

技術報告

接着系あと施工アンカーを用いた鉄骨部材の接続方法の開発

Development of a Connection Method for Steel-members using Post-installed Adhesive Anchors

香田 伸次^{*1}、横山 一智^{*2}、山野辺 宏治^{*3}、澤口 香織^{*4}、西尾 淳^{*5}、中川 晴日^{*6}、遠竹 泉美^{*7}

1. はじめに

1.1 背景

2006年2月28日の国土交通省告示第1024号の一部改正により、耐震改修促進法に基づく耐震改修工事において、既存鉄筋コンクリート造（以下、RC造）等の部材とこれを補強するための部材の接合にあと施工アンカーの使用が可能となった。なお、従来から設備機器や設備配管の固定にはあと施工アンカーが用いられている。

しかし、社会的に、より幅広い目的であと施工アンカーを使用したいという強い要望があり、建築基準法整備促進事業等によるあと施工アンカーに関する調査・研究が行われた。その成果をまとめ、2022年3月31日に国土交通省告示第1024号の一部改正（令和4年国土交通省告示第413号）が行われた。この改正により、従来の既存建築物の補強に限定されず、鉄筋コンクリート造等の部材と構造耐力上主要な部材の接合にあと施工アンカーが使用でき、新築や増改築にも適用可能となった。

1.2 開発目的

改修工事や新築工事において、精度確保や生産性向上、設計変更対応またはデザイン性の高い部位等にあと施工アンカーを使用したいというニーズが高い。これらのニーズに応えることを目的として、長期荷重が作用する鉄骨部材とRC造・鉄骨鉄筋コンクリート造（以下、SRC造）の躯体を接合するために用いる接着系あと施工アンカーを開発した。

1.3 強度指定

強度指定を受けるには、図-1に示すように、あと施工アンカー単体の申請と構造部材の申請が必要である¹⁾。

本工法においては、単体の申請は日本ヒルティ株式会社が（一財）日本建築センターにて性能評定書を取得し、構造部材の申請は清水建設株式会社が（一財）日本建築総合試験所にて構造性能評定書を取得した。この2つの性能評定書をもって、2024年10月10日に接着系あと施工アンカーを用いた鉄骨部材の接続方法に関する強度指定を取得した。

本報告では、本工法の概要、設計方法、および強度指定取得のために実施した短期・長期載荷実験、施工性確認実験の結果および適用実績と効果について述べる。

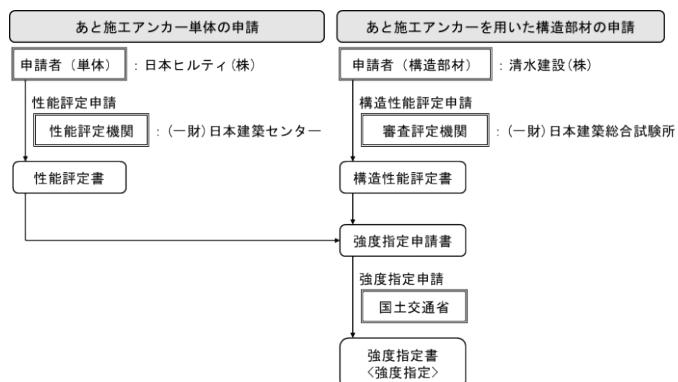


図-1 強度指定を受けるためのフロー

*1 KODA Shinji : 清水建設株式会社 生産技術本部

*2 YOKOYAMA Kazutomo : 清水建設株式会社 設計本部

*3 YAMANOBE Koji : 清水建設株式会社 技術研究所 建設基盤技術センター

*4 SAWAGUCHI Kaori : 清水建設株式会社 技術研究所 架構技術グループ

*5 NISHIO Atsushi : 清水建設株式会社 生産技術本部 生産計画部 構造エンジニアリンググループ

*6 NAKAGAWA Haruhi : 清水建設株式会社 技術研究所 架構技術グループ

*7 TOTAKE Izumi : 清水建設株式会社 生産技術本部 建築技術部 躯体グループ

2. 工法概要

2.1 接着系あと施工アンカーを用いる構造部材

本工法により支持される部材は鉄骨造の片持ち支持部材または両端単純支持部材である(図-2)。必ずしも水平に配置される小梁のみを対象とするものではなく、間柱や吊り材と称される垂直に配置される部材も対象としている。なお、地震や暴風などによる短期荷重を積極的に負担する構造部材には原則として適用しない。

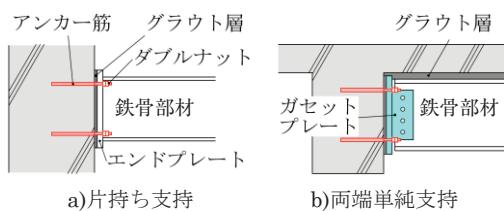


図-2 接着系あと施工アンカーを用いる構造部材

本工法に適用する鉄骨部材の材料は、原則として鋼構造許容応力度設計規準²⁾の「4.1 材質」に規定される鋼材とする。グラウトは、アンカー筋を固着する構造部材(以下、「母材」と記載する)のコンクリート強度以上の無収縮モルタルとする。

2.2 適用建築物に関する条件

適用建築物が新築または既存のどちらにおいても、その規模、構造種別、用途に対して特に制限を設けない。ただし、いずれにおいても、本工法による部材の追加およびこれによる面積や荷重の増加等に対して、建築基準法および関連法規の規定を満足させる必要がある。

2.3 アンカー筋を固着する母材の条件

母材は、RC造・SRC造の梁・柱(柱梁接合部を含む)・壁とする。母材コンクリートの仕様は、後述『2.5⑤』による。また、母材内の鉄筋・鋼材は、建築物建設時の規定による。

なお、アンカー筋は、これを固着する母材が大地震時等により塑性化すると予想され、ひび割れが進展することで、付着性能が低下する可能性がある領域には施工しない。

2.4 施工時及び施工後の環境条件と対策

本工法におけるあと施工アンカーの施工時および施工後の環境条件と対策は以下のとおりである。

- ・温湿度の変動が大きくならないよう適切に養生を行う。
- ・接着剤硬化後にその劣化を促す環境条件が発生しないよう、適切な対策を施す。
- ・耐火建築物に適用する場合には、耐火時間などの実情

を勘案し、適切な温度上昇対策を施す。

2.5 単体申請の条件

本工法では、日本ヒルティ株式会社による単体申請において性能評価された接着系注入方式アンカーを使用する。仕様は以下のとおりである。

①性能評定番号 BCJ評定-SS0059-01

②評定取得年月日および有効期間

令和5年12月15日取得

(令和10年12月14日まで有効)

③あと施工アンカーの分類(注入方式)

カートリッジ型ミキシングノズル式(エポキシ樹脂系)

