

論文 腐食鉄筋の付着すべり判定を考慮した塩害劣化 RC 橋のせん断安全性評価

瀬戸 亮太*1・森川 英典*2・笠松 大輔*3

要旨: 現在劣化が顕在化している橋梁の多くには付着力に乏しい丸鋼が用いられており、鉄筋の腐食に伴い鉄筋とコンクリートの付着力が低下することを踏まえると、せん断引張破壊の可能性を考慮に入れた安全性評価が行われることが望ましい。本研究では、既報の鉄筋の付着すべりに起因するせん断引張破壊を判定基準として考慮した FEM 解析手法を塩害劣化 RC 橋の耐荷力解析に導入し、劣化予測のモンテカルロシミュレーションの結果を用いて解析を行うことでせん断破壊に対する安全性評価を行った。また、その結果を既報の曲げ安全性指標と比較し総合的な安全性評価を行うことでせん断安全性評価の有効性について考察した。

キーワード: RC 橋, 塩害, 劣化予測, せん断引張破壊, FEM 解析, 安全性評価

1. はじめに

維持管理においては、RC 構造物の劣化に対する点検を行い、その結果に基づく劣化予測により予定供用期間中の安全性を評価することが重要である。これまで材料強度、環境条件などの不確定性を考慮した曲げ破壊に対する塩害劣化 RC 橋の安全性評価手法が主として検討されている¹⁾。しかし、材料強度や環境条件等による鉄筋腐食の不確定性を考慮すると、曲げ破壊よりもせん断破壊が先行する可能性も危惧され、曲げとせん断に対する総合的な安全性評価を行うことが必要であると考えられる。せん断に対する安全性評価手法の検討は狩野²⁾により行われ、その結果、コンクリート強度が低いレベルであるときにはせん断安全性評価を行うことが有用であると示している。一方、劣化が顕在化している橋梁の多くには付着力に乏しい丸鋼が用いられており、鉄筋腐食に伴い鉄筋とコンクリートの付着力が低下することも踏まえると、せん断引張破壊の可能性を考慮に入れた安全性評価が行われることが望ましい。せん断引張破壊とは、鉄筋の付着破壊やひび割れ開口部での鉄筋のダウエル作用によるコンクリートの鉄筋軸に沿う割裂破壊であり脆性的なせん断破壊形式の一つである。

本研究では、対象橋梁について現場試験結果に基づく劣化因子の不確定性を考慮した劣化予測より推定した腐食減量率を用いて、耐荷力解析および断面力解析を行った。なお、その際の耐荷力解析については著者らが提案した既報³⁾の腐食鉄筋の付着すべりに起因するせん断引張破壊の判定と 4 直線で近似した付着ばね構成則を新たに導入した FEM 解析により行った。そして、せん断耐荷力と発生せん断力により安全性指標を算出し、せん断破壊に対する安全性評価を検討した。またそれらの

結果を曲げ安全性指標と比較することで、総合的な安全性評価を行った。

2. 対象橋梁概要

表-1 に対象橋梁の諸元等を、図-1 に劣化状況として現場試験のひび割れ・浮き調査結果をそれぞれ示す。

表-1 対象橋梁諸元

対象橋梁略称	M橋	
架設年度	1962年	
調査時の橋齢	44年	
橋種・上部構造形式	RC単純T桁橋	
径間割	1径間	
橋長さ(支間長)	10.6m (-)	
設計荷重	T-20	
補強年(増桁)	-	
構造概要	主桁	本数:4, 間隔:2.00m
	横桁	本数:3
	舗装	コンクリート
	高欄	コンクリート
海岸からの距離	約15m	

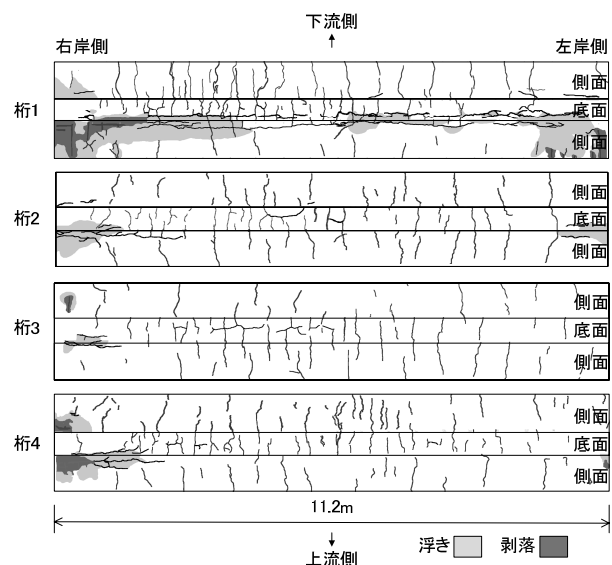


図-1 ひび割れ・浮き調査結果

*1 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (正会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 教授 工博 (正会員)

