

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	繰返し荷重を受けた鉄筋のひずみ時効による特性変化
Title(English)	Changes in properties of reinforcing bars due to strain ageing after cyclic loading
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. 361-364
Citation(English)	, , , pp. 361-364
発行日 / Pub. date	2025, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

繰返し载荷を受けた鉄筋のひずみ時効による特性変化

構造—鉄筋コンクリート構造

正会員 ○ 岡村光晋^{*1}
〃 佐藤大樹^{*3}

正会員 Alex Shegay^{*2}

ひずみ時効 補修 鉄筋

1. 序論

近年地震で損傷した建物の補修や再利用の意義が強まっている¹⁾。補修後の建物の耐震性能変化の一つの要因としてひずみ時効がある。ひずみ時効とは塑性変形を受けた鋼材に時間の経過とともに降伏棚が再現し、耐力の上昇や塑性変形能力の低下が起こる現象²⁾(図1)である。延性低下は建物の脆性破壊を、強度上昇は建物の破壊モードの変化を引き起こす恐れがあるため、鉄筋のひずみ時効は建物の耐震性に影響を及ぼすことが考えられる。

既往研究³⁾では、単純引張を受けた鉄筋について、ひずみ時効による特性変化に影響を及ぼす因子の特定および特性変化の予測手法の構築を行った。本報ではより実際の地震損傷に近づけた、繰返し载荷を受けた鉄筋について、ひずみ時効による特性変化に影響を及ぼす因子の特定および単純引張時との特性変化の差異の分析を行う。

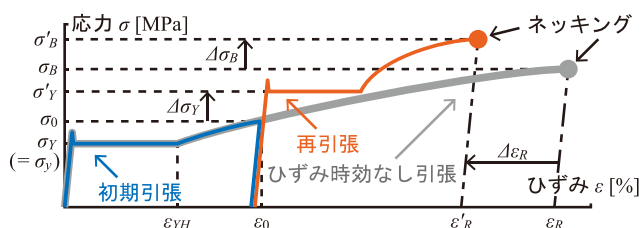


図1 鉄筋の応力-ひずみ曲線模式図

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体には、鉄筋 SD345, D32 を削り出して作成した鋼材を使用する。表1に試験体の概要を、図2に試験体平面図を示す。

表1 試験体概要

鋼種	径	炭素含有率	バナジウム含有率	長さ
SD345	D32	0.25 %	0.020 %	120 mm

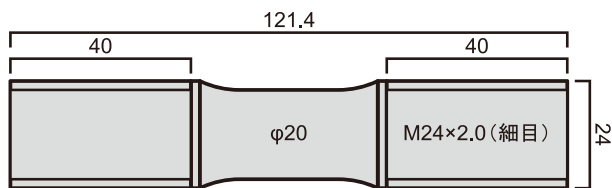


図2 試験体平面図 (単位:mm)

2.2 载荷条件概要

本実験では試験体に対して1~3%のひずみを1~4 サイクルかけ(なお、これは地震応答時に鉄筋が受けると考えられる⁴⁾ 载荷条件である), 1年間の時効に相当する加熱を行うことによってひずみ時効を発生させる。この試験体を再び引張ることによってひずみ時効による特性変化の計測を行った。図3に実験セットアップ図を、表2に実験マトリクスを、図4に各条件の载荷履歴をそれぞれ示す。^{*1}で示した载荷条件Fの試験体は加力後に両振幅0.5%の繰返し载荷を8回行う。この実験を行うことにより以下の5点について分析および確認を行う。なお、各条件で2本の試験体を用いた。

(1) 予ひずみの大小

単純引張試験の結果をから予ひずみの増大に伴いひずみ時効による特性変化も大きく発生することが確認されている³⁾ ため、载荷条件A, B およびEを比較し、この傾向と同様かの確認を行う。

(2) 残留ひずみの大小

単純引張試験によって示された予ひずみとひずみ時効による特性変化の関係が予ひずみによるものなのか残留ひずみによるものなのか、载荷条件D, E, G およびIを比較し分析を行う。

