T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ひずみ時効による鉄筋の特性変化の予測手法 その2 特性変化の予測モデルの構築
Title(English)	Prediction method for changes in reinforcement properties due to strain ageing (Part2 Proposed prediction model for changes in reinforcement characteristics)
著者(和文)	岡村光晋, Alex SHEGAY, 佐藤大樹
Authors(English)	Koshin Okamura, Alex Shegay, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 301-304
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 301-304
発行日 / Pub. date	2023, 2
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

2022年度日本建築学会
関東支部研究報告集Ⅰ
2023年2月

ひずみ時効による鉄筋の特性変化の予測手法
その2　特性変化の予測モデルの構築

構造－鉄筋コンクリート構造

ひずみ時効　　鉄筋
補修

準会員　○　岡村　光晋[*1]　　正会員　Alex Shegay[*2]
正会員　　佐藤　大樹[*3]

1. 序論

本報その1では，ひずみ時効による鉄筋の延性低下や強度上昇に影響を及ぼす因子を特定するための実験について記述した．本報その2では，本報その1で挙げられた因子を用いてひずみ時効による鉄筋の特性変化の予測モデルの構築を行う．

2. ひずみ時効による特性変化の定量的な定義

本報その1ではひずみ時効による鉄筋の特性変化として伸び率の低下，引張強度の上昇および降伏強度の上昇を確認している（図1）．本報その2ではこの3つの特性変化を予測するモデルの構築を行う．

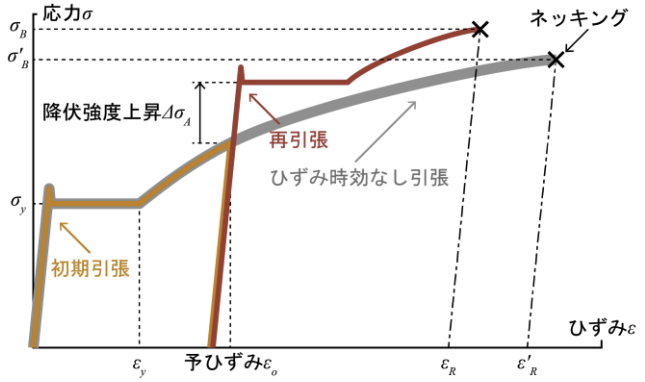

図1 鉄筋のひずみ-応力曲線模式図

モデル構築にあたって伸び率，引張強度および降伏強度の変化を定量的に評価するために使用した伸び率比 α_R ，引張強度比 α_B および降伏強度比 α_{YA} の定義を式(1)，(2)，(3)に示す．これはそれぞれについて値が1のときにひずみ時効による特性変化が発生しなかったことを示す．なお図1に示されるように，ε'_R，ε_R はそれぞれひずみ時効なし引張時，再引張時のネッキング発生時のひずみ，σ'_B ，σ_B はそれぞれひずみ時効なし引張時，再引張時の引張強度，σ_y は初期引張時の降伏強度（本報では0.2 %オフセット耐力を用いた），$\Delta\sigma_A$ はひずみ時効による降伏強度上昇を示す．

$$\alpha_R = \varepsilon_R/\varepsilon'_R \quad (1)$$

$$\alpha_B = \sigma'_B/\sigma_B \quad (2)$$

$$\alpha_{YA} = (\sigma_y + \Delta\sigma_A)/\sigma_y \quad (3)$$

3. 各因子によるひずみ時効発生の予測モデル構築

本報その1ではひずみ時効による延性の低下および強度の上昇に影響を及ぼす因子としてバナジウム含有率 λ_V ，時効期間 t_A および予ひずみ ε_o が挙げられることを確認した．本報その2ではこれら3因子について，それぞれのひずみ時効発生のモデルを構築する．

