

論文 ナット締付によりプレストレスを導入したテーパー型先端定着体を有するアンカーに関する実験的検討

山本 剛史*1・渡部 太郎*2

要旨：PC 丸鋼棒の先端にテーパー型定着体を有するアンカーに軸力を導入しプレストレス構造とした際の性能を確認するために、トルクレンチを用いたナット締付により直径 13 mm の PC 鋼棒（C 種 1 号）に対して最大で 0.2%耐力 8 割相当の軸力を導入し、208 日間にわたる PC 鋼棒のひずみ低下とその後の保持軸力を実験的に検討した。その結果、締付トルクと導入軸力は比例関係となること、締付ナットの支圧力を適切に分散した試験体は 208 日経過後でも約 7 割のひずみを保持すること、PC 鋼棒ひずみから不可逆変形を控除して算出した軸力の範囲内ではアンカーで定着した部材間の開口を抑制できることが確認された。

キーワード：プレストレス、クリープ、アンカー、PC 鋼棒、先端定着体、トルク

1. はじめに

アンカー工法はコンクリート構造物の補強工事や付帯設備の取り付けなど、部材接合を必要とする場面で多く用いられている。小林ら¹⁾はアンカー筋に丸型 PC 鋼棒を使用し、PC 鋼棒先端にテーパー形状に加工したナットを取り付けて先端定着体とするアンカー（図-1。以下、テーパーナットアンカーと呼称する）工法を考案し、アンカーの設置深さを PC 鋼棒直径の 20 倍とすることで、PC 鋼棒（C 種 1 号）の破断荷重相当の引張耐力を有することを報告している。

また、筆者ら²⁾は PC 鋼棒を用いた簡易なプレストレス導入を目的に、トルクレンチを用いたナット締付による軸力導入に関する検討を行い、直径 13 mm の PC 鋼棒（C 種 1 号）に対して 0.2%耐力の 8 割相当の軸力を導入できること、締付ナット座面の摩擦力を低減することで小さなトルクで効率的に軸力を導入できることを報告した。

テーパーナットアンカーはアンカー筋に丸鋼を使用しており付着力が小さいため、設置後にプレストレスを導入しても周囲のコンクリートに有害なひび割れを生じさせない。そこで、ナット締付により設置後のテーパーナットアンカーにプレストレスを導入することを考えた。テーパーナットアンカーは通常の鉄筋と比較してヤング率に対して引張強度が大きいことから伸び量が大きくなるという問題があるが、プレストレス構造とすることで変形を抑制することが可能になると考えられる。これにより、PC 鋼棒の引張強度を十分に活用できるようになり、アンカー本数の低減や、アンカー径の縮小が期待できる。

本論文では、ナット締付によりテーパーナットアンカーに軸力を導入する際の、導入時および導入後の性状を

明らかにすることを目的に実験的な検討を行った。実験では、締付トルクと導入軸力の確認、プレストレス状態で長期間継続計測した際のアンカー鋼棒ひずみ変化の確認、長期間経過後にテーパーナットアンカーが保持している軸力の確認を行った。以下、本論文では PC 鋼棒にねじで螺合されコンクリート内部に埋め込まれるテーパー形状の先端定着体を「テーパーナット」と呼称し、軸力導入の際に締め付けられるコンクリート表面に露出している六角 PC ナットを「締付ナット」と呼称するものとする。

2. ナット締付による軸力導入試験

2.1 試験概要

ナット締付によってテーパーナットアンカーに軸力を導入する際の締付トルクと導入軸力の関係を明らかにするために、無筋コンクリートフーチングに設置したテーパーナットアンカーの締付試験を行った。図-2 に試験体概要図を、表-1 に材料諸元を示す。フーチングの中央軸線上に 260 mm（アンカー鋼棒径の 20 倍）の間隔を設けてテーパーナットアンカーをあらかじめ配置してコンクリートを打設した。アンカーの設置深さは既往の研究¹⁾で PC 鋼棒が破断する破壊形態となることが確認さ