*3 西日本旅客鉄道株式会社

2.1 M橋概要

M橋は、海岸から約15mの位置で供用されている4主桁の単径間単純RCT桁の河川橋梁である。現場試験結果より海岸に近い桁（図-1の桁1）では鉄筋腐食に伴うひび割れやかぶりのほく落が見られ主鉄筋およびスターラップが著しく腐食している。しかし、その他の桁においては腐食ひび割れが確認されず、比較的軽微な劣化段階であることが確認された。なお、下流側より桁1, 桁2, 桁3, 桁4とする。

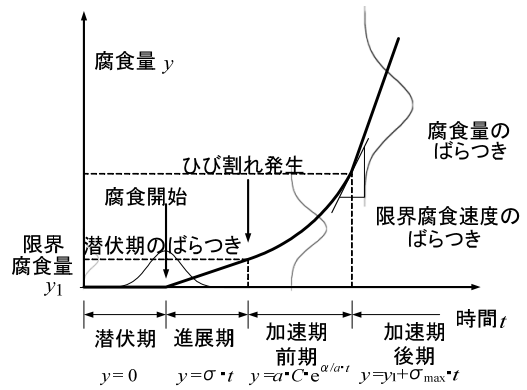


図-2 劣化曲線概要

3. 現場試験結果に基づく主鉄筋の劣化予測

3.1 主鉄筋の劣化予測手法

本研究では、劣化区分を図-2に示すように潜伏期、進展期、加速期、劣化期に分け、劣化区分ごとに劣化予測手法を構築し、劣化因子の不確定性を考慮して、供用開始時からの経時的な劣化予測を、試行回数1000回のモンテカルロシミュレーションにより行った。またその際に、各劣化区分は連続であるとし、連続性を考慮した劣化予測を行った。劣化予測において用いる劣化因子の初期設定を表-2に示す。劣化因子とは、各橋梁から採取されたコンクリートコアの塩分分析から得られる表面塩化物量、初期含有塩化物量、拡散係数に加え、かぶりが挙げられる。桁ごとにこれらの平均値と標準偏差を算出し、正規分布あるいは対数正規分布に従うように分布させることで、劣化の不確定性を表現している。潜伏期ではFickの拡散方程式⁴⁾を用いてコンクリート中の塩分量が鋼材位置における塩化物イオンの鉄筋腐食発生限界濃度 $C_{lim}=1.2(\text{kg}/\text{m}^3)$ に至る時点として評価を行い、進展期では加速期との連続性を考慮し、加速期初期の腐食速度を進展期の腐食速度と仮定し劣化予測を行い、加速期以降では図-3の三者関係⁴⁾を用い劣化予測を行った。また、実橋現場試験における鉄筋腐食モニタリングの分極抵抗より腐食速度を推定し、点検時の速度に合うように劣化予測曲線を補正することでモニタリング計測点での腐食量を算出する。そして、ひび割れ浮き調査より得られる計測点でのひび割れ面積密度と腐食量の相関関係から、点検時全桁の腐食量を推定している。その後、点検時の腐食量に劣化予測の腐食量を同定する形で劣化予測曲線の補正を行っている。このような補正を行うことで桁内の腐食のばらつきを表現できる。

表-2 劣化因子の初期設定値

対象橋梁	M橋			
	桁1	桁2	桁3	桁4
主鉄筋径	φ28			
スターラップ鉄筋径	φ9			
主鉄筋かぶり [mm]	平均値			
	標準偏差			
スターラップ鉄筋かぶり [mm]	平均値		25.0	
	標準偏差		9.3	
表面塩化物イオン量 [kg/m ³]	10.04	3.14	3.95	3.93
	標準偏差			
初期含有塩化物イオン量 [kg/m ³]	平均値			
	標準偏差			
拡散係数 [cm ² /year]	5.13	2.20	2.81	3.03
	標準偏差			
主鉄筋限界腐食量 ⁵⁾ [mg/mm ²]	平均値			
	標準偏差			
スターラップ限界腐食量 ⁶⁾ [mg/mm ²]	平均値			
	標準偏差			
限界腐食速度 [mg/mm ² /year]	平均値			
	標準偏差			

d: かぶり[mm], φ: 鉄筋径[mm]

