

途上国での社会基盤構造物—特に 鉄筋コンクリート構造物—の老朽化 に関する考察

東京工業大学国際開発工学専攻
大即信明、横倉順治、斎藤 豪、
西田孝弘

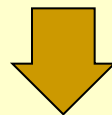
1. はじめに

- 我々の国と同様、開発途上国においても社会基盤の主たる材料はコンクリートである。現在の開発途上国における建設現場での施工を考えた場合、これらの国のコンクリート技術は実用上十分なレベルに達していないことが懸念される。本報告では、アフリカの13ヶ国における開発途上国の材料施工の実情を紹介する。また、これらを踏まえて今後の課題をまとめる。なお、調査対象とされた20件に関し、コンクリートの材料・施工について現場で認められた主な問題点を表-1にまとめる。
- また、(工学論文となるよう)温度の影響も検討した。
- **注: 鋼は値段が高いため、コンクリートの割合は大きい。**

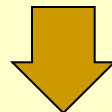
開発・社会基盤の基本材料はコンクリートである

開発途上国

技術レベル: 十分なレベルに達していない
特に基礎的な知識の不足



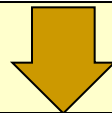
加えて, 厳しい環境条件



より高度な知識の必要性

日本

技術レベル: 十分なレベルに達している



モラルの欠如

2. 早期劣化事例 岩塩入り骨材の使用

1) カイロにて

カイロで見学した建築物のコンクリート工事の出来事を紹介する。これは、1990年頃のことであるが、現場で砂利を篩っていた作業員が時々白いものを脇へ放り投げていた。案内役の方の話によると、採取された砂利には時々岩塩が混ざっており、発見した場合それを取り除いているとのことだった。先にも述べたとおり、鉄筋コンクリートへの塩分の混入は塩害を誘発する恐れがある。

しかしながら、著者の1名が2000年にカイロの該当建築物の外観調査を行ったが、幸いなことに鉄筋腐食は観察されなかった。次に述べるアレキサンドリアの例と考え合わせると、カイロは非常に乾燥しているため、鉄筋腐食が生じなかったと推察される。

岩塩入り骨材の使用

2) アレキサンドリア精米技術訓練センターのひび割れ

1984年に竣工したが、その後、仕上げ面および躯体表面に顕著なひび割れが生じた。1999年にひび割れの発生原因ならびに補修方法を含めた今後の対策を検討するために、ひび割れの目視観察、コンクリートコアの採取、はつりによる鉄筋腐食状況調査を行った。また、砂の採取場において砂の試料を採取した。この調査の概略は次のようである。

- ①最大ひび割れ幅は10mm(日本で補修が必要とされるひび割れ幅は0.3程度)
- ②塩化物量は2～4kg/m³ (腐食が発生する最小の塩分量は1.2 kg/m³程度)
- ③中性化(コンクリートのpHが低下する現象)は鉄筋位置まで達していない。
- ④腐食生成物の観察などにより、塩化物による腐食と推察される。

このセンターは、JICAの無償援助にて1984年竣工された鉄筋コンクリート造平屋建て(一部中2階)である。最高高さは13.5mで、基本スパンは長辺方向が9.0m、短辺方向が6.0m、7.0mおよび7.5mである。

1984年に竣工したが、その後、仕上げ面および躯体表面に顕著なひび割れが生じた。1999年にひび割れの発生原因ならびに補修方法を含めた今後の対策を検討するために、我が国の施工会社がひび割れの目視観察、コンクリートコアの採取、はつりによる鉄筋腐食状況調査を行った。また、砂の採取場において砂の試料を採取した。

岩塩入り骨材の使用 施工後15年で大規模補修

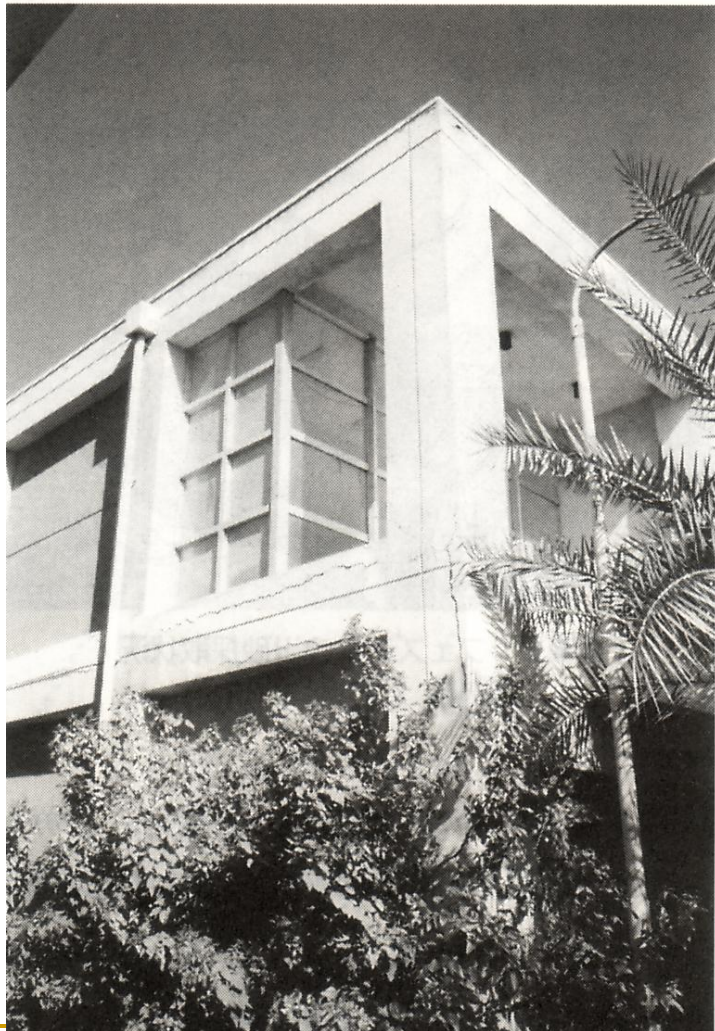


写真-3 センターの柱, 梁のひび割れ



写真-4 センター柱のひび割れ

岩塩入り骨材の使用

3)中近東の状況

中東からの留学生によると、母国の地域では岩塩の含まれていそうな砂漠の岩石をコンクリート用骨材として多用しているようである。これが、水分の状態との兼ね合いで、塩害を起こしている場合もあれば起こしていない場合もあると考えられる。もし、起こしているあるいは今後顕在化するようであれば大問題となる可能性が高い。

3. 材料・施工上の問題

- 本章では、アフリカの13ヶ国における開発途上国の材料・施工の実情を紹介する。また、これらを踏まえて今後の課題をまとめる。なお、調査対象とされた20件に関し、コンクリートの材料・施工について現場で認められた主な問題点を表-1にまとめる。

表-1 施工管理上の問題発生状況

No.	施工管理項目	発生 件数
1	骨材に挟雑物が混入、あるいはその保管場所における直射日光・降雨からの遮蔽への対策なし。	4
2	仕様書の規定より砂が細かい、砂利が大きい、又はそもそも試験されていないものを使用。	14
3	水セメント比の仕様書との適合性に関し、施工中適切な頻度で定量的方法（砂の表面水測定等）により確認されていない。	9
4	組み立て後の型枠に、モルタル・セメントミルクが漏れるほどの隙間が見られる。	12
5	型枠隙間充填のための木片・紙片がコンクリート内部に混入し、あるいは型枠固定のために既設コンクリートに釘が打ち込まれている。	8
6	仕様書どおりコンクリートが養生されていない。	3
7	型枠の外し方が雑なため、柱/梁の角が欠損。	12
8	深刻なコールドジョイント発生。	6
9	多数のマメイタ/ジャンカ発生。	12
10	コンクリート表面に直径5mm以上の気泡多数。	11

20件中

2. 材料に関する実情

(1) 粒度の細かい砂

モロッコの事例では、作業性(スランプ8cm)を確保するために単位水量を増加したため、単位水量と水セメント比がそれぞれ $195\text{kg}/\text{m}^3$ 、65%となった。最終的には現地ではあまり使用されていない薬剤(減水剤)を加えて $165\text{kg}/\text{m}^3$ 、55%とした。

