論文　飛沫帯にあるRC部材の曲げ耐力に関する劣化予測手法

木下　真一[*1]・内田　慎哉[*2]・鎌田　敏郎[*3]

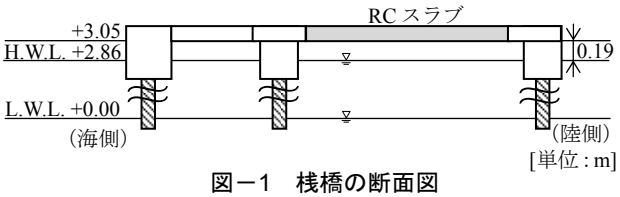
要旨：本研究では，飛沫帯にあるRC部材を対象として，部材の設置環境条件および部材諸元と，既往の研究や実構造物での調査結果に基づいて設定した表面塩化物イオン濃度や鉄筋の腐食速度などの確率分布および統計量から，モンテカルロ法により曲げ耐力に関する劣化曲線の導出を行った。導出した劣化曲線から供用年数33年から36年での曲げ耐力を推定し，載荷により得られた実際の曲げ耐力との比較を行った。その結果，本研究の範囲内では，推定した曲げ耐力と実際の曲げ耐力は，比較的良い一致を示した。

キーワード：桟橋，RC部材，塩害，飛沫帯，曲げ耐力，劣化予測，劣化曲線，モンテカルロ法

1. はじめに

著者らは，既往の研究[1),2)]を参考に，海洋環境下にあるRC部材を対象として，部材の設置環境条件および部材諸元と，既往の研究や実構造物での調査結果に基づいて設定した表面塩化物イオン濃度や鉄筋の腐食速度などの確率分布および統計量から，モンテカルロ法（以降，MCM）により，曲げ耐力に関する劣化曲線を導出する方法についての検討を行なってきた[3)]。しかしながら，確率分布の設定の際に使用したデータには，飛沫帯，干満帯あるいは大気中など様々な条件下に加えて，電食試験結果も含まれており，たとえば，環境条件を飛沫帯に限定して本手法を適用する場合には，精度向上の観点からは検討の余地を残していた。

そこで，本研究では，塩害環境として最も厳しい飛沫帯を対象とすることとし，まず，飛沫帯での暴露実験や実構造物の調査結果に基づき前述の確率分布および統計量を見直すことで劣化曲線の導出手順の再構築を行った。続いて，飛沫帯にあるRC部材の曲げ耐力に関する劣化曲線の導出を試みた。さらに，対象とした部材において載荷試験を行い曲げ耐力を実測した既往の研究成果[4)]を用いて，導出した劣化曲線の妥当性についての検証も併せて行った。



図－1　桟橋の断面図

表－1　RCスラブの部材諸元

スラブ厚さ(mm)		350
上段鉄筋	径(mm)	16
	本数(本)	2
	有効高さ(mm)	225
	かぶり(mm)	117
	降伏強度(N/mm^2)	363
	弾性係数(kN/mm^2)	186
下段鉄筋	径(mm)	13
	本数(本)	5
	有効高さ(mm)	280
	かぶり(mm)	63.5
	降伏強度(N/mm^2)	380
	弾性係数(kN/mm^2)	183
コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)		32.6
コンクリートの弾性係数(kN/mm^2)		28
水セメント比(%)		47.5

2. 飛沫帯にあるRC部材の概要

本研究で対象としたRC部材は，**図－1**に示す桟橋上部工のRCスラブである。この桟橋は1968年～1971年の間に建設[4)]され，山口県の下関港で2004年まで供用[5)]されたものである。**図－1**に示すとおり，対象RCスラブは飛沫帯に設置されており，H.W.L.から部材下面までの距離：dは0.19mである。港湾の施設の技術上の基準・同解説[6)]および既往の研究[7)]によれば，桟橋のコンクリート上部工における表面の塩化物イオン濃度：C_0 (kg/m^3)は，H.W.L.と部材下面までの距離が0～2.0m程度の場合，次式から推定できるとしている。

$$C_0 = -6.0d + 15.1 \tag{1}$$

したがって，C_0は式(1)より14.0kg/m^{3}となる。

表－1にRCスラブの部材諸元を示す。部材寸法，引張側主鉄筋（上段および下段），コンクリートの圧縮強度は，桟橋調査結果の値を採用した[4)]。水セメント比は同調査結果[4)]および既往の研究[8)]に基づいて47.5%と仮

