

## 特別報文

# 横浜市地下鉄におけるコンクリート側壁の塩害の調査と耐久性診断システムによる評価

東 邦 和・宮 村 貫 雄・青 木 進

コンクリート構造物の長寿命化および維持管理において、構造物の劣化要因として深刻な問題とされているのが塩害による早期の鉄筋腐食である。横浜市営地下鉄高島町駅部において躯体コンクリートの維持管理を目的として、立坑躯体壁で塩害の調査を行った。開発した装置を用いて背面水圧のある箇所での貫通コアを採取し、診断・評価システムによって塩害劣化の進行予測を行った結果、維持管理によって健全性を確保できることが判った。

キーワード：コンクリート、塩害、劣化予測、貫通コア採取、耐久性診断システム

## 1. はじめに

急速な経済発展とともに整備されてきた社会資本の基盤であるコンクリート構造物の長寿命化および維持管理の重要性が認識されるようになってきた。

コンクリートの劣化の中でも、深刻な問題とされているのが塩害、中性化による早期の鉄筋腐食である。特に塩害は劣化の進行が早く、鉄筋腐食によりひび割れ、錆汁等が発生し、美観・景観上の問題が生じる。さらに劣化が進行すると、コンクリートの剥離・剥落といった劣化現象により、安全性、使用性の機能に問題が現れてくる。

横浜市営地下鉄高島町駅部において、上り線横浜側坑口付近について、塩化物イオンの侵入の状況を調査した。この調査には背面水圧のある場所でも貫通コアを採取できる装置を開発して使用した。また、パソコンによる耐久性診断・評価システムを用いて塩害の進

行を解析した。これらの結果について紹介する。

## 2. コンクリートの塩害調査

### (1) 調査対象構造物の概要

高島町駅部の横浜方に位置する平沼町立坑の、上り線横浜側坑口付近において、塩化物イオンの侵入の状況を調査した。高島町駅部平面を図-1に示す。

平沼町立坑は1972年3月に地中連続壁の築造が開始され、立坑の完成は1974年2月である。その後、シールド工法により高島町駅部が掘削され、建築工事、軌道工事、試運転を経て、1976年9月に地下鉄の供用が開始された。今回の調査対象の立坑側壁コンクリートは、築造後約33年が経過したものである。立坑の形状は幅35.7m長さ16.0m深さ31.0mであり、躯体壁の厚さは1000mmである。

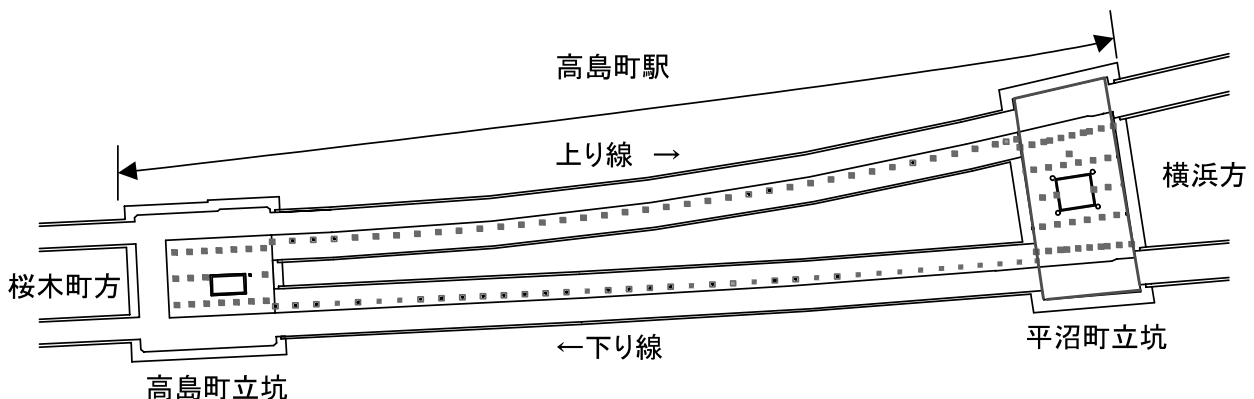


図-1 横浜市営地下鉄高島町駅平面図

(2) 調査の概要

本調査に先だって、2003年に平沼町立坑側壁部を中心としたコンクリートの劣化調査が実施された。側壁部の劣化は、躯体コンクリート内側の鉄筋の腐食によりコンクリートに腐食ひび割れが発生しており、部分的に鉄筋の発錆によりかぶりコンクリートの剥離と鉄筋の断面減少が見られる状況である。

