

論文 ねじふし鉄筋へのトルクによる軸力導入に関する実験的検討

小島 巧^{*1}・上山 裕太^{*1}・井口重信^{*1}

要旨：定着具等を用いた一般的なプレストレス導入ではなく、トルクによる簡易なプレストレスの導入方法について、影響因子を把握するため実験的検討を行った。その結果、緊張長さや鉄筋径による軸力導入への影響がないことを確認した。また、座金の材質や摩擦係数等により、座金が変形することで軸力導入に影響を与えている可能性を示した。トルク導入に伴いねじふし鉄筋にねじれが発生する場合には、せん断応力により規格値の降伏荷重の半分程度の軸力で鉄筋が降伏することを確認した。

キーワード：ねじふし鉄筋, トルク, プレストレス

1. はじめに

図-1に示すように、鉄筋コンクリート高架橋の張出しスラブや、ラーメン高架橋の一部径間等のスパンを大きくする場合などに、プレレストコンクリート(PC)用緊張材を配置してプレストレスにより補強をする場合がある。このような場合、安全性(破壊)等ではなく、耐久性上のひび割れ幅の制限等により補強を必要とする場合が多く、一般的なPC桁のような緊張力を必要としてはいない。しかし、現状では、一般的なPC桁と同様のPC用緊張材および定着具等を用いてプレストレスを導入する必要があることから、コスト増や工期増の一因となっている。そこで、部材内に配置する異形鉄筋の一部あるいは全部をねじふし鉄筋に代えて、トルクにより緊張力を導入することで、PC用緊張材の代替とする方法を検証してきた。¹⁾ねじふし鉄筋による簡易なプレストレスの導入が実現できれば、合理的な構造物の設計が可能となり、PCの適用の幅も大きく広がることが考えられる。

既存研究より、ねじふし鉄筋を用いたトルクによるプレストレスの導入が可能であることを検証した。²⁾本論では、検証したプレストレス導入方法を用いる際の影響因子を検証するため、ねじふし鉄筋の緊張長さ・径、座金の種類などの違いによる影響やねじふし鉄筋に生じるねじれの影響等について実験的検討を行ったので、以下でその概要を述べる。

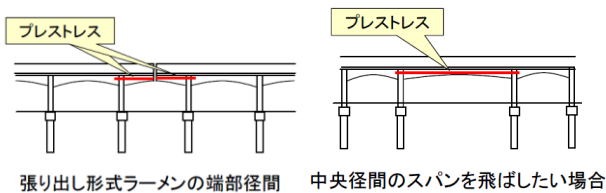


図-1 ねじふし鉄筋によるPC補強が考えられる例

2. ねじふし鉄筋を用いたトルクによる軸力導入試験

2.1 試験概要

(1) 試験体

試験体の概要を図-2、図-3に示す。載荷は、ねじふし鉄筋端部にナットを取り付けて支圧板を介して、反力体を反力に固定し、片側からトルク導入によりナットを締め付けることで引張力をかけて行った。緊張側の反力体と支圧板の間には、ロードセルを取り付けて鉄筋へ導入する軸力を計測した。また、両端ともに支圧板とナットの間には、座金をかませている。

緊張長さは反力体により調整し、反力体には交番載荷試験に用いる反力壁や剛な鋼材を用いている。緊張時、反力体に変形の有無が確認できるようダイヤルゲージにより計測した。

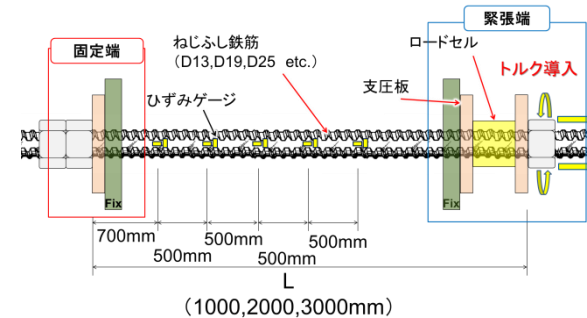


図-2 試験体概要

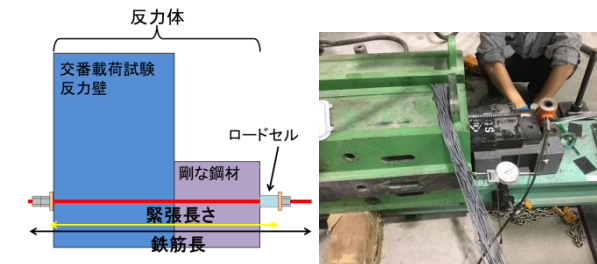


図-3 反力体イメージ図および設置状況写真

*1 東日本旅客鉄道株式会社 上信越工事事務所(正会員)

