

報告 都市内高速道路 RC 壁式高欄の耐久性診断

佐々木 一哉^{*1}・植木 博^{*2}・寺島 善弘^{*3}・田中 芳和^{*4}

要旨: 首都高速道路 11 号台場線は平成 5 年 8 月に供用開始し 10 年が経過した。この路線の高欄は RC 壁式高欄で、建設時より表面に塗布が施してある。近年、全線にわたり高欄に約 0.5m から 1m の間隔で、垂直の黒いしま模様が目立つようになり、美観上問題となってきた。調査の結果、これは高欄のひび割れに排気ガス等の汚れが付着したもので、内部鉄筋の腐食、コンクリートの中酸化等の劣化の進行はみられず、高欄の耐久性には問題のないことが判明した。

キーワード: ひび割れ, 耐久性, 鉄筋腐食, 中酸化

1. はじめに

首都高速 11 号台場線は、首都高速 1 号羽田線芝浦 JCT と湾岸線有明 JCT を結ぶ延長約 5km の路線で、平成 5 年 8 月に開通し約 10 年が経過した。(図 1)

首都高速 11 号台場線は、東京港横断部にレインボーブリッジを有し、ほぼ全線が海岸線から 200m 以内の範囲に位置する。吊橋構造のレインボーブリッジを除いて、ほとんどの構造が支間長 50m~100m の鋼床版橋である。高欄の構造は、レインボーブリッジ部を除いて RC 壁式であり、建設時から表面に白色の塗装を施してある。近年、高欄のひび割れ部に排気ガス等の汚れが付着し、垂直の黒いしま模様が目立ってきており、美観上問題となっている。

本稿はこのひび割れの発生原因の推定および高欄の耐久性診断について報告するものである。

2. RC 壁式高欄の概要

(1) 形状および配筋

高欄の高さは路面から 100cm、幅は 25cm である。(形状および配筋を図 2. に示す。配力筋(水平方向筋)の鉄筋比は 0.51%。)

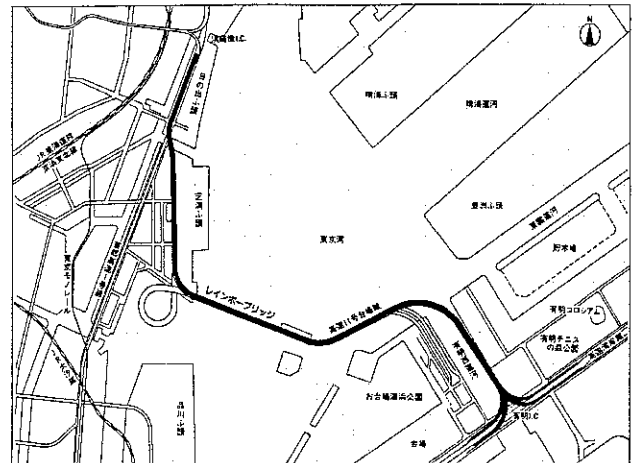


図 1. 首都高速 11 号台場線位置図

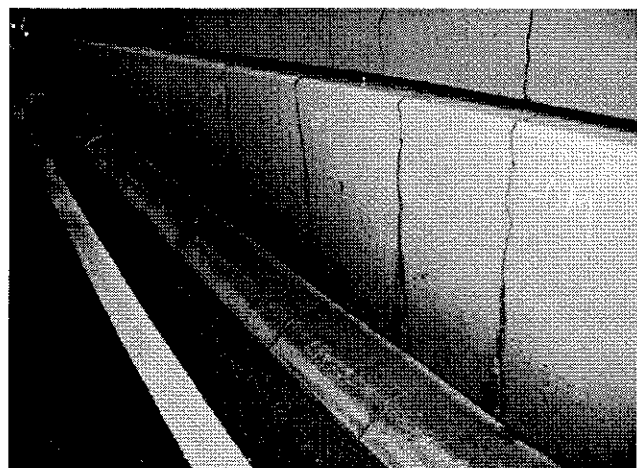


写真 1. ひび割れ発生状況

*1 首都高速道路公団 東東京管理局保全部設計課 工修 (正会員)

