

損傷力学を用いた既設 RC 桁の終局耐力に関する解析的研究

九州大学 学生会員 村戸伸行 九州大学 正会員 園田佳巨

九州大学 正会員 彦坂熙 国土交通省福岡国道工事事務所 正会員 植田 定

1. 緒言

構造物のライフサイクルコストをできるだけ小さくするには、構造物の劣化の進展や耐力の経年変化を正確に把握することが不可欠である。本研究では、そのための基礎的な考察として、長年月にわたり供用され劣化した既設 RC 桁の終局耐力評価に、連続体損傷力学を適用する方法について検討を試みた。

2. 解析手法の概要

損傷力学は、材料内部に生じる損傷の発生および進展を評価する一手法であり、材料の劣化による損傷度 D_{chem} と力学的要因により生じる損傷度 D_{mech} を個々に考慮すれば、式(1)に示すように構造部材の劣化と疲労の2つの異なる現象による耐力の低下を評価できるものと考えられる。

$$\mathbf{s}_{ij} = (1 - D_{mech})(1 - D_{chem})E_{ijkl}\mathbf{e}_{kl} \quad (1)$$

現実には、様々な材料劣化の原因が考えられ、既往の研究によればコロイドの侵入・拡散によって発生するコンクリートの劣化については、以下のような式でモデル化が行われている。

$$D_{chem} = (1 - f) \left(1 - \frac{1}{1 + (2R)^4} \right) \quad (2)$$

ここに、 $f = f_{ck,damage} / f_{ck,initial}$ 、 $R = c / c_{ref}$

c_{ref} ：コロイド粒子の濃度の最大値、 c ：コロイド粒子濃度を示し、時間の変化に対するコロイド粒子の濃度は一般に拡散方程式によって求められる。

力学的な変形にともなう損傷については、コンクリート構造部材内部の相当ひずみを圧縮強度と引張強度の相違を考慮した以下の式(3)を用いて評価することで、部材内部の損傷を式(4)で示される負荷関数を満足するときに発生もしくは進展するものとした。

$$\mathbf{e}_{eq} = \frac{k-1}{2k(1-2n)} I_1 + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2n} I_1 \right)^2 + \frac{6k}{(1+n)^2} 2J_2} \quad (3)$$

$$f(\mathbf{e}_{eq}, \mathbf{k}) = \mathbf{e}_{eq} - \mathbf{k}_i = 0 \quad (4)$$

ここに、 I_1 ：ひずみの1次不変量、 J_2 ：偏差ひずみ2次不変量、 k ：圧縮強度と引張強度の比、 i ：損傷進展条件パラメータ（無損傷時：損傷開始時の相当ひずみ、損傷進展時：過去の最大相当ひずみ）

なお、式(3)において $k = 1$ とおけば、ミーゼスの降伏条件に帰着することを利用し、鉄筋要素に対しても同じ式を適用した。また、部材内部に生じる損傷度を表すスカラー変数 D_{mech} は、以下の式(5)を用いて評価した。

$$D_{mech} = 1 - \frac{\mathbf{k}_0}{\mathbf{k}} \left[(1 - \mathbf{a}) + \mathbf{a} e^{-b(k - k_{0i})} \right] \quad (5)$$

ここに、 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} は材料定数で、 \mathbf{k}_0 は損傷発生時の相当ひずみの値である。式(5)で求めた損傷変数 D_{mech} を用いて、構造部材内の損傷の進展にともなう力学的な剛性低下を、式(1)により評価することで既設 RC 桁の終局耐力評価を行った。

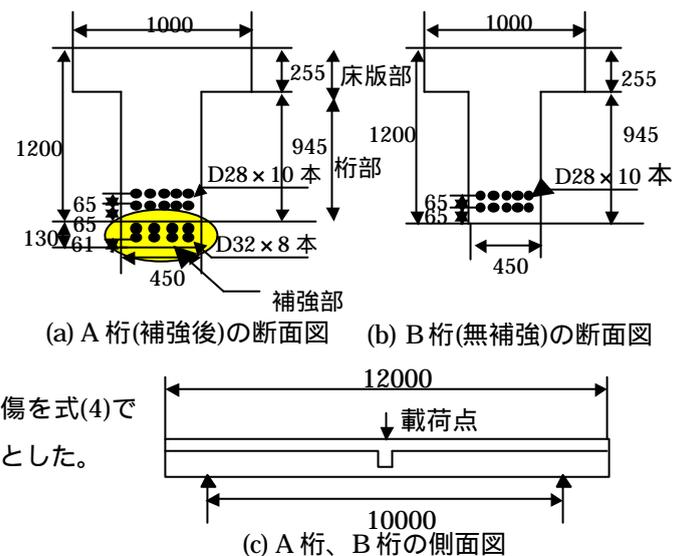


図 - 1 既設 RC 桁解析モデル (単位 mm)

キーワード：損傷力学，既設 RC 桁，弾塑性有限要素解析

連絡先：〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 九州大学大学院工学研究府建設システム工学専攻

