

損傷力学による既設RC桁の耐荷性能評価法に関する研究

A Study on the Evaluation Method of Ultimate Strength and Durability of the Existing RC Beams by Damage Mechanics

園田佳巨*, 結城洋一**, 杣辰雄***, 牧角龍憲****

Yoshimi Sonoda, Youichi Yuuki, Tatuo Soma, Tatsunori Makizumi

*工(博) 九州大学大学院助教授 工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

**学生会員 九州大学大学院 工学研究府 建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

***工(博) 中央コンサルタンツ(株)福岡支店 (〒812-0062 福岡市中央区荒戸 1-1-16)

****工(博) 九州共立大学教授 (〒807-8585 福岡県北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

Recently, maintenance problems of the existing RC structures become serious, and it is important to estimate the total life cycle cost of structures. In order to accomplish this purpose, it is necessary to evaluate the durability and predict the deterioration of the existing structures. In this study, the damage evolution due to the mechanical (external load) and environmental effect (salt damage) is considered by using continuum damage mechanics. It is found that the proposed method could evaluate the change of ultimate strength of the existing RC beam under the various exposed conditions.

Key Words: Damage Mechanics, ultimate strength, salt damage

1. はじめに

今後、日本全国で急速に老朽化した鉄筋コンクリート道路橋の数が増加することが予測されており、これら老朽化した既設道路橋への対処が、人口の減少と高齢化社会を迎える日本が現在の豊かさを維持するための重要な懸案となるものと予想される。現在の国内経済の状況を考えると、公共投資の効率を向上させることが不可欠であり、老朽化した既設の道路橋に対して合理的な維持・補修計画を立て、ライフサイクルにおけるトータルコストを低減することが非常に重要であると考えられる。一方、老朽化した構造物の合理的な維持・補修の計画を立案するには、構造物の劣化・損傷状況を把握した残存耐荷力の正確な評価と将来の変動予測を行うことが大切であるが、必ずしもそのことは容易ではない。

一般にRC構造物の場合、耐荷力が低下する要因は、荷重履歴により生じる力学的損傷と環境的要因による材料劣化の2種類に大別される。これまでに、これら2つのカテゴリー別に、個々の具体的な現象に関する研究は数多く行われており、個別の現象のメカニズムは解明されつつあると思われるが、材料劣化と構造部材としての耐荷力との関係を定量的に関連づけることは困難であり、2つのカテゴリーにまたがる劣化と損傷を同時に評価できる手法は確立されていない。

連続体損傷力学は、材料の損傷度を有効断面の減少によって定義するもので、金属のクリープ損傷を対象にKachanovが提案して以来、コンクリートや高分子材料その他のあらゆる材料に対しても、損傷状況を評価する力学

として発展し、その適用が試みられてきた¹⁾。損傷力学は、種々の要因別に損傷変数を定義することにより、様々な原因による構造材料の損傷を表現できる自由度を備えているため、荷重履歴により生じる力学的損傷と環境的要因による化学的損傷²⁾(劣化と損傷は同義としている)を個々に定義すれば、これら2つの現象を同時に考慮できる有用な耐荷力評価の手段となりうるものと考えられる。

今回、竣工後50年近く経過した4径間単純鉄筋コンクリート橋と3径間単純鉄筋コンクリート橋の2橋(以後、それぞれA橋、B橋と称する)の架け替えにともない、解体桁での載荷試験を実施することができ、各種非破壊試験や材料試験とともに既設鉄筋コンクリート道路橋の主桁の終局耐力(本論文では最大荷重時を終局耐力と定義している)を調査する機会が得られた。そこで、本研究ではこの2橋の試験データをもとに、損傷力学を用いてA橋・B橋の終局耐力評価を行い、力学的な損傷を考慮した解析手法の精度を検証した。

さらに、新たな試みとして環境的要因による材料劣化の一つである塩害に着目し、塩害により鉄筋の腐食が生じた場合の既設RC桁の終局耐力の経年変化を連続体損傷力学を用いて予測する手法について、別の実験結果を用いて検討した。