*1 大阪大学大学院　工学研究科地球総合工学専攻　(正会員)
*2 大阪大学大学院　工学研究科地球総合工学専攻　特任助教　博士(工学)　(正会員)
*3 大阪大学大学院　工学研究科地球総合工学専攻　教授　博士(工学)　(正会員)

表－2　各パラメータのバラツキを表す確率変数の確率分布および統計量

確率変数		確率分布	平均値	変動係数	標準偏差
鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度	X_1	一様	1.0	0.20	0.20
鉄筋位置での塩化物イオン濃度	X_2	対数正規	1.1	－	0.47
表面塩化物イオン濃度	X_3	正規	1.00	0.363	0.363
かぶりの施工誤差(mm)	X_4	正規	-0.16	－	7.8
塩化物イオンの見かけの拡散係数	X_5	対数正規	0.34	－	0.24
腐食ひび割れ発生時の腐食量	X_6	対数正規	1.00	0.330	0.330
コンクリートの圧縮強度	X_7	正規	1.00	0.0382	0.0382
腐食ひび割れ発生前の鉄筋の腐食速度	X_8	一様	1.0	0.47	0.47
腐食ひび割れ発生後の鉄筋の腐食速度	X_9	一様	1.0	0.33	0.33

定した。コンクリートの弾性係数は，コンクリート標準示方書【設計編】に基づき圧縮強度に対応する値とした。

3. 曲げ耐力に関する劣化曲線の導出方法

3.1 導出手順の概要

本研究では，2 章で推定した表面塩化物イオン濃度および RC スラブの部材諸元から，曲げ耐力に関する劣化曲線を導出した。具体的には，まず，鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度や腐食ひび割れ発生前後の腐食速度などのバラツキを考慮するために，これらを確率変数として取り扱い，既往の研究および実構造物での調査結果から確率変数の確率分布および統計量を設定した（3.2 参照）。その後，鉄筋の腐食開始時刻および腐食ひび割れ発生時刻を，MCM を用いて推定した（3.3 および 3.4 参照）。これらの推定結果を用いて，供用年数ごとに，同じく MCM により鉄筋の質量減少率の平均値を求め，「鉄筋の質量減少率の経時変化」を算出した（3.5 参照）。さらに，既往の研究成果に基づき，「曲げ耐力比と鉄筋の質量減少率との関係」を整理した（ただし，ここでは入手できたデータ数の関係から，MCM は用いていない。3.6 参照）。最後に，「鉄筋の質量減少率の経時変化」と「曲げ耐力比と鉄筋の質量減少率との関係」から「曲げ耐力に関する劣化曲線」を導出（3.7 参照）した。これらの詳細を次節以降にそれぞれ示す。

3.2 確率変数の確率分布および統計量の設定方法

本研究で使用した確率変数の確率分布および統計量を**表－2** に示す。対象とした RC 部材が飛沫帯にあることを考慮して，著者らの既往の研究 [3]で使用した確率変数の確率分布および統計量を一部見直すとともに，新たに確率変数を追加した。見直しを行った確率変数は，**表－2** 中の X_1，X_2，X_5，X_8 および X_9 である。鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度：C_{lim} は，既往の文献 [9]によれば，1.2kg/m^3～2.5kg/m^3 の範囲となる。これより，C_{lim} の確率分布を一様分布として，平均値：1.85kg/m^3 および標準偏差：0.375kg/m^3 を算出した。平均値が 1.0 となるように平均値および標準偏差を無次元化して，これらを X_1 の統計量とした（**表－2** 参照）。X_2 および X_5 は，飛沫帯にある実構造物での調査結果 [4),10),11)]を参考に決定した。まず，X_2 については，調査結果を Fick の拡散方程式の解で回帰することにより表面塩化物イオン濃度と見かけの拡散係数をそれぞれ算定した。続いて，これらの算定値から任意の位置での塩化物イオン濃度を Fick の拡散方程式の解により推定した。調査結果を推定値で除した無次元量から平均値および標準偏差をそれぞれ算出した。続いて，X_5 は，Fick の拡散方程式の解で回帰することにより算定した見かけの拡散係数を次式で推定した見かけの拡散係数で除し，平均値および標準偏差をそれぞれ求めた。