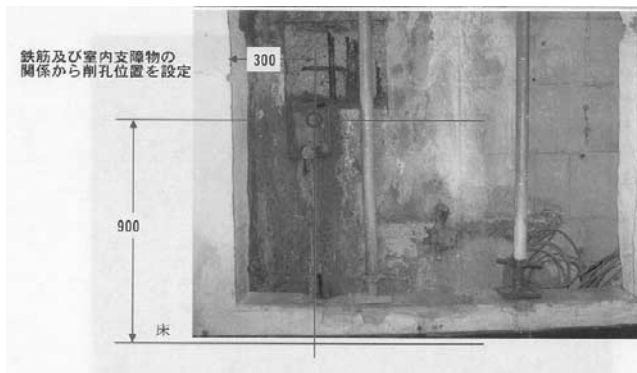
本構造物は海岸近くに位置し、周辺の地下水は塩分を含有している。側壁内側から浸透している外来塩分は、地下水の漏水によるものと考えられた。側壁から漏水を採取し、イオンクロマトグラフにより分析した漏水中の塩化物イオン量調査分析結果を表—1に示す。平沼町立坑上り線坑口部の漏水は、海水成分を多く含むものであることが判った。一方、駅部反対側の高島町立坑では、かぶりの薄い部分は鉄筋が腐食しているものの劣化の程度が比較的軽く、漏水中の塩化物イオンの濃度は低い結果であった。また、立坑側壁部で深さ500mmのコアを採取し内面からの塩化物イオンの分布を求めて、躯体内面側の劣化原因は漏水中の塩分が表面から侵入したものであることが分かった。

表—1 漏水中の塩化物イオン量分析結果

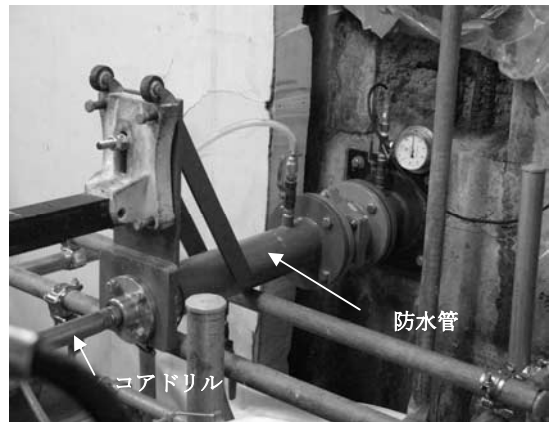
採取位置	塩化物イオン濃度(mg/l)	
平沼町立坑 B4F	4580	
高島町立坑	B3F (海側)	995
	B4F (山側)	216
河川水 (参考)	5.8	
海水 (参考)	19000	

(3) 貫通コア採取による調査

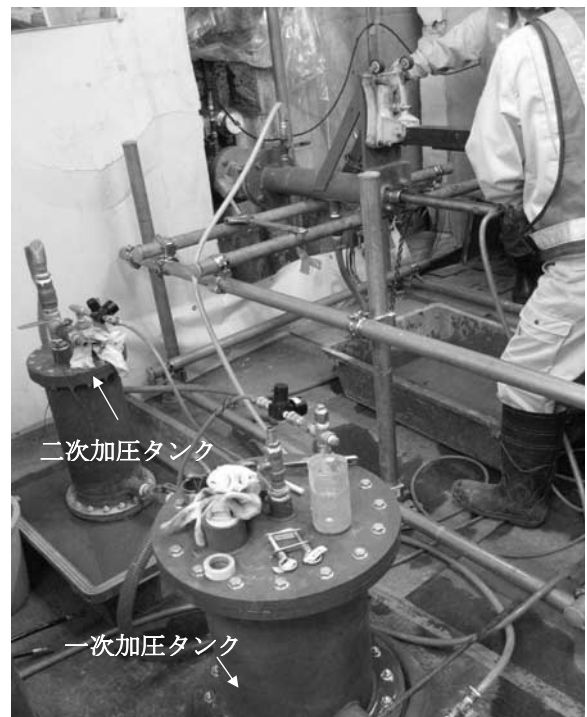
地山側の情報が得られていないため、躯体外側の塩化物イオン濃度の測定と外側鉄筋の健全性の調査を目的として、2006年に貫通コアの採取を実施した。平沼町立坑地下4階の調査位置を写真—1に示す。開発した躯体貫通型コアサンプリング装置を写真—2に、水圧に対抗する加圧タンク装置を写真—3に、



