中大規模木質ラーメン構造の鉄筋コンクリート仕口を想定した転造ねじアンカーボルトの引抜性能に関する実験的研究

Experimental Study on Pull-out Performance of Rolled-Thread Anchor Bolts Anchored in Reinforced Concrete Joints of Timber Moment-Frame Structures

井上　樹里也[*1]，白山　貴志[*1]，蛭田　駿[*1]，原田　兼佑[*1]，新上　浩[*2]，徳武　茂隆[*1]
JURIYA INOUE, TAKASHI SHIRAYAMA, SHUN HIRUTA,
KENSUKE HARADA, SHINJO HIROSHI, SHIGETAKA TOKUTAKE

中大規模木造の仕口部に鉄筋コンクリート造や鉄骨鉄筋コンクリート造を採用する場合，転造ねじアンカーボルト（以下，ABR と称する）をコンクリートに定着させ，仕口部から突出した ABR を接着剤や金物を介して柱や梁と接合する方法がある。本研究では，鉄筋コンクリートに定着された ABR の付着性能を把握するため，複数の径の ABR で引抜実験を実施し，ABR の引張強さに近い応力下において，埋込深さが ABR 径の 15～20 倍以深の計測点ではひずみはほとんど生じておらず，コンクリートとの付着作用が当該位置まで及んでいないことを確認した。

キーワード：鉄筋コンクリート，転造ねじ，定着，付着応力度，中大規模木造

When reinforced concrete or steel-reinforced concrete is used for the joints of medium-to large-scale timber structures, one connection method anchors rolled-thread anchor bolts (ABR) in the concrete and connects the projecting portion to timber columns or beams via adhesive or steel hardware. In this study, pull-out tests were conducted on ABRs of several diameters in order to clarify the bond performance of ABRs anchored in reinforced concrete. Under stress close to the tensile strength of the ABR, almost no strain occurred at measurement points deeper than 15-20 times the bolt diameter, confirming that bond action did not extend to those depths.

Keywords: Reinforced concrete, Rolled thread, Anchorage, Bond stress, Medium-to large-scale timber structures

1. はじめに

近年，カーボンニュートラルや森林資源の循環利用を目的として，建築構造への木材利用が増加している。木材は繊維（材軸）方向に比べ，繊維直交方向は剛性，強度ともに低いという異方性を有しているため，**図-1** に示すような中大規模木造では，柱と梁部材が交差する柱梁接合部が強固となるよう，接合部パネル部に鉄筋コンクリート（以下，RC と称する）造や鉄骨鉄筋コンクリート造を採用する事例も多い。このような構法における木質の柱や梁の接合方法の一つに，接着剤や金物を介して，接合部パネルから突出した異形鉄筋や転造ねじを有する両ねじアンカーボルト（以下，ABR と称する）と接合するものがある（**図-2**，**図-3** 参照）。ABR においては，施工性や付着性能の向上を目的として，プレキャスト RC 造柱梁接合部内に転造ねじ部を通し配



図-1　中大規模木造建物イメージ

[*1] 建築事業本部構造・免制震開発部
[*2] 技術研究所技術開発推進部

筋することも想定される。付着性能についての既往研究としては降伏後の異形鉄筋 [1]やシース管内部の異形鉄筋に関する研究 [2]，ねじ節鉄筋に関する研究 [3]などがあるが，転造ねじを有する ABR の付着性能に関する知見は十分でない。そこで本報では，RC 中に定着された転造ねじの付着性能を把握するために実施した，全長を転造ねじとした ABR の引抜実験の結果について報告する。