3.1. バナジウム含有率 λ_V による特性変化の予測モデル

ここではバナジウム含有率 λ_V による伸び率比 α_R ，引張強度比 α_B および降伏強度比 α_{YA} の予測モデルの構築を目的とする．本報その1の材料特性条件に関する実験で得られた λ_V に対する α_R ，α_B および α_{YA} について図2の散布図部分に示す（λ_V については本報その1の表1参照）．図2の散布図部分より λ_V が上昇すると延性の低下および強度の上昇が抑えられていることがわかる．このことから λ_V が上昇することによりひずみ時効の発生が抑制されることがわかる（なお伸び率の低下および降伏強度の上昇は λ_V がおおよそ0.06 %以上で，引張強度の上昇は λ_V がおおよそ0.03 %以上で発生しなくなる）．また λ_V と α_R ，α_B および α_{YA} との関係は線形に近い．そこで最小二乗法を用いて λ_V による特性変化の予測モデルを構築した．それぞれの予測式を式(4)，(5)，(6)に，予測式をプロットしたもの

Prediction method for changes in reinforcement properties due to strain ageing (Part2 Proposed prediction model for changes in reinforcement characteristics)

OKAMURA Koshin, Alex SHEGAY
SATO Daiki

を図 2 の破線部分に示す．この予測モデルについて，λ_V が十分に大きいときにひずみ時効が発生しなくなるため，α_R については 1 を上限，α_B および α_{YA} については 1 を下限とした．なお，式(4)，(5)，(6)は後述する一般的な予測モデル構築の際の計算の簡略化のために 1 からの差異を強調する表記にしている．

3. 2. 時効期間 t_A による特性変化の予測モデル

ここでは時効期間 t_A による特性変化の予測モデルの構築を目的とする．なお時効期間 t_A は Hundy[7]が作成した式を用いて常温（15 ℃）時の放置に相当する期間を算出した．本報その 1 のひずみ時効条件に関する実験で得られた t_A に対する α_R ，α_B および α_{YA} について図 3 の散布図部分に示す．図 3 の散布図部分より t_A が大きくなると延性の低下および強度の上昇が大きくなることがわかる．このことから t_A の経過にしたがいひずみ時効の発生が進行することがわかる．また，この進行は徐々にある値に収束する動きを見せる．よって指数関数式を用いた t_A による特性変化の予測モデルを最小二乗法で構築した．最も変化が顕著であり傾向が掴みやすかった予ひずみが約 8 %のものについて，それぞれの予測式を式(7)，(8)，(9)に，予測式をプロットしたものを図 3 の破線部分に示す．なお，式(7), (8), (9)内の 0.69，0.076，0.16 はそれぞれひずみ時効による延性低下の最低値および強度上昇の最大値を示しており，他の予ひずみを与えた際の特性変化の予測モデルはこの値を変更することで作成することができると仮定した．