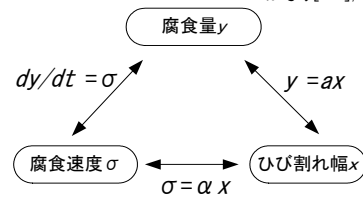


図-3 加速期における関係⁴⁾

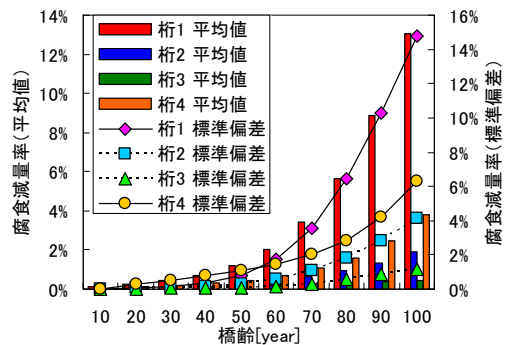


図-4 主鉄筋の劣化予測結果

3.2 主鉄筋の劣化予測結果

図-4にM橋における主鉄筋の劣化予測結果を示す。M橋は橋齢50年頃まで全体的に腐食量が小さいものの、桁1ではその後指数関数的に腐食減量率の平均値が増加している。これは、桁1の下流側端部ではかぶりコンクリートが不足しており、図-1に示すように大きな腐食が発生していることが原因である。

4. 現場試験結果に基づくスターラップの劣化予測

4.1 スターラップの劣化予測手法²⁾

スターラップの各劣化区分には、主鉄筋と同様に図-2を用いた。また、劣化因子の初期設定値については、表-2に示す値を用いており、かぶりやひび割れ発生限界腐食量などが主鉄筋の場合と異なる。スターラップのかぶりは、現場試験においてコンクリートのほく落部およびはつり部より計測した値の平均を参考に設定した。

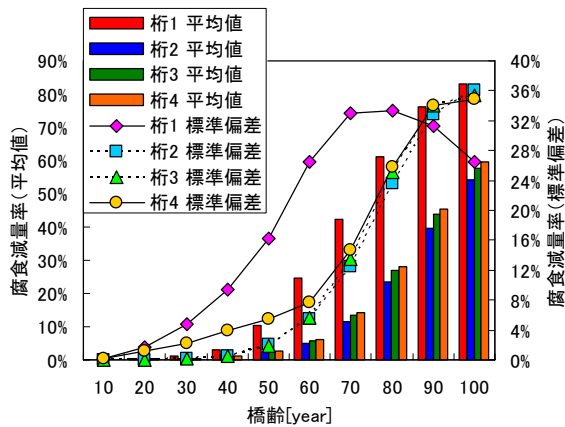


図-5 スターラップの劣化予測結果

4.2 スターラップの劣化予測結果

図-5にM橋におけるスターラップの劣化予測結果を示す。主鉄筋の劣化予測結果に比べ腐食レベルが高いことが分かる。これは、スターラップの場合、劣化予測結果への影響度が大きいかぶり値が小さいことによるものである。桁毎にみると主鉄筋と同様に外観に大きな変状が見られる桁1の経年での腐食減量率が大きく、桁2, 3, 4に関してはそれ程大きな差異は生じていない。

5. 主鉄筋劣化予測結果に基づく断面力解析

5.1 断面力解析概要

本研究では、図-6に示すはり格子モデルを用いたFEM解析より断面に発生するせん断力を算出した。載荷荷重はB活荷重L載荷とし、実データに基づき不確定性を考慮している。表-3に解析の載荷荷重諸元を示す。桁断面剛性の低下はその要因を塩害による鉄筋腐食の影響のみとし、モンテカルロシミュレーションによる劣化予測結果の鉄筋腐食減量率を用いて鉄筋断面積の減少による鉄筋剛性の低下で次式⁷⁾を用いて表わしている。

$$K' = K \{ (1 - \xi) + \xi \cdot n \} \quad (1)$$

$$n = 1 - 1.13 \cdot \Delta w \quad (2)$$

ここで、 K' ：腐食後の断面剛性、 K ：健全時の断面剛性、 n ：弾性係数比、 Δw ：鉄筋腐食減量率

また ξ は、腐食減量率を変数として断面剛性を求めるための係数である。見かけの降伏強度および弾性係数の低下と付着剛性の低下を考慮したFEM解析に基づき、スパン中央における発生曲げモーメントと曲率の関係(M- ϕ 関係)を求め、鉄筋降伏点までの近似曲線の勾配をその平均断面剛性値とし、鉄筋の腐食減量率との関係から断面剛性低下式を算出した。その結果、M橋は $\xi=0.308$ となった。

