

# 論文 頭部ナット付き鉄筋と無機モルタルカプセルによるあと定着型工法の付着性能に関する実験的研究

西村 英一郎\*1・石坂 隆幸\*2・金川 基\*3・山崎 康雄\*3

**要旨：**本研究は、既設 RC 部材へ引張力を負担する鉄筋を追加するための後施工タイプの工法を提案し、その構造性能を明らかにすることを目的としている。提案する工法は既存構造物のせん断補強方法として土木分野で実用化されている工法の技術を応用し、既設 RC 部材表面にハンマードリル等で削孔を行い、その孔内へ無機モルタルカプセルを充填し、鉄筋の先端に頭部ナットを取り付けたあと定着鉄筋を挿入する。本論文では、定着に用いるモルタルカプセルと母材コンクリートとの平均付着強度や、本工法を用いた部材の長期クリープ性状が既往の定着と同程度であることを実験により示した。

**キーワード：**頭部ナット付き鉄筋, 無機モルタルカプセル, 引抜実験, 付着性能, クリープ特性

## 1. はじめに

あと施工アンカーは主にせん断力の伝達を対象としており、引張力の伝達は可能ではあるものの、施工精度によってその強度が左右されるなど、信頼性に欠けるため用いられることは少ないのが現状である。また指定建築材料ではないため、耐震改修工事を除く新築物件や既存改修工事の躯体鉄筋に使用することはできない。本研究は地震力を負担しない二次部材を主な対象とし、既設 RC 部材へ引張力を負担する鉄筋を追加するための後施工タイプの工法を提案し、その定着性状を明らかにすることを目的としている。試験は、基本的な付着・定着性状を把握するための引抜実験、長期的性状を把握するための長期クリープ実験を行い、本工法の各種構造性能について検討した。

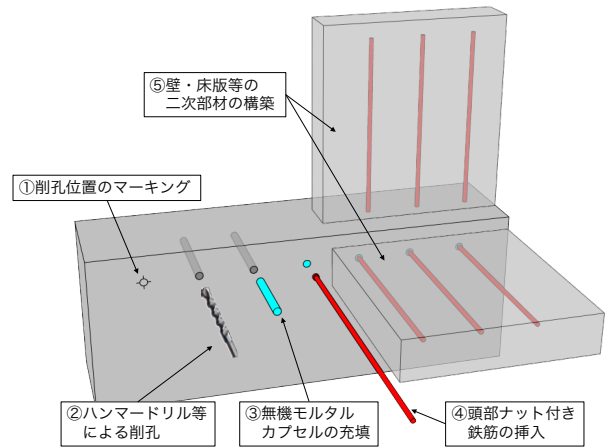


図-1 本工法の概要図

## 2. 工法概要

図-1に提案する工法の概要図を示す。本工法は、土木分野にて供用中のRC 部材片面から後施工にてせん断補強を行う工法りの技術を応用したものである。既設RC部材表面からハンマードリル等で削孔を行い、その孔内へ削孔径に対応する専用の無機モルタルカプセル (写真-1) をあらかじめ水中に2~5分程度浸漬したのち充填し、鉄筋の先端に頭部ナットを取り付けた「あと定着鉄筋(写真-2)」を挿入する。頭部ナットにはあと定着鉄筋の径に応じた形状規格がある (図-2)。モルタルカプセルが硬化することによりあと定着鉄筋と既設RC部材が一体化し、引張力の伝達を可能とする。既存改修工事・増設工事等での追加部材・追加補強が容易となり、効率化・迅速化が可能となる。

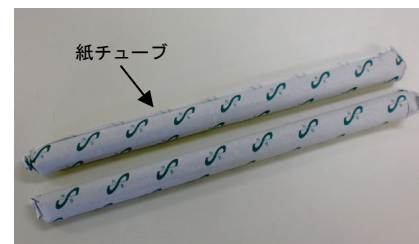


写真-1 無機モルタルカプセル



写真-2 あと定着鉄筋(左 : D13 用, 右 D16~25 用)

\*1 戸田建設(株) 技術開発センター (正会員)

