

論文 接着系注入方式あと施工アンカーの火災時及び火災後の付着破壊強度に関する試験方法の提案

大和 征良*1・池田 憲一*2

要旨: 長期部材接合を想定し、市場で広範に使用されているエポキシ樹脂系カートリッジ型の接着系注入方式あと施工アンカーについて、火災時(高温時)及び火災後(高温履歴後)の付着破壊強度の荷重加熱実験を実施し、その付着破壊強度の実験的研究を行った。エポキシ樹脂や製品接着剤の物性値と接着系注入方式あと施工アンカーの付着破壊強度の数値には差異があることから、本実験的研究で行った試験方法に基づき、火災時及び火災後の付着破壊強度試験を行うことにより、常温時の付着強度式の付着応力度と本実験の付着破壊強度を置換して評価することで、本試験方法の適用の可能性を示した。

キーワード: 接着系注入方式あと施工アンカー, 火災時, 火災後, 付着破壊強度, 残存付着強度, 試験方法

1. はじめに

既存鉄筋コンクリート系建造物の耐震補強方法の一つとしてあと施工アンカーが使用されている。最近では、騒音振動の少ない接着系注入方式あと施工アンカーが頻繁に使用されるようになってきた¹⁾²⁾。一方で、あと施工アンカーの部材接合における長期許容応力度(引張・せん断)については明らかになっていない部分が多く、中でも長期クリープ特性や環境温度の影響並びに耐火性能についてはその解明は十分ではなく、使用にあたってはさらなる検証が必要であるとされている³⁾⁴⁾。また、建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説⁵⁾(日本建築学会編)では、補修・補強工法および補修材料の選定と実施において、部材の増設を行う際にあと施工アンカーを用いる場合は火災に対する配慮も必要であると記載されている。しかしながら、接着系注入方式あと施工アンカーを使用する引張の長期部材接合(長期許容引張応力度)を想定した火災時(高温時)及び火災後(高温履歴後)の実験的研究は、筆者らが行った注入方式接着系あと施工アンカーの実験検証以外ほとんど存在しない⁶⁾⁷⁾。

本研究は、長期部材接合を想定し、市場で広範に使用されているエポキシ樹脂系カートリッジ型の接着系注入方式あと施工アンカーに限定して、火災時(高温時)及び火災後(高温履歴後)の付着強度の荷重加熱実験を実施し、その付着破壊強度の試験方法を提案するものである。

2. 本実験で使用する接着系あと施工アンカー

本実験で使用する接着系注入方式カートリッジ型のあと施工アンカーの接着剤について、表-1に示す。本論文においては、市場で広範に使用されているある特定の接着系アンカーのエポキシ樹脂系(A)の接着剤に限定して言及するものとする。

表-1 本実験で使用する製品(接着剤)の物性

物性試験 (試験方法: JIS)	製品(接着剤)	
	エポキシ樹脂系(A)	
	樹脂(M)	硬化剤(H)
主含有物	ビスフェノール A ビスフェノール B	メタキシレンジアミン 石英
混合比 (M:H)	3:1	
圧縮強度 (MPa) (JIS K 7181)	109.0	108.0
引張強度(MPa) (JIS K 7161)	75.7	45.1
曲げ強度 (MPa) (JIS K 7171)	118.0	66.7
引張せん断接着強度 (MPa) (JIS K 6850)	10.3	7.5
付着破壊強度(MPa) (文献 8))	25	

注) 引張せん断接着強度とあと施工アンカーとしての付着破壊強度の数値が大きくかけ離れているため、樹脂のガラス転移温度などの温度特性に関する物性データ試験を行っていない。

3. 実験概要と結果

3.1 実験概要

図-1に試験体の仕様を示す。写真-1に試験装置と試験体設置状況を示す。表-2に異形鉄筋の強度試験結果を示す。実験は東京理科大学葛飾キャンパスの第二実験棟の1000kN油圧式万能試験機を用いて行った。試験体は、直径150mm・高さ300mm・厚さ5mmの鋼管柱に、