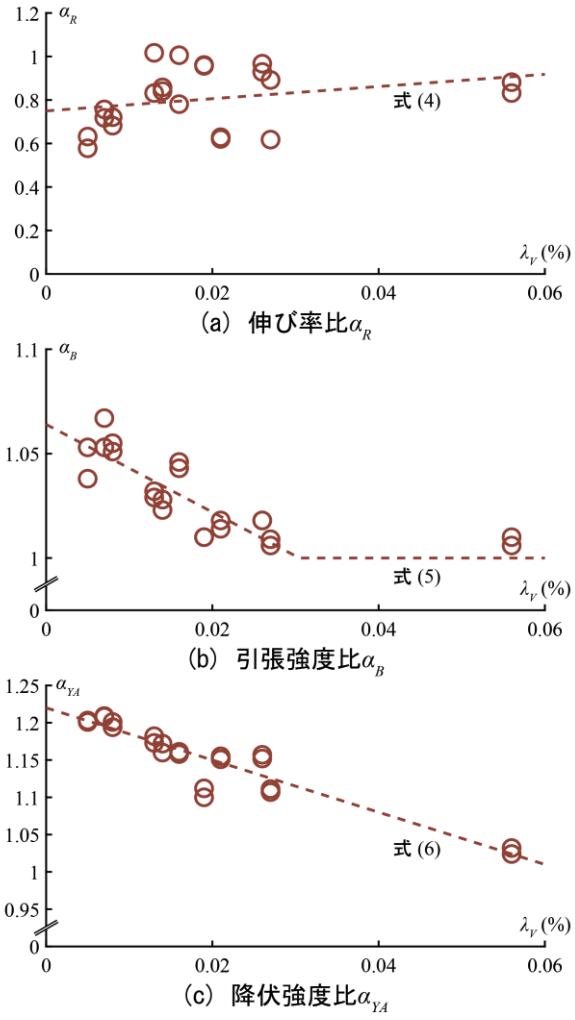

図 2 バナジウム含有率 λ_V と特性変化の関係

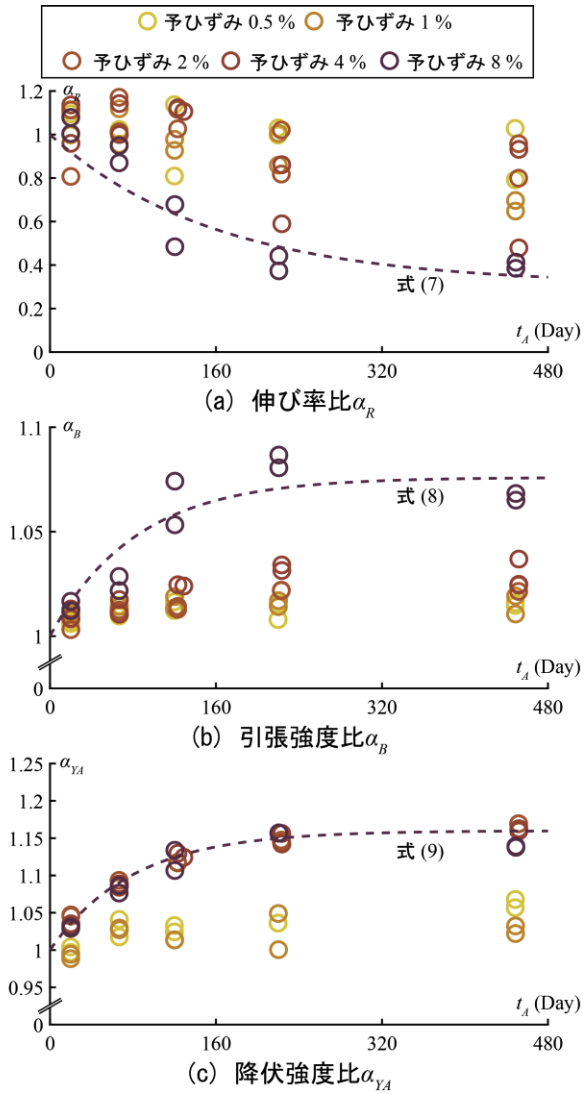

図 3 時効期間 t_A と特性変化の関係

$$\alpha_R = 1 - 0.25 + 280\lambda_V \leq 1 \quad (4)$$

$$\alpha_B = 1 + 0.064 - 210\lambda_V \geq 1 \quad (5)$$

$$\alpha_{YA} = 1 + 0.22 - 350\lambda_V \geq 1 \quad (6)$$

$$\alpha_R(\varepsilon_o \approx 8\,\%) = 1 - 0.69\left(1 - e^{-t_A/160}\right) \quad (7)$$

$$\alpha_B(\varepsilon_o \approx 8\,\%) = 1 + 0.076\left(1 - e^{-t_A/83}\right) \quad (8)$$

$$\alpha_{YA}(\varepsilon_o \approx 8\,\%) = 1 + 0.16\left(1 - e^{-t_A/80}\right) \quad (9)$$