2. 解析手法

2.1 損傷力学の概要

一般に材料の損傷と破壊は、材料中の微視的空隙の発生

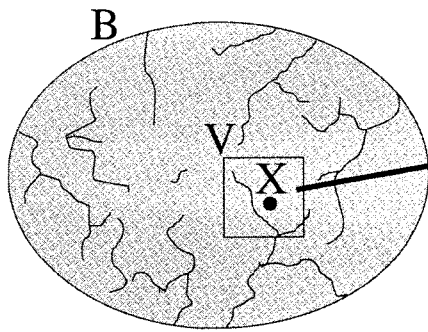


図-1 損傷度評価の領域

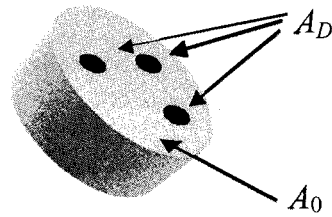


図-2 損傷変数の定義
 A_0 : 全断面積
 A_D : 損傷を受け、全抵抗力を失った面積

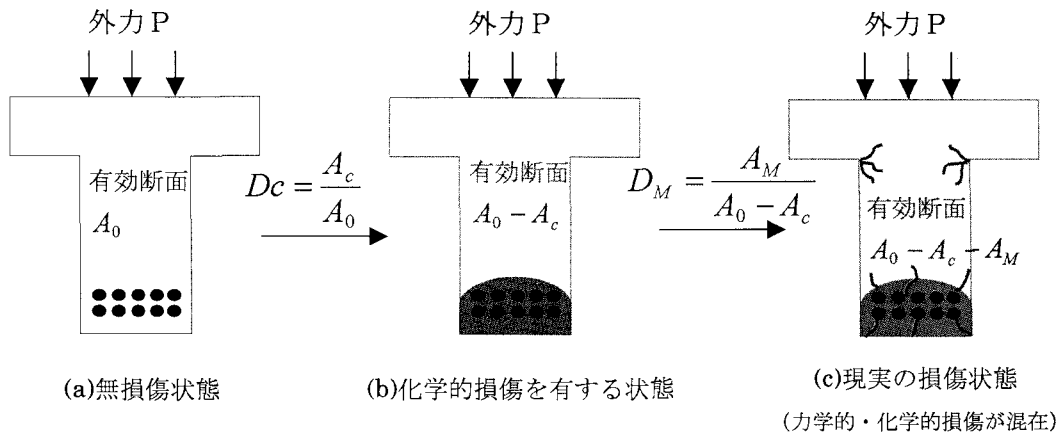


図-3 損傷力学モデルへの置換

と、その成長・合体による巨視的き裂への進展によってもたらされる。材料中に分布する多数の微視的空隙は、様々な劣化・損傷をもたらす要因によって成長し、材料強度や部材剛性・じん性の低下を招くだけでなく、巨視的き裂へと進展し、最終的な破壊を引き起こすことにより構造物の残存寿命を縮める原因となる。このような多数の微視的空隙の成長による力学的影響を、連続的な変数場（損傷場）として表現し、材料中の損傷領域の拡がりを与える力学的影響を追跡する学問として「損傷力学」が提案され、これまでに数多くの研究がなされてきた。損傷力学は、空隙が存在する状態の材料（損傷を生じた材料）の挙動だけでなく、損傷の進展による巨視的き裂の発生（破壊）までの過程を解析的に追跡可能であることから、構造材料の寿命予測等における有用なツールになりうるものと考えられる。

損傷力学の基本的な概念は、微視的空隙の影響を力学的に等価な巨視レベルの変数（損傷変数）で表現することにある。そのために、図-1のような多数の微小な空隙を含む物体Bに対して、B中の任意点xまわりに、個々の微小空隙の影響を平均値で近似可能な程度に十分大きく、かつ応力やひずみの変化を正確に表現可能な程度に十分小さな微小領域Vを仮定する（概ね、鋼で 0.1mm^3 、コンクリートで 100mm^3 が目安と言われている¹⁾）。その上で、物体内の任意点xにおける微視的空隙の影響を、断面レベルにおける部材の有効断面積の減少と解釈し、式(1)および図-2に示

すような微小領域Vの空間で評価された損傷変数D (damage variable) を用いて部材剛性の低下を評価する。

$$D = \frac{A_D}{A_0} \quad (1)$$

ここに、 A_D : 損傷を受け、全抵抗を失った面積、 A_0 : 全断面積
 具体的な損傷変数の定義については、これまでに多くの研究がなされており、高階のテンソル量として取り扱う方法も提案されているが、本研究では、損傷変数を最も簡易なスカラー量で定義した。したがって、構成式は損傷の影響に等方性を仮定した以下の式(2)で表される。

$$\sigma_{ij} = (1 - D)E_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (2)$$

ここに、 σ_{ij} : 応力テンソル、 E_{ijkl} : 弾性係数、 ϵ_{kl} : ひずみテンソル

一般に損傷力学では、応力、ひずみ、あるいはひずみエネルギーのいずれかを無損傷状態と損傷時で等価とみなすことにより、それぞれ異なる定式化が行われているが、ここではひずみを等価な物理量（有効応力を用いて、無損傷時と損傷時でひずみを同じ構成式で表現できる）とみなし、式(3)の有効応力を用いた解析を行った。

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (3)$$

ここに、 $\bar{\sigma}$: 有効応力

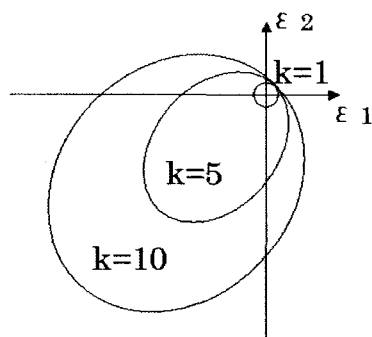
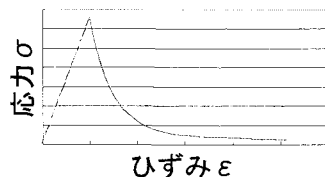
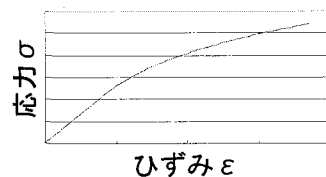


図-4 降伏曲面



(a) ひずみ軟化曲線



(b) ひずみ硬化曲線

図-5 コンクリートの応力-ひずみ関係

2.2 荷重履歴と環境要因による損傷の連成

RC構造物には、様々な要因による損傷が発生すると考えられる。本研究では、それらを大別し、荷重履歴により生じる力学的損傷度 D_M と環境的要因による材料劣化にともなう化学的損傷度 D_C の2種類に分けて、式(4)に示すように両者の影響が独立して部材の剛性低下を招くと仮定した。

$$\sigma_{ij} = (1 - D_M)(1 - D_C)E_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (4)$$

この式は、RC部材に力学的な損傷により抵抗力を失った領域と材料劣化により強度低下した領域が別々に存在し、その影響を個々に求めて重ね合わせることができると仮定するものである。具体的には、以下のように段階的に損傷場を想定していくことで式(4)が得られる。
1) まず最初に、図-3(a)に示す無損傷状態から、図-3(b)に示すような化学的損傷の発生を考える。この場合、損傷により減少した有効断面 $A_0 - A_c$ に、有効応力 $\bar{\sigma}^c$ が作用する状態とみなし、式(5)で定義される化学的損傷変数 D_C を用いて式(6), (7)が得られる。

$$D_C = \frac{A_c}{A_0} \quad (5)$$

$$P = A_0 \bar{\sigma} = (A_0 - A_c) \bar{\sigma}^c \quad (6)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{A_0 - A_c}{A_0} \cdot \bar{\sigma}^c = (1 - D_C) \bar{\sigma}^c \quad (7)$$

