

論文 接着系あと施工アンカーの火災後の残存引抜き耐力に関する実験

吉敷 祥一^{*1}・吉田 正友^{*2}・橋本 智子^{*3}・小隈 幸一^{*3}

要旨: あと施工アンカーは、仕上げ工事、設備機器の取り付けなどでの使用が主流であり、構造材への使用はRC躯体の耐震補強時に限定されている。近年、構造材に対して自由度の高い使用が望まれつつあるが、未だ様々な課題が残されている。本論文では火災加熱を受けた接着系あと施工アンカーの残存引抜き耐力に着目した構造実験を実施した。実験より火災加熱の冷却後において引抜き耐力が低下することが確認できた。これに対して、高温加熱によるコンクリート強度、付着強度の低下を反映させることにより、既往の耐力評価式で火災加熱を経験した接着系あと施工アンカーの引抜き耐力を評価できることが分かった。

キーワード: 接着系あと施工アンカー, 火災, ひび割れ, 引抜き耐力

1. はじめに

あと施工アンカーは、仕上げ工事、設備機器の取り付けなどでの使用が主流であり、現在、構造材への使用はRC躯体の耐震補強時に限定されている。しかしながら、最近では構造材に対してより自由度の高い使用が望まれており、建築基準法整備の一環として長期許容応力度に関する検討も行われている¹⁾など。

あと施工アンカーを構造材に対して積極的に使用するためには、未だ様々な課題が残されている。例えば、既に先付けアンカーボルトで検討されている地震時のひび割れ²⁾など、火災加熱³⁾などの影響把握が挙げられる。本研究では接着系あと施工アンカーを多様な用途で使用するための設計資料を得ることを目的とし、上記のひび割れ、火災加熱が引抜き耐力に及ぼす影響を把握する一連の研究を実施する。本論文では、このうち火災加熱の影響(図-1)に着目した載荷実験を行い、主としてコンクリートのコーン状破壊、接着剤近傍の付着破壊に至る際の残存引抜き耐力を把握する。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体は、コンクリート塊に埋め込んだ接着系あと施工アンカーである。試験体の詳細を図-2に示す。コンクリート塊は平面寸法1.95x1.2m、高さ0.7mの直方体であり、上面にM16の全ねじ棒(PC鋼棒(C種))を接着系あと施工アンカーとして取り付ける。ここでアンカーに高強度のPC鋼棒(C種)を用いたのは、アンカー軸部の破断を避け、コンクリートのコーン状破壊や付着破壊に至らしめるためである。コンクリート塊の下面には、火災加熱試験時の吊り下げ用ボルトをあらかじめ仕込むとともに、その周辺に補強用の鉄筋を配した。ただし、アンカーの

