

塩害による鉄筋腐食が棧橋RC上部工の破壊確率に与える影響

INFLUENCE OF CORROSION OF STEEL BARS BY CHLORIDE ATTACK ON FAILURE PROBABILITY OF REINFORCED CONCRETE DECK OF WHARF

合田和哉¹
Kazuya GODA

¹正会員 博(工) 東洋建設株式会社 (〒135-0064 東京都江東区青海二丁目43番地)

For considering effective and rational maintenance strategies for port and harbor infrastructures, it is important to evaluate the load carrying capacity of the structures by the results of prediction on the progress of materials deterioration. The author have studied the influence of corrosion of reinforcing steel bars by chloride attack on failure probability of reinforced concrete (RC) deck of wharf. The failure probability for bending moment of RC deck against reaction force of the fender with corroded steel bars was calculated using First-Order Reliability Method. The calculated results indicate that the failure probability when the rate of volume decrease of steel bars(V) is less than 0.2 is similar to the probability in the case V=0, and might be higher than the allowable failure probability of wharf ($P_f=1.9 \times 10^{-3}$) when the rate of volume decrease of steel bars was greater than 5%.

Key Words : RC deck of wharf, chloride induced deterioration, corrosion, failure probability, reliability analysis

1. はじめに

港湾施設の維持管理を実施するに当たっては、将来の施設の性能低下を予測し、維持管理活動を考慮したライフサイクルマネジメントの検討が必要である。その際、港湾施設の材料劣化や変状を考慮した要求性能の照査および被害リスクの定量的評価が重要となる。

港湾施設における代表的なコンクリート部材としては、棧橋上部工が挙げられる。これまで、棧橋上部工の劣化状況と耐荷性を関連づけた研究成果としては高橋ら¹⁾の研究成果が、また劣化進行による耐荷性の低下と被害リスクを定量的に評価した検討事例としては横田ら²⁾の研究成果がある。

一方で、被害リスクを定量的に評価する手法としては、信頼性理論による破壊確率を用いる方法が挙げられる。しかし、材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造信頼性評価などは十分実施できていないのが現状である。

本研究は、棧橋上部工（鉄筋コンクリート部材）の鉄筋腐食を考慮した曲げ破壊確率に注目し、船舶接岸時の直杭式横棧橋を対象とした信頼性解析を実施した結果から、塩害による鉄筋腐食がRC上部工の曲げ破壊確率に与える影響について考察を行ったものである。

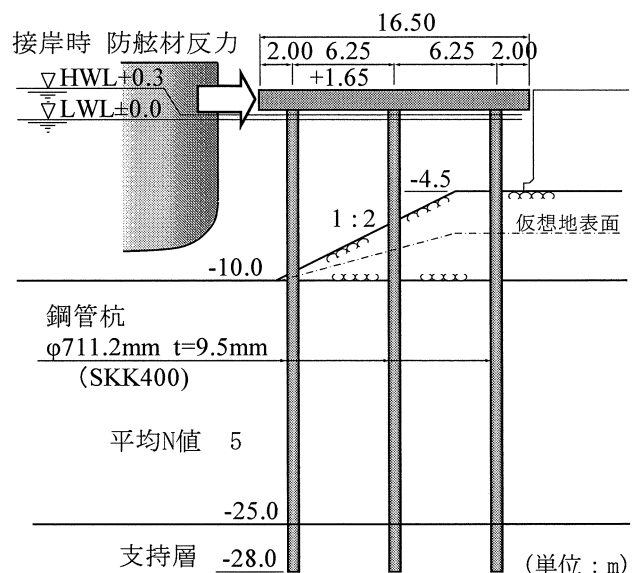


図-1 解析対象モデル（直杭式横棧橋）

2. 解析対象モデル

(1) 解析上の仮定

本研究では、以下に述べる解析上の仮定を設けて問題を単純化している。1) 塩害による梁の鉄筋腐食のみを対象とする。よって、塩害の影響を受ける下

側鉄筋の腐食量に注目した。2)部材の破壊は曲げ破壊に限定し、せん断破壊については対象としない。3)栈橋部材は船舶接岸時、地震時、暴風時等の全ての設計状態に対して安全性が確保されなければならないが、ここでは船舶接岸時のみに限定した。したがって、解析対象モデルとして設定した上部工梁断面は、船舶接岸時の照査結果のみを反映した配筋となっている。