④基準付着強度 15 N/mm^2

⑤適用範囲

・穿孔方法 : ヒルティ式ハンマードリル
(吸塵機能付)

・母材 : 普通コンクリート
 $18 \leq F \leq 36 \text{ N/mm}^2$

・アンカー筋種類 : 異形棒鋼(JIS G 3112)

・アンカー筋種別 : SD295, SD345

・アンカー筋径 : D10~D25

・有効埋込み長さ : $7d_a \sim 20d_a$ かつ500mm以下
(d_a : アンカー筋径)

・施工の向き : 下向き、横向きおよび上向き

⑥環境条件

・屋外使用の可否 : 可。ただし原則は屋内使用

・施工時温度 $5 \sim 35^\circ\text{C}$

・硬化後温度 $5 \sim 40^\circ\text{C}$

3. 設計方法

3.1 許容応力度

(1) 母材コンクリートの許容応力度

鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説³⁾による。なお、適用対象が既存建築物であり、設計条件等が不明な場合には、アンカー筋埋込み部近傍より採取したコンクリートコアの圧縮強度試験結果にて強度の推定を行う。推定法は接着系あと施工アンカー強度指定申請ガイドライン¹⁾の記載による。

(2) あと施工アンカーの許容応力度

あと施工アンカーの許容応力度は、表-1による。表中の F_{safe} は、接着系あと施工アンカーの許容応力度および材料強度を設定するための安全率で、次式により算出する。

表-1 あと施工アンカーの許容応力度 (N/mm²)

1) 引張を受けるあと施工アンカーの許容応力度

断面の位置	記号	長期	短期
アンカー筋の断面	$b f_t$	$\frac{\sigma_y}{1.5}$	σ_y
コーン状破壊を生じる コンクリートの断面	$c f_t$	$\frac{0.23\sqrt{F}}{3F_{safe}}$	$\frac{0.23\sqrt{F}}{1.5F_{safe}}$
付着破壊を生じる コンクリートの断面	τ_{bavg}	$\frac{15\sqrt{\frac{F}{21}}}{3F_{safe}}$	$\frac{15\sqrt{\frac{F}{21}}}{1.5F_{safe}}$

2) せん断を受けるあと施工アンカーの許容応力度

断面の位置	記号	長期	短期
アンカー筋の断面	$b f_s$	$\frac{\sigma_y}{1.5\sqrt{3}}$	$\frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$
支圧破壊を生じる アンカー筋の断面	$c f_q$	$\frac{0.4\sqrt{E_c \cdot F}}{3F_{safe}}$ ただし、 $500 \leq \sqrt{E_c \cdot F} \leq 900$	$\frac{0.4\sqrt{E_c \cdot F}}{1.5F_{safe}}$ ただし、 $500 \leq \sqrt{E_c \cdot F} \leq 900$
コーン状破壊を生じる コンクリートの断面	$c f_t$	$\frac{0.23\sqrt{F}}{3F_{safe}}$	$\frac{0.23\sqrt{F}}{1.5F_{safe}}$

〔記号〕 σ_y : アンカー筋の規格降伏点 (N/mm²) F : 母材コンクリートの圧縮強度 (N/mm²) E_c : 母材コンクリートの静弾性係数 (N/mm²)

$$F_{safe} = a_1 \times a_2 \times a_3 \times a_4 = 1.5 \quad (1)$$

 a_1 : 材料係数 (設計に用いる母材の圧縮強度 σ_B の設定の信頼性に関する低減係数の逆数) (≥ 1.0) a_2 : ひび割れ係数 (施工後の外力によるひび割れ発生による低減係数の逆数) (≥ 1.5) a_3 : 施工係数 (施工の難易度、施工品質による低減係数の逆数) (≥ 1.0) a_4 : 設計係数 (あと施工アンカーに生じる応力の算定精度による低減係数の逆数) (= 1.0)

本工法は、あと施工アンカーを母材の塑性化が想定される部位に施工しないこと、施工指針に示す方法でアンカー筋設置位置に有害なひび割れや豆板等の不具合の有無(存在する場合は十分に補修する)を必ず確認することから、 $a_1 = a_3 = a_4 = 1.0$ 、 $a_2 = 1.5$ とした。

3.2 接着系あと施工アンカーの設計

(1) アンカー筋に作用する設計用引張力とせん断力

接着系あと施工アンカーに作用する引張力とせん断力は、ベースプレート底面(ベースプレートと無取縮モルタルとの界面)に作用する曲げモーメントとせん断力とから算定する。なお、単純支持梁のベースプレート下面の設計用曲げモーメントは、材端のせん断力 Q (図-3)

を用いてベースプレート底面における曲げモーメントを次式により算定する。

$$M = Q \times e_{mq} \quad (2)$$

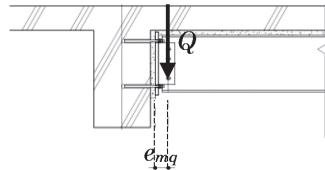


図-3 単純支持部材端部の設計用曲げモーメント

(2) アンカー筋およびコンクリートに生じる各種応力

ベースプレート底面の応力分布は、鋼構造許容応力度設計規準²⁾の「17.2 露出柱脚」に従い算出する。

(3) アンカー筋の許容引張力 p_a

あと施工アンカー1本当たりの許容引張力 p_a は、

$$p_a = \min (p_{a1}, p_{a2}, p_{a3}) \quad (3)$$

$$p_{a1} = b f_s \cdot s_c a \quad (4)$$

$$p_{a2} = c f_t \cdot A_c \quad (5)$$

$$p_{a3} = \tau_a \cdot \pi \cdot d_a \cdot l_e \quad (6)$$

ここに、

 $b f_t, c f_t$: 表-1.1) に示す許容応力度 $s_c a$: アンカー筋のねじ部有効断面積 A_c : コーン状破壊の有効水平投影面積 τ_a : へりあきおよびアンカー筋のピッチを考慮した接着系アンカー筋の引張力に対する付着強度で次式による。

$$\tau_a = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \tau_{bavg} \quad (7)$$

a_1, a_2, a_3 : へりあきおよびアンカー筋のピッチによる付着強度の低減係数。各種合成構造設計指針・同解説⁴⁾「第4編 6.1 接着系アンカー・A種の設計」による。

 τ_{bavg} : 表-1.1) に示す付着に関する許容応力度 d_a : アンカー筋(異形棒鋼)の呼び径 l_e : アンカー筋の有効埋め込み長さ(4) アンカー筋の許容せん断力 q_a