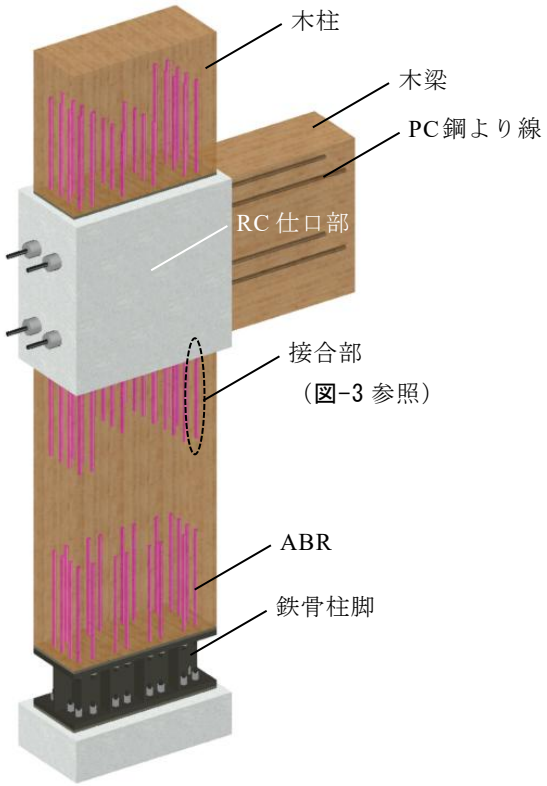


図-2　ABR を用いた接合イメージ
（RC 仕口部と木柱の接合に ABR を用いた場合）

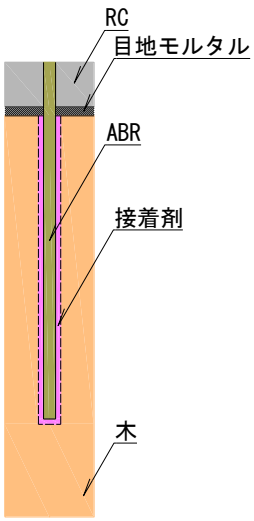


図-3　接合部拡大図

2. 実験概要

試験体諸元一覧を**表-1** に，試験概要図（dg.1, dn.1）を**図-4 に**，試験状況（dn.1）を**図-5** に示す。試験方法は文献 1), 4)を参考とした。ABR の鋼種は SNR490B とし，呼び径は 18 mm，20 mm，24 mm，27 mm の 4 種類とした。なお，呼び径 27 mm については呼び強度 48 N/mm^2 および 60 N/mm^2 の 2 種類のコンクリート強度を採用した。ABR は RC 躯体上面から 5d の範囲をポリプロピレンシートで覆い付着除去区間を設け，ABR の降伏が先行するよう埋込長さを 40 d とし，はしあきは 12.5 d 以上とした。**図-4** 中の試験体 dg.1 のように，付着区間では 5d 間隔で対向する 2 面のねじ山を削り取り，ひずみゲージを貼付した。ひずみ

表-1　試験体諸元一覧

試験体名	ABR			RC		
	材質	呼び径 (d) [mm]	ひずみゲージ	幅 × せい [mm]	高さ [mm]	コンクリート圧縮強度 [N/mm^2]
ag.1 ~ ag.3	SNR490B	18	あり	1100 × 675	45d	63.5
an.1 ~ an.3			なし			
bg.1 ~ bg.3		20	あり			63.0
bn.1 ~ bn.3			なし			
cg.1 ~ cg.3		24	あり			62.9
cn.1 ~ cn.3			なし			
dg.1 ~ dg.3		27	あり			62.0
dn.1 ~ dn.3			なし			
eg.1 ~ eg.3			あり			45.8
en.1 ~ en.3			なし			

ゲージ貼付の影響を確認するため，同径でひずみゲージを有しない ABR（**図-4** 中の試験体 dn.1）も同一の RC 躯体に埋設した。試験体数は呼び径あたり各 3 体とし，ABR 試験体名の数字の同じものが同一 RC 躯体に埋設されている。変位計測用の鋼板を通すスリットのある円筒部，および RC 躯体との接触面に 300 ⌀ の開口のあるベースプレートを組み合わせた載荷反力用鋼製治具を RC 躯体上部に設置し，センターホールジャッキにより ABR に引張荷重を与えた。加力サイクル計画図を**図-6** に示す。加力サイクルは SNR490B の長期許容応力度を 2 回，短期許容応力度の 95%を 2 回，材料試験より求めた引張強さの 95%を 1 回とした。ABR の材料試験結果を**表-2** に，材料試験時の引張応力度とひずみの関係を**図-7** に示す。**表-2** に記載している値はそれぞれ試験体 3 体の平均値である。