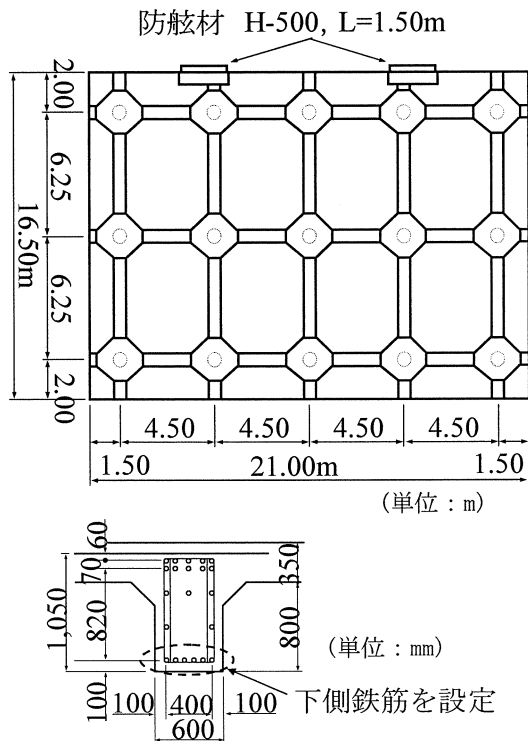


図-2 上部工モデル

表-1 上部工梁断面ケース

断 面	D-1	D-2	D-3
下側鉄筋	D22×6本	D19×7本	D19×6本
終局限界 $\gamma_i M_u / M_{ud}$	0.68	0.78	0.91
使用限界 w/w_a	0.88	0.97	1.11

表-2 梁断面の照査に用いた部分係数

部分係数		終局限界	使用限界
材料係数 γ_m	コンクリート	1.3	1.0
	鉄筋	1.0	1.0
荷重係数 γ_f	自 重	1.1	1.0
	上載荷重	1.2	1.0
	防舷材反力	1.2	1.0
構造解析係数	γ_a	1.0	1.0
部材係数	γ_b	1.1	1.0
構造物係数	γ_i	1.1	1.0

(2) 解析対象モデルの設定

解析対象モデルとして、対象船舶15,000DWTの係留施設である直杭式横棧橋を設定した。図-1に解析対象モデルの標準断面図を、図-2に上部工のモデル図をそれぞれ示す。一般に、船舶接岸時の上部工断面の照査では、法線直角方向梁に対して終局限界状態と使用限界状態の照査が行われる。また、本研究では塩害による鉄筋腐食の影響に主眼をおいていることから、対象となる鉄筋は梁の下側鉄筋である。よって、上部工梁断面として、船舶接岸時における終局限界状態および使用限界状態の照査結果に基づき、下側鉄筋量の異なる3断面を設定した。表-1に各梁断面の下側鉄筋と港湾基準に従って照査した終局限界状態および使用限界状態の結果を示すが、断面D-1は安全性に余裕のある断面、断面D-2は安全性を満足する経済的断面、断面D-3は使用限界を満たさない断面である。なお、梁断面の照査に用いた各部分係数を表-2に示す。

3. 信頼性解析

(1) 信頼性解析法

信頼性解析は、2次元骨組解析により求めた断面力をもとに一次信頼性理論（FORM：First Order Reliability Method）を用いて実施した。

2次元骨組解析モデルは、図-3のような線形弾性モデルとした。船舶接岸時における最大曲げモーメント発生点は点a近傍に位置することから、点aでの曲げモーメントが最大となる上載荷重分布を作用させた。