*1 日本ヒルティ 技術本部 博士(工学)(正会員)

*2 東京理科大学 教授 博士(工学)(非会員)

普通コンクリート(設計基準強度 $F_c=15(N/mm^2)$)を打設し、コンクリート養生硬化後、試験体の上面のコンクリート中心部に径 20mm・有効埋込み長さ(l_e)160mm($10d_a$)の孔をハンマードリルで穿孔後、この穿孔穴を清掃した。その後、エポキシ樹脂系注入方式接着系あと施工アンカー剤(接着剤)を注入し、先端を寸切りした D16 の異形鉄筋を挿入した。異形鉄筋は最終破壊モードとして付着破壊を先行させるため、高強度材(SD685)を使用した。温度測定用の熱電対は、異形鉄筋を挿入する際に、アンカー筋とコンクリート穿孔穴側面の間の接着剤中に、穿孔穴底部と上部(コンクリート表面より 30mm 程度の深さ)の 2 か所に設置した(図-1)。試験体は、試験機に設置後、試験体上部に引張力の反力板をコンクリート破壊とならないように設置し、試験部を取り囲むように高温電気炉を設置した(図-2、写真-1、写真-2、写真-3)。実験時の試験体コンクリートの材料試験強度は $28.4N/mm^2$ であった。加力時の変位は、アンカー筋のコンクリート表面からの抜け出し量で測定したが、アンカー筋の伸び量も含まれている。アンカーの破壊モードは、鋼材破断(アンカー筋の破断)、コンクリートコーン状破壊、付着破壊の 3 種類がある⁹⁾が、その 3 種類の破壊モードの中で、鋼材破断とコンクリートコーン状破壊においては鋼材とコンクリートの高温時の性状として既往の研究が既に存在するため¹⁰⁾、アンカー筋に高強度異形鉄筋を使用し、試験体上面のコンクリート表面に平板治具を設置してコンクリート表面を拘束することで、付着破壊モードが支配的になるようにして実験を行った。

