルで現地調査を実施しており、平成22年度においては、表-2に示す5路線7区間30地点において2種類の調査パターンで調査を行った。

なお、今回調査対象区間の建設当時の設計図書によると、コンクリートの設計基準強度は21N/mm²、示方配合でのW/Cは53%、単位セメント量は320kg/m³と記述されている。

表-2 現地調査区間一覧

番号	路線名	交差河川	トシ構造	施工年度 (経過年数)	調査 パターン数	
丸1	丸ノ内線	日本橋川	開削	1955 (55)	1	2
日1	日比谷線	神田川	開削	1962 (48)	1	2
日2		日本橋川	潜函	1962 (48)	1	4
東1	東西線	亀島川	開削	1966 (44)	1	2
東2		隅田川	潜函	1966 (44)	1	6
千1	千代田線	日本橋川	開削	1969 (41)	1	2
有1	有楽町線	神田川	開削	1974 (36)	1	5

パターン 調査として、5 路線 7 区間のうち、漏水または漏水跡が顕著にみられた代表地点の側壁において、詳細な調査を行った。調査項目は外観目視・打音、コア採取による含有塩化物イオン濃度、かぶり深さ、はつり調査による鉄筋腐食度等である。

図-2 にパターン 調査の漏水位置と調査範囲の例を、図-3 に採取コアの位置と外観目視結果の例を示す。

漏水中に含まれる含有塩化物イオン濃度の影響範囲を調べるため、漏水または漏水跡から順に遠ざかるように、鉄筋を避けて 200~300mm の間隔でコアを 4 本採取し、20mm 幅でスライスして 5 試料の含有塩化物イオン濃度の測定を行った。



図-2 漏水箇所と調査範囲の例

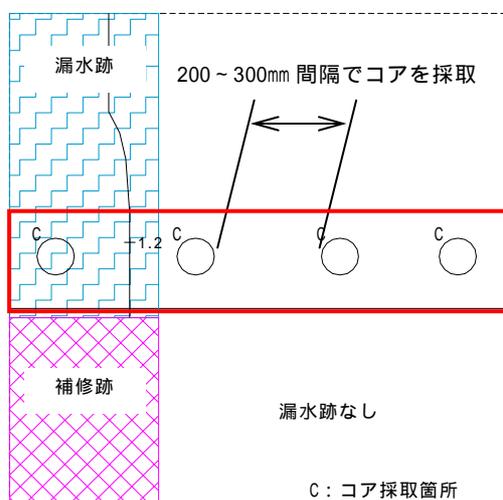


図-3 採取コアの位置と外観状況結果の例

パターン 調査は主に鉄筋腐食度のサンプル数を補完するために、パターン の調査項目のうち含有塩化物イオン濃度を省略し、外観目視・打音、かぶり深さ、はつり調査による鉄筋腐食度等を実施したものである。調査箇所はパターン と同じく漏水または漏水跡のみられる地点を選定した。なお、一部過年度で実施した含有塩化物イオン濃度が既知の箇所では、そのデータも活用している。

4. 調査結果の分析および考察

本論文では現地調査で取得したデータを「漏水の発生状況とその影響範囲」、「鉄筋腐食度と各種要因との相関」、「ひび割れ（浮き）が発生する腐食量」の三点に着眼し分析および考察を行った。

4.1 漏水の発生状況とその影響範囲

パターン で採取したコアの塩化物イオン濃度分布を図-4 に示す。当然ながら漏水または漏水跡直下であるコア での塩化物イオン濃度が最も高い傾向を示しており、表層部（表面から 0~20mm）で 10kg/m^3 を越えている箇所もあった。また 80~100mm の位置でも 3.0kg/m^3 以上の塩化物イオン濃度となる箇所も認められた。

一方、コンクリート表面に漏水または漏水跡の認められないコア 位置では、「東 2」を除き、塩化物イオン濃度は表層部でも 2.0kg/m^3 以下であり、更に 60mm 以上の深さになると塩化物イオン濃度は 0.5kg/m^3 程度以下と少なくなる傾向にあった。