2) 次に、図-3(b)の状態に加えて新たに力学的な損傷(ひび割れや空隙)が発生した場合を考える。この場合、2種類の損傷で抵抗力を失った領域を差し引いた残りの断面 $A_0 - A_c - A_M$ に応力 σ が作用しているとみなし、式(8)で定義される力学的損傷変数 D_M を用いて式(9), (10)が得られる。

$$D_M = \frac{A_M}{A_0 - A_c} \quad (8)$$

$$P = (A_0 - A_c) \bar{\sigma}^c = (A_0 - A_c - A_M) \sigma \quad (9)$$

$$\bar{\sigma}^c = \frac{A_0 - A_c - A_M}{A_0 - A_c} \cdot \sigma = (1 - D_M) \sigma \quad (10)$$

3) 式(7)に式(10)を代入することにより、以下の式

が得られる。

$$\bar{\sigma} = (1 - D_C) \bar{\sigma}^c = (1 - D_C)(1 - D_M) \sigma \quad (11)$$

式(11)は、力学的・化学的損傷の影響を考慮するためには、有効断面 $A_0 - A_c - A_M$ に作用する真応力 σ を $(1 - D_C)(1 - D_M)$ 倍した有効応力 $\bar{\sigma}$ を構成式に用いれば、損傷の進展による有効断面の変化などを考慮することなく簡易に応力解析ができることを意味している。以上の式の誘導には、力学的・化学的損傷の影響が、それぞれ独立して有効断面の減少をもたらすことを仮定しているが、その妥当性については検討の必要がある。

2.3 力学的損傷解析の流れ

損傷力学を用いて、RC構造物の曲げ破壊挙動を精度良く評価するには、式(4)に用いる力学的損傷変数 D_M を鉄筋・コンクリートで個別に適切なモデル化を行わなければならない。そこで、本研究では主ひずみ空間において降伏曲面を定義し、相当ひずみによりスカラー量として損傷度を評価するPeerlingsらの手法^{3), 4)}を引用することにした。この手法は、RC部材の静的4点曲げ破壊挙動等の正確なシミュレーションを目的に、コンクリートの引張軟化領域までモデル化したもので、損傷変数の取り扱いが簡易であることから、モデル中のパラメータを適切に設定することで鋼材に関しても同手法を引用することにした。

具体的には、コンクリート部材内部の相当ひずみ ε_{eq} を以下の式(12)により評価し、コンクリートの基本的性質である圧縮強度と引張強度の相違を考慮しながら式(13)に示される負荷関数を満足するときにコンクリート内部の損傷が発生あるいは進展するものと仮定した。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} I_1 + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1\right)^2 + \frac{6k}{(1+\nu)^2} 2J_2} \quad (12)$$

ここに、 I_1 : ひずみの1次不変量、 J_2 : 偏差ひずみの2次不変量、 k : 圧縮強度と引張強度の比、 ν : ポアソン比

$$f(\varepsilon_{eq}, \kappa) = \varepsilon_{eq} - \kappa_i = 0 \quad (13)$$

ここに、 κ_i : 損傷進展条件パラメータ(無損傷時には損傷発生時の相当ひずみ κ_0 を与え、損傷進展時には過去の最

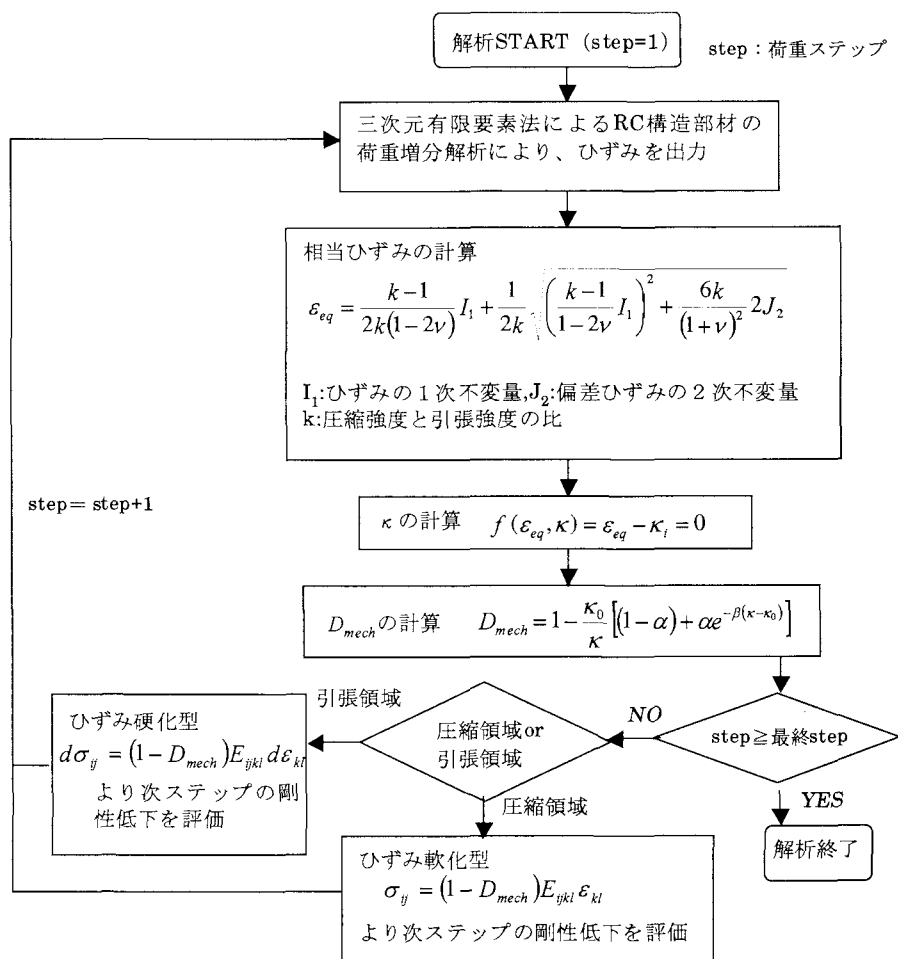


図-6 力学的損傷度解析の流れ

大相当ひずみ κ_i を与える)