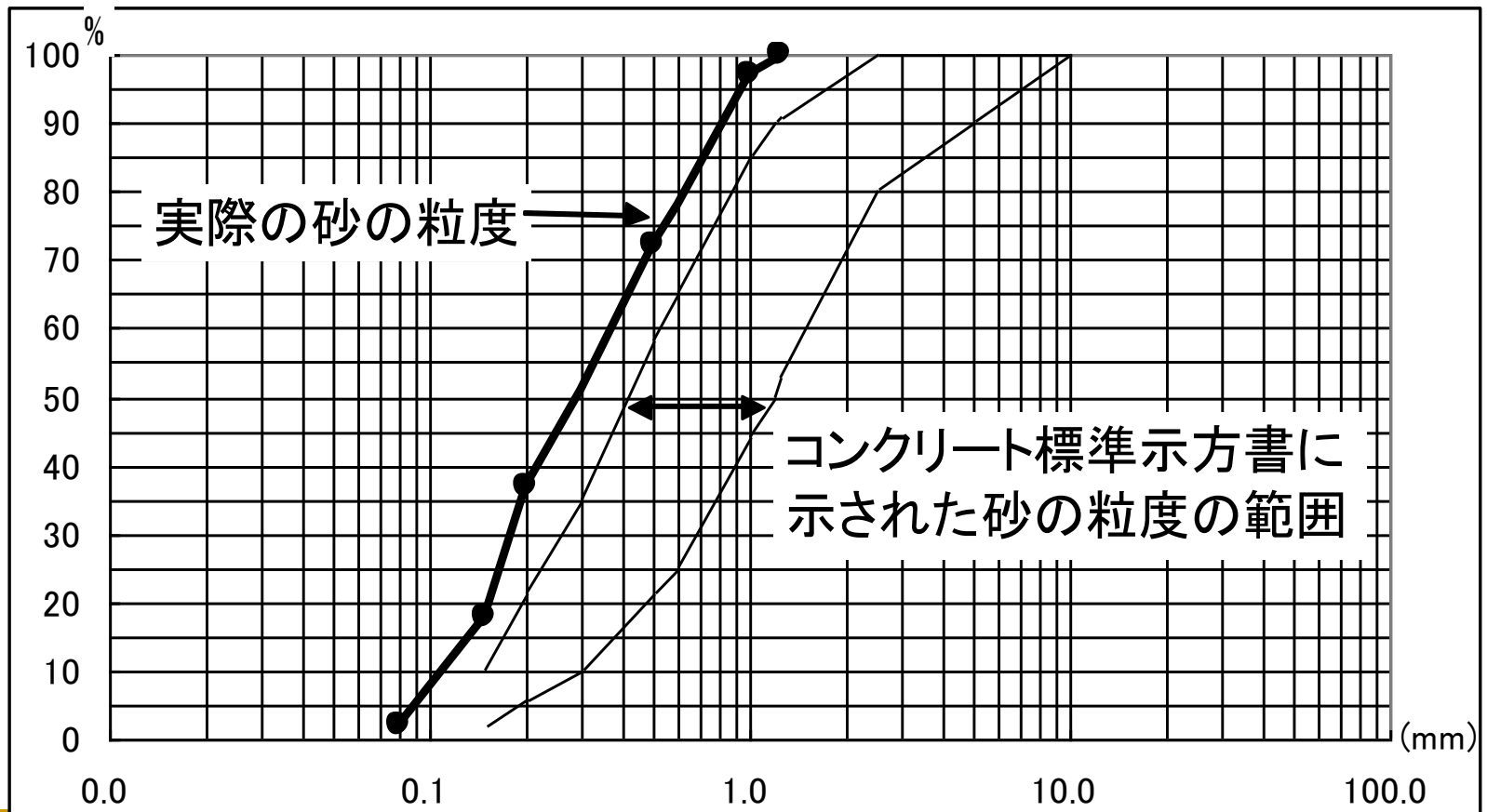
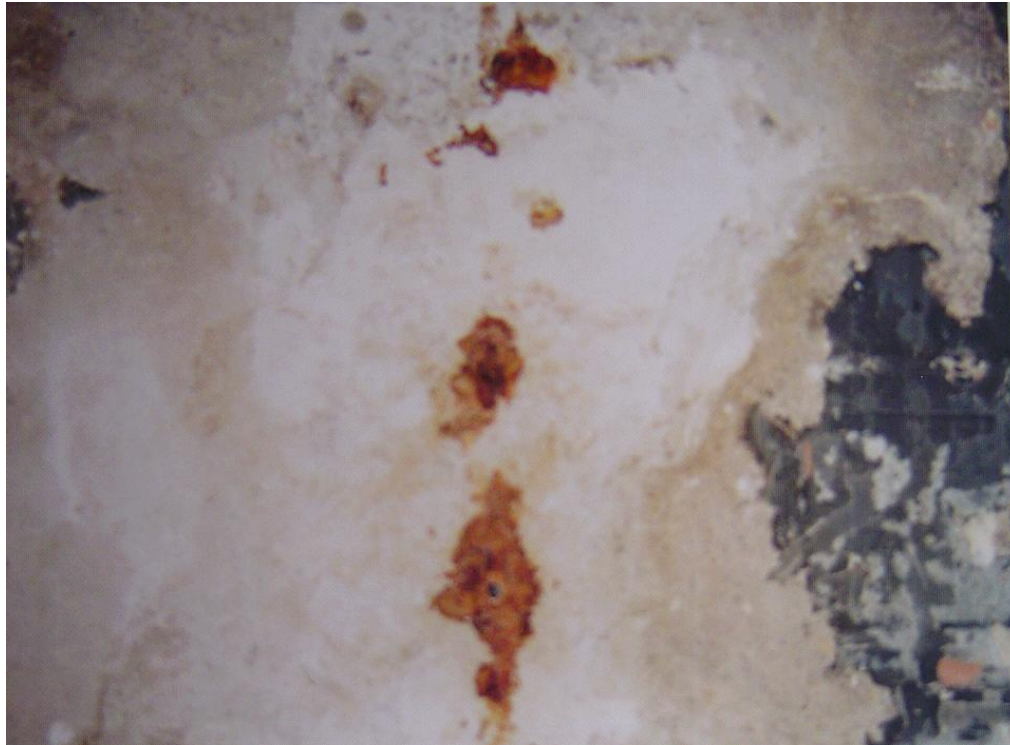


図-1 粒度が細かい砂の粒度分布の事例

(2) 海砂



**写真1. 水道管の腐食
モロッコ**

海砂を使用したとの説明があった。また、筆者らの調査の結果、モルタルとコンクリートの塩化イオン総量の平均値は $0.74\text{kg}/\text{m}^3$ であった。海砂の使用によってコンクリートあるいはモルタルの塩化イオン総量が上限値($0.3\text{kg}/\text{m}^3$)を超え、この壁の中に埋めこまれた鋼製水道パイプの腐食が加速されたと考えられる。

(3)粗骨材としての貝殻



写真2 貝殻骨材
モーリタニア

貝殻を使用したコンクリートでは28日強度 $210\text{kg}/\text{cm}^2$ を得ることは可能であるが、耐久性については十分に解明されていない。

(4)骨材の保管



写真3

骨材の保管状況

モロッコ

仕切りが不十分なために砂の中に砂利がこぼれて混ざっている様子である。またここでは、砂には根に土のついた草、砂利には規格外の大きさの石が混ざっており、これらが除かれないままコンクリートミキサーに投入されていた。

(5)配合



写真4 鉄筋の腐食

塩分浸透が加速された要因として、室温が35度～40度になることがあり、温度約30度の海水が出入りするという環境であったこと、一方でこのような環境に対処するための配合になっていなかったこと、などの点があげられる。

(2) コールドジョイント



写真6

コールドジョイント

モロッコ

コールドジョイントの問題は特に鉄筋コンクリートの壁構造物(水槽、擁壁、地中壁)で発生しやすい傾向がある(写真-6:モロッコ保健センター)。発生範囲が広く、また鉄筋に達して構造的安全性に影響すると考えられるものもあった。

(3)ジャンカと気泡



写真7

ジャンカ

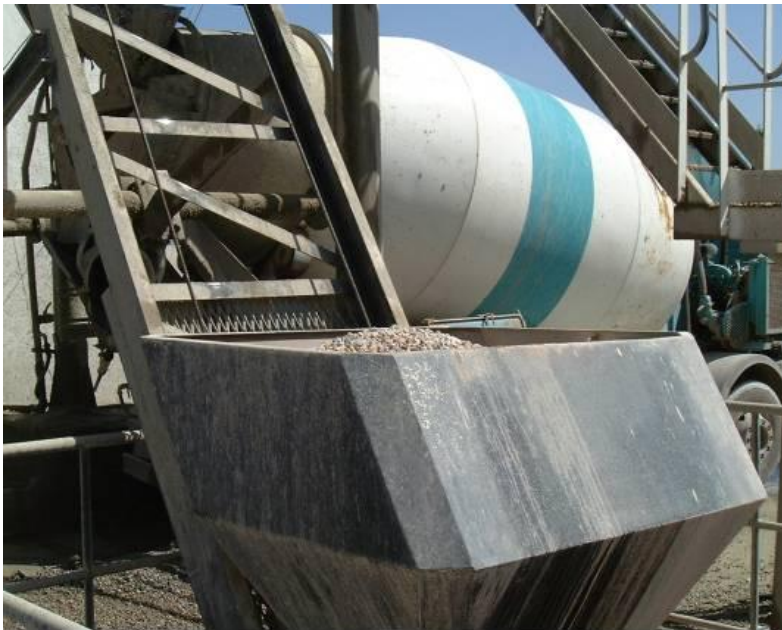
カーボベルテ

ジャンカとコンクリート表面の気泡の問題は多くの現場で見られた。ジャンカの深刻な事例を写真-7(カーボベルテ漁港)に示した。

やや番外 モロッコ編











4. 対策と課題

(1) 対策

- ①現地下請け会社とは最初から一括契約にするのではなく、出来高に応じた部分契約方式とし、その下請け会社のレベルを見極めながら契約を更新する。最初から一括契約にすると下請け業者に良い仕事をしようとするインセンティブが生じにくくなる。
- ②現地の下請け会社の技術を育てるつもりで使う。また、日本のやり方を丁寧に教える根気が必要である。
- ③日本人所長みずから現場をよく見ることが重要であり、決して部下あるいは下請け任せにしない。現場では何が起ってもおかしくない。所長が現場を見ることによってかなりの問題を未然に防ぐことが可能となる。