\*2 戸田建設(株) 構造設計部

\*3 西松建設(株) 技術研究所 (正会員)

### 3. 引抜実験

#### 3.1 実験概要

表-1 に試験体一覧を、図-3 に試験体概要を示す。試験体は想定する実施工と同様に硬化したコンクリートスタブを削孔し、無機モルタルカプセルを充填した後にあと定着鉄筋を挿入した計 16 シリーズとし、その結果から引張力を受けるあと定着鉄筋の挙動について検討した。実験パラメータは、あと定着鉄筋の径、鋼種、定着長さ、スタブコンクリート強度、端あき寸法、あと定着筋の挿入方向とした。

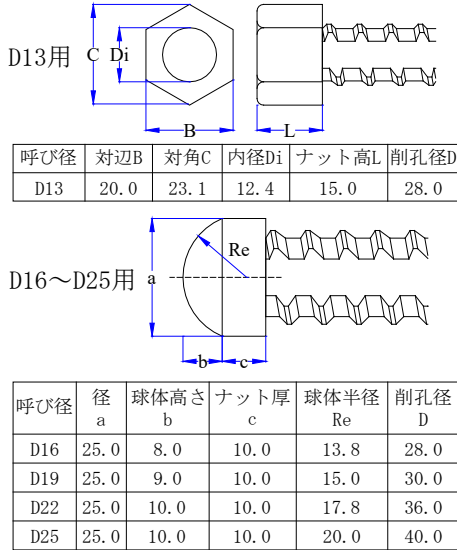


図-2 頭部ナット寸法詳細

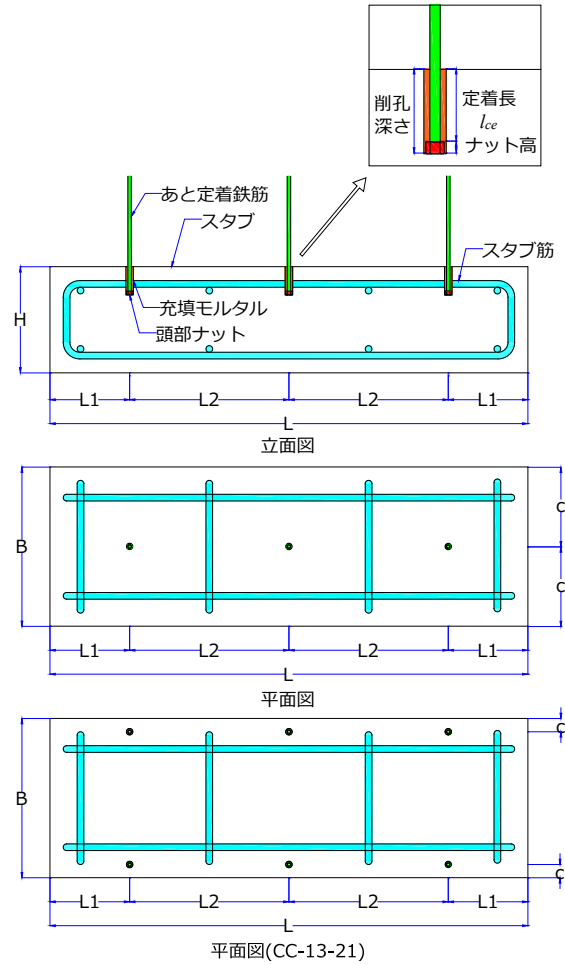


図-3 引抜試験体概要

表-1 引抜試験体パラメーター一覧

試験体	破壊モード	コンクリート設計基準強度 $F_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	充填モルタル設計圧縮強度 $mF_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	あと定着筋	定着長 $l_{ce}$	試験体数	B [mm]	L [mm]	L1 [mm]	L2 [mm]	H [mm]	c [mm]		
MA-13-21	MA	21	60	D13	$5d_b$	3	600	1800	300	600	400	300		
MA-13-21'						6								
MA-19-21				3		2000								
MA-19-21U													3	
MA-25-21				D25		$6d_b$							3	900
MA-13-36		36		60	D13	$5d_b$	3	600	1800	300			600	
MA-13-36'							6							
MA-19-36					3		2000							
MA-19-36U														3
MA-25-36					D25		$6d_b$							3
MA-25-36'	6													
CC-13-21	CC	21	60	D13	$5d_b$	6	600	1800	300	600	400	50		
CC-13-27						3								
CC-19-27		27		D19		3						2000	400	300
CC-25-27				D25		3						2710	455	
BY-19-27	BY			D19	$15d_b$	3	900	2710	515	840				