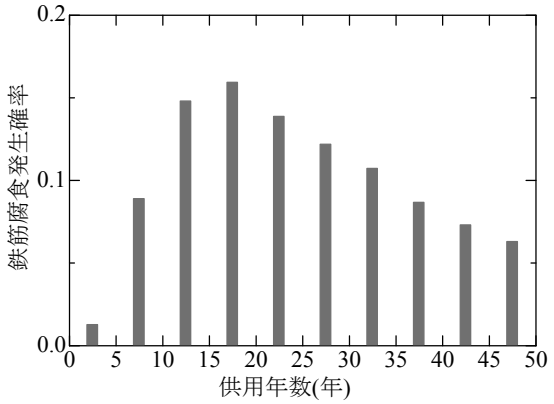
$$log_{10} D = -3.9\left(W/C\right)^2 + 7.2\left(W/C\right) - 2.5 \qquad (2)$$

ここで，D：塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm^2/年)，W/C：水セメント比[=0.475]である。なお，X_2 および X_5 の分布は対数正規分布とした。X_8 および X_9 は，飛沫帯で暴露した供試体での実験結果 [12),13),14)]を，式(3)および(4)にそれぞれ代入して求めた腐食速度から決定した。

$$V_b = W_c / \left(t_{cr} - t_{corr.}\right) \qquad (3)$$

$$V_a = \left(W - W_c\right) / \left(t - t_{cr}\right) \qquad (4)$$

ここに，V_b：腐食ひび割れ発生前の鉄筋の腐食速度(mg/cm^2/年)，W_c：腐食ひび割れ発生時の腐食量(mg/cm^2)，t_{cr}：腐食ひび割れの発生時刻(年)，$t_{corr.}$：腐食開始時刻(年)，V_a：腐食ひび割れ発生後の鉄筋の腐食速度(mg/cm^2/年)，W：t_{cr} 以降の任意の供用年数 t (年)における腐食量(mg/cm^2)である。ただし，W_c が不明なものについては，Qi らが提案している腐食ひび割れ幅から鉄筋の腐食量を推定する式 [15)]により求めた。腐食ひび割れ発生時のひび割れ幅は 0.1mm[16)]と仮定した。その結果，V_b は 2.3～21.9mg/cm^2/年，V_a は 21.9～64.9mg/cm^2/年を得た。ただし，V_a の上限値は，露出の鋼材・管材などの実用上の限界腐食速度：78.7mg/cm^2/年 [17)]に変更した。以上より，V_b および V_a の平均値は，それぞれ 12.1 mg/cm^2/年および



図－2　鉄筋腐食発生確率

50.3mg/cm^2/年とした。なお，X_8 および X_9 はいずれも一様分布として，平均値で無次元化した。

一方，本研究で新たに追加した確率変数は X_3 および X_7 である。特に，X_3 の表面塩化物イオン濃度については，飛沫帯にある実構造物での調査結果 [7]に基づき，確率分布を正規分布，H.W.L.から RC 部材下面までの鉛直距離が 0.0～0.5m での標準偏差：5.05kg/m^3 を採用した。平均値は式(1)より求めた 14.0kg/m^3 とした。一方，X_7 のコンクリートの圧縮強度については，確率分布および変動係数は，徳富が実施した試験体 100 体での結果 [18]を参考に正規分布および 0.0382 とした。平均値は桟橋調査結果 [4]に基づき 32.6N/mm^2 とした。なお，X_3 および X_7 のいずれの場合も，平均値が 1.00 となるように無次元化した。

確率変数 X_4 および X_6 については，著者らの既往の研究 [3]と同じとした。理由は，X_4 は部材の設置環境に依存しないためであり，X_6 は飛沫帯にある実構造物での調査結果などの事例が少なかったためである。