性能関数 g は式(1)のように定義し、部材の曲げ破壊耐力と発生曲げモーメントの差が0以下で破壊と判定した。

$$g = M_{u(coor)} - M(F, K_h, \gamma_{RC}, q) \quad (1)$$

ここに、 $M_{u(coor)}$:主筋の腐食を考慮した曲げ破壊

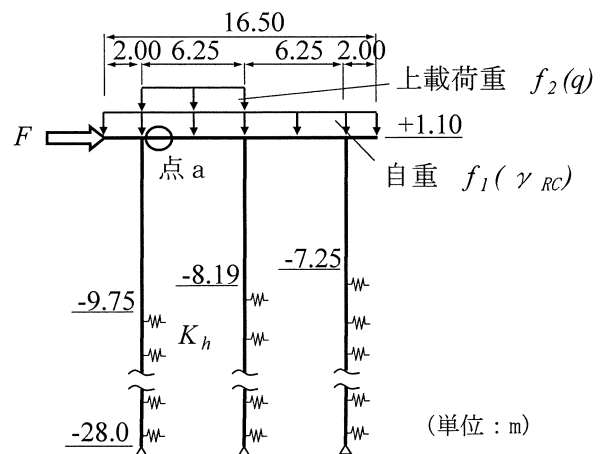


図-3 2次元骨組解析モデル

耐力, M : 発生曲げモーメント, F : 防舷材反力, K_h : 水平地盤反力係数, γ_{RC} : 鉄筋コンクリートの単位体積重量, q : 上載荷重であり, 下添え字($coor$)は腐食時の値であることを示す。

FORMでは, 性能関数の偏微分を行う必要があるが, ここでは確率変数が互いに独立であるとして, 曲げ破壊耐力に係る偏微分は解析的に, 発生曲げモーメントに係る偏微分は2次元骨組解析から数値的に, それぞれ求めた。

(2) 確率変数

信頼性解析に用いた確率変数の統計量と分布形を表-3に示す。曲げ破壊耐力算定精度, 断面諸元精度, 鉄筋の降伏強度, コンクリートの圧縮強度は長尾³⁾の研究を基に, その他の確率変数は港湾基準⁴⁾の設定を基に, それぞれ設定した。

上部工の塩害による鉄筋腐食量を表す変数としては, 鉄筋の断面減少率 V_r を用いた。後述する信頼性解析結果では, 同変数を確定値とした場合と確率変数とした場合のケーススタディを行っている。確率変数とする場合には, 鉄筋腐食量が常に正值であることから対数正規分布と仮定した。

表-3 信頼性解析に用いた確率変数

確 率 変 数	平 均 値	変動係数	分布形
防舷材反力 F	191.40 kN	25 %	対数正規
水平地盤反力係数 K_h	10000 kN/m ³	76 %	対数正規
上部工の単位体積重量 γ_{RC}	23.52 kN/m ³	2 %	正 規
上載荷重 q	10.00 kN/m ²	40 %	正 規
曲げ破壊耐力算定精度 λ	1.13	14 %	正 規
断面諸元精度 ξ	1.00	5 %	正 規
鉄筋の降伏強度 f_y	393.30 N/mm ²	5 %	正 規
コンクリート圧縮強度 f_c	26.40 N/mm ²	5 %	正 規

(3) 鉄筋腐食後の曲げ破壊耐力

曲げ破壊耐力の算定は式(2)によった。横田ら²⁾は, 加藤ら⁵⁾の研究成果から, 梁部材の鉄筋腐食後の曲げ破壊耐力についての評価式を示している。式(2)は, 同式に曲げ破壊耐力算定精度 λ と断面諸元精度 ξ を確率変数として加味したものである。

$$M_{u(coor)} = \lambda \xi A_{s(coor)} f_{y(coor)} d \left\{ 1 - (0.60 p_{s(coor)} f_{y(coor)} / f'_c) \right\} \quad (2. a)$$

$$f_{y(coor)} = f_y (1 - 1.32 V_r) \quad (2. b)$$

$$p_{s(coor)} = A_{s(coor)} / (bd) \quad (2. c)$$

ここに, λ : 曲げ破壊耐力算定精度, ξ : 断面諸元精度, A_s : 鉄筋の断面積, f_y : 鉄筋の降伏強度, d : 有効

高さ, p_s : 鉄筋比, f'_c : コンクリートの圧縮強度, V_r : 鉄筋の平均断面減少率, b : 腹部幅である。

4. 信頼性評価

(1) 腐食量を確定値とした場合の解析結果

鉄筋の腐食による断面減少率を確定値として信頼性解析を行った結果を以下に示す。解析ケースは, D-1, D-2, D-3の各断面に対して, それぞれ平均断面減少率 V_r を0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4とした計15ケースである。

a) 平均断面減少率と信頼性指標との関係

信頼性解析から得られた鉄筋腐食による平均断面減少率と信頼性指標との関係を図-4に示す。いずれの断面に対しても, 鉄筋の腐食に伴って信頼性指標の低下量が漸増する傾向にあり, 同関係は2次曲線によって精度良く近似できる結果であった。