写真—1 調査位置 (平沼立坑 B4F)



写真—2 躯体貫通型コアサンプリング装置



写真—3 加圧タンク装置



写真—4 一次止水 (薬液注入)

一次止水状況を写真—4に示す。開発した装置は、防水管に与圧を与えて削孔を行うものである。

採取したコアを写真—5に示す。躯体と背面の連

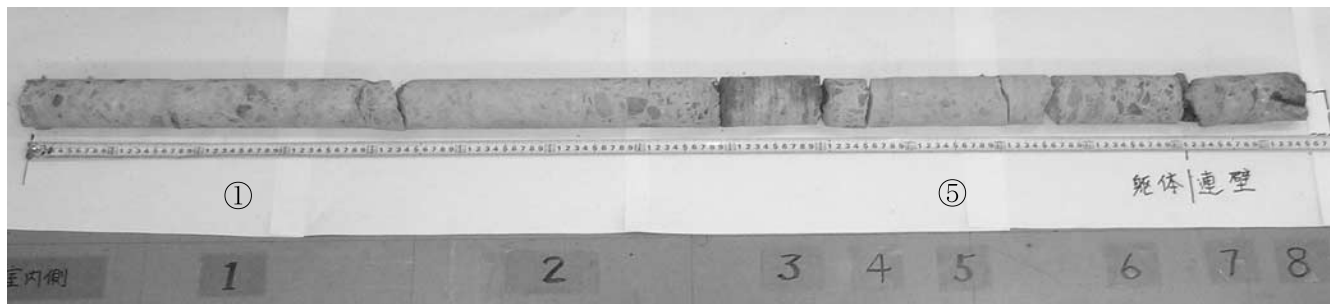


写真-5 採取コア (全長 1400 mm)

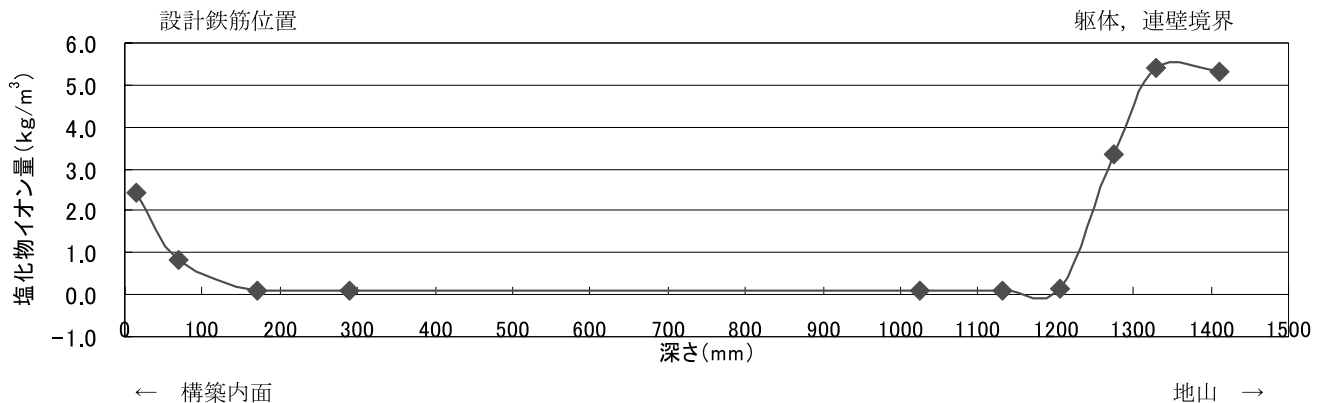


図-2 塩化物イオン分布 (全塩分量)

表-2 圧縮強度試験結果

供試体採取位置	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	見掛け密度 (kg/m <sup>3</sup> )
躯体①部	—	2230
躯体中央部	41.1	2230
躯体⑤部	—	2230