(2) 課題

- 日本の職人に相当する専門技術者が存在しない場合が多い。一般的には現地地下請会社の技術レベルは日本と比較してかなり低い
- 日本の施工会社の技術者は、コンクリート工学をはじめとする施工技術について、高度である必要ないが、現場で実際に必要とされる基本的知識を有していることが求められている。工程管理と作業手配的なマネジメントに偏ることなく、施工管理全般について実務的知識と経験を身につけた現場監督員を派遣し、現場を重視した施工管理体制

4 . Influence of Temperature on Deterioration Process due to Chloride Attack

- *Takahiro Nishida* *Port and Airport Research Institute*
- Nobuaki Otsuki* *Tokyo Institute of Technology*
- Hiroshi Minagawa* *Tohoku University*

Keywords: deterioration process, activation energy, temperature dependency, life time, diffusion, steel corrosion

Manila



Okinawa

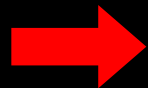


Tokyo



Our Experience

Deterioration speed increases with temperature elevation

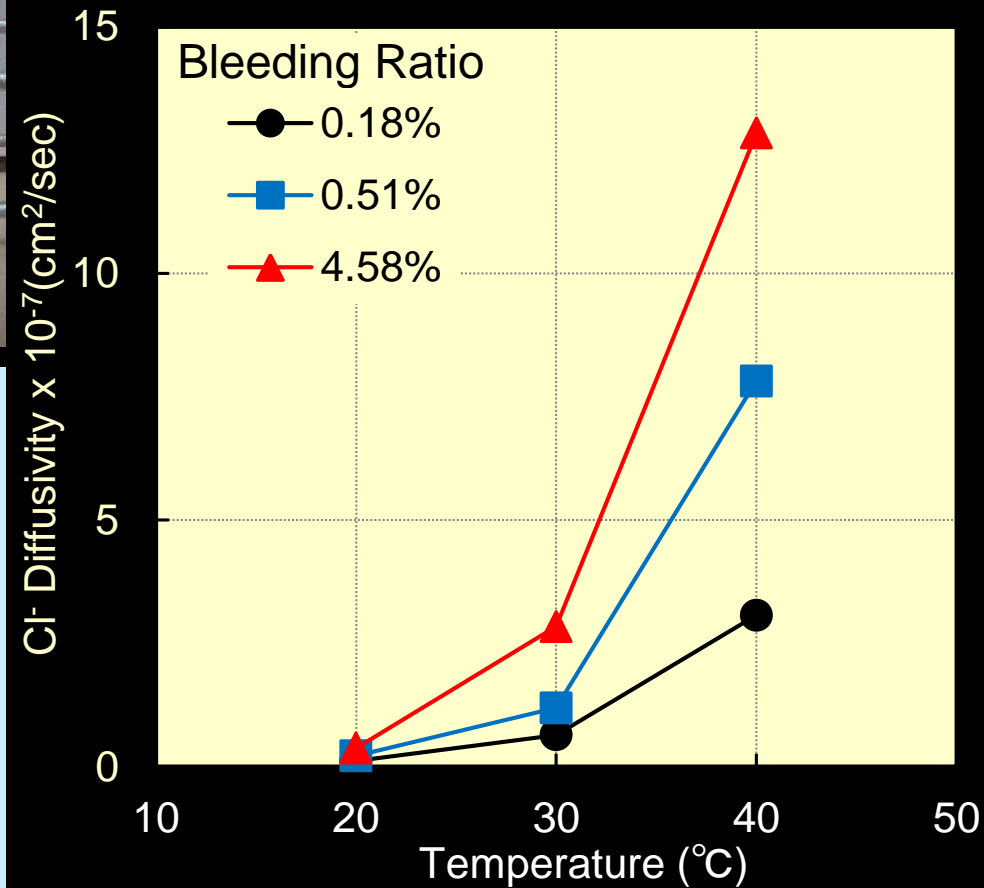
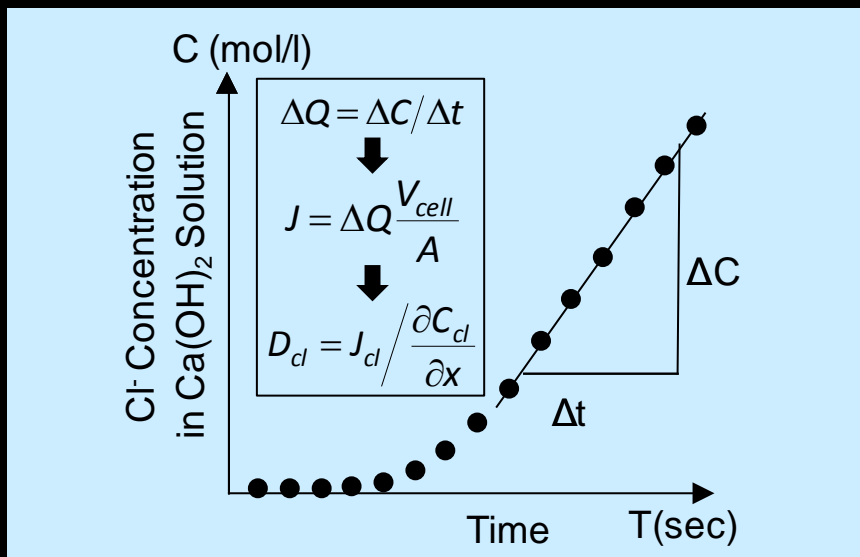
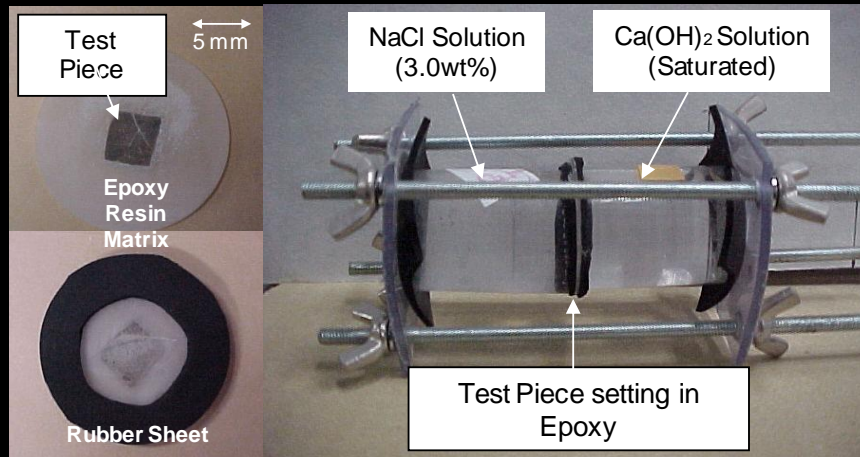


There is little **quantitative information** of temperature dependency of deterioration of RC members due to chloride attack.

- (1) *To investigate the influence of temperature on **Cl⁻ diffusivity** and **corrosion rate of steel bars** in concrete induced by chloride attack.*
- (2) *To study **temperature dependency** of Cl⁻ diffusivity and corrosion rate based on **Arrhenius theory**.*
- (3) *To clarify the influence of **temperature** on **deterioration process** of reinforced concrete due to chloride attack based on the predicted results considering temperature profile in each city.*