あと施工アンカー1本当たりの許容せん断力 q_a は、

$$q_a = \min (q_{a1}, q_{a2}, q_{a3}) \quad (8)$$

$$q_{a1} = b f_s \cdot s_c a \quad (9)$$

$$q_{a2} = c f_q \cdot s_c a \quad (10)$$

$$q_{a3} = c f_t \cdot A_{qc} \quad (11)$$

ここに、

 $b f_s, c f_q, c f_t$: 表-1.2) に示す許容応力度 A_{qc} : せん断力に対するコーン状破壊(側面破壊)面の有効投影面積

(5) 引張力 p とせん断力 q を同時に受けるアンカーリング

次式を満足させる。

3.3 鉄骨部材の初期たわみの計算とたわみ倍率

あと施工アンカーに支持される部材は、クリープを含めた経年変化により、たわみが増加する。長期載荷実験の結果から50年後のたわみ量を推定し、その値を初期たわみからの倍率（以下、たわみ倍率）で示した。本工法では、長期載荷実験結果より、たわみ倍率を3.0に設定した。なお、単純支持部材では、両端完全ピン支持として求められるたわみ量を超えることがないので、たわみ倍率の設定は行わない。片持ち支持部材の初期たわみの計算方法を下記に示す。

初期たわみ量は、元端の回転によるたわみ量 δ_{re} と、片持ち支持部材の弾性変形によるたわみ量 δ_{bs} との和で表される(図-4)。鋼構造許容応力度設計規準²⁾などには露出柱脚の回転剛性 K_{BS} を計算する式が提案されているが、本工法では実験結果を基に回転剛性計算式を提案している。

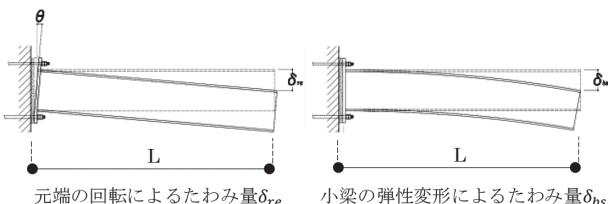


図-4 片持ち支持部材の初期たわみの2つの要因

3.4 冗長性の確保

片持ち支持形式は静定構造であり、アンカー筋の抜け出し等により支持力を失う懸念があるため、フェールセーフとして吊り材等を併用する。

4. 短期載荷實驗

4.1 計画概要

設計法の妥当性を確認するため、引張力作用下のアンカーラインのせん断挙動および終局せん断耐力について短期載荷実験を実施した。

試験体の形状寸法を図-5に示す。試験体は実大とし、RC造大梁を模擬した版状部材（以下、スタブ）の両側に鉄骨小梁を片持ち支持で接合したものとした。鉄骨小梁は加力治具として扱えるよう剛強な断面計画とした。試験体一覧を表-2に示す。

試験体は片持ち支持形式の設計荷重を想定したCシ

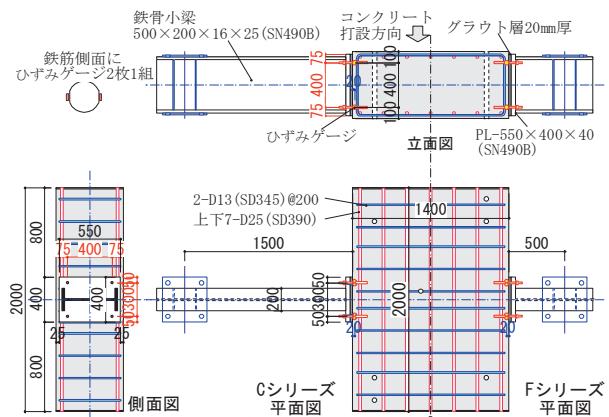


図-5 短期載荷試験体の形状寸法（実際は左右対称）

表-2 短期載荷試驗體一覽

番号	試験名	あと施工アンカー				コンクリート 計画圧縮強度 (N/mm ²)	シア スパン (mm)
		径	節形状	有効 定着長	穿孔深さ (mm)		
CNo.1	CT19-7dL	D19	竹節	7d _a	133	18	1500
CNo.2	CN19-7dL	D19	ねじ節	7d _a	133	18	
CNo.3	CT19-12dL	D19	竹節	12d _a	228	18	
CNo.4	CN19-12dL	D19	ねじ節	12d _a	228	18	
CNo.5	CT19-20dL	D19	竹節	20d _a	380	18	
CNo.6	CT19-7dH	D19	竹節	7d _a	133	36	
CNo.7	CN19-7dH	D19	ねじ節	7d _a	133	36	
CNo.8	CT25-7dL	D25	竹節	7d _a	175	18	
CNo.9	CT25-12dL	D25	竹節	12d _a	300	18	
FNo.1	FT19-20dL	D19	竹節	20d _a	380	18	500
FNo.2	FT25-20dL	D25	竹節	20d _a	500	18	
FNo.3	FN19-20dL	D19	ねじ節	20d _a	380	18	

リーズ9体(梁シアスパン1500mm)と、両端単純支持形式の設計荷重を想定したFシリーズ3体(同500mm)とした。試験体1体につき片側はあと施工アンカーによる定着、もう一方は埋込み鉄筋による定着としたが、本報ではあと施工アンカーの結果のみ報告する。実験変数はアンカー筋の径(D19, D25)、アンカー筋の節形状(竹節、ねじ節)、アンカー筋のスタブへの定着長($7d_a$, $12d_a$, $20d_a$)およびコンクリート圧縮強度(18N/mm², 36 N/mm²)とした。鉄骨小梁端部とスタブとの間には厚さ20mmのグラウト層を設け、無収縮モルタルを流し込み施工した。鉄骨小梁とアンカー筋の接続はダブルナットとし、竹節異形鉄筋にはねじ加工(D19にはM16, D25にはM22)を施した。鉄骨小梁端部のベースプレートの孔はねじ径に5mmを加えた直径とし、アンカー筋の鋼種はSD345とした。使用材料の材料試験結果を表-3および表-4に示す。

加力および計測計画を図-6に示す。梁荷重は油圧ジャッキに取り付けたロードセルを用いて計測した。またスタブからの相対変位として、梁載荷点の鉛直変位、鉄骨小梁元端の鉛直変位およびアンカー筋先端の水平変

