

論文 塑性域の引張ひずみを受けた電炉製鉄筋の熱処理後の機械的性質に関する実験的研究

小林 薫^{*1}・岩佐 高吉^{*2}

要旨：大地震によって損傷を受けた RC 構造物の復旧後の性能を補償するためには，大きなひずみを受けた軸方向鉄筋や帯鉄筋の機械的性質を把握することともに，機能回復に向けた研究が必要と思われる。

本研究では，塑性域の引張ひずみを 0.025～0.15 まで変化させた鉄筋を熱処理温度 450℃～950℃で焼きなましを行い，その後の鉄筋の機械的性質について基礎的な実験から検討を行ったものである。実験結果からは，熱処理温度を 850℃以上とすることで塑性ひずみを受ける前と同等な機械的性質に回復できることを明らかにした。

キーワード：電炉製鉄筋，焼きなまし，応力-ひずみ曲線

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下「RC」という）構造物の耐震性能^{1) 2)}は，地震による損傷に対する構造物の復旧性を性能の一つとして規定している。

復旧性を確保した構造物の耐震設計では，地震による損傷をある程度限定した状態に制御することを念頭に行われる。例えば，鉄道構造物の耐震設計²⁾では，想定地震による各部材の最大応答を各部材に設定した損傷レベル以下とすることで構造物の復旧性に対する性能照査を行っている。

復旧性に対する要求性能を満足した構造物では，復旧後の RC 構造物の再使用を前提としている。この場合，許容される部材の損傷状態としては，部材の部位や役割によって相違するが柱部材を例にすると，コンクリートのひび割れやかぶりコンクリートの剥落程度までである。このような損傷状態に対する復旧方法としては，ひび割れへの樹脂等の注入，断面修復などである。

鉄筋に関しては，せん断補強鉄筋で一部交換



写真-1 RC 柱試験体の交番載荷終了後の状況

を含めた整齊等が行われる場合もあるが，再使用が前提である。

鉄筋については，L2 レベル相当の地震による損傷状態では塑性域の大きなひずみ履歴を多数回受けるものと思われる。例えば，写真-1は，L2 レベル地震を想定し，模型 RC 柱試験体による交番載荷実験後，脆弱箇所のコンクリートを取り除いた後の状況を示したものである。塑性域の繰返し載荷に伴い，軸方向鉄筋には大き

*1 東日本旅客鉄道（株）研究開発センターフロンティアサービス研究所副課長 博(工) (正会員)

*2 東日本旅客鉄道（株）研究開発センターフロンティアサービス研究所主 席 (正会員)

表－1 供試体の機械的性質，および化学成分

規格	呼び名	機械的試験(ミルシート表示値)				化学成分分析結果						
		降伏点	引張強さ	伸び	曲げ試験							
		N/mm2		%		C	Si	Mn	P	S	Al	N
		345-440	Min490	3号試験片min20	180°	%						
JIS G3112SD 345	D32直径 32mm	372	536	21	good	0.24	0.18	0.81	0.026	0.034	0.004	0.011

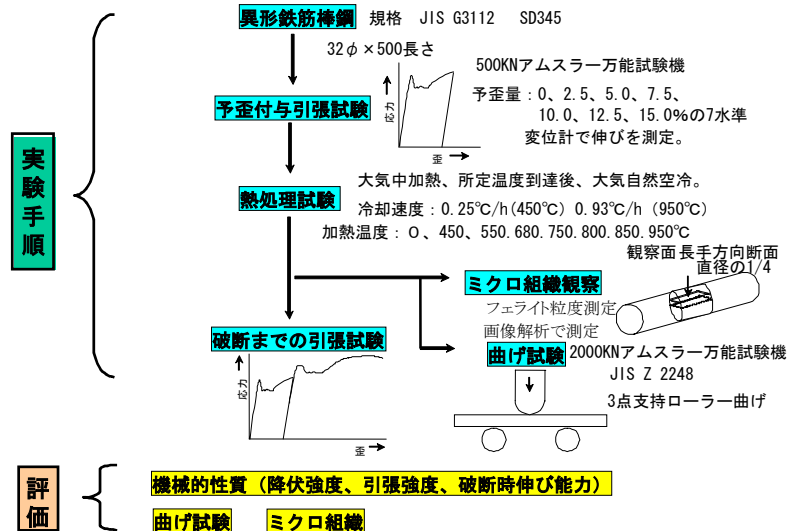
な変形が発生している。このような鉄筋では、塑性域でのひずみの発生がひずみ硬化やひずみ時効性を伴うことで鉄筋の機械的性質の変化が問題となる場合もある。

