

報告 交番繰返し荷重を受けた柱軸方向筋の強度特性

山内 俊幸^{*1}・石橋 忠良^{*2}・菅野 貴浩^{*3}・大久保 啓一^{*4}

要旨：鉄筋コンクリート柱部材が、大規模地震による被害を受けた場合の修復方法の一つとして、屈曲した柱軸方向筋を直線に戻し、その一部もしくは全部を再使用することが考えられる。この場合、問題となるのは、地震の影響を受けた鉄筋の残存能力である。これを調べるため、地震の被害を受けた実構造物の柱主鉄筋と、交番繰返し載荷を行った後の模型供試体の柱主鉄筋とを加熱矯正し、引張試験を行った。その結果、前者の鉄筋ではJISに定められた降伏点、引張強さ、伸びそれぞれの値を満足し、後者の鉄筋では、引張強さは満足するものの伸びが小さくなることが確認できた。

キーワード：鉄筋引張試験、交番載荷試験、地震の影響

1. はじめに

大規模地震の被害を受けた例[1]では、鉄筋コンクリート（以下、RCという）ラーメン高架橋の柱軸方向主鉄筋が、柱上下端部の曲げ破壊や、あるいは中間部のせん断破壊によって大きな変形を受けた。このうち、柱コンクリートの崩壊を伴ったものでは、軸方向筋が提灯形やS字形に大きくうねった状態で露出したものも数多く見受けられた。筆者らは、この被害を受けた構造物から鉄筋を実際に切り出し引張試験を行うとともに、柱の模型供試体による大変形の交番載荷実験後に主鉄筋をはつり出し、これらの引張試験を行ったので、これらの結果を報告する。

2. 被害を受けた構造物からはつり出した鉄筋の引張試験

2. 1 試験片

試験片となる鉄筋は、兵庫県南部地震の被害を受けた新幹線および在来線のRCラーメン高架橋の柱軸方向筋であり、地震の影響により曲げ破壊し、かぶりまたは帶鉄筋内部コンクリートの崩落によって露出したものをガス切断により採取したものである。

鉄筋の規格は建設当時の記録より、SD295とSD345の2種類であり、径は全てD29である。

2. 2 試験片の加工

試験に供する鉄筋は、大きく屈曲したままでは引張試験を行うことが困難なため、温度チョークをもとに約1000°Cに加熱してほぼ直線となるように矯正した。

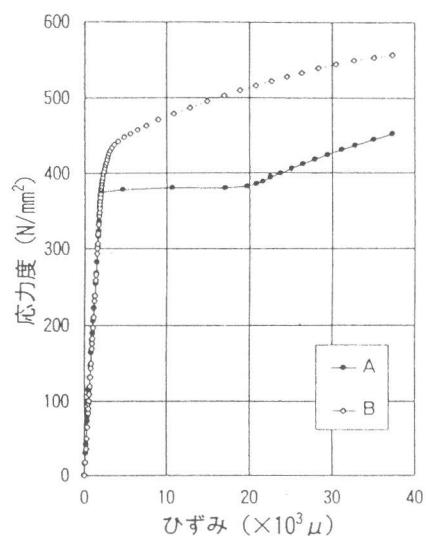


図-1 応力度-ひずみ度曲線

*1 東日本旅客鉄道（株） 東京工事事務所工事管理室係長、（正会員）

*2 東日本旅客鉄道（株） 建設工事部構造技術PT担当部長、工博（正会員）

*3 東日本旅客鉄道（株） 建設工事部構造技術PT、工修（正会員）

*4 東日本旅客鉄道（株） 東京工事事務所工事管理室

2. 3 試験方法 試験は、JIS Z 2241-1980 「金属材料引張試験方法」によった。載荷は、アムスラタイプの100tf 万能試験機を用いて行った。破断伸び（以下単に、伸びという）の計測は、JIS の定めに従い載荷前試験片にポンチにより標点をししておき、破断後突き合わせ、標点間長を測定する方法によって求めた。ひずみは試験片中央付近に表裏各 1 枚添付したストレインゲージにより計測された値を平均して求めた。

