

# 報告 東日本大震災における津波による住宅の塩害被害に関する調査

福山 智子<sup>\*1</sup>・呉 多英<sup>\*2</sup>・西脇 智哉<sup>\*3</sup>・野口 貴文<sup>\*4</sup>

**要旨:** 東日本大震災によって各地で津波による浸水被害が発生しており、建物の直接的な構造被害の他に、塩害などによる耐久性の低下が懸念されている。本報では、浸水に伴う塩害の実態について、被災地域の住宅基礎から採取した試料に対して塩化物イオン含有量の分析を行い調査した。その結果、浸水した住宅基礎のかぶりコンクリートから、将来の性能低下が懸念される量の塩化物イオンが検出された。これにより、津波による塩害は看過できないレベルであり、対策を要するという結論に至った。

**キーワード:** 津波, 塩害, 全塩化物イオン, ドリル法, 耐久性

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災により、各地で甚大な被害が発生した。本震災の被災特徴として、津波による被害が大きい点が挙げられる。気象庁の発表によると、津波高さが岩手県大船渡市で11.8m、同県釜石市で9.3mと推定されている。同庁の記録では、2003年の十勝沖地震で観測した十勝港の2.55mが最高であり、数字の面からも今回の津波の規模がけた違いに大きなものであったことが見て取れる<sup>1)</sup>。

その中で、宮城県石巻市の各地においても津波による浸水被害が発生しており、鮎川では8.6mを記録した。さらに、津波による被害の他に、地震に伴う地盤の沈下による継続的な住宅の浸水被害が発生している地域も存在している。しかし、津波による浸水被害を受けているコンクリート構造物の被害程度についての報告は、これまでにほとんど見られない。

この現状を鑑み、本報では、震災による浸水に伴う住宅コンクリート基礎部分の塩害について、塩化物イオン量の分析により現状を把握した上で劣化予測を行い、鋼材腐食発生限界濃度を考慮することによって、構造物の将来的な耐久性能について検討する。

## 2. 調査概要

### 2.1 調査対象地域と塩化物イオンに関する環境条件

#### (1) 津波

図-1に示す本報告の調査対象地域は、2011年3月11日の震災時に津波による浸水被害を受けた。この地域は、海岸線から直線距離で西に700m以上の場所に位置する。津波による浸水被害では、水流圧や浮遊物および浮力による物理的損害が構造物に生じる可能性が考えられる。また、構造的被害の他に、海水を浴びたことによる構造物の質的損害が生じるおそれがある。

今回の調査対象については、外観目視の範囲では構造的な被害は見られなかった。



図-1 調査対象地域<sup>2)</sup>

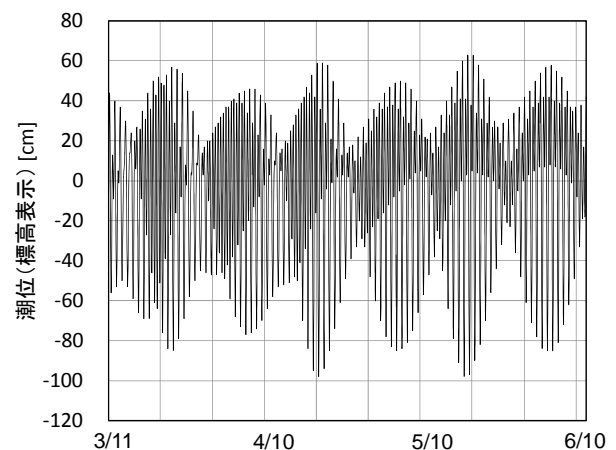


図-2 石巻市鮎川の3/11~6/10の潮位の推移<sup>3)</sup>

\*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 特任研究員 博士(工学) (正会員)

\*2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 修士課程 (会員外)

\*3 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

\*4 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

## (2) 地盤沈下と潮の干満による浸水

電子基準点の解析結果や GPS による上下変動の調査結果から、東北地方太平洋沿岸において地震に伴い顕著な沈降が発生していることが確認された。上下方向の最大変動量は宮城県石巻市鮎川で 1.14m の沈降であったとされる<sup>4)</sup>。