図-1 テーパーナットアンカー

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

*2 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センターフロンティアサービス研究所 主幹研究員 博（工）（正会員）

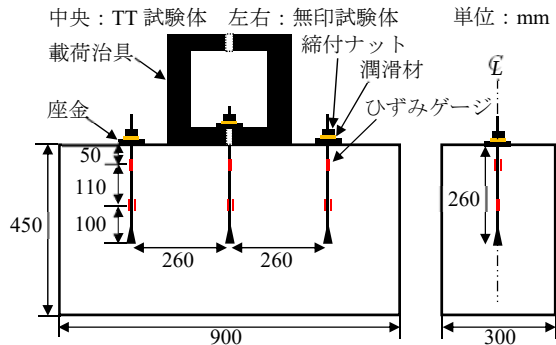


図-2 試験体概要図

表-1 材料諸元

PC 鋼棒	φ13 mm, ねじ部 M14 (細目) C 種 1 号, $\sigma_{0.2}=1159 \text{ N/mm}^2$, $f_t=1338 \text{ N/mm}^2$, $E_{pc}=195.3 \text{ kN/mm}^2$
テーパナット	S45C 相当
縮付ナット	M14, S45C
座金	SS400, $t=14 \text{ mm}$
載荷治具	SM490A, $t=45 \text{ mm}$
コンクリート	OPC, $f'_c=32.0 \text{ N/mm}^2$
テフロンシート	$t=1 \text{ mm}$

表-2 試験体一覧および試験結果

記号	潤滑材	引張載荷 治具	目標 導入軸力	PC 鋼棒 ひずみ(μ)	換算導入軸力 (kN)	縮付トルク (N・m)	トルク係数
T5	テフロンシート	なし	$0.5\sigma_{0.2}$ 相当 (77.2 kN)	3020	78.3	154.8	0.138
T5-TT		あり		3033	78.6	113.9	0.102
T8		なし	$0.8\sigma_{0.2}$ 相当 (123.5 kN)	5220	124.2	225.9	0.133
T8-TT		あり		5250	124.6	215.9	0.125
G5	モリブデン入り リチウムグリス	なし	$0.5\sigma_{0.2}$ 相当 (77.2 kN)	3014	78.1	214.2	0.195
G5-TT		あり		3064	79.4	199.0	0.186
G8		なし	$0.8\sigma_{0.2}$ 相当 (123.5 kN)	5215	124.1	300.3	0.176
G8-TT		あり		5228	124.3	248.7	0.149

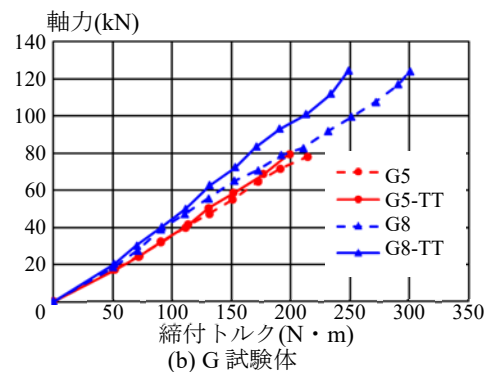
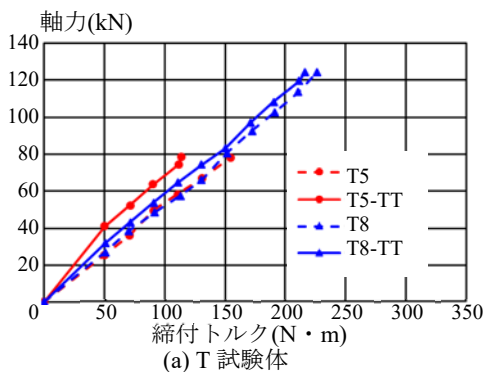