平均断面減少率と破壊確率との関係として示したものが図-5である。同図に示す破壊確率 $P_f=1.9 \times 10^{-3}$ (信頼性指標 $\beta=2.90$)は, 港湾基準に示される栈橋の目標破壊確率(船舶作用による変動状態)である。同目標破壊確率は, 杭に対して設定されたものではあるが, 解析結果を考察するための一つの目安となる。平均断面減少率が0.0の点は, 鉄筋が腐食していない状態を表すが, 全ての断面ケースにお

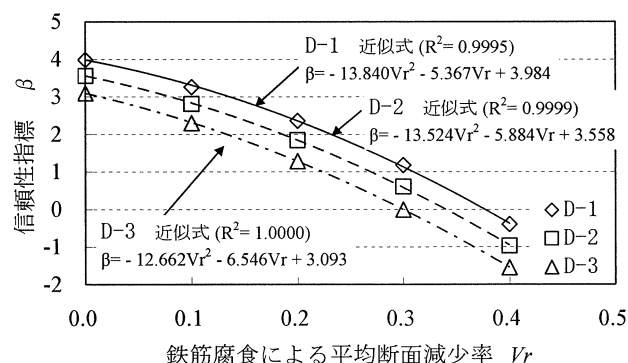


図-4 平均断面減少率と信頼性指標の関係

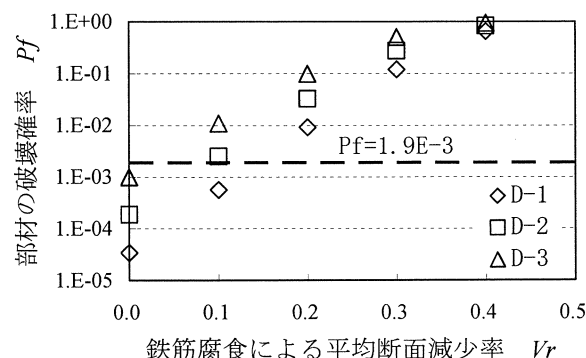


図-5 平均断面減少率と破壊確率

いて目標破壊確率を下回っており、港湾基準の部材照査法によれば、建設直後から鉄筋腐食が始まるまでの期間において、十分な安全性を有していることが確認できる。しかし、港湾基準を満たす断面D-1およびD-2においても、鉄筋の平均断面減少率が0.1程度以上となると目標破壊確率を超える結果となる。よって、供用期間中にわたって部材の安全性を確保するためには、設計時点での耐久性の照査あるいは適切な維持管理の実施が重要であると言える。