表-3 コンクリートとグラウトの材料特性

番号	試験名	母材コンクリート			目地グラウト				
		圧縮強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)	継弾性係数 (kN/mm²)	ボアン比	圧縮強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)	継弾性係数 (kN/mm²)	ボアン比
CNo.1	CT19-7dL	21.6	2.05	25.5	0.224	69.1	2.65	22.6	0.246
CNo.2	CN19-7dL	20.0	1.67	25.5	0.208	69.1	2.65	22.6	0.246
CNo.3	CT19-12dL	23.0	2.10	25.3	0.222	73.0	2.38	22.8	0.243
CNo.4	CN19-12dL	23.0	2.10	25.3	0.222	73.0	2.38	22.8	0.243
CNo.5	CT19-20dL	21.6	2.05	25.5	0.224	69.1	2.65	22.6	0.246
CNo.6	CT19-7dH	45.9	3.55	33.4	0.248	73.3	2.21	23.3	0.244
CNo.7	CN19-7dH	45.9	3.55	33.4	0.248	73.3	2.21	23.3	0.244
CNo.8	CT25-7dL	23.0	2.10	25.3	0.222	74.2	2.73	23.9	0.248
CNo.9	CT25-12dL	23.0	2.10	25.3	0.222	74.2	2.73	23.9	0.248
FNo.1	FT19-20dL	20.4	1.84	27.6	0.198	63.4	2.39	21.2	0.241
FNo.2	FT25-20dL	22.9	2.01	27.2	0.209	66.8	2.54	23.1	0.242
FNo.3	FN19-20dL	20.4	1.84	27.6	0.198	63.4	2.39	21.2	0.241

表-4 鋼材の材料特性

名称	部位	鋼種	降伏強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)	継弾性係数 (kN/mm²)	破断伸び (%)	降伏ひずみ (μ)
D19 竹節	アンカー(共通)	SD345	392	581	185	22.1	2114
D25 竹節	アンカー(共通)	SD345	371	569	188	27.5	1971
D19ねじ節	アンカー(C)	SD345	390	556	191	23.2	2044
D19ねじ節	アンカー(F)	SD345	391	555	189	23.8	2066
PL25	梁鉄骨 Fr.C)	SN490B	364	532	190	28.8	1921
PL16	梁鉄骨 Wb(C)	SN490B	382	528	207	27.2	1846
PL40	梁鉄骨 E.PL	SN490B	353	542	183	30.0	1935
PL25-2	梁鉄骨 Fr.(F)	SN490B	367	527	203	26.0	1803
PL16-2	梁鉄骨 Wb(F)	SN490B	369	521	205	29.0	1801
PL40-2	梁鉄骨 E.PL(F)	SN490B	354	524	187	31.7	1890

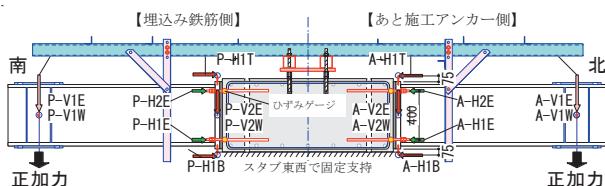


図-6 加力および計測計画

位を計測した。スタブ端におけるアンカーラインのひずみは鉄筋側面に貼り付けた2枚1組のひずみゲージによって計測した。

加力履歴を図-7に示す。両側の鉄骨小梁に同じ向きの荷重制御による漸増繰返し載荷を行った後、上側引張(正加力)の単調押切り載荷を行った。正方向で中途破壊した試験体では、下側引張(負方向)に押切り加力を行った。片持ち形式の試験体Cシリーズでは初期剛性を確認後、長期設計荷重 Q_f (長期曲げ、7.4kN)を、両端単純支持形式の試験体Fシリーズでは長期設計用せん断力 Q_{s2} (長期せん断、11.5kN)をそれぞれ基準にした繰り返し履歴とした。

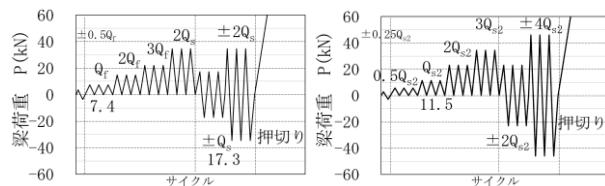
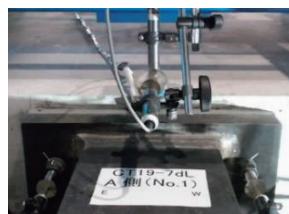


図-7 加力履歴

4.2 結果概要

あと施工アンカーアーによる鉄骨梁定着部の損傷状況例を写真-1に示す。いずれの試験体においても、長期設計荷重の繰り返し1回目載荷時には、あと施工アンカーアー定着部周辺のスタブやグラウト層の損傷は確認されなかった。また図-8に示すようにいずれの試験体も長期設計荷重(試験体Cシリーズは Q_f 、試験体Fシリーズは Q_{s2})の3倍までは弾性的な挙動を呈した。



(a) 片持ち試験体 CNo. 1



(b) 両端支持試験体 FNo. 1

写真-1 長期設計荷重作用時の定着部損傷状況

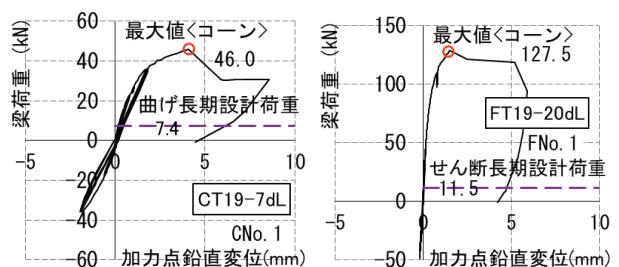


図-8 全体荷重変形関係(代表試験体)

4.3 設計法の妥当性検証

4.3.1 せん断力に対する設計法

両端支持形式とした試験体Fシリーズの実験結果を用い、せん断力に対する設計法の妥当性を検証した結果を表-5に示す。いずれの試験体も下端アンカーラインの側方コーン破壊となり、最大荷重はコーン状破壊により決定する長期許容設計荷重に対して9~20倍程度の余裕度があった。

表-5 せん断力に対する検証結果

試験体	破壊形式		最大荷重 P<max>(kN)	長期許容せん断力 qa(kN)	余裕度 P<max>/qa
	実験最終	長期*			
FNo.1	FT19-20dL	コーン	129	13.6	9.46
FNo.2	FT25-20dL	コーン	308	13.6	22.6
FNo.3	FN19-20dL	鋼材	201	13.6	14.8

* 長期許容せん断力を決める破壊形式

4.3.2 曲げ引張力に対する設計法

片持ち支持形式とした試験体Cシリーズの実験結果を用い、曲げ引張力に対する設計法の妥当性を検証した結

果を表-6に示す。コーン状破壊となった試験体の最大荷重は長期許容引張力に対して約4~6倍の余裕度があった。一方、鋼材によって許容耐力が決定した試験体の余裕度は約3倍以上であり、鋼材の長期許容応力度の安全率1.5を上回った。実験で観測された破壊形式は概ね想定通りであったが、試験体CNo.3 (CT19-12dL) はコーン状破壊ではなく鋼材によって破壊した。

