

あとから鉄筋工法の開発

頭部ナット付き鉄筋と無機モルタルカプセルによる後定着型工法の付着性状に関する実験的研究

DEVELOPMENT OF “POST-INSTALLED REBAR METHOD”

Experimental study of adhesion behavior of post installation type method with head nut rebar and inorganic mortar capsule

西村 英一郎*¹, 竹中 啓之*², 石坂 隆幸*³

Eiichirou NISHIMURA, Hiroyuki TAKENAKA and Takayuki ISHIZAKA

Post installation anchors are used mainly to transmit shear force. Though it is possible to transmit tensile force, it is seldom used because its strength is affected by construction accuracy. In addition, since it is not a designated building material, it cannot be used as tension rebar in new or renovated buildings except for aseismic reinforcement work. “Post installation rebar method” is a post installation type method developed to add tension rebars to RC members. This method applies the technology that has been put into practical use in the civil engineering field as a method to provide shear reinforcement to structures in the construction field. In this study, to clarify its structural performance, the authors carried out extraction tests of post installation rebars and examined the average adhesion strength between mortar capsule and concrete and obtained the following information.

1. There is a linear relationship between the diameter of a rebar and the bond strength α , which can be expressed as $\alpha = -0.23d_b + 9.8$.
2. It was confirmed that the failure mode when the tensile force acts on the rebar becomes yield of the rebar by securing the anchorage length of $20d_b$.

Keywords : Adhesion behavior, Head nut rebar, Inorganic mortar capsule, Pull-out tests

付着性状, 頭部ナット付き鉄筋, 無機モルタルカプセル, 引抜試験

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。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。既存改修工事で壁や床を新たに設けるような場合には、既存躯体を研り、鉄筋を配筋した後に再度コンクリートを打設するなど、手間のかかる施工しているのが現状である。筆者らは西松建設(株)と共同で、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が追加可能な後施工タイプの「あとから鉄筋工法」を開発した。本研究は、このあとから鉄筋工法によって定着された鉄筋の引抜試験を行い、基本的な付着・定着性状を明らかにすることを目的としている。

2. 工法概要

図 1 にあとから鉄筋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「SNB 工法¹⁾」の技術を応用したものである。硬化している既設 RC 部材表面へ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(表 1)。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、引張力の伝達が可能となる。在来工法のように新たな鉄筋を追加するために既設 RC 部材を研る必要がないため、既存改修工事・増設工事等でより効率的で生産性の高い施工を実現するほか、粉塵や騒音を最小限に留めることができ、「持続可能な開発目標 (SDGs)」の達成にも貢献する工法となっている。

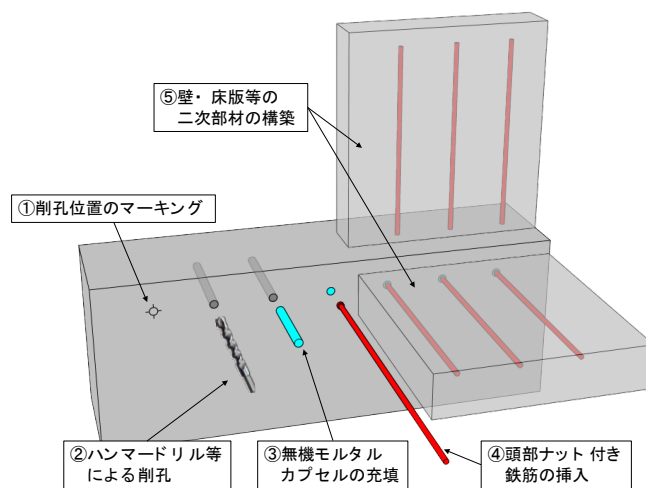


図 1 あとから鉄筋工法概要図

*1 戸田建設株式会社技術開発センター 修士 (工学)

*2 戸田建設株式会社技術開発センター 博士 (工学)

*3 戸田建設株式会社構造設計部 修士 (工学)

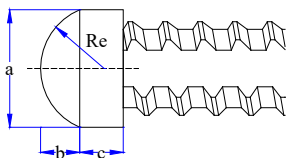
Technology Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

Technology Development Center, TODA CORPORATION, Dr.Eng.