破壊モード MA : 充填モルタル—母材コンクリートの付着破壊, CC : 母材コンクリートのコーン破壊 BY : あと定着鉄筋の降伏

試験体名は(破壊モード)—(鉄筋径)—(コンクリート強度)となっている。末尾に'U'の付く試験体は上向きに、それ以外は下向きに鉄筋を打ち込んだ。

### 3.2 加力方法

図-4 に加力装置を示す。加力はコンクリートスタブ上に鉄骨で架台を組んだ自己反力型とし、センターホールジャッキによる一方方向の単調載荷とした。あと定着鉄筋が終局耐力に達するまで引張力を与え、ロードセルによって引張荷重、ひずみゲージによって鉄筋のひずみ、変位計によって鉄筋の抜け出し変位を計測した。充填モルタル—母材コンクリート界面の付着破壊を計画した試験体については、定着長が短く付着破壊よりも先行してコーン破壊を生じるおそれがあったため、スタブのコーン破壊領域を鋼板で拘束して付着破壊が先行するよう加力した。コーン破壊、もしくはあと定着鉄筋の降伏を計画した試験体については、コーン破壊領域を拘束しないよう、鉄骨架台の間隔を十分に確保して加力を行った。

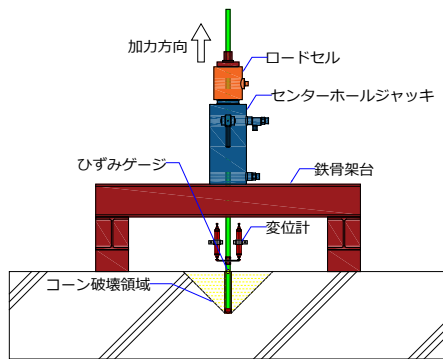


図-4 加力装置・計測概要図

### 3.3 破壊モードと耐力算定式

本工法は文献<sup>2)</sup>によると、頭付きアンカーと接着系アンカーを複合させた型抜きアンカーに相当する工法となるため、あと定着鉄筋に引張力が作用した際には図-5に示すような破壊を生じることが考えられる。これらの破壊に対する耐力は式(1)~(4)で求めた。

型抜きアンカーに相当する工法では頭部での支圧抵抗と鉄筋—充填モルタル界面の付着抵抗が複合的に作用することも考えられるが、本工法では頭部ナットでの支圧

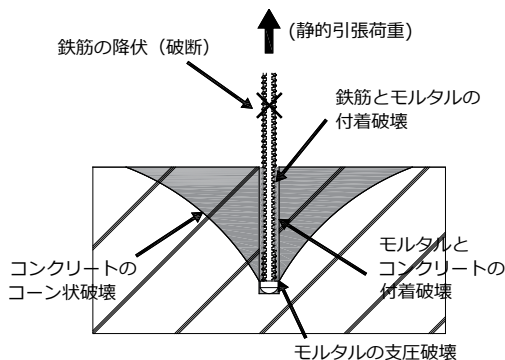


図-5 あと定着鉄筋の破壊モード

$$T_y = \sigma_y \cdot a_t \quad (1)$$

$$T_c = 2/3 \cdot 0.31 \sqrt{\sigma_B} \cdot A_c \quad (2)$$

$$T_a = \tau_a \cdot \pi \cdot D \cdot l_{ce} \quad (3)$$

$$T_b = \tau_b \cdot \pi \cdot d_b \cdot l_{ce} \quad (4)$$

$T_y$ : 鉄筋の降伏耐力  $T_c$ : 母材コンクリートのコーン破壊耐力

$T_a$ : 充填モルタル—母材コンクリートの付着破壊耐力

$T_b$ : 鉄筋—充填モルタルの付着破壊耐力

$\sigma_y$ : 鉄筋の降伏強度  $a_t$ : 鉄筋の断面積  $\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度