式(12)および式(13)の組み合わせにより、図-4に示すような引張領域と圧縮領域で大きさの異なる降伏曲面が定義される。式(12)の I_1 ならびに J_2 に関わる項は、それぞれ静水圧応力と偏差応力の影響を考慮したもので、 $k=1$ とおけばMisesの降伏条件に一致することから、本研究では鋼材に関しても同様の評価を行うことにした。

本研究では、コンクリートの曲げ引張領域の挙動を追跡するために、図-5(a)に示す引張軟化特性を式(14)の全応力-ひずみ関係で考慮するとともに、圧縮領域では図-5(b)のような硬化型の弾塑性挙動を増分型の応力-ひずみ関係式(15)で表現した。(以下、 D_M と D_{mech} は等価な変数としている)

$$\sigma_{ij} = (1 - D_{mech}) E_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (14)$$

$$d\sigma_{ij} = (1 - D_{mech}) E_{ijkl} d\varepsilon_{kl} \quad (15)$$

力学的な損傷を考慮した解析の流れについて図-6に示す。大まかな流れとしては、各要素中の積分点において式(12)を用いて求められる相当ひずみが、式(13)を満たす場合には式(16)により損傷度を求め、引張応力下では式(14)に、圧縮応力下では式(15)に適用することで、力

学的な損傷にともなうRC部材の耐荷性能の評価を行った。

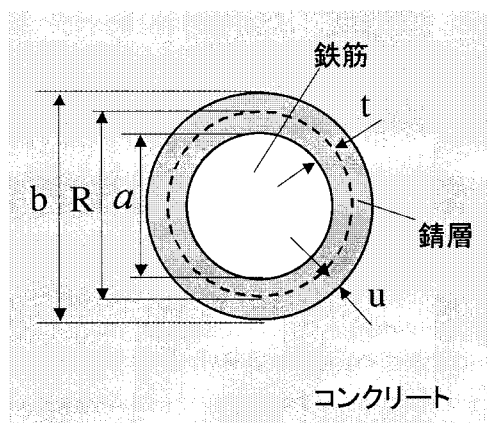
$$D_{mech} = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \left[(1-\alpha) + \alpha e^{-\beta(\kappa-\kappa_0)} \right] \quad (16)$$

ここに、 α 、 β : 損傷進展パラメータ (材料定数)、 κ_0 : 損傷発生時の相当ひずみ、 κ : 蓄積塑性ひずみ

2.4 環境要因(塩害)による化学的損傷度の評価

環境要因による劣化・損傷には塩害、中性化、アルカリ骨材反応その他の数多くの事例が存在する。本研究では、その中の一例として塩害を受けた鉄筋コンクリート部材の損傷度評価方法について検討した。

一般に、塩害を受けたRC部材の耐荷性能の低下は、鉄筋の腐食によって生じると言われている⁹⁾。鉄筋の腐食度を評価するためには、その原因となる塩化物イオンの構造部材中への拡散・浸透状況について予め解析し、腐食の発生と進展状況を明らかにする必要がある。そこで、一般に鉄筋表面の塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 程度に到達すると鉄筋の不動態被膜が破壊して腐食が発生し、塩化物イオン濃度の増加とともに腐食がより進展すると考



R : 腐食前の鉄筋径
 t : 腐食によって失われた鉄筋の厚さ
 α : 腐食生成物の体積膨張率 (周囲に拘束在り)
 u : 膨張変位量
 $a = \frac{R}{2} - t$: 腐食後の鉄筋径
 $b = \frac{R}{2} + t(\sqrt[3]{\alpha} - 1)$: a + 錆層

図-7 鉄筋腐食モデル

えられていること⁷⁾を踏まえ、以下の手順で評価した。
 1) フィックの第2法則に基づく二次元拡散方程式を解くことで、各鉄筋位置の塩化物イオン濃度を計算する。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (17)$$

ここに、 K : 塩化物イオンの拡散係数 (cm^2/year), C : 時間の経過とともに蓄積される塩化物イオン濃度 (kg/m^3)
 2) 鉄筋位置における塩化物イオン濃度から腐食による鉄筋の断面減少率 ω を既往の研究結果^{7) 8) 9) 10)}を参考に式(18)から求め、式(19)に示す断面減少率を鉄筋の化学的損傷度と定義した。

$$\omega = 0.02(0.33C_{st} + 3.7) \quad (18)$$

$$D_c = \frac{\omega}{100} \quad (19)$$

ここに、 C_{st} : 積算塩化物イオン濃度 ($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{year}$)
 3) 鉄筋表面に、腐食生成物 (錆) が生じる過程において体積変化がおり、大気中であれば体積膨張率 α は約2.5~3.0に達すると言われている^{11) 12)}。鉄筋周囲にコンクリートが存在し、膨張を拘束する状況では同程度の体積変化は生じないと考えられるが、膨張圧が周囲のコンクリートに引張応力として作用しひび割れを生じさせるため、その影響を考慮することは重要であると考えられる。そこで、図-7に示す鉄筋腐食生成物の膨張モデルを用い、鉄筋表面が一様に腐食すると仮定し、鉄筋の断面減少率 ω と体積膨張率 α より膨張変位量 u を式(20)によって求めた¹²⁾。