Structural Design Division, TODA CORPORATION, M.Eng.

表1 頭部ナット寸法詳細

呼び名	径 a	球体高さ b	ナット厚 c	球体半径 Re	削孔径 D
D13	19	7	10	19.9	22
D16	25	8	10	13.8	28
D19	27	9	10	15.0	30
D22	32	10	10	17.8	36
D25	35	10	10	20.0	40



単位: mm

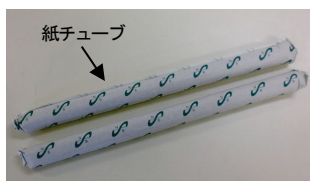


写真1 無機モルタルカプセル

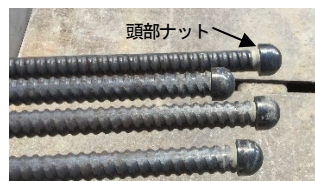


写真2 あと定着鉄筋

3. あと定着鉄筋の引抜試験

3.1 実験概要

表2に試験体一覧、図2に試験体図の一例を示す。試験体は想定する実施工と同様に、硬化した母材となる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13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、スタブコンクリートの強度、へりあき寸法、あと定着鉄筋の挿入方向とした。なお、鉄筋降伏型試験体以外の鉄筋にはUSD685と980級の2種類が混在しているが、これは製作期間が異

なる試験体間で入手できた材料の違いによるもので、基本的にはどちらも設定した破壊モードに達する前に鉄筋が降伏しないために用いた高強度鉄筋である。スタブには主に割れ止めのためのスタブ筋が配筋されているが、3.2、3.3節で後述するあと定着鉄筋のコーン破壊領域を拘束しないように配置されている。スタブのコンクリート強度は、本工法が想定する母材の材料強度である $F_{21\sim36}$ の間で設定した。モルタルカプセルはそれぞれの鉄筋径に対応する径と長さを持つが、中身は全て細砂とセメントを主成分とする同一のモルタルである。