図-3 導入軸力-縮付トルク関係

れているアンカー鋼棒径の 20 倍で 260 mm とした。アンカーからの反力が縮付ナット直下のコンクリートに集中して母材破壊が生じることを防ぐために、座金 (70 mm × 70 mm) をコンクリートと縮付ナットの間に設置した。なお、一部の試験体には後述する引張試験実施のために、コンクリートと座金の間に載荷治具 (底盤面積 300 mm × 330 mm) を不陸調整用の石膏とともに設置した。また、既往の研究²⁾を参考に、縮付トルクに対して効率的に軸力を導入するために、潤滑材としてテフロンシートまたはモリブデン入りリチウムグリスを座金と縮付ナットの間に設置した。つまり、コンクリート表面 (石膏・載荷治具) - 座金 - テフロンシートまたはモリブデン入りリチウムグリス - 縮付ナットという積層構成になる。

表-2 に試験体一覧および試験結果を示す。試験では縮付トルクが確認できるデジタルトルクレンチを用いてナットの縮付を行い、トルク 50 N・m から概ね 20 N・m

おきに PC 鋼棒に貼付したひずみゲージのひずみ値を計測した。ひずみゲージは図-2 に示す通り、テーパナット先端から 100 mm と 210 mm の位置の表裏 (180 度) にそれぞれ貼付した。また、上下のひずみゲージ貼付方向は 90 度ずらした方向とした。

テーパナットアンカーへの導入軸力は別途実施した PC 鋼棒の材料試験結果を基に、PC 鋼棒のひずみの平均値から算出した。目標導入軸力は PC 鋼棒の 0.2% 耐力の 5 割相当 (77.2 kN) および 8 割相当 (123.5 kN) とした。この値は土木学会コンクリート標準示方書³⁾で定める緊張作業直後の緊張材の引張応力度の制限値 ($0.7f_{puk}=937 \text{ N/mm}^2$ (荷重 124.3 kN 相当) および $0.85f_{pyk}=985 \text{ N/mm}^2$ (荷重 130.7 kN 相当) の小さいほう。本試験に用いたアンカー-PC 鋼棒の場合荷重 124.3 kN 相当。ここで f_{puk} : PC 鋼材の引張強度の特性値, f_{pyk} : PC 鋼材の降伏強度の特性値) より小さい。なお、縮付実施時におけるコンクリ

ートの材齢は28日である。

2.2 試験結果

表-2 に示す試験結果のとおり、すべての試験体で目標とした軸力を導入することができた。なお、締付の際に締付ナットと PC 鋼棒の供回りは確認されなかった。図-3 に導入軸力-締付トルク関係を示す。すべての試験体で導入軸力と締付トルクの関係はおおむね比例関係となった。潤滑材にテフロンシートを用いた T 試験体とモリブデン入りリチウムグリスを用いた G 試験体を比較すると、T 試験体のほうが締付トルクに対する導入軸力が大きく、軸力導入の効率が良い。

一般に、締付トルクと締付力（ここでは導入軸力）は式(1)で求めることができる。

$$T = kdF \quad (1)$$

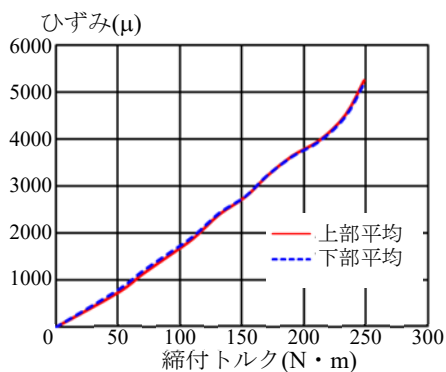


図-4 G8-TT 試験体 ひずみー締付トルク関係

ここで、 T ：締付トルク($\text{N} \cdot \text{m}$)、 F ：軸力(N)、 d ：ネジの呼び径(m)、 k ：トルク係数

各試験体の軸力-締付トルク関係を線形近似した傾きからトルク係数を求めた結果を表-2 に示すが、T 試験体、G 試験体ともに、既往の研究²⁾で実施した PC 鋼棒に対するナット締付による軸力導入の時のトルク係数と同様の値となった。