5.2 断面力解析結果

断面力解析の結果を図-7に示す。荷重分配は、中桁に比べ外桁の断面力が大きくなっている。M橋では経年での断面力の変化はあまりみられない。

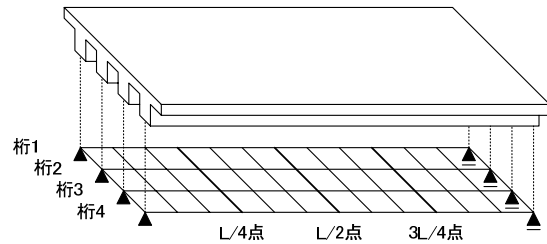


図-6 断面力解析モデル

表-3 M橋断面力解析載荷荷重諸元

対象橋梁		M橋
活荷重[kN]	平均値	610
	標準偏差	101
死荷重[kN]		786

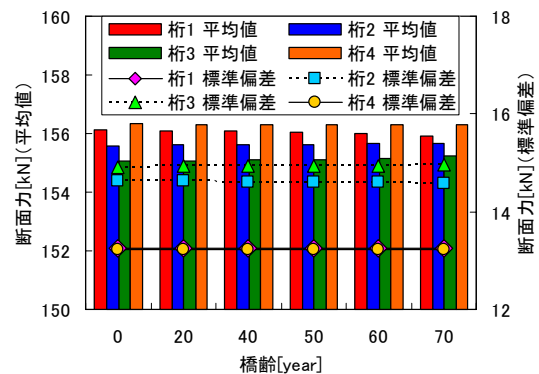


図-7 断面力解析結果

6. せん断破壊形式を考慮した耐力力解析

6.1 耐力力解析概要

2次元のFEM解析モデル²⁾および解析諸元を図-8、表-4に示す。本モデルは道路橋示方書の設計方法に準拠し、単独桁のモデルとした。そうすることで信頼性解析において安全側に評価を行うことができる。載荷荷重は道路橋示方書に準じ、せん断力に最も不利な応力になるようにスパン長の3/4の区間に等分布荷重を載荷した。コンクリート要素は平面応力要素、鉄筋(主鉄筋とスターラップ)は線要素、付着バネの構成則にはコンクリート要素と鉄筋要素の接触に付着を考慮したバネ要素を導入した。材料構成則はコンクリートの圧縮側の応力ひずみ関係をコンクリート標準示方書⁸⁾に準じトリリニアでモデル化し、引張側は引張限界ひずみまでを弾性範囲とし、引張限界ひずみ以降は引張軟化を考慮した。引張軟化の力学モデルには仮想ひび割れモデルを分布ひび割れモデルに適用したものをを用いた。また鉄筋要素は完全弾塑性でモデル化した。付着バネ要素は、図-9に示す著者らが提案した既報³⁾の4直線近似モデルを用いた。最大付着応力 τ_{max} までは菅ら⁹⁾の式(3)をすべりはじめの0.002mm、付着強度として使用される0.002Dmm、 τ_{max} の三点で傾きを変更する3直線モデルにより近似した。ここで、 τ_{max} は、寄特¹⁰⁾が提案している鉄筋径とかぶり考慮した式(4)で求めたひずみ S_{max} 時の付着応力とする。なお、本モデルでは付着バネの軟化は考慮していない。そこで、直線近似した軟化の勾配より軟化が終了す