今回調査対象とした石巻市の地域でも地盤が沈下したために道路や住宅が浸水する被害が起きている。これは、潮の干満に伴いマンホールから水が湧出するためである。この水（以下、道路水）の塩化物イオン濃度は 2819.60 [mg/L]であり、塩化ナトリウムの濃度に換算すると 4946.38 [mg/L]であった。これは、質量パーセント濃度では 0.49 [wt%]に換算される。一般的な海水の質量パーセント濃度は 2.5 [wt%]前後と言われており<sup>5)</sup>、道路水の塩化物イオン濃度は海水と比較して 5 分の 1 程度となる。これは、海水が潮の干満に伴って下水道を遡上しており、遡上の際に道路水が海水以外の液体と下水道内で混合したためと推察される。

図-2 に 3 月 11 日から 6 月 10 日の石巻市鮎川の天文潮位を示す。約半月に 1 回、定期的に潮位の振幅が大きくなっている様子が見取れる。これは、潮位が月の運行に伴って変動するためである。新月と満月に当たる日の前後数日間は、潮位の満潮・干潮の差が大きくなる大潮となる。また、上弦の月、下弦の月に当たる日の前後数日間は、潮位の満潮・干潮の差が小さくなる小潮となる<sup>3)</sup>。

写真-1 に示すように、調査対象地域では大潮時にマンホールから水が湧くので住宅が浸水する。逆に、写真-2 に示すように、湧水がない期間は道路が完全に乾燥している様子を観察できる。写真右手奥の住宅の門に見える土嚢は、庭への水の浸入を防ぐために浸水時に用いるものである。調査対象地域は、このような乾湿繰返し状態にあるため、道路水に含まれる塩分による塩害が懸念される。



写真-1 5月31日（大潮直前）の道路浸水の様子



写真-2 乾燥時の道路の様子<sup>6)</sup>

## 2.2 調査方法

2011年5月31日（大潮直前）と6月10日（小潮直後）に、5軒の住宅の浸水被害状況調査と、コンクリート基礎に対するドリル法<sup>7)</sup>の適用による試料（以下、ドリル粉末）の採取を行った。各住宅の名称はA～E邸とし、1軒当たり1～2箇所の試料採取を行った。得られたドリル粉末に対して各戸ごとにナンバリングを行い、これをサンプル名（例：A-1）とした。

図-3 に示すように、構造物に残存する津波の浸水線を基準点（ゼロ点）として、地面方向に試料採取高さ  $L$  [cm] を定義した。

図-4 に、各試料の採取高さを示す。A邸とD邸では、同一の箇所の壁面に対し、削孔する高さを変えて試料を採取した。大潮時の水位は-89 cm、マンホールからの湧水が発生する場合に常に浸水する高さを-98 cmとして図中に示した。これは、大潮直前期である5月31日の試料採取高さが約-89 cmであり、また、この地域の住人への聞き取り調査の結果、浸水被害が発生する際に必ず浸水する高さが約-98 cm前後までであることが明らかになったためである。

そこで、試料採取高さごとに塩害環境に関するレベル分けを次のように設定した。すなわち、 $-80 < L < 0$  では津波による浸水、 $-100 < L < -80$  では1か月に2回程度の大潮による低頻度の浸水、 $L < -100$  では1か月に3回以上の高頻度の浸水を想定した。ここは、道路から水が湧出する場合に必ず浸水する部位であり、最も厳しい塩害環境にある可能性が高いと考えられるためである。

試料採取深さ  $x$  [cm] は、コンクリート表面を基準点として定義し、表面から 1cm まで ( $x=0.5$ cm)、1～2cm ( $x=1.5$ cm)、2～3cm ( $x=2.5$ cm) と深度別にドリル粉末を採取することにより深さ方向の塩化物イオン量を分析する。