壁部を含めて 1400 mm の長さのコアを採取した。採取コアから測定した塩化物イオンの分布を図-2に示す。地山側からは、最大で 5.5 kg/m<sup>3</sup> の塩化物イオン濃度が測定された。圧縮強度測定結果を表-2に示す。側壁コンクリートの中央部の圧縮強度は 41.1 N/mm<sup>2</sup> であった。設計基準強度が 21 N/mm<sup>2</sup> であることから強度に問題のないことが確認された。

### 3. 耐久性診断・評価システム

#### (1) システムの概要

開発したコンクリート構造物の劣化診断と劣化進行予測および補修による延命予測を行う耐久性診断評価システムを紹介する。このシステムにより、リニューアルの項目である補修時期・方法・コストをデータに基づいて提案することができる。

システムは、①劣化原因を判定するグレーディング、②塩害・中性化およびこれらの複合劣化、硫酸劣化の進行予測、③劣化進行予測結果を使用したライフサイ

クルコストの算定から構成されている。ここでは、横浜市地下鉄において用いた塩害の進行予測について述べる。

塩害の進行予測では、構造物を取り巻く環境条件による劣化外力およびコンクリートの品質、またはコアサンプリングなどによる劣化測定データを用いることができる。また、コンクリートを補修した場合の検討も行うことができ、構造物の劣化進行予測から、補修工法とその時期を考慮して、補修の効果の比較が可能である。

#### (2) 塩化物イオンの浸透解析

コンクリート中の鉄筋は不動態皮膜で保護されている。この不動態皮膜は塩化物イオンがコンクリート中に存在すると破壊され鉄筋の腐食が始まる。発錆によりコンクリートにひび割れが生じさらに鉄筋の腐食が加速する。

塩化物イオンには「初期塩分」と「外来塩分」がある。初期塩分は海砂に含まれる等でコンクリートに導入されたものである。また外来塩分はコンクリート硬化後に潮風、海水飛沫などから供給されコンクリート表面から浸透するものである。これらとセメントの種類および水セメント比を計算条件として入力する。塩害計算条件入力画面を図-3に示す。

塩化物イオンの拡散の予測には、式 (1) の Fick の

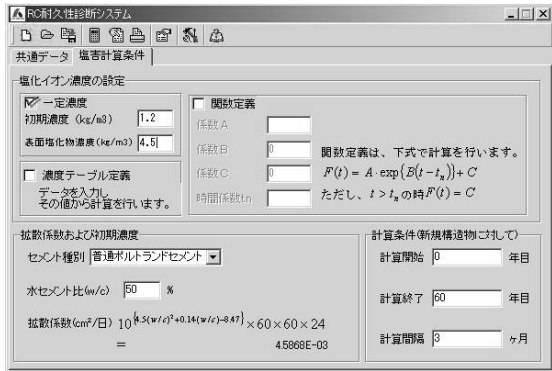


図-3 塩害計算条件入力画面

拡散方程式を適用した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Dc \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (1)$$

ここに

C：塩化物イオン濃度

Dc：拡散係数

x：コンクリート表面からの距離

t：時間

塩害に関するデータを得ることを目的に高塩分環境下の暴露試験を実施した。使用したコンクリートの配合は水セメント比50%のものを例として表-3に示す。試験における塩化物イオン濃度と解析値を図-4に示す。これは海水飛沫が当たる環境下でのCase-1の計測結果である。暴露期間3ヶ月、20ヶ月の計測結果と診断・評価プログラムで求めた解析結果の塩化物イオン濃度分布を示している。解析結果は計測値から最小自乗法により表面塩化物濃度および拡散係数を求め式(1)により計算したものである。計測値が良

表-3 配合

No.	水セメント比 W/C(%)	単位量 (kg/m³)			
		水(W)	セメント(C)	細骨材(S)	粗骨材(G)
Case-1	50	185	370	767	977