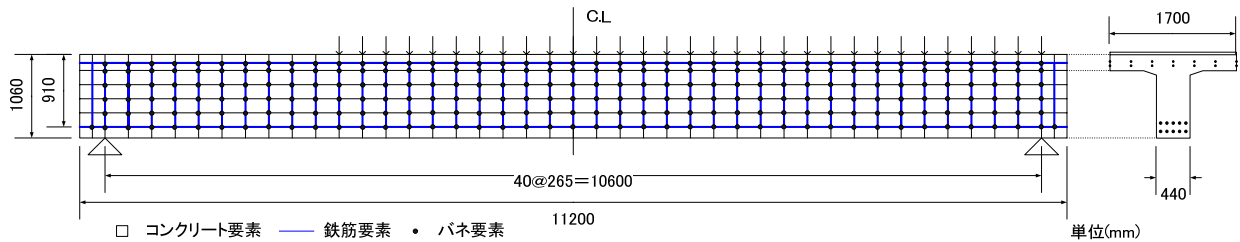


図-8 FEM 解析モデル

表-4 M橋耐荷力解析諸元

対象橋梁		M橋	
コンクリート要素	圧縮強度 [N/mm ²]	平均値	28.2
		標準偏差	5.1
	引張強度 [N/mm ²]	平均値	2.1
		標準偏差	圧縮強度の標準偏差に準じる
コンクリート要素	静弾性係数 [kN/mm ²]	平均値	27
		標準偏差	圧縮強度の標準偏差に準じる
コンクリート要素	引張限界ひずみ [μ]	平均値	79
		標準偏差	圧縮強度の標準偏差に準じる
鉄筋要素	降伏強度 [N/mm ²]		295
	弾性係数 [kN/mm ²]		200.0
	降伏ひずみ [μ]		1475
	主鉄筋		10-φ28
	スターラップ		4-φ9
	圧縮鉄筋		16-φ13

際のすべり S' を算出し、バネが軟化により解放するエネルギーの計算を行った。本解析においてすべりが τ_{max} 到達時のすべり S_{max} を超えた後、軟化により解放されるのと等価なエネルギーが作用するすべり S'' が生じた場合を付着バネ要素の付着限界とした。付着バネ構成則作成分に用いた式を以下に示す。

$$\tau = 0.4 \times 0.9 (f_c')^{2/3} \left[1 - \exp \left\{ -40 (S/D)^{0.5} \right\} \right] \quad (3)$$

$$S_{max} = 0.09 (C/D) \quad (4)$$

$$I = 0.006C + 0.417 \quad (5)$$

ここで、 f_c' : コンクリート圧縮強度 (N/mm²)、 S : すべり量 (mm)、 D : 鉄筋径 (mm)、 C : かぶり厚 (mm)、 I : 軟化勾配

鉄筋腐食による性能低下は、桁ごとに得られる劣化予測のモンテカルロシミュレーションから算出された1000通りの腐食減量率を用いて各鉄筋の力学的性能および付着性能を低下させることで表現した。本研究で用いた式⁸⁾を以下に示す。

$$E_{cs} = (1 - 1.13 \cdot \Delta w) \cdot E_{ss} \quad (6)$$

$$f_{cy} = (1 - 1.98 \cdot \Delta w) \cdot f_{sy} \quad (7)$$

ここで、 E_{cs} : 腐食後の鉄筋弾性係数、 E_{ss} : 健全時の鉄筋弾性係数、 f_{cy} : 腐食後の鉄筋降伏強度、 f_{sy} : 健全時の鉄筋降伏強度

なお、式 (6)、(7) は腐食減量率 35% までのデータにおいて評価されている式であり、腐食減量率が 35% を超える時の評価を行う場合の精度は保証されないものと考えられる。しかし、劣化予測から得られる腐食減量率はばらつきが大きいため、表-5 に示すように比較的早い段階で腐食減量率が 35% を超えるケースが生じる。本解析では主鉄筋およびスターラップ劣化予測結果の腐

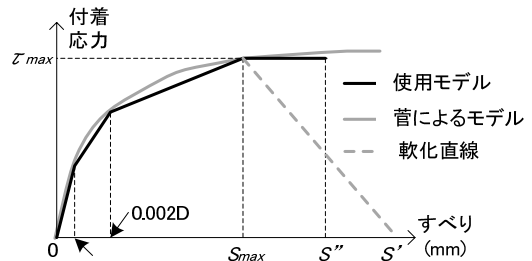


図-9 付着バネ構成則

表-5 腐食減量率 35%以上の存在確率 (スターラップ)

橋齢 [year]	M橋			
	桁1	桁2	桁3	桁4
40	1.2%	0.0%	0.0%	0.2%
50	2.2%	0.0%	0.0%	0.3%
60	13.6%	0.1%	0.1%	0.5%
70	26.5%	0.7%	0.9%	1.6%