また、はつり出した鉄筋の腐食度に関して、鉄筋を直接目視し、(社)日本コンクリート工学協会の指針⁴⁾によりグレード判定した(表-3 参照)。

表-3 目視による鉄筋腐食度の判定⁴⁾⁵⁾

腐食度	腐食状態
0	腐食を認めず()
A	点錆程度の表面的な腐食()
B	全体に表面的な腐食()
C	浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食()
D	断面欠損の明らかな著しい腐食()

()内は土木学会コンクリート標準示方書での腐食度評価を示す

はつり出した鉄筋の腐食度をみると「東 2」を除き C 以上のものは全てコア の近傍，位置では全て B 以下であった。

なお「東 2」は潜函トンネルの継手部の区間であり，特殊な施工条件下で建設されたためか当該区間内の殆どの箇所では防水層が機能しておらず，過去からの漏水量が多く，他の開削区間とは環境条件が大きく異なる箇所である。

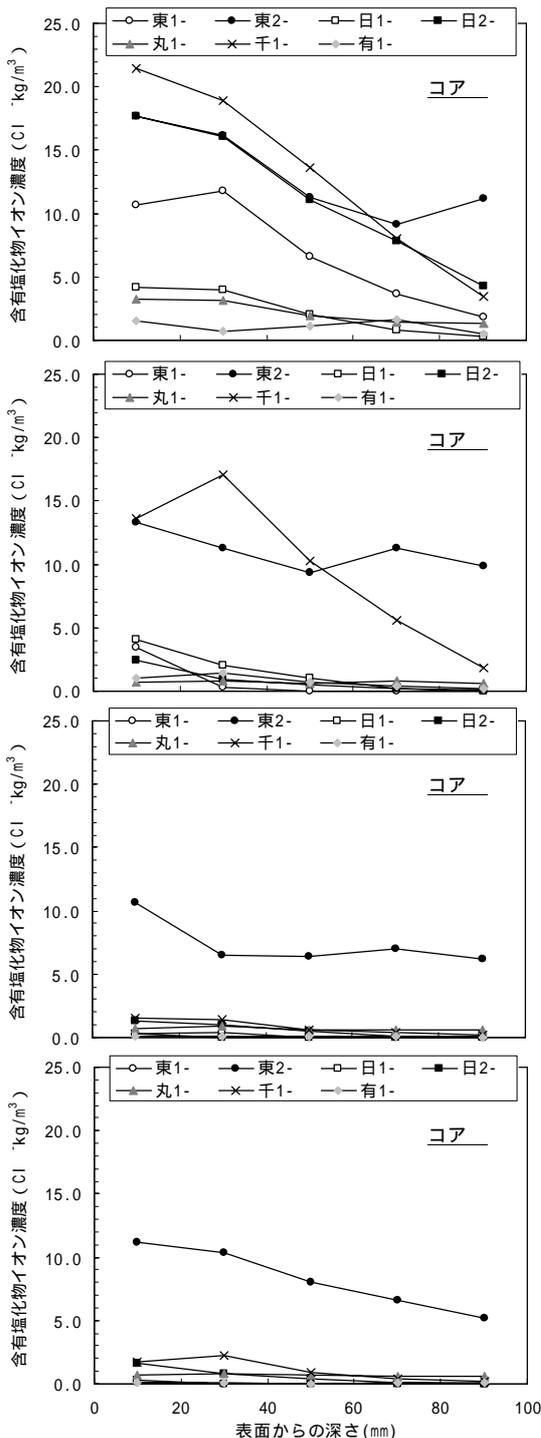


図-4 各コアの塩化物イオン濃度分布

このことから特殊環境の「東 2」を除く一般の開削トンネルでは，現状において漏水に含まれている塩化物イオンの影響範囲は局所的な範囲に止まっており，基本的には漏水または漏水跡の認められている直下，もしくはそれから 200～300mm の範囲内であると考えられる。