*2 首都高速道路公団 東東京管理局保全部 (正会員)

*3 首都高速道路公団 東東京管理局保全部設計課 工修

*4 首都高速道路公団 東東京管理局保全部設計課

(2) 使用コンクリート

設計基準強度	: 30N/mm ²
単位水量	: 153kg/m ³
単位セメント量	: 319kg/m ³
水セメント比	: 48%
セメント	: 普通ポルトランドセメント
スランプ	: 8±2.5cm
空気量	: 4±1%
打設時期	: 冬季

(3) 表面処理

内面（路面側）、外面、天端とも、ポリウレタン樹脂系塗布（塗布厚：90μ以上）を施してある。ただし、塗布材料の伸び率は2%以上と規定しており、ひび割れ幅の変動に追従できない仕様となっている。

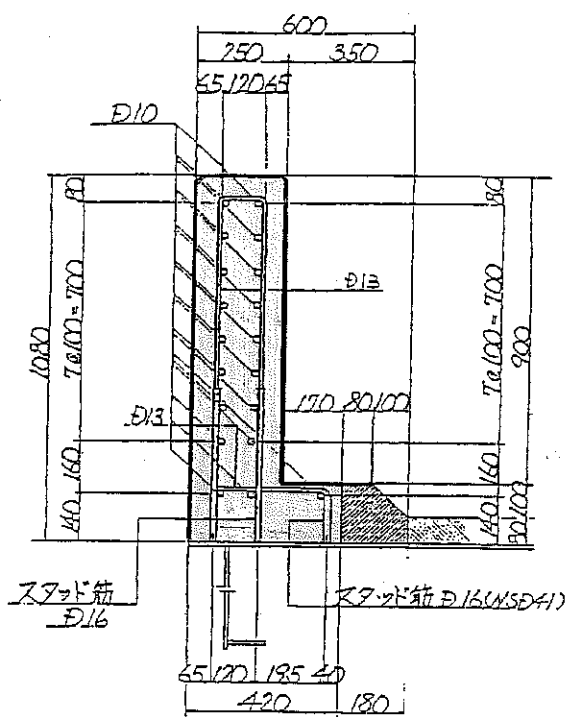


図2. 高欄の形状および配筋

3. 調査項目および調査方法

調査項目および調査方法を以下に示す。

①ひび割れ状況：ひび割れ間隔、ひび割れ幅、ひび割れ深さを計測した。ひび割れ深さは、非破壊検査法の1つである受信波の位相変化によるひび割れ深さ測定¹⁾により計測した。ひび割れを挟み、ひび割れから等間隔に打撃点と計

測点を配置し、計測点に到達する波動の初期振幅の方向成分を計測することによって行った。ひび割れ先端を回折する波動は、材料の持つ弾性波の臨界角度と回折角度の関係によって、弾性波の振幅に違いが生じる。すなわち、図3に示すように、打撃点と計測点の距離がひび割れに近い場合、回折角度が大きくなるので計測点に到達する弾性波成分の振幅は引張波となる。また、ひび割れからの距離が大きくなると、ひび割れ先端を迂回して計測点に到達する波動は回折角度が小さくなり圧縮波となる。一般に、コンクリートの臨界角は88~90°であり、初期波形の位相が負から正に反転する距離がひび割れ深さと判断できる。

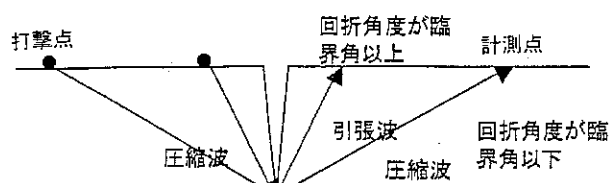


図3. ひび割れ先端を屈折する波動

②中性化深さ、塩化物イオン量：塩分分析は電位差滴定法により行った。

③鉄筋腐食状況：鉄筋をはつり出しての目視観察および自然電位測定を行った。

④ひび割れに付着した汚れの原因推定：ひび割れに付着した汚れが内部鉄筋の腐食に起因するものかを確認するために、X線回折測定、実体顕微鏡観察、電子顕微鏡観察により汚れの成分分析を行った。