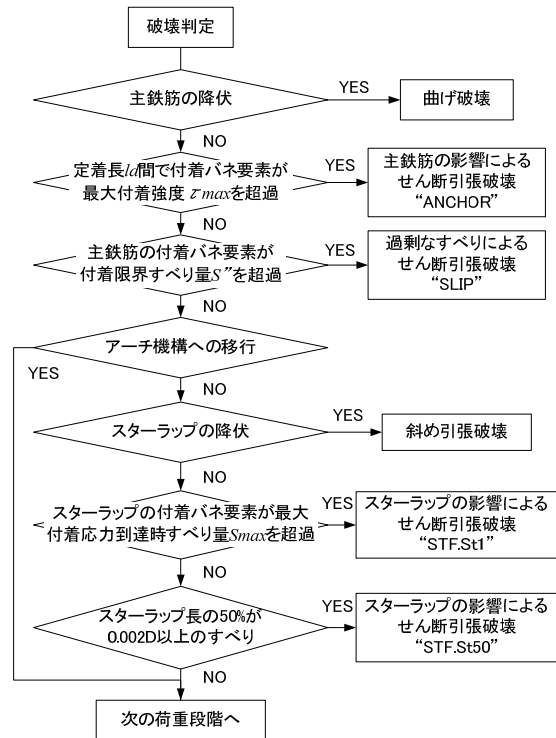


図-10 破壊判定フロー

食減量率の存在確率より対象橋梁 M 橋の評価対象期間を橋齢 50 年までと設定した。

また、著者らは既往研究³⁾で、せん断引張破壊は主鉄筋の付着低下の影響によるものとスターラップの付着低下の影響によるものとでメカニズムが異なることを示した。スターラップの付着が小さい場合、斜めひび割れの開口に対して十分に抵抗できず、急激なひび割れ開口によりスターラップに大きな引張力が作用し、スターラ

ップが早期に降伏することから斜めひび割れが早期に引張鉄筋位置に到達する。ダウエル作用により抵抗するものの、割裂ひび割れの進展によりせん断引張破壊で終局する。それらのメカニズムに基づき FEM 解析上で脆性的な破壊であるせん断引張破壊の兆候を捉えるための破壊判定の基準を図-10のように設定した。以下に示す耐荷力解析結果は図-10のせん断引張破壊判定を導入した FEM 解析により行った。

6.2 せん断引張破壊判定を導入した耐荷力解析結果

図-11にM橋の耐荷力解析のモンテカルロシミュレーション結果の平均値を示す。比較のため、せん断引張破壊の判定を導入していない場合の結果も同図に示す。なお以下では、せん断引張破壊の判定を導入した場合の解析を新解析、未導入の場合を旧解析と称す。また、旧解析における付着バネ構成則は、鉄筋の引抜試験を基にトリリニアでモデル化したものを用いている。

旧解析では、橋齢50年でも耐荷力の低下はほとんど生じていない。対して新解析では全桁において耐荷力の低下が生じている。特に、桁1では40年あたりで大きく耐荷力が低下している。実際にここ数年でM橋では桁1端部の腐食が著しく進行しており、概ね実状を捉えられている。また、新解析ではせん断引張破壊の判定を導入したことによりスターラップ腐食の影響に対する感度が高く、せん断引張破壊に対し安全側に評価できるものと考えられる。また、図-12に耐荷力解析のモンテカルロシミュレーションで判定された破壊形式の割合の推移の一例として桁1の結果を示す。腐食状況が比較的軽微な段階では、スターラップの付着低下によるせん断引張破壊 (St50) が先行している。その後、劣化進行に伴い橋齢50年頃からスターラップの降伏による終局 (S.Y.) が発生するとともに、引張鉄筋の腐食減量率の急増に伴う定着部低下による終局 (SLIP) も発生しており、M橋の桁1では50年を過ぎると定着破壊など脆性的な破壊に対して危険になる恐れがある。

7. 断面力解析と耐荷力解析に基づくせん断安全性評価

7.1 安全性評価手法と安全性指標 β

耐荷力をR、断面力をSとすると、安全余裕は $M=R-S$ で定義できる。このとき、安全性指標 β は次式で表せる。

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (8)$$

ここで、 μ_M : Mの平均値、 σ_M : Mの標準偏差

式(8)で定義した β により構造物の経年の安全性評価を行うことが可能となる。しかし、維持管理上重要な点は補修・補強・架け替え等の処理に対する判断基準を明確にすることである。既往の研究¹¹⁾では、複数の実橋で橋梁管理技術者に対して行ったアンケート調査によ