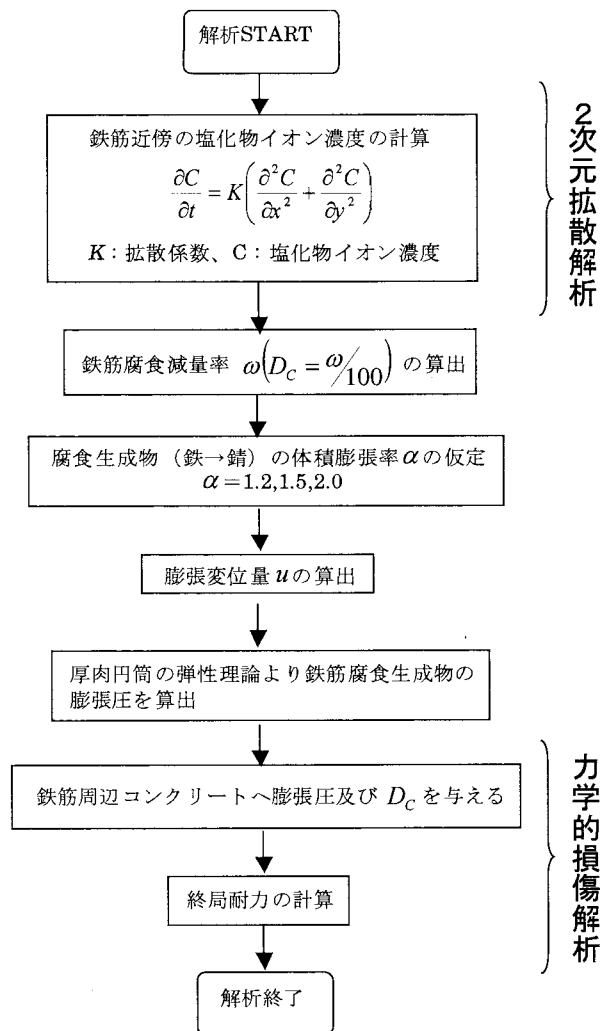


図-8 塩害の影響を考慮した終局耐力解析

$$u = \frac{1}{2} R (\sqrt[3]{\alpha} - 1) \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\omega}{100}} \right) \quad (20)$$

4) 厚肉円筒の弾性理論から得られる式(21)を用い^{11) 13)} 14)、3)で求めた膨張変位量 u を代入して求めた膨張圧を周囲のコンクリートに作用する荷重とみなし、化学的損傷現象である鉄筋腐食がコンクリートへ与える力学的な影響とみなした。

$$u = \frac{p}{E_2(b^2 - a^2)} \left[\frac{4a^2b^3}{\left\{ (1 - \mu_2)a^2 + (1 + \mu_2)b^2 + (1 - \mu_1)(a^2 - b^2) \frac{E_2}{E_1} \right\}} - b \{ a^2 + b^2 + (a^2 - b^2)\mu_2 \} \right] \quad (21)$$

ここに、 E_1, μ_1 : 鉄筋の弾性係数とポアソン比,
 E_2, μ_2 : 腐食生成物の弾性係数とポアソン比
 以上の解析の流れを図-8に示す。なお、コンクリート中の鉄筋の体積膨張率 α を理論的に決定することは現時点では困難と思われる。そこで、本解析では α をパラメータとして取り扱い、損傷解析を行った。

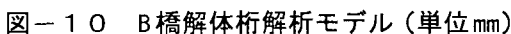
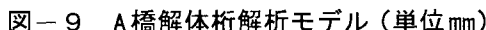


表-1 A橋主桁コア試験で得られた材料定数

	コンクリート		補強部 モルタル	鉄筋	
	床版部	主桁部		既設部	補強部
ヤング率(kN/mm ²)	26.0	13.0	16.0	210	210
ポアソン比	0.20	0.20	0.20	0.29	0.29
圧縮強度(N/mm ²)	40.0	23.0	65.0	410	520
降伏強度(N/mm ²)	—	—	—	274	346
圧縮・引張強度比	15	15	10	1	1

3. 数値計算結果および考察

3.1 力学的損傷解析による既設RCはりの終局耐力評価

(1) 解析モデル

解析対象とするのは、昭和29年に竣工した4径間単純鉄筋コンクリート橋と同年に竣工した3径間単純鉄筋コンクリート橋2橋の主桁である。これら2橋（以後、A橋、B橋と称する）は、どちらも昭和29年当時の道路橋示方書に従って設計されたもので、図-9および図-10に示すようにほぼ同じ断面寸法を有している。2橋いずれも、架け替えにより撤去・解体された際に解体桁の破壊実験を行っており、ここでは実験で得られた終局耐荷性能のシミュレーションを試みた。なお、A橋については主桁および床版下面にB活荷重対応の増厚補強が施されていたため、補強桁（A1桁と称する）と補強部を取り除いた無補強桁（A2桁と称する）の2通りの比較を行っ

た。

表-1 および表-2 は、A、B 2 橋のコア試験により得られた材料定数の一覧を示したものである。この表より、床版部、主桁部（既設部、補強部）で強度や弾性係数に大きな相違が見られるため、各部位ごとに異なる材料定数を与えることにした。

また、式(16)に用いる材料の損傷進展速度に関する定数 α , β , κ_0 の値については、材料試験（コア試験）のシミュレーションを行い、材料試験で得られた応力-ひずみ関係を良好に再現できることを条件に決定した。

(2) 数値計算結果および考察

表-3および表-4は、それぞれA橋、B橋の材料試験結果に対して逆解析で求めた損傷パラメータを示したものである。これらの材料定数を用いて、本手法で求めたA橋の2種類の解体桁（A1桁・A2桁）の荷重-変位関係

表-2 B 橋主桁コア試験で得られた材料定数

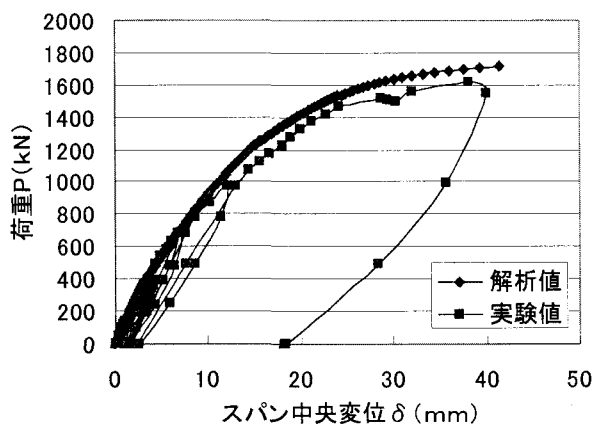
	コンクリート		鉄筋
	床版部	桁部	
ヤング率 (kN/mm ²)	28.7	19.0	200
ポアソン比	0.20	0.20	0.29
圧縮強度 (N/mm ²)	40.1	26.5	—
降伏強度 (N/mm ²)	—	—	235
圧縮・引張強度比	15	15	1