ねじふし鉄筋にはSD390(降伏応力の規格値 390N/mm²以上)のものを用い全長を 3500mm とした。鉄筋径に合わせたナットと座金を使用している。鉄筋には軸方向の表裏および周方向の表裏にひずみゲージを貼付し、载荷中のひずみを計測した。ナットには JIS G4051SC (降伏応力の規格値 370N/mm²以上) のものを用いた。表 - 1 に使用したねじふし鉄筋の規格、図 - 4 にねじふし鉄筋寸法図を示す。

ナットを締めつけるトルクレンチには、0.5N・m 単位で 10 N・m から 60N・m までトルク導入可能なものと、2N・m 単位で 60 N・m から 420N・m までトルク導入可能なものを使用した。

表 - 1 ねじふし鉄筋の形状寸法および機械的性質

呼び名	公称寸法		基礎部寸法			節の寸法(mm)		ヤング係数 (Mpa)
	直径 (mm)	断面積 (cm ²)	D (mm)	B (mm)	C (mm)	ピッチ P	高さ H	
D13	12.7	1.267	14.0	11.6	12.0	7.0	1.0	183115
D19	19.1	2.865	21.5	17.5	18.0	8.0	1.9	-
D25	25.4	5.067	28.2	23.6	24.2	10.0	2.0	-

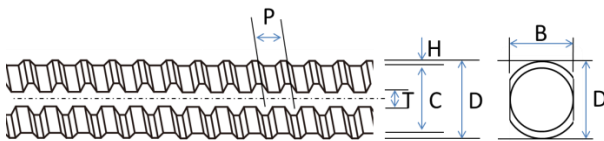


図 - 4 ねじふし鉄筋寸法図

(2) 試験方法

トルクの導入は、はじめに両側のナットを仮止めした後、トルクレンチを用いて 10N・m ずつ計測を行いながら所定トルクまで導入した。トルクを導入した側(以下、緊張側)はナット 1 個、反対側の固定側についてはナット 2 個(以下、2 重ナット)を緩まないよう相互に締め付けて取り付けた。

試験ケースを表 - 2 に示す。試験パラメータとして、鉄筋径、緊張長さ、ねじふし鉄筋個体差、トルク導入回数、座金種別の 5 項目とした。

鉄筋径のパラメータは D13, D19, D25 の 3 種類とし、ねじふし鉄筋個体差のパラメータとして異なる鉄筋径毎に 2 本ずつ鉄筋を用意し、試験を実施した。緊張長さのパラメータは 3m, 2m, 1m の 3 種類を検討した。緊張長さ毎に鉄筋を変更することなく、初めに 3m の緊張長さにて引張载荷を行い、同じ鉄筋の緊張長さを 1m ずつ調整して、2m および 1m の緊張長さについてトルク導入を行った。トルクの導入回数のパラメータは、緊張長さ毎に 3 回ずつ繰り返し実施した。また、D19 の鉄筋においては、座金の種別による影響を検討するため、3m の緊

張長さにおいて、異なる 4 種類の座金にて载荷した。使用した座金の寸法を表 - 3 に、座金の外観を図 - 5 に示す。トルク導入後のナットと座金は、固定端側については変形を目視にて確認できなかったため繰り返し使用し、緊張側については軸力導入の都度新品のナットと座金に交換して载荷を行った。

また、ひずみゲージの貼付箇所は、緊張側から 700mm, 1200mm, 1700mm, 2200mm の 4 箇所とし、トルクによるプレストレス導入時にねじふし鉄筋に均一に軸力が導入されているか検証した。

表 - 2 試験ケース

径	緊張長さ	鉄筋試験本数	トルク導入 繰り返し回数	座金種別
D13	3m	2本	3回	A
	2m	2本	1回	A
	1m	1本	3回	A
D19	3m	2本	3回	A
	2m	2本	3回	A
	1m	1本	3回	A
D25	3m	2本	3回	A
	2m	2本	3回	A
	1m	1本	3回	A
D19	3m	1本	1回	B
		1本	1回	C
		1本	1回	D