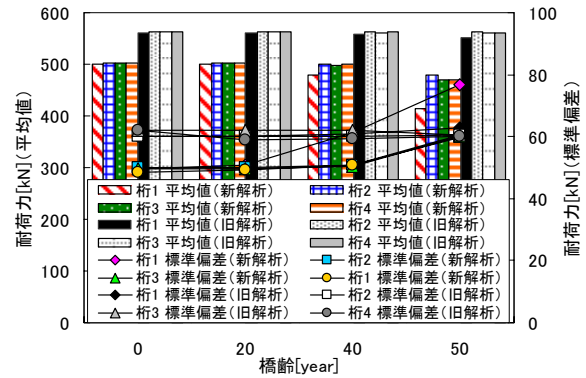


図-11 耐荷力解析結果

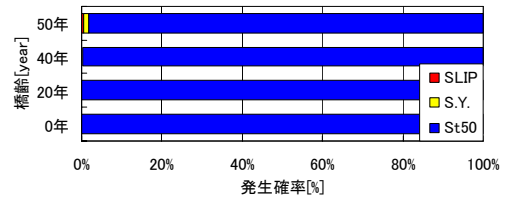


図-12 破壊形式の発生確率 (例: M橋の桁1)

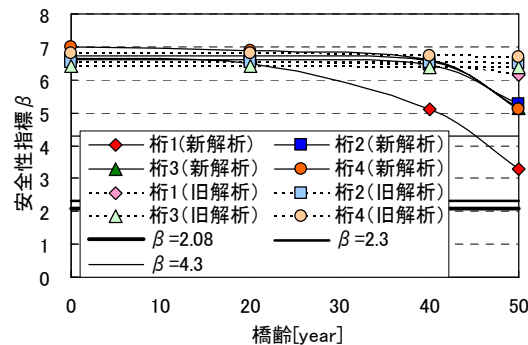


図-13 せん断の安全性指標 β の経年変化

り耐荷性に関する判断を抽出し、安全性に対する限界値を $\beta=2.08$ と提案している。さらに本研究では、上述の安全性限界値に加え、ISO13822で設けられている終局限界状態における「破壊の影響が極めて小さい場合」および「破壊の影響が大きな場合」の目標信頼性指標 β として $\beta=2.3, 4.3$ の基準値¹²⁾も目安に加え安全性評価を行う。

7.2 せん断安全性評価

M橋のせん断安全性評価結果を、せん断引張破壊判定未導入の場合の結果と併せて図-13に示す。供用開始時において新解析と旧解析とで β 値の違いはみられない。新解析では、その後20年までは一定値で推移するものの、40年で桁1の β 値が急激に下落している。実際にM橋の桁1では、橋齢44年~46年間の調査時において下流側端部で大きな腐食の発生が確認されており、スターラップかぶりのはく離するなどせん断に対しても危険になりつつあるとみなせる。このことを考えると橋齢40~50年で極端な低下が起こっていない旧解析に比べ、新解析は実状を捉えられている。さらに、新解析における桁1では45年過ぎにISO13822の終局限界状態における「破壊の影響が大きな場合」の $\beta=4.3$ を下回っていると、新解析は安全側に評価できていると考えられる。

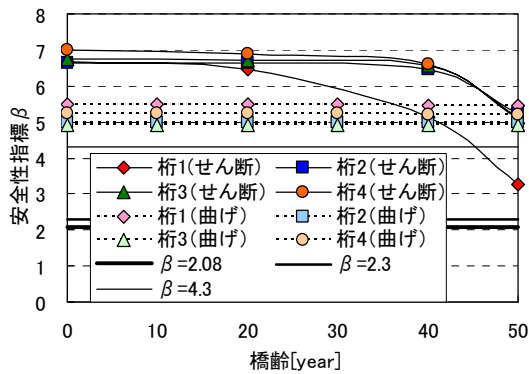


図-14 せん断と曲げの安全性評価の比較

7.3 曲げとせん断安全性評価に基づく総合安全性評価

1章で述べたように曲げとせん断の双方を考慮した安全性評価を行うことが望ましい。そこで、図-14に示すように、せん断安全性評価と既報の手法²⁾による曲げ安全性評価を比較し、総合的な安全性評価を行った。