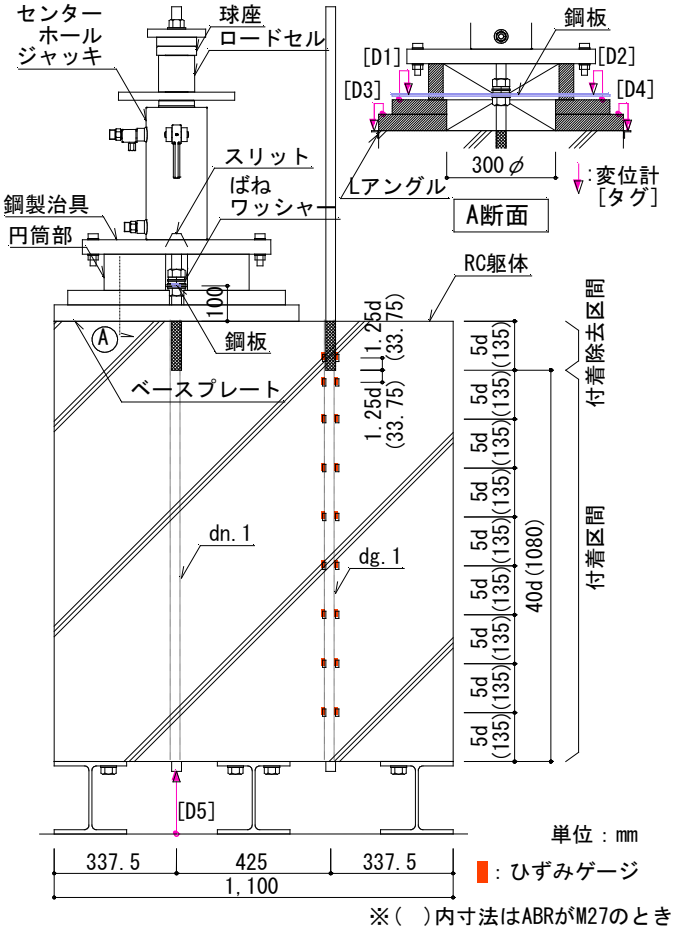


図-4 試験概要図（dg.1，dn.1）

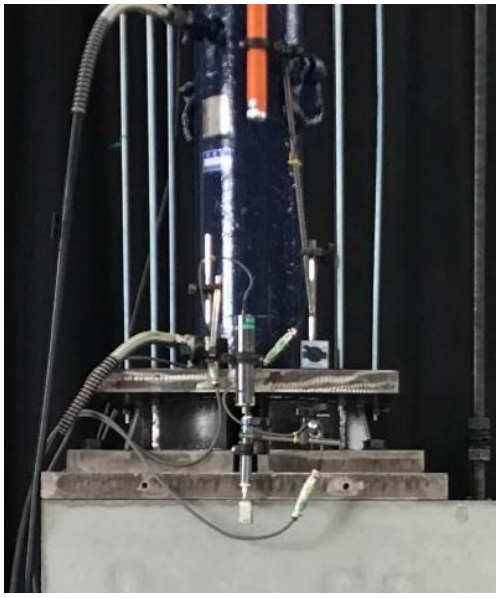


図-5 試験状況（dn.1）

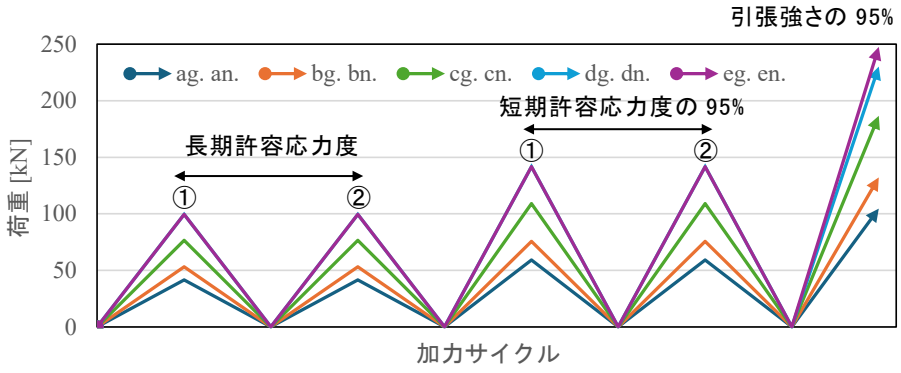


図-6 加力サイクル計画図

表-2　ABR 材料試験結果

呼び径 (d) [mm]	対応試験体 (ABR)	降伏応力※ [N/mm^2]	降伏ひずみ [%]	引張強さ [N/mm^2]
18	ag.1 ~ ag.3 an.1 ~ an.3	328	0.41	573
20	bg.1 ~ bg.3 bn.1 ~ bn.3	313	0.40	568
24	cg.1 ~ cg.3 cn.1 ~ cn.3	325	0.40	557
27	dg.1 ~ dg.3 dn.1 ~ dn.3	326	0.39	528
	eg.1 ~ eg.3 en.1 ~ en.3	320	0.39	537