つまり，地下鉄の開削トンネル区間の場合，塩害は漏水近傍の局所的な範囲で進行するケースが多く，これは，沿岸部の構造物のように，飛来塩分が部材全体に作用して劣化する一般的な塩害劣化とは異なることを示唆している。

4.2 鉄筋腐食度と各種要因との相関

(1) 鉄筋腐食度とかぶりとの関係

パターン で調査した，箱型トンネルの側壁に生じた漏水・漏水跡箇所およびその近傍の，はつり調査における鉄筋の鉄筋腐食度とかぶり深さとの関係を図-5 に示す。

浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食が認められる腐食度 C 以上が発生しているのは，全てかぶり深さが 125mm 以下であった。かぶり深さがそれ以上であると，現状では鉄筋腐食度は 0，A または B であり，腐食はほとんど認められていない。

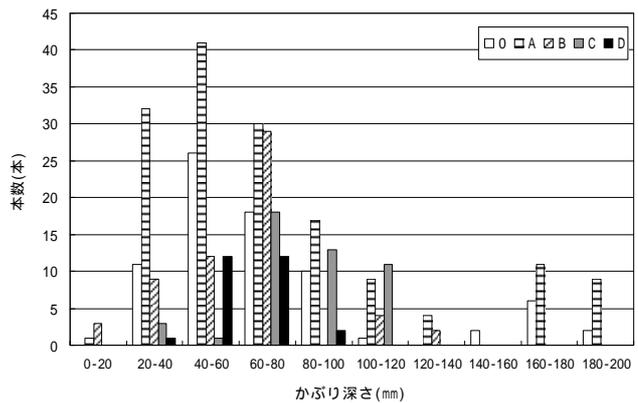


図-5 鉄筋腐食度とかぶりとの関係

(2) 鉄筋腐食度と塩化物イオン量との関係

パターン 調査で得られた鉄筋位置での含有塩化物イオン濃度と鉄筋腐食度との関係を図-6 に示す。

塩化物イオン濃度が高くなるほど鉄筋の腐食度も高くなる傾向を示している。腐食度 0，A，B は，塩化物イオン濃度が 1.0kg/m^3 以下に集中

しており、 3.0kg/m^3 以上で C 以上の腐食度が現れる。

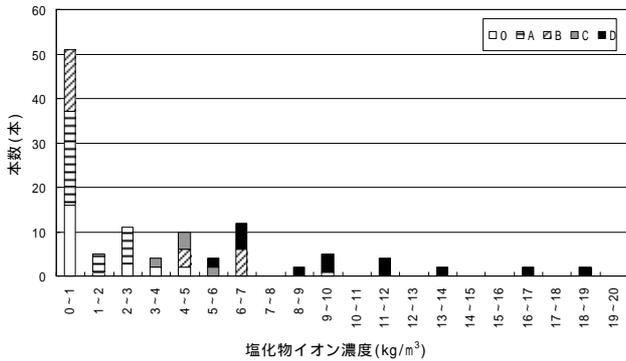


図-6 塩化物イオン濃度と腐食度の関係

図-7 にパターン . で調査した、漏水・漏水跡箇所およびその近傍の、はつり調査における鉄筋の腐食度とかぶり深さ、鉄筋位置での塩化物イオン濃度との関係を示す。

なお、施工現場では、材料の保管状態によっては、鉄筋組み立て前から鉄筋表面に点錆程度の鉄筋腐食が生じることもあるのが実態である。そのため、はつり調査でみられる鉄筋の腐食が軽微な場合は、建設時からの腐食が残っていた可能性も考えられる。図-7 をみると腐食度 B の鉄筋は、塩化物イオン濃度が 1kg/m^3 以下の範囲での分布と、 4kg/m^3 以上の範囲での分布に大別される。そこで前者は建設時からの錆として考え(B1 と記す)、後者の鉄筋の錆は塩害腐食により生じたものとする(B2 と記す)と、後者は腐食度 C と判定した鉄筋の最低塩化物イオン濃度 3.0kg/m^3 以上の範囲に分布している。