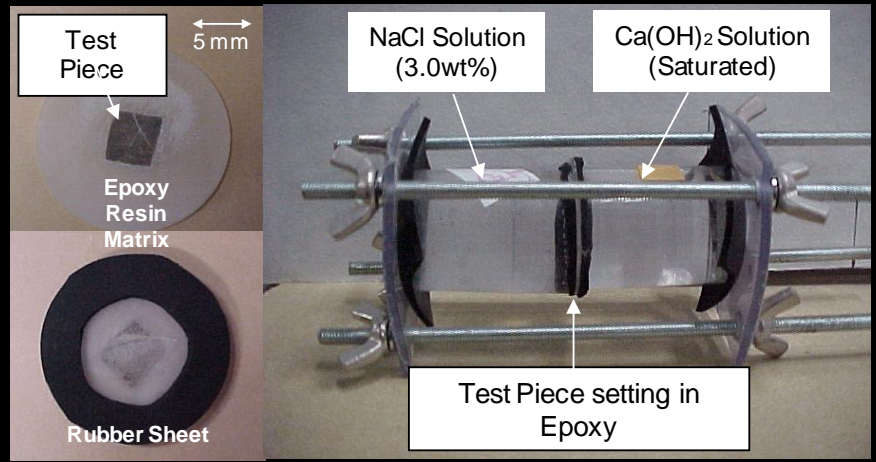


Influence of Temperature on Cl⁻ Diffusivity

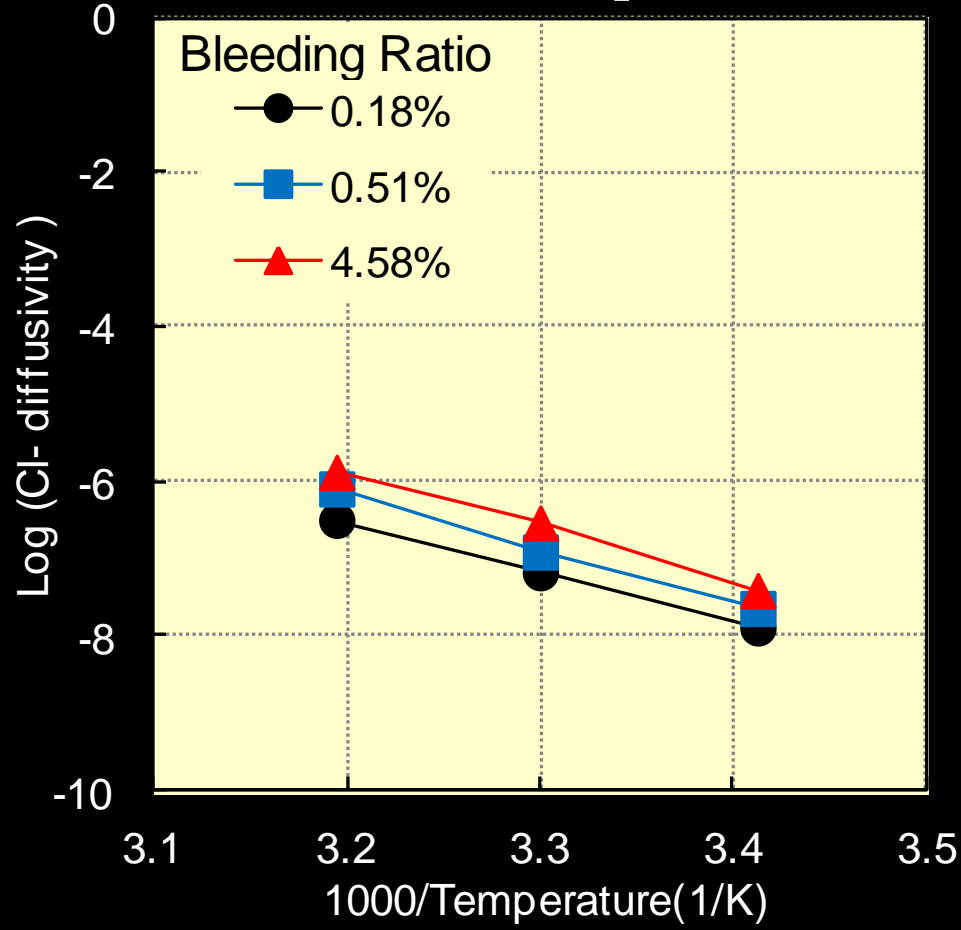
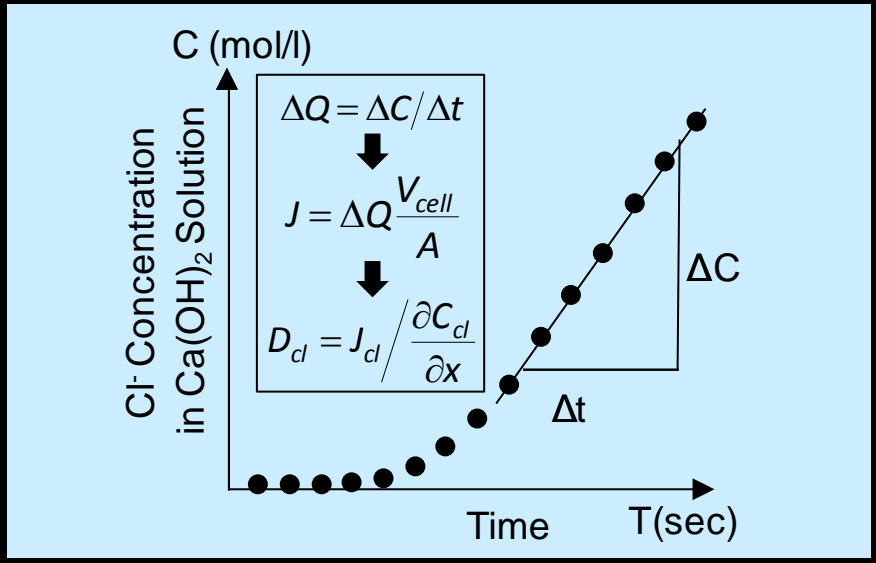


Cl⁻ diffusivity of concrete increases with temperature elevation.

Arrhenius Plot of Cl⁻ Diffusivity



$$\log D_{cl} = A \frac{1}{T} + B$$



Cl⁻ diffusivity of concrete apparently follows Arrhenius theory.

Expressing the influence of temperature on reaction or diffusion

$$k = a \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right)$$

ΔE : activation energy a : frequency factor
 k : rate constant R : gas constant
 T : absolute temperature

Rate of reaction can theoretically express as follows.

$$V = k \cdot C$$

C : concentration of reactant

From Arrhenius Equation

$$\log V = -\log_{10} e \frac{\Delta E}{R} \frac{1}{T} + \log(\alpha \cdot C)$$

From Experiment

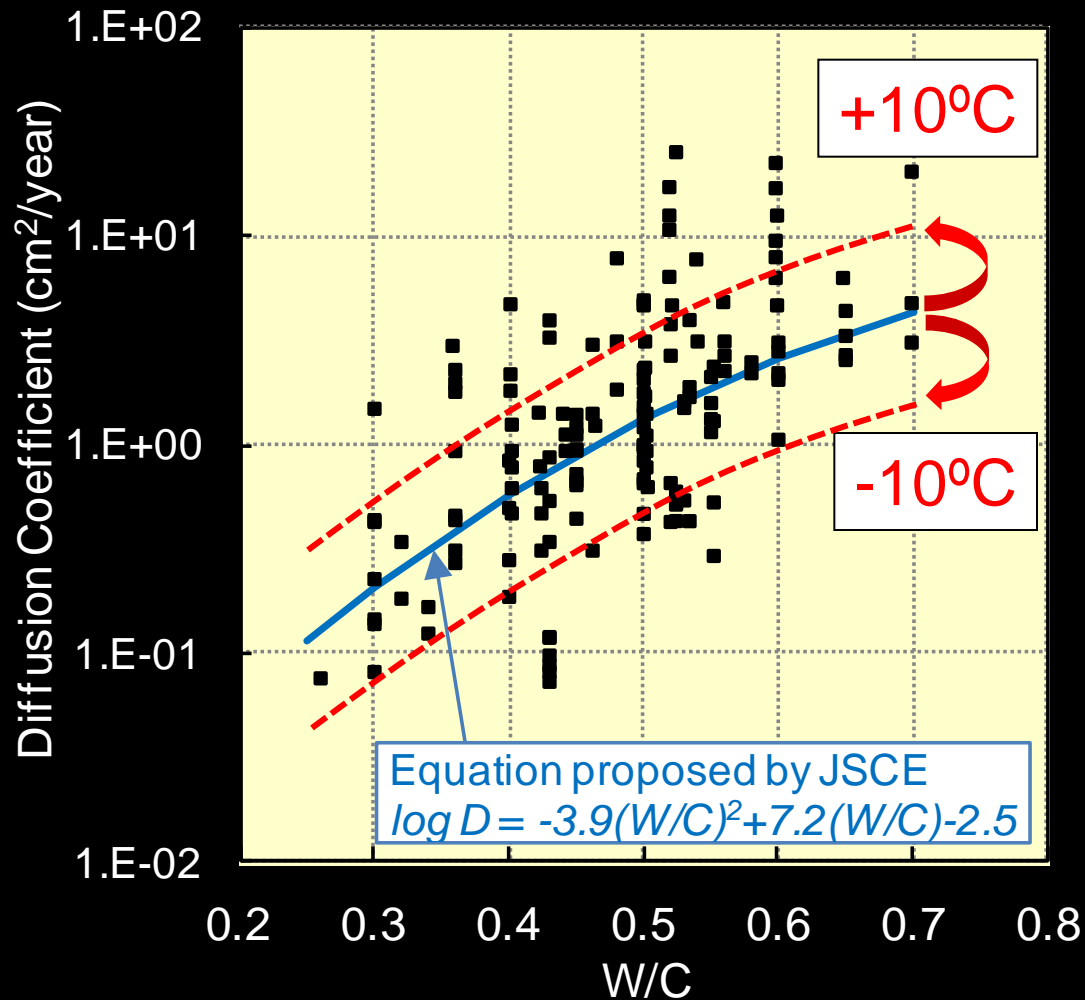
$$\log V = A \frac{1}{T} + B$$

$$\Delta E_a = -\frac{R}{\log_{10} e} \cdot A$$

ΔE_a : Apparent Activation Energy

A : Slope of Arrhenius Plot

Activation Energy of Cl⁻ Diffusivity



It is important to consider temperature of exposed environment

Corrosion Formation of Steel Bar in Concrete

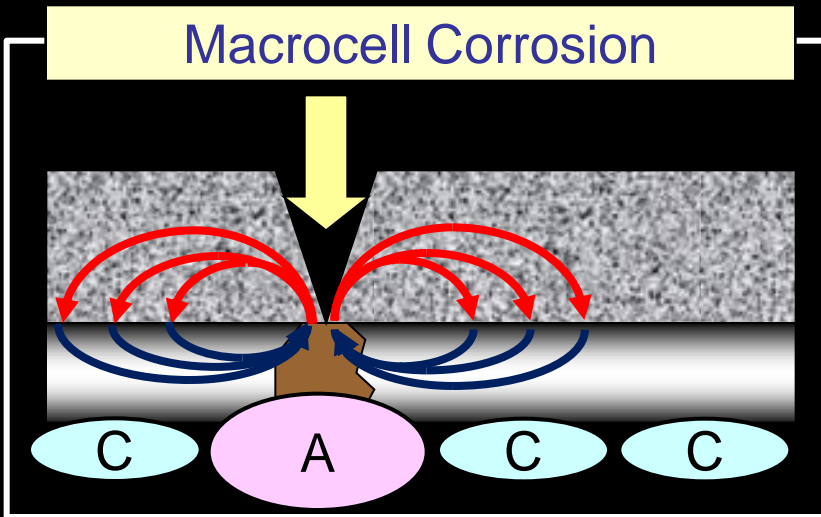
Anode Reaction : $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$