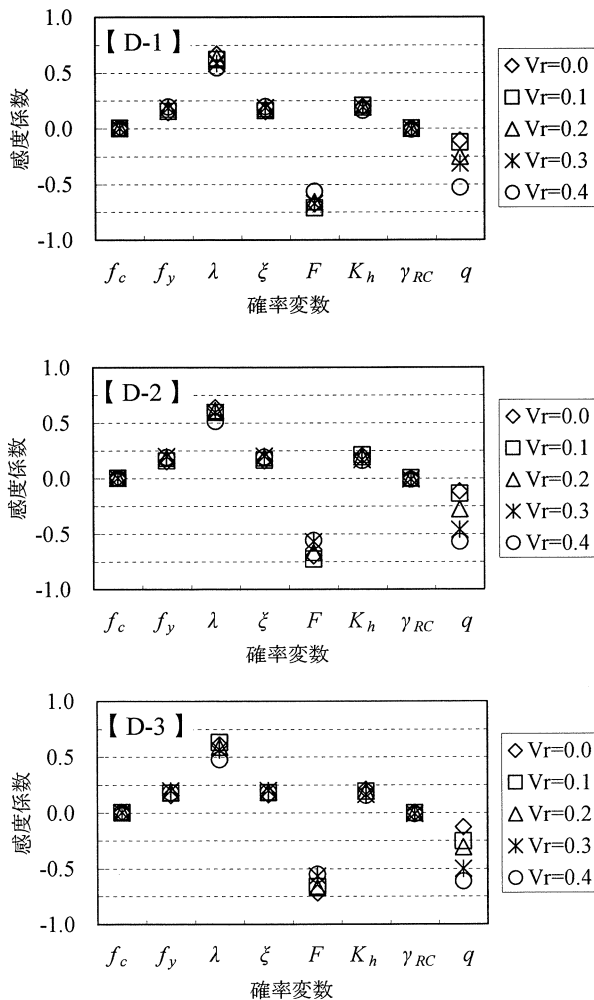


図-6 感度係数（鉄筋腐食量確定値）

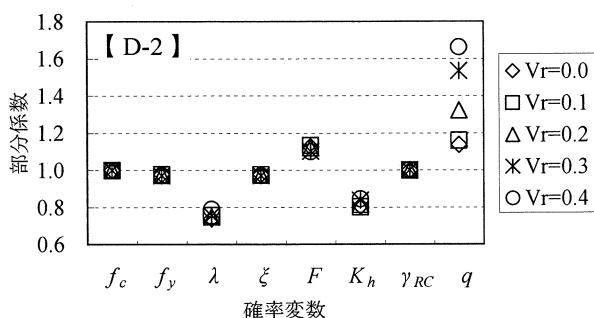


図-7 部分係数（鉄筋腐食量確定値）

b) 感度係数

解析から得られた感度係数を図-6に示す。設定した断面の影響はあまり見られず、全断面とも同じ傾向を示す。曲げ破壊耐力算定精度 λ 、防舷材反力 F の感度が高く、次いで水平地盤反力係数 K_h 、上載荷重 q の感度が高い。また、平均断面減少率 Vr が高くなるほど上載荷重の感度が高くなる傾向が見られる。これは、断面の曲げ耐力が小さくなることで断面破壊を起こす曲げモーメントが小さくなり、結果的に曲げモーメントを直接増加させる効果のある上載荷重の影響が大きくなるためである。

図-7は、得られた感度係数を用いて、部分係数を試算した結果である。各断面で傾向が変わらないことから、ここでは断面D-2の結果のみを示した。なお、目標破壊確率は、前述した港湾基準に示される $P_f=1.9 \times 10^{-3}$ （信頼性指標 $\beta=2.90$ ）を用いた。1モデルに対する検討結果のみであり、部分係数について議論する段階にはないが、曲げ破壊耐力算定精度 λ は0.7～0.8程度、防舷材反力 F は1.1～1.2程度、水平地盤反力係数 K_h は0.7～0.9程度となる。また、上載荷重 q については、鉄筋の腐食量の増加に伴って、1.1程度から1.7程度にまで増加する傾向にある。このことから、栈橋の利用条件等によって上載荷重が異なる場合にも、上載荷重の感度係数や部分係数が大きく異なる可能性があると考えられる。

c) 劣化の進行に伴う破壊確率の変化

図-8は、鉄筋腐食の経時変化を試算し、この結果に図-4の関係をあてはめることで、破壊確率の経時変化を示したものである。一般に、鉄筋位置における塩化物イオン量の発錆限界値は 1.2 kg/m^3 とされている。この値を超えると鉄筋腐食は急速に進行し、腐食生成物の体積膨張により、かぶり部分にひび割れが発生する。港湾基準⁴⁾では性能の経時変化に対する検討として、鉄筋腐食が生じ腐食ひび割れが形成されるまでの時点を超えて限界状態と定め、限界塩化物イオン量を 2.0 kg/m^3 と定めている。このことから、安全側の評価ではあるが、鉄筋位置でのコンクリートに含まれる塩化物イオン量が 2 kg/m^3 となった時点で腐食ひび割れが発生すると仮定した。

鉄筋位置での塩化物イオン量の経年変化は、Fickの第2法則に従うとして次式より算定した。

$$C(x,t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (3)$$

ここに、 $C(x,t)$ ：コンクリート中の塩化物イオン量 (kg/m^3)、 C_0 ：表面塩化物イオン量 (kg/m^3)、 x ：コンクリート表面からの距離 (cm)、 t ：経過時間 (y)、 D ：見かけの拡散係数 (cm^2/y) である。なお、表面塩化物イオン量、見かけの拡散係数については、港湾基準に従って設定した。