復旧性を指標とした耐震設計を行った構造物では、地震後に写真－1で示したような損傷状態の部材を復旧し、その性能を補償するためには、損傷を受けた部分のコンクリートの修復だけでなく、大きなひずみ履歴を受けた鉄筋の機械的性質が重要になると思われる。このとき、もし、塑性域の大きなひずみ履歴を受けた鉄筋を熱処理等によって、部材損傷前と同じ機械的性質に戻すことが可能であるならば、復旧後の部材性能や構造物の耐震性能を明確にすることが可能になると思われる。

本研究は、以上のような観点から、大きな履歴ひずみを受けた鉄筋の基礎的検討として、単調引張ひずみを与えた電炉製鉄筋の熱処理後の機械的性質について、基礎的な実験から検討を行ったものである。

2. 実験概要

図－1に、本実験の概要、および評価項目を示す。実験に用いた供試体には、一軸の引張状態で設定したひずみ量(以下「予ひずみ量」という)を与え、その後、加熱炉を用いて熱処理を行った。本研究で行った熱処理は、所定温度まで加熱後、自然冷却を行う焼きなまし処理³⁾であ



図－1 実験概要

る。熱処理を行った供試体を用いて、破断までの引張試験、曲げ試験、ミクロ組織の観察を行った。

(1) 供試体概要

本実験には、D32 (SD345) の電炉製鉄筋を供試体として用いた。表－1に、実験に使用した供試体用異形鉄筋棒鋼の機械的性質をミルシートより転記し、供試体化学成分を JIS で規定されている各種分析法 (例えば、窒素では JIS G1228, アルミニウム (Al) JIS G1257) による分析結果を示す。本実験に用いた供試体は、機械的性質、化学成分共に JIS の規格値を満足している。なお、供試体は、4.5m の長尺材を 0.5m 毎に切り出して製作した。

(2) 実験パラメータ

表－2に、本実験で検討を行った予ひずみ量と熱処理温度との関係を示す。鉄筋の予ひずみ量としては、0%～15.0%の範囲で7段階のひず

みレベルとした。熱処理温度に関しては、供試体化学成分から判定される A1 変態点以下の加熱温度で 3 レベル、2 相域で 2 レベル、A3 変態点以上で 2 レベルの合計 7 段階の値を設定とした。

表-2 実験パラメータ（予ひずみ量と熱処理温度）

		熱処理加熱温度 (°C)							
		熱処理 無し	A1変態点以下フェライト 域(回復、再結晶)			2相域		A3変態点以上 オーステナイト域	
			450	550	680	750	800	850	950
予歪 (%)	0	○	○	○	○	○	○	○	○
	2.5	○	○	○	○	○	○	○	○
	5	○	○	○	○	○	○	○	○
	7.5	○	○	○	○	○	○	○	○
	10	○	○	○	○	○	○	○	○
	12.5	○	○	○	○	○	○	○	○
	15	○	○	○	○	○	○	○	○

(3) 予ひずみ量の付与方法および引張試験概要

供試体への予ひずみの付与、および熱処理後の引張試験には、500kN の引張試験機を用いた。供試体の予ひずみの管理、および熱処理後の引張試験時のひずみ測定は、供試体に取り付けた変位計で行った。写真-2 に、供試体に取り付けた変位計の状況を示す。