3.3 鉄筋腐食発生の判定と腐食開始時刻の算出

任意の供用年数: t (年)における鉄筋位置での塩化物イオン濃度：C (kg/m^3)が，C_{lim} [=1.85(kg/m^3)]を超えた場合に，鉄筋が腐食したと判定した（$g_1<0$ で鉄筋腐食発生）。判定式：$g_1=0$ として t について解くと，$t_{corr.}$ (年)が算出できる。以下に判定式 [1),2),3)]および $t_{corr.}$ の算出式 [3)]をそれぞれ示す。

$$g_1 = x_1 C_{lim} - C(c, C_0, D, t) \tag{5}$$

$$C = x_2\left[x_3 C_0\left\{1 - erf\frac{0.1(c+x_4)}{2\sqrt{x_5 Dt}}\right\}\right] \tag{6}$$

$$t_{corr.} = \frac{1}{4x_5 D}\left\{\frac{0.1(c+x_4)}{erf^{-1}\left(1-\frac{x_1 C_{lim}}{x_2 x_3 C_0}\right)}\right\}^2 \tag{7}$$

ここで，c：かぶり［=63.5(mm)］，x_1, x_2, x_3, x_4, x_5：C_{lim}, C, C_0, c, D それぞれのバラツキを表す確率変数の MCM による標本観測値である。見かけの拡散係数は，対象 RC スラブが普通ポルトランドセメントを使用して W/C を 0.475 とし，式(2)により求めた。

試行回数 n =10,000 回の MCM により標本観測値: x_1 ～ x_5 をそれぞれ発生させ，鉄筋の腐食開始時刻をそれぞれ算出した。**図－2** に供用年数 5 年毎に腐食発生と判定した数をカウントし，供用年数 50 年までの腐食発生確率に関するヒストグラムを示す。図によれば，供用年数 15 年～20 年までの間で鉄筋が腐食する確率が最も高く，以降，時間の経過とともに小さくなった。

3.4 腐食ひび割れ発生の判定とひび割れ発生時刻の算出

任意の供用年数：t (年)における鉄筋の腐食量：Q (mg/cm^2) [1),2),3)]が，W_c (mg/cm^2)[15]を超えた場合に，腐食ひび割れ発生と判定した（$g_2<0$ で腐食ひび割れ発生）。判定式：$g_2=0$ として t について解くと，t_{cr} (年)が算出できる。以下に判定式 [1),2),3)]および t_{cr} の算出式 [3)]をそれぞれ示す。

$$g_2 = x_6 \eta W_c - Q(V_b, t_{corr.}, t) \tag{8}$$

$$Q(V_b, t_{corr.}, t) = x_8 V_b (t - t_{corr.}) \tag{9}$$

$$t_{cr} = t_{corr.} + \frac{x_6 \eta W_c}{x_8 V_b} \tag{10}$$

$$W_c = \frac{100\rho_s}{\pi(\gamma-1)}\left[\alpha_0\beta_0\frac{0.22\left[\{2(c+x_4)+\varphi\}^2+\varphi^2\right]}{E_c(c+x_4+\varphi)}(x_7 f_c')^{\frac{2}{3}} + \alpha_1\beta_1\frac{c+x_4+\varphi}{5(c+x_4)+3\varphi}w_{cr}\right] \tag{11}$$

ここで，η：腐食ひび割れ発生時の腐食量に関する補正係数[=3.68[2),3)]]，V_b =12.1(mg/cm^2/年)，ρ_s：鉄筋の密度[=7.85(mg/mm^3)]，γ：腐食生成物の体積膨張率[=3.0]，φ：鉄筋径[=13(mm)]，E_c：コンクリートの弾性係数[=28.0 × 10^3(N/mm^2)]，f_c'：コンクリートの圧縮強度[=32.6(N/mm^2)]，w_{cr}：腐食ひび割れが発生したときのひび割れ幅[=0.1(mm)[16]]，x_6, x_7, x_8：W_c, f_c', V_b のそれぞれのバラツキを表す確率変数の MCM による標本観測値，$\alpha_0, \beta_0, \alpha_1, \beta_1$：かぶり，鉄筋径およびコンクリートの圧縮強度に関する補正係数である。この補正係数は，以下の式 [15]により求めることができる。

