

# การคาดคะเนการกัดกร่อนของเหล็กในแนวอากาศ

## PREDICTION OF CORROSION OF STEEL EXPOSED TO ATMOSPHERES

ดร. สมเกียรติ รุ่งทองในสุรี

ภาควิชาช่างโยธา

สถาบัตtement โภชนาจักรราชนครินทร์

DR. SOMKIAT RUNGTHONGBAISUREE

Department of civil Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Thonburi

### บทคัดย่อ

เป้าหมายของการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เพื่อสร้างสมการที่ใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศจะแบ่งสมการออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรก เป็นสมการที่ใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนของเหล็กในระยะเวลาสั้น ซึ่งสมการกลุ่มนี้ได้สร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลของผลการทดลองผิงเหล็กในบรรยากาศ พ.ต่ำแห่งที่สนใจที่เวลาต่าง ๆ ทัน กลุ่มที่สอง เป็นสมการที่ใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนของเหล็กที่เวลาใด ๆ โดยสมการจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันของสภาพภูมิอากาศ ซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลผลการทดลองผิงเหล็กในบรรยากาศและข้อมูลของสภาพภูมิอากาศ พ.ต่ำแห่งต่าง ๆ ที่เวลาเดียวกัน

### SUMMARY

The objective of this research is to determine the equations for prediction of corrosion of bare steel exposed to atmospheres. These equations are divided into two groups. Equations in the first group predict long-term corrosion of steel, and are determined based on the results of steel exposure test at the interested area for different exposure times. Equations in the second group, which are the function of environmental factors, predict corrosion of steel at the certain exposure times, and are determined based on the results of steel exposure test and data of environmental factors from different areas for certain exposure times.

## บทนำ

เหล็กเป็นวัสดุคงสร้างที่สำคัญชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับกัณฑ์ร็อก ปัจจุบันได้มีการนำเอาเหล็กมาใช้ในการก่อสร้าง เพื่อ减น้ำหนักตัวสถาปัตย แต่เมื่อจากเหล็กเป็นโลหะที่ไม่เสถียรภาพในธรรมชาติ เมื่อนำเหล็กมาใช้งาน เหล็กมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนกลับไปอยู่ในรูปของอีกไซด์ ซึ่งเสถียรภาพในธรรมชาติ ซึ่งพฤติกรรมนี้เรียกว่า เหล็กเกิดสนิมหรือเกิดการกัดกร่อน การกัดกร่อนทำให้เนื้อโลหะเหล็กที่เป็นส่วนของโครงสร้างลดน้อยลง ซึ่งส่วนผลกระบวนการโดยตรงต่อกำลังของโครงสร้าง การนำเอาเหล็กมาใช้เป็นวัสดุคงสร้าง เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพงานสูงสุด จะเป็นต้องทราบถึงพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็ก เพื่อที่จะให้สามารถก้าวหน้ามาตรการที่จะใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กให้เหมาะสมสมกับงานได้

### ปัจจัยที่มีผลผลกระทบต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยายกาศ

เมื่อนำเหล็กไว้ในบรรยายกาศ เหล็กจะเกิดการกัดกร่อนขึ้น อัตราการกัดกร่อนของเหล็กขึ้นโดยตรงต่อสภาพภูมิอากาศ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณฝน ปริมาณก๊าซชัลเฟอร์ไนโตรไซด์ในอากาศ ปริมาณเกลือในอากาศ กิ่งก้านของลม ความเร็วลมและปริมาณแสงแดด เป็นต้น [1-9] แต่ปัจจัยที่มีผลผลกระทบอย่างมากต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยายกาศ มี 5 ชนิด คือ อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณฝน ปริมาณก๊าซชัลเฟอร์ไนโตรไซด์และปริมาณเกลือในอากาศ

#### อุณหภูมิ (Temperature)

เมื่อจากการกัดกร่อนของเหล็กนั้นเป็นปฏิกิริยาทางเคมี และโดยปกติแล้วอุณหภูมิมีผลผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลผลกระทบต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็ก เหล็กจะมีอัตราการกัดกร่อนสูงที่อุณหภูมิสูง และมีอัตราการกัดกร่อนต่ำที่อุณหภูมิต่ำ

#### ความชื้นสัมผัติ (Humidity)

อัตราการกัดกร่อนของเหล็กจะสูงในที่ที่มีความชื้นสูงและต่ำในที่ที่มีความชื้นต่ำ แต่เมื่อย่างไรก็ตาม ได้มีผู้ค้นพบว่า ถ้าความชื้นในอากาศต่ำกว่าค่า ๆ หนึ่งแล้วความชื้นจะไม่มีผลผลกระทบต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็ก ซึ่งความชื้นที่ค่านี้ เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical humidity) อัตราการกัดกร่อนของเหล็กจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อความชื้นในอากาศสูงกว่าความชื้นวิกฤต โดยปกติแล้วความชื้นวิกฤตของเหล็ก จะมีค่าอยู่ระหว่าง 50-80% [1, 2, 4] ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของอากาศ ได้มีผู้พบว่า ถ้าทำให้อากาศอบริสุทธิ์ปราศจากสิ่งเจือปนต่าง ๆ เช่น ก๊าซชัลเฟอร์ไนโตรไซด์ เกลือคลอไรด์ และฝุ่นแล้ว ความชื้นวิกฤตอาจมีค่าสูงถึง 99% [5] ทุกที่ แม้จะความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและการกัดกร่อนของเหล็ก แสดงให้เห็นความชื้นวิกฤต [10]