⑤ひび割れの動態観測：ひび割れ幅に及ぼす温度変化および交通荷重の影響を求めため、24時間の動態観測を行った。（観測方法については4.5(1)を参照）

4. 調査結果

4.1 ひび割れ状況

ひび割れは、主筋位置（15cm間隔）と無関係に全線にわたって0.5~1.0m間隔で一様に発生

していた。ひび割れ幅は支間中央付近では 0.05～0.20mm，中間支点付近では 0.10～0.30mm であった。ひび割れ深さはひび割れ幅が小さいものは 5.0～7.5cm でかぶり厚程度の深さで，ひび割れ幅の大きいものは 10.0～15.0cm の測定値を示し，貫通しているものもあると思われる（ひび割れ発生状況を写真 1 に示す）。

4.2 中性化深さ、塩化物イオン量

中性化深さはほぼ 0mm であった。岸谷式により算出すると供用 10 年間では約 2mm，土木学会式により算出すると約 3mm，植木らの解析²⁾によると約 5mm の中性化が進行していることが導かれるが，この高欄の場合は塗布による表面保護が十分に機能していると思われる。（中性化深さ測定状況を写真 2 に示す。暗色の部分がフェノールフタレインにより紫変色した部分。）

塩分分析の結果は，ひび割れ面に沿って測定したところ，表面近傍および鉄筋近傍いずれの箇所でも塩化物イオン量が約 0.05kg/m³であった。

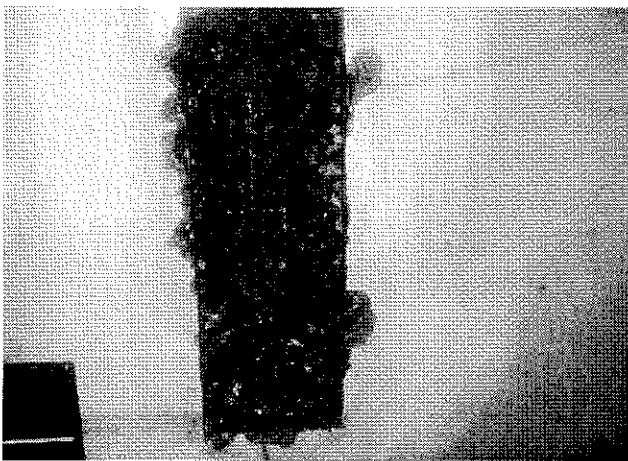
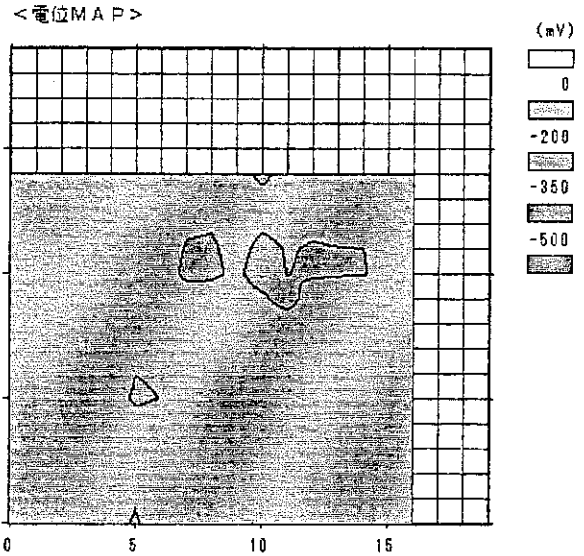


写真 2. 中性化深さ測定状況

4.3 鉄筋腐食状況

ひび割れ幅が大きい箇所（高欄内側 2 箇所，外側 1 箇所）をはつり鉄筋を目視により観察したところ，わずかな点錆が認められた箇所もあったが，全く健全な状態であった。また同位置で自然電位測定法により腐食確率を求めたところ，いずれの箇所においての 90%以上の範囲が「90%以上腐食なし」との確率が得られた。