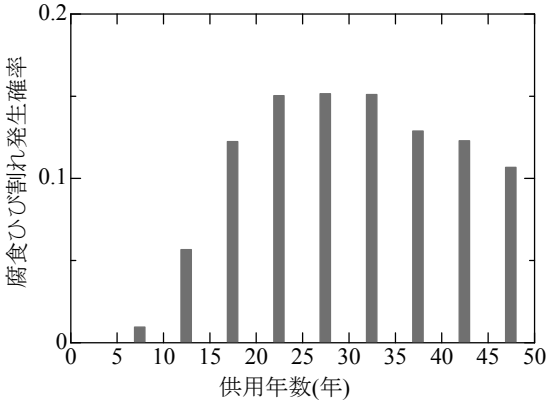
$$\alpha_0 = (-0.0005\varphi + 0.028)(c + x_4) + (-0.0292\varphi + 1.27) \tag{12}$$

$$\beta_0 = -0.0055 x_7 f_c' + 1.07 \tag{13}$$

$$\alpha_1 = (0.0007\varphi - 0.04)(c + x_4) \tag{14}$$

$$\beta_1 = -0.0016 x_7 f_c' + 1.04 \tag{15}$$

確率変数：X_6，X_7 および X_8 の標本観測値 x_6，x_7 および x_8 を試行回数 n =10,000 回の MCM によりそれぞれ発生させ，腐食ひび割れの発生時刻をそれぞれ算出した。**図－3** に供用年数 5 年毎に腐食ひび割れ発生と判定した数をカウントし，供用年数 50 年までの腐食ひび割れ発



図－3　腐食ひび割れ発生確率

生に関するヒストグラムを示す。供用年数 20 年から 35 年において腐食ひび割れが発生する確率が最も高くなっていることが確認できる。また，腐食ひび割れ発生の確率が最も高い年数は，鉄筋の腐食開始のそれよりも遅くなっていることもわかる。

3.5 鉄筋の質量減少率の算出

ここでは，3.3 および 3.4 で求めた 10,000 個の $t_{corr.}$ (年)と t_{cr} (年)のペアを用いて，供用年数 0 から 50 年までの鉄筋の質量減少率の平均値をそれぞれ算出する方法について説明する。鉄筋の質量減少率を算出するためには，供用年数 1 年ごとに鉄筋の腐食量を求める必要がある。腐食量を求める具体的な手順としては，以下の 3 ケースを想定し，それぞれのケースごとに腐食量を算出した。すなわち，腐食量を算出する供用年数：t の時点において，腐食ひび割れが既に発生している場合（ケース I：$t_{corr.} < t_{cr} < t$），鉄筋は腐食しているものの腐食ひび割れが発生していない場合（ケース II：$t_{corr.} < t < t_{cr}$）および鉄筋が腐食していない場合（ケース III：$t < t_{corr.} < t_{cr}$）である（**図－4** 参照）。ケース I における腐食量の算出式を式(16)に，ケース III でのそれを式(17)に示す。なお，ケース II については，式(9)と同じである。

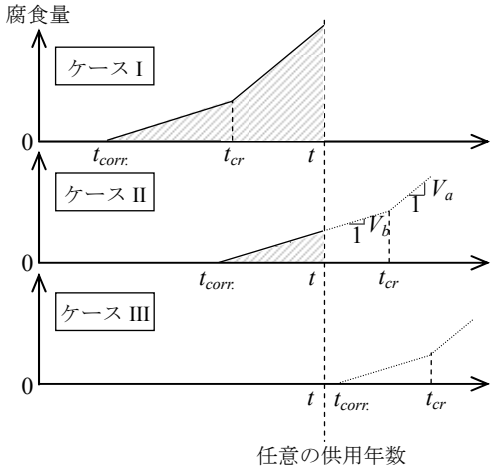
$$Q(V_b, V_a, t_{co}, t_{cr}, t) = x_8 V_b (t_{cr} - t_{corr.}) + x_9 V_a (t - t_{cr}) \qquad (16)$$

$$Q = 0 \qquad (17)$$

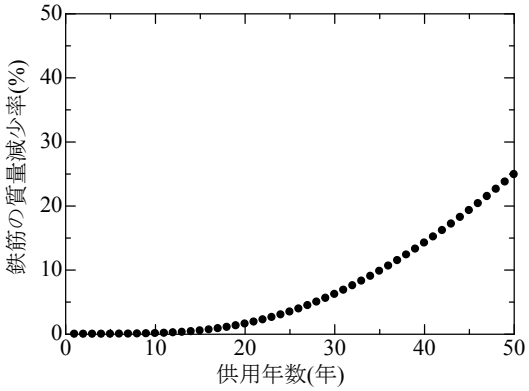
ここで，V_a =50.3(mg/cm^2/年)，x_9 ：V_a のバラツキを表す確率変数の MCM による標本観測値である。腐食量を求めようとする供用年数：t と 3.3 および 3.4 で求めた 10,000 個の $t_{corr.}$ (年)と t_{cr} (年)のペアとを比較し，上記のケース I～III のどのケースに分類されるかを決定した。その後，ケースごとに式(9)，(16)および(17)を適宜使い分け，供用年数 1 年ごとに 10,000 個の腐食量を求めた。最後に，供用年数 1 年ごとに以下の式から鉄筋の質量減少率の平均値：$\omega_{ave.}$ を算出した。