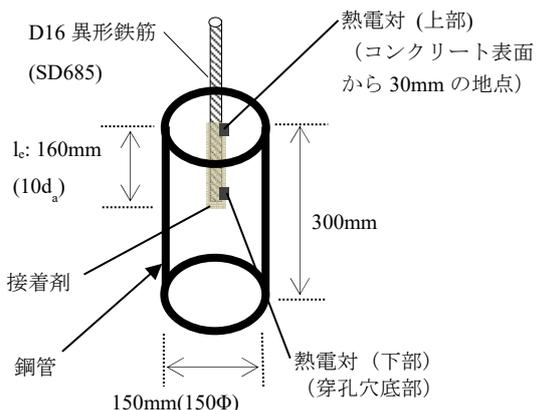


写真-1 試験装置と試験体設置状況

表-2 D16 異形鉄筋材料試験結果

	降伏強度 (N/mm^2)	最大強度 (N/mm^2)
D16 (SD685)	708.6	906.2

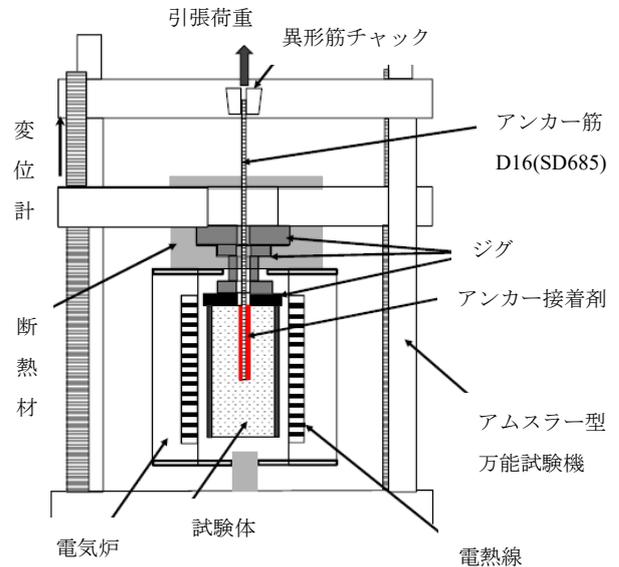


図-2 試験装置図

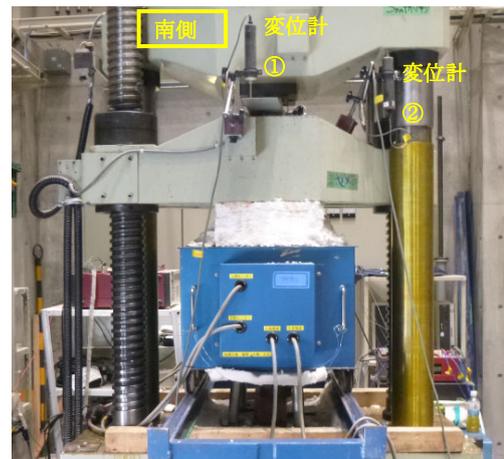


写真-2 油圧式万能試験機



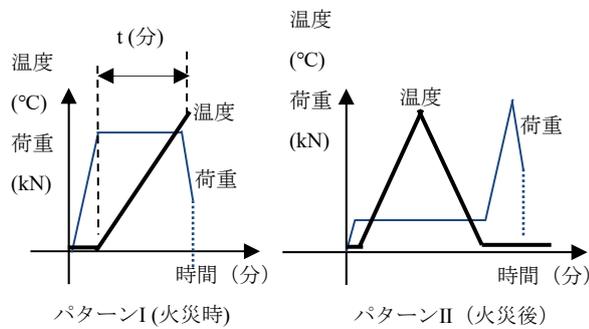
写真-3 油圧式万能試験機

3.2 実験パラメータ

図-3 に実験パラメータを示す。試験体ごとのパラメータ条件の詳細を表-3 に示す。

試験体温度上昇速度は $0.8^{\circ}C/分$ を目標として加熱した。

荷重・加熱条件は以下の2つのパターンを採用した。パターンIは、火災時(高温時)の強度を確認することを目的として、実施した。引張荷重を載荷した状態で加熱して付着破壊時の温度を測定した。ここで、付着破壊は軸変形が30mmとなったときとした。これは、荷重が載荷された状況下での高温時の暴露であり、実際の火災時(高温時)の状況を再現したものである。パターンIIは、火災後(高温履歴後)の再使用性を確認することを目的として実施した。あと施工アンカーの常温領域の耐力は、文献9)の耐震改修設計指針等の耐力式で評価されており、高温時は文献11)では約200°Cを超えたところで付着破壊強度がほとんど残っていない結果が報告されている。また、文献6)では、エポキシ樹脂系注入方式接着系あと施工アンカーのみであるが、火災後の残存耐力の実験において、250°Cまでは短期荷重として常温時の終局付着耐力を有することが報告されている。従って、本実験では、火災後(高温履歴後)の残存付着耐力を明らかにするため、150°Cから400°Cまで50°Cごとに温度パラメータを設定した。また、文献6)より、250°Cと300°Cにおける残存付着耐力に大きな差異が存在するため、275°Cについても実験を行うことにした。さらに、パターンIIの実験において、温度パラメータ350°Cの実験を行っている間、350°Cの目標温度を超えたところで長期引張荷重によって付着破壊が生じてしまったため、350°Cと400°Cにおいては、長期引張荷重を載荷せずに実験を行った。