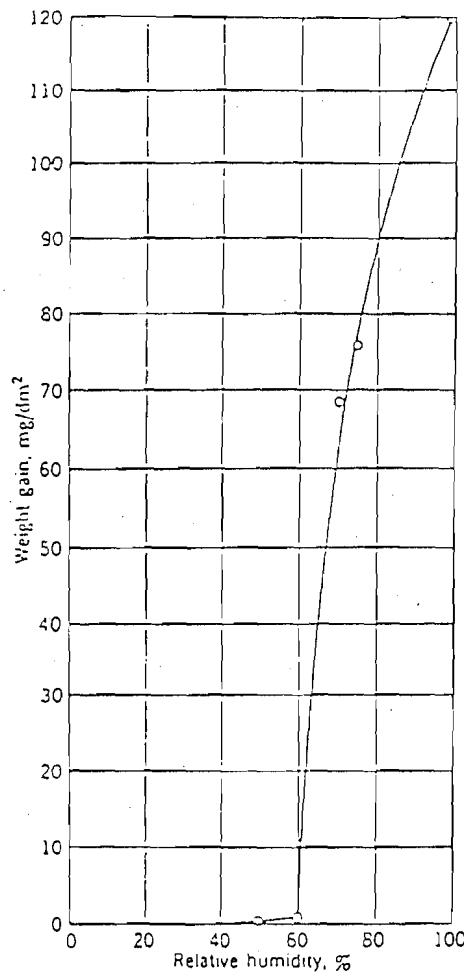


Fig. 1 Corrosion of iron in air containing 0.01%  $\text{SO}_2$  55 days' exposure, showing critical humidity [10]

### ปริมาณฝน (Precipitation)

อัตราผลของฝน ก็คือ จะทำให้ผิวของเหล็กเปียก ถ้าฝนตกมาก เวลาที่ผิวเหล็กเปียกฝนก็จะมาก ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนของเหล็กสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ ผลกระทบทางอ้อมของปริมาณฝน ก็คือ จะทำให้ปริมาณความชื้นในอากาศมีค่าสูงขึ้น ซึ่งความชื้นมีผลผลกระทบอย่างมากต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กในอากาศ

### ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur-dioxide concentration)

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีผลผลกระทบอย่างมากต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตอุตสาหกรรมและในเขตเมืองใหญ่ ๆ ที่มีการจราจรหนาแน่น ซึ่งเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงป่าเบกน้ำมันและก๊าณหิน อัตราการกัดกร่อนของเหล็กจะสูงในพื้นที่ที่มีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูง รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และอัตราการกัดกร่อนของเหล็ก

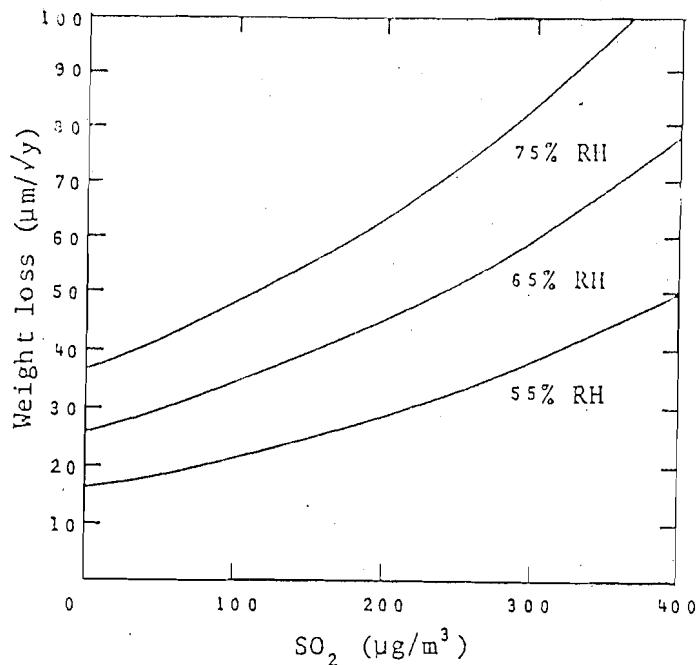


Fig. 2 Effect of sulfur dioxide concentration and humidity to the rate of corrosion of steel materials [11]