$$\omega_{ave.} = \frac{1}{10000} \sum_{i=1}^{10000} \left\{ Q_i \Big/ (\varphi\rho/4) \times 100 \right\} \qquad (18)$$

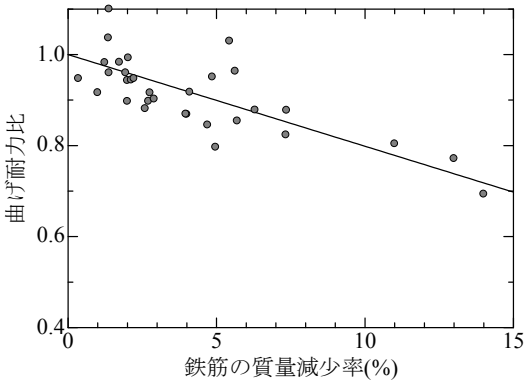
算出した鉄筋の質量減少率の平均値と供用年数との関係を**図－5** に示す。



図－4　任意の供用年数における鉄筋の質量減少の算出方法の概念図



図－5　鉄筋の質量減少率の平均値の経時変化



図－6　曲げ耐力と鉄筋の質量減少率との関係

3.6 曲げ耐力と鉄筋の質量減少率の関係

RC はり供試体を対象に，電食試験以外の方法で鉄筋の腐食促進試験を行ない，その後，曲げ載荷試験を行なって得られた最大荷重とその供試体での鉄筋の質量減少率との関係を既往の研究 [19)~23)]を参考にしてまとめたものを**図－6** に示す。また，回帰式を以下に示す。

$$L = -2.01 \times 10^{-2} \times m + 1.00 \qquad (19)$$

ここで，L ：曲げ耐力比，m ：鉄筋の質量減少率(%)である。

3.7 曲げ耐力に関する劣化曲線

図－5 において供用年数 1 年ごとに質量減少率の平均値を判読し，これらの値を**図－6** から算出した回帰式(19)にそれぞれ代入して，曲げ耐力比を求めた。この計算を供用年数が 50 年となるまで繰り返し，供用年数と曲げ耐力の関係，すなわち，曲げ耐力の劣化曲線を算出した。**図－7** に曲げ耐力の劣化曲線（図中の●）を示す。

4. 導出した劣化曲線の検証

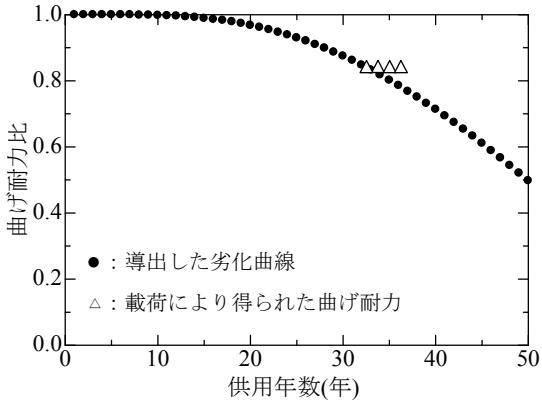
導出した劣化曲線の妥当性を検証するため，2004 年に撤去した RC スラブからはり状に切り出した RC 部材（幅 1,010mm×高さ 350mm×長さ 5,000mm）に対して 4 点曲げ載荷試験（載荷スパン：3,700mm，モーメントスパン：800mm，載荷点から支点までの距離：1,450mm）を行った既往の研究成果 [4)]と比較することとした。載荷試験の結果，最大荷重は 139kN であった。ここで，建設当時の健全な状態での RC スラブの設計曲げ耐力を推定するため，有限要素法による解析を行った。解析モデルを**図－8** に示す。コンクリートの要素寸法は，高さ 25mm，長さ 25mm とした。コンクリートの材料モデルには，**図－9** に示す応力－ひずみ関係を適用した。圧縮応力下においては，圧縮強度：f'_c に達するまで放物線とし，その後は終局ひずみ：ε'_{cu} となるまで線形で軟化するように設定した。ε'_{cu} の値は，圧縮破壊エネルギー：G_{f_c} (N/mm)を考慮して決定した。以下に圧縮破壊エネルギーの算出式を示す。