供用開始時においては曲げよりもせん断の β 値が上回っている。その後、曲げに対しては橋齢50年時においても β 値の低下はほとんど起こっていない。これに比べてせん断に対する β 値の低下率は大きく、橋齢40年を過ぎたあたりからせん断破壊に対する安全性がかなり小さくなっていることから、対象橋梁は将来的に曲げよりもせん断破壊が先行する可能性がある。

8. おわりに

本研究では、劣化予測の結果を用いてせん断引張破壊を判定基準としたFEM解析を行うことでせん断安全性評価を行った。その結果を曲げ安全性指標と比較し、総合的な安全性評価を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) せん断引張破壊を考慮したFEM解析により、実橋梁のせん断耐荷性能を解析的に検討した。供用開始時から経年においてスターラップの付着強度不足に基づくせん断引張破壊で終局に至るケースが多い結果となった。これは、対象橋梁の内部鉄筋には丸鋼が用いられており鉄筋の付着強度が不十分となることからせん断引張破壊の可能性が高く、本解析ではその兆候を捉えており、実橋梁に適用しても妥当であることが確認された。
- (2) 耐荷力解析のモンテカルロシミュレーションより腐食進行に伴い経年のせん断耐荷力が低下する結果となり、破壊判定を考慮することで安全側に評価できることを示した。また、破壊形式に着目すると、スターラップの腐食進行とともにスターラップの降伏による終局が見られ始めるが、主鉄筋の腐食が大きい場合、主鉄筋の定着破壊に至るケースも存在することが確認された。
- (3) せん断引張破壊を考慮したせん断安全性評価は、対象橋梁については橋齢40年あたりから β 値が急激に下落する結果となった。これは、端部で鉄筋の激しい腐食

が起こり、かぶりコンクリートのはく離・はく落が観察されている実状を踏まえると妥当であると考えられる。

- (4) せん断引張破壊を考慮したせん断安全性評価と既往の手法による曲げ安全性評価の比較を行った。対象橋梁は標準的なコンクリート圧縮強度を有するが、鉄筋腐食の進展に伴いせん断安全性が曲げ安全性を下回り、せん断破壊が先行する可能性があることを示唆した。

参考文献

- 1) 小島大祐, 森川英典, 岡本早夏, 岸紗百合: 現場試験に基づいたRC橋梁における塩害劣化予測と安全性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1579-1584, 2005.6.
- 2) 狩野裕之, 森川英典, 湯浅康史: 現場試験に基づいた塩害劣化RC橋のせん断安全性評価と特性分析, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第8巻, pp.145-152, 2008.10.
- 3) 森川英典, 瀬戸亮太, 友村圭祐, 笠松大輔: 腐食鉄筋の付着すべり判定を導入したFEMによる塩害劣化RC部材のせん断破壊解析, 建設工学研究所論文報告集第51号, 2009.11.
- 4) (社)土木学会: コンクリート標準示方書「施工編」, 2002.3.
- 5) 伊庭孝充, 松島学, 関博: 確率論的手法に基づいた塩害による鉄筋腐食量の変動係数推定に関する一考察, 土木学会第54回年次学術講演会, V-315, pp.630-631, 1999.9.
- 6) 小林豊治, 米澤敏男, 出頭圭三: 鉄筋腐食の診断, pp.161, 1993.5.
- 7) 李翰承, 友澤史紀, 野口貴文, 鹿毛忠継: 有限要素法による鉄筋の腐食したRC梁の耐力性能評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1147-1152, 1997.6.
- 8) (社)土木学会: コンクリート標準示方書「構造性能照査編」, pp.26-28, 2002.3.
- 9) 菅満宣, 中村光, 檜貝勇, 斉藤成彦: RCはりの力学的挙動に及ぼす付着特性の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.295-300, 2001.
- 10) 寄特隆宏, 檜貝勇, 斉藤成彦: 異形鉄筋の付着応力-すべり関係に及ぼすかぶり厚と鉄筋直径の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.757-762, 2005.
- 11) 森川英典, 宮本文穂, 竹内和美: 統計解析に基づく既存コンクリート橋の安全性および寿命評価, 土木学会論文集, No.502/V-25, pp.53-62, 1994.11.
- 12) (財)日本規格協会: ISO13822・構造物の設計の基本-既存構造物の性能評価, 2002.8.