表-3 A 橋解析に用いる損傷パラメータ

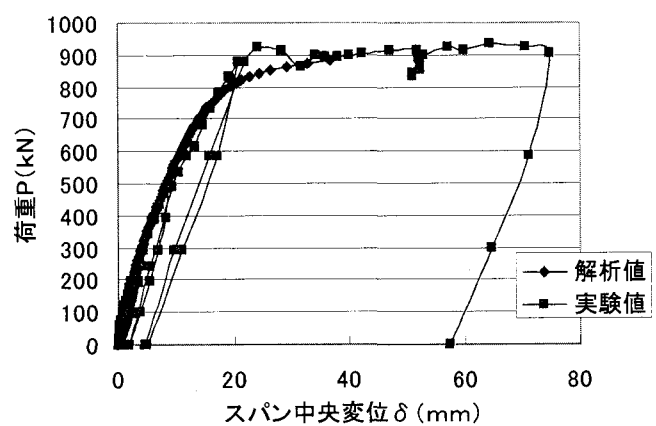
	コンクリート				モルタル		鉄筋	
	床版部		桁部		補強部		既設部	補強部
	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張・圧縮同じ	
α	0.99	0.96	0.99	0.96	0.99	0.96	0.96	0.96
β	21000	100	21000	100	21000	300	3000	3000
κ_0	1.0×10^{-4}	6.5×10^{-5}	7.7×10^{-5}	2.5×10^{-5}	1.3×10^{-4}	9.8×10^{-5}	8.5×10^{-4}	1.0×10^{-3}

表-4 B 橋解析に用いる損傷パラメータ

	コンクリート				鉄筋
	床版部		桁部		
	引張	圧縮	引張	圧縮	
α	0.99	0.96	0.99	0.96	0.96
β	20000	100	20000	100	3000
κ_0	9.4×10^{-5}	4.4×10^{-5}	9.4×10^{-5}	4.4×10^{-5}	8.3×10^{-4}



(a) A1 桁（補強桁）の荷重－変位関係



(b) A2 桁（無補強桁）の荷重－変位関係

図-11 A 橋解体桁の破壊実験のシミュレーション

を、図-11(a)および(b)に示す。図中に示す载荷実験結果には、数回の载荷・除荷を行っているため、履歴にわずかな残留変位をとめないながらの往復が見られるが、本手法により2種類の解体桁の終局耐力に至るまでの荷重－変位関係が精度良く再現されていることが認められた。A1桁とA2桁を比較すると、下面増厚工法による効果として、終局耐力が約70%も増加していることが解析においても認められた。このことから、解析で仮定している既設部と増厚部境界のひずみの連続性などが実際の補強桁においても満足されており、補強工事が適切に施さ

れていたことがうかがえる。図-12は、B橋解体桁の载荷実験のシミュレーションを示したものである。この図より、A橋同様に終局時までの荷重－変位関係を精度良く再現できていることが確認された。図-13は、B橋解体桁の終局耐力時の状況を写真と比較したものである。この図より、終局耐力時には、写真に見られるひび割れと同様に、桁下面から典型的な曲げ破壊に相当する損傷領域が広がる結果が得られることが分かる。

以上のことから、コア抜きによる材料試験データを用いれば、図-6に示す力学的な損傷度を考慮した解析によ

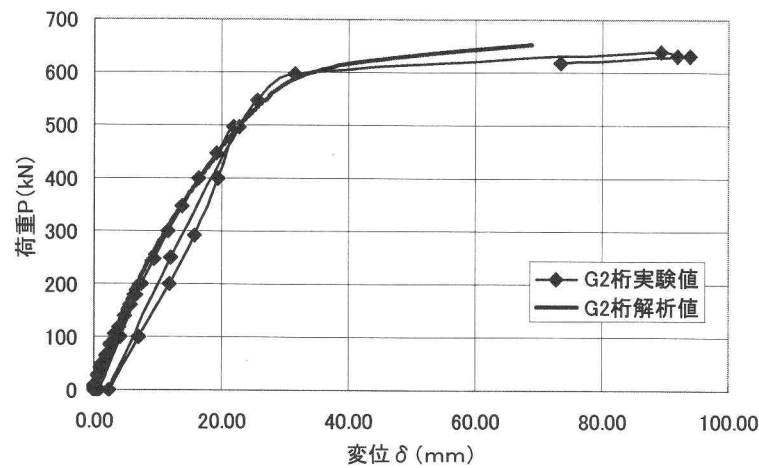


図-12 B橋解体桁破壊実験のシミュレーション

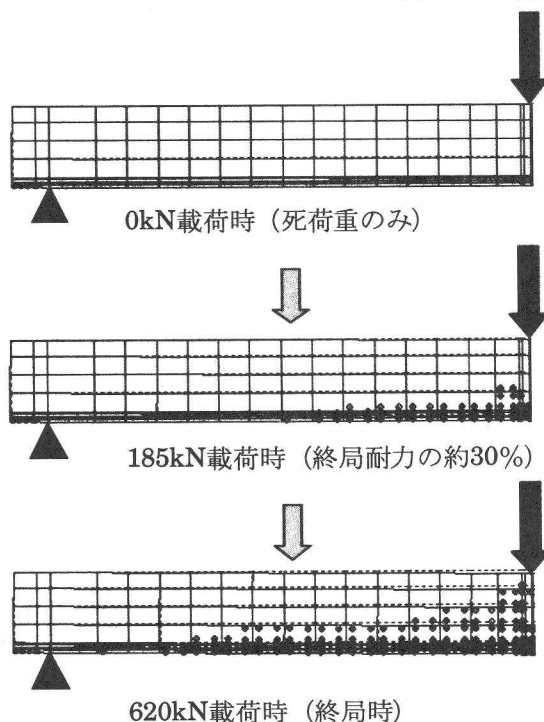


図-13 B橋解体桁の終局状況（黒点は損傷部分）

り、既設鉄筋コンクリート部材の残存耐力と終局耐力時の挙動を正確に把握できることが確かめられた。次に、式(4)を用いて環境要因による化学的損傷を同時に考慮した解析を試みる。