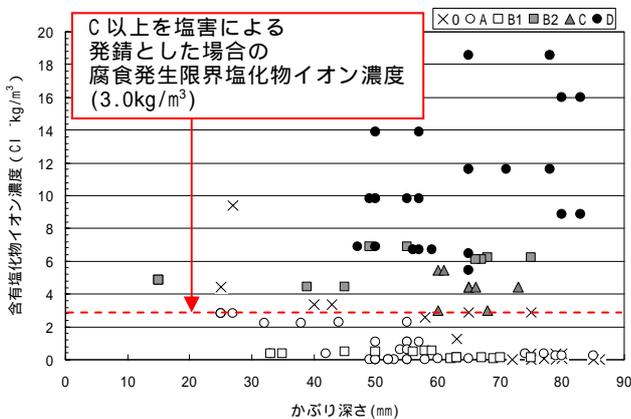


図-7 鉄筋腐食度とかぶり深さ・塩化物イオン濃度との関係

そこで、表-3 に示した目視判定では、各腐食グレード内でも実腐食量に幅があることや、既往文献⁶⁾を考え併せ、腐食度 B1 までを建設時から存在していた錆、腐食度 B2 以上を塩害によって生じた腐食と仮定して分析することとした。

塩害による鉄筋の腐食進行が、塩化物イオン濃度だけでなく、酸素や水分の浸透抵抗性に影響するかぶり深さにも依存することも考えられたが、図-7 をみる限り塩害による腐食と仮定した B2, C, D のサンプル間における、塩化物イオン濃度とかぶり深さには優位な関係性はみられなかった。

これは、本調査での腐食量が目視によるグレード判定であり必ずしも正確な腐食量を表しているものではないことや、かぶりの品質や含水状態等、条件が個々のサンプルで異なることなどに起因しているものと考えられる。

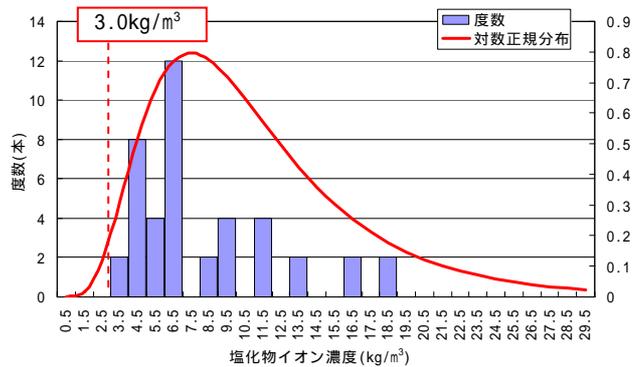


図-8 腐食度 B2,C,D の塩化物イオン濃度分布

鉄筋位置の塩化物イオン濃度が、ある発生限界濃度に達すると、その時点から鉄筋の腐食が開始するといわれている。一般的には、塩害による鉄筋腐食は、塩化物イオン濃度、かぶり、鉄筋径、配合、温度、湿度など様々な要因に支配されることが知られている。しかし、潜伏期終了を示す腐食発生限界塩化物イオン濃度については、既往の文献^{7)~10)}では $1.0\sim 2.5\text{kg/m}^3$ と幅が広く、環境条件等により異なった値が挙げられている。

そこで、本調査の結果にもとづき、腐食発生限界塩化物イオン濃度について分析を試みた。

図-8 はパターン ， で調査した腐食度 B2 , C , D の鉄筋位置での塩化物イオン濃度の分布を示したものである。分布は対数正規分布に従うことに着目し分析を行った。

その結果、今回の現場調査結果から 95% 以上の確率で B2 以上の腐食度が現れる塩化物イオン濃度は 3.4 kg/m^3 であり、現地調査腐食度 C のうち最低塩化物イオン濃度である 3.0 kg/m^3 の場合は 97% の信頼確率となる。