かぶりにひび割れが発生した後の鋼材の腐食速度は、次式より算定した。

$$V_r = \frac{4ac}{\Phi \gamma_{Fe}} e^{\frac{\alpha}{a} t} \quad (4)$$

ここに、 γ_{Fe} ：鉄筋の単位体積重量(mg/cm^3)、 a ：腐食量とひびわれ幅を関連付ける係数($1500\text{mg}/\text{cm}^2$ と仮定)、 c ：腐食による初期のひび割れ幅(0.005cm と仮定)、 Φ ：鉄筋径(cm)、 α ：腐食速度とひび割れ幅の関係付け係数($220\text{mg}/\text{cm}^3/\text{y}$ と仮定)、 t ：時間(y)である。

図-8には、参考として古玉ら⁶⁾に示される劣化度と鉄筋腐食に関する推定結果の関連付けを示した。いずれの断面においても、鉄筋の平均断面減少率 $V_r=1\%$ 程度から急激に破壊確率が増加する傾向にある。また、適切に設計された断面D-1およびD-2は、それぞれ $V_r=14.7\%$ および 9.3% において目標破壊確率を超える結果となった。よって、供用期間中に目標破壊確率を超えないためには、劣化期の部材を発生させないことが維持管理上の一つの目安となる。

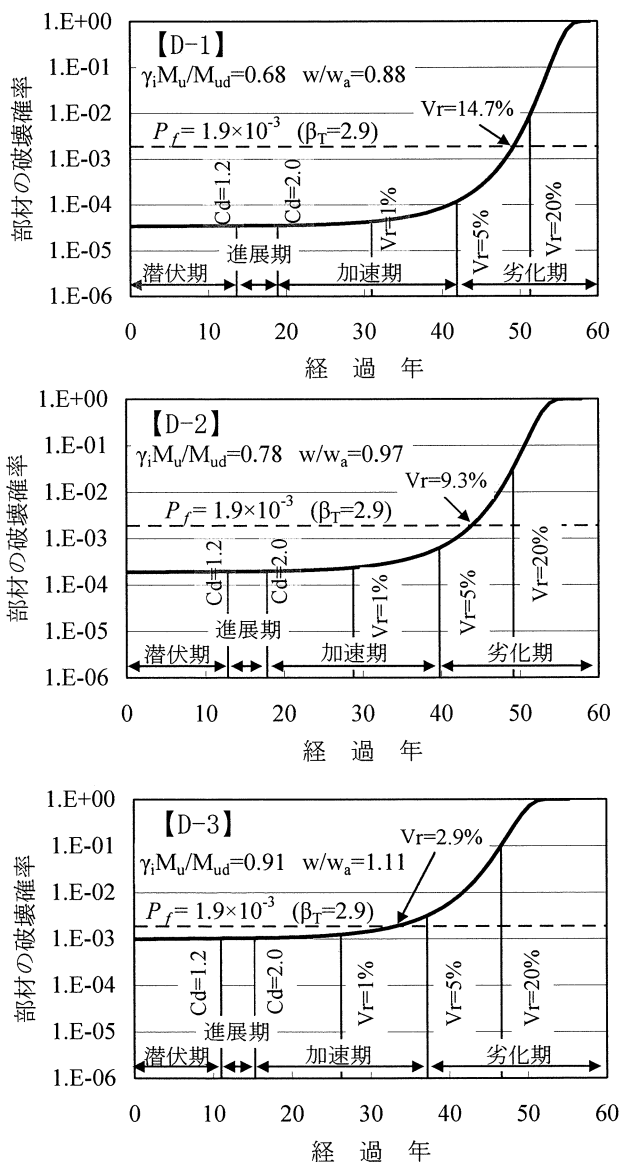


図-8 破壊確率の経時変化

(2) 腐食量のばらつきが信頼性指標に与える影響

鉄筋の腐食量は、栈橋1施設あるいは1ブロック内でみればかなりのばらつきがあることが想定される。ここでは、鉄筋腐食量のばらつきと破壊確率との関係について考察する。

以下に、上部工断面D-2に対し、断面減少率を対数正規分布と仮定して、変動係数 V が0.2, 0.5, 1.0, 2.0である場合の信頼性解析結果を示す。前述の腐食量を確定値とした解析結果において9.3%で目標破壊確率を上回ることから、平均断面減少率の範囲を0~0.2とした。仮定した断面減少率の確率分布のうち、平均断面減少率 $V_r=0.05$ および0.20の場合を選び図-9に示す。