表-6 曲げ引張力に対する検証結果

試験体	破壊形式		最大荷重 P<max>(kN)	長期許容 引張力 p _a (kN)	余裕度 P<max>/p _a
	実験最終	長期*			
CNo.1 CT19-7dL	コーン	コーン	46.0	7.51	6.12
CNo.2 CN19-7dL	コーン	コーン	43.4	7.37	5.89
CNo.3 CT19-12dL	鋼材	コーン	66.5	15.0	4.44
CNo.4 CN19-12dL	コーン	コーン	72.7	14.7	4.95
CNo.5 CT19-20dL	鋼材	鋼材	64.3	21.5	2.99
CNo.6 CT19-7dH	コーン	コーン	63.9	10.7	5.96
CNo.7 CN19-7dH	コーン	コーン	64.3	10.5	6.10
CNo.8 CT25-7dL	コーン	コーン	50.6	10.8	4.69
CNo.9 CT25-12dL	コーン	コーン	83.8	21.2	3.96

* 長期許容引張力を決める破壊形式

4.3.3 組合せ応力に対する設計法

片持ち形式とした試験体Cシリーズのうち、鋼材破壊が先行した2体（試験体CNo.3, CNo.5）について、曲げ引張力とせん断力の組合せ応力の検定を行った結果を表-7に示す。検定は曲げ引張側となる上端のアンカー筋に対して行い、式(11)によって求まるコーン状破壊により決定する許容耐力 q_{as} 算定期時のアンカー筋のへりあきは500mmとした。試験体CNo.3 (CT19-12dL) および試験体CNo.5 (CT19-20dL) について、組合せ応力は長期許容応力度以下となった。

表-7 組合せ応力に対する検証結果

試験体	許容引張応力度時の曲げモーメント(kN-m)				許容せん断応力時の梁せん断力(kN)				$\alpha = 1$
	設計荷重 $t_u M_D$	鋼材 $t_u M_s$	コーン $t_u M_c$	付着 $t_u M_b$	設計荷重 $t_u Q_D$	鋼材 $t_u Q_s$	支圧 $t_u Q_p$	コーン $t_u Q_b$	
CNo.3	11.1	32.3	22.5	25.7	17.3	83.0	36.2	234	0.97
CNo.5	11.1	32.3	44.7	42.9	17.3	83.0	36.2	234	0.82

5. 長期載荷実験

5.1 計画概要

長期性能を確認するため、長期載荷実験を実施した。試験体の形状寸法を図-9に示す。

試験体は実大とし、コンクリートの目標圧縮強度21N/mm²のコンクリート母材 (600 × 1100 × 800mm, 以下スタブ) の両側に片持ち形式の鉄骨小梁を取付けた。鉄骨小梁のスタブ端より2000mmの位置にコンクリート製および鋼製錘を設置して、あと施工アンカーリング部に対して3年間の長期載荷を行った。梁鉄骨はH-300

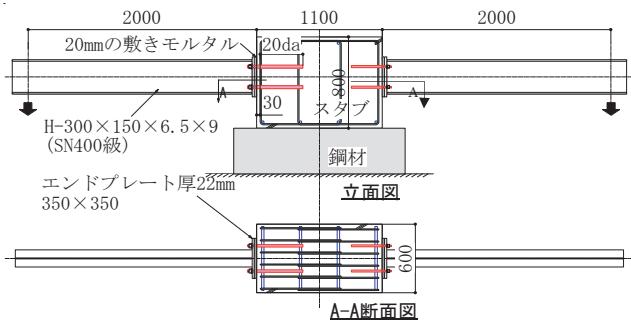


図-9 長期載荷試験体の形状寸法

× 150 × 6.5 × 9 (SN400) とし、端部プレートPL-22 (SN400) を溶接した。梁鉄骨端部とスタブとの間には20mm厚のグラウト目地を設け、アンカーリング部には所定のトルク (D16:100N·m, D19:180N·m) を導入し、定着板とアンカーリングとの間にエポキシ樹脂を注入して緩みがないよう固定した。スタブコンクリートの打設方向は上面からとし、スタブ断面には横補強筋を配筋した。横補強筋のかぶり厚30mmは、アンカーリングの定着長から除外した。試験体一覧を表-8に示す。試験体数は4体で、実験変数はアンカーリングの径 d_a (D16, D19) およびアンカーリングの定着長 (12 d_a , 20 d_a) および定着方法 (あと施工, 埋込み鉄筋) とした。アンカーリングには通常、竹節鉄筋にねじ切削加工をしたものを使用するが、付着性状確認を目的とした本試験では鉄筋降伏を許容しない。そのためアンカーリングには切削不要の高強度ねじ節鉄筋 (D16 : USD590, D19 : SD490) を用いた。ねじ節鉄筋の方が竹節鉄筋よりもコンクリートとの付着機構の形成が厳しいため、安全側の計画となる。使用材料の特性を表-9に示す。

表-8 長期載荷試験体一覧

試験体名	アンカーリング 鉄筋径	定着長	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	作用付着 応力度 (N/mm ²)	孔深さ ^{※1} (mm)	錘 ^{※2} (kg)
A-No.1-1	D16	20 d_a	21	3.3	350	1504(994)
	D19				410	2305(1318)
A-No.10-1	D16	12 d_a			222	1098(504)
	D19				258	1404(846)

*1 定着長にかぶり厚30mmを加えた値、*2 括弧内はコンクリート製

表-9 使用材料の特性 (上：鉄筋、下：コンクリート)

名称	鋼種	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	継弾性係数 (kN/mm ²)	破断伸び (%)
D16ねじ筋	SD590	622.1	768.2	202.0	16.6
D19ねじ筋	SD490	531.9	688.9	186.4	19.0
28日強度	91日強度	1年強度	2年強度	3年強度	
圧縮 (N/mm ²)	引張 (N/mm ²)	圧縮 (N/mm ²)	引張 (N/mm ²)	圧縮 (N/mm ²)	引張 (N/mm ²)
20.1	—	22.3	—	24.6	2.14
				26.1	2.15
				26.6	2.18

加力および計測計画を図-10に示す。加力はスタブのコンクリート圧縮強度が目標強度以上となったことを確認後、梁鉄骨に接続した錐下部の支持材を撤去した。アンカー筋に貼った2枚1組のひずみゲージの平均値から生じている平均付着応力度を確認し、 3.3N/mm^2 となるよう鋼製錐の重量を調整した。目標値は、採用した接着剤の基準付着強度 15N/mm^2 に安全率 $3 \times F_{safe} = 1.5$ を見込んだ長期許容付着応力度である。またスタブからの相対変位として、鉄骨梁錐設置点の鉛直変位(梁たわみ)、梁鉄骨端部の鉛直変位および水平変位を防水型ないし防滴型CDPによって計測した。データの計測間隔は毎定刻時に1回とし、載荷開始時刻に最も近い計測点を日記録として採用した。