注) t(分): 電気炉暴露時間

図-3 実験における荷重と温度の条件

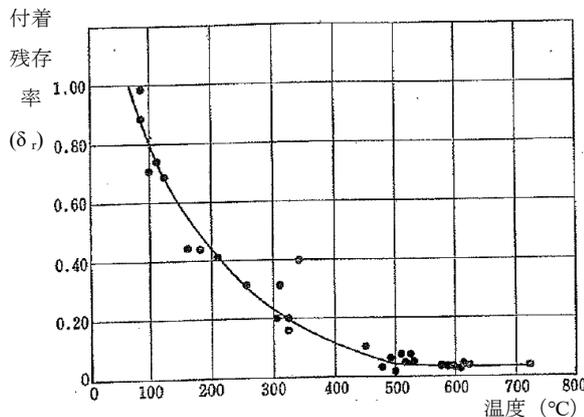


図-4 鉄筋コンクリートの温度における

付着残存率(δ_r)¹⁰⁾

3.3 長期引張荷重の設定と設計付着応力度

長期引張荷重は鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説¹²⁾の鉄筋のコンクリートに対する常温時の長期許容付着応力度(実際の長期部材接合を考慮して上端筋の算定式とした)より算出し(式(1)),これに、構造材料の耐火性ガイドブック¹⁰⁾の経歴温度時の鉄筋とコンクリートの付着強度残存率(図-4)を乗じた値を長期設計引張荷重として載荷した(式(2),式(3))。詳細を表-3に示す。長期付着応力度から長期設計引張荷重の換算は、耐震改修設計指針⁹⁾及び日本建築学会の各種合成構造設計指針¹³⁾に示される式を用いて以下のように算出した(式(3)~式(7))。また、あと施工アンカーの常温時の許容付着応力度の算定式(式(8))も以下に示す。

$$\tau_{cia,l} = (1/15) \cdot F_c \quad (1)$$

$$\tau_{cia,l,r} = \tau_{cia,l} \cdot \delta_r \quad (2)$$

$$T_{a3,l} = \tau_{cia,l,r} \cdot \pi \cdot d_a \cdot l_e \quad (3)$$

$$T_{a3,u} = \tau_a \cdot \pi \cdot d_a \cdot l_e \quad (4)$$

$$\tau_a = T_{a3,u} / (\pi \cdot d_a \cdot l_e) \quad (5)$$

$$\tau_{al} = T_{a3,u} / (3 \cdot \pi \cdot d_a \cdot l_e) \quad (6)$$

$$\tau_{as} = T_{a3,u} \cdot 2 / (3 \cdot \pi \cdot d_a \cdot l_e) \quad (7)$$

$$\tau_{au} = 10 \cdot \sqrt{(\sigma_B / 21)} \quad (8)$$

ここで、

$\tau_{cia,l}$: 長期許容付着応力度(N/mm²)

$\tau_{cia,l,r}$: 長期設計付着応力度(N/mm²)

δ_r : 付着強度残存率

F_c : コンクリート設計基準強度(N/mm²)

$T_{a3,l}$: 長期設計引張荷重(N)

$T_{a3,u}$: 終局設計引張荷重(N)

τ_a, τ_{au} : 付着応力度(N/mm²)

τ_{al} : 常温時長期許容付着応力度(N/mm²)

τ_{as} : 常温時短期許容付着応力度(N/mm²)

d_a : アンカー筋径(mm)

l_e : アンカー筋の有効埋込み長さ(mm)

σ_B : コンクリート強度(N/mm²)

4. 実験結果と考察

4.1 実験結果

表-4に実験結果を示す。図-5に火災時(高温時)を想定したパターンIの温度と付着強破壊度との関係を示す。付着破壊強度は温度の上昇とともに低下していることがわかる。図-6にパターンIIで得られた高温履歴温度と火災後(高温履歴後)の残存付着破壊強度との関係を示す。火災時(高温時)のアンカー部の履歴温度が250°Cまでは最大耐力は鉄筋の破断で決定され、その時の値は常温時のアンカーの付着破壊強度以下となる。また、250°Cを超えたところから、急激に耐力低下が生じ、