$$G_{f_c} = 8.8(f'_c)^{1/2} \tag{20}$$

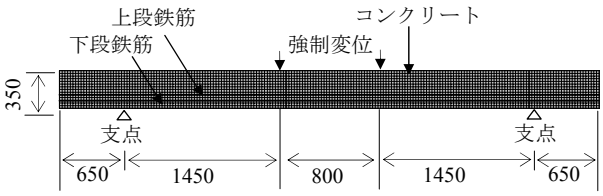
これに対して，引張応力下では，引張強度：f_t に達するまで線形とし，その後は引張破壊エネルギー：G_{f_t} [=150(N/mm)] [24)]で定義される終局ひずみ：ε_{tu} に達するまで指数曲線で軟化するようにした。解析で使用したコンクリートの物性値を**表－1** に示す。コンクリートの引張強度およびポアソン比は，対象桟橋での調査結果 [4)]がないため，それぞれ 3.26N/mm^2 および 0.20 と仮定した。

一方，鉄筋は離散鉄筋モデルとした。鉄筋の材料モデルには，**図－10** に示すトリリニア型である。図中の E_s は弾性係数，E'_s [$= 0.01E_s$] [25)]は硬化後の剛性，f_y は降伏強度，f_u は引張強度，ε_y は降伏強度時のひずみ，ε_{sh} [=0.01] [25)]は硬化開始時のひずみ，ε_u [=0.2] [25)]は破断時のひずみである。**表－1** に鉄筋の物性値を示す。

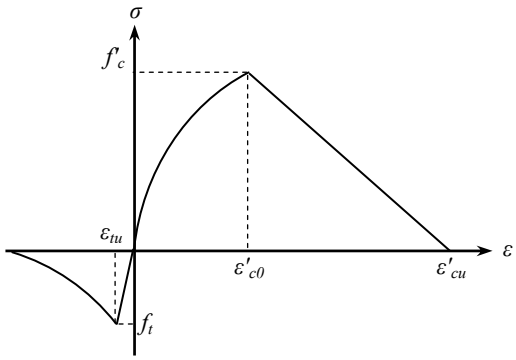
以上の条件で解析を行った結果，最大荷重は約 170kN となった。これより，飛沫帯にある RC 部材の曲げ耐力比は，実験によって測定した最大荷重を解析で求めた最大荷重で除し，0.818 となる（**図－7** 中の△）。以上のことから，導出した劣化曲線から推定した供用年数が 33 年～36 年での曲げ耐力比は，実際の曲げ耐力比と概ね良い対応関係を示すことが明らかとなった。



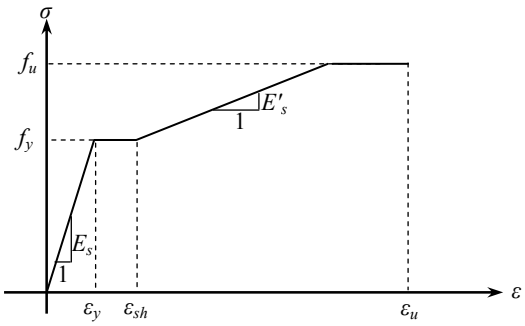
図－7　曲げ耐力の劣化曲線



図－8　解析モデル　[単位：mm]



図－9　コンクリートの応力-ひずみ関係



図－10　鉄筋の応力-ひずみ関係

5. まとめ

本研究では，飛沫帯での暴露実験や実構造物の調査結果に基づき確率分布および統計量の見直しを行うこと

で劣化曲線の導出手順の再構築を行った。導出した劣化曲線から供用年数 33 年から 36 年での曲げ耐力を推定し，載荷により得られた実際の曲げ耐力と比較した。その結果，本研究の範囲内では，推定した曲げ耐力と実際の曲げ耐力は，比較的良い一致を示した。