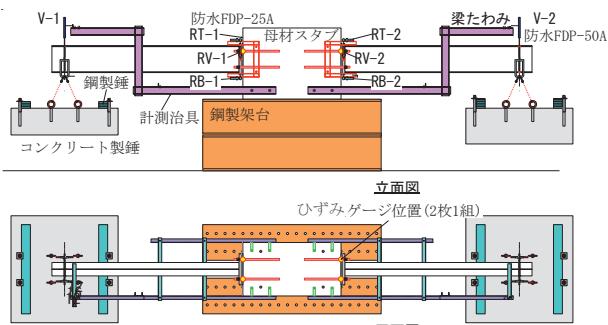


図-10 加力および計測計画

5.2 計画概要

5.2.1 長期観測結果の概要

あと施工アンカーを用いた鉄骨梁のたわみの日計測結果について区間数7の移動平均を求め、さらに載荷直後の梁初期たわみとの比を取り梁たわみ倍率を算定した結果を図-11に示す。梁たわみ倍率は載荷開始から60日後に平均で1.2程度となり、1年後に1.2~1.3程度、2年後に1.3~1.4程度、3年後には約1.5になった。一方、アンカー筋に生起させた平均付着応力度の区間数7の移動平均の推移を図-12に示す。概ね目標値の 3.3N/mm^2 前後を維持したが、いずれの試験体にも季節変動が見られた。

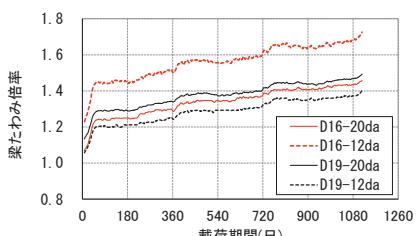


図-11 梁たわみ倍率の推移

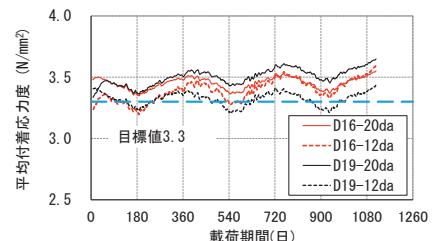


図-12 平均付着応力度の推移

5.2.2 長期の梁たわみ予測

計測された梁たわみ増分に対し、一般的なクリープ試験結果の考察に用いられる「べき則」を適用し、長期の梁たわみを予測した。まず対数に変換した梁たわみ増分(mm) - 対数に変換した載荷期間(日)関係において、式(13)に示す線形近似直線を求める。

$$\log \delta_c(t) = a \log(t) + b \quad \dots \dots \dots (13)$$

$\delta_c(t)$: 載荷 t 日経過後の梁たわみ増分で梁たわみ計測値から載荷直後の初期たわみ δ_0 を減じたもの

a : 試験定数で最小二乗法による

b : 載荷1日後の梁たわみ増分 $\delta_c(1)$ とする。

次に式(13)を変換して式(14)に示す梁たわみ増分の予測曲線 $\delta_c(t)$ を得る。

$$\delta_c(t) = At^N \quad \dots \dots \dots (14)$$

A : 載荷1日後の梁たわみ増分 ($b = \log A$)

N : 定数 ($N = a$)

さらに予定供用期間 $t_{service}$ 後の長期梁たわみ倍率は式(15)のように定まる。

$$\frac{\delta_{service}(t)}{\delta_0} = 1 + ct_{service}^N \quad \dots \dots \dots (15)$$

$\delta_{service}(t)$: 予定供用期間 t (日) 後の梁たわみ

δ_0 : 載荷直後の初期たわみ

c : 定数で A/δ_0 とする

2年間または3年間の梁たわみ増分の長期観測データを用い、予定供用期間50年の長期たわみ倍率を算定した結果を表-10に示す。計測データは生データと、季節変動を除去したデータの2通りとした。図-13に示すように、季節変動は区間365の中央移動平均を取ることで、区間7とした場合と比較して適切に除去できた。生データによる長期たわみ倍率の最大値は計測期間2年間、同3年間共に2.03で、両者の差は最大でも2%程度と小さかった。一方、季節変動を除去したデータを用いた場合は、すべての試験体で計測期間3年間のほうが同2年間より約5%大きかった。

次に生データによる長期たわみ予測に対し、季節変動の影響の評価を試みる。対数変換された次元において、

表-10 長期たわみ倍率(予定供用期間50年)

試験体	鉄筋径	定着長	生データ			季節変動除去データ		
			2年間	3年間	3年/2年間	2年間	3年間	3年/2年間
No.1-1	D16	20da	2.03	2.03	1.00	1.96	2.04	1.03
No.1-2	D19		1.74	1.77	1.02	1.87	1.93	1.03
No.10-1	D16		1.99	2.03	1.02	2.14	2.25	1.05
No.10-2	D19	12da	1.91	1.92	1.00	1.87	1.97	1.05

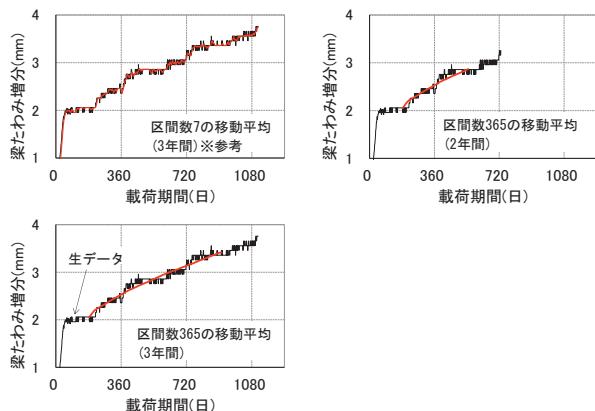


図-13 季節変動除去データの例(試験体No.1-1、D16-20da)

たわみ増分の予実差の標準偏差 σ を求め、母平均の区間推定の5%超過確率に対応する 1.65σ を式(15)に考慮すると、季節変動を考慮した長期たわみ増分 δ_{c2} の予測式(16)を得る。たわみ増分の予実差とは、載荷1日後から3年後までの3年間の生データを用いて求めた長期たわみの予測値と、梁たわみの実測値の差のことである。図-14に試験体No.1-1(D16-20da)の算定例を図示する。

$$\delta_{c2}(t) = A \cdot (10^{1.65\sigma}) \cdot t^N \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

表-11に示すように季節変動を考慮した長期たわみ倍率は最大で2.16となり、季節変動を考慮しない場合の最大値2.03に対し約7%大きかった。

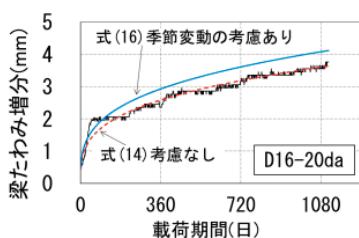


図-14 梁たわみ増分と季節変動

表-11 長期たわみ倍率と季節変動

試験体	鉄筋径	定着長	生データ 3年間		
			季節変動 考慮なし	季節変動 考慮あり	考慮あり /なし
No.1-1	D16	20da	2.03	2.16	1.07
No.1-2	D19		1.77	1.84	1.04
No.10-1	D16		2.08	2.13	1.02
No.10-2	D19	12da	1.92	2.05	1.07