A : Anode

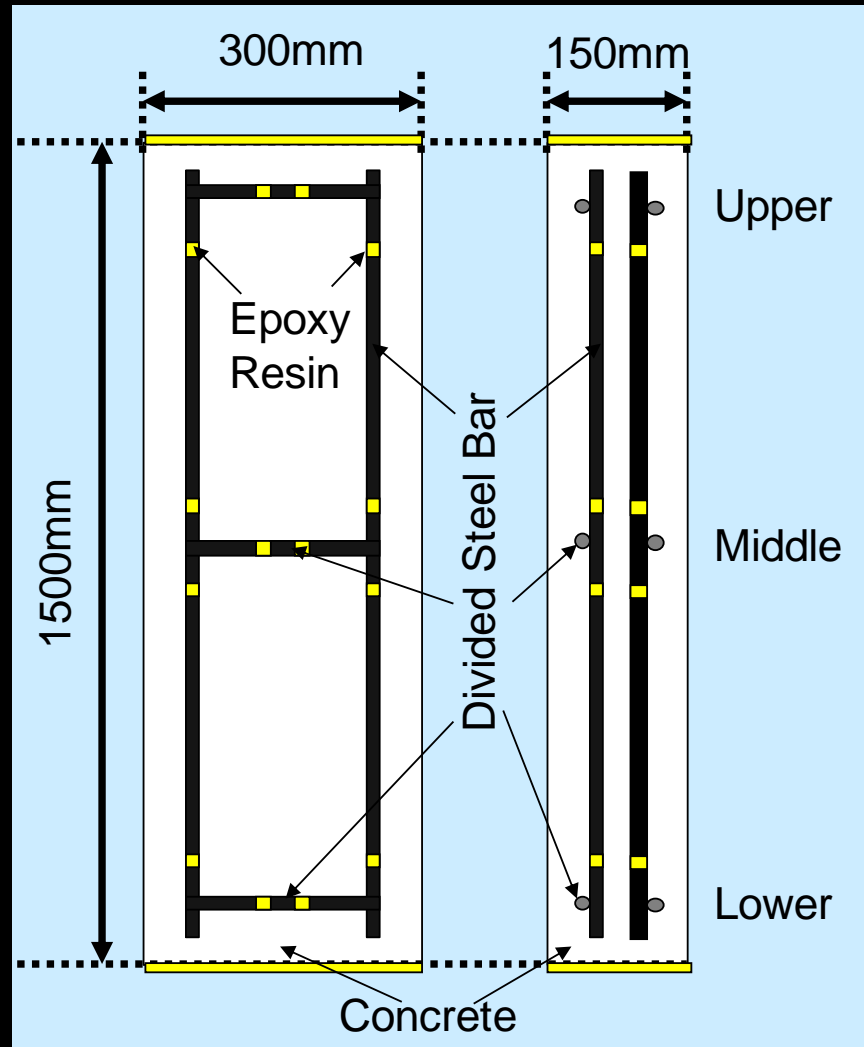
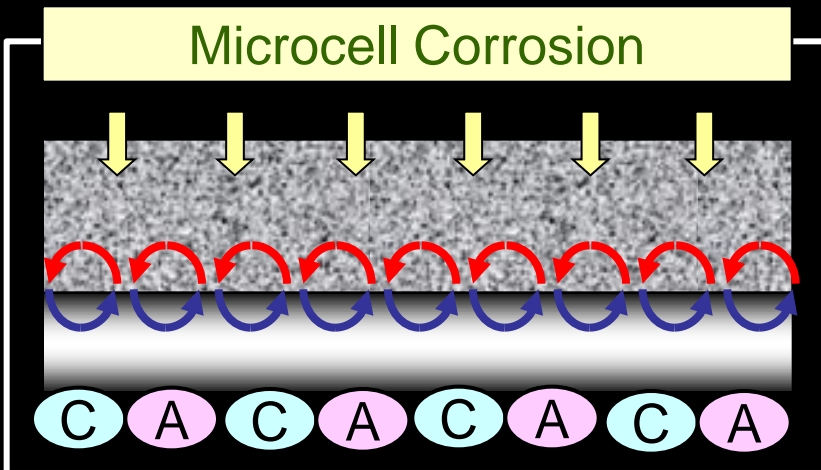
Cathode Reaction : $2H_2O + O_2 + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$

C : Cathode

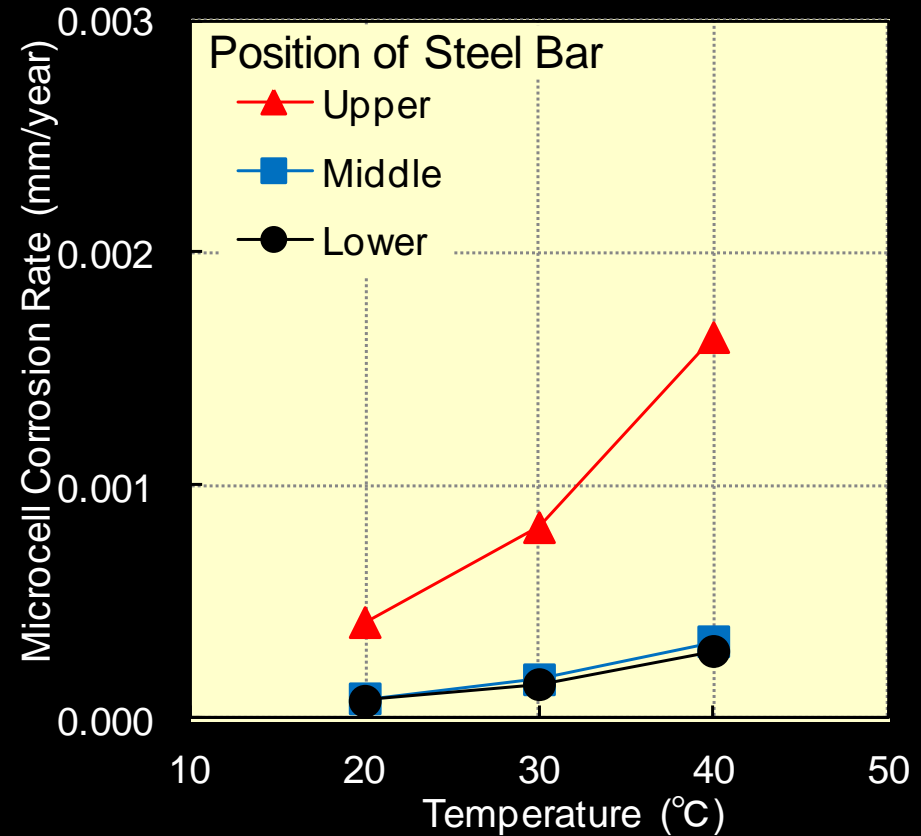
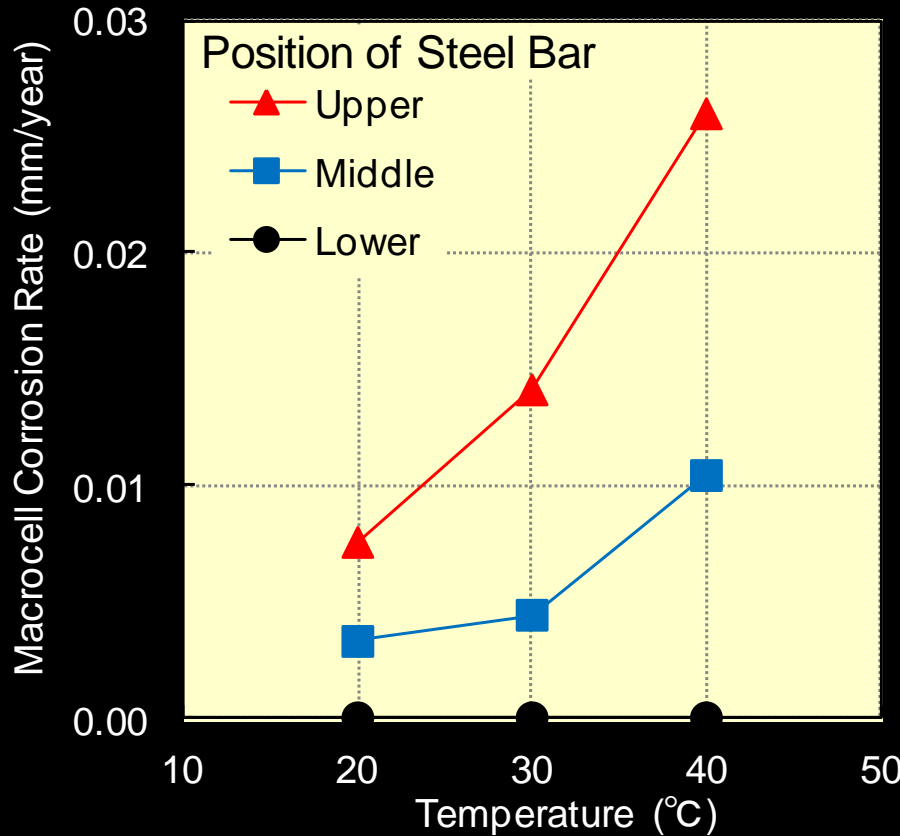
Macrocell Corrosion