$A_c$ : コーン状破壊面の有効水平投影面積(=  $\pi \cdot l_{ce}(l_{ce}+D)$ )

$D$ : 削孔径  $l_{ce}$ : あと定着鉄筋の定着長

$\tau_a$ : 充填モルタル—コンクリート界面の引張力に対する基本平均付着強度 (=  $\alpha \sqrt{\sigma_B/21}$ )

$\tau_b$ : 鉄筋—充填モルタル界面の付着強度(=  $5 \sqrt{m \sigma_B/21}$ )

$m \sigma_B$ : 充填モルタル圧縮強度  $d_b$ : 鉄筋径

耐力  $T_f$  は算入せず、接着系アンカーと同様に鉄筋—充填モルタルの付着破壊耐力  $T_b$  のみを評価する。

しかしながら、付着力が固着した物体間のせん断抵抗に依存するのであれば、付着の破壊面は最も強度の低い物体によって決定されるため、本工法のように母材よりも強度の高い充填モルタル使用する工法では、 $T_a$  より先行して  $T_b$  で付着破壊面が決まることは少なく、文献<sup>2)</sup>内でもこの破壊面に対する耐力の算定は行われていない。ただし、削孔径が鉄筋径よりも 10~15mm 大きいため、 $T_a$  では削孔の周長を、 $T_b$  では鉄筋の周長を用いて付着面積を算定すると  $T_a$  は見かけ上大きな値となって表現される。よって、 $T_b$  の算定を省略した際に  $T_a > T_y > T_b$  となり鉄筋の降伏が保証されないことがないように、 $T_b$  についても検討することとした。

鉄筋—充填モルタル界面の付着強度  $\tau_b$  については、マシブなモルタルに埋め込まれた鉄筋に引張力が作用した際の単純な付着強度に関する知見は少ないものの、文献<sup>2)</sup>に示される無機系カプセルの基本平均付着強度  $\tau_{bavg} = 5 \sqrt{\sigma_B/21}$  が、様々な強度のコンクリートやモルタルに先付けされた鉄筋の付着強度を検証した文献<sup>3)~6)</sup>に示される付着強度の下限値を評価していることから、 $\tau_b = 5 \sqrt{m \sigma_B/21}$  とした。図-6 に文献による鉄筋の付着強度と定着材圧縮強度の関係を示す。

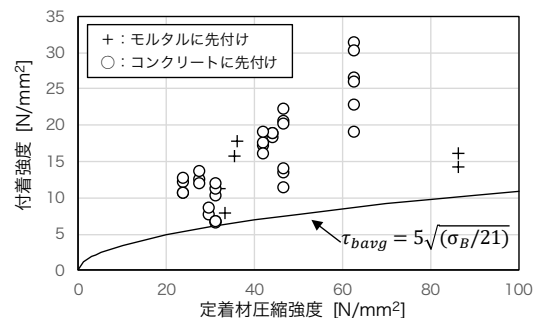


図-6 鉄筋の付着強度と定着材圧縮強度の関係

### 3.4 実験結果

#### 3.4.1 付着破壊型試験体の実験結果と評価

表-2 に付着破壊型試験体の実験結果を示す。表中の付着強度  $\tau$  は、最大荷重  $P_{max}$  を充填モルタル周囲の付着面積( $=\pi \cdot D \cdot l_{ce}$ )で除した値である。写真-3 より、実験では全ての MA シリーズにおいて付着破壊が充填モルタルとコンクリートの境界部にて生じていることを確認した。また、あと定着鉄筋の挿入方向による付着強度の差異は確認されなかった。