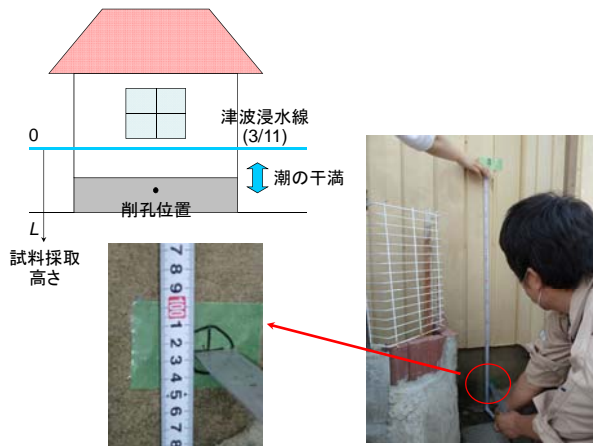


図-3 試料採取高さの定義

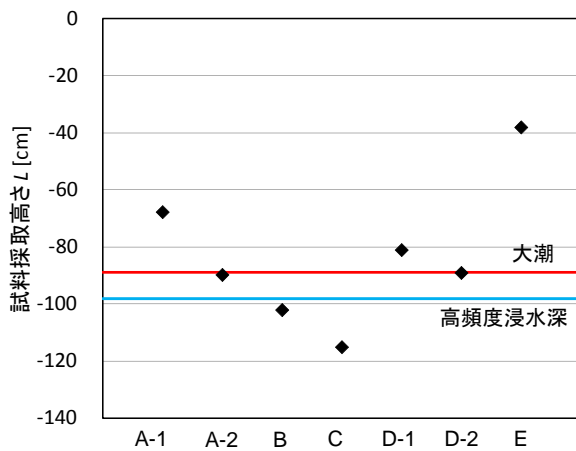


図-4 各試料の採取高さ

### 3. 塩化物イオン濃度分析による劣化現状の評価

海水を含有する水により浸水被害を受けた住宅のコンクリート基礎中の塩化物イオン量を定量するために、JIS A 1154 に規定する全塩化物イオンの定量法<sup>7)</sup>に準拠して塩化物イオン濃度の分析を行った。

#### 3.1 全塩化物イオンの抽出

JIS A 1154 に準拠して、ドリル粉末を 200mL の硝酸に溶解し、これをろ過することでドリル粉末に含まれる全塩化物イオンを抽出した。

#### 3.2 吸光光度法による塩化物イオンの定量

##### (1) 実験の概要

JIS A 1154 に基づき、3.1 節で得たろ液の一部を分取し、チオシアン酸水銀 (II) 及び硫酸アンモニウム鉄 (III) を加えた。チオシアン酸イオンと鉄 (III) とが反応してだいたい赤に呈色する錯体の吸光光度を測定して、塩化物イオン濃度  $S$  [mg/L] を定量した。

##### (2) 塩化物イオン量の計算

吸光光度の測定で得られた塩化物イオン濃度  $S$  [mg/L] から式(1)により塩化物イオン質量パーセント濃度  $C$  [wt%] を算定し、これを用いて式(2)からコンクリート単位重量当たりの塩化物イオン量  $M$  [kg/m<sup>3</sup>] を算出した。本

調査で得られたコンクリート試料は絶乾単位重量が不明なため、換算に当たってはコンクリートのおおよその絶乾単位質量平均値 2,200 [kg/m<sup>3</sup>] として使用した。

$$C = S \times 10^{-3} / W \times 200 / 1000 \times 100 \quad (1)$$

$$M = C / 100 \times 2200 \quad (2)$$

ここに、 $C$ : 塩化物イオン質量パーセント濃度 [wt%],

$S$ : 吸光光度法から求めた試料溶液中の塩化物イオン濃度 [mg/L],

$W$ : 試料質量 [g],

$M$ : コンクリート単位重量当たりの全塩化物イオン量 [kg/m<sup>3</sup>]

### 3.3 塩化物イオン測定結果に及ぼす骨材量の影響の補正

ドリル法により構造物からコンクリート試料を採取する場合、採取可能な試料の量が少ないために、ドリル粉末中のセメントペースト分と骨材分の比と測定の対象とした実構造物コンクリートのものと異なる可能性が高く、測定結果に大きなばらつきを生じさせることが考えられる<sup>8)</sup>。

JSCE-G 573 附属書に準拠して、ドリル粉末中の塩化物イオンの含有量に及ぼす骨材量の影響を考慮し、3.2 節の操作によって得た全塩化物イオンの分析結果を補正した。

#### (1) 実験の概要

ドリル粉末中の骨材量を求めるため、ドリル粉末を塩酸に溶解し、この溶解液をろ過することにより不溶残分を求めた。

#### (2) 骨材量の影響の補正計算

採取したドリル粉末中のセメントペースト分と骨材分の比が測定の対象とした実構造物コンクリートのセメントペースト分と骨材分の比と異なる場合、実構造物コンクリート中の全塩化物イオンの割合とドリル粉末中の全塩化物イオンの割合には、式(3)の関係がある<sup>7)</sup>。