参考文献

1) 土木学会：続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ 85，2009
2) 吉田郁政，秋山充良，鈴木修一，山上雅人：Sequential Monte Carlo Simulation を用いた維持管理のための信頼性評価手法，土木学会論文集 A，Vol.65，No.3，pp.758-775，2009.8
3) 内田慎哉，鎌田敏郎，木下真一：塩害環境下にある RC 部材の曲げ耐力の予測手法に関する基礎研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 10 巻，pp.207-214，2010
4) 加藤絵万，岩波光保，山路　徹，横田　弘：建設後 30 年以上経過した桟橋上部工から切り出した RC 部材の劣化性状と構造性能，港湾空港技術研究所資料，No.1140，2006
5) 山路　徹，渡邊弘子，小牟禮建一，濵田秀則，岩波光保：海洋環境下で 30 年以上供用された桟橋上部工コンクリートの耐久性，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部門，pp.1027-1028，2002
6) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，p.488，2008.7
7) 山路　徹，横田　弘，中野松二，濵田秀則：実構造物調査および長期暴露試験結果に基づいた港湾 RC 構造物における鉄筋腐食照査手法に関する検討，土木学会論文集 E，Vol.64，No.2，pp.335-347，2008.5
8) 大即信明，下沢　治：港湾工事におけるコンクリートの品質調査報告，港湾技研資料，No.429，1982.
9) 建設省東北地方建設局酒田工事事務所：温海地区塩害橋対策技術報告書，p.6，1998.3
10) 建設省土木研究所：土木研究所資料 飛来塩分量全国調査（III）－調査結果およびデータ集－，土木研究所資料，第 2687 号，1988
11) 川村　力，谷村幸裕，曽我部正道，鳥取誠一，長谷川雅志，東川孝治：鉄道構造物の調査に基づくコンクリート中への塩化物イオン浸透に関する研究，土木学会論文集，No.781/V-66，pp.193-204，2005.2
12) 松村卓郎，西内達雄：沖縄における 13 年間の暴露実験による鉄筋コンクリートの塩害劣化に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.795-800，2008
13) 松村卓郎，金津　努，西村達雄：7 年間海岸に暴露した鉄筋コンクリート試験体への交流インピーダンス法を用いた鉄筋腐食検査手法の適用，材料，Vol.51，No.5，pp.581-586，2002.5
14) 桝田佳寛，花栄　浩，松林裕二，原　謙二，安田正雪：塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する実験，日本建築学会構造系論文報告集，第 435 号，pp.19-27，1992.5
15) Qi, L.，関　博：鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究，土木学会論文集，No.669/V-50，pp.161-171，2001.2
16) 中川裕之，田中大博，横田　優，松島　学：塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験によるひび割れモードとひび割れ発生時の腐食量，土木学会論文集 E，Vol.64，No.1，pp.110-121，2008.2
17) 永山　勝：コンクリート構造物における鉄筋腐食の非破壊モニタリングに関する研究，名古屋大学学位論文，pp.84-89，1999
18) 徳富久二：コンクリートの引張・圧縮強度分布について，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.127-128，1994
19) 大屋戸理明，金久保利之，山本泰彦，佐藤　勉：鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響，土木学会論文集 E，Vol.62，No.3，pp.542-554，2006.8
20) 山住克巳，宮本征夫，佐藤　勉：鉄筋を腐食させた RC はりの劣化状態と耐力について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.1，pp.557-562，1990
21) 松田耕作，横田　優，萩山和樹，松島　学：塩害劣化を受ける鉄筋コンクリートはりの耐荷性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.807-812，2008
22) 倉知星人，佐藤孝史，小林孝一，六郷恵哲：塩害による鉄筋の性能低下が RC はり部材の耐荷性能に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.819-824，2008
23) 小林孝一：塩害劣化した RC はり部材の曲げ耐荷性能に関する実験的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，第 6 巻，pp.231-236，2006
24) 井上寛規，檜貝　勇，中村　光：RC 部材におけるせん断補強鉄筋の効果：コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.463-468，1999
25) 斉藤成彦，高橋良輔，檜貝　勇：鉄筋の腐食分布が RC はり部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響，土木学会論文集 E，Vol.64，No.4，pp.601-611，2008.11