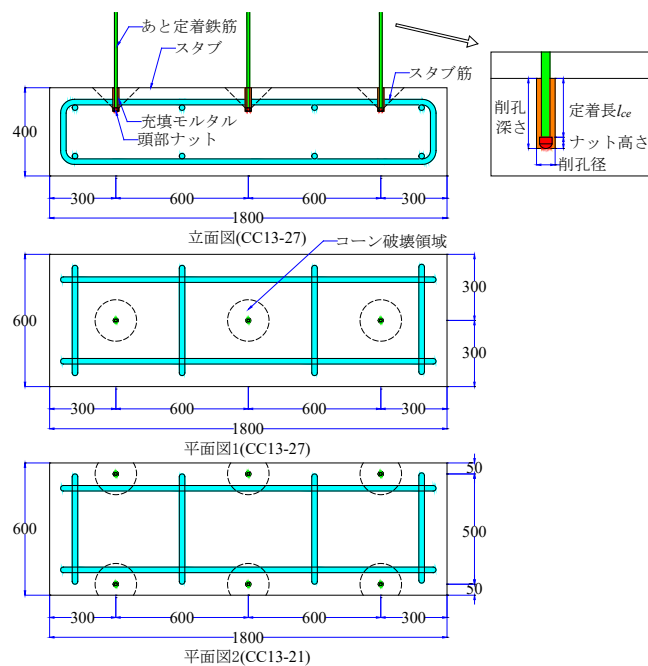


図2 試験体図の一例

表2 試験体一覧

試験体名	試験体数 n [本]	あと定着鉄筋			スタブ		充填モルタル 設計基準強度 mF_c [N/mm ²]	挿入方向		
		呼び名	鋼種	定着長 l_e (d_b : 鉄筋径) [mm]	設計基準強度 F_c [N/mm ²]	へりあき				
MA13-21	5	D13	USD685	65 ($5d_b$)	21	大	60	下向き		
MA13-21'	5			130 ($10d_b$)						
MA13-36	5			65 ($5d_b$)					36	
MA19-21	4	D19	980級*	95 ($5d_b$)	21	大		60	上向き	
MA19-21U	3								36	下向き
MA19-36	3									
MA19-36U	3								21	36
MA25-21	4	D25	980級*	150 ($6d_b$)	21	36		下向き		
MA25-36	9								21	36
CC13-21	6	D13	980級*	65 ($5d_b$)	21	36	大	下向き		
CC13-27	3								27	95 ($5d_b$)
CC19-27	3	D19	980級*	150 ($6d_b$)	21	36				
CC25-27	3						D25		980級*	150 ($6d_b$)
BY13-21	4	D13	SD295A	260 ($20d_b$)	21	大				

試験体名は(破壊モード)-(鉄筋径)-(母材コンクリート強度)となっている。末尾に'U'の付く試験体はスタブに対して上向きに、それ以外は下向きに鉄筋を打ち込んだ。

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

*980級とはSD390材を熱処理して $\sigma_t=980$ [N/mm²]相当まで強度を高めた鉄筋である。

3.2 加力方法

図3に加力装置、および計測概要図を示す。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向の単調载荷とした。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。

3.3 破壊モードと耐力算定式

本工法は文献2)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。あと定着鉄筋に引張力が作用した際に想定される破壊モードとしては、図4に示す4つの破壊が考えられる。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ナットによる支圧抵抗と鉄筋-充填モルタル界面の付着抵抗が複合的に作用することが考えられるが、本工法では簡単のため、鉄筋-充填モルタルの付着破壊耐力 T_b が頭部ナットによる支圧耐力を含むものとして評価した。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、充填モルタル-コンクリート界面より先行して鉄筋-充填モルタル界面で付着破壊が生じることは少なく、文献2)内でもこの破壊面に対する T_b の算定は行われていない。ただし、本工法では頭部ナットの存在により削孔径が鉄筋径よりも 10~15mm 程度大きい。そのため、 T_a 算定時には削孔径、 T_b 算定時には鉄筋の周長を用いて付着面積を求め、これに平均付着強度を乗じて付着耐力を求めた場合、削孔径と鉄筋径の比率によっては、 $T_a > T_b$ となるおそれがある。また、設計時に T_b の算定を省略した際に $T_a > T_y > T_b$ となり、あと定着鉄筋の降伏が保証されないことがないよう、 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 τ_b については、マッシュパ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2)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3)~6)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5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。

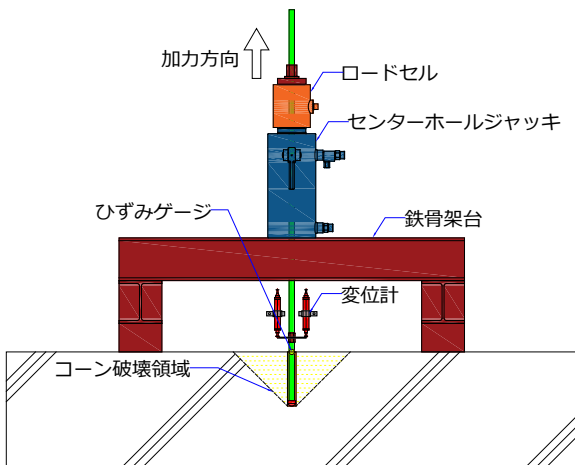


図3 加力装置・計測概要図

$$T_y = \sigma_y \cdot a_t \tag{1}$$

$$T_c = 2/3 \cdot 0.31\sqrt{\sigma_B} \cdot A_c \tag{2}$$

$$T_a = \tau_a \cdot \pi \cdot D \cdot l_{ce} \tag{3}$$

$$T_b = \tau_b \cdot \pi \cdot d_b \cdot l_{ce} \tag{4}$$

T_y : あと定着鉄筋の降伏耐力

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-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

σ_y : あと定着鉄筋の降伏強度, a_t : あと定着鉄筋の断面積

σ_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

τ_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(= $\alpha\sqrt{\sigma_B/21}$)