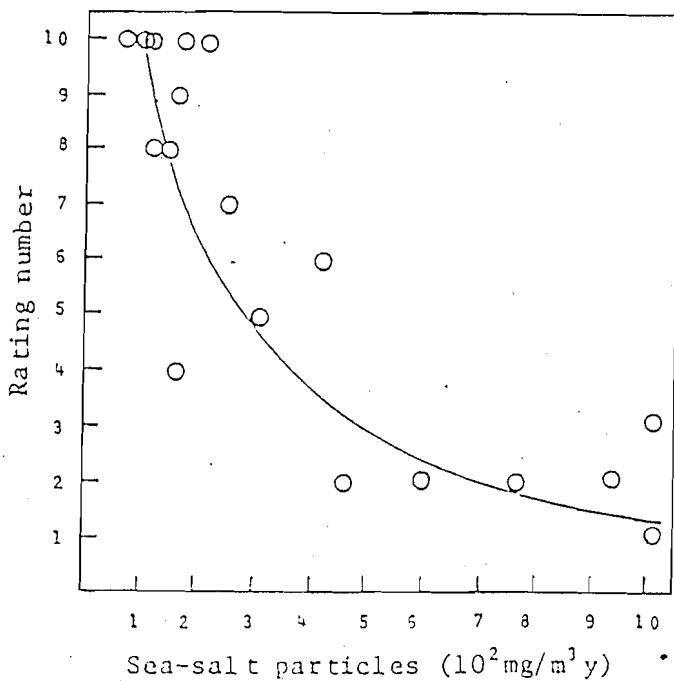


Fig. 3 Relation between adhered sea-salt fine particle weight and corrosion occurrence [12]

## ปริมาณเกลือในอากาศ (Sea-salt particles)

ปัจจัยที่มีผลกระหน่ำอย่างมากต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศ คือ ปริมาณเกลือในบรรยากาศ เกลือที่สำคัญ คือ เกลือคลอไรด์ ซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากการทะเล พนักพิงภูเขาและแม่น้ำ ซึ่งมีอัตราการกัดกร่อนของเหล็กสูงถึงห้าเท่า ได้รับ รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกลือในอากาศและการกัดกร่อนของเหล็กในรูปของ Rating number Rating number 10 หมายถึง ไม่เกิดการกัดกร่อน Rating number 1 หมายถึง เกิดการกัดกร่อนสูงสุด

### การคาดคะเนการกัดกร่อนของเหล็กระยะยาว

สมการที่ใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนของเหล็กระยะยาว ที่นิยมใช้กันในประเทศญี่ปุ่น ชื่อแนะนำโดย Horikawa et al. [13] เป็นไปตามสมการข้างล่างนี้

$$y = At^B \exp(C/t) \quad (1)$$

เมื่อ  $y$  คือ corrosion depth ที่เวลา  $t$

$t$  คือ เวลา

$A$ ,  $B$  และ  $C$  คือ ค่าคงที่

สมการนี้ใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนของเหล็กระยะยาวได้เป็นอย่างดี เมื่อเวลาไม่มากกว่าศูนย์ห้อสมควร เมื่อเวลาไม่ค่าเจ้าใกล้ศูนย์ สมการนี้จะให้ค่าตอบที่ไม่ถูกต้อง ดังนั้นในที่นี้ จึงได้เสนอสมการใหม่ตามสมการที่ 2 ซึ่งสามารถใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนของเหล็กได้เป็นอย่างดีทุก ๆ ค่าของเวลา

$$y = kt^{-\alpha} \quad (2)$$

เมื่อ  $y$  คือ corrosion depth ที่เวลา  $t$

$t$  คือ เวลา

$k$  และ  $\alpha$  คือ ค่าคงที่

สมการที่ 1 และสมการที่ 2 สามารถใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนของเหล็กระยะยาวได้ ถ้าทราบค่าคงที่ในสมการทั้งสอง ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพภูมิอากาศและการใช้งานของเหล็กค่าคงที่สามารถได้จากข้อมูลของการตั้งแต่งทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศ ณ. สถานที่ที่ต้องการ โดยทำการเก็บข้อมูลการกัดกร่อน ที่เวลาต่าง ๆ กัน เช่น 1, 2, 3, 4 และ 5 ปี นำข้อมูลการกัดกร่อนที่เวลาต่าง ๆ กัน แทนลงในสมการข้างต้น โดยวิธี least square ค่าคงที่ต่าง ๆ ในสมการสามารถคำนวณได้

ตารางที่ 1 และตารางที่ 2 แสดงผลการคำนวณค่าคงที่ในสมการที่ใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนของเหล็กระยะยาว จากข้อมูลของ การตั้งแต่งทดสอบการกัดกร่อนของเหล็ก ที่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งทำการทดลองโดย Hanshin Expressway Public Corporation [14] ตามสถานที่ต่าง ๆ 15 แห่ง ในประเทศญี่ปุ่น ตารางที่ 3 และตารางที่ 4 แสดงผลการคำนวณค่าคงที่ ทำการที่ใช้ในการคาดคะเนการ

Table 1 Estimated parameters in the equation for predicting long-term corrosion for members exposed to rain ( $Y = k t^m$ )