電位度数分布 分布範囲(mV)	度数	指示率(%)
0 < 電位	0	0.0
-200 < 電位 ≤ ±0	0 239	93.7
-350 < 電位 ≤ -200	16	6.3
-500 < 電位 ≤ -350	0	0.0
電位 ≤ -500	0	0.0

鉄筋の腐食判定基準（準ASTM）

自然電位(mV)	腐食確率(%)
±0 > 電位	100%腐食なし
-200 < 電位 ≤ ±0	90%以上腐食なし
-350 < 電位 ≤ -200	50%以上腐食あり
-500 < 電位 ≤ -350	90%以上腐食あり
電位 ≤ -500	100%腐食あり

図 4. 自然電位測定結果例

4.4 ひび割れに付着した汚れの原因推定

(1) X線回折測定結果

X線回折測定では，結晶性鉱物の同定を行うことができる。ひび割れに付着した黒色の汚れに対しX線回折測定を行った結果，確認された鉱物はルチル（酸化チタン），石英，長石，輝石およびカルサイト（炭酸カルシウム）であった。ルチルは塗布材料に含まれる顔料の成分である。

石英，長石，輝石は大気中に砂塵として普遍的に存在する砂粒の成分である。カルサイトはコンクリート中のセメント水和物が大気中の二酸化炭素と反応して生成される鉱物であるが，塗膜とコンクリートの間に浸入した雨水や結露水がコンクリート中のカルシウム分を溶解し，

空気中の二酸化炭素と反応して析出したものと推測される。

(2) 実体顕微鏡観察結果

写真3は塗膜表面（路面側）の写真である。上側の黒色部がひび割れ部である。この黒色部を拡大したのが写真4であるが、砂粒の付着が観察できる。写真5は塗膜裏面（コンクリート側、上側がひび割れ部）、写真6は白色部の拡大図である。炭酸カルシウムに砂粒が固定されているのが観察できる。実体顕微鏡観察では、他に植物の付着やブレーキかすと思われる微細な金属片が観察されたが、ひび割れより内部鉄筋の錆が溶出した痕跡は見つからなかった。

(3) 電子顕微鏡観察結果

電子顕微鏡による観察では、ひび割れ部の黒色の汚れは粒径 $1\mu\text{m}$ 以下の微粒子に覆われていることがわかった。分析の結果、この粒子群は珪素、アルミニウム、硫黄、カルシウムおよび酸素を構成元素としており、砂粒の成分、排ガス中の SO_x がコンクリートから供給された豊富なカルシウム分と結合して石膏となったか、何らかの形で吸着されたものと推測する。塗膜裏面の白色部は、カルシウムを主成分としており、炭酸カルシウムが付着していると確認できた。その他の付着物としては、花粉や排ガス中のすすと思われる球状粒子が観察されたが、内部鉄筋に由来する鉄分（Fe）を含む成分は観察されなかった。

(4) 汚れの原因推定

以上より、汚れの原因は砂塵の付着、排ガスの付着が主なものであり、内部鉄筋の錆の溶出によるものではないと考えられる。

4.5 ひび割れ動態観測結果

(1) 観測方法

レインボーブリッジに隣接する3径間連続鋼床版橋（支間長：84m+104m+102m）の端径間支間中央付近および中間支点付近の2箇所のひびわれについて、温度変化、交通荷重による高欄天端の加速度、ひび割れ幅の変動の24時間動態観測を行った。ひび割れ幅については、高欄天