表 - 3 使用した座金

座金種別	呼び名	穴径	厚さ	備考
A	D22	24mm	3.2mm	平座金
B	D24	26mm	4.5mm	平座金
C	D22	24mm	6.0mm	高力ボルト
D	D24	26mm	6.0mm	高力ボルト



図 - 5 座金外観(左から A, B, C, D)

2.2 試験結果

(1) トルクと軸力の関係

図 - 6, 図 - 7, 図 - 8 に、緊張長さ毎に各鉄筋径のトルクと軸力の関係を示す。軸力は、ロードセルの値を用いている。いずれのグラフにおいてもトルク値の上昇に伴い、ほぼ比例関係で軸力が増大していく結果となった。また、トルク導入の繰り返しの影響は顕著にはあらわれなかったものの、導入トルク値が大きくなるにつれ、ばらつきが増大する傾向が見られた。

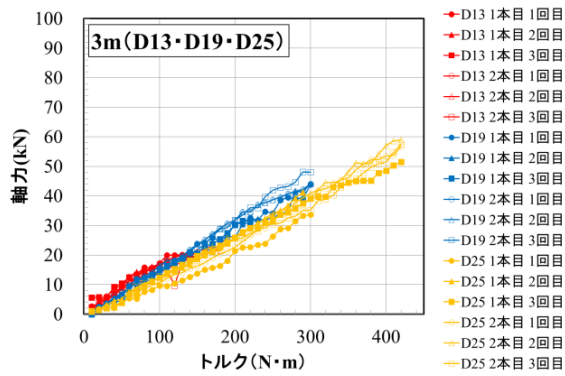


図 - 6 緊張長さ 3m のトルクと軸力の関係

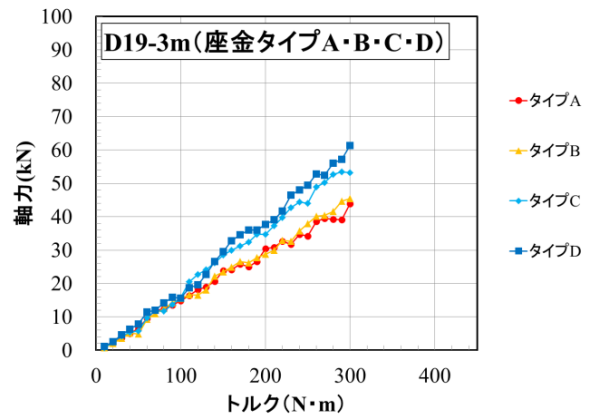


図 - 9 異なる座金種別のトルクと軸力の関係

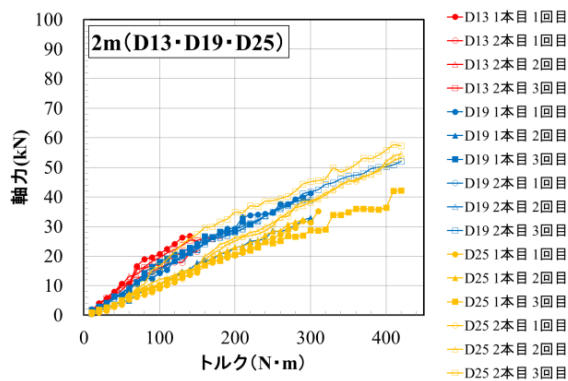


図 - 7 緊張長さ 2m のトルクと軸力の関係

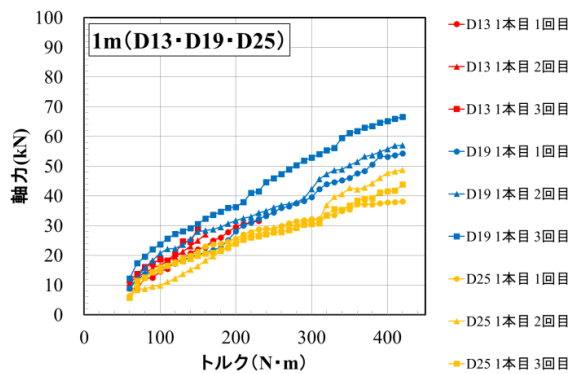


図 - 8 緊張長さ 1m のトルクと軸力の関係

図 - 9 に鉄筋径 D19 の緊張長さ 3m における座金種別ごとのトルクと軸力の関係を示す。こちらについてもトルク値の上昇に伴い、比例関係で軸力が增大する結果となった。一般的な平座金のタイプ A・B に比べ、高力ボルト用のタイプ C・D の方が導入される軸力が大きくなる傾向が見られた。