本工法による充填モルタル-コンクリート界面の付着性状は一般的な接着系アンカーと同様に、コンクリート孔壁の凹凸部と硬化した充填モルタルのせん断抵抗力に依存していると考えられるため、文献<sup>2)</sup>に従い、 $\sqrt{\sigma_B/21}$  に係数  $\alpha$  を乗じて基本平均付着強度  $\tau_a$  を求めることとした。ただし、今回の実験結果から求められた付着強度には母材コンクリート強度と相関する傾向が若干見られるもののバラツキが大きい。そこで実験結果から本工法の  $\alpha$  を統計的に評価するため、付着強度  $\tau$  を  $\sqrt{\sigma_B/21}$  で除した  $\alpha$  の実験値について、下式(5)より 11 シリーズ 41 体の結果を母集団とした 95%信頼値  $\alpha_{95\%}$  を求める。安全側の検討として  $\alpha_{95\%}$  は 95%信頼区間の下限側の値とすれば、 $\alpha_{95\%}=6.3$  と求められる。

$$\alpha_{95\%} = \bar{\alpha} - \frac{t \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

$\bar{\alpha}$  :  $\alpha$  実験値の標本平均  $\sigma$  : 標本標準偏差

$t$  : 自由度  $f(=n-1)$ , 信頼係数 95% に対する統計量 ( $t=2.021$ )

$n$  : 試験体数

図-7 に付着強度実験値  $\tau$  と付着強度計算値  $\tau_a$  の比較を示す。 $\tau_a$  は式上では鉄筋径に依存しないが、D13 を用いた試験体の付着強度が他の径に対して相対的に低い傾向が見られた。そのため D13 を用いた試験体に限れば、 $\alpha_{95\%}$  を用いて求めた  $\tau_a$  を下回る試験体が 18 体中 13 体となる。これより、安全側に評価するため  $\alpha$  は試験体全体による下限値 3.5 と定め、基本平均付着強度は  $\tau_a = 3.5\sqrt{\sigma_B/21}$  とした。

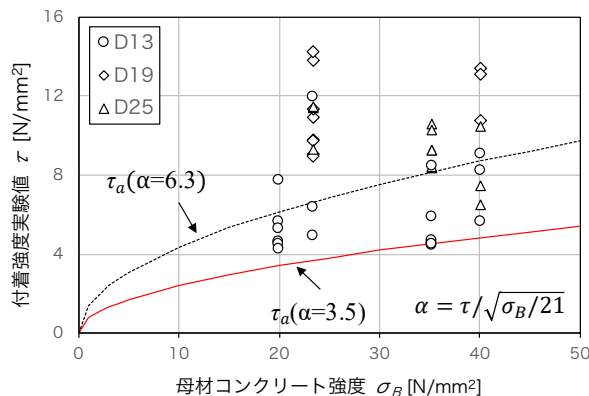


図-7 付着破壊型試験体の付着強度の比較

表-2 付着破壊型試験体の実験結果

試験体	実験結果		
	最大荷重 $P_{max}$ [kN]	付着強度 $\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	コンクリート 圧縮強度 $\sigma_B$ [N/mm <sup>2</sup> ]
MA-13-21	68.4	12.0	23.4
	28.1	4.9	
	36.4	6.4	
MA-13-21'	32.5	5.7	19.9
	30.2	5.3	
	44.4	7.8	
	24.3	4.2	
	26.4	4.6	
	25.9	4.5	
MA-19-21	-	-	-
	123.7	13.8	
	87.9	9.8	
MA-19-21U	97.8	10.9	23.4
	81.6	9.1	
	101.6	11.3	
	101.6	11.3	
MA-25-21	215.4	11.4	-
	216.1	11.5	
	175.5	9.3	
MA-13-36	51.8	9.1	40.1
	47.1	8.2	
	32.3	5.6	
MA-13-36'	26.1	4.6	35.2
	33.8	5.9	
	27.0	4.7	
	25.6	4.5	
	48.5	8.5	
	25.8	4.5	
MA-19-36	80.5	9.0	40.1
	87.5	9.8	
	127.7	14.3	
MA-19-36U	120.0	13.4	40.1
	117.5	13.1	
MA-25-36	96.6	10.8	-
	140.1	7.4	
	122.0	6.5	
MA-25-36'	197.5	10.5	35.2
	157.2	8.3	
	158.6	8.4	
	174.1	9.2	
	199.7	10.6	
	174.7	9.3	
	193.4	10.3	