3.2 力学的・化学的損傷による終局耐力変動予測

(1) 解析モデルの概要

解析対象とするのは、既往の研究¹⁵⁾で使用された図-14に示すような単鉄筋RCばりの実験供試体である。(表-5に材料試験結果から得られた材料定数を、表-6には損傷進展式(16)に用いたパラメータを示す。)図-14、図-15に示すように、この供試体下面中央部に一定の塩化物イオン濃度を与え、桁中央部断面において二次元拡散解析を行い、塩化物イオンが桁中央部の部材の損傷に及ぼす影響を検討した。また力学的損傷解析においては拡散解析により算出された膨張圧を荷重として、最

も構造物全体の耐力に影響を与えと考えられる桁中央部鉄筋要素下面に与え、さらに、図に示すように桁中央部2箇所に対し外力に相当する荷重を与えた。

(2) 数値計算結果および考察

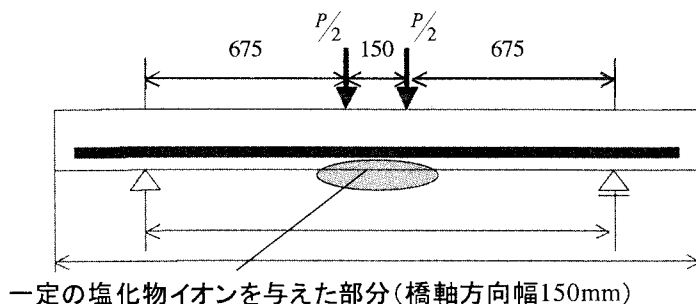
鉄筋の体積膨張率 α をパラメータとして、塩害による鉄筋腐食の影響を考慮した場合の荷重-変位関係を図-16に、また経年変化にともなう終局耐力の変化を図-17に示す。 $\alpha=1.2$ とした場合には10年経過時で5.9%、30年経過時で6.5%の終局耐力の低下が予想されたのに対し、 $\alpha=2.0$ とした場合には10年経過時で10.1%、30年経過時で33.9%の終局耐力の大幅な低下が予想された。コンクリート中の鉄筋の体積膨張率は明確ではないが、現実の終局耐力の値は本解析で設定した条件 $\alpha=2.0$ (大気中に置かれた無拘束の状態における鉄筋の体積膨張率に該当し、コンクリート中における膨張率はこれ

表-5 解析に用いた材料定数

	コンクリート		鉄筋
	引張	圧縮	引張・圧縮同じ
α	0.96	0.96	0.96
β	20000	100	3000
κ_0	8.4×10^{-5}	3.2×10^{-3}	1.5×10^{-5}

表-6 解析に用いた損傷進展パラメータ

	コンクリート	鉄筋
ヤング係数(kN/mm ²)	26.5	205.8
ポアソン比	0.18	0.29
圧縮強度(N/mm ²)	35.6	-
降伏強度(N/mm ²)	-	541.9
圧縮・引張強度比	11.1	1



一定の塩化物イオンを与えた部分(橋軸方向幅150mm)

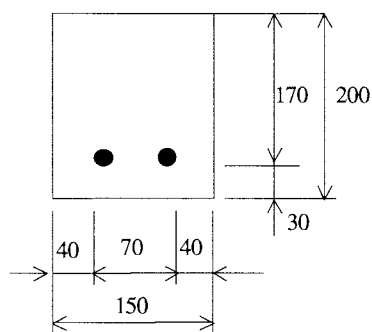
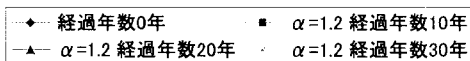
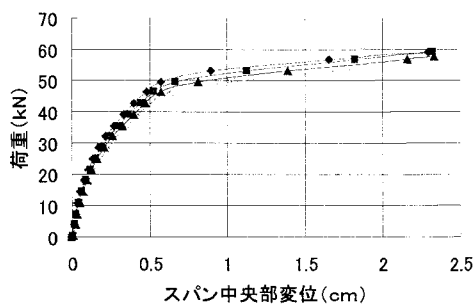
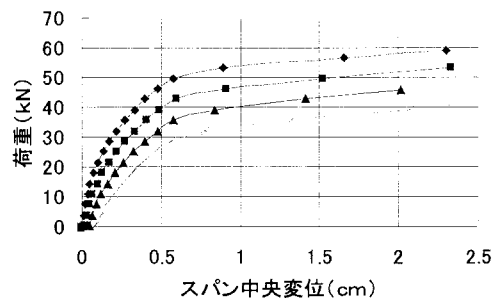


図-14 塩害を考慮したRCはりモデル(mm)