この関係を用いて、塩化物イオン量測定結果に及ぼす骨材量の影響の補正を行った。本調査で得られたコンクリート試料は調合が不明であるため、骨材量の影響の補正に当たり実構造物コンクリート中の骨材の割合を 0.8 と仮定した。

$$C_{Cl} = C_{Cl(d)} \cdot (1 - f_{ag}) / (1 - f_{ag(d)}) \quad (3)$$

ここに、 $C_{Cl}$ : 実構造物コンクリート中の全塩化物イオン [kg/m<sup>3</sup>],

$C_{Cl(d)}$ : ドリル粉末中の全塩化物イオン [kg/m<sup>3</sup>],

$f_{ag(d)}$ : ドリル粉末中の骨材の割合,

$f_{ag}$ : 実構造物コンクリート中の骨材の割合

### 4. 将来劣化（塩化物イオンの拡散）の予測

コンクリート構造物の塩害劣化は、鋼材の腐食が開始するまでの潜伏期、腐食開始から腐食ひび割れ発生まで



の進展期，腐食ひび割れの影響で腐食速度が大幅に増加する加速期，および鋼材の大幅な断面減少などが起こる劣化期という過程に分けて考えることができる。塩害劣化進行過程における潜伏期には，塩化物イオンの拡散の予測が重要である。一般に塩化物の拡散の予測には式(4)が用いられている<sup>9)</sup>。

$$C(x,t) = \gamma_{cl} \left[ C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) + C_i \right] \quad (4)$$

ここに， $C(x,t)$ ：深さ  $x$  [cm]，経過時間  $t$  [年]における塩化物イオン濃度 [kg/m<sup>3</sup>]

$C_i$ ：初期含有塩化物イオン濃度[kg/m<sup>3</sup>]

$C_0$ ：表面における塩化物イオン濃度 [kg/m<sup>3</sup>]

$D$ ：塩化物イオンの見掛けの拡散係数[cm<sup>2</sup>/年]

$\operatorname{erf}$ \*：誤差関数，

$\gamma_{cl}$ ：予測の精度に関する安全係数 (1.0)

コンクリート中の塩化物イオンの拡散係数と表面塩化物イオン濃度が判明すれば，時刻  $t$  における塩化物イオンの濃度を，式(4)を用いて算定することができる。本報では式(5)を用い，試料の水セメント比を70%と仮定した上で拡散係数を算定した。表面塩化物イオン濃度は，調査結果の塩化物イオン濃度分布より算出した<sup>9,10)</sup>。

$$\log D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (5)$$

ここに， $D_p$ ：塩化物イオンの見掛けの拡散係数の予測値 [cm<sup>2</sup>/年]， $W/C$ ：水セメント比

## 5. 塩害の現状評価と劣化の判定

採取したドリル粉末に対して3章の手順に従って塩化物イオン濃度分析を行い，津波と浸水による当該地区の住宅基礎の塩害状況について検討を行った。

さらに，4章の手順に従って調査対象の20年後の塩化物イオン分布について予測を行い，将来的な劣化状況について判定を行った。

図-5は，上記の操作により得た全塩化物イオン分布の現状(図-5(a))と20年後の予測(図-5(b))を試料採取高さ  $L$  との関係で整理したものである。

### 5.1 塩害の現状

図5(a)は，全塩化物イオン量分布をドリル粉末中の骨材量で補正したものである。骨材量の補正に際して，試料 A-1 ( $x=0.5\text{cm}$ ) の試料が不足したために，他の部位 ( $x=1.5\text{cm}$ ,  $2.5\text{cm}$ ) の骨材割合を参考にして0.7と仮定して塩化物イオン量を算定した。すべての試料で，補正後の全塩化物イオン量が小さくなる傾向が見られた。よって，今回の調査で採取したドリル粉末は，一般的な構造用コンクリートと比較してセメントペーストの割合が多いといえる。

塩化物イオン濃度の分布状況については，津波や道路水による外部塩化物の供給により，すべての試料でコン

クリート内部に塩化物イオンが浸入している様子が確認できる。また，測定結果から算定した近似曲線より，各住宅の初期含有塩化物イオン濃度は，ほぼゼロであると推定される。