2. 4 試験結果および考察

試験項目は図 2 に示すように降伏点、引張強さ、伸びの 3 点であり、それぞれのグラフにおける横軸は単に試験の順番を表し、同一試験片の結果は上中下のグラフでそれぞれが対応している。この試験により得られた応力度 - ひずみ度曲線の代表例を図 1 に示す。なお、この図ではストレインゲージで測定できたデータのうち 40000μ までを示した。

降伏点は、図 1 に示す A のように降伏域が明確に現れる試験片では降伏域に入る直前の最大荷重を公称断面積で除した値とし、B のようなものは降伏点が特定できないため空欄とした。伸びについては、標点間以外もしくは付近で破断したため伸びを正確に求めることができなかったものは空欄とした。

また、図 2 中の太線は、JIS G 3112 鉄筋コンクリート用棒鋼 に定められた現在の規格値（以下、規格値という）の範囲を示す。プロットした記号の違いは採取した構造物の違いを区別したものである。

図 2 に示すとおり、降伏点、引張強さ、伸びとともに規格値をほぼ満足していることがわかった。

3. 柱の模型供試体による大変形交番載

荷実験後の主鉄筋の引張試験

3. 1 交番載荷実験の概要

供試体は図 3 に示すような形状のものとし、基本となる載荷方法は、主鉄筋降伏時までは、荷重制御で正負 1 サイクル載荷し、その後は主鉄筋降伏時の載荷点変位 δ_y の整数倍となるように変位制御で正負 3 サイクル載荷するものである。じん性率が高いものは途中の変位段階を省略したものもあるが、降伏荷重を下回る前の変位段階では最