つまり、地下鉄箱形トンネル環境下における腐食発生限界塩化物イオン濃度は、これまでの条件のもとで分析すると、 $3.0 \sim 3.4 \text{ kg/m}^3$ 程度であると考察される。

4.3 ひび割れ（浮き）が発生する腐食量

(1) 鉄筋腐食度と浮きとの関係

図-9 にパターン ， で調査した各鉄筋の腐食度とかぶり深さ、はつり出す前の表面コンクリートの浮きの有り無しの関係を整理し、鉄筋腐食進行によってコンクリートにひび割れが発生する条件の分析を行った。

なお当該区間を含め、地下鉄トンネル内では鉄筋腐食によるひび割れは、かぶりコンクリートの浮きとなって現れることが殆どであることから、本論文でのひび割れ発生腐食量の分析には、打音調査による浮きの有無の結果を用いることとした。

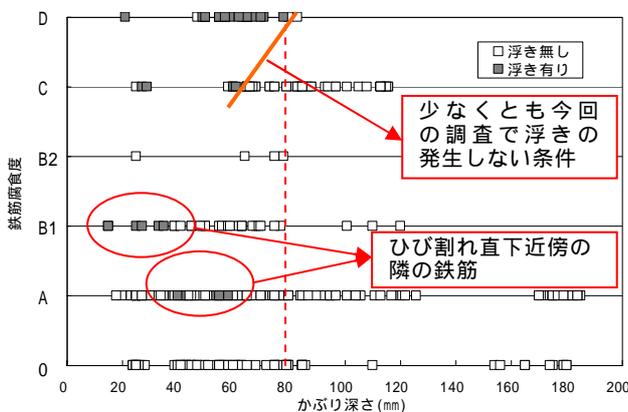


図-9 鉄筋腐食度とかぶり深さ・浮きとの関係

コンクリートの浮きの発生は、かぶり深さが 80mm 以下の場合に発生している。すなわち、かぶり深さが 80mm 以上であれば、腐食度が C、

D となるまで腐食が進行しても、浮きとして顕在化しない可能性があることが判った。

なお図中、鉄筋腐食度 A, B1 において、コンクリートの浮きが生じていると評価した箇所があるが、これは図-10 に示すとおり漏水直下でかつ、ひび割れが伴っていた箇所であり、ひび割れ直上を通る鉄筋 1 本が著しく腐食をしていたために、これによる浮きが隣接する鉄筋の範囲にも及んでいたケースである。このため、これら A, B1 での「浮き有り」は、当該鉄筋の塩害腐食に起因しないものと判断した。

これらにより、図-9 の腐食度 C, D の「浮き有り」でプロットしたかぶりの最大点を結んだ線が、少なくとも今回の調査結果において浮きが発生しないかぶり深さの条件と分析される。

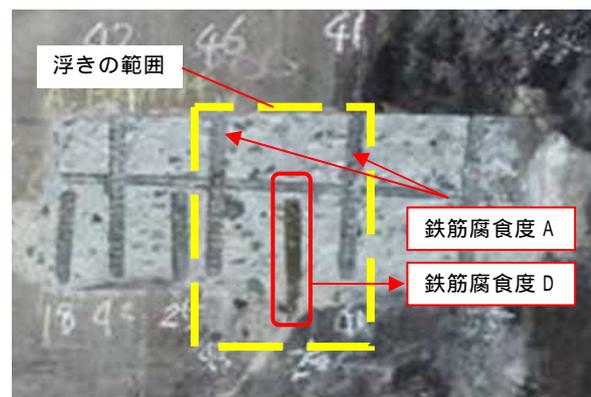


図-10 漏水直下の著しい腐食と浮きの影響範囲

(2) ひび割れ（浮き）発生腐食量の検討

図-9 の縦軸は定性的な腐食度で示したものである。今回得られた腐食度、浮き（ひび割れ）有無、かぶり深さの関係と、既往の腐食ひび割れ発生限界量の推定式を比べるために、腐食度を腐食量に換算し比較した。