(3) 両振幅の大小および圧縮変形の有無

载荷条件Jの結果から、鉄筋が初期状態と比べて圧縮側に変形した際のひずみ時効の発生への影響がないかを確認する。

(4) 繰返し载荷のサイクル数

既往研究⁵⁾により、サイクル数によるひずみ時効への影響は小さいとされているため、载荷条件Gに対しHを比較し、この傾向と同様かの確認を行う。

(5) 細かい繰返し载荷の有無

地震応答解析時に鉄筋は数回の比較的大きい振幅の変形を起こした後に数回~数十回の細かい振幅の変形を起こしていることを確認している⁴⁾。载荷条件Eに対しFを比較することでこれによるひずみ時効の発生への影響の有無を確認する。

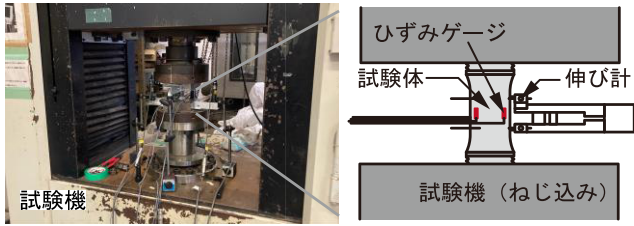
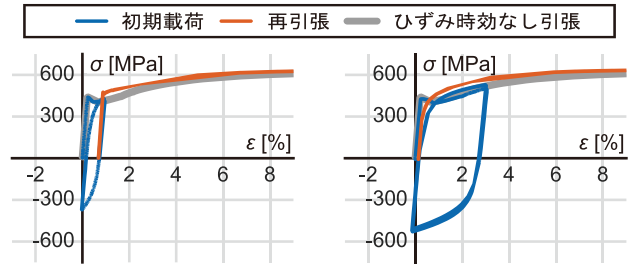


図3 実験セットアップ図

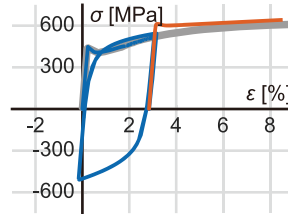
表2 実験マトリクス

		最大ひずみ			
		1%	2%	3%	
		両振幅 Amp.			
		1%	2%	3%	4%
残	0%	サ	1+引張	D	J
留	1%	イ	1+引張	A, B, E, F ^{**1}	
ひ	2%	ク	1+引張	C, G	
ず	3%	ル	4+引張	H, I	
み		数	1+引張		