(2) ひずみ分布

図 - 10 に D19 鉄筋を緊張長さ 3m で載荷した際のトルク導入時のひずみ分布を示す。図には、導入軸力の増加に伴い、貼付箇所による発生ひずみの差が生じるか検証できるように、導入トルク 100N・m、200N・m、300N・m 時の軸方向のひずみゲージの値を示している。発生ひずみに多少のばらつきがあるものの、いずれの箇所でもトルク値の増加に伴い一様にひずみが増加していることを確認した。

この傾向は異なる鉄筋径および緊張長さでも同様の結果が得られた。また、ひずみゲージを貼付したすべての箇所で、トルク導入を 3 回繰り返した影響はほとんど見られなかった。

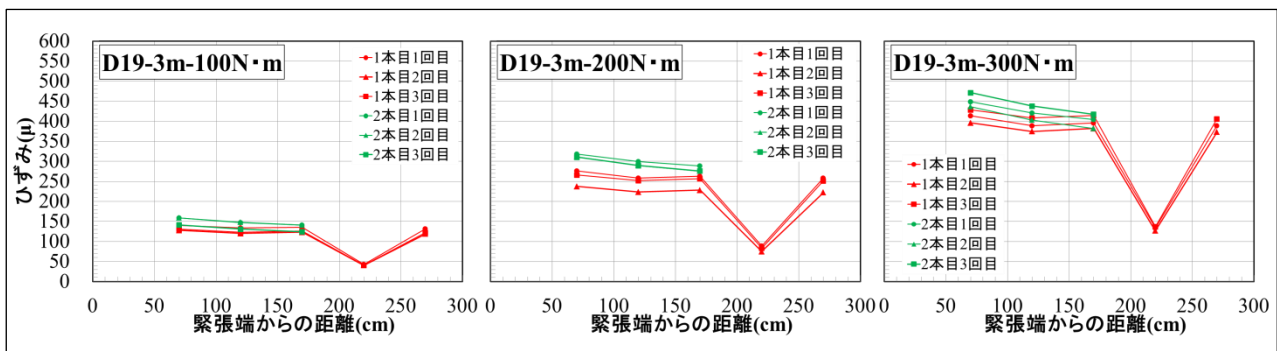


図 - 10 各トルク時のひずみ分布図 (鉄筋径 D25, 緊張長さ 3m)

(3) 応力とひずみの関係

図 - 11, 図 - 12, 図 - 13 に緊張長さ毎の応力とひずみの関係を示す。ひずみについては、鉄筋軸方向に貼付した各ゲージの平均を示しており、3 回繰り返し導入した内の 1 回を代表値として示している。応力については、ロードセルの値から鉄筋径毎の断面積を除して求めた。D13 および D19 においては、降伏応力の規格値以下で降伏し、ひずみが残留することを確認した。ひずみ分布の結果と同様にトルク導入を 3 回繰り返した影響はほとんど見られなかった。