※降伏応力は0.2%オフセット耐力

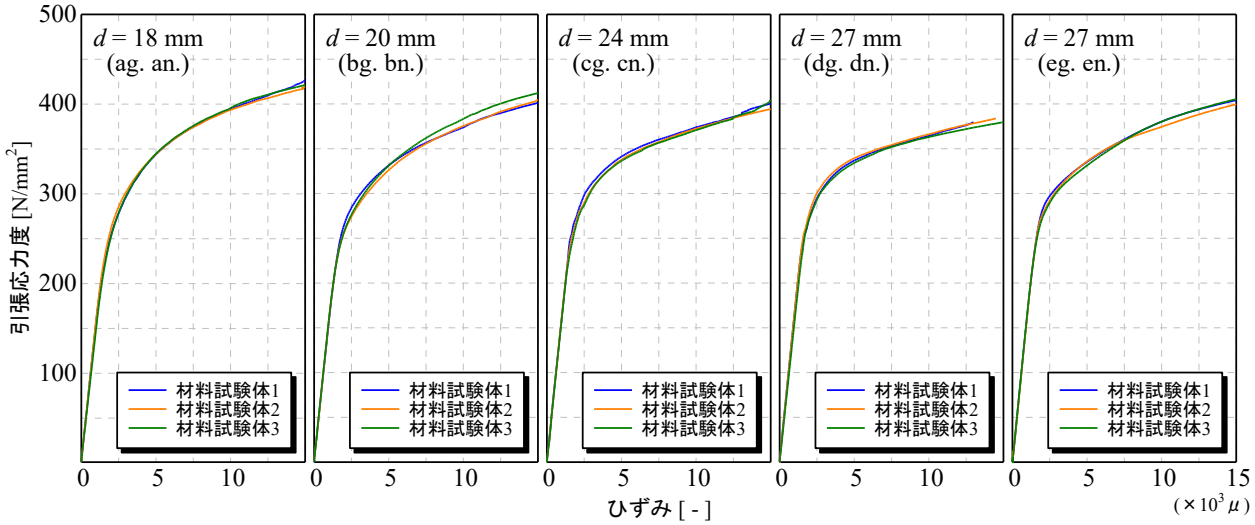


図-7　引張応力度とひずみの関係（ABR 材料試験）

3. 引張応力度と全抜け出し量の関係

図-8 に引張応力度と全抜け出し量の関係を呼び径ごと，およびコンクリート強度ごとに示す。引張応力度は，ロードセルによる荷重計測値をねじ部有効断面積で除した値であり，全抜け出し量は，**図-4** に示す ABR に取り付けた鋼板と RC 上面との相対変位より求めた値（**図-4** に示す変位計 D1, D2 と D3, D4 それぞれの平均値の和）であり，付着除去区間から鋼板までの区間（以下，非付着区間と称する）における転造ねじの伸びも含まれる。すべての試験体で ABR の引張降伏後に伸び量が増大し，引張強さの 95%荷重に到達した。RC 下面から突出させた ABR に変位は生じなかった。また，短期許容応力度の 95%以下の繰り返し範囲内での顕著な剛性低下は見られなかった。全抜け出し量はひずみゲージを貼付した ABR の方が大きくなる傾向が見られ，ねじ山が削られたことによる断面積の減少と，当該部の付着剛性の低下によるものと考えられる。また，**図-8** には計測されたひずみを区間平均し，積分により求めた短期許容応力度の 95%サイクル 2 回目までの各ピーク時における付着区間と付着除去区間の境界面での抜け出し量もプロットしている。区間境界面における抜け出し量は全抜け出し量と比較して小さく，サイクル 1 回目と 2 回目に差はほぼなかった。各ピーク時における境界面での抜け出し量と全抜け出し量の差を非付着区間の伸びと考えると，ひずみゲージを貼付した ABR の試験体で加力サイクルにおける短期許容応力度の 95%時点の ABR の全抜け出し量は，非付着区間の伸びが約 50%以上を占めていることが確認できた。