さらに，図より試料採取高さ  $L$  と含有塩化物イオン量  $M$  が必ずしも比例関係にないことが確認できる。これは，各部位での塩化物イオン量が試料採取高さ(浸水深)以外の要因からも影響を受けるためだと考えられる。

#### (1) 津波の影響

今回の調査で試料を採取した箇所は，すべて3月11日の津波によって浸水している。しかし，その後の定期的な浸水により，試料E以外の試料は塩水の乾湿繰返しを受けており，津波による塩害について検討が可能であるのは試料Eのみである。この部位には，今後塩化物が供給される可能性が低いいため，中性化などによる塩化物イオンの深部への濃縮が起これなければ，鉄筋位置で塩化物イオンが鋼材腐食発生限界濃度に達する可能性は低いと考えられる。

#### (2) 乾湿繰返しと浸水頻度の影響

各高さレベルで想定した水害は，「①津波(-80<L<0)」・「②大潮(-100<L<-80)」・「③大潮よりも低い水位レベルの浸水(L<-100)」の3つであった。上記②③の水が対象地域に遡上する際の駆動力や遡上経路について考えた場合，駆動力は潮の干満であり，②の場合は大潮のため大量の海水が下水道を遡上するが，③の場合は②よりも潮の駆動力が小さいために海水が少なくなり，水溶液中の塩化物イオン量が低くなる可能性がある。また，②③ともに移動経路が下水道であるために，これらの水は津波よりも塩化物イオン濃度が低下していることは，2.1節(2)で確認済みである。

よって，高頻度に乾湿を繰り返すために塩化物イオンの濃縮が予想される③であっても，雨水や塩化物イオン濃度の低い道路水がコンクリート表面にかかるような場合は，乾湿繰返しによる塩化物イオンの濃縮よりも移流によって塩化物イオンが溶出する量が上回ることが予想される。試料Cは試料Bよりも低い位置にあり高頻度の乾湿繰返しを受けるため塩化物イオン含有量が多いことも想定されるが，実際にはBよりも塩化物イオン量が低くなっているのはこの理由のためであると考えられる。

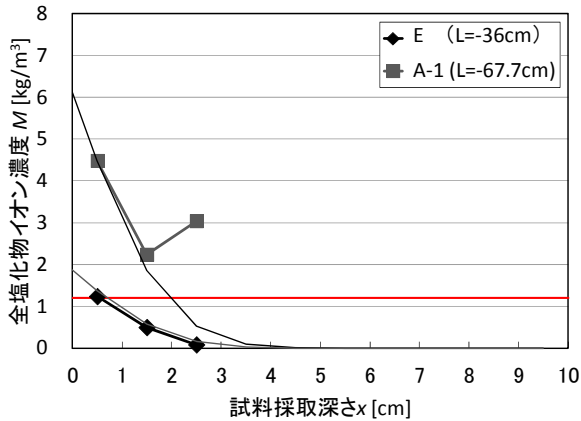
#### (3) 同組成の試料を比較した場合

同一の住宅の基礎壁面に対し削孔する高さを変えて試料を採取したA-1・A-2とD-1・D-2を対象として，高さや遮蔽物の影響に関して検討を行った。試料A-1とA-2では， $x=2.5\text{cm}$ の位置ではほぼ同程度の値をとっている。また， $x=1.5\text{cm}$ よりも $2.5\text{cm}$ の方が塩化物イオンの濃度が高い。この場合， $x=2.5\text{cm}$ 付近の中性化フロントにおいて塩化物イオンの濃縮現象が生じた可能性が考え

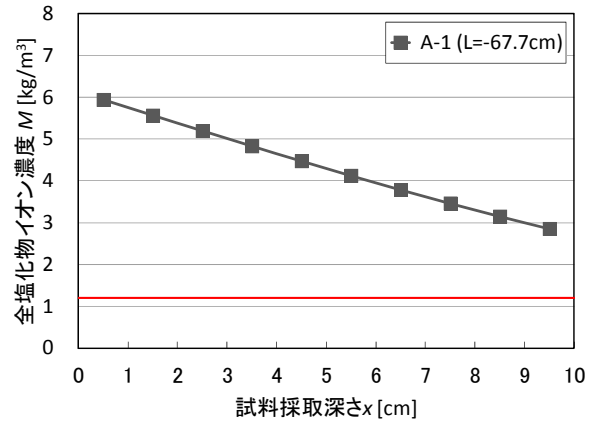
られる。また、A-2で $x=0.5\text{cm}$ での濃度が極端に低くなっているのは、流水による移流で塩化物イオンが洗い出されたためと予想される。