τ_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

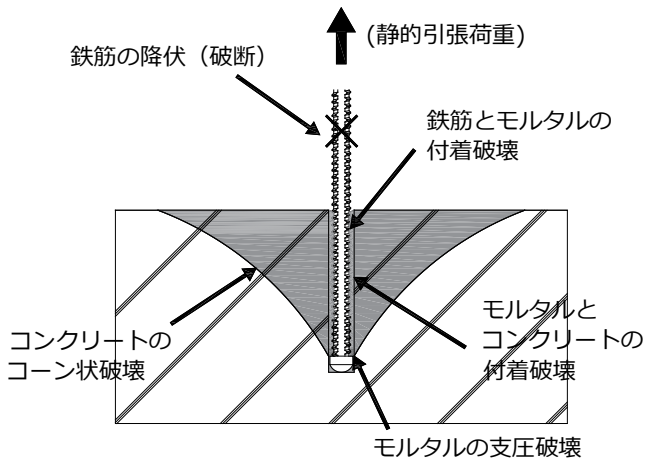


図4 あと定着鉄筋の破壊モード

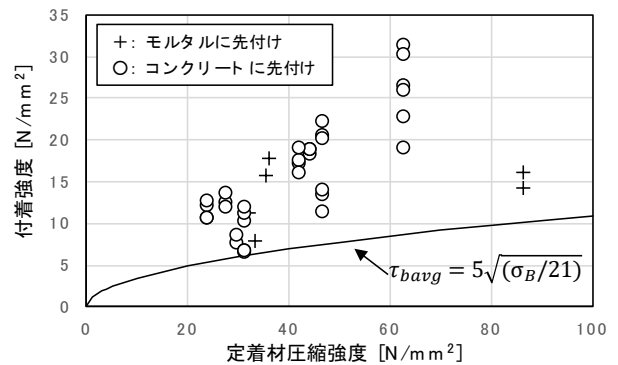


図5 鉄筋の付着強度と定着材圧縮強度の関係

3.4 実験結果

3.4.1 付着破壊型試験体の実験結果と耐力評価

表3に付着破壊型試験体の実験結果を示す。表中の付着強度 τ 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に加力後に引き抜いた鉄筋の例を示すが、実験ではMA13-21'で鉄筋が降伏した1本(表3中網掛け)を除き、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²⁾に従い、 $\sqrt{\sigma_B/21}$ に係数 α を乗じて基本平均付着強度 τ_a を求めることとした。実験による付着強度にはバラツキが見られたため、 α の実験値 α_{exp} の確率分布を正規分布でモデル化し、鉄筋径ごとの α_{exp} の95%信頼値 $\alpha_{95\%}$ を求める。 $\alpha_{95\%}$ は正規分布が描く面積を1とした時、左裾の面積(=危険側となる不良率)が2.5%になる時の α とする。 α_{exp} は以下の式(5)によって実験値 P_{max} から求めた。

$$\alpha_{exp} = \frac{\tau_{max}}{\sqrt{\sigma_B/21}} = \frac{P_{max}/(\pi \cdot D \cdot l_{ce})}{\sqrt{\sigma_B/21}} \quad (5)$$

図6に鉄筋径ごとの付着強度の確率分布を示す。縦軸は頻度、横軸は α_{exp} である。鉄筋が太径になるほど α_{exp} のピーク、および $\alpha_{95\%}$ が小さくなる傾向が見られた。これは削孔径と定着長が鉄筋径に比例して増大することから、鉄筋径と α の関係を以下の式(6)~(9)として表現できるためと説明できる。

$$D \propto d_b \rightarrow D = m \cdot d_b \quad (6)$$

$$l_{ce} \propto d_b \rightarrow l_{ce} = n \cdot d_b \quad (7)$$

$$A = \pi \cdot D \cdot l_{ce} = \pi \cdot m \cdot n \cdot d_b^2 \quad (8)$$

$$\tau_a = \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi \cdot m \cdot n \cdot d_b^2} \rightarrow \alpha = k \cdot \frac{1}{d_b^2} \quad (9)$$