(a) 荷条件 A

(b) 荷条件 D



(c) 荷条件 I

図5 各条件の荷履歴

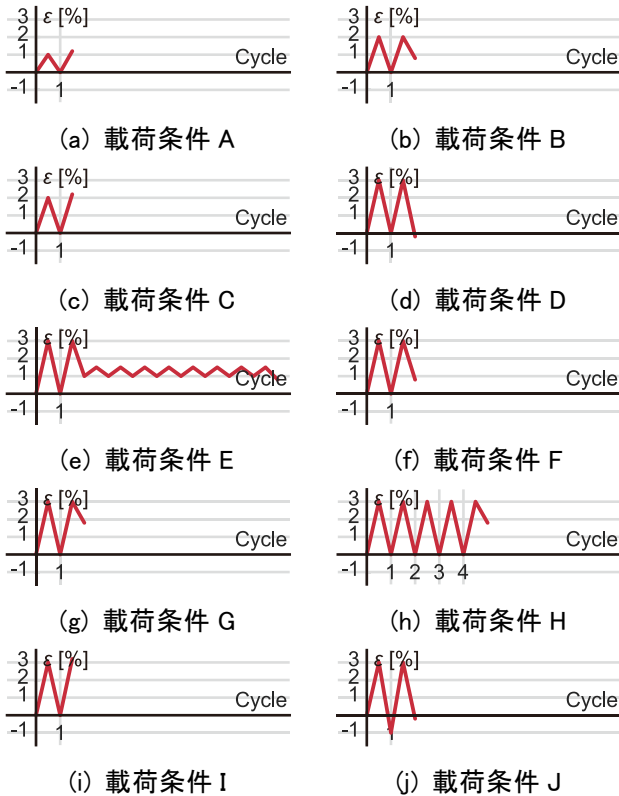


図4 各条件の荷履歴

3. 荷試験結果

代表的な実験結果として、荷条件 A(予ひずみ $\epsilon_0 =$ 残留ひずみ $\epsilon_r = 1\%$)、D($\epsilon_0 = 3\%$, $\epsilon_r = 0\%$)および I($\epsilon_0 = \epsilon_r = 3\%$)の荷履歴を図5に示す。図5より、 ϵ_0 および ϵ_r が大きい試験体はひずみ時効による降伏棚の再現および強度上昇が起こっていることを確認した。また、荷条件 D に代表される、予ひずみと残留ひずみが一致しない試験体については、降伏棚が再現しないことを確認した。

4. ひずみ時効による特性変化

ひずみ時効による特性変化を評価するために、以下に示す式(1)~(3)を用いて評価指標(延性変化率 β_R 、最大引張強度変化率 β_B 、降伏強度変化率 β_{YC})を作成した。ここでは降伏強度変化率 β_{YC} に注目し、荷条件による差異の分析を行う。 β_{YC} は、初期荷時の応力の最大値に対する再引張時の同様のひずみの際の応力との差 $\Delta\sigma_{YC}$ をひずみ時効なし引張時の降伏応力 σ_Y で割った値であり、繰返し荷を受けた鉄筋の降伏強度上昇がどれほどの割合であるかを示している。

$$\beta_R = \Delta\epsilon_R / \epsilon_R = (\epsilon'_R - \epsilon_R) / \epsilon_R \quad (1)$$

$$\beta_B = \Delta\sigma_B / \sigma_B = (\sigma'_B - \sigma_B) / \sigma_B \quad (2)$$

$$\beta_{YC} = \Delta\sigma_{YC} / \sigma_Y \quad (3)$$

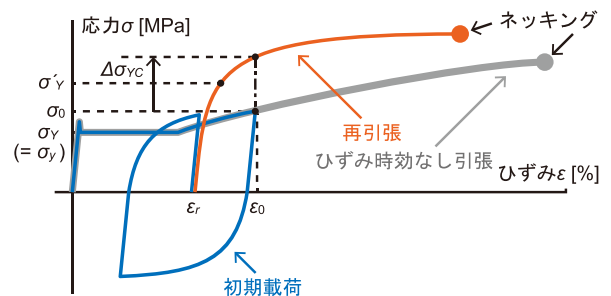


図6 繰返し荷を受けた鉄筋の応力-ひずみ曲線模式図

4.1 各条件のひずみ時効による特性変化の比較

2.2 節で述べた5つの条件の違いによってひずみ時効による特性変化にどのような違いが出るかを分析する。図7に試験体(条件ごとに2試験体)のひずみ時効による降伏強度上昇の比較を示す。なお、図7の灰色破線に単純引張試験結果⁴⁾から得た降伏強度変化率 β_{YC} の予測式を示している。

(1) 予ひずみの大小

図7(a), (b)より、残留ひずみ ϵ_r が等しい試験体について、

予ひずみ ε_0 と降伏強度変化率 β_{YC} の関係は弱いことが見て取れる。一方で図 7(e)より、予ひずみ ε_0 と残留ひずみ ε_r が等しい試験体については、予ひずみ ε_0 が大きくなるにつれて降伏強度変化率 β_{YC} も上昇することを確認した。このため、予ひずみ ε_0 の上昇に伴いひずみ時効による特性変化も増大する可能性があるが、残留ひずみ ε_r の影響を強く受けると考えられる。

(2) 残留ひずみの大小

図 7(c), (d)より、残留ひずみ ε_r が大きい試験体は降伏強度変化率 β_{YC} も上昇することを確認した。このため、ひずみ時効による特性変化は、残留ひずみ ε_r が大きいほど増大すると考えられる。