3.3. 予ひずみ ε_o による特性変化の予測モデル

ここでは予ひずみ ε_o による特性変化の予測モデルの構築を目的とする．本報その 1 のひずみ時効条件に関する実験で得られた ε_o に対する α_R ，α_B および α_{YA} について図 4 の散布図部分に示す．図 4 の散布図部分より ε_o が上昇すると延性の低下および強度の上昇が大きくなることがわかる．また ε_o と α_R および α_B との関係は線形に近く，α_{YA} との関係は基本的に横ばいで，1~2 %を境に値を変えることがわかる．本報ではこの境界をひずみ硬化開始時のひずみ ε_y と仮定した．そこで最小二乗法を用いて ε_o による α_R および α_B の予測モデルを構築し，2 値に分ける形で ε_o による α_{YA} の予測モデルを構築した．収束値に近しく時効期間による影響を除外できる，時効期間が約 1 年のものについて，それぞれの予測式を式(10), (11), (12)に（後述する一般的なモデル構築の際の計算の簡略化のために 1 からの差異を強調する表記にしている），予測式をプロットしたものを図 4 の破線部分に示す．

$$\alpha_R(t_A \approx 1\ year) = 1 - 0.16 - 5.3\varepsilon_o \tag{10}$$

$$\alpha_B(t_A \approx 1\ year) = 1 + 0.009 + 0.68\varepsilon_o \tag{11}$$

$$\alpha_{YA}(t_A \approx 1\ year) = \begin{cases} \varepsilon_o > \varepsilon_y \text{の場合} & 1.16 \\ \varepsilon_o \leq \varepsilon_y \text{の場合} & 1.04 \end{cases} \tag{12}$$

4. 一般的な特性変化モデルの構築および検証

4.1. 一般的な予測モデルの構築

3 章ではひずみ時効による特性変化に影響を及ぼすとされる 3 因子（バナジウム含有率 λ_V ，時効期間 t_A および予ひずみ ε_o ）について，伸び率比 α_R ，引張強度比 α_B および降伏強度比 α_{YA} の予測モデルを構築した．ここではこれらを組み合わせて総合的な予測モデルを構築する．

α_R ，α_B および α_{YA} の予測式は，鉄筋の鋼種や径によって異なる λ_V および鉄筋に加わった損傷で決定する ε_o で最大値（最小値）が決定し，t_A の経過にしたがいその最大値（最小値）に向けて徐々に収束すると仮定する．また t_A に関する指数関数項は 3.2.で先述した式(4), (5), (6)の指数関数項と同様であると仮定する．この仮定より α_R ，α_B および α_{YA} の予測式は以下の式(13), (14), (15)の通りであるとして，この $f(\lambda_V, \varepsilon_o)$ が λ_V および ε_o の 2 変数で決定する変数とした．$f(\lambda_V, \varepsilon_o)$ は基準として用いる λ_V による特性変化の予測式(4), (5), (6)および ε_o による予測式(10), (11), (12)と線形関係を持つと仮定し，両者をかけ合わせることで作成した．それぞれの $f(\lambda_V, \varepsilon_o)$ を式(16), (17), (18)に，例として α_{YA} の予測モデルの概要を図 5 に示す．ひずみ時効による降伏強度上昇は図 5 の紫実線から時間経過にしたがい上昇しある値に収束すること，紫，赤，黄実線から鉄筋のバナジウム含有率の上昇によって低下すること，実線と破線の比較から与えられた予ひずみの上昇によ