6. 施工性確認実験

6.1 計画概要

本工法では接着系あと施工アンカー強度指定申請ガイドライン¹⁾に示される穿孔深さ上限300mmを超える穿孔深さを適用範囲とした。また、穿孔と同時に孔内の清掃を行う施工法を採用した。そこで、本工法の施工精度をその他の一般的な方法と比較・検証する施工実験を実施した。各検証項目と精度確認方法を表-12に示す。検証項目は、①水平穿孔精度、②孔内の清掃程度、③接着剤の充填性の3点である。孔の施工向きは横向きとした。

表-12 施工実験での検証項目

番号	項目	検証方法	検証内容	試験数/工法
①	水平穿孔精度	穿孔角度の計測	90°との差分	3 ^{*1}
②	孔内の清掃程度	重ね板 ファイバースコープ	孔壁面の切粉量	3
③	接着剤の充填性	アクリルパイプへの注入	空隙・気泡の有無	2 ^{*2}

*1 コアドリル工法のみ2とする

*2 打継ぎ(カートリッジ交換)あり/なし1体

穿孔方法と清掃方法の組み合わせは、本工法、コアドリル工法、一般工法の3通りとした。各工法の施工状況を写真-2に示す。本工法は、ガイドツールを用い集塵機能付きハンマードリルにて穿孔し、穿孔と同時に清掃が完了する。コアドリル工法は、ドリルスタンド併用のダイヤモンドコアドリルで穿孔後、ナイロンブラシで孔内を清掃し、吸塵する。一般工法は、ハンマードリルで穿孔(ガイドツール未使用)後、ナイロンブラシで孔内を清掃し吸塵する。

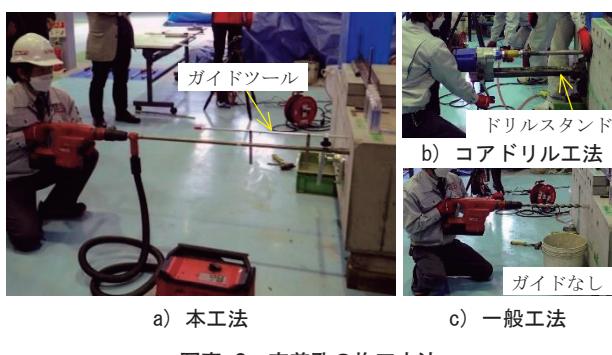


写真-2 定着孔の施工方法

6.2 施工試験結果

6.2.1 水平穿孔精度

定着孔の水平穿孔精度は、孔内に挿入した計測用ボルトのコンクリート母材面に対する角度を計測することで検証した。計測用ボルトと計測方法を写真-3に示す。

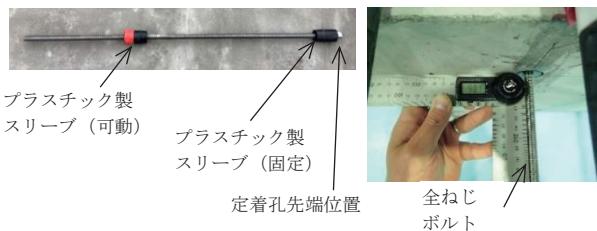


写真-3 計測用ボルトと穿孔角度の計測状況

計測用ボルトは、全ねじボルトにプラスチック製スリーブを取り付けたものである。点接触するよう加工したボルト先端を定着孔内の先端に当て、スリーブを先端付近と定着孔出口にセットし孔と内接させることで、計測用ボルトと穿孔された定着孔の軸が平行になるように工夫されている。デジタルプロトラクターを母材コンクリート面に密着させ、計測用ボルトの角度を鉛直上下・水平左右の4方向から計測することで、穿孔角度を求めた。さらに法線角90°と穿孔角度の差の絶対値を、施工精度として記録した。

ガイドツールを用いた本工法、ドリルスタンド併用のコアドリル工法、ガイドツール未使用の一般工法の3工法による穿孔角度の計測結果を図-15に、施工精度を整理した結果を表-13にそれぞれ示す。一般工法と比較して、ドリルスタンド併用のコアドリル工法とガイドツールを用いた本工法の穿孔角度は共に $90 \pm 1^\circ$ 程度となった。また本工法の穿孔角度の90°との差は最大でも 1.5° となり、深さ500mmの場合においても十分な施工精度を有していた。

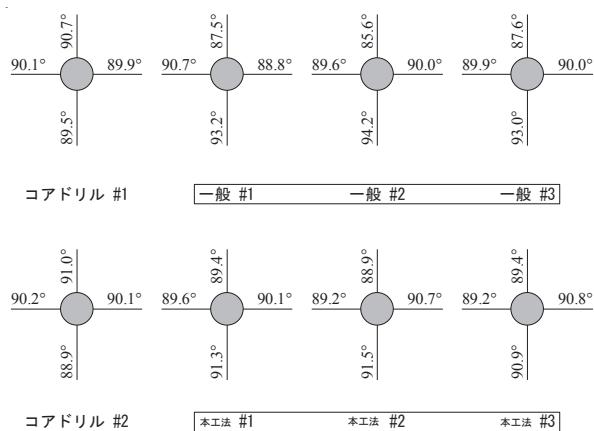


図-15 各工法の穿孔角度

表-13 各工法の水平穿孔精度

水平穿孔精度※ (°)						
本工法			コアドリル工法			一般工法
1.3	1.5	0.9	0.7	1.1	-	3.2
平均			平均		平均	3.0

※ コンクリート面の法線と穿孔軸のなす角

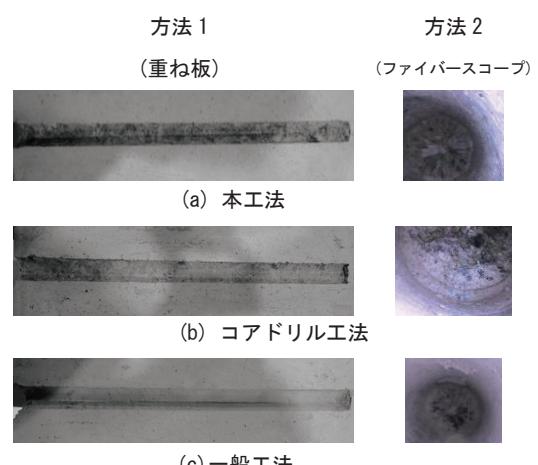
6.2.2 孔内の清掃程度

孔内の清掃程度は、2通りの方法で検証した。方法1は2枚重ねのコンクリート板状母材に対し穿孔後、板を分離して孔内を直接目視して確認した。方法2は施工した定着孔にファイバースコープを挿入して映像で確認した。白色に近いほど切粉が多く、清掃状態が悪いと判断できる。両試験の試験状況を写真-4に、孔内の清掃程度の確認結果を写真-5にそれぞれ示す。残留切粉量は本工法とコアドリル工法が同程度に少なく、一般工法は両工法より多かった。また一般工法では、微量ではあるが孔内へ切粉の付着も確認された。以上より、本工法は十分に定着孔内の清掃が可能であることを確認した。



a) 方法1(重ね板) b) 方法2(ファイバースコープ)