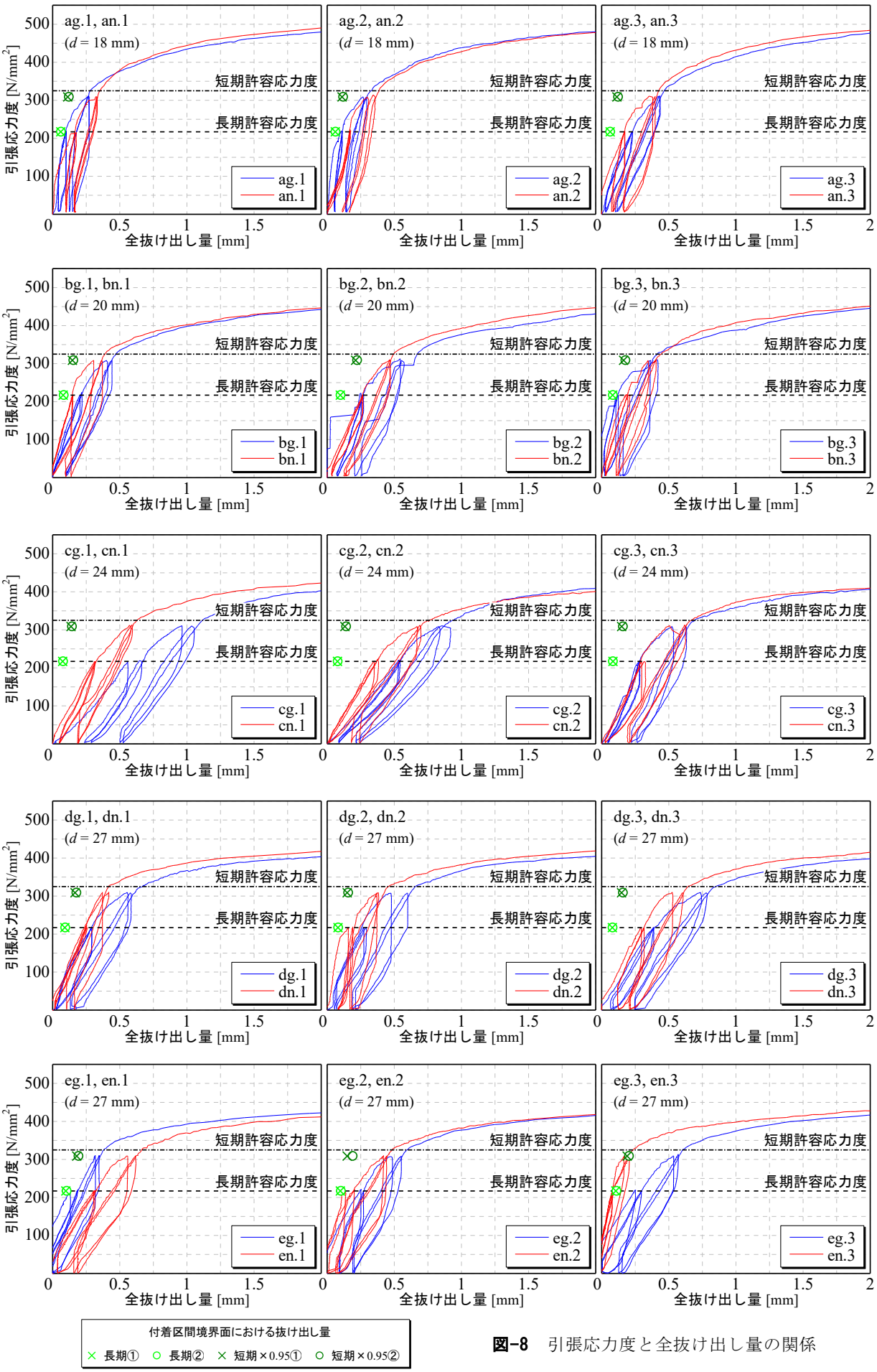


図-8 引張応力度と全抜け出し量の関係

4. 破壊性状

図-9 に試験体 ag.1 における RC 躯体上面の加力前後の状況を示す。加力後に ABR の抜け出しが確認されたが，躯体上面にひび割れ等の損傷は生じなかった。これは ABR の躯体上面付近に付着除去区間を設けたためと考えられる。なお，すべての試験体で躯体表面にひび割れ等の損傷は生じなかった。