写真3. 塗膜表面（路面側）

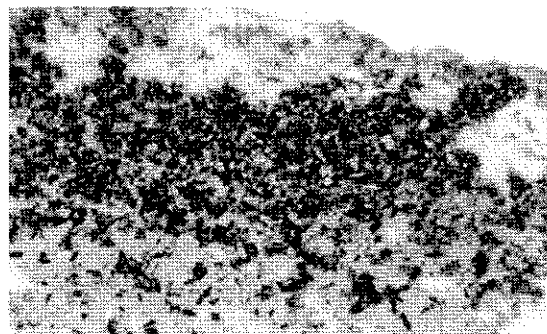


写真4. 塗膜表面（路面側）の拡大図



写真5. 塗膜裏面（コンクリート側）

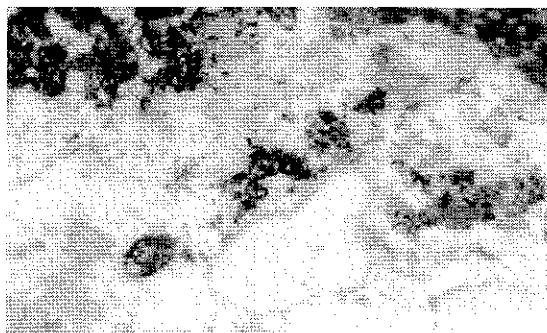


写真6. 塗膜裏面の拡大図

端から12.5cm(上部)および80cm(下部)の2点に亀裂変位計を設置し観測した。サンプリング間隔は1/100秒、考慮する周波数を0~50Hzとした。これは、既往の計測結果より、卓越周波数は30Hz以下であり、1/100秒のサンプリング間隔で評価が十分に可能であることが確認できているためである。

観測日は平成 15 年 12 月上旬の平日で、天候は晴れ、気温は最低 6 度、最高 16 度であった。

日交通量は約 4 万台（2 車線）で午前中に約 3 時間渋滞が発生した。

(2) 観測結果

① 支間中央付近ひび割れ

ひび割れ幅は高さによらず 0.05～0.1mm、深さは 50～75mm であった。高欄天端の加速度の変動幅は橋軸方向±15gal、橋軸直角方向±60gal、鉛直方向±50gal、ひび割れ幅の変動幅は、上部下部に差異はなく約 0.02mm であった。ひび割れ幅の変動は主に温度変化によるもので、交通荷重による影響はほとんど見られなかった。

② 中間支点付近ひび割れ

ひび割れ幅は天端に近いほど大きく、上部では 0.3mm 下部では 0.1mm、深さは高さによる差異はなく 100～150mm であった。高欄天端の加速度の変動幅は橋軸方向±10gal、橋軸直角方向±15gal、鉛直方向±15gal、ひび割れ幅の変動幅は、上部で約 0.15mm 下部で約 0.015mm であった。下部のひび割れ幅の変動は、支間中央付近ひび割れと同様に、温度変化によるもので、交通荷重による影響はほとんど見られなかった。一方、上部のひび割れ幅の変動は交通荷重の影響を大きく受けており、渋滞時に幅が増大した。

5. ひび割れ発生原因の推定

5.1 ひび割れの特徴

今回調査したひび割れの特徴は以下のとおりである。

① 全線にわたりほぼ等間隔に発生し、その間隔は 1m 未満であった。

② ひび割れ幅は概ね 0.1～0.3mm であった。

③ ひび割れ発生時期は明確ではないが、関係者のヒアリングによると、コンクリート打設から半年経過した時点（供用開始以前）ではすでに発生していた。

④ 中間支点上には構造目地が設置されているが、適切なひび割れ誘発目地は設置されてい

ない。

また、施工に関してはヒアリングおよび施工計画書により以下のことが判明している。

⑤ 使用コンクリートは 2. (2) に示すように適切な配合であった。

⑥ コンクリート打設時期は冬季（12 月～2 月）であった。

⑦ 打設順序、締め固めには問題はなかった。

⑧ 型枠脱型時期、養生方法の詳細については不明である。

5.2 ひび割れ発生原因の推定

鉄筋コンクリートに生じるひび割れは、鉄筋腐食先行型、ひび割れ先行型、劣化ひび割れの 3 種類に分けて整理できる。

このうち、以下の理由により、鉄筋腐食先行型および劣化ひび割れの可能性は極めて小さいと考えられる

① 中性化深さは 0cm であった。

② 鉄筋の腐食は認められなかった。

③ かぶりコンクリートの剥離・剥落は認められなかった。

④ 塩化物イオン量は 0.05kg/m³ であった。

⑤ アルカリ骨材反応によるアルカリシリカゲルは認められなかった。

⑥ 地域的に凍害の可能性は小さい。

ひび割れ先行型のひび割れには、乾燥収縮ひび割れ、温度ひび割れ等があるが、今回のひび割れは部材厚が 25cm と薄いこと、セメント量が 300kg/m³ 程度であることから温度ひび割れとは考えにくい。今回のひび割れの主原因は、以下の理由により乾燥収縮である可能性が高い。