(3) 両振幅の大小および圧縮変形の有無

図 7(f)より、両振幅が 3% の試験体と 4% の試験体の降伏強度変化率 β_{YC} の差異は軽微であることを確認した。 β_R および β_B についても同様の傾向が確認できたため、両振幅の大小および圧縮変形の有無がひずみ時効による特性変化に与える影響は軽微であると考えられる。

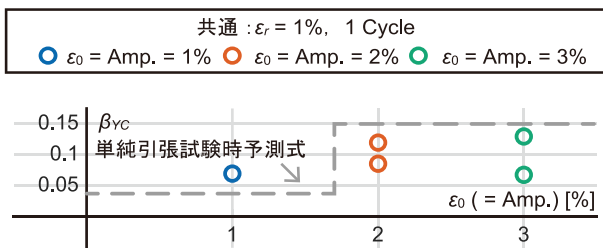
(4) 繰返し载荷のサイクル数

図 7(g)より、繰返し载荷のサイクル数が 1 回の試験体に対し、4 回の試験体は降伏強度の上昇が軽微であることを確認した。 β_R および β_B についても同様の傾向が確認できたため、繰返し载荷のサイクル数の増加に伴いひずみ時効による特性変化は減少すると考えられる。

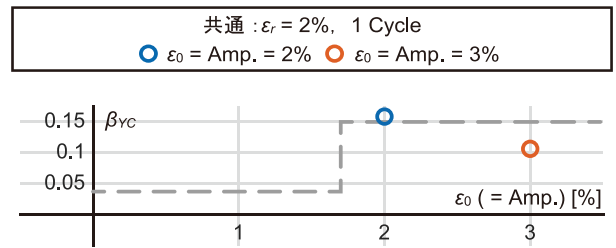
(5) 細かい繰返し载荷の有無

図 7(h)より、細かい繰返し载荷の有無による降伏強度変化率 β_{YC} の差異は軽微であることを確認した。 β_R および β_B についても同様の傾向が確認できたため、細かい繰返し载荷の有無がひずみ時効による特性変化に与える影響は軽微であると考えられる。

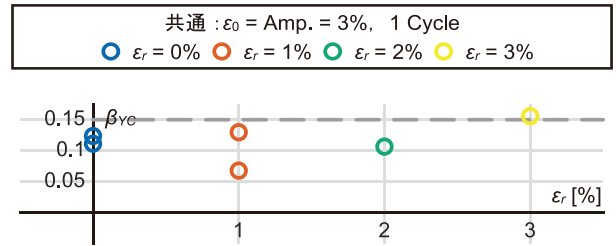
以上により、ひずみ時効による特性変化は、繰返し载荷のサイクル数が多いほど減少し、残留ひずみ ε_r が大きいほど増大することを確認した。また、予ひずみ ε_0 の上昇に伴いひずみ時効による特性変化も増大する可能性があることが示唆された。一方で予ひずみ ε_0 、残留ひずみ ε_r およびサイクル数を用いた、特性変化の予測式は十分な精度を出すことができなかった。この原因として、予測式に用いるパラメータに対して試験結果の数が不十分な事、単純引張に比べて繰返し载荷を受けた鉄筋の特性変化のばらつきが大きい事が考えられる。



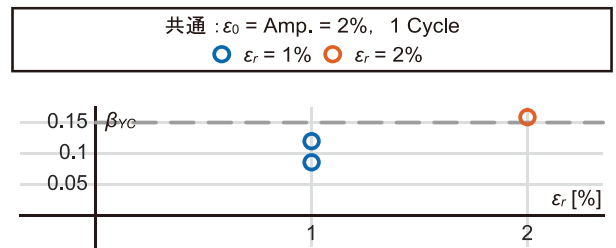
(a) 予ひずみによる比較(载荷条件 A, B, F)



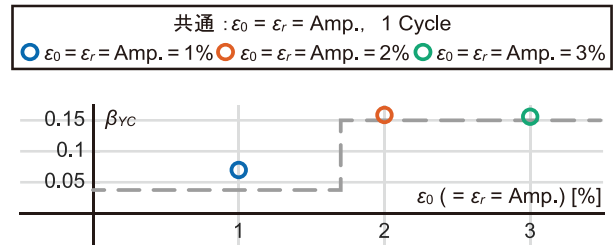
(b) 予ひずみによる比較(载荷条件 C, G)