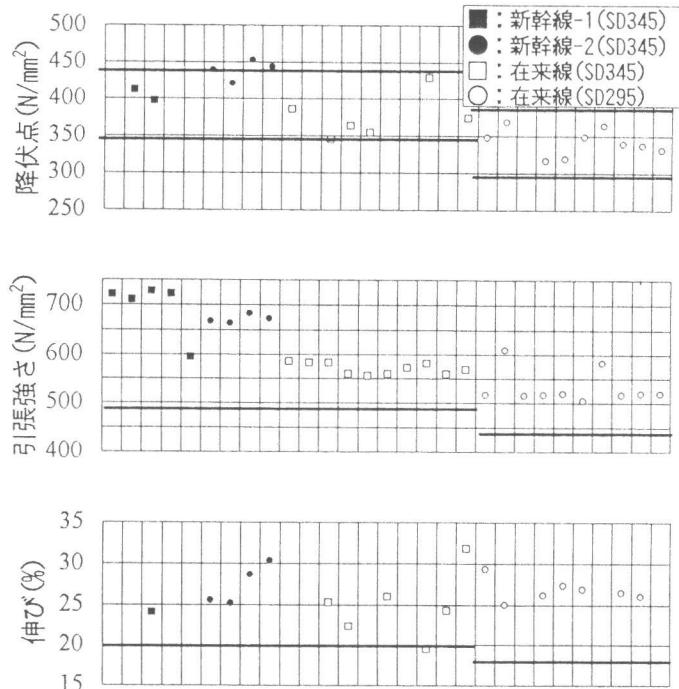


図 - 2 引張試験の結果

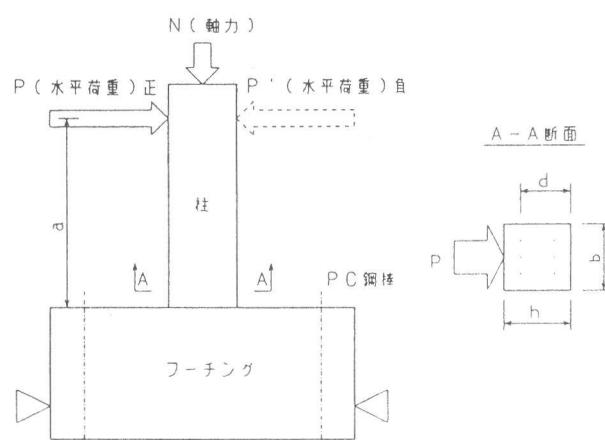


図 - 3 供試体形状

低3サイクルの載荷を行った。

じん性率は、荷重-載荷点変位曲線の包絡線が、主鉄筋降伏時荷重 P_y を下回るときの変位を δ_u とし、

$$\text{じん性率 } \mu = \delta_u / \delta_y \quad (1)$$

として[2]求めた。供試体の諸元と実験結果の一覧表を表1に示す。

表-1 供試体諸元と実験結果一覧表

供試体 No.	断面寸法 (mm)						せん断 スパン a (mm)	引張鉄筋比 P_t (%)	軸方向筋比 P (%)	帶鉄筋比 P_w (%)	補強形態	実験結果						
	補強前			補強後								降伏変位 δ_y (mm)	じん性率 μ					
	b'	h'	d'	b	h	d												
1	400	400	360	-	-	-	1150	5019 0.99	16D19 2.87	1D10@150 0.24	無補強	7.22	5.61					
2	400	400	360	430	430	375	1150	5019 0.99	16D19 2.48	-	鋼板巻き t=2.3	6.61	8.75					
3	400	400	360	430	430	375	1150	5019 0.99	16D19 2.48	-	鋼板巻き t=4.5	5.49	13.16					
4	400	400	360	430	430	375	1150	5019 0.99	16D19 2.48	1D10@150 0.22	鋼板巻き t=2.3	6.26	11.11					
5	400	400	360	430	430	375	1150	5019 0.99	16D19 2.48	1D10@150 0.22	鋼板巻き t=4.5	5.44	12.24					
6	400	400	360	430	430	375	850	5019 0.99	16D19 2.48	1D10@250 0.13	鋼板巻き t=3.2	4.88	10.49					
7	400	400	360	430	430	375	1150	5019 0.99	16D19 2.48	1D10@225 0.15	鋼板巻き t=3.2	6.58	9.07					
8	400	700	660	430	730	675	1150	6019 0.59	28D19 2.56	1D10@250 0.13	鋼板巻き t=3.2	6.15	9.95					
9	400	250	210	430	280	225	700	4019 1.18	10D19 2.38	-	鋼板巻き t=3.2	5.05	12.31					
10	400	400	360	600	500	410	1150	5019 0.58	16D19 1.53	-	RC巻き D13@50	5.64	9.41					
11	400	400	360	500	500	410	1150	5019 0.70	16D19 1.83	-	RC巻き D13@100	5.76	8.02					
12	400	400	360	500	500	410	1150	5019 0.70	16D19 1.83	-	RC巻き D16@50	5.29	10.87					
13	400	400	360	500	500	410	1150	5019 0.70	16D19 1.83	1D13@150 0.19	RC巻き D13@100	5.16	11.28					
14	400	400	360	500	500	410	1150	5019 0.70	16D19 1.83	1D13@150 0.19	RC巻き D13@300	5.78	8.04					
15	400	400	360	430	430	375	1150	4019 0.71	10D19 1.55	-	鋼板巻き t=3.2	5.93	10.80					
16	400	400	360	500	500	410	1150	5019 0.70	16D19 1.83	-	RC巻き D10@100	4.90	11.60					

注：補強形態欄中、鋼板巻きのtは鋼板厚 (mm) を、RC巻きの数値は補強のために付加した帶鉄筋の径とピッチを表す。

3.2 試験片

試験片となる鉄筋は柱断面最外縁に位置する軸方向鉄筋であり、3.1に示した供試体から実験終了後に柱とフーチングの境界から上下250mmの位置で切断採取した。鉄筋の規格はSD345である。

3.3 引張試験片の加工

2.2と同様に加熱矯正した。

3.4 試験方法

ひずみは図4に示すように試験片に2本の変位計を取り付け、測定間距離の平均ひずみとした。保持ボルトは先端のとがった全ネジボルトであり、治具の鉄筋への取り付けは、上下とも各々3本用いて締結した。変位計の感度は、 $500 \times 10^{-6}/\text{mm}$ 、非直線性は、0.1%Ro、Roは12.5mmである。なお、この変位測定方法では、試験片が伸びるに従って保持ボルトがゆるんでく