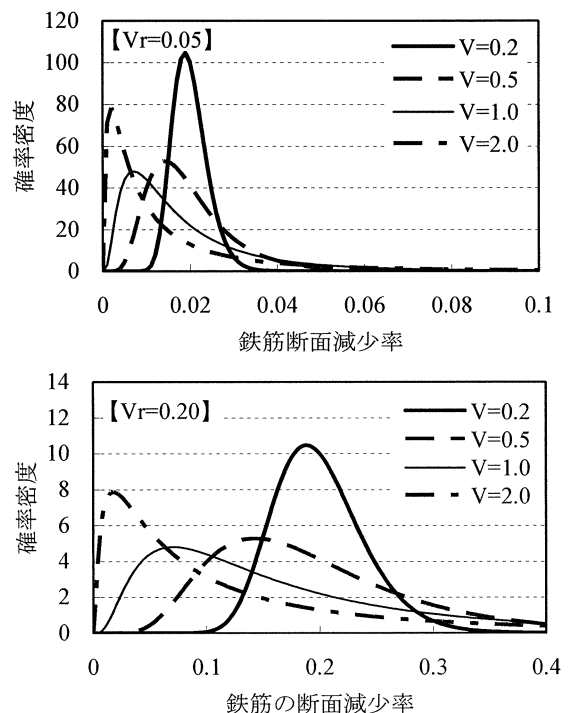


図-9 鉄筋の断面減少率の確率密度

平均断面減少率と信頼性指標との関係を図-10に、破壊確率との関係を図-11にそれぞれ示す。変動係数 $V=0.2$ では、腐食量を確定値とした場合の信頼性指標と大きく変わらない。しかし、変動係数 V が大きくなるに従って信頼性指標は小さくなり、 $V=1.0$ では $V_r=0.04$ で、 $V=2.0$ では $V_r=0.02$ で、それぞれ断面減少率を確定値($V=0.0$)とした結果から大きく離れる傾向にある。

図-12は、信頼性解析で求められた破壊点の平均断面減少率をプロットしたものである。変動係数が大きくなると破壊点での断面減少率が大きくなる傾向にあり、 $V=1.0$ では $V_r=0.05$ で、 $V=2.0$ では $V_r=0.02$ で断面減少率0.3近傍に移行している。現実の腐食量は、建設年からの経過年数に応じて限界値が存在するはずであり、図-9に示した $V_r=0.05$ の断面減少率の確率密度に対して0.3近傍に破壊点が見れるこ

とについては、実際の腐食量調査等からの精査が必要であると考えられる。また、腐食量のばらつきが大きい場合には、仮定する鉄筋腐食量分布の設定に注意が必要であるとも言える。よって、実際の栈橋上部工の破壊確率を求めるにあたっては、鉄筋の腐食量を詳細に調査し、現実に近い分布を定義することが重要となる。