(a) 加力前　　(b) 加力後

図-9　RC 躯体上面の状況（ag.1）

5. ひずみ分布

図-10 にシリーズごとに代表的な試験体の埋込深さ方向のひずみ分布を示す。なお，ひずみ分布は同パラメータの 3 体とも同様の傾向を示した。図中に示すひずみは，埋込深さ方向の同じ位置で，ABR 断面上の対称となる 2 か所で計測したひずみの平均値である。ひずみ分布は，長期許容応力度および短期許容応力度の 95%の 1 サイクル目ピーク時と除荷時，降伏応力および引張強さの 95%時を記載した。降伏応力および引張強さは ABR の材料試験結果で得た値とした。引張強さの 95%サイクル中に計測不能となったひずみゲージの計測データは除いている。また，図中に記載しているひずみ値は，引張強さの 95%時にグラフ外となった計測点の値である。ひずみ計測位置について，付着除去区間と付着区間の境界部分においては，それぞれ境界から 1.25d（d：ABR 呼び径）の位置（S1，S2）で計測し，付着区間は 5d の間隔の位置（S3～S9）で計測した。いずれの試験体も，S1～S4 位置のひずみはピーク時荷重の増加に伴い大きくなる傾向を示しており，eg.シリーズを除く試験体では S5～S9 位置のひずみは加力終了時までほぼ変化しておらず，eg.シリーズについても S5～S6 間のひずみが加力サイクル中の降伏応力から引張強さの 95%の間でわずかに増大したのみである。このことから，本試験条件においては付着破壊を生じない定着長さが確保できたと考えられる。ABR の径が同じでコンクリート強度が異なる dg.シリーズと eg.シリーズを比較すると，荷重 0 の時点を除く各計測時において eg.シリーズの S2～S5 位置のひずみは dg.シリーズより大きな値を示した。

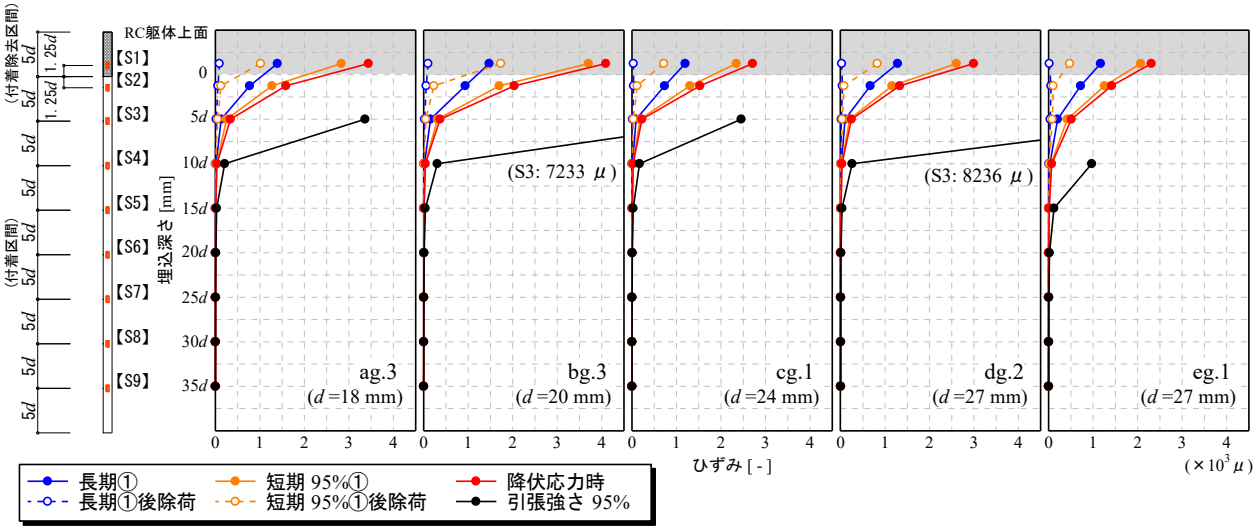


図-10　代表的な試験体のひずみ分布

6. 区間平均付着応力度分布

(1) 付着応力度の算出方法

ABR の区間平均付着応力度を算出するにあたり，ひずみゲージによる計測値から ABR の引張応力度を算出するため，ABR の材料試験より得られた引張応力度とひずみの関係を Ramberg-Osgood モデル（以下，R-O モデルと称する）から求められる曲線に，材料試験結果との整合性を確認しながらパラメータを決定した。また，ABR 降伏時の弾性ひずみに対する塑性ひずみの割合と降伏応力 σ_y（0.2%オフセット耐力）を用いて R-O モデルを変形すると式(1)となる。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_s} + 0.002\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^n \tag{1}$$

ここで，ε ：ABR のひずみ，σ ：ABR の引張応力度 [N/mm^2]，E_s ：材料試験結果による ABR のヤング係数 [N/mm^2]，n ：ひずみ硬化係数，σ_y ：材料試験結果による ABR の 0.2%オフセット耐力（降伏応力） [N/mm^2]

また，ABR の区間平均付着応力度 τ は式(2)により算出した。

$$\tau = \frac{\Delta\sigma A_s}{A_b} \tag{2}$$

ここで，τ ：区間平均付着応力度 [N/mm2]，$\Delta\sigma$ ：ひずみ計測位置間の引張応力度の差 [N/mm^2]，A_s ：ABR のねじ部有効断面積 [mm^2]，A_b ：計測位置間のコンクリート付着面積 [mm^2]