図-4 に計測位置ごとのひずみ値の一例として G8-TT 試験体のひずみー締付トルク関係を示す。上部（テーパナット先端から 210 mm）および下部（同 100 mm）のひずみ値の差はほとんどなく、PC 鋼棒の付着は無視できる範囲であり、アンカー丸鋼部のひずみは一様に分布していると言える。

以上より、既往の知見の PC 鋼棒単体へ軸力を導入する場合と同様に、テーパナットアンカーの場合でもナット締付により軸力を導入できることが分かった。

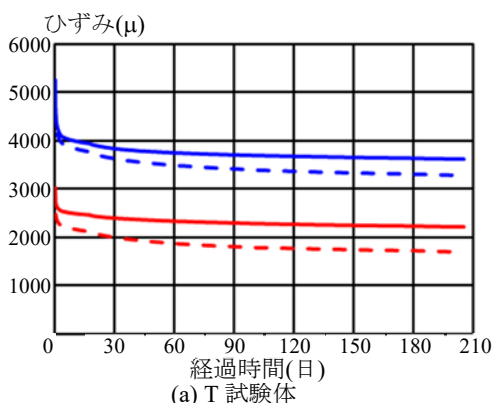
3. 軸力を導入したテーパナットアンカーのひずみ長期計測

3.1 計測概要

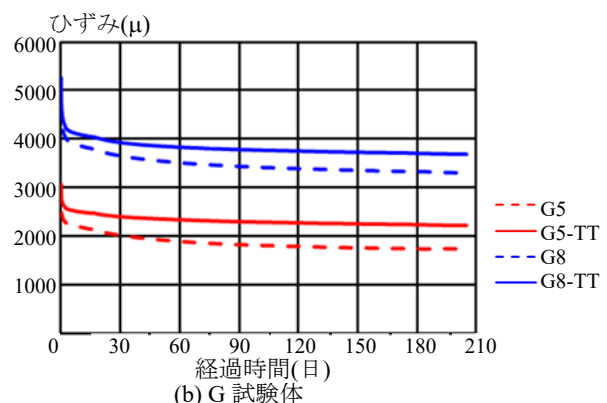
軸力を導入したテーパナットアンカーの長期にわたるひずみ変化を確認するために、2 章にて作製した試験体のアンカー PC 鋼棒ひずみ値を 208 日間継続計測した。計測はナットの締付から連続して行った。試験体を気温 20 度の恒温試験室に設置し、データロガーを用いてアン

表-3 計測初期および計測終了時のひずみ値と各時点のひずみ残存率

記号	計測初期 ひずみ(μ)	ひずみ残存率							計測終了 ひずみ(μ)
		1 時間後	1 日後	3 日後	7 日後	30 日後	90 日後	終了時	
T5	3020	0.86	0.77	0.74	0.72	0.66	0.60	0.56	1685
T5-TT	3033	0.92	0.86	0.84	0.83	0.79	0.76	0.73	2207
T8	5220	0.88	0.79	0.76	0.74	0.70	0.65	0.63	3280
T8-TT	5250	0.90	0.82	0.78	0.77	0.73	0.71	0.69	3625
G5	3014	0.86	0.78	0.75	0.73	0.67	0.60	0.57	1716
G5-TT	3064	0.93	0.86	0.84	0.82	0.78	0.75	0.72	2219
G8	5215	0.89	0.80	0.76	0.75	0.70	0.66	0.63	3301
G8-TT	5228	0.92	0.84	0.80	0.79	0.75	0.72	0.70	3681