k, m, n : 定数

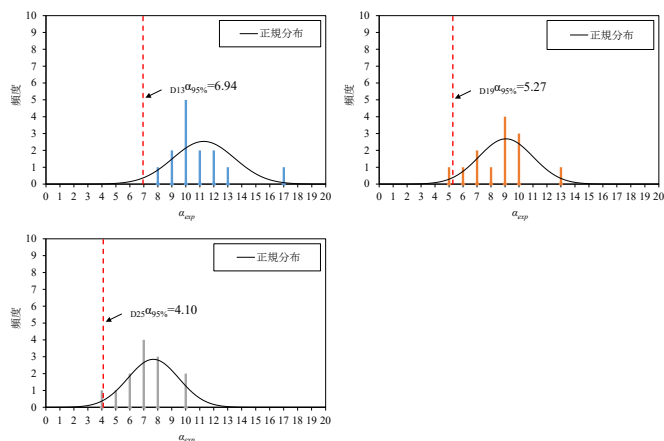
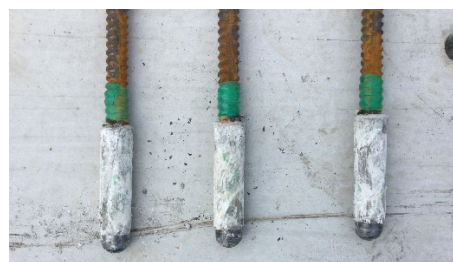


図6 付着破壊型試験体の付着強度の比較

表3 付着破壊型試験体の実験結果

試験体	実験結果			α_{exp}	
	最大荷重 P_{max} [kN]	付着強度 τ_{max} [N/mm ²]	コンクリート 圧縮強度 σ_B [N/mm ²]		
MA13-21	48.4	10.8	20.0	11.0	
	51.1	11.4		11.7	
	45.7	10.2		10.4	
	54.3	12.1		12.4	
	76.0	16.9		17.3	
MA13-21'	95.2	10.6		10.9	
	91.1	10.1		10.4	
	93.8	10.4		10.7	
	97.0	10.8		11.1	
	90.8	10.1		10.4	
MA13-36	51.0	11.3	34.6	8.8	
	69.5	15.5		12.1	
	78.7	17.5		13.7	
	52.1	11.6		9.0	
	52.2	11.6		9.1	
MA19-21	56.0	6.3	23.4	5.9	
	123.7	13.8		13.1	
	87.9	9.8		9.3	
	83.3	9.3	22.2	9.3	
MA19-21U	97.8	10.9	23.4	10.3	
	81.6	9.1		8.6	
	101.6	11.3		10.7	
MA19-36	80.5	9.0	40.1	6.5	
	87.5	9.8		7.1	
	127.7	14.3		10.3	
MA19-36U	120.0	13.4		9.7	
	117.5	13.1		9.5	
MA19-36U	96.6	10.8		7.8	
	215.4	11.4	23.4	10.8	
	216.1	11.5		10.9	
	175.5	9.3		8.8	
MA25-21	135.0	8.6	22.2	8.4	
	140.1	7.4	40.1	5.4	
	122.0	6.5		4.7	
	197.5	10.5		7.6	
	157.2	8.3	6.4		
	MA25-36	158.6	8.4	35.2	6.5
		174.1	9.2		7.1
		199.7	10.6		8.2
		174.7	9.3		7.2
		193.4	10.3		7.9



3 付着破壊後に引き抜いた鉄筋の様子 (MA19-36)

また、図 7 に示すように縦軸に $\alpha_{95\%}$ 、横軸に鉄筋径を取ると、D13～D25 の $\alpha_{95\%}$ には、およそ線形の関係が見られた。先述の通り α は鉄筋径の二乗に反比例するため、微小な d_b の区間では鉄筋径と α の関係を直線に近似できると考えられる。この時、近似線から $\alpha = -0.23d_b + 9.8$ という関係が得られた。

3.4.2 コーン破壊型試験体の実験結果と耐力評価

表 4、および図 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。スタブの際にあと定着鉄筋を打ち込んでへりあきを小さくした CC13-21 の T_c については、へりあきに応じてコーン状破壊面の有効水平投影面積 A_c を減じている。へりあきを十分確保している場合、へりあきが小さい場合、いずれについても、あと定着鉄筋のコーン破壊に対する耐力は接着系アンカーボルトの設計に準拠して求めることで、試験体最大耐力の下限値を評価できることを確認した。