MA-19-21U

MA-13-21'

写真-3 付着破壊の様子

### 3.4.2 コーン破壊型試験体の実験結果と評価

表-3 にコーン破壊型試験体の実験結果を示す。CC-13-21 試験体のコーン状破壊面の有効水平投影面積は端あきによる面積の減少を考慮した。実験では全ての CC シリーズにおいて写真-4 に示す母材コンクリート表面に円形の剥離が見られ、コーン破壊にて終局に達した。図-8 にコーン破壊型試験体の実験値  $P_{max}$  と計算値  $T_c$  の比較を示す。試験体の最大荷重は計算値耐力を全て上回っており、本工法のコーン破壊耐力が文献<sup>2)</sup>による接着系アンカーボルトの設計に準拠する式(2)で算定できることを確認した。

表-3 コーン破壊型試験体の実験結果

試験体	実験結果			計算値 コーン破壊耐力 $T_c$ [kN]
	最大荷重 $P_{max}$ [kN]	コンクリート 圧縮強度 $\sigma_B$ [N/mm <sup>2</sup> ]	有効水平投影面積 $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	
CC-13-21	29.9	23.4	15389	15.4
	30.8			
	43.4			
	24.6			
	25.9			
26.7				
CC-13-27	40.1	31.7	18991	22.1
	58.2			
	32.9			
CC-19-27	81.2	31.7	37306	43.4
	80.8			
	80.3			
CC-25-27	177.9	31.7	89535	104.2
	142.8			
	197.8			

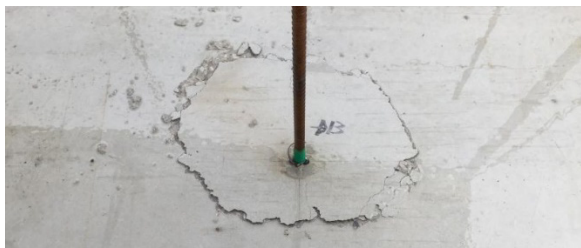


写真-4 コーン破壊の様子 (CC-13-27)

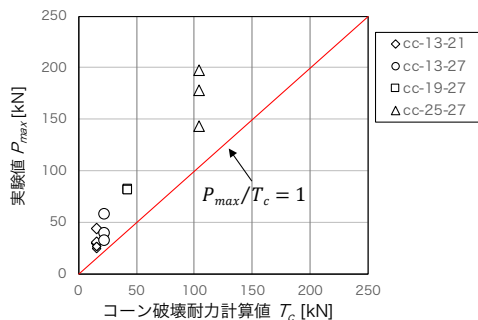


図-8 コーン破壊型試験体の最大荷重の比較

### 3.4.3 鉄筋降伏型試験体の実験結果と評価

表-4 に鉄筋降伏型試験体の実験結果を示す。BY-19-27 試験体は全て鉄筋の降伏により最大耐力が決まった。本工法ではSD295, もしくはSD345 鉄筋の使用を想定しており、引張力を確実に伝達させるため、定着部の損傷を許容せず、あと定着鉄筋の降伏、もしくは破断により終局に達するように設計する。BY-19-27 試験体では安全側の検討のため、鉄筋にSD490 を用いてSD345 の降伏強度の約1.4 倍に相当する引張荷重を加えた。また、定着長についても  $20d_b$  での使用を想定しているが、こちらも安全側の検討として  $20d_b$  より  $5d_b$  短い  $15d_b$  とした。この時、2.2.1 で定めた基本平均付着強度  $\tau_a$  を用いてBY-19-27 試験体の付着耐力  $T_a$  を求めると鉄筋の降伏耐力  $T_y$  を下回るため計算上付着破壊することになる。しかし、前述の通り BY-19-27 試験体は全て付着破壊せずに鉄筋が降伏している。これは  $\tau_a$  を付着破壊型試験体の下限値より定めているためであり、適切な定着長を設けることで  $\tau_a$  は十分安全率を含む数値になっていると考えられる。