各腐食度は、表-4 に示す（社）日本コンクリート工学協会の指針⁴⁾に準じて、鉄筋腐食量に換算した。図-11 にひび割れ（浮き）有りの鉄筋の腐食量とかぶり深さの関係を示すとともに、推定式による限界腐食量をプロットした。

なお、図-11 には、塩害腐食により生じた浮きのみを対象としているため、腐食度 0, A, B1, および「浮き有り」のサンプルが存在しな

かった B2 は対象外とした。

表-4 鉄筋の腐食度と質量減少率の関係

腐食度	鉄筋質量減少率(%)	
	平均値	標準偏差
(0)	0.8	0.2
(A)	2.0	1.0
(B)	4.5	3.0

今回、腐食ひび割れ発生限界腐食量の予測式として、かぶり深さが変数として用いられている横関ら¹¹⁾の提案式(式(1)を参照)を比較対照として用いた。なお、現地調査結果より、鉄筋径は 16、鉄筋間隔は 125mm である。

$$W_{cr} = -1.841 \left(-8.661 \right) + 145.1 \left(-1.194 \right) + 3809D^{-0.8351} + 10.60X_1 - 72.30 \quad (1)$$

ここに、 W_{cr} : 限界腐食量[mg/cm^2]、 α : クリープ係数(=0.4 と仮定¹²⁾¹³⁾)、 β : 腐食生成物の体積膨張率(=3.2)、 D : 腐食角度(=360° と仮定)、 X_1 : 形状係数(X_1 には(かぶり厚/鉄筋径)と $\{1.75 \times (\text{鉄筋間隔鉄筋径}) / (2 \times \text{鉄筋径})\}$ のうち小さい方の値を用いる)。

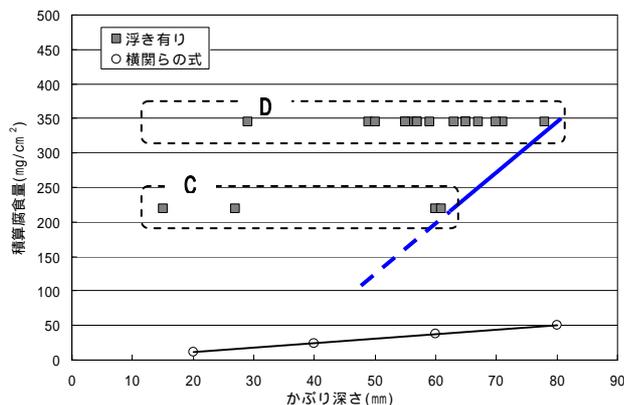


図-11 ひび割れ発生腐食量とかぶりの関係

表-4 および現地調査による鉄筋径で算出した腐食量は、C が $220\text{mg}/\text{cm}^2$ 、D が $345\text{mg}/\text{cm}^2$ であり、図-11 で各腐食度の最大かぶり、すなわち C の 61mm、D の 78mm を結んだ線が今回調査でのひび割れ(浮き)が発生する限界腐食量とかぶりの関係となる。

この線は横関らの提案式よりも上側にプロッ

トされており、横関らの提案式の妥当性と、これを使った予測等が十分安全であることが確認された。

またその傾向は、かぶり深さが大きくなると、現地調査の結果の近似式と横関らの提案式との差は広がる傾向を示していることが判る。

ただし今回の現地調査結果は、ひび割れ発生を浮きの有無で判断しているため初期に微細なひび割れが生じた場合にはそれを検知できてない可能性があること、今回対象区間は建設後 36~55 年が経過しており、ひび割れ発生(進展期末)からかなりの年数が経ってさらに腐食が進行している可能性があることなどが考えられるため、これらに留意する必要がある。