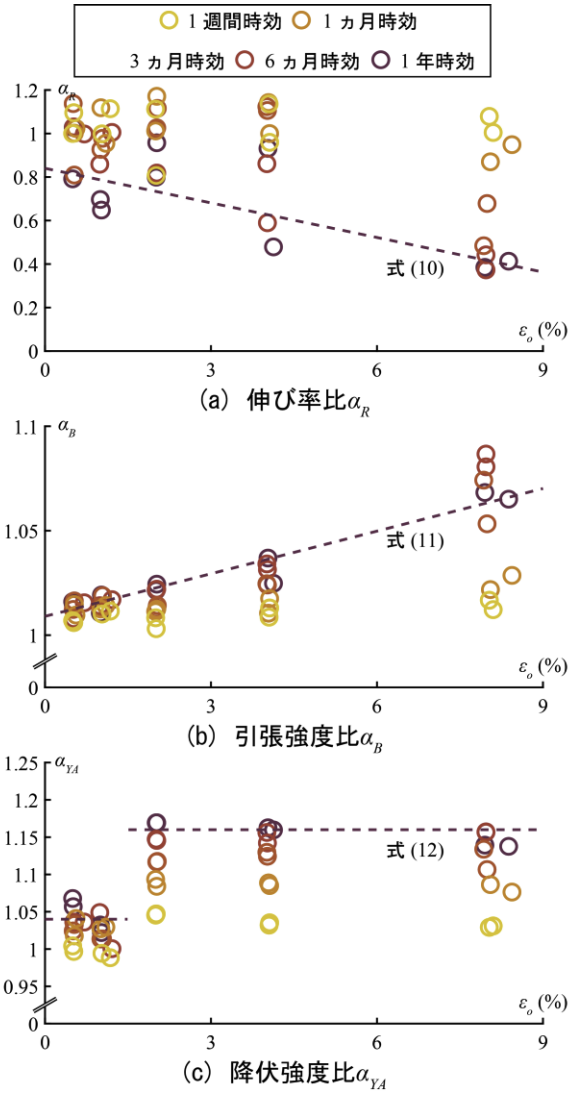

図 4 予ひずみ ε_o と特性変化の関係

$$\alpha_R = 1 - f_R(\lambda_V, \varepsilon_o)\left(1 - e^{-t_A/160}\right) \tag{13}$$

$$\alpha_B = 1 + f_B(\lambda_V, \varepsilon_o)\left(1 - e^{-t_A/83}\right) \tag{14}$$

$$\alpha_{YA} = 1 + f_{YA}(\lambda_V, \varepsilon_o)\left(1 - e^{-t_A/80}\right) \tag{15}$$

$$f_R(\lambda_V, \varepsilon_o) = 4.7(0.25 - 280\lambda_V)(0.16 + 5.3\varepsilon_o) \geq 0 \tag{16}$$

$$f_B(\lambda_V, \varepsilon_o) = 29(0.064 - 210\lambda_V)(0.009 + 0.68\varepsilon_o) \geq 0 \tag{17}$$

$$f_{YA}(\lambda_V, \varepsilon_o) = 0.94(0.22 - 350\lambda_V)\varepsilon'_o \geq 0$$

$$\text{ただし，}\ \varepsilon'_o = \begin{cases} \varepsilon_o > \varepsilon_y \text{の場合} & 1 \\ \varepsilon_o \leq \varepsilon_y \text{の場合} & \dfrac{1}{4} \end{cases} \tag{18}$$

って上昇することが確認でき，構築した予測モデルが前述したひずみ時効による特性変化に影響を及ぼすとされる 3 因子を考慮していることが見て取れる．

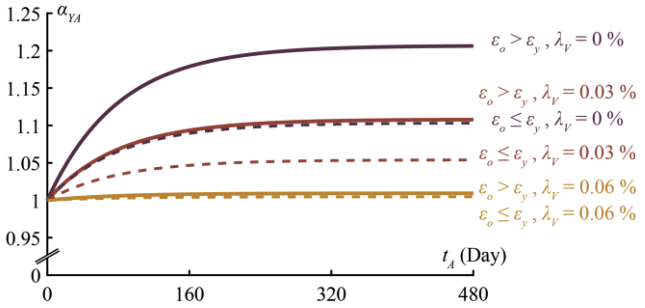

図 5 降伏強度比 α_{YA} の予測モデルの概要

4.2. 構築した予測モデルの検証

本報その 1 の材料特性条件に関する実験およびひずみ時効条件に関する実験について，作成したモデルの予測値と計測値との比較を図 6 の赤丸部に示す．また既往研究[3,4]の実験結果について作成したモデルの予測値と計測値との比較を図 6(b)，(c)の黄丸部に示す．図 6 より，強度の上昇を予測するモデルは計測値との誤差が 5 %以内であり，既往研究も同様の傾向を示していることから作成した予測モデルが一般的に適応できることを確認した．一方，延性の低下を予測するモデルは計測値との誤差が大きい．これはパンチマークを用いたことによる計測時の誤差が原因であると考えられる．