Location	k	m
Otaru	0.039	0.424
Sendai	0.042	0.363
Niigata	0.055	0.415
Nagano	0.026	0.363
Nagoya	0.068	0.314
Shimizu	0.046	0.836
Tokyo	0.059	0.324
Kawasaki	0.144	0.613
Matsue	0.035	0.542
Amagasaki	0.088	0.592
Wakayama	0.062	0.318
Shionomisaki	0.055	0.663
Miyasaki	0.037	0.500
Matsuyama	0.047	0.311
Ashizurimisaki	0.086	1.056

Table 2 Estimated parameters in the equation for predicting long-term corrosion for members exposed to rain ( $Y = A t^B \exp(C/t)$ )

Location	A	B	C
Otaru	0.050	0.293	-0.263
Sendai	0.036	0.455	0.184
Niigata	0.046	0.509	0.189
Nagano	0.031	0.270	-0.188
Nagoya	0.101	0.099	-0.432
Shimizu	0.063	0.659	-0.354
Tokyo	0.047	0.447	0.246
Kawasaki	0.079	0.931	0.640
Matsue	0.041	0.429	-0.227
Amagasaki	0.124	0.407	-0.370
Wakayama	0.086	0.138	-0.361
Shionomisaki	0.099	0.349	-0.631
Miyasaki	0.138	0.197	-1.398
Matsuyama	0.111	0.148	-0.920
Ashizurimisaki	0.027	1.665	1.223

Table 3 Estimated parameters in the equation for predicting long-term corrosion for members underneath bridges ( $Y = k t^m$ )

Environment	No	Bridge Name	Location	k	m
Rural (3)	9	Shinjoe	Omiya	0.018	0.636
	32	Hirokawa	Ozu	0.017	0.592
	41	Minamiodan 4-2	Dobokukengyjo	0.012	0.638
Mountainous (11)	3	Takihue	Chitose	0.016	0.695
	6	Daido	Higashine	0.010	0.594
	8	Ominezawa	Shinji, Tone	0.008	0.528
	15	Joro	Tsugawa	0.012	0.462
	16	Hamaguri	Furukawa	0.006	1.164
	21	Yamagami	Otsu	0.015	0.613
	26	Miyoshi	Miyoshi	0.014	0.493
	29	Keido	Kagawa-Tokushima	0.010	0.442
	34	Nishinotani	Kashiwabara, Kuju	0.010	0.649
	39	Ishihira	Okinawa	0.025	0.733
	40	Kenjo	Naha	0.021	0.631
	4	Hahakoi	Muroran	0.023	0.674
Industrial (7)	10	Ebigawa	Funabashi	0.033	0.466
	14	Senpogawa	Takaoka	0.018	0.842
	19	Yokkaichi	Yokkaichi	0.018	0.770
	23	Nishiyodogawa	Osaka	0.015	0.773
	28	Shinkasumi	Kurashiki	0.012	0.661
	36	Chuo	Kitakyushu	0.011	0.786
	1	Ishikari	Ishikari	0.041	0.805
Marine (11)	5	Takagi	Matsushima	0.017	0.891
	13	Yoneyama	Kashiwazaki	0.067	1.197
	17	Shinryoku	Ohama	0.087	1.085
	20	Arita	Arita By-pass	0.015	1.028
	24	Hamamura	Hoki, Kedaka	0.124	1.195
	25	Gonokawa	Gotsu	0.019	0.724
	31	Yasudagawa	Yasuda	0.077	1.203
	33	Kizaki	Miyazaki	0.041	0.825
	37	Shioya	Shioya-wan	0.365	0.614
	38	Setoke	Nago	0.058	0.966
	2	Toyohira	Sapporo	0.008	0.799
City (9)	7	Natori	Sendai	0.017	0.826
	11	Owariya	Yokohama	0.015	0.475
	12	Shinkumihakamasen	Nagaoka	0.041	0.624
	18	Kozoku	Nagoya	0.015	0.735
	22	Gojo	Kyoto	0.012	0.512
	27	Izumida	Okayama	0.014	0.637
	30	Onogawa	Matsuyama	0.015	0.594
	35	Jurogawa	Fukuoka	0.035	0.420

Table 4 Estimated parameters in the equation for predicting long-term corrosion for members underneath bridges ( $\gamma = A t^B \exp(C/t)$ )