試料D-1とD-2では、高さのみを考えるとD-1の方が浸水の危険が少ないが、塩化物イオン量は多くなっている。これは、写真-3に示すように、試料D-2採取位置

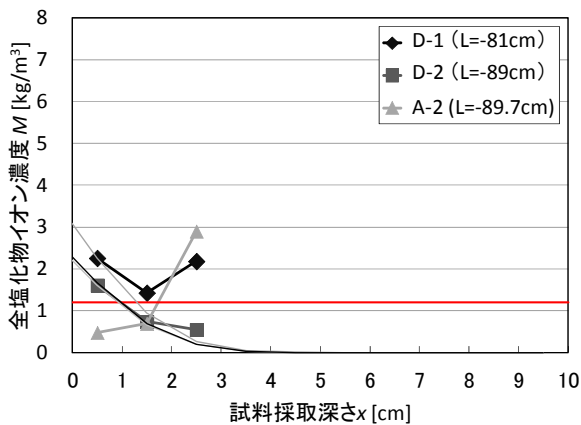
がコンクリートブロックで覆われていたため、塩化物イオンの浸入を阻害したものと考えられる。住宅の場合、津波や浸水を二次的に遮蔽する周辺構築物が不規則に存在し、これが塩分移動に影響を及ぼす可能性が想定される。このため、今後は周辺遮蔽状況を踏まえた実測計測が必要であると考えられる。



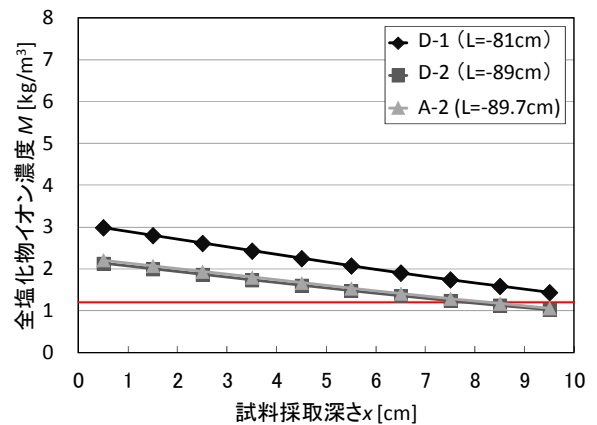
(i)  $-80 < L < 0$  (津波による浸水部位)



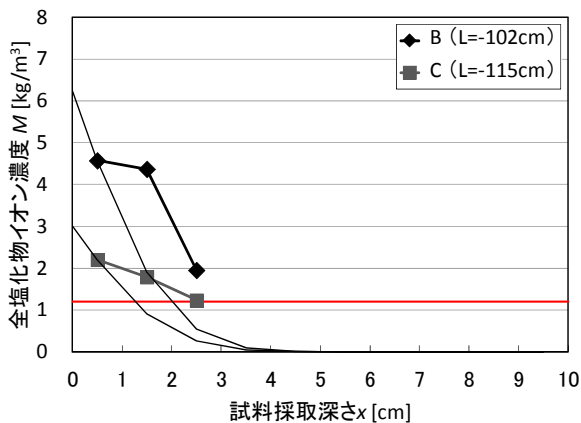
(i)  $-80 < L < 0$  (津波による浸水部位)



(ii)  $-100 < L < -80$  (大潮による浸水部位)

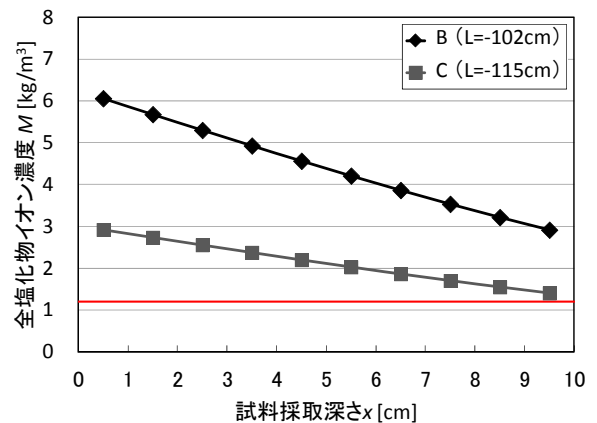


(ii)  $-100 < L < -80$  (大潮による浸水部位)