写真-2 予ひずみ付与および引張試験状況

(4) 供試体熱処理の方法

供試体の熱処理は、予め加熱炉内の温度を、各供試体に設定した温度まで昇温後、予ひずみ付与後の供試体を加熱炉に挿入し加熱した。加熱速度は、20～30℃/分とした。供試体の温度が設定温度に到達確認後、加熱炉から取り出し、大気中で自然放冷した。除冷速度は、30～40℃/分であった。



写真-3 曲げ試験の状況

供試体の加熱温度は、供試体と同じ母材から切り出した鉄筋に孔を空け、その孔内に熱電対を取付けたものを供試体といっしょに加熱炉に入れ、熱電対の値から供試体温度を管理した。なお、供試体加熱中の加熱炉内は、大気中となっている。

(5) 供試体曲げ試験の概要

RC 柱復旧時、曲がった鉄筋の修正も考えられることから曲げ試験を行うことにした。供試体の曲げ試験は、JIS Z 2248 にもとづいて行った。曲げ試験に関しては、供試体の割れを目視で観察した。写真-3 に、供試体の曲げ試験状況を示す。

(6) ミクロ組織観察試験

供試体のミクロ組織観察用試験片は、引張側となる供試体の 1/4 付近の断面高さで 10mm 角

程度の試料を採取した。ミクロ組織観察用試験片は、観察面を研磨仕上げし、表面をピクリン酸溶液（ピクリン酸 4 g+エチルアルコール 100cc）で腐食した。ミクロ組織の観察は、CCD カメラを搭載したデジタルファイリング型の倒立顕微鏡で倍率を 100 倍と 400 倍で観察した。フェライト粒度の測定は画像処理により求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 引張試験結果

(1) 破断状況

予ひずみを与えた供試体の熱処理後、引張試

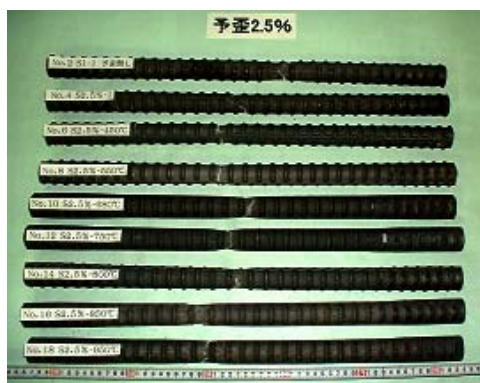


写真-4 予ひずみ量 2.5%供試体の破断状況

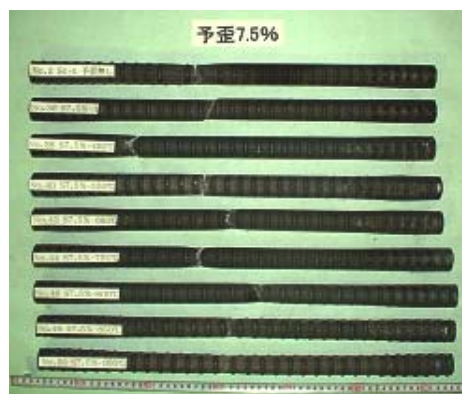


写真-5 予ひずみ量 7.5%供試体の破断状況

験時の破断状況として、予ひずみ量 2.5%, 7.5%, 15.0%の場合を写真-4～6に示す。各写真で上段の供試体は、各供試体との比較のため、基準とした母材そのままを常温で引張試験した後の破断状況である。

予ひずみ量が最も小さい 2.5%の場合では、いずれの熱処理温度においても、母材と同程度の延性くびれを呈している。

予ひずみ量が 7.5%, および 15%の場合では、熱処理温度が比較的低い場合 (450℃～750℃) で延性くびれが見られず、脆性的な破断状況となり、母材の破断状況と大きく異なっていた。