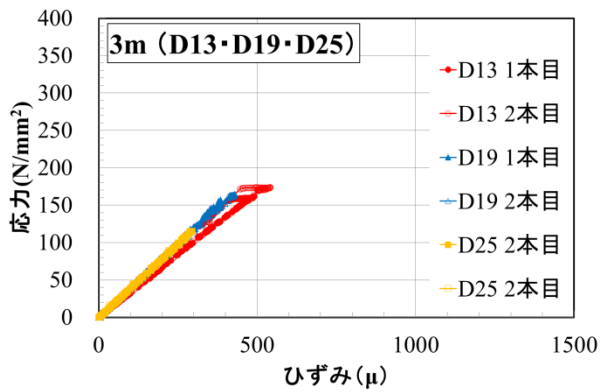


図 - 11 緊張長さ 3.0m の応力とひずみの関係

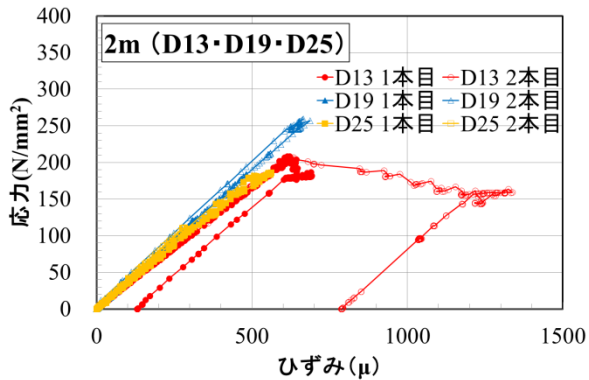


図 - 12 緊張長さ 2m の応力とひずみの関係

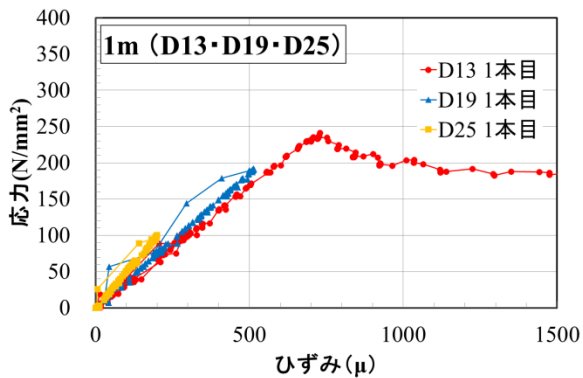


図 - 13 緊張長さ 1m の応力とひずみの関係

(4) 載荷後のねじれおよび損傷状況

トルク導入後の鉄筋のねじれ状況を図 - 14 に示す。また、D13, D19, D25 の各鉄筋径の緊張長さ 3m にトルク導入した際のナットと座金の損傷状態もあわせて示す。ねじれの角度については、ばらつきが多く生じており鉄筋径等との関係も明確にすることはできなかったが、導

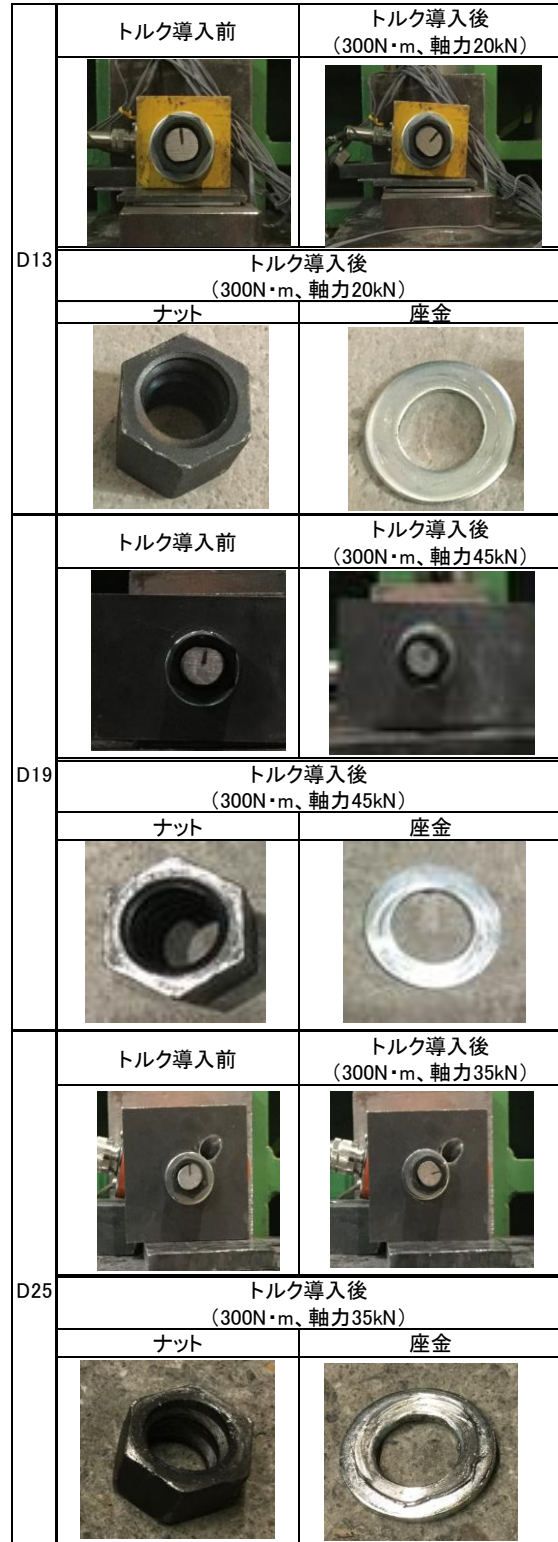


図 - 14 ねじれおよび損傷状態

入軸力 30kN 時に、概ね 30° から 70° の範囲でねじれが生じていることを確認した。

導入後の座金については、ナットとの設置箇所が削れているもの、凹みができているものを確認した。一方で、導入後のナットについてはいずれの鉄筋径においても変形や欠け等を確認することがなかった。