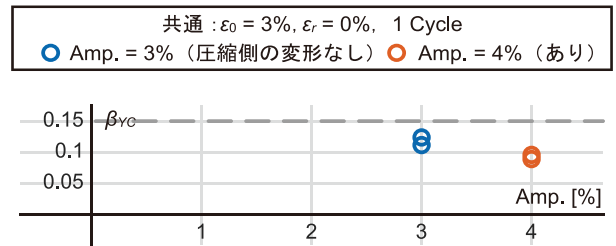
(c) 残留ひずみによる比較(载荷条件 D, E, G, I)



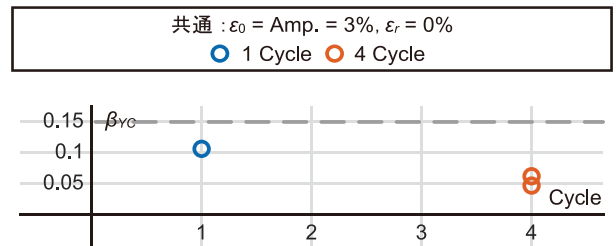
(d) 残留ひずみによる比較(载荷条件 B, C)



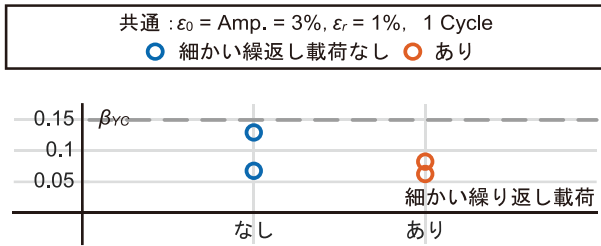
(e) 予ひずみおよび残留による比較(载荷条件 A, C, I)



(f) 圧縮側の変形の有無による比較(载荷条件 D, J)



(g) サイクル数による比較(载荷条件 G, H)



(h) 細かい繰返し载荷の有無による比較(载荷条件 E, F)
 図 7 各条件のひずみ時効による降伏強度上昇の比較

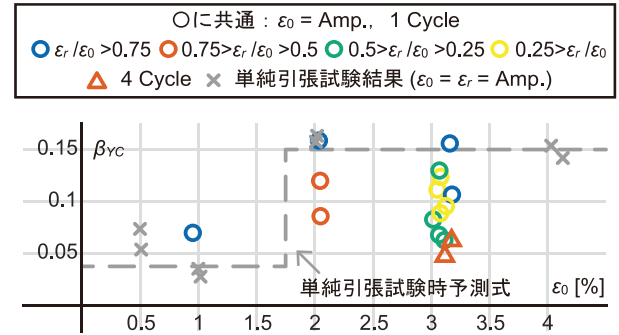


図 9 予ひずみに対する降伏強度変化率
 (残留ひずみ/予ひずみを凡例とする)

4.2 予ひずみおよび残留ひずみの差異による比較

4.1 節より、ひずみ時効による特性変化は、残留ひずみ ϵ_r が大きいほど増大すること、予ひずみ ϵ_0 が大きいほど増大する可能性があることを確認した。ここでは ϵ_r および ϵ_0 の両者について β_{YC} の比較を行う。

図 8 に残留ひずみ ϵ_r を凡例とした予ひずみ ϵ_0 に対する降伏強度変化率 β_{YC} を示す。なお、4.1 節よりサイクル数が多い試験体は β_{YC} が小さいため Δ で表している。また、灰色の \times で示される値は単純引張試験³⁾の結果、灰色破線は単純引張試験の結果から算出した降伏強度変化率の予測式である。図 8 より多くの β_{YC} が単純引張試験の結果から算出した予測式を下回る値をとった。よって繰返し载荷を受けた鉄筋のひずみ時効による降伏強度上昇は、単純引張を受けた鉄筋のひずみ時効による降伏強度上昇を上限とした値になると考えられる。そのため繰返し载荷時でも、予ひずみが同等の単純引張とみなし降伏強度上昇を予測することで安全側へ予測することが可能であると考えられる。