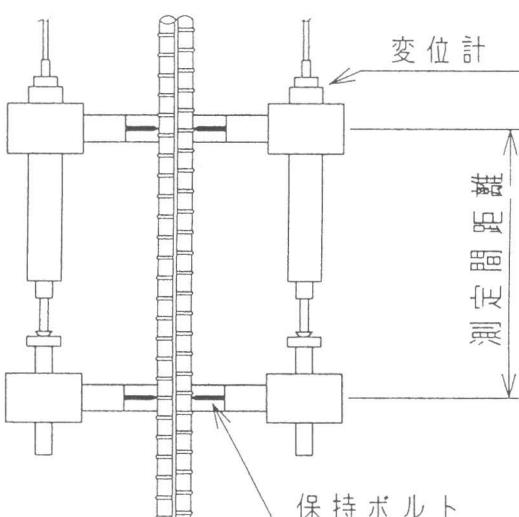


図-4 変位計設置状況

るため、ひずみが約40000 μ に達する付近で変位計をはずし、以下荷重だけをモニターした。その他の方法は2.3と同じである。

3.5 試験結果および考察

表2に試験結果を、

図5に代表例として

No.7の応力度-ひずみ度曲線を示す。

降伏点に関しては、図5に示すように、降伏域が明確に現れないものが多いいため判定できなかった。引張強さは、規格値490N/mm²以上を全て満足していた。伸びについては、ばらつきがあるものの平均14.8%であった。

柱を模した供試体に水平交番荷重を与えると、図6①に示すように主鉄筋の引き抜けが生じ、残留ひずみが累積していく。これは、交番載荷であるため②のように両サイドの主鉄筋に生じる。そのため更に交番載荷を進めると、やがては③に示すような柱根元でのせん断変形が現れ、④に示すような曲げ変形とが合成された挙動を示すようになる。この実験のように10 δ_y にも及ぶような大変位を与えた場合には、④に示す主鉄筋のS字状の変形が繰り返し与えられるため、主鉄筋に微細な割れ

が生じ、それ
に起因して主
鉄筋が破断に
至る場合もある。
このこと
から表2に示
すNo.2につい
ては鉄筋に明
らかな割れが
認められ、正
常な引張試験
が不能と判断
された。

表2 試験結果

No.	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
1	538.4	17.3
2		-
3	512.1	14.4
4	522.7	14.1
5	530.9	13.5
6	544.6	16.3
7	525.8	15.7
8	528.8	12.9
9	538.4	15.6
10	522.7	17.0
11	519.3	11.9
12	530.9	14.7
13	533.0	13.4
14	535.3	16.3
15	526.8	15.4
16	523.7	12.8
平均	528.9	14.8