図 - 15 に降伏した D13 のねじれ状況を示す。導入トルク 180N・m 時までは、図に示すよう 30° まで徐々にねじれが生じていたが、トルク値 190N・m にて導入する際には、鉄筋が降伏して 150° まで急激にねじれが進展する結果となった。また、除荷後もねじれが残っていることを確認した。



D13緊張長さ2m			
トルク導入(180N・m)	ねじれ角度	トルク導入(190N・m)	ねじれ角度
	30°		150°

図 - 15 降伏してねじれた鉄筋状況

また、異なる座金種別の損傷状況を図 - 16 に示す。平座金のタイプ A・B については、ナットとの設置箇所に窪みが生じていることや、摩擦箇所が削られているような損傷状況を目視により確認できるが、高力ボルト用座金のタイプ C・D については、表面の塗装がはがれた程度であった。

異なる座金種別の損傷状態(300N・m導入後)			
タイプA	損傷状態	タイプB	損傷状態
	×		×
タイプC	損傷状態	タイプD	損傷状態
	○		○

図 - 16 座金の損傷状況

2.3 考察

(1) トルク係数

ねじにおけるトルクと軸力には一般的に式(1)の関係がある。

$$T = k \times d \times F \quad (1)$$

ここで、T：トルク(N・m)

k：トルク係数

d：鉄筋の呼び径(mm)

F：軸力(N)

トルク係数 k はねじと支圧面およびナットとねじの界面の表面粗度により異なり、通常のボルトにて機械用油脂等を塗布してある場合には、0.15～0.20 程度である。式(1)より、トルク係数算出式を求めると式(2)になる。

$$k = \frac{T}{d \times F} \quad (2)$$

試験結果より得られたトルク値および軸力から、式(2)を用いてトルク係数を求める。表 - 4 に本試験で得られたトルク係数と、トルク係数の変動係数を示す。変動係数は、標準偏差を平均値で除して求めた。また、図 - 6、図 - 7、図 - 8、図 - 9 のようにトルクと軸力を表すグラフについて傾きの平均値を求めたものを併せて示す。

表 - 4 トルク係数一覧

	D13	D19	D25	D19(座金種別毎)			
				A	B	C	D
グラフの傾き(F/T)	157.1	147.9	119.9	144.5	149.6	181.8	185.4
トルク係数	0.50	0.36	0.34	0.36		0.29	
変動係数	0.11	0.11	0.12	0.02		0.02	

トルク係数より、D19 および D25 ではほとんど差がないことがわかる。また、D13、D19、D25 の変動係数の値を見ると 0.11 および 0.12 と、鉄筋径によるトルク係数のばらつき方に大きな変化がないことが確認できる。このことから、今回使用した座金と同等のものを使用することで、変動係数 0.11~0.12 の範囲でトルク係数 k=0.35 にてトルク管理により軸力導入が可能であることが分かった。D13 では、トルク係数が他の鉄筋径に比べて大きく、軸力導入のロスが大きいことがわかる。しかし、D13 鉄筋においても、導入軸力 20kN 程度のトルク値 100N・m までの平均トルク係数では 0.39 となった。小径鉄筋では、軸のねじれの影響を受けやすく、高トルク値の軸力導入が難しいことを確認した。表 - 4 に示すトルク係数は、緊張長さ、繰り返し回数、鉄筋個体差の影響も含まれているものであるが、各変動係数の値が落ち着いていることから 3 つのパラメータが与えるトルク係数への影響は