Environment	No	Bridge Name	Location	A	B	C
Rural (3)	9	Shinjoe	Omiya	0.019	0.593	-0.071
	32	Hirokawa	Ozu	0.013	0.550	-0.069
	41	Minamiodan 4-2	Dobokukengyjo	0.013	0.598	-0.067
Mountainous (11)	3	Takihue	Chitose	0.018	0.554	-0.068
	6	Daido	Higashine	0.011	0.553	-0.067
	8	Ominezawa	Shinji, Tone	0.009	0.486	-0.069
	15	Joro	Tsugawa	0.013	0.416	-0.075
	16	Hamaguri	Furukawa	0.016	0.629	-0.070
	21	Yamagami	Otsu	0.016	0.570	-0.071
	26	Miyoshi	Miyoshi	0.015	0.447	-0.076
	29	Keido	Kagawa-Tokushima	0.010	0.397	-0.074
	34	Nishinotani	Kashiwabara, Kuju	0.011	0.610	-0.065
	39	Ishihira	Okinawa	0.027	0.690	-0.070
	40	Kenjo	Maha	0.023	0.586	-0.073
	4	Hahakoi	Eurocan	0.024	0.630	-0.072
Industrial (7)	10	Ebigawa	Funabashi	0.036	0.414	-0.086
	14	Senpogawa	Takaoka	0.020	0.804	-0.062
	19	Yokkaichi	Yokkaichi	0.019	0.730	-0.065
	23	Nishiyodogawa	Osaka	0.016	0.735	-0.063
	28	Shinkasumi	Kurashiki	0.013	0.621	-0.066
	36	Chuo	Kitakyushu	0.011	0.750	-0.059
	1	Ishikari	Ishikari	0.044	0.761	-0.072
Marine (11)	5	Takagi	Matsushima	0.018	0.856	-0.058
	13	Yoneyama	Kashiwazaki	0.047	1.411	0.354
	17	Shinryoku	Ohama	0.468	0.063	-1.684
	20	Arita	Arita By-pass	0.035	0.515	-0.845
	24	Hamamura	Hoki, Kedaka	0.780	0.079	-1.839
	25	Gonokawa	Gotsu	0.020	0.683	-0.068
	31	Yasudagawa	Yasuda	1.862	0.730	-3.185
	33	Kizaki	Miyazaki	0.044	0.782	-0.071
	37	Shioya	Shioya-wan	0.407	0.551	-0.104
	38	Setoke	Nago	0.062	0.925	-0.068
	1	Ishikari	Ishikari	0.044	0.761	-0.072
City (9)	2	Toyohira	Sapporo	0.009	0.765	-0.056
	7	Matori	Sendai	0.018	0.788	-0.062
	11	Owariya	Yokohama	0.016	0.428	-0.077
	12	Shinkumihakamassen	Nagaoka	0.044	0.575	-0.081
	13	Kozoku	Nagoya	0.016	0.696	-0.065
	22	Gojo	Kyoto	0.013	0.467	-0.073
	27	Izumida	Okayama	0.015	0.596	-0.069
	30	Onogawa	Matsuyama	0.016	0.550	-0.072
	35	Jurogawa	Fukuoka	0.038	0.366	-0.080

กัดกร่อนของเหล็กจะอย่าง จากข้อมูลของการตั้งแต่งทดลองการกัดกร่อนของเหล็กที่ติดตั้งไว้บนรากห้องศาลา ได้สะพานในตำแหน่งที่ไม่ได้ถูกแดด日光 ไฟฟ้าและเครื่องจักร ทำการทดลองโดย Public Works Research Institute [15] ตามสถานที่ต่าง ๆ 41 แห่งในประเทศญี่ปุ่น รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างของข้อมูลการกัดกร่อนและผลการคำนวณ ค่าคงที่ในการคำนวณการกัดกร่อนระยะยาว

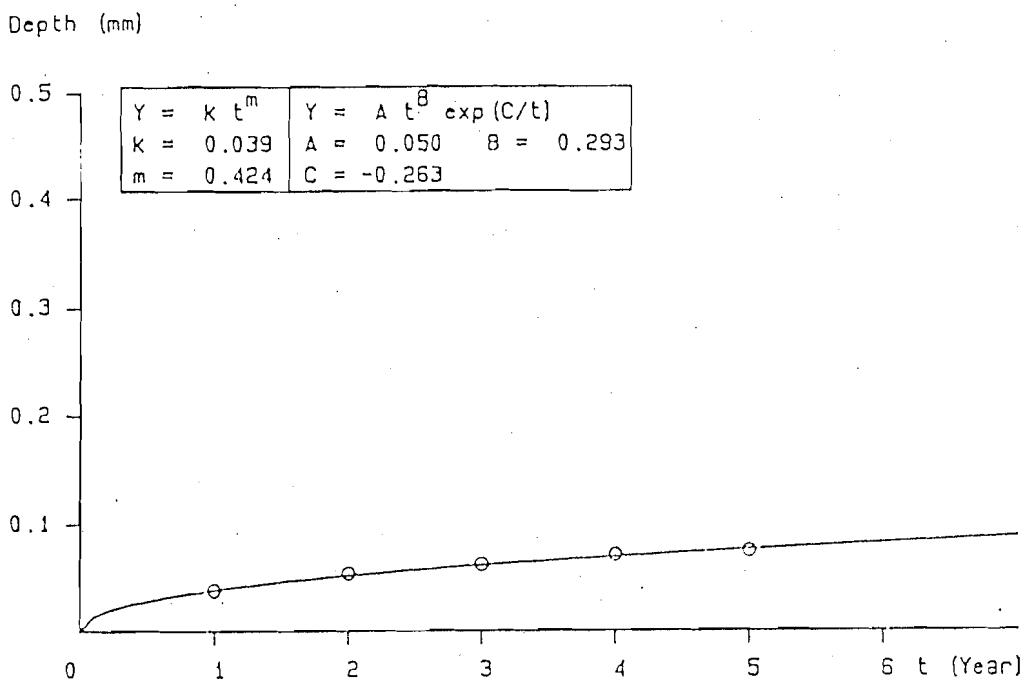


Fig.4 Long-term corrosion of bare steel exposed to rain (Otaru)