2.2 既設 RC 桁の損傷解析

ここでは、既設 RC 桁を三次元ソリッド要素で離散化し、弾塑性増分解析の各ステップで、各要素の積分点毎に求めた相当ひずみをもとに式(5)を用いた損傷度評価を行い、得られた損傷変数を次ステップの構成式(1)に用いることで、損傷の進展を考慮した。なお、本解析で検討対象とした既設 RC 桁は、図 - 1 に示す部材断面を有するもので、破壊試験直前に実施した材料試験より各材料定数を決定したことから、材料劣化に関して今回は考慮しない。

3. 解析結果および考察

3.1 解析モデル

図 - 1 の既設 RC 桁（補強されたものを A 桁、無補強のものを B 桁とした）に対して、支間中央に一定の増分荷重を与え、破壊試験のシミュレーションを行った。なお、材料のヤング係数および強度は、材料試験の応力 - ひずみ関係を用いて決定した。計算に用いた材料定数を表 - 1 に示す。

3.2 数値計算結果および考察

図 - 2 は、本手法で求めた既設 RC 桁の荷重 - 変位関係を、表 - 2 は終局耐力を比較した結果を示す。これらの図表より、終局耐力、荷重 - 変位関係について実験結果とほぼ等しい値を得ることができ、下面増厚工法による補強効果についても解析により良好に把握できることが認められた。図 - 3 は、終局時の損傷状態を表す損傷変数の分布を示したもので、A 桁、B 桁同様に曲げ引張領域で損傷が進展する結果が得られた。今回は単調載荷時の破壊性状について検討したが、今後は各種非破壊試験結果から判断される材料劣化を考慮した既設 RC 桁の残存耐力の評価方法について基礎的レベルから検討を行う予定である。

本研究で用いた既設 RC 桁の実験データは、国土交通省福岡国道工事事務所の協力を得て行った研究活動によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献 1) M.G.D.Geers et.al:Damage and crack modeling in single-edge and double-edge notched concrete beams, Engineering Fracture mechanics65,pp.247-261,2000

表 1 - 材料定数

	コンクリート		補強部	鉄筋	
	床版部	桁部	モルタル	既設部	補強部
E : ヤング係数 (kgf/cm ²)	2.6 × 10 ⁵	1.3 × 10 ⁵	1.6 × 10 ⁵	2.1 × 10 ⁶	2.1 × 10 ⁶
: ポアソン比	0.20	0.20	0.20	0.29	0.29
: 材料定数	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
: 材料定数	100	100	2000	3000	3000
o : の初期値	2.5 × 10 ⁻⁵	3.5 × 10 ⁻⁵	1.0 × 10 ⁻⁴	6.5 × 10 ⁻⁴	9.5 × 10 ⁻⁴
圧縮強度(kgf/cm ²)	400	230	650	4100	5200
圧縮・引張強度比	15	15	10	1	1

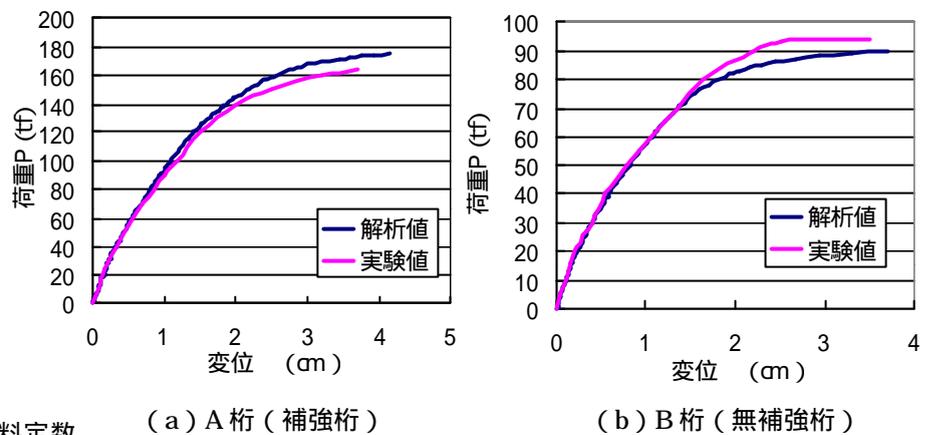


図 - 2 既設 RC 桁の荷重 - 変位関係

表 - 2 終局耐力の比較 (tf)

	実験値	解析値
A 桁	164.0	171.2
B 桁	94.0	89.5

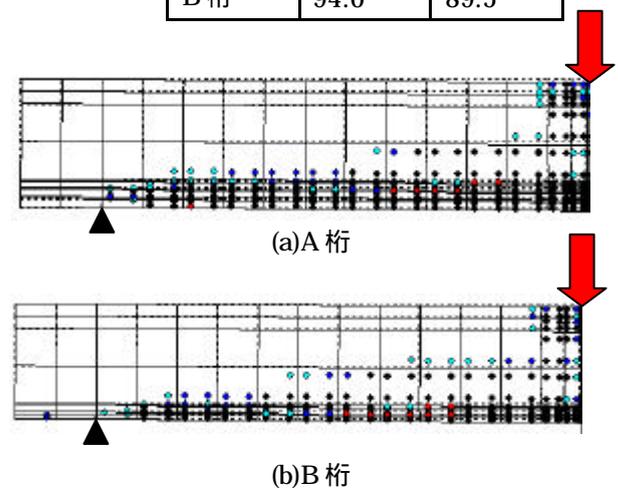


図 - 3 終局時の損傷進展状況