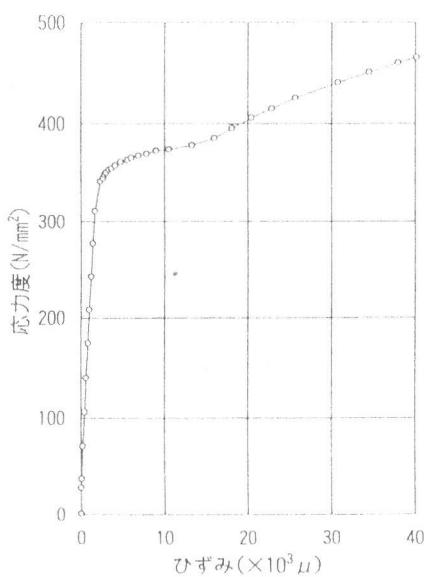


図5 応力度-ひずみ度曲線

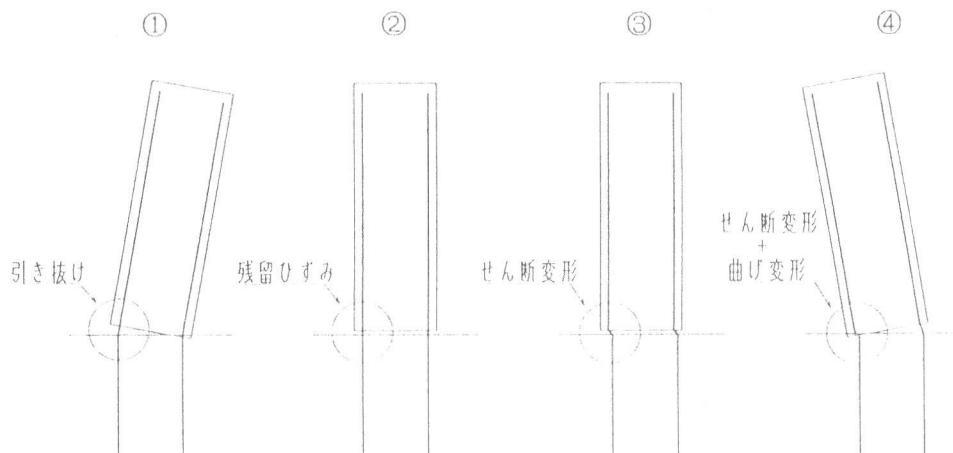


図6 説明図

4. 鉄筋の加熱加工の影響を調べるための引張試験

4.1 試験片

試験片は、3. の供試体に用いた鉄筋と同じメーカーで製造されたJIS 製品であり、径についても同じD19 である。なお、両者の機械的性質および、化学成分は鋼材の検査証明書から同等である。参考のため、表3 に化学成分(%)についてJIS の規格値、試験片の検査証明書に示された値、最近の調査資料による値[3]をそれぞれ示す。

表-3 化学成分(%)

	C	S i	Mn	P	S	C u	C r	S n	C+Mn/6
J I S 規 格 検 査 証 明 書	0.27以下 0.23	0.55以下 0.19	1.60以下 0.86	0.040以上 0.027	0.040以上 0.025	— —	— —	— —	0.50以下 0.37
参 考 値 [3]	0.257	0.196	0.984	0.0291	0.0315	0.318	0.169	0.0234	0.421

4. 2 試験方法

載荷パターン①は、3.4 に示す通常の載荷方法。載荷パターン②は、降伏域で一旦除荷し、再載荷。載荷パターン③は、ひずみ硬化開始点以降の領域で一旦除荷し、再載荷。載荷パターン④は、試験片の引張試験機装着時の固定点間に相当する部分全体を約1000°C に加熱し、気中で自然放熱させたものを①の方法で載荷。載荷パターン⑤は、②の方法で残留ひずみを与えたのち、④の方法で加熱処理をほどこし、再載荷。載荷パターン⑥は、③の方法で残留ひずみを与えたのち、④の方法で加熱処理をほどこし、再載荷。以上、6つの載荷パターン(以下、①②...⑥で表す)で、それぞれ各3本の引張試験を実施した。