表-5 にあと定着鉄筋をD19(SD345), 母材コンクリート強度を  $F_c21$ , 定着長を  $20d_b$  とした場合の各計算値耐力の比較を示す。降伏耐力の算定にはSD345 のF 値の1.1 倍( $\sigma_y=380$ [N/mm<sup>2</sup>])の値を用いた。降伏耐力に対する各計算値耐力の余裕度は1.0 以上あり、あと定着筋降伏型として設計することが十分可能と考えられる。

表-4 鉄筋降伏型試験体の実験結果

試験体	実験結果			計算値	
	最大荷重 $P_{max}$ [kN]	コンクリート 圧縮強度 $\sigma_B$ [N/mm <sup>2</sup> ]	鉄筋 降伏強度 $\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	鉄筋降伏耐力 $T_y$ [kN]	モルタル-コンクリート 付着破壊耐力 $T_a$ [kN]
BY-19-27	160.6	31.7	532	152.4	115.5
	159.6				
	169.0				

表-5 各耐力の試算結果一覧

定着筋: D19 $\sigma_y=380$ [N/mm <sup>2</sup> ] コンクリート: $F_c21$ モルタル: $mF_c60$ 定着長: $20d_b$	計算値			
	鉄筋降伏 耐力 $T_y$ [kN]	コーン破壊 耐力 $T_c$ [kN] ( $T_c/T_y$ )	モルタル-コンクリート 付着破壊耐力 $T_a$ [kN] ( $T_a/T_y$ )	鉄筋-モルタル 付着破壊耐力 $T_b$ [kN] ( $T_b/T_y$ )
	108.7	463.6 (4.26)	125.3 (1.15)	191.7 (1.76)

## 4. 長期クリープ実験

### 4.1 実験概要

表-6 に試験体の一覧を、図-9 に試験体図を示す。あと定着鉄筋の引張力に対する抜け出しについての長期性状を把握することを目的とし、引張鉄筋に本工法と既往の直線定着を用いた要素試験体に、それぞれ360 日にわたって引張力を長期に作用させた。鉄筋径はD13, D16 の2 種、コンクリート強度は  $F_c21$  とした。

表-6 長期クリープ試験体一覧

試験体名	cp13-1	cp13-2	cp16-1	cp16-2
$F_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	21 ( $\sigma_B=25.7$ N/mm <sup>2</sup> )			
スタブ直径 R [mm]	300			
スタブ高さ H [mm]	400	600	400	600
引張鉄筋	D13-SD295A ( $\sigma_y=399$ N/mm <sup>2</sup> )		D16-SD295A ( $\sigma_y=412$ N/mm <sup>2</sup> )	
定着長	あと定着	直線定着	あと定着	直線定着
	$20d_b$	$30d_b$	$20d_b$	$30d_b$

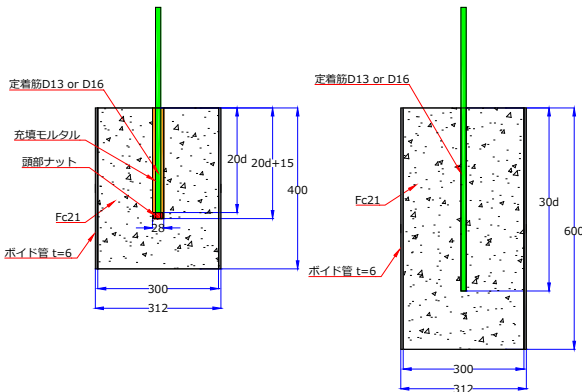


図-9 長期クリープ試験体

#### 4.2 加力方法

図-10に加力装置を示す。加力は試験体に設置したバネ式の加力治具へセンターホールジャッキによって初期の引張力を与え、その後はバネの反力によって鉄筋に一定の引張力を与え続けた。引張力は鉄筋の材料試験結果より、降伏荷重の2/3倍とした。変位計によって鉄筋の抜け出し変位を計測した。