Microcell Corrosion



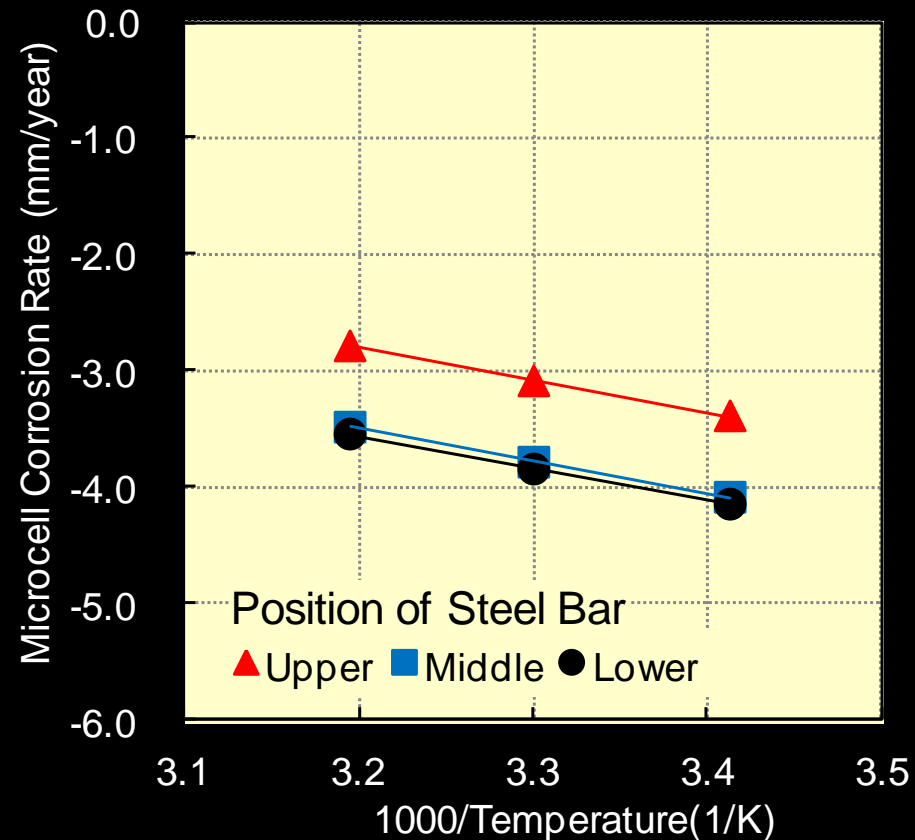
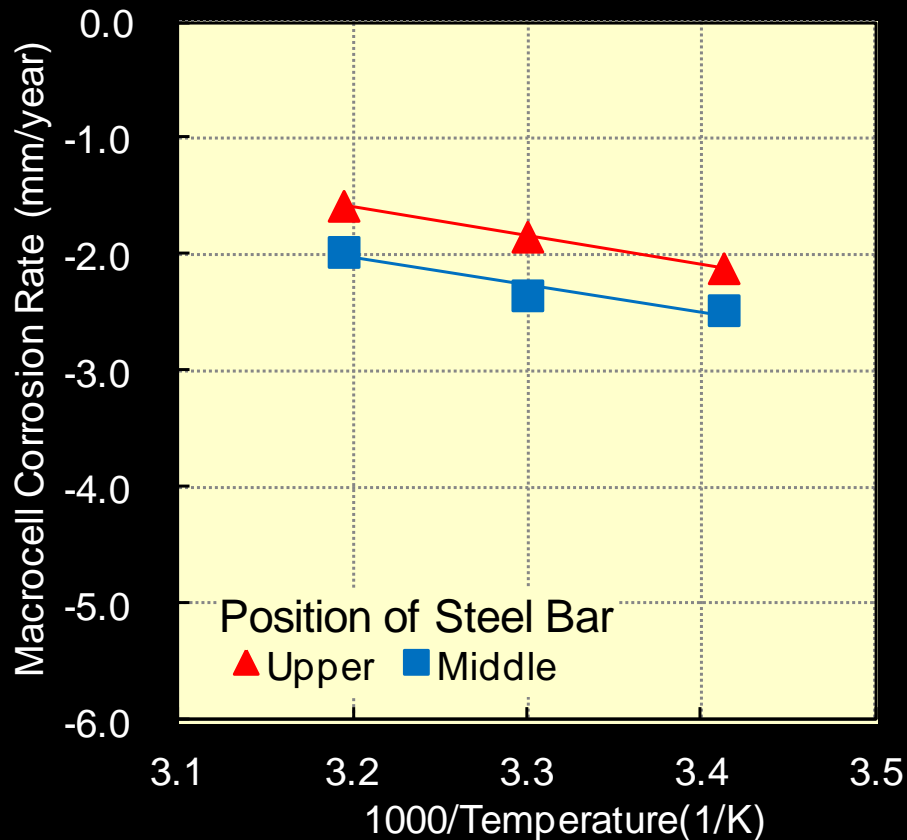
Influence of Temperature on Corrosion Rate



Corrosion rate of steel bars in concrete increases with temperature elevation.

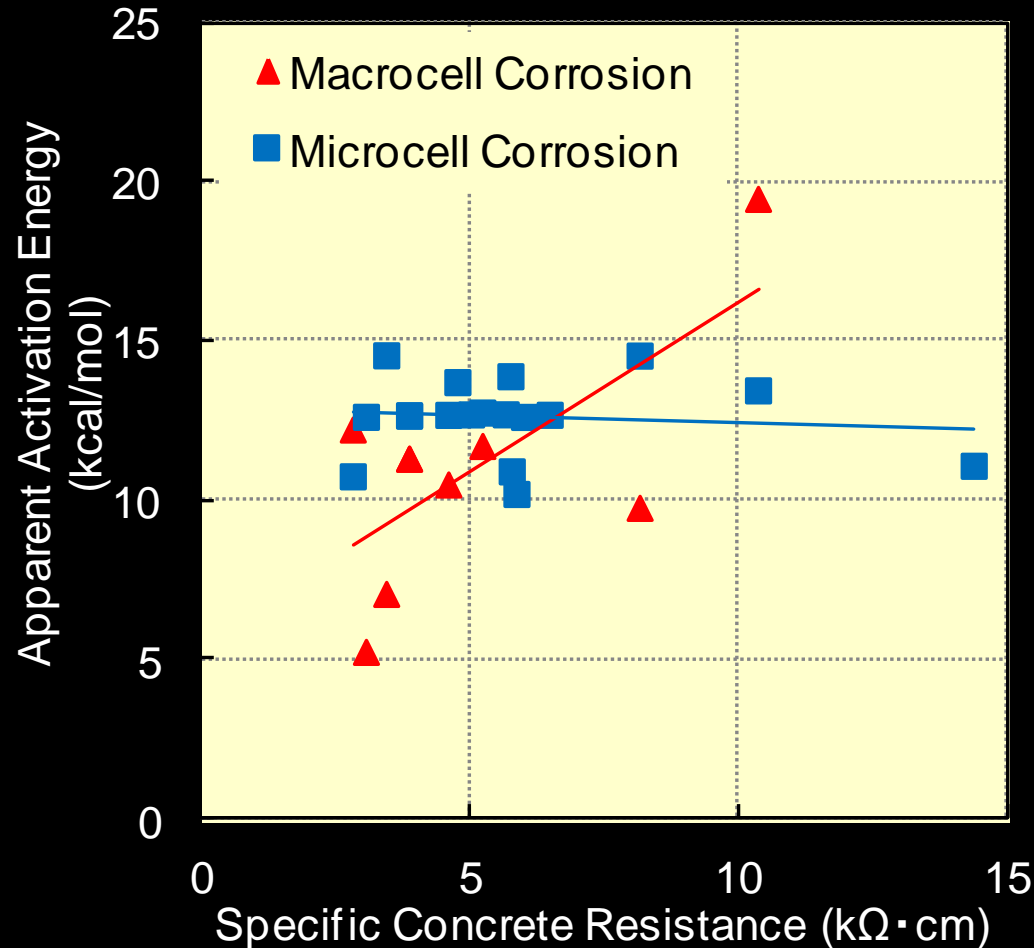
Arrhenius Plot of Steel Corrosion

$$\log V_{corr} = A \frac{1}{T} + B$$



Corrosion rate apparently follows Arrhenius theory.