写真-6 の丸印は脆性破断の顕著な例を示した。

各供試体の破断状況として、熱処理温度が低く、予ひずみ量が大きくなるほど、脆性的な破断状況を示す傾向になった。

(2) 機械的性質

予ひずみを付与後、熱処理を行った供試体の機械的性質は、破断までの引張試験によって得られる応力度・ひずみ曲線から検討を行うことにした。図-2～4に、熱処理温度を 450℃, 680℃, 850℃とし、予ひずみ量 5%, 10%, 15%の場合の各供試体における応力度・ひずみ曲線を例として示す。なお、供試体の応力度を算出する場合の断面積は、予ひずみを付与したことによって若干くびれが生じているため、事前に予ひずみ後の供試体を切断し、くびれ部分の断面積測定を行い予ひずみ前の断面積を補正した。

供試体の降伏点応力度については、熱処理温

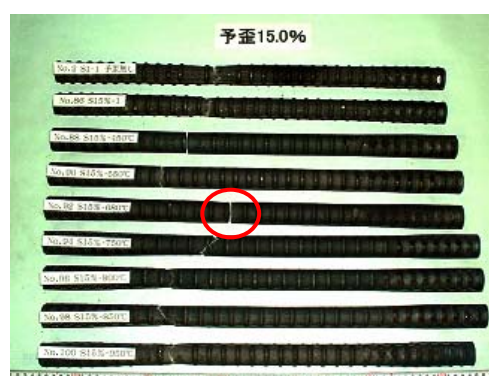


写真-6 予ひずみ量 15%供試体の破断状況

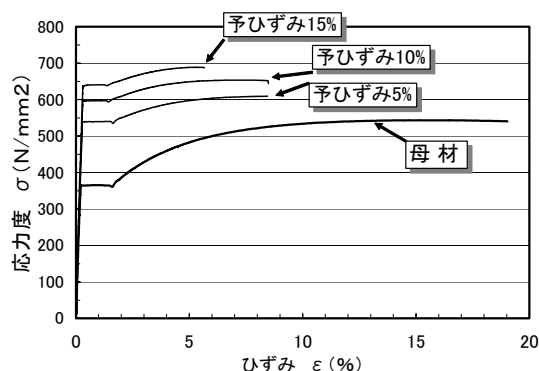


図-2 熱処理温度 450℃の場合の供試体応力度・ひずみ曲線

度が 450℃, 680℃の場合で、予ひずみ量が大きくなるに従って母材よりも大きくなる傾向を示した。熱処理温度が 850℃の場合では、予ひずみ量の大きさに影響を受けず、ほぼ母材と同程度となった。

予ひずみ量と熱処理温度による各供試体の機械的性質として、降伏点応力度を図-5に、引

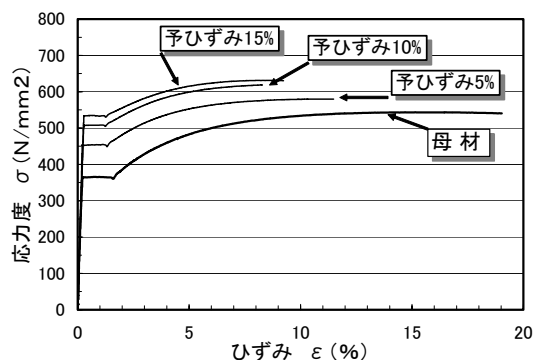


図-3 熱処理温度 680°Cの場合の供試体応力・ひずみ曲線

張応力度を図-6に、それぞれ示す。

これらの図から、母材に比較して、予ひずみを順次増やして行くと、常温～750°Cの熱処理温度においては、降伏点応力度、引張応力度共に、高くなっていくのがわかる。また、熱処理温度が 850°C以上になると、本実験で設定した7レベルの予ひずみ全てにおいて、母材の機械的性質とほぼ同じになった。