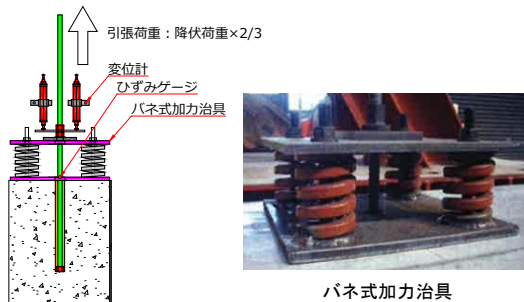


図-10 加力装置

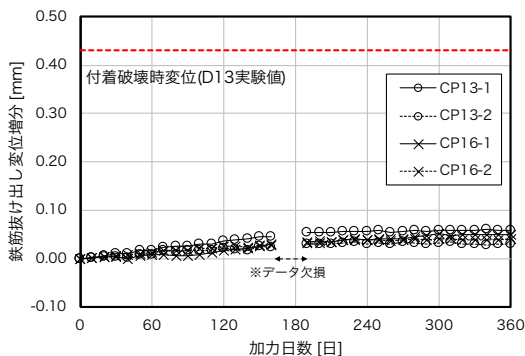


図-11 鉄筋の抜け出し変位増分の推移

#### 4.3 実験結果

図-11に載荷開始から360日までの鉄筋の抜け出し変位の増分（それぞれの計測値から載荷直後の初期の抜け出し変位を差し引いて算定）の推移を示す。図中の付着破壊変位（実験値）とは、前述のD13を用いた付着破壊型試験体の付着破壊時における抜け出し変位の平均値である。長期載荷による鉄筋の抜け出し変位の増分は、D13, D16のあと定着と直線定着ともに0.03~0.05mmであった。変位の増分は載荷開始から200日以降で頭打ちとなっており、付着破壊時の変位に対しても十分小さい。この結果より定着長 $20d_b$ を確保することで、あと定着鉄筋に長期の引張力を与えても既往の直線定着と同等の性能を発揮すると判断した。

#### 5. まとめ

あと定着鉄筋と無機モルタルカプセルを用いたあと定着型工法に関する引抜実験および長期クリープ実験により、以下の知見を得た。

- (1) 基本平均付着強度は $\tau_a = 3.5\sqrt{\sigma_B/21}$ とすることで、引抜実験による付着破壊耐力の下限値を評価することができる。
- (2) コーン破壊耐力は接着系アンカーボルトの設計に準拠して算定できることを確認した。
- (3) 想定する材料強度の範囲において定着長を $20d_b$ とすることで、引抜力が作用した場合の破壊モードはあと定着筋の降伏で決まる。
- (4) 要素試験体を用いた長期クリープ実験では、本工法と直線定着で抜け出し変位の増分が同程度であることを確認した。

#### 参考文献

- 1) 佐藤幸三, 藤浪亘, 西田徳行, 西見宣俊: あと施工せん断補強「サイトフィットネイリングバー (SNB)®」工法の開発, 西松建設技報, VOL.39, 2016
- 2) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針・同解説 2010
- 3) 太田周, 佐川康貴, 原田耕司, 西崎丈能: ジオポリマーモルタルと鉄筋の付着特性に関する基礎的研究, コンクリート工学, Vol.38, No.1, pp.2313-2318, 2016
- 4) 関根武, 吉田啓喜, 平野範彰, 平出亨, 池田捷也: コンクリート構造物の補修・補強に用いる特殊モルタルと鉄筋との付着強度に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 材料施工, pp.167-168, 1994.9
- 5) 高木憲三郎, 杉山智昭, 小野英雄, 渡辺英義: 小円形板を有する後挿入型定着工法の定着性能 その1 短い定着長の引張実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造IV, pp.41-42, 2015.9
- 6) 若林和義, 中村則清: 引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強さ試験方法におけるコンクリートの圧縮強度及び供試体の寸法についての検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 材料施工, pp.217-218, 2017.7