表-3 試験体リスト

試験体名	載荷加熱パターン	火災時 (高温時)				高温履歴後
		目標温度 (°C)	電気炉暴露時間 (t) (分)	T (T _d) (kN)	$\tau_{cia,l(1.0)} \times \delta_r$ (N/mm ²)	
		PF				
①DF_50	I	50	50	112.5	-	-
②DF_60		60	63	96.5	-	-
③DF_70		70	75	80.4	-	-
④DF_80		80	88	48.2	-	-
⑤DF_100		100	113	32.2	-	-
⑥DF_120		120	138	24.1	-	-
⑦DF_200		200	237	16.1	-	-
⑧AF_150	II	150	-	(4.9)	0.6	S
⑨AF_200		200	-	(3.7)	0.45	S
⑩AF_250		250	-	(2.5)	0.3	S
⑪AF_275		275	-	(2.1)	0.26	B
⑫AF_300		300	-	(1.9)	0.225	B
⑬AF_350		350	-	-	0	B
⑭AF_400		400	-	-	0	B

注) T: 引張載荷荷重, (T_d): (長期設計引張荷重),
 PF: 予測破壊モード
 $\tau_{cia,l(1.0)} = (1/15) \cdot F_c = (1/15) \cdot 15 = 1.0$ (長期許容付着応力度)
 δ_r : 付着残存率, 破壊モード, S: 鋼材破断, B: 付着破壊

300°C以上においては、残存付着破壊強度は、1.3～1.4(N/mm²)程度まで低下することがわかった。これは、250°C前後より硬化後のエポキシ樹脂の分解(炭化)が促進されること¹⁴⁾に起因しているものと思われる。

4.2 考察

(1) 常温時の物性試験とアンカーの付着破壊強度

接着剤の接着強さを試験する方法として、引張せん断接着強度(JIS K 6850)がある(表-5)。

本実験で用いたエポキシ樹脂系カートリッジ型の接着系注入方式あと施工アンカーのうち、ピュア樹脂(骨材やフィラーが含有していない接着剤)と製品接着剤(骨材やフィラーが含有している、実験試験体(図-1)に注入された接着剤)の引張せん断接着強度(JIS K 6850)の結果を表-6、図-7に示す。さらに、接着系あと施工アンカーの引張拘束試験(欧州 ETAG001(技術ガイドライン)¹⁵⁾準拠)の付着破壊強度の結果を表-6、図-7に同時に示す。この欧州技術ガイドラインに準拠の付着破壊強度試験は、製品接着剤における接着系注入方式あと施工アン

表-4 実験結果

試験体番号	パターン	火災時 (高温時)		火災後 (高温履歴後)			
		温度 (°C)	引張荷重 (kN)	$\tau_{au,df}$ (MPa)	最大引張荷重 (kN)	$\tau_{au,re}$ (N/mm ²)	FF
①	I	55	112.5	14	-	-	-
②		59	80.4	10	-	-	-
③		65.6	96.5	12	-	-	-
④		89.7	48.2	6	-	-	-
⑤		100	32.2	4	-	-	-
⑥		123.5	24.1	3	-	-	-
⑦		301	16.1	2	-	-	-
⑧	II	150	4.9	-	190.1	≥23.6	S
⑨		200	3.7	-	180.0	≥22.3	S
⑩		250	2.5	-	181.9	≥22.6	S
⑪		275	2.1	-	117.5	14.6	B
⑫		300	1.9	-	9.6	1.1	B
⑬		350	-	-	17.0	2.1	B
⑭		400	-	-	9.0	1.1	B

注) $\tau_{au,df}$: 火災時付着破壊強度, $\tau_{au,re}$: 火災後残存付着破壊強度, FF(最終破壊モード), S: 鋼材破断, B: 付着破壊, ⑦試験体温度 301°C: 目標温度 200°Cより高温なのは想定以上に荷重を保持したことによる。付着破壊強度 (N/mm²)