計測位置間のコンクリート付着面積 A_b は式(3)より算出した。

$$A_b = \pi l D \tag{3}$$

ここで，l ：ひずみ計測位置間のコンクリート付着長さ [mm]，D ：ABR の有効断面積より算出した ABR 直径[mm]

表-3 に式(1)中に用いた試験体ごとの定数を示す。なお，式(1)中の σ_y には**表-2** に示す降伏応力の値を用いた。**図-11** に呼び径 d= 27 mm（dg.シリーズ）の材料試験結果および式(1)の引張応力度とひずみの関係を示す。また，dg.シリーズで代表的な試験体の付着除去区間で計測したひずみの平均値（S1 ひずみ）を**図-11** に併せて示す。すべての試験体において，計測した ABR のひずみの中で S1 ひずみのみ短期許容応力度の 95%の 1 サイクル目後の除荷時に残留ひずみが生じた。式(1)は繰り返し載荷時の残留ひずみを表現していないが，降伏応力度以降の S1 ひずみは再び R-O モデルにおおむね沿っているため，各加力サイクルにおけるピーク時の付着応力度を算出するにあたり式(1)を用いた。

表-3 式(1)中の定数

試験体名 (ABR)	呼び径 (d) [mm]	E_s ※ [N/mm^2]	n
ag.1 ~ ag.3	18	152,800	7
bg.1 ~ bg.3	20	156,600	
cg.1 ~ cg.3	24	161,500	9
dg.1 ~ dg.3	27	162,800	11
eg.1 ~ eg.3		165,800	8

※材料試験結果 (各3本) の平均値

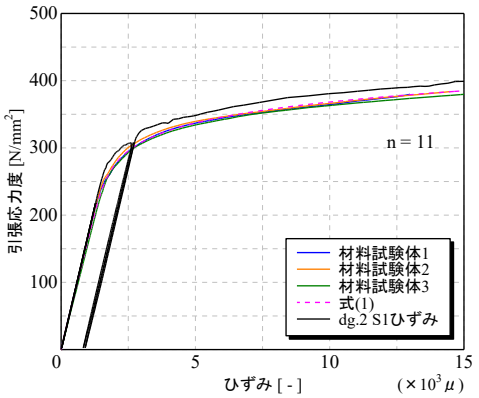


図-11 材料試験結果および式(1)の引張応力度とひずみの関係

(2) 算出結果

図-12 に ABR の呼び径が同等である試験体 dg.2 および eg.1 の S2～S3 のひずみ計測区間における荷重と区間平均付着応力度の関係を示す。コンクリート圧縮強度が 62 N/mm^2 の dg. シリーズでは埋込深さ 1.25～5d 間の加力サイクル中において，計測可能であった範囲における区間平均付着応力度は最大で 17 N/mm^2 程度を示した。コンクリート圧縮強度が 45.8 N/mm^2 の eg. シリーズでは区間平均付着応力度は最大で 12 N/mm^2 程度を示した。

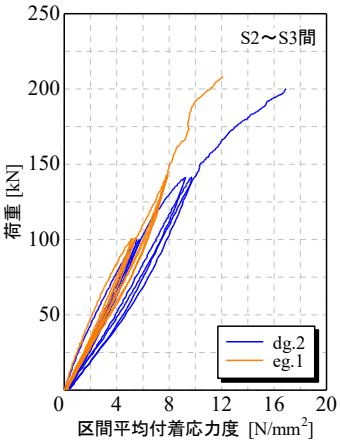


図-12 荷重と付着応力度の関係

図-13 にシリーズごとの区間平均付着応力度分布を示す。分布は長期許容応力度および短期許容応力度の 95%の 1 サイクル目ピーク時，引張強さの 95%時を記載した。付着応力度分布は同パラメータの 3 体とも同様の傾向を示した。ag.～dg. シリーズでは埋込深さが 15d まで，eg. シリーズで 20d まではピーク時荷重の増加に伴い区間平均付着応力度は増大しており，それ以深ではひずみがほとんど生じていないため，付着応力度は 0 に近い値を示した。dg.シリーズと eg.シリーズで比較すると，各計測時における eg.シリーズの埋込深さ 10～20d の区間平均付着応力度が dg.シリーズより大きな値を示している。これは eg.シリーズは dg.シリーズと比べてコンクリート強度が低いため，付着剛性が低く，応力伝達領域が深部へ移行したためと考えられる。