### การคาดคะเนการกัดกร่อนของเหล็กจากข้อมูลสภาพภูมิอากาศ

ในการศึกษาข้อมูลการกัดกร่อนของเหล็กที่เวลาต่าง ๆ กันจากผลการทดลองของการตั้งแต่งทดลองการกัดกร่อน จำเป็นที่จะต้องคำนวณหาปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กที่เวลาต่าง ๆ กันก่อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากข้อมูลของสภาพภูมิอากาศ ที่มีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยายกาศ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณฝน ปริมาณก๊าซชัลฟ์เอนโซไซด์ และปริมาณเกลือในอากาศ ตารางที่ 5 แสดงข้อมูลของสภาพภูมิอากาศ และข้อมูลผลการทดลองการกัดกร่อนของเหล็กที่เวลาต่าง ๆ กัน สำหรับเหล็กที่ติดต่อสัมผัสด้วยอากาศ ผลการวิเคราะห์นำเสนอการที่ใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนของเหล็กที่เวลาต่าง ๆ ในรูปของปัจจัยทางสภาพภูมิอากาศ แสดงโดยสมการที่ 3 ถึงสมการที่ 7

$$y_1 = 551.7 + 53.2X_1 - 15.4X_2 - 0.111X_3 + 33.9X_4 + 4.46X_5 \quad \delta = 0.65 \quad (3)$$

$$y_2 = 878.3 + 75.1X_1 - 26.9X_2 + 0.021X_3 + 47.8X_4 + 5.99X_5 \quad \delta = 0.68 \quad (4)$$

$$y_3 = 2001 + 101.3X_1 - 49.1X_2 + 0.120X_3 + 57.3X_4 + 6.83X_5 \quad \delta = 0.62 \quad (5)$$

$$y_4 = 5289 + 118.3X_1 - 96.1X_2 + 0.333X_3 + 39.4X_4 + 7.29X_5 \quad \delta = 0.59 \quad (6)$$

$$y_5 = 5793 + 131.5X_1 - 111.4X_2 + 0.503X_3 + 55.9X_4 + 7.57X_5 \quad \delta = 0.58 \quad (7)$$

Table 5 Data of environmental factors and corrosion depths for members exposed to rain

Location	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>
	T ° C	RH %	Pre. mm/y	SO <sub>2</sub> 10 <sup>-3</sup> ppm	NaCl 10 <sup>-4</sup> g/cm <sup>2</sup> y	Corro. Depth 10 <sup>-4</sup> mm				
Otaru	8.4	71	1158	15.3	7.66	382	533	622	711	747
Sendai	11.9	73	1219	12.6	1.55	427	533	622	702	764
Niigata	13.1	75	1822	10.2	12.50	560	711	871	1000	1070
Nagano	11.4	74	987	17.9	0.38	258	338	391	444	453
Nagoya	14.9	71	1575	16.4	0.37	658	880	960	1070	1080
Shimizu	16.0	69	2361	14.9	2.44	444	844	1150	1446	1710
Tokyo	15.3	66	1460	18.2	5.34	596	729	809	933	1006
Kawasaki	15.3	70	1427	21.2	22.70	1510	2040	2810	3388	4000
Matsue	14.4	78	1957	12.4	18.40	347	533	640	738	844
Amagasaki	16.3	69	1277	16.8	8.86	860	1360	1740	1990	2220
Wakayama	16.0	70	1454	12.1	21.20	604	773	907	978	978
Shionomisaki	16.9	72	2766	10.7	82.30	524	951	1110	1410	1530
Miyazaki	16.9	77	2490	11.4	5.52	338	613	684	711	782
Matsuyama	15.6	71	1337	16.9	5.99	444	631	702	720	729
Ashizurimisaki	17.8	70	2473	9.9	26.70	933	1560	2520	4070	4810

เงื่อนไข ก:  $y_5 > y_4 > y_3 > y_e > y_1 > 0$

เมื่อ  $X_1$  คือ อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )

$X_2$  คือ ความชื้น (%)

$X_3$  คือ ปริมาณฝน (mm/year)

$X_4$  คือ ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไนโตรออกไซด์ในอากาศ ( $10^{-3}$  ppm)

$X_5$  คือ ปริมาณเกลือ ( $10^{-4}$  g/cm<sup>2</sup> year)

$y_1 - y_5$  คือ corrosion depth ที่เวลา 1-5 ปี ( $10^{-4}$  mm)