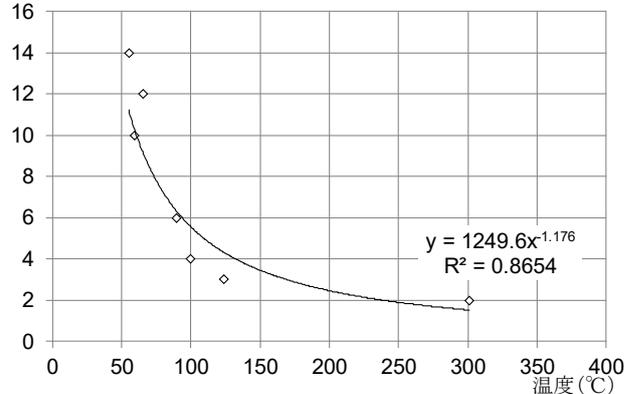


図-5 温度と付着破壊強度との関係 ①-⑦(火災時(高温時))

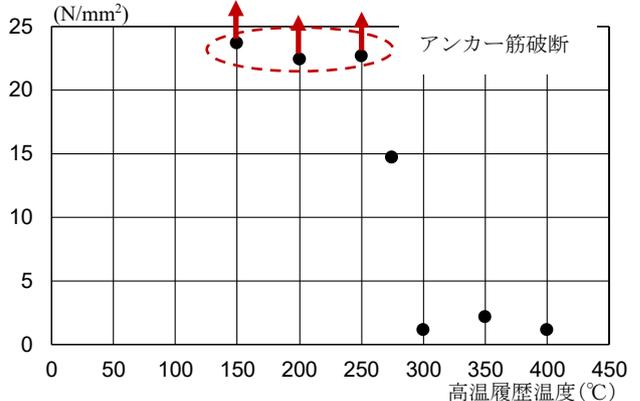


図-6 高温履歴温度と残存付着強度との関係

⑧-⑭(火災後(高温履歴後))

表一5 接着剤物性値試験

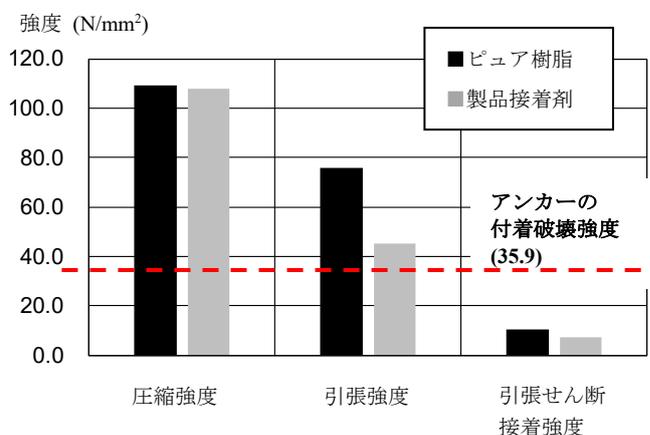
試験種類	JIS 番号	試験体形状
圧縮強度	K7181	φ5mm × 6.25mm
引張強度	K7161	175mm × 20mm × 3mm (ISO-527 Type 1B)
引張せん断接着強度	K6850	12.5mm × 25mm (接着面)