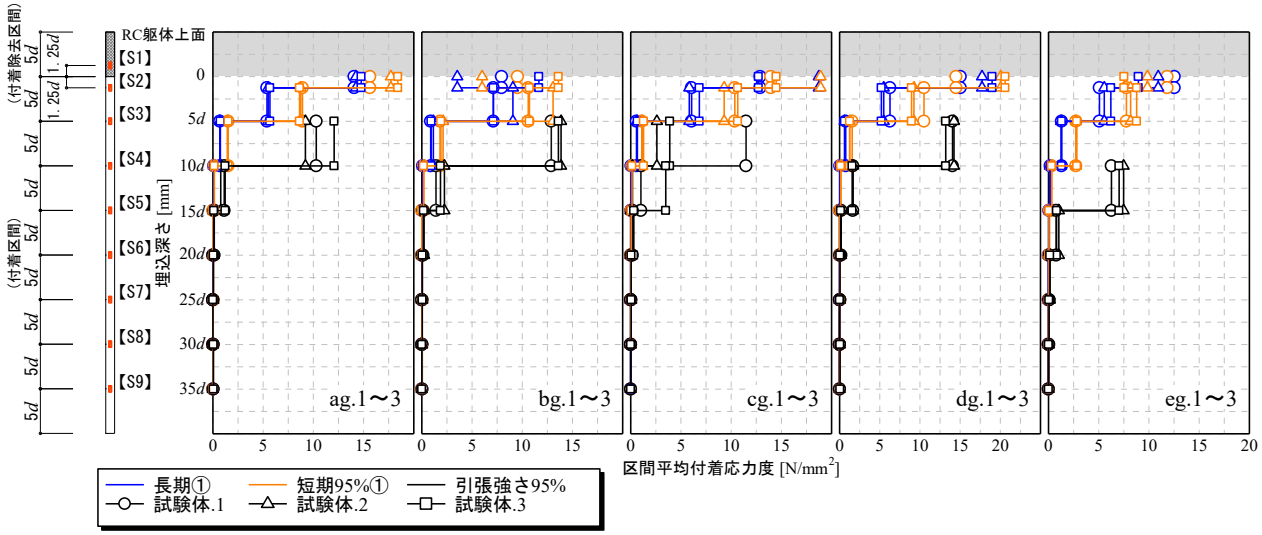


図-13 区間平均付着応力度分布

7. まとめ

RC 中に定着した ABR の引抜実験を行い，以下の知見を得た。

① ABR はひずみゲージの有無によらず，すべての試験体で降伏し，引張強さの 95%となる最大加力サイクルのピークまで達した。

② コンクリート強度が同等の場合，ABR の径によるひずみ分布および区間平均付着応力度の差異は見られなかった。

③ ABR の径が同等でコンクリート強度が異なる場合，埋込深さ 20d 以浅の計測点のひずみはコンクリート圧縮強度が低い試験体のほうが大きな値を示した。

④ ABR の引張強さに近い応力を負担していても埋込深さ 15～20d 以深の計測点ではひずみはほとんど生じていなかった。

⑤ 本実験で確認された埋込深さ 1.25～5*d* の区間平均付着応力度は ABR の短期許容応力度付近で 10 N/mm^2，最大で 17 N/mm^2 であったが，試験終了時においても付着破壊に至っていないことから，実際の最大付着応力度は本実験の計測値を上回る可能性がある。

⑥ RC 仕口内に定着された ABR は引張強さに近い応力下においても付着破壊は生じず，十分な定着性能を有した。

参考文献

1) 島弘，周礼良，岡村甫：異形鉄筋の鉄筋降伏後における付着特性，土木学会論文集，第 378 号／V-6，pp.213-220，1987.2

2) 小田切智明，小坂英生，今井和正，是永健好，甲斐隆夫，河合邦彦：プレキャスト部材におけるシース管内鉄筋の付着性状（その 1）実験概要，日本建築学会大会（近畿）学術講演梗概集，C-2，構造Ⅳ，pp.27-28，2005

3) 田附遼太，太田雄介，中村光男，森泰夫，森清隆，和田湧気，浦川和也，金子治：高強度鉄筋を主筋に用いた場所打ちコンクリート杭の付着性能（その 1 付着強度試験），日本建築学会大会（近畿）学術講演梗概集，構造Ⅰ，pp.511-512，2023

4) 田附遼太，太田雄介，森泰夫，森清隆，和田湧気，熊田健太，福田健，Phan Van Quang，金子治：高強度鉄筋を主筋に用いた場所打ちコンクリート杭の付着性能（その 3 鉄筋の引抜き試験），日本建築学会大会（関東）学術講演梗概集，構造Ⅰ，pp.439-440，2024