จากสมการข้างต้น จะเห็นว่า ความชื้นไม่แสลงให้เห็นแนวโน้มที่จะส่งเสริมการกัดกร่อน ซึ่งอาจเป็น เพราะว่าข้อมูลของความชื้นตามลักษณะที่ถ่างกัน ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือรังน็อกค่าไม่สูงมากนัก และอาจจะถังน้ำค่าต่ำกว่าความชื้นปกติ ซึ่งความชื้นจะไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็ก ลังนั้นสมการเหล่านี้จึงสามารถใช้ได้กับพื้นที่ความชื้นไม่มากนัก โดยที่เงื่อนไข ก ยังเป็นจริง

Table 6 Data of environmental factors and corrosion depths for members underneath bridges

Environment	No	X <sub>1</sub> ° C	X <sub>2</sub> %	X <sub>3</sub> Pre. mm/y	X <sub>4</sub> 10 <sup>-3</sup> ppm SO <sub>2</sub>	X <sub>5</sub> 10 <sup>-4</sup> g/cm <sup>2</sup> y NaCl	Y <sub>1</sub> Corro. Depth 10 <sup>-4</sup> mm	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>
Rural (3)	9	14.1	69	1207	13.50	2.88	176	275	354
	32	-	-	-	-	1.13	120	132	230
	41	-	-	-	-	0.66	122	191	246
Mountainous (11)	3	6.3	79	1631	8.13	1.53	164	267	352
	6	11.2	76	163	-	0.47	100	152	192
	8	13.8	67	1155	-	0.33	84	122	150
	15	-	-	-	-	0.88	118	164	196
	16	10.3	79	1832	-	0.95	64	-	230
	21	14.1	77	1741	-	0.80	150	231	294
	26	-	-	-	-	1.57	142	201	244
	29	15.2	74	1199	-	0.18	96	131	156
	34	15.6	74	1708	-	0.88	100	158	204
	39	22.4	77	2128	3.17	4.67	254	424	568
	40	22.4	77	2128	7.00	4.12	212	330	424
Industrial (7)	4	8.9	75	1303	9.36	5.40	228	366	478
	10	15.3	66	1460	16.44	6.75	332	462	554
	14	13.5	79	2346	11.64	3.03	184	331	464
	19	15.0	73	1708	10.27	2.99	176	302	410
	23	16.2	67	1400	18.64	5.55	154	264	360
	28	14.6	75	1223	16.82	1.50	118	188	244
	36	15.5	74	1718	10.45	1.24	108	187	256
Marine (11)	1	8.0	73	1158	4.17	14.45	408	717	988
	5	11.9	73	1219	2.30	6.10	166	309	442
	13	13.1	77	2948	-	24.86	672	-	2502
	17	15.5	74	4118	-	10.80	868	-	2858
	20	16.0	70	1454	-	5.69	152	-	470
	24	14.3	76	2018	-	62.49	1240	-	4608
	25	15.1	73	1740	6.50	3.80	186	309	412
	31	16.4	74	2524	-	16.86	770	-	2888
	33	16.9	77	2490	-	12.96	408	727	1010
	37	22.4	77	2128	-	41.14	3652	5634	7166
	38	22.4	77	2128	4.00	13.21	582	1143	1682
City (9)	2	8.0	73	1158	13.09	1.06	84	147	202
	7	11.9	73	1219	9.55	2.08	172	306	426
	11	15.1	71	1596	13.00	0.99	146	204	246
	12	-	-	-	-	6.53	408	633	810
	18	14.9	71	1575	11.55	1.13	148	248	332
	22	15.2	70	1669	14.36	1.46	122	175	214
	27	14.6	75	1223	17.55	3.83	140	219	282
	30	15.6	71	1337	14.82	1.31	150	228	288
	35	16.0	72	1690	8.00	5.80	348	469	552

สำหรับเหล็กที่ไม่ตากแดดตามฟัน โดยตรงใช้ช้อนมูลสภาพภูมิอากาศและช้อนมูลของการกัดกร่อนที่เวลาต่างๆ ตามตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์สมการที่ใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนของเหล็กที่เวลาต่าง ๆ ในรูปของปัจจัยของสภาพภูมิอากาศ แสดงโดยสมการที่ 8 ถึงสมการที่ 10

$$y_1 = 47.29 + 1.83X_1 - 1.47X_2 + 0.07X_3 - 0.53X_4 + 27.21X_5 \quad r = 0.92 \quad (8)$$

$$y_2 = -416.63 + 5.06X_1 + 4.72X_2 + 0.09X_3 - 1.10X_4 + 51.16X_5 \quad r = 0.93 \quad (9)$$

$$y_3 = -973.27 + 8.54X_1 + 11.70X_2 + 0.11X_3 - 1.59X_4 + 73.64X_5 \quad r = 0.92 \quad (10)$$