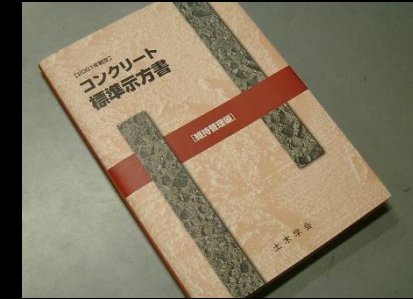
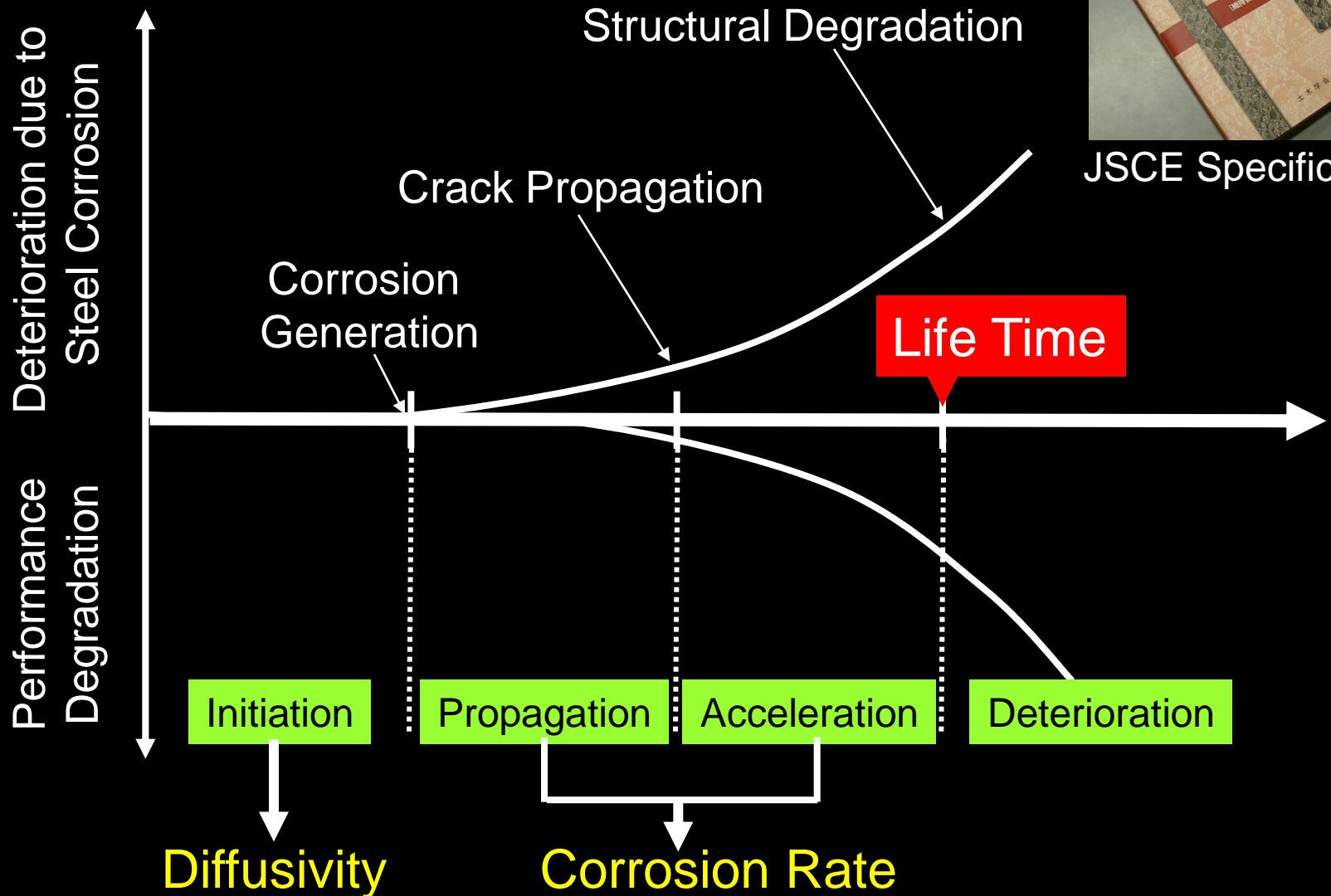
Activation Energy of Steel Corrosion



Activation energy of macrocell corrosion tends to change with specific concrete resistance.

Activation energy of microcell corrosion is almost constant regardless of specific concrete resistance.

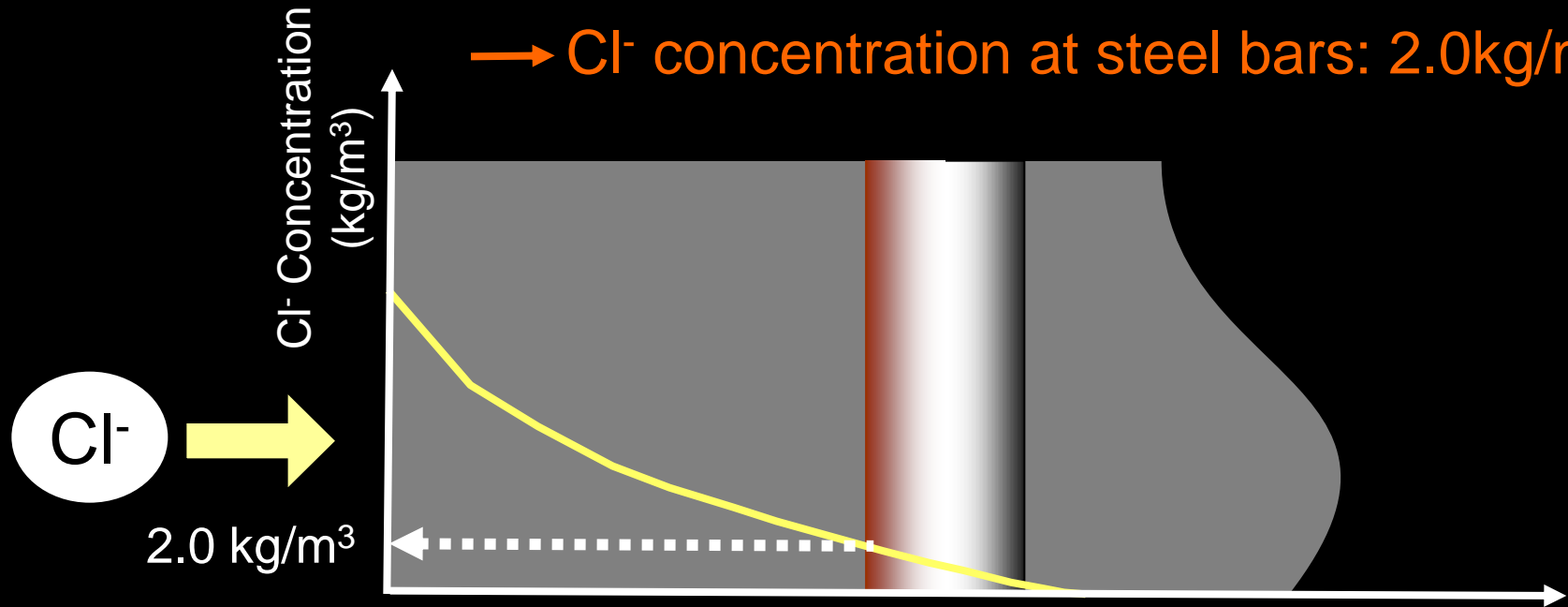
Deterioration Process due to Steel Corrosion



JSCE Specification

- Initiation Period** : The period before the steel bars in concrete starts to corrode