カーの付着性能試験(案)^{15),16)}に準じており、アンカー筋 M12、穿孔径 φ14mm、定着長 72mm、母材温度は 23 度前後の常温(室温)にて行ったものである。かつ、引張せん断接着強度の他に、有機系樹脂接着剤の物性の指標となる、圧縮強度と引張強度についても物性試験を行い、接着系アンカーの付着強度試験の付着破壊強度との比較を行った。これは、電気炉の設置など少々複雑となる接着系注入方式あと施工アンカーの高温時の付着破壊強度の試験方法や評価方法を考案するにあたり、アンカーの付着破壊強度とピュア樹脂や製品接着剤の接着強度との間に相関性があれば、ピュア樹脂もしくは製品接着剤の接着強度から高温時のアンカーの付着破壊強度を評価できる可能性を有するものと思われたからである。しかしながら、表一6、図一7 より、エポキシ樹脂系カートリッジ型の接着系注入方式あと施工アンカーのうち、ピュア樹脂と製品接着剤いずれも、付着破壊強度との数値に乖離があり、また、ピュア樹脂と製品接着剤それぞれも物性値として必ずしも同様の数値を示すものではないことが認識できる。これは、接着剤の物性試験は、試験方法に基付いた測定値の代表的な数値を示したもので、その製品の特定や品質管理に用いるものであり、材料間の比較をするためのデータを意図して行われるものである。さらに、これは接着系アンカーの付着強度発現のメカニズムとも異なる。接着系アンカーの付着強度発現のメカニズムは、接着剤とコンクリート壁面の界面の接着力と摩擦力、並びに支圧力が複合的に発生している抵抗機構、又は、接着剤と異形鉄筋との界面においても同様の抵抗機構がそれぞれ複合的に発生しており、それらの抵抗機構が不均等に組み合わせられている。さらには、接着剤の物性試験は、試験片の厚みが 2mm～4mm の決まった形状のものであり、材料の流れ方向の強さを測っているが、実際に接着系あと施工アンカーとして使用される接着剤は、肉厚が 1mm～4mm とアンカー筋の呼び径によって差異があり、かつ、形状は円柱鋼管のような形であることから、単純なピュア樹脂と製品接着剤の物性試験による物性値と接着系アンカーの付着破壊強度とは必ずしも相関性を有しないことが改めて認識できた。

表一6 接着剤物性値試験

物性試験種類	注入方式接着系アンカー エポキシ樹脂系接着剤(A)	
	ピュア樹脂	製品接着剤
圧縮強度 (MPa)	109.0	108.0
引張強度 (MPa)	75.7	45.1
引張せん断接着強度 (MPa)	10.3	7.5
アンカーの付着破壊強度 ETAG 001 (MPa)	—	35.9

注) アンカーの付着破壊強度 ETAG 001 では、接着系あと施工アンカー(製品接着剤)の常温時の付着破壊強度の試験方法・評価方法を記載しているため、ピュア樹脂の項目は「—」とした。



図一7 物性試験結果

(2)火災時(高温時)及び火災後(高温履歴後)の
付着破壊強度の試験方法

本実験の試験方法に基き実験で得られた火災時火災後の付着破壊強度を常温時の予測引張破壊荷重算出式¹⁶⁾の付着応力度を式(9)の火災時付着破壊強度($\tau_{au,df}$)と式(10)の火災後残存付着破壊強度($\tau_{au,re}$)に置き換えて算出することで、火災時(高温時)付着破壊強度と火災後(高温履歴後)残存付着破壊強度を評価することができ、火災時(高温時)・火災後(高温履歴後)の付着破壊強度の試験方法の可能性を示していると言える。特に、火災後(高温履歴

後)の残存付着破壊強度は、長期荷重が作用した状態で火災時(高温時)にその長期荷重を支持し、その後地震動等の短期荷重が作用した際に、接着系注入方式あと施工アンカーを使用した接合部材が損壊しないことを耐火設計時に行うためのものでもある。また、火災後(高温履歴後)の接着系注入方式あと施工アンカーを使用した接合部材の再使用性の検討においても重要となる。

■付着破壊時火災時(高温時)引張荷重 $T_{a3pu,df}$ (N)

$$T_{a3pu,df} = \tau_{au,df} \cdot \pi \cdot d_a \cdot l_e \quad (9)$$

■付着破壊時火災後(高温履歴後)残存引張荷重 $T_{a3pu,af}$ (N)

$$T_{a3pu,af} = \tau_{au,re} \cdot \pi \cdot d_a \cdot l_e \quad (10)$$

ここで、

$\tau_{au,df}$: 火災時(高温時)付着破壊強度(N/mm²)

$\tau_{au,re}$: 火災後(高温履歴後)残存付着破壊強度(N/mm²)

5. まとめ

本研究は、長期部材接合を想定し、市場で広範に使用されている接着系注入方式あと施工アンカーのエポキシ樹脂系製品接着剤(A)(カートリッジ型)について、火災時(高温時)及び火災後(高温履歴後)の付着破壊強度の載荷加熱実験を実施し、その付着破壊強度試験方法の適用の可能性を示した。