3.4.3 鉄筋降伏型試験体の実験結果と耐力評価

表 5 に鉄筋降伏型試験体の実験値 P_{max} と計算値 T_y の比較を示す。BY13-21 試験体は全てあと定着鉄筋が降伏し、 P_{max} はあと定着鉄筋降伏時の耐力としている。定着長を $20d_b$ 確保することで、引張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ことを確認した。

4. まとめ

頭部ナット付き鉄筋と無機モルタルカプセルを用いた後定着型工法に関する引抜試験により、以下の知見を得た。

- 1) 鉄筋径と付着強度に関する係数 α にはおよそ線形の関係が見られ、 $\alpha = -0.23d_b + 9.8$ と表すことができる。
- 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) 定着長を $20d_b$ 確保することで、引張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ことを確認した。

謝辞

共同研究者である西松建設(株)の飯塚信一氏、金川基氏、山崎康雄氏には、実験の計画・実施にご協力していただくと共に、SNB®工法に関する貴重なデータを提供していただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 佐藤 他「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 他「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」, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, pp.2313-2318, 2016
- 4) 関根 他「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, 材料施工, pp.167-168, 1994.9
- 5) 高木 他「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, 構造IV, pp.41-42, 2015.9
- 6) 若林 他「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, 材料施工, pp.217-218, 2017.7

表 4 コーン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]	耐力計算値 T_c [kN]	コンクリート圧縮強度 σ_B [N/mm ²]	P_{max}/T_c
CC13-21	29.9	15.4	23.4	2.82
	30.8			1.94
	24.6			2.00
	25.9			1.60
	26.7			1.68
	43.4			1.73
CC13-27	40.1	22.1	31.7	1.81
	58.2			2.63
	32.9			1.49
CC19-27	81.2	43.4	31.7	1.87
	80.8			1.86
	80.3			1.85
CC25-27	177.9	104.2	31.7	1.71
	142.8			1.37
	197.8			1.90

表 5 鉄筋降伏型試験体の実験結果

試験体	実験結果			
	最大荷重 P_{max} [kN]	耐力計算値 T_y [kN]	降伏強度 σ_y [N/mm ²]	コンクリート圧縮強度 σ_B [N/mm ²]
BY13-21	45.7	43.6	344	23.4
	47.1			
	47.3			
	47.1			

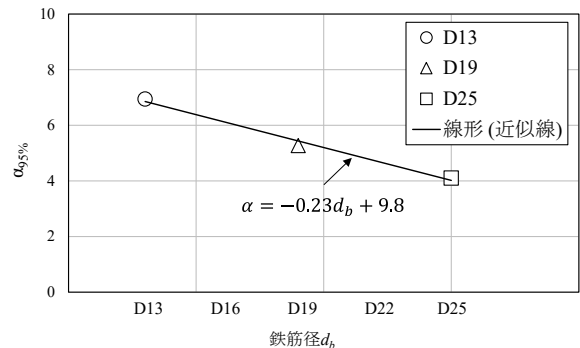


図 7 鉄筋径と α の関係

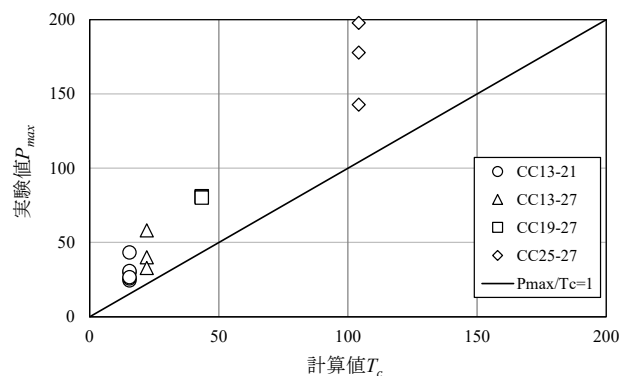


図 8 コーン破壊型試験体の実験値と計算値の比較