また、図 8 より $\epsilon_r = \epsilon_0 = 1, 2, 3\%$ の試験体は β_{YC} が予測式に近い値をとることを確認した。これらの試験体は ϵ_r / ϵ_0 が 1 に近いことを示す。そこで ϵ_r / ϵ_0 を凡例とした予ひずみ ϵ_0 に対する降伏強度上昇率 β_{YC} を図 9 に示す。図 9 より ϵ_r / ϵ_0 が 1 に近い試験体については単純引張試験結果に近い β_{YC} を示すのに対し、 ϵ_r / ϵ_0 が 1 より小さいと β_{YC} も減少する傾向をとることを確認した。

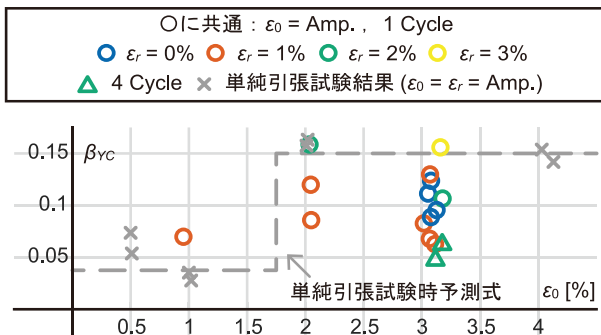


図 8 予ひずみに対する降伏強度変化率
 (残留ひずみを凡例とする)

5. 結論

本報告では繰返し载荷をあたえた鉄筋をひずみ時効させることでひずみ時効による特性変化を計測した。確認できた事項を以下に示す。

- (1) 両振幅の大小、圧縮側への変形の有無および細かい繰返し载荷の有無がひずみ時効による特性変化へ及ぼす影響は軽微である。一方で、繰返し载荷のサイクル数の増大に伴ってひずみ時効による特性変化が抑えられる。
- (2) 繰返し载荷を受けた鉄筋の特性変化の十分な精度の予測は困難である。この原因として、予測式に用いるパラメータに対して試験結果の数が不十分な事、繰返し载荷を受けた鉄筋の特性変化のばらつきが大きい事が考えられる。
- (3) 繰返し载荷を受けた鉄筋のひずみ時効による降伏強度上昇に影響を及ぼすのは残留ひずみ ϵ_r および予ひずみ ϵ_0 である。繰返し载荷を受けた鉄筋のひずみ時効による降伏強度上昇は、単純引張を受けた鉄筋のひずみ時効による降伏強度上昇を上限とし、 ϵ_r / ϵ_0 が 1 を下回ると減少する傾向を示す。そのため繰返し载荷時でも、予ひずみが同等の単純引張とみなし降伏強度上昇を予測することで安全側へ予測することが可能である。

参照

- 1) Resilient Repair Guide Source Report: Post-Earthquake Assessment of Reinforced Concrete Buildings, Applied Technology Council, 517p, 2021
- 2) 宮川大海: 金属材料工学 改定・SI 版, 森北出版株式会社, 294p, 2019
- 3) 岡村光晋, Alex Shegay, 佐藤大樹: ひずみ時効による鉄筋の特性変化の予測式の構築, 日本建築学会技術報告集, pp.1263-1268, 2024.10
- 4) 岡村光晋, Alex Shegay, 前田匡樹, 佐藤大樹: 地震応答が原因となるひずみ時効の RC 造建物の鉄筋への影響の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.5-6, 2024
- 5) 山田哲, 竹内篤史, 吉敷祥一, 渡辺厚: ひずみ時効を受けた鋼材の履歴性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.927-928, 2006

*1 東京科学大学 環境・社会理工学院 大学院生
 *2 オークランド大学 土木環境工学部 講師・Ph.D.
 *3 東京科学大学 総合研究院 准教授・博士(工学)

*Graduate Student, Institute of Science Tokyo *1
 *Lecturer, University of Auckland, Ph.D. *2
 *Associate Professor, IIR., Institute of Science Tokyo, Dr.Eng. *3