6. 今後の課題

接着系注入方式カートリッジ型のあと施工アンカーは、火災時(高温時)及び火災後(高温履歴後)の実験や研究は極めて少なく、未だ未解明な部分が多い中、限られた実験的研究ではあったが、その結果に基いた付着破壊強度の算出を行い、付着破壊強度の試験方法を提案した。今後とも、実際の適用を考えた鉄筋径(異形鉄筋の形状)・埋込み長さ・コンクリート強度・高温暴露時間・荷重載荷条件・接着剤など様々なパラメータや条件についての同様の実験を継続する必要がある。また、今後、ピュア樹脂・製品接着剤の高温時、高温履歴後の物性値の検討を行い、樹脂・接着剤の高温時・高温履歴後の物性値と接着剤の付着破壊強度との相関性について分析し、常温時を含めた高温時付着強度発現のメカニズムの理論的解析的解明を試みる必要がある。さらに、接着系注入方式あと施工アンカー(カートリッジ型)の高温時高温履歴後の実大の加熱載荷実験を行い、その結果に基いた実験的解析的検討も必要である。

参考文献

1) 川西泰一郎: ひばりが丘団地におけるルネッサンス計画 1-住棟単位での改修技術の開発, 独立行政法人都市再生機構都市住宅技術研究所, Vol. 48, No.10, pp.34-pp.40, コンクリート工学, 2010.10

2) 大和征良, 渡辺一弘, 辻和幸, 高橋宗臣, 山口陽二: 既存 RC 系建築物による改修工法の周辺環境影響評価に関する実験的研究, 既存壁式構造集合住宅におけるあと施工アンカー工事・躯体の切断撤去工事の騒音, 振動, 粉じん比較検証実験とその適用性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 構造IV, pp.1081-1084,

3) 大森正秀他: あと施工アンカーの長期許容応力度に関する研究, その1 研究概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C2, 構造IV, pp.635-636, 2011.8

4) 相葉雅史他: あと施工アンカーの長期許容応力度に関する研究, その2 付着強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C2, 構造IV, pp.637-638, 2011.8

5) 日本建築学会: 火災診断および補修・補強方法指針・同解説, 2015

6) 大和征良, 池田憲一: 高性能エポキシ樹脂系注入方式接着系あと施工アンカーの火災時及び火災後の付着破壊強度に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.87-88, 2015.9

7) 大和征良, 池田憲一: 長期部材接合を想定した接着系注入方式あと施工アンカーの高温履歴後の残存付着強度に関する実験的研究, 日本建築学会大会(九州)学術講演梗概集, 防火, pp.105-106, 2016.8

8) 瀬戸口英恵, 阿部隆英, 高瀬裕也, 佐藤真一郎, 高橋宗臣, 佐藤貴志: 湿式コアドリル工法によるあと施工アンカーの性能確認実験 (その2) 注入式アンカーを用いた付着性能実験, 日本建築学会学術講演梗概集(北陸), pp.149-150, 2010 年9月

9) (一財)日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・改修設計指針・同解説 2017, 2007年7月

10) (一社)日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック 2017, 2017年2月

11) REPORT No. 26033756-HIT-HY 200-A&R on Hilti HIT-HY200 injection systems in conjunction with concrete reinforcing bar and subjected to fire exposure, CSTB, 2014

12) (一社)日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規程・同解説 2018, 2018年12月

13) (一社)日本建築学会: 各種合成構造設計指針・同解説 2011, 2010年11月

14) 日本樹脂施工協会: 樹脂注入施工ハンドブック, 2.1.2 建築・土木用エポキシ樹脂, (3)耐熱性, 1)熱老化性, pp.19-pp.20, 1988.4

15) ETAG 001 : Metal Anchors for Use in Concrete, Part 5: Bonded Anchors, 2013

16) 大和征良, 山本泰稔, 近藤龍哉: 接着系あと施工アンカーの予測引張破壊荷重に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, pp.1399-1404, Vol.35, No.2, 2013