写真-4 孔内清掃状況の確認作業



※白っぽいほど切粉残留量が多い

写真-5 孔内清掃程度の確認

6.2.3 接着剤の充填性

本工法について、接着剤樹脂の定着孔内への充填性をアクリルパイプへの注入試験により確認した。カートリッジ交換などによる打継ぎの影響を確認するため、打継ぎ有無の2ケースを実施した。試験状況を写真-6に示す。いずれのケースにおいても、孔内に空隙や気泡の混入がないことを目視で確認した。以上より、本工法の接着剤充填性に問題がないことを検証した。

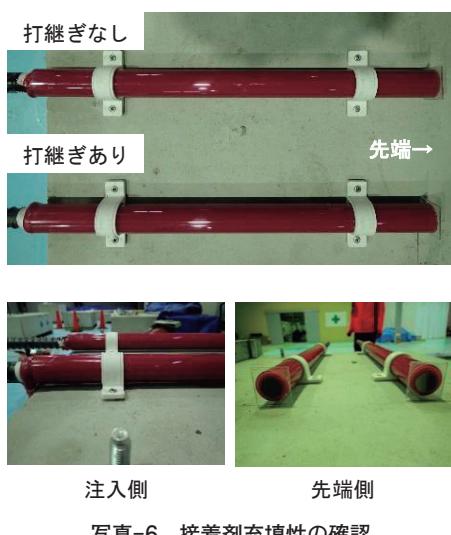


写真-6 接着剤充填性の確認

6.3 定着性状に対する穿孔方法の影響

あと施工アンカーの定着性状に対する穿孔方法の影響を、マッシブなコンクリート母材に直線定着したアンカー筋の単調引抜き試験によって検討した。コンクリート圧縮強度は 18.7N/mm^2 、アンカー筋は竹節とねじ節の異形鉄筋D25 (SD490)、有効定着長は $20d_a$ とした。

本工法とコアドリル工法の試験結果を図-16に比較して示す。図中の長期許容付着耐力は、表-1.1)に示す採用接着系アンカーの基本平均付着強度 τ_{bavg} を用いて求めた。 $(F_{safe} = 1.5)$

両者の荷重変形関係は同等であり、定着性状にあと施工アンカーの穿孔方法による違いは見られなかった。

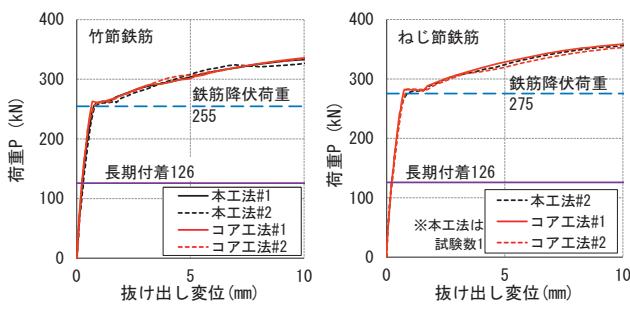


図-16 アンカー筋定着性状の比較結果

7. 適用実績・効果

本工法は2024年10月の強度指定取得から2025年10月時点(約1年)で、既に7件(改修4件、新築3件)で適用している。加えて、適用の相談・問い合わせが多数あり、新築・改修を問わず幅広いシーンでの活用が進んでいる。

本工法のメリットとして、短工期、低コストであり、かつ環境配慮型の工法であることが挙げられる。本工法を用いることで、従来の施工法(コンクリートを大きく研り取り、アンカーボルトをセットする)の工期と工事費、廃棄物の各発生量を100とすると、それぞれ約30、15、1にすることが可能である。

適用例1)

幅2375mm × 奥行1315mm (EPS) という狭小なスペースの中に鉄骨小梁を設置する改修工事であった。従来工法では、足場や支保工設置、水研り、型枠工事、コンクリート打設、鉄骨工事が必要である。また、研り工事により大きな騒音や粉塵が発生するため、使用継続しながらの改修工事は難しい。しかし、本工法を用いることにより、支保工設置や研り工事、型枠工事、コンクリート打設が不要となるため、狭小なスペースで、使用継続しながらの工事を実現している。

適用例2)

外壁受け間柱に本工法を適用した。従来工事はテンプレートや架台を用いてアンカーボルトを強固に固定する必要があり、コンクリート打設によるアンカーボルトの位置ずれが発生した場合、以下のような対応が必要となる。

- ・アンカーボルトの台直し
- ・鉄骨ベースPLの再製作
- ・水研り等

本工法を用いることで、容易に精度確保が可能となり、上記のような不具合対応を未然に防ぐことが可能となる。

8. まとめ

本報告では、2024年10月10日に強度指定を取得した接着系あと施工アンカーを用いた鉄骨部材の接続方法について、その概要、設計方法、短期・長期載荷実験、施工性確認実験の結果、および適用実績と効果を報告した。従来であれば、コンクリート研り後に、アンカー筋をセットし、コンクリートの再打設を行っていたところをアンカー径程度の削孔と接着剤の注入という最小限の工程でアンカー工事が完了することから、従来の工程に

伴う騒音・振動・塵埃を最小限に抑えたうえで圧倒的な工期・コスト・廃棄物削減を実現できることが本工法最大のメリットである。本メリットを活かし、今後も適用実績を積み重ねていくとともに、適用範囲拡大に向け、さらなる開発を続けていく。

【参考文献】

- 1) 日本建築防災協会, 接着系あと施工アンカー強度指定申請ガイドライン, 2024
- 2) 日本建築学会, 鋼構造許容応力度設計規準, 2021
- 3) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018
- 4) 日本建築学会, 各種合成構造設計指針・同解説, 2024

【執筆者】



*1 香田 伸次
(KODA Shinji)



*2 横山 一智
(YOKOYAMA Kazutomo)



*3 山野辺 宏治
(YAMANOIBE Koji)



*4 澤口 香織
(SAWAGUCHI Kaori)



*5 西尾 淳
(NISHIO Atsushi)



*6 中川 晴日
(NAKAGAWA Haruhi)



*7 遠竹 泉美
(TOTAKE Izumi)