(iii)  $L < -100$  (高頻度な浸水部位)

(a) 現状 (初回浸水経験後3ヶ月経過)



(iii)  $L < -100$  (高頻度な浸水部位)

(b) 20年後の予測

図-5 コンクリート基礎中の全塩化物イオン量分布



写真-3 試料 D-1, D-2 採取箇所

## 5.2. 劣化予測

図-5(b)は、調査対象の20年後の塩化物イオン分布を予測したものである。試料Eの部位への塩害は津波由来の一時的な塩化物イオンの供給のみと考えたため、継続的な塩分供給を前提とする本手法による予測は行わなかった。その他の試料では、マンホールからの湧水により、継続的に一定量の塩化物が供給されると想定した。

塩化物イオンの鋼材腐食発生限界濃度は、コンクリート単位重量当たり  $1.2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ とされている<sup>9)</sup>。図で示すすべての試料のかぶり7.5cm位置で塩化物イオン量  $M$  が  $1.2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ を超過していることがわかる。

## 5.3 劣化判定

今回の調査では、構造物に外観上の変状は見られなかったが、浸水によってかぶりコンクリートの塩化物イオン含有量が上昇したため、劣化状態のグレードは状態Ⅰ（潜伏期）であると判断した。現時点では劣化現象は顕在化していないが、浸水による乾湿繰返しが続いた場合や中性化が進行した場合、深部に塩素イオンが濃縮される可能性が高いため、状態Ⅱ（進展期）に至ることが想定される。そのため、脱塩やはつりなどの対処を行う必要があると考えられる。

## 6. まとめ

大規模地震に伴う津波・地盤沈下の影響によって、被災地域では平時には見られない特殊な周辺環境に依存する塩害が発生した。本調査では、津波の影響と下水に混ざって遡上してくる海水の影響について塩化物イオン濃度の変化を中心に考察を行った。本調査により得られた主要な結果は以下に示すとおりである。

(1) 津波による浸水を一度経験しただけの高い場所に位

置する構造物であっても、高頻度で低塩分濃度の道路水が繰返し浸水する構造物であっても、かぶりコンクリート中に相当量の塩化物イオンが浸入していることがわかった。津波による塩害に関するこれまでの調査実績が少ないので、被害の実態や対策について今後さらに検討していく必要があると考えられる。

- (2) 試料によっては、塩化物イオン濃度が深さ方向に対して単純減少をしていない結果が得られたものも存在した。調査中の制約から中性化深さについて詳細な調査を行えなかったものの、コンクリートの中性化に伴う塩化物イオンの濃縮現象についても留意する必要があると考えられる。
- (3) 浸水被害が構造物に及ぼす影響因子は塩化物イオン以外にも存在するものと考えられるため、今後は、下水の混合による海水の水質変化や、マンホールの位置、住宅周辺の遮蔽物の影響なども考慮して総合的に塩分の移動を考慮する必要があると考えられる。

本調査では津波による塩害被害に関する重要な基礎資料を得た。これは、構造物に起こりうる津波被害対策への一助になるものとする。

## 参考文献

- 1) 気象庁：「石巻市鮎川」の津波観測点の観測値について（続報）、報道発表資料，2011.6.3
- 2) Google マップより転載
- 3) 気象庁：潮位表，気象統計情報
- 4) 国土地理院：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震に伴う三角点及び水準点の測量成果の改定値を公表（10月31日から提供開始）資料3 太平洋沿岸の上下変動量，2011年報道発表資料，2011.10.28
- 5) JIS K 2510：潤滑油—さび止め性能試験方法
- 6) Google ストリートビューより転載
- 7) JIS A 1154：硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法
- 8) JSCE-G 573-2003：実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法（案），コンクリート標準示方書[規準編]，pp.289-296，2005
- 9) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 [基礎編]，pp.194-200，2011.2
- 10) 小林豊治・米澤敏男・出頭圭三：鉄筋腐食の診断，森北出版，pp.173-183，1993.5