(a) T 試験体



(b) G 試験体

図-5 アンカー鋼棒ひずみー経過時間関係

カーPC 鋼棒のひずみ値をインターバル計測した。

3.2 計測結果

表-3 に計測初期及び計測終了時のひずみと計測各時点におけるひずみ残存率を、図-5 にアンカー鋼棒ひずみ値一経過時間関係を示す。いずれの試験体においても締付完了直後に急激にひずみが減少し、その後緩やかな減少に転じた。初期の急激なひずみ減少は主にテーパナットと定着部コンクリートのなじみに起因するものと考えられる。締付後 208 日経過した計測終了時点においても、コンクリートフーチングの乾燥収縮やクリープ変形が原因とみられるごく緩やかなひずみ減少が続いているが、この時点におけるひずみ残存率は 0.53~0.73 となった。

引張載荷試験のためにコンクリートと座金の間に載荷治具を設置した TT 試験体は、同じ初期ひずみ条件の無印試験体と比較してひずみの減少量が小さく、いずれの試験体においても初期ひずみの 7 割程度のひずみを計測終了時に保持していた。これはコンクリートフーチング表面において、載荷治具の厚い鋼板を通じて締付ナットの支圧力がより広範囲に分散されたため、クリープの影響が小さくなったことが理由と推察される。

初期ひずみ条件別に比較を行うと、初期ひずみが大きく、コンクリートへ作用する応力が大きい T8/G8 シリーズの試験体のほうが、T5/G5 シリーズの試験体に比較してひずみの減少量が大きい。

潤滑材の違いによる、長期ひずみ挙動の有意な差は認められなかった。

4. 軸力を導入したテーパナットアンカーの保持軸力確認試験

4.1 試験概要

軸力の導入から長期間経過したテーパナットアンカーが保持する軸力を確認するために、2 章で作製し、3 章で継続計測した試験体の一部 (TT 試験体) に対し、引張試験を行った。図-6 に試験概要図を示す。

TT 試験体の引張載荷治具に、引張載荷試験用に直径 23 mm の PC 鋼棒 (C 種 1 号, M24 ねじ切り) を取り付け、センターホールジャッキを用いて一軸引張載荷を行った。引張載荷用 PC 鋼棒はテーパナットアンカーと同軸となるよう設置した。載荷方法は手動油圧ポンプを用いた静的載荷とし、目標最大載荷荷重は 120 kN とした。なお、載荷は 3 章の計測終了から連続して行ったため、軸力導入から 208 日後に実施している。

計測項目は載荷荷重、コンクリートフーチングと引張載荷治具の開口変位、アンカーPC 鋼棒ひずみとし、それぞれロードセル、 π ゲージ、ひずみゲージを用いて計測した。

4.2 試験結果

表-4 に載荷試験結果を、図-7 に荷重-アンカーひずみ関係を、図-8 に荷重-開口変位関係を示す。いずれの試験体も載荷荷重がある一定の値を超えるまでは、アンカーひずみ、開口変位ともにほとんど変化が見られず、荷重がある値を超えたのち、ひずみ、開口変位ともに荷重増加に対応して単調増加する挙動がみられた。これは試験体の耐荷機構が、ナット締付によりアンカーに導入された軸力によって載荷治具とフーチングの開口を抑制するプレストレス構造から、プレストレス力の消失とともに載荷治具とフーチングが開口して単純なアンカーの引張に変化したためと考えられる。以下では、開口変位が 0.01 mm に達した荷重を目開き荷重と称し、耐荷機構の変化点として定義する。目開き荷重は初期導入ひずみおよび試験開始時ひずみの大きい T8-TT/G8-TT 試験体のほうが T5-TT/G5-TT 試験体よりも大きな値となった。

最大荷重時のひずみは T8-TT/G8-TT 試験体で大きな値を示した。これは初期締付時の導入軸力が大きく、試験開始時点でアンカーPC 鋼棒が塑性ひずみを有していたためと考えられる。最大開口変位は目開き発生が早かったために目開き発生後の載荷荷重増分が大きくなった T5-TT/G5-TT 試験体で大きな値を示した。