このような結果になった理由を以下に考察する。供試体に予ひずみが加わると、供試体内の鋼原子の転位がからみあって硬化する。ひずみ量が大きくなる程、この転位が多くからみあって強度を高めることになる。熱処理温度については、熱処理温度を 450°Cから順次高めて行くと、降伏点応力度、引張応力度ともに母材の値に近づくようになる。さらに、A3 変態点となる 850°C以上で熱処理を行えば、母材とほぼ同等の降伏点応力度、引張応力度となる。これは、供試体への A3 変態点以上の加熱によって、鉄原子が移動しやすくなり、鋼の結晶が再結晶する。この再結晶過程に、予ひずみによる転位は消滅し、加熱条件に対応した新しい大きさの結晶粒を生成、成長するためと考えられる。

3.2 曲げ試験結果

曲げ試験による供試体の割れを目視で確認した結果を表-3に示す。曲げ試験終了後の供試体の状況として、熱処理をせずに常温で試験を

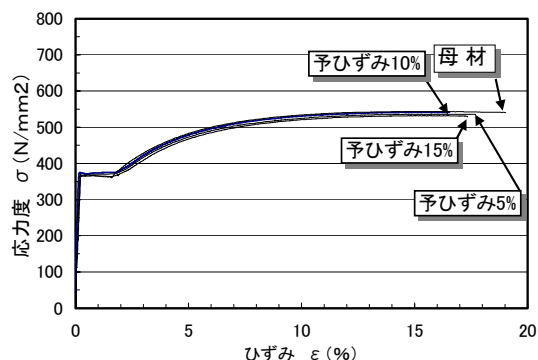


図-4 熱処理温度 850°Cの場合の供試体応力・ひずみ曲線

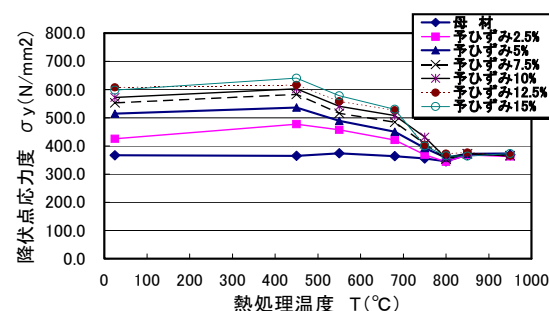


図-5 熱処理温度と各供試体降伏点応力度の関係

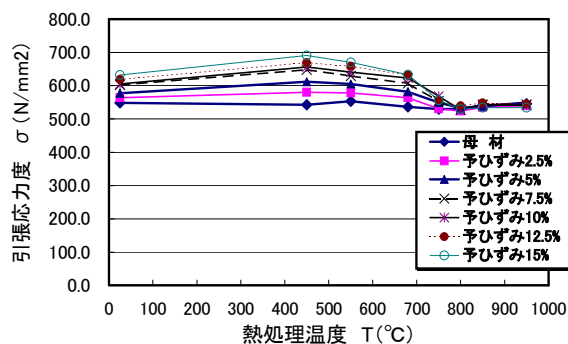


図-6 熱処理温度と各供試体引張応力度の関係

行った場合を写真-7に、熱処理温度を 550°Cとした場合を写真-8に、それぞれ示す。

予ひずみを付与し、熱処理をしないで常温で試験を行った場合は、予ひずみ量 10%までは割れの発生が無く、12.5%で亀裂が発生し、15%になると完全に二つに折損した。熱処理温度の影響をみると、割れの発生が認められたのは、予ひずみ量 10%以上で、450, 550°Cの低い熱処理温度の場合であった。その他の条件では割れ