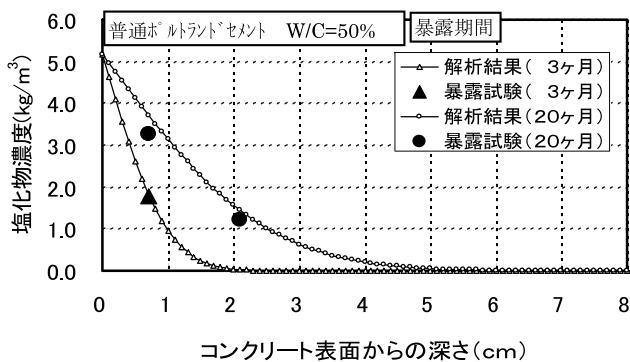


図-4 塩化物イオン濃度分布

好に模擬されている。

同定した拡散係数を用い50年後までの塩化物イオン濃度を予測した結果を図-5に示す。コンクリート表面から2cm～8cmまでの位置での濃度分布の時間変化を示したものである。また図中の発錆限界濃度はコンクリート標準示方書において示されている鉄筋の発錆限界濃度である。深さ2cmでは約2年後、6cmでは11年後に発錆限界濃度に達している。

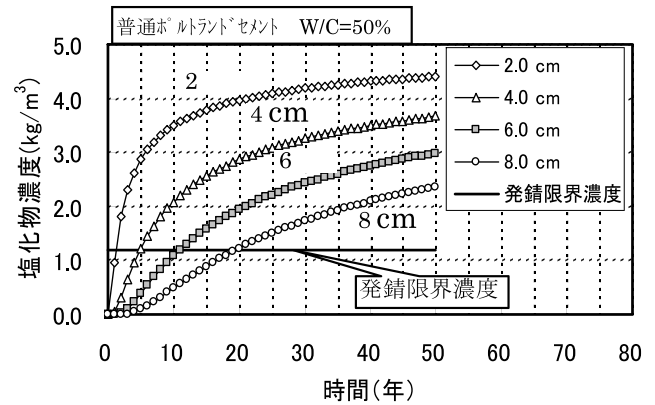


図-5 塩化物イオン濃度予測結果

本診断プログラムは、コンクリートを補修した場合の検討も行うことができる。補修工法にはコンクリート表面からの塩分浸透を遮断する表面被覆とコンクリートを撤去して打ち替える断面修復がある。

断面修復の概念を図-6に示す。断面修復工で置き換えられたコンクリートは塩化物イオンを含まず、その後の経過によりコンクリート表面から塩化物イオンの補修部分への浸透が始まることになる。その結果、塩化物イオン濃度が鉄筋の発錆限界濃度に達する時間を遅くすることができる。補修を施工した場合の構造物の劣化予測には補修材料の劣化を考慮しており、特性が変化しない期間では拡散係数は変化しないものとし、劣化期間ではシグモイド関数を用いて拡散係数を大きくしている。補修を行った場合の塩化物イオン濃度の予測結果を図-7に示す。鉄筋のかぶり厚を4cmと想定して、コンクリート表面からの深さが4cmの位置の濃度変化を示した。断面修復は10年後に深さ4cmまで行き、表面被覆は新設時に行ったとして解析した。断面修復では補修後に塩化物イオンが補修部側にも拡散し濃度が小さくなる。また、表面被覆では拡散係数が小さくなり濃度の増加勾配が小さくなっている。補修をしない場合は5年後、表面被覆は17年後、断面修復は28年後に鉄筋の発錆限界濃度1.2 kg/m³に達している。