(a) 腐食膨張率 $\alpha = 1.2$ の場合



(b) 腐食膨張率 $\alpha = 2.0$ の場合

図-16 鉄筋の腐食が生じたRC桁の荷重-変位関係

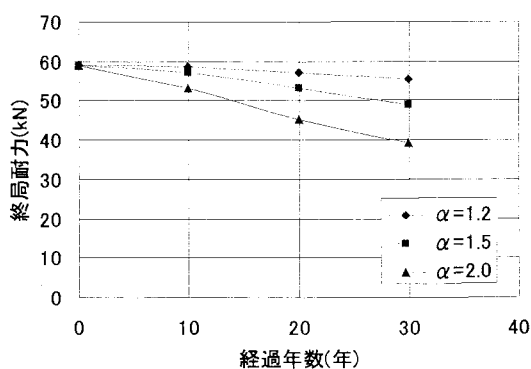
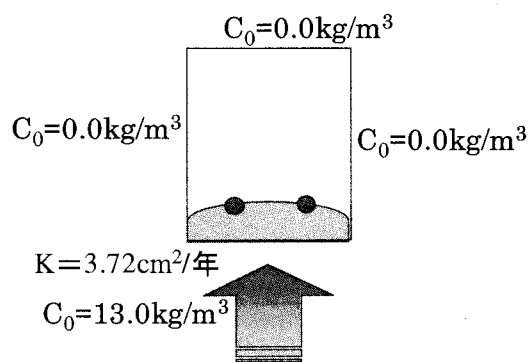


図-17 鉄筋の腐食膨張率が終局耐力に与える影響



C_0 : 初期塩化物イオン濃度 (kg/m³)

K: 拡散係数 (cm²/年)

図-15 桁中央部拡散解析イメージ図

ほど大きくはないものと考えられる)とした場合ほどに低下するとは考えられないが、慎重に検討する必要があることが伺えた。

以上の結果より、鉄筋の体積膨張率を明確に設定し、本手法のような観点から塩害による鉄筋腐食がRC桁の終局耐力低下に及ぼす影響を評価することが重要であることが確認された。

4. 結論

本研究では、損傷力学を用いて荷重履歴により生じる力学的損傷と環境的要因による化学的損傷の影響を同時に考慮できる手法の提案を行った。本研究で得られた成果を要約すると以下のとおりである。

- 1) 力学的損傷を考慮した解析により、2種類の既設RC桁の終局耐力時までの荷重-変位関係を精度よく把握できることが確認された。
- 2) A橋に対する解析で、下面増厚工法の効果で終局耐力が補強前に比べ約70%増加していることを解析によって再現できた。このことから、既設部と補強部の変位の連続性が解析上の仮定と同様に満足されていることが予想され、A橋の補強工事が適切に施されていたことが推察された。
- 3) 化学的損傷による終局耐力の変動例として、塩害の影響を考慮した解析を行った。今後、適切な鉄筋腐食モデルを構築できれば、塩害が耐荷性能に与える影響を把握できるものと考えられる。
- 4) 鉄筋腐食のモデル化において、体積膨張率 α を1.2～2.0の範囲で変化させると、最大で3割程度の終局耐力の低下が予想された。このことから、腐食生成による体積膨張が終局耐力に与える影響は、非常に大きくなる可能性があることが認められた。

本研究では鉄筋の体積膨張率をパラメータとしただけでなく、コンクリート中の塩化物イオンの拡散係数も一定の値を仮定したが、今後の課題として、鉄筋腐食部の膨張メカニズムをより明らかにするとともに、コンクリートのひび割れの進展にともなう拡散係数の変化を考慮した検討を行う必要があると考えている。

参考文献

- 1) Jean Lemaitre : *A course on damage mechanics*, Springer Verlag,1992.
- 2) Anna Saetta, Roberto Scotta, and Renato Vitaliani : Coupled environmental-mechanical damage model of RC structures *Journal of Engineering Mechanics* August 1999, pp.930-940.
- 3) Ronnie Henricus, Johannes Peerlings : Enhanced damage model for fracture and fatigue, *Ph.D. Thesis*, Eindhoven University of Technology: Eindhoven, The Netherlands, 1999.
- 4) M.G.D.Geers, R.de Borst, R.H.J.Peerlings : Damage and crack modeling in single-edge and double-edge notched concrete beams, *Engineering Fracture Mechanics* 65 (2000),pp.247-261
- 5) Wai-Fah Chen : *Constitutive equation for engineering materials*, Elsevier, 1994.
- 6) 濱田秀則 : RC港湾構造物の塩害に係わる環境要因の定量的評価に関する研究 (1998)
- 7) 竹田宣典, 迫田恵三, 十河茂幸 : 海洋環境下に10年暴露した鉄筋コンクリートの経年変化 (コンクリート工学年次報告集, Vol. 18, 1996, p753-758)
- 8) 堤知明, 白井伸一, 安田登, 松島学 : 塩害劣化に関する影響要因の実データに基づく定量評価 (土木学会論文集No.544 / V-32,33-41,1996)
- 9) QiLukuan, 高木言芳, 関博 : 鉄筋腐食領域によるコンクリートひび割れ発生時の腐食量への影響について (土木学会第53回年次学術講演会 p254-255 1998)
- 10) 森本登志也, 小堀光憲, 高木兼士 : 塩分を含んだコンクリート中の鉄筋腐食に関する研究 (コンクリート工学年次報告集 9-1 p351-356 1987)
- 11) 元路寛, 関博 : 離散ひび割れモデルに基づく鉄筋腐食によるひび割れ幅に関する解析的検討 (コンクリート工学年次報告集 Vol.21, No.2, 1999, p1033-1038)
- 12) 松尾豊支, 西内達雄, 松村卓郎 : 鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひびわれ進展解析 (コンクリート工学年次報告集, vol.19, no.2, 1997, p99-104)
- 13) 須田久美子, 本橋賢一, MISRA Sudir : 鉄筋の腐食生成物の物理的性質が腐食ひびわれ発生限界腐食量に及ぼす影響 (土木学会第45回年次学術講演会、p520-521、平成2年9月)
- 14) 須田久美子, MISRA Sudir, 本橋賢一 : 腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的検討 (コンクリート工学年次報告集, vol.4, no.1, 1992, p751-756)
- 15) 富田充宏 : 剛体-ばねモデルによるコンクリート構造の非線形解析に関する研究 (1997)

(2003年9月12日受付)