5.まとめ

今回、地下鉄箱形トンネル内での塩害発生条件を明らかにすることを目的に、感潮河川下を中心に現地調査・測定を行い、そのデータを用いた分析を行い塩害に影響を及ぼす各種要因について検討をした。その結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) 一般的な地下鉄の開削トンネル区間の場合、塩害は漏水近傍で局所的に進行するケースが多く、これは、沿岸構造物のように、飛来塩分が部材全体に作用する一般的な塩害とは異なることを示唆している。
- (2) ただし、特殊環境下で建設された区間で、過去からの漏水が著しい場合は、その影響範囲が広がっていることに留意する必要がある。
- (3) 断面欠損が認められる腐食度 C 以上が発生しているのは、全てかぶり深さが 125mm 以下であった。
- (4) 本調査での腐食発生限界塩化物イオン濃度は、腐食度 B2 以上を塩害による発錆と仮定した場合、95%の信頼確率で $3.4\text{kg}/\text{m}^3$ 、今回データの最低値 $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ とすれば 97%の信頼確率が得られることが分析された。
- (5) 本調査による腐食ひび割れ発生限界量を、既往の提案式である横関らの式と比較をした結

果，全て提案式よりも上側にプロットされており，提案式の妥当性と，これを使った予測等が十分安全であることが確認された。

なお本論文は，現地調査・測定結果に基づき検討したものであるため，以下のことに留意する必要がある。すなわち，現地調査の腐食量は目視によるグレード判定であり必ずしも正確な腐食量を表しているものではないこと，現地のかぶりコンクリートの品質や含水状態等，条件が個々のサンプルで異なること，建設後36～55年が経過しており，場所によってはひび割れ発生（進展期末）からかなりの年数が経っていることなどである。

今後は，本調査検討結果を元に，他の環境条件下での調査を継続的に実施し，劣化進行予測，限界状態の検討などを行うことで，地下鉄トンネル独自の環境下での中長期的な観点での確実かつ合理的な塩害対策計画を検討していきたい。

謝辞

本調査・検討にあたっては，東京大学の岸利治教授，石田哲也准教授をはじめ多くの関係者の方々に多大なるご指導，ご協力を賜りました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 帝都高速度交通営団，工務部のあゆみ(土木編)，pp.735-745，2005.7
- 2) 大塚努，瀬筒新弥，田底成智：漏水中の塩化物イオンの影響を受けたセグメントの健全度調査，トンネル工学報告集16，pp.419-426，2006.11
- 3) 瀬筒新弥，山本努：河川を横断する地下鉄潜函トンネルの塩害対策，トンネル工学報告集 20，pp.395-402，2010.11

- 4) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針-2009-，2009.3
- 5) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編 2007年制定，2008.3
- 6) 石橋忠良，古谷時春，浜崎直行，鈴木博人：高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究，土木学会論文集，No.711/V-56，pp.125-134，2002.8
- 7) (社)土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書 設計編，p.119，2007.12
- 8) (財)東京港埠頭公社：棧橋劣化調査・補修マニュアル，p.32，2004.6
- 9) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，p.489，2007.7
- 10) (財)土木研究センター：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(土木構造物に関する研究成果)，p.67，1989.5
- 11) Yokozeki, K., Motohashi, K., Okada, K., and Tsutsumi, T.: A rational model to predict the service life of RC structures in marine environment, Forth CEMENT/ACI International Conference on Durability of Concrete, SP 170-40, pp. 777-798, 1997
- 12) 川村力，谷村幸裕，曾我部正道，鳥取誠一，長谷川雅志，東川孝治：鉄道構造物の調査に基づくコンクリート中への塩化物イオン浸透に関する研究，土木学会論文集 No.781/V-66，193-204，2005
- 13) 丸屋剛，宇治公隆：コンクリートへの塩分の拡散浸透に関する表面塩分量の定式化，コンクリート工学年次論文報告集，11-1，pp.597-602，1989