5. 結論

本報その 2 ではその 1 で特定したひずみ時効の発生に影響を及ぼすバナジウム含有率 λ_V ，時効期間 t_A および予ひずみ ε_o について，それぞれの特性変化の予測モデルと，それらを総合した予測モデルを構築した．これは強度の上昇に関して計測値との誤差が 5 %以内であり，本研究以外の実験結果でも同様の傾向を示すため，ひずみ時効による鉄筋の特性変化を一般的に予測できると考えられる．

今後は繰り返し載荷など単調引張以外の加力を行った際の特性変化や，特性変化による建物の耐震性への影響について分析を行っていく予定である．

謝辞

本研究に当たり，東京鐵鋼（株）の各位には貴重なご助言を賜りました．本研究は JSPS 科研費 22K14315 の助成を受けたものです．本研究の実験を遂行するにあたり，東京工業大学の佐藤研究室の各位にはご助力いただきました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1) 田才晃，山田哲弥，小谷俊介，青山博之：鉄筋コンクリート造曲げ部材の補修後の耐力に関する研究，第七回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.653-656，1985.
2) 武田武信，白鳥英亮，池上皓三，熊倉重典，那須康雄：時効を施した軟鋼の塑性変形挙動，日本機械学会論文集，Vol. 47，No. 418，pp.665-675，1981.
3) Loporcaro, G.: A least invasive method to estimate the residual strain capacity of steel reinforcing bars in earthquake damage buildings, Ph.D thesis. University of Canterbury, 2017.
4) Pussegoda, L.N.: Strain age embrittlement in reinforcing steels, Ph.D thesis. University of Canterbury, 1978.
5) 岡村光晋，Alex，SHEGAY，佐藤大樹：ひずみ時効による鉄筋の強度及び延性変化に影響を及ぼす材料特性の特定，日本地震工学会大会，2022.
6) 国土交通省国土技術政策総合研究所，建築研究所：建築物の構造関係技術基準解説書 2020 年版，全国官報販売協同組合，2020.
7) Hundy, B.B.: Accelerated strain ageing of mild steel, Journal of the Iron and Steel Institute, pp. 34-38, 1954.

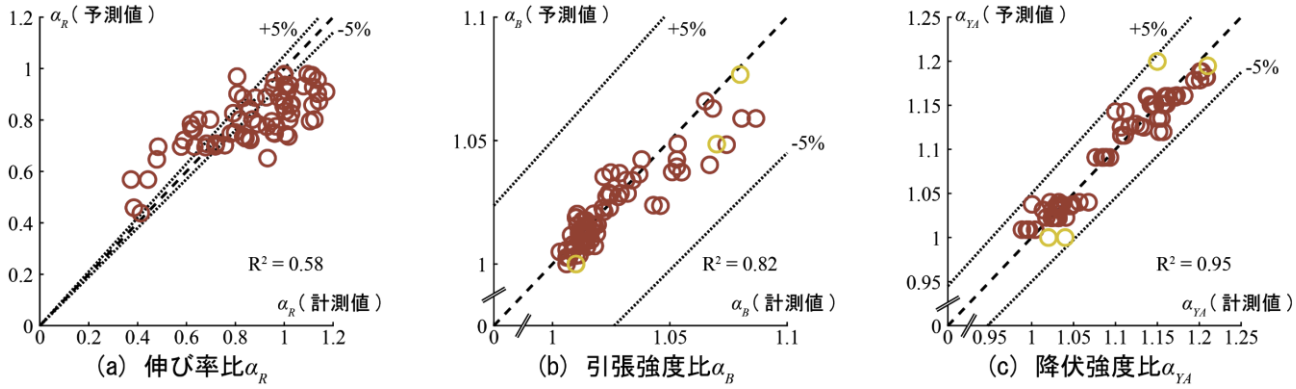

図 6 各モデルと計測値の比較

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 学生 Undergraduate Student, Tokyo Institute of Technology*1
*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 助教・Ph.D. Assistant Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.*2
*3 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士（工学） Associate Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng. *3