潤滑材の違いによる、目開き荷重や引張載荷時変形挙動の有意な差は認められなかった。

除荷時の挙動に着目すると、G5-TT 試験体を除いて載荷時の値に沿うようにひずみ、開口変位が減少していき、荷重がある値を下回ると開口変位がほぼ 0 になり、ひずみも一定の値となる。これは載荷時とは逆にアンカーの引張からプレストレス構造へ耐荷機構の変化が発生して

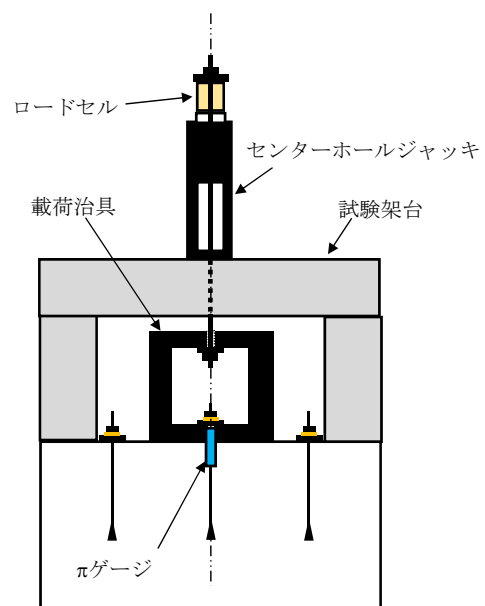


図-6 試験概要図

表-4 載荷試験結果

記号	試験前 ひずみ(μ)	目開き 荷重 (kN)	目開き荷 重時ひず み(μ)	最大荷重 (kN)	最大荷重 時ひずみ (μ)	最大開口 変位(mm)	残留開口 変位(mm)	試験後 ひずみ(μ)
T5-TT	2207	56.2	2257	119.6	4914	1.135	0.014	1339
T8-TT	3625	71.1	3679	120.8	5505	0.729	0.045	3173
G5-TT	2219	58.0	2329	121.5	4999	1.146	0.060	1578
G8-TT	3681	72.2	3719	121.1	5563	0.718	0.020	3226