4. 3 試験結果

試験により得られた応力度-ひずみ度曲線をパターン毎に図7に示す。なお、この図は3.4 に記した理由から約40000μ までを示した。

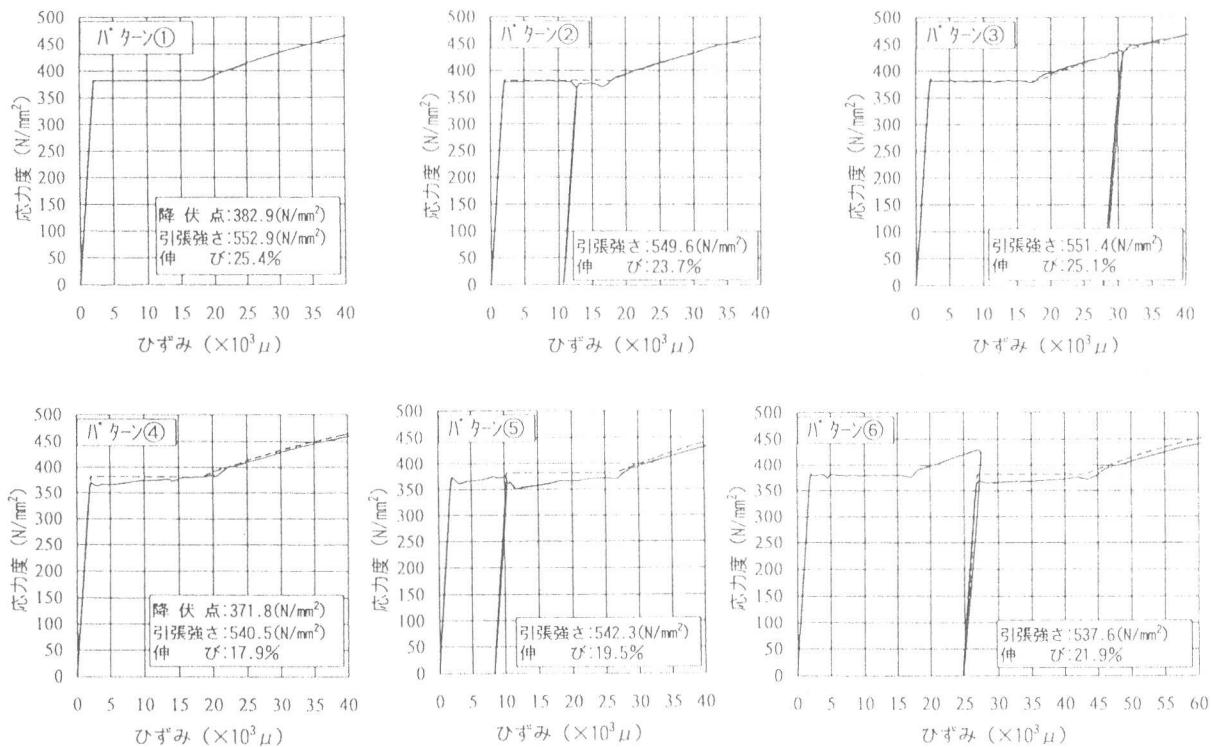


図-7 応力度-ひずみ度曲線

図中の①は、3本の結果を平均してモデル化したものであり、②～⑥は各々の3本のうちから代表するものを示した。なお、②～⑥の図中の点線は①である。

②③から、残留ひずみのある鉄筋を引張試験すると、処女載荷により得られる応力度-ひずみ度曲線を再びトレースすることがわかる。加熱したことによる影響としては、④⑤⑥から加熱後の降伏域が若干低い値となったこと、また、加熱により再び降伏域が現れることの2点がみてとれる。また、加熱しない①②③の伸びを平均すると24.7%、加熱した④⑤⑥の伸びを平均すると19.8%となり、4.9%の伸びの減少がみられた。

5. 構造物の補修を前提とした考察

- 1) 2. の結果から、降伏点、引張強さ、伸びとともに現在の規格値を満足しているため、これらの鉄筋は、加熱矯正後に断面コンクリートを修復するなどして再使用できると考えられる。
- 2) 3. の結果からは、大変位の交番載荷によって伸び能力が大きく消費されたことがわかる。その値を求めてみると、4. 3 ①より、生材の処女載荷による伸び能力が25.4%である。一方、表2に示すように載荷後に取り出し加熱矯正した鉄筋の伸びの平均は14.8%である。つまり、その差10.6%が大変位交番載荷と加熱矯正による伸びの減少量と考えられる。この値から4. 3に述べた加熱による伸びの減少量4.9%を差し引くと5.7%となり、この値が大変位交番載荷によって消費された伸び能力と考えた。

従って、残存の伸び能力14.8%と、この値との比較から、これらの鉄筋を再使用した場合には、少なくとも同等の交番載荷には十分耐えうると言える。

6. まとめ

- 1) 2. 3. 4. に示す各鉄筋の引張試験結果から、次ぎのことがわかった。
 - 1) この試験の対象となった地震の被害を受けた実構造物の柱主鉄筋は、加熱矯正後の再使用が可能である。
 - 2) 大変位の交番繰返し荷重を受けた柱軸方向筋は、伸び能力が落ちるものの中再使用できる。

7. おわりに

鉄筋を提供頂いた日本鋼弦コンクリート（株）と、ご指導、ご協力を賜った関係各位に、この紙面を借りて深く感謝の意を表する。

【参考文献】

- [1] 土木学会・兵庫県南部地震震災調査団：阪神・淡路大震災・緊急報告会開催される、土木学会誌、第3号、PP. 2-11, 1995. 3
- [2] 石橋 忠良・吉野 伸一：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究、土木学会論文集、第390号、PP. 57-66, 1988. 2
- [3] 電炉鉄筋棒鋼品質調査委員会：電炉鉄筋棒鋼品質調査報告書、P. 48, 1991. 4