เงื่อนไข คือ  $y_3 > y_2 > y_1 > 0$

จากสมการข้างต้น จะเห็นได้ว่าก้าวชัลเฟอร์ໄดออกไซด์ไม่แสดงให้เห็นถึง แนวโน้มของการลุ่งเสริม การกัดกร่อน ซึ่งอาจเป็น เพราะว่าช้อนมูลของก้าวชัลเฟอร์ໄดออกไซด์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ มีค่าไม่สูงมากนัก และช้อนมูลของการกัดกร่อน ณ. พื้นที่ที่ก้าวชัลเฟอร์ໄดออกไซด์ต่อ อาจมีค่าสูง เนื่องจากเหตุผลอื่น จึงทำให้ไม่สามารถเห็นผลกราฟของก้าวชัลเฟอร์ໄดออกไซด์ที่แท้จริง สันประสึกหรือสันพันธ์ระหว่างช้อนมูลของการกัดกร่อนและช้อนมูลทางสภาพภูมิอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 7

Table 7 Single-correlation coefficients between environmental factors and corrosion depths at some certain exposure times

		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>
Based on steel exposure test exposed to rain	Y <sub>1</sub>	0.366	-0.447	-0.026	0.372	0.192
	Y <sub>2</sub>	0.499	-0.428	0.177	0.248	0.299
	Y <sub>3</sub>	0.482	-0.397	0.215	0.174	0.277
	Y <sub>4</sub>	0.484	-0.370	0.298	0.043	0.297
	Y <sub>5</sub>	0.475	-0.354	0.305	0.043	0.286
Based on steel exposure test underneath bridges	Y <sub>1</sub>	0.305	0.115	0.299	-0.491	0.885
	Y <sub>2</sub>	0.299	0.203	0.314	-0.533	0.889
	Y <sub>3</sub>	0.294	0.239	0.317	-0.541	0.874

#### บทสรุป

เหล็กเป็นวัสดุที่ไม่เสียหายในธรรมชาติ เหล็กมีแนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อน เมื่ออุ่นในบรรยากาศ ปัจจัยทางสภาพภูมิอากาศที่มีผลกราฟโดยตรงต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กคือ อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณฝน ปริมาณก้าวชัลเฟอร์ໄดออกไซด์และปริมาณเกลือในอากาศ สมการที่ใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนระยะยาว ของเหล็กในอากาศ สามารถวิเคราะห์หาได้จากช้อนมูลการกัดกร่อนของเหล็กที่เวลาต่างๆ ช้อนมูลการกัดกร่อนของเหล็กที่เวลาต่าง ๆ อาจได้จากการทดลองของกราฟดังแผนกดลองการกัดกร่อนของเหล็ก หรืออาจได้จากการคาดคะเน โดยอาศัยช้อนมูลของสภาพภูมิอากาศที่มีผลกราฟโดยตรงต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็ก

ເລກສາຮ້າງຂອງ

- 1 Ractliffe, A.T.: The basis and essentials of marine corrosion in steel structures; Proc. ICE Part 1, 74, pp899-907, Nov., 1983
- 2 Uhlig, H: Corrosion and corrosion control, Second edition, John Wiley & Sons Inc., 1971
- 3 Mitsubishi Chemical Safety Research Institute: Investigation on the effect of air pollution on the living environment, March, 1986 (In Japanese)
- 4 The protection of steel structures against corrosion; BS 5493, 1977
- 5 Vassie, P. R.: Corrosion of structural steelwork in bridge enclosures, box sections, and anchorage chambers; Br.Corros.J., Vol.22, No.1, 1987
- 6 Takazawa, H. et al: Study on atmospheric corrosion of hot-dipped galvanized steels in costal areas; Corrosion Engineering, Vol. 38, No. 3, pp143-147, March, 1989 (In Japanese)
- 7 Makita, M.: Corrosion protection technology of marine structures; Corrosion Engineering, Vol. 35, No. 8, pp471-479, Aug., 1986 (In Japanese)
- 8 2nd Report of the Accelerated Weathering Tests Sub-committee, JSSC Vol. 8, No. 83, pp5-42, Nov., 1972 (In Japanese)
- 9 Feliu, S. and Morcillo, M.: Corrosion in rural atmospheres in Spain; Br.Corros. J., Vol. 22, No. 2, pp99-102, 1987
- 10 Vernon, W.; Trans. Faraday Soc., Vol. 23, No. 113, 1927
- 11 Haynie, H. and Upham, B.: Correlation between corrosion behavior of steel and atmospheric pollution data; Corrosion in Natural Environment, ASTM Special Technical Publication 558, pp33-51, 1974
- 12 Akao, H. et al: Study on unpainted steel bridges and verification on actual bridge through long-range exposure test; K.H.I. Technical Review, Special Issue for Bridges, No. 96, pp78-92, July, 1987 (In Japanese)

- 13 Horikawa et al: Atmospheric corrosion and corrosion protection of metallic substance No. 5; Corrosion Eng., 16, 153-158, 1967 (In Japanese)
- 14 Hanshin Expressway Public Corporation; Anti-corrosion Study Group of Bridge Structure, Report, Nov., 1980 (In Japanese)
- 15 Public Works Research Institute: Results of the second measurement of corrosion depth from steel exposure test, Research report No.10, Jan., 1988 (In Japanese)