① 適切なひび割れ誘発目地が設置されていないかった。

② ほぼ等間隔に発生した。

③ 供用開始までにひび割れが発生していたこと、施工時期が冬季であったこと、型枠脱型時期や養生方法の詳細が不明であること、等から早期脱型または不適切な養生による急激な乾燥が原因である可能性が考えられる。

これらの理由から、今回のひび割れ発生原因

は初期の急激な乾燥，あるいはそれと乾燥収縮の組み合わせであったことである可能性が高い。

乾燥収縮による変形は，時間・応力に依存する複雑な現象であるため，乾燥収縮に起因するひび割れ幅の実用的な算定式は少ない。ちなみに，文献³⁾に示される壁式構造の鉄筋比と乾燥収縮ひび割れ幅の関係の調査結果によると，鉄筋比が0.5%の場合，最大ひび割れ幅は約0.2mmであり，今回の調査結果と整合している。

実構造物においては，これに加え部位等の構造特性，温度変化，交通荷重等の影響により場所によりひび割れ幅の差異が生じているものと考えられる。

6. 耐久性の診断

6.1 鉄筋腐食状況に関する考察

はつり出しによる鉄筋の目視観察および自然電位測定による鉄筋腐食確率調査では鉄筋の腐食はほとんど認められず，ひび割れ部に付着した汚れの成分分析結果から鉄筋成分が溶出した形跡が認められなかったことから，現時点では鉄筋は健全な状態を保っていると考えられる。また，鉄筋近傍の塩化物イオン量も約 $0.05\text{kg}/\text{m}^3$ で，鉄筋腐食発生限界濃度 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を大きく下回っているため，今後すぐの急激な腐食の進行の可能性は小さいと思われる。ただし，ほとんどのひび割れの深さが鉄筋位置に達していると考えられるため，現状のままで放置すると確実に腐食は進行するであろう。

6.2 ひび割れ幅に関する考察

首都高速11号台場線はほぼ全線が海岸線に近い範囲に位置するため，鋼材の腐食に対する環境条件は腐食性環境にあると言える。高欄の設計かぶりコンクリート厚は58.5mmであるため，文献⁴⁾によると，許容ひび割れ幅は0.23mmとなる。今回発生したひび割れは部分的にひび割れ幅が0.3mmに達しているものもあるため，補修が必要と考える。

6.3 コンクリートの品質に関する考察

ひび割れ部以外のコンクリートは塗布による

表面保護が十分機能して，中性化，塩害の影響が抑えられている。また，ひび割れ面での塩化物イオン量が表面近傍と鉄筋近傍で差異がなく小さいことより，ひび割れ部も現状ではコンクリートの劣化は抑えられていると考えられる。

6.4 耐久性

以上のように現時点ではコンクリートおよび鉄筋の状態はほぼ健全であり，構造安全性は保たれていると言える。ただし，現状のままで放置すると鉄筋の腐食が進行することが予測され，ひび割れ補修，表面塗布の再塗布等の対策が必要と考える。

7. おわりに

種々の調査により，首都高速11号台場線のRC壁式高欄の構造安全性は，現時点では保たれていることが確認できた。ただし，現状のコンクリート表面のしま模様は美観上問題があるばかりでなく，高速道路利用者や周辺住民の方々に「壊れているのではないか」との不安を抱かせる結果となっている。今後は，構造物の安全性を説明するだけでなく，一般の方々にどのように見えるかとの視点から構造物を管理していくことが重要と考える。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 '03 [基礎編]，pp. 116-117
- 2) 植木 博，後藤 孝治，村上 正明，益子直人：空隙構造と化学平衡を考慮したコンクリートの炭酸化反応モデル，コンクリート工学論文集，Vol. 13，No. 3，pp. 19-28，2002. 9
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム委員会報告書・論文集，2001. 7
- 4) 土木学会：2002年制定 コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，pp. 97