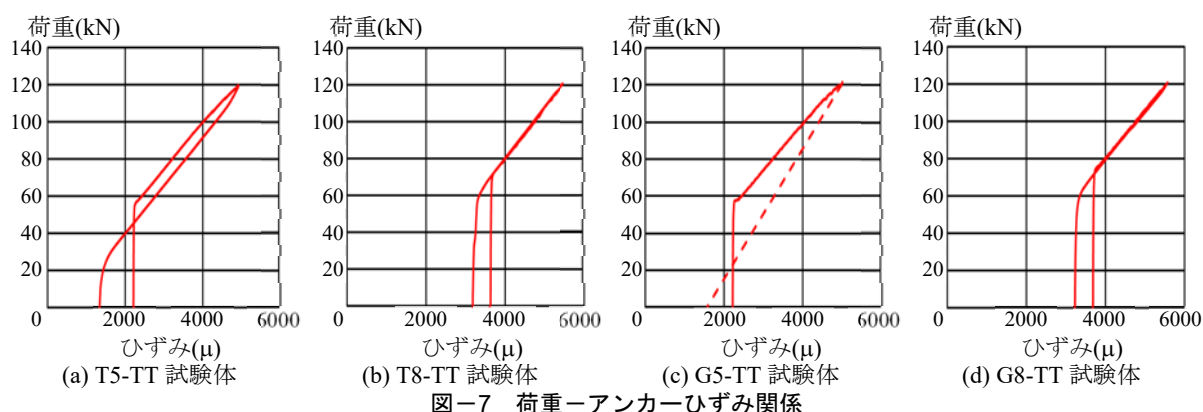


図-7 荷重-アンカーひずみ関係

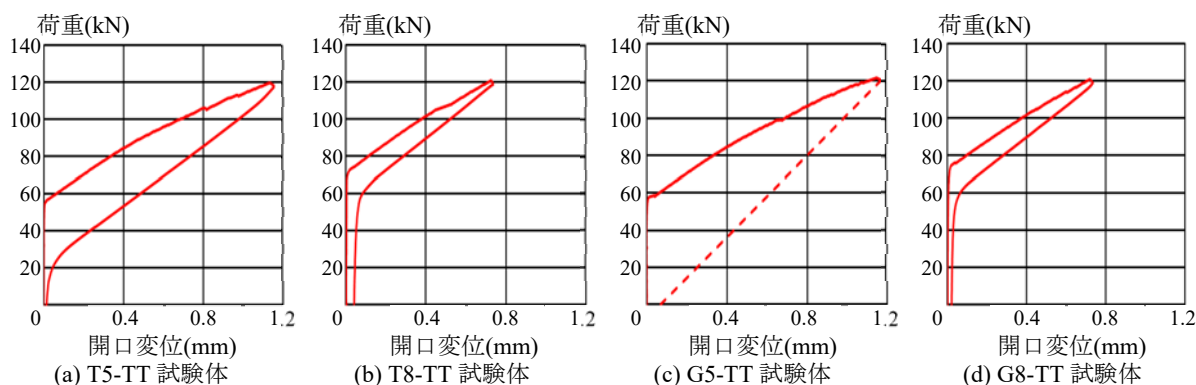


図-8 荷重-開口変位関係

いるものと推察される。この変化点の荷重は載荷時の目開き荷重より小さくなっている。なお、G5-TT 試験体は除荷時に油圧ポンプのバルブを一気に開放して瞬時に除荷を行ってしまったため、最大荷重 (121.5 kN) から完全除荷 (0 kN) に至るまでの中間点における計測データが存在しない。

除荷後の残留開口変位はいずれの試験体もほぼ 0 となったが、試験後のひずみは試験前のひずみよりも低下する結果となった。開口変位が試験前後で変化していないにも関わらず試験前後でひずみが低下したことから、テーパナットまたは締付ナットが構成する定着部の変形、または、ひずみゲージ貼付位置以外の部位でより大きな塑性変形が発生して当該部位に変形が集中した結果、計測位置のひずみが減少した可能性が考えられる。前者は定着体のテーパナット周囲のコンクリートの塑性変形による埋め込み長のごくわずかな減少、後者は計測箇所

の丸鋼部 (直径 13 mm, 断面積 132.7 mm²) よりも断面がやせているねじ部 (M14, 有効断面積 125 mm²) への変形集中があげられる。

表-5 にひずみ値より算出した保持軸力計算値および目開き荷重実験値の比較を示す。なお、保持軸力計算値は以下の手順に基づき算出した。①ナット締付で導入した初期ひずみ (全ひずみ) と材料試験結果を比較して応力を決定する。②応力とヤング率をもとに全ひずみを弾性ひずみと塑性ひずみに分解する (式(2), 式(3))。③塑性ひずみは永久変形であるから、長期計測によるひずみ低下を経た引張試験開始時の全ひずみから初期塑性ひずみを控除したひずみ値を引張試験開始時の有効ひずみとし、応力および保持軸力を算出する (式(4)~式(6))。

$$\epsilon_{ini_e} = \sigma_{ini} / E_{pc} \quad (2)$$

$$\epsilon_{ini_p} = \epsilon_{ini_t} - \epsilon_{ini_e} \quad (3)$$

$$\epsilon_{start_eff} = \epsilon_{start_t} - \epsilon_{ini_p} \quad (4)$$

表-5 保持軸力計算値

記号	初期全ひずみ(μ) ϵ_{ini_t}	初期塑性ひずみ(μ) ϵ_{ini_p}	試験開始時全ひずみ(μ) ϵ_{start_t}	試験開始時有効ひずみ(μ) ϵ_{start_eff}	試験開始時応力(N/mm^2) σ_{start}	保持軸力計算値(kN) P_{start}	目開き荷重実験値(kN)	実験値/計算値
T5-TT	3033	0	2207	2207	431	57.2	56.2	0.98
T8-TT	5250	442	3625	3183	617	81.9	71.1	0.87
G5-TT	3014	0	2219	2219	433	57.5	58.0	1.01
G8-TT	5228	432	3681	3249	629	83.5	72.2	0.87

