T2R2東京工業大学リサーチリポジトリ Tokyo Tech 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, , , pp. 301-304 | | | | |
| Citation(English) | , , , pp. 301-304 | | | | |
| 発行日 / Pub. date | 2023, 2 | | | | |
| | | | | | |

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 | |

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.





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 a_R , 引張強度比 a_B および降伏強度比 a_{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

| 準会員 | \bigcirc | 岡村 | 光晋*1 | 正会員 | Alex Shegay ^{*2} |
|-----|------------|----|------|-----|---------------------------|
| 正会員 | | 佐藤 | 大樹*3 | | |

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.

$$\alpha_R = \varepsilon_R / \varepsilon'_R \tag{1}$$

$$\alpha_B = \sigma'_B / \sigma_B \tag{2}$$

$$\alpha_{YA} = \left(\sigma_y + \Delta \sigma_A\right) / \sigma_y \tag{3}$$

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_4 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 λν 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_{I4} 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_{I4} 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_{I4} 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

OKAMURA Koshin, Alex SHEGAY SATO Daiki

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

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, a_{R} については1を上限, a_{B} および a_{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 Hundy⁷⁾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 a_R , a_B および a_{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



図 2 バナジウム含有率 λ_{ν} と特性変化の関係

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

 $\alpha_B = 1 + 0.064 - 210\lambda_V \ge 1 \tag{5}$

$$\alpha_{YA} = 1 + 0.22 - 350\lambda_V \ge 1 \tag{6}$$

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 t₄ 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 t₄ 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.



3.3. 予ひずみ *εo* による特性変化の予測モデル

ここでは予ひずみ ε。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。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_{α} と α_{R} および α_{B} との関係は線形に近く, α_M 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_ν と仮定した. そこで最小二乗法を用いて ε_ο 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。による α_M 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.

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

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

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 a_R ,引張強度比 a_B およ び降伏強度比 a_{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.

(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(λr, ε₀)を式(16),(17),(18) に,例として α₁₄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

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

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

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

$$f_R(\lambda_V, \varepsilon_o) = 4.7(0.25 - 280\lambda_V)(0.16 + 5.3\varepsilon_o) \ge 0 \quad (16)$$

$$f_B(\lambda_V, \varepsilon_o) = 29(0.064 - 210\lambda_V)(0.009 + 0.68\varepsilon_o) \ge 0 \quad (17)$$

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 t₄ および予ひ

ずみ ε。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

- 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.
- 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.
- 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.
- 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 |
|----|--------|-----|---------|----|
|----|--------|-----|---------|----|

- *2 東京工業大学 未来産業技術研究所 助教・Ph.D.
- *3 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士(工学)

Undergraduate Student, Tokyo Institute of Technology^{*1} Assistant Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.^{*2} Associate Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.^{*3}