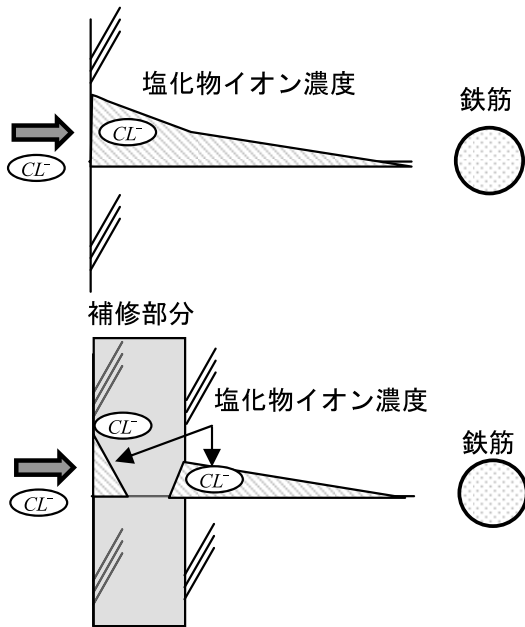


図-6 断面修復の概念

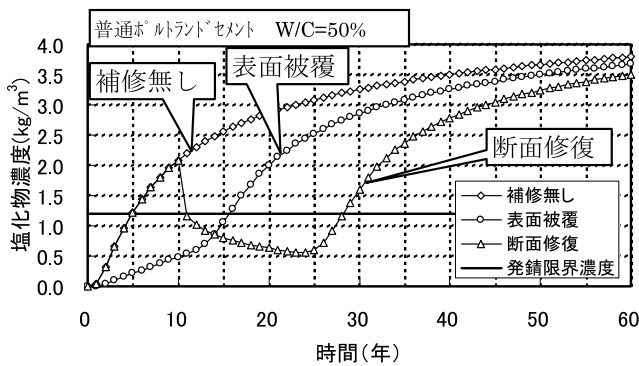


図-7 補修した場合の塩化物イオン濃度

#### 4. 躯体側壁の塩害の進行予測

地下鉄立坑部外壁の塩化物イオンの測定結果を基にコンクリートの拡散係数と表面塩化物イオン濃度を逆算し、今後の塩化物イオン濃度の推移を予測した。躯体の塩化物イオン濃度の経過年数ごとの分布を図-8に示す。現在値を30年経過として、50年目には鉄筋かぶり5.4 cmの場合では発錆限界濃度1.2 kg/m<sup>3</sup>に達

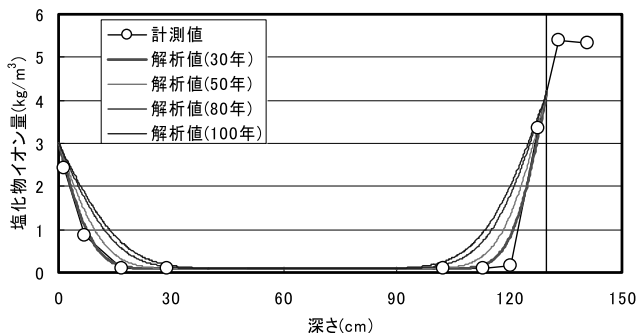


図-8 塩化物イオン濃度分布

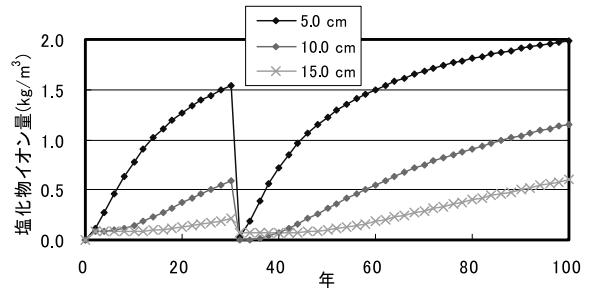


図-9 塩化物イオン濃度の推移 (30年で補修)

する予測である。

表面からの深さが5.0～15.0 cmにおいて、経過年数毎の塩化物イオン濃度の推移を図-9に示す。建設後30年に深さ15 cmまでを断面補修材で置き換えたとしているため、この時点で濃度は低い値になっている。深さ10 cm位置では建設後30年には塩化物イオン濃度は、0.6 kg/m<sup>3</sup>程度であったが、補修後には0 kg/m<sup>3</sup>に低下し、その後漸増している。なお、50年経過以降に塩化物濃度が再び上昇しているのは、補修材の性能劣化を考慮したためである。

#### 5. おわりに

側壁コンクリートは、構造物内側から塩化物イオンの侵入により内側鉄筋に腐食が発生しているが、鉄筋かぶりが大きいと、顕著な腐食ひび割れの発生は少ない。背面からの塩化物イオンの侵入が確認されたが、背面側の鉄筋の腐食は進んでおらず、躯体の劣化が今後急速に進むことはないと考えられる。今後も、維持管理より構造物の健全性を保持して行きたい。

JCMA

##### 【筆者紹介】



東 邦和 (あづま くにかず)  
 (株)奥村組 技術研究所  
 材料・LCEグループ 主管研究員



宮村 貫雄 (みやむら みちお)  
 (株)奥村組 東京支社  
 土木工事第3部 所長



青木 進 (あおき すずむ)  
 横浜市交通局 電車部 施設課  
 施設区 区長