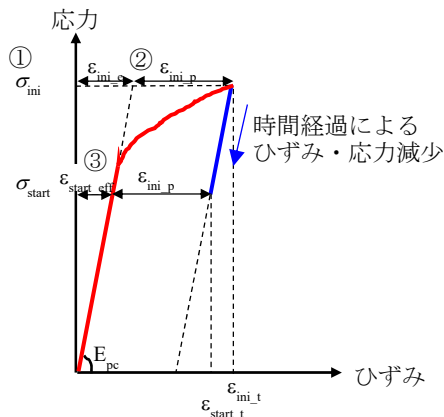


図-9 保持軸力計算値算出の考え方

$$\sigma_{start} = \epsilon_{start_eff} E_{pc} \quad (5)$$

$$P_{start} = A_{pc} \sigma_{start} \quad (6)$$

ここで、 ϵ_{ini_t} : 初期全ひずみ、 ϵ_{ini_e} : 初期弾性ひずみ、 ϵ_{ini_p} : 初期塑性ひずみ、 σ_{ini} : 初期応力(N/mm^2)、 E_{pc} : PC 鋼棒ヤング係数(kN/mm^2)、 ϵ_{start_t} : 試験開始時全ひずみ、 ϵ_{start_eff} : 試験開始時有効ひずみ、 σ_{start} : 試験開始時応力、 P_{start} : 保持軸力、 A_{pc} : PC 鋼棒断面積

図-9 にこれらの算出手順をアンカー鋼棒の応力ひずみ関係上に表した概念図を示す。

目開き荷重実験値と保持軸力計算値を比較すると、初期導入ひずみを PC 鋼棒の 0.2%耐力の 5 割相当とした T5-TT/G5-TT 試験体では実験値と計算値がほぼ一致したのに対して、初期導入ひずみを 0.2%耐力の 8 割相当とした T8-TT/G8-TT 試験体では実験値が計算値を 13%下回る結果となった。塑性変形履歴のある T8-TT/G8-TT 試験体において、計算値の算出時に控除した締付時の塑性変形以外に何らかの変形が発生し有効ひずみが減少していた可能性がある。

5. 結論

本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 直径 13 mm の PC 鋼棒 (C 種 1 号) をアンカー鋼棒に用いたテーパナットアンカーに対しトルクレンチを用いたナット締付を行い、PC 鋼棒の 0.2%耐力の 8 割に相当する約 120 kN の軸力を導入することができた。
- (2) 締付トルクと導入軸力の関係は比例関係となり、そのトルク係数は既往の知見にある、PC 鋼棒に対するナット締付による軸力導入の際のトルク係数と同様の値となる。
- (3) 締付ナット定着部に引張载荷治具の鋼板を挿入して締付ナットからコンクリートに伝達する支圧力を適切に分散することで、締付から約半年経過後のひずみ残存率が 56~63 %から 69~73 %に向上した。テーパナットアンカーに軸力を導入する場合、目的の有効軸力を得るためには定着プレートの寸法・板厚の検討が必要である。
- (4) テーパナットアンカーに軸力を導入することでプレストレス構造を構成するため、導入した軸力が有効な範囲においてテーパナットアンカーで定着した部材に作用する引張力による部材間の開口を抑制することができる。

参考文献

- 1) 小林 薫, 鈴木雄大, 平林雅也, 伊藤隼人: テーパーナットを PC 鋼棒定着体としたあと施工アンカー工法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1609-1614, 2016.7
- 2) 山本剛史, 小林寿子, 細川良美: トルクによる PC 鋼棒の軸力導入に対するナット座面の影響に関する実験的検討, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会講演概要集, V-354, 2020.8
- 3) コンクリート標準示方書【設計編】, 土木学会, 2017.12