→ Cl⁻ concentration at steel bars: 2.0 kg/m³



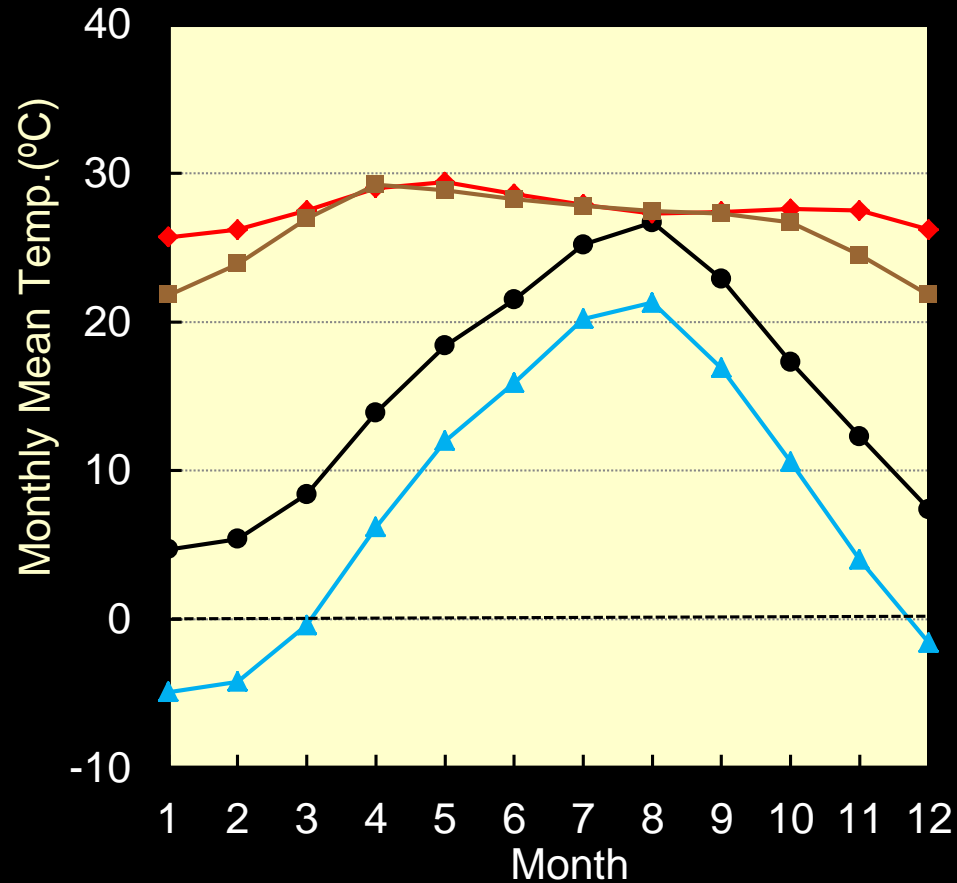
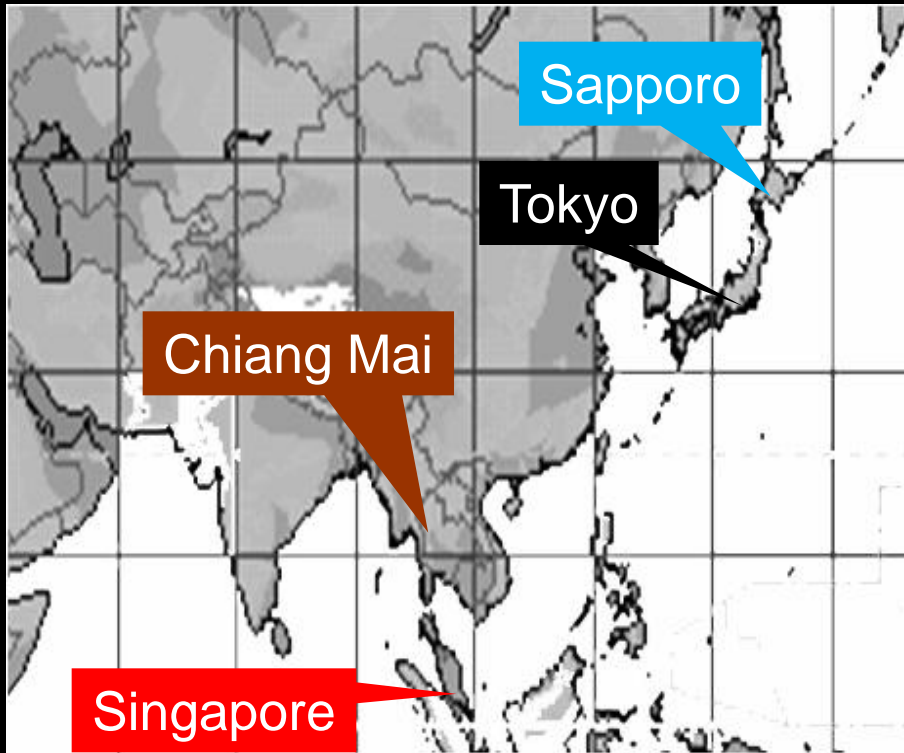
$$J_{Cl} = - \left[k \cdot T_1 \cdot B_{Cl} \cdot \left(1 - \ln 10 \times C_{Cl} \cdot \frac{0.51 \cdot Z_{Cl}^4}{4\sqrt{l} \cdot (1 + \sqrt{l})^2} \right) - Z_{Cl} \cdot B_{Cl} \cdot C_{Cl} \cdot \frac{k \cdot T_1 \cdot \sum_n \left[Z_n \cdot \left(1 - \ln 10 \times C_n \cdot \frac{0.51 \cdot Z_n^4}{4\sqrt{l} \cdot (1 + \sqrt{l})^2} \right) \cdot B_n \cdot \frac{\partial C_n}{\partial x} / \frac{\partial C_{Cl}}{\partial x} \right]}{\sum_n \left(Z_n^2 \cdot B_n \cdot C_n \right)} \right] \times \exp \left(\frac{\Delta E}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right) \cdot \frac{\partial C_{Cl}}{\partial x}$$

- **Propagation Period** : The period before cracking
 - **Corrosion Quantity : 10mg/cm²**
(JSCE, 2001)
- **Acceleration Period** : The period the corrosion rate of steel bar rises up
 - **Corrosion Quantity : 510mg/cm²**
= 70% of bending load capacity
(Miyagawa, 1998)

	Corrosion rate at 20°C (mm/year)	
	Macrocell	Microcell
Propagation Period	0.0056	0.0003
Acceleration Period	0.02*	0.06*

*(Miyazato, 2001)

Example of Temperature Profile



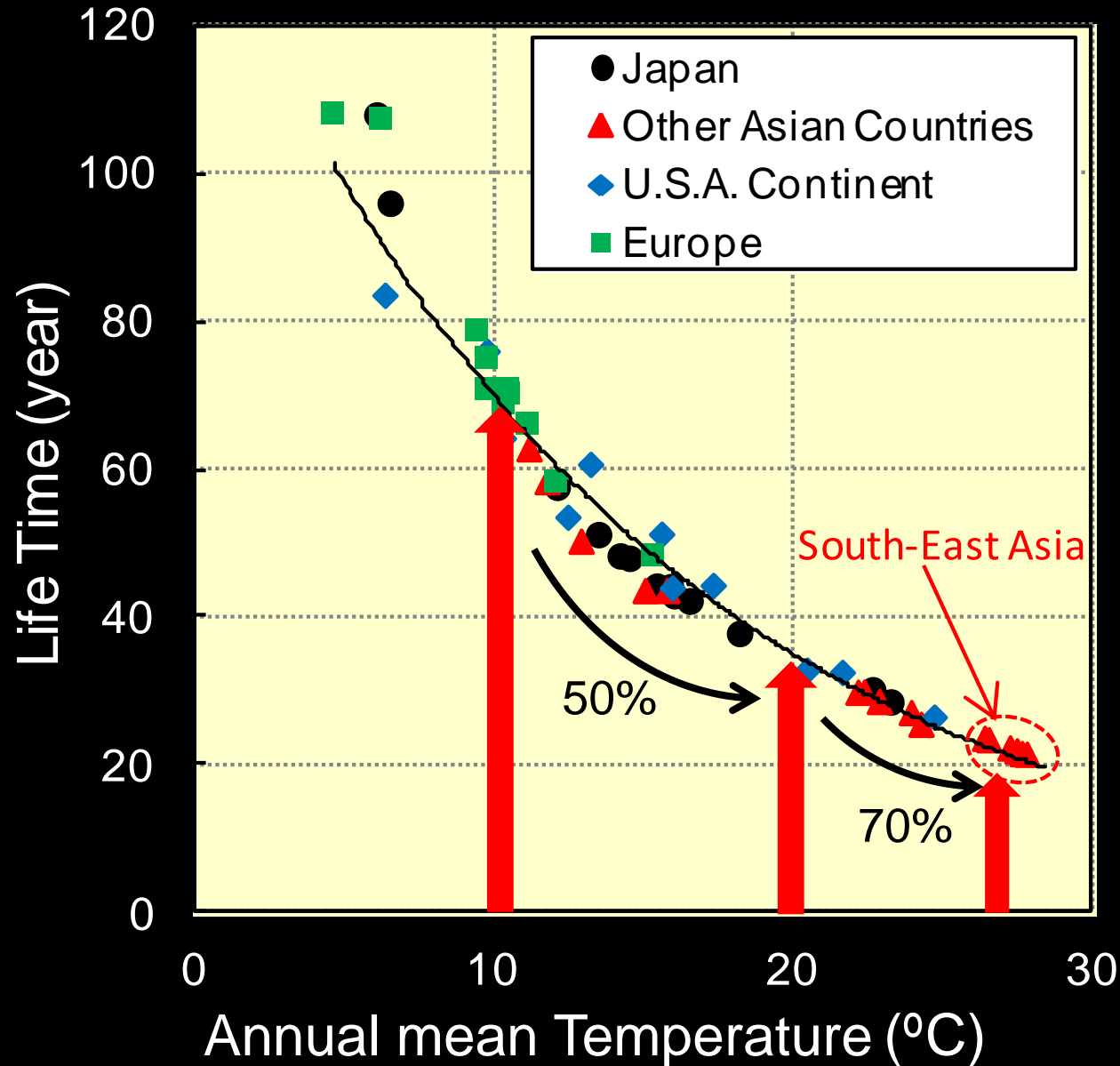
Life time of RC members were predicted using 55 cities of temperature profile.

Lifetime Considering Temperature Profile

Results of 55 cities

-Conditions-

W/C	0.55
Water Content (kg/m ³)	175
Concrete Cover (cm)	7.0
Environmental Condition	Sever Condition such as Tidal Zone



- ✓ Cl⁻ diffusivity and corrosion rate in concrete increased with the temperature elevation.
- ✓ In addition, these phenomenon can be explained by Arrhenius theory from the viewpoint of practice.
- ✓ According to estimated results of the Life time exposed to several cities in severe marine environment, the life time of the structures in south east Asian cities are estimated relatively short.



5. 提言：調査・研究の必要性

- 途上国の構造物の耐久性については知見がはなはだ少ない。キチンと調べて、sustainableな社会資本としなければ、欧米や日本のような「荒廃する・・・」となる。
- 現地材料（砂利（貝殻？）、（砂漠）砂、海水？）の積極的利用も考えるべき（そうしないといろんな材料を輸入することとなる）
- 各々の国にあった社会資本の充実（経済的でsustainableで就職の受け皿？）

研究のスタンス(国際開発工学専攻 の1研究室として)

- いろんな国(途上国も日本も)での構造物や建設材料に対する問題点を調査する。それでいろいろな報告をまとめる。
- これだけでは、工学論文とならないので、最新理論を用いて、解釈(例えば、劣化進行や予測)を行い論文とする。
- あるいは、地域にある面白い材料(海水含む)をなんとか用いる工夫をし、工夫や評価手法に新規性をつけ論文とする。