少ないものであると考えられる。

次に座金種別について考察する。D19 鉄筋の座金の種別毎のトルク係数に明確な差は確認できないものの、高力ボルト用の座金についてはトルク係数が小さくなる傾向がみられる。また、平座金のタイプ A, B と高力ボルト用のタイプ C, D のグラフの傾きを比較すると、高力ボルト用の座金の方が傾きが大きく同トルクで大きな軸力導入が可能であることがわかった。図 - 16 のトルク導入後の座金の損傷状態でもほとんど損傷していないことから、座金の変形有無がトルク係数に影響を与えているものと推測される。また、高力ボルトについては表面処理がされており、表面の粗度が座金変形に起因しているものだと推測される。

(2) 鉄筋降伏

図 - 11, 図 - 12, 図 - 13 において、トルク導入後に除荷をしてもひずみが残留していることについて考察する。D13 鉄筋については、応力-ひずみ曲線より降伏荷重を算出すると、規格値の降伏荷重より平均で 5 割程度小さい荷重で鉄筋が降伏していることを確認した。降伏時のひずみゲージの値では 600~700 μ 程度であった。材料試験の引張載荷時では降伏ひずみ値は 2100 μ であり、こちらと比較すると小さなひずみしか生じていない。図 - 14, 図 - 15 より、今回の導入時に鉄筋のねじれが発生しており、軸ねじりによりせん断ひずみが発生しているためだと推測される。本試験で降伏した D13 鉄筋のひずみと軸力の関係を図 - 17 に示す。降伏点と引張載荷時の降伏ひずみ値 2100 μ を結んだ線形をねじれ発生による想定値として図に示す。図より軸方向の発生ひずみが理論値よりも低く出ることを確認した。今回の結果より、実験値である軸方向のひずみゲージの値が引張による発生ひずみを表し、想定値とひずみゲージとの差分がねじれによる発生ひずみを表していることが推測される。別の降伏した鉄筋についても同様の傾向が確認できたものの、引張によるひずみとねじれによるひずみの割合に関係性を確認できなかった。座金の変形やねじれ具合により、発生ひずみの割合にばらつきが生じるものと思われる。以上のことより、D13 鉄筋では、トルク導入の上限は降伏軸力の規格値半分以下となる。今後、本工法の施工を一般的なものにするために、ねじれを生じさせないような導入工法の検討が必要であると考えられる。

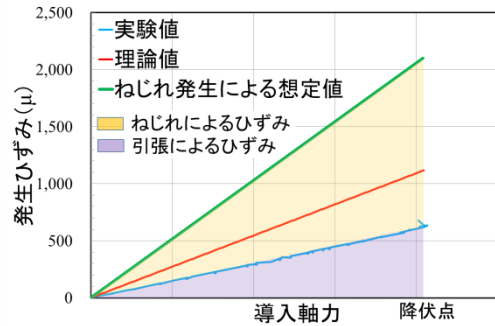


図 - 17 ねじれによる軸力と発生ひずみの関係

3. まとめ

ねじふし鉄筋を用いてトルクによる簡易なプレストレスの導入方法を用いる際の影響因子について実験的に検討したところ、本検討の範囲において、以下のことが分かった。

- (1) ねじふし鉄筋を活用した軸力導入をする際に、鉄筋の緊張長さ、トルク導入回数、鉄筋個体差の影響は些少のものであることを確認した。
- (2) トルクと軸力の関係に影響するものとして、材質や摩擦係数等による座金の変形の有無があることを確認した。
- (3) トルク導入時に発生するねじれの影響で、D13 のねじふし鉄筋であれば規格値の降伏荷重の半分程度の軸力で降伏する可能性を示唆した。

今後の課題としては、ねじれの影響によりねじふし鉄筋の規格値の降伏応力より先に降伏してしまうことを明らかにすることや、ねじれを与えずにトルク導入を可能にする工法の検討が挙げられる。これらの点については、今後検討していく予定である。

謝辞

本実験にあたり、鉄筋等の材料をご提供いただきました東京鉄鋼土木株式会社様に深謝します。

参考文献

- 1) 鈴木計夫, 常松 豪, 伊井敬二, 中村佳史: トルクによる簡易プレストレス導入工法の実証的研究, プレストレストコンクリート技術協会, 第 18 回シンポジウム論文集, pp.337-340, 2009.10
- 2) 小島 巧, 井口重信, 高見澤拓哉: ねじふし鉄筋を用いたトルクによる簡易なプレストレス導入に関する実験的検討, 日本コンクリート工学会, 第 39 回コンクリート工学年次論文集, pp.349-354, 2017.10