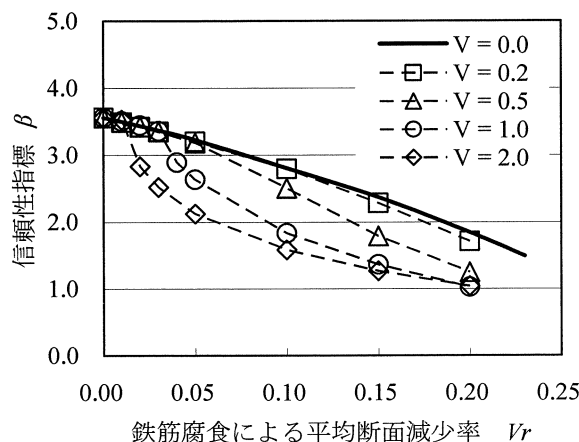


図-10 平均断面減少率と信頼性指標の関係

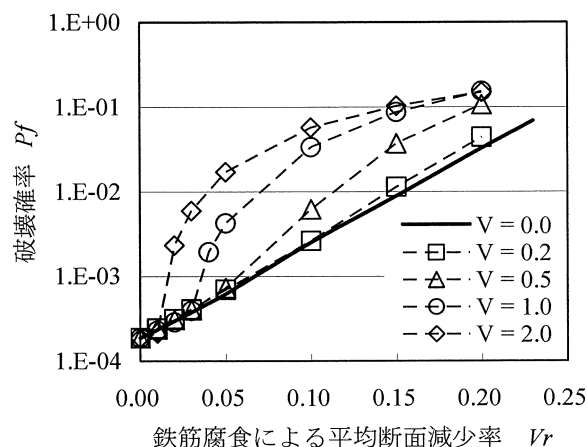


図-11 平均断面減少率と破壊確率

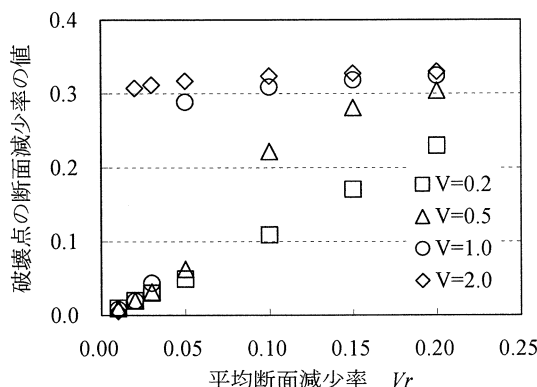


図-12 破壊点の断面減少率

5. おわりに

船舶接岸時の直杭式横栈橋を対象として、鉄筋腐食を考慮した信頼性解析を実施し、RC上部工の曲げ破壊確率を試算した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 鉄筋の平均断面減少率 $V_r=1\%$ 程度までは顕著な破壊確率の増加はみられないが、 $V_r=1\%$ 程度から急激に破壊確率が増加する。
- 2) 本検討モデルでは、適切に設計された断面に対して $V_r=9\%$ 以上で目標破壊確率を上回る結果となった。よって、劣化期の部材を発生させないことが、維持管理上の目安となる。
- 3) 鉄筋腐食による断面減少率を対数正規分布と仮定し、確率変数として扱った場合、断面減少率の変動係数が0.2程度より大きくなると破壊確率への影響が顕著になる。
- 4) 腐食量のばらつきが大きい場合には、仮定する鉄筋腐食量分布の設定に注意が必要である。

なお、本研究は解析上の仮定を設けた信頼性解析の一例にしかすぎず、栈橋接岸時以外の設計状態や曲げ破壊以外の限界状態、あるいは耐久信頼性の考慮等、今後の課題は多い。

謝辞：本研究は港湾信頼性設計法研究会（国土技術政策総合研究所）における活動成果であり、長尾室長をはじめとするメンバーの方々にご指導ご助言を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋宏直，横田弘，岩波光保：港湾施設のアセットマネジメントに関する研究—構造性能の低下予測とアセットマネジメントの試行例—，国土技術政策総合研究所研究報告，No.29，2006。
- 2) 横田弘，山内浩，加藤絵万，岩波光保：既設栈橋のライフサイクルシナリオに関する検討，港湾空港技術研究所資料，No.1114，2005。
- 3) 長尾毅：ケーソン式防波堤の終局曲げ安全性照査に関する信頼性設計手法の提案，土木学会論文集，No.696/I-58，pp.173-184，2002。
- 4) 港湾の施設の技術上の基準・同解説，社団法人日本港湾協会，2007。
- 5) 加藤絵万，岩波光保，横田弘，中村晃史，伊藤始：繰返し荷重を受けるRCはりの構造性能に及ぼす鉄筋腐食の影響，港湾空港技術研究所資料，No.1079，2004。
- 6) 古玉悟，田邊俊郎，横田弘，濱田秀則，岩波光保，日比智也：栈橋の維持補修マネジメントシステムの開発，港湾空港技術研究所資料，No.1001，2001。