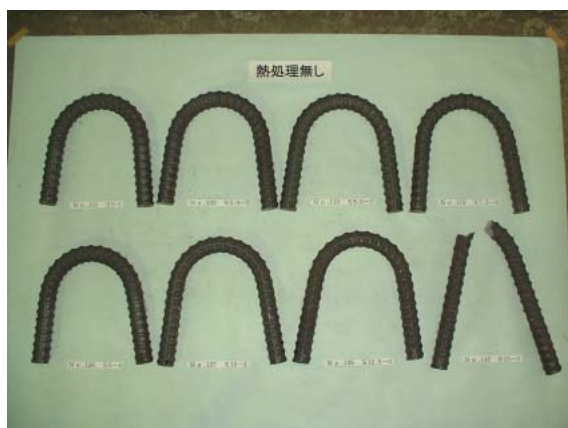


写真-7 予ひずみ付与後常温での曲げ試験後の供試体状況



写真-8 予ひずみ付与後熱処理温度 550℃とした場合の曲げ試験後の供試体状況

表-3 曲げ試験の結果

予歪み(%)	450℃	予歪み%	550℃	予歪み(%)	680℃
2.5	割れ無し	2.5	割れ無し	2.5	割れ無し
5.0	割れ無し	5.0	割れ無し	5.0	割れ無し
7.5	割れ無し	7.5	割れ無し	7.5	割れ無し
10.0	ひび割れ二つ	10.0	割れ無し	10.0	割れ無し
12.5	割れ無し	12.5	二つ割れ	12.5	割れ無し
15.0	割れ無し	15.0	二つ割れ	15.0	割れ無し
予歪み(%)	750℃	予歪み(%)	800℃	予歪み(%)	850℃
2.5	割れ無し	2.5	割れ無し	2.5	割れ無し
5.0	割れ無し	5.0	割れ無し	5.0	割れ無し
7.5	割れ無し	7.5	割れ無し	7.5	割れ無し
10.0	割れ無し	10.0	割れ無し	10.0	割れ無し
12.5	割れ無し	12.5	割れ無し	12.5	割れ無し
15.0	割れ無し	15.0	割れ無し	15.0	割れ無し
予歪み(%)	950℃	予歪み(%)	熱処理無し	温度	予歪み無し 熱処理
2.5	割れ無し	0	割れ無し	450℃	割れ無し
5.0	割れ無し	2.5	割れ無し	550℃	割れ無し
7.5	割れ無し	5.0	割れ無し	680℃	割れ無し
10.0	割れ無し	7.5	割れ無し	750℃	割れ無し
12.5	割れ無し	10.0	割れ無し	800℃	割れ無し
15.0	割れ無し	12.5	ひび割れ	850℃	割れ無し
		15.0	二つ割れ	950℃	割れ無し

の発生は認められなかった。

3. 3 ミクロ組織観察結果

本実験に用いた供試体を観察した範囲内では、予ひずみおよび熱処理温度がフェライト粒度に及ぼす顕著な影響が認められなかった。

4. まとめ

本研究は、構造物の復旧性を指標とした耐震設計において、復旧後の構造物の耐震性能を補償するための基礎的な検討として、引張ひずみを付与した電炉製鉄筋の熱処理後の機械的性質について、実験的な検討を行った。

本研究結果を以下にまとめる。

- (1) 各供試体の破断状況としては、熱処理温度が低くなるほど、予ひずみ量が大きくなるほど、脆性的な破断状況を示す傾向になった。
- (2) 熱処理後の供試体の降伏点応力度、引張応力度は、熱処理温度が 750℃より低い場合で、予ひずみ量が大きくなるに従って母材よりも大きくなる傾向を示した。熱処理温度が 850℃以上の場合では、予ひずみ量の大きさに影響を受けず、ほぼ母材と同程度となった。

供試体の引張応力度も降伏点応力度と同様な傾向を示した。

- (3) 曲げ試験による熱処理温度の影響をみると、割れの発生が認められたのは、予ひずみ量 10%以上で、450,550℃の低い熱処理温度の場合であった。その他の条件では割れの発生は認められなかった。

【参考文献】

- 1)土木学会：コンクリート標準示方書・耐震性能照査編 [2002 年制定]，2002.12
- 2)鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・耐震設計編，丸善，1999.10
- 3)菊池洋一，笹戸松二：大学課程橋梁工学，オーム社，1985