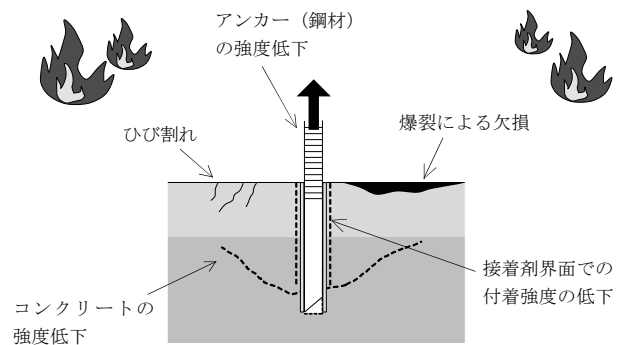


図-1 火災加熱を受けた接着系あと施工アンカーにおける引抜き耐力の低下要因

最大埋込み長さ程度の範囲(上面から200mm)については無筋としている。

実験パラメータは、接着系あと施工アンカーに用いる接着剤の種類、加熱時間(温度)、およびアンカーの埋込み長さ l_e とへりあき距離 c_n である。試験体一覧を表-1に示す。接着剤はエポキシ系、ウレタン系の2種、加熱時間は後述する加熱曲線を用いて0(加熱せず)、30、60分の3種とした。アンカーの埋込み長さ l_e は80、112、160、192、272mmの5種とし、アンカー軸部の直径 d_a に対してそれぞれ5、7、10、12、17 d_a に相当する。また、へりあき距離 c_n については80、160、480mm(5、10、30 d_a)の3種とした。ただし、最大値である480mmは隣接するアンカーまでの距離であり、実際のへりあき距離はさらに大きい。なお、アンカー間の距離はいずれの方向においても450mm以上、パラメータでない方向のはしあき距離は300mm以上確保してある。これらは耐力評価⁴⁾において影響のない160mm(10 d_a)に対して十分に大きい。

試験体は、1体のコンクリート塊において接着剤の種類と加熱時間を統一し、図-2の平面図に示すように埋込

*1 東京工業大学 建築物理研究センター 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 大阪工業大学 八幡工学実験場 特任教授 博士(工学)

*3 日本ヒルティ(株) 技術本部

み長さごとに平面配置を変えることによってへりあき距離を変化させた。このコンクリート塊を接着剤の種類と加熱時間が異なる6体製作することで、試験体となる合計72本の接着系あと施工アンカーを用意した。

接着系あと施工アンカーは、コンクリート打設日から5週間が経過した後にφ18mmの穿孔を行い、穿孔を十分に清掃した後に取り付けた。施工方法は注入方式である。また、火災加熱試験は接着系あと施工アンカーを取り付けた日から1週間が経過した後にいった。引抜き実験は、火災加熱試験後に自然冷却させ、それぞれの火災加熱試験日からさらに3日が経過した後に実施した。

2.2 火災加熱試験

火災加熱試験のセットアップを図-3に示す。火災加熱試験は大阪工業大学 八幡工学実験場が保有する大型水平加熱炉にて行った。試験体は接着系あと施工アンカーが下面となるようコンクリート塊を反転させ、鉄骨梁によって吊り下げ、コンクリート表面を加熱した。バーナー位置は側面の片側にほぼ均等に4ヶ所ずつある。コンクリート塊は接着剤の種類が異なる2体を1組として炉内に吊り下げ、耐火被覆を施したALC版等によって隙間を埋めて炉内の温度をほぼ一定に保った。

火災加熱試験は、耐火試験の国際規格であるISO 834で定められている標準加熱曲線に基づき行い、30、60分の2種類の加熱時間を採用した。それぞれの加熱時間に対する炉内平均温度は842、945℃が目標値となる。ISO 834

表-1 試験体一覧 (パラメータの組み合わせ)

へりあき距離 : c_n [mm]	80, 160, 480					
	埋込み長さ : l_e [mm]	80	112	160	192	272
エポキシ系	0分	○	○	○		○
	30分	○	○	○		○
	60分	○	○	○		○
ウレタン系	0分	○	○	○	○	
	30分	○	○	○	○	
	60分	○	○	○	○	

※○印を用意した

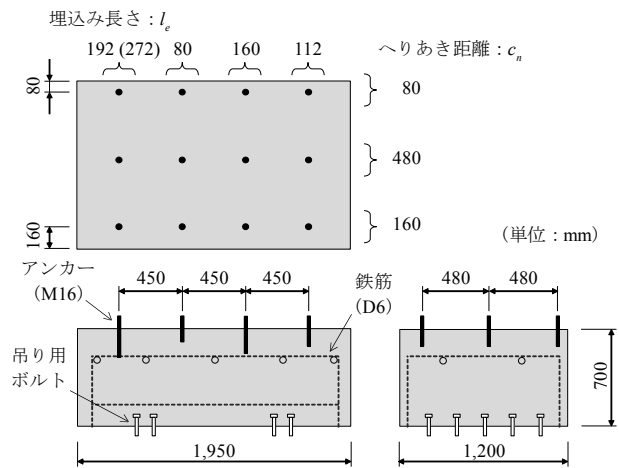


図-2 試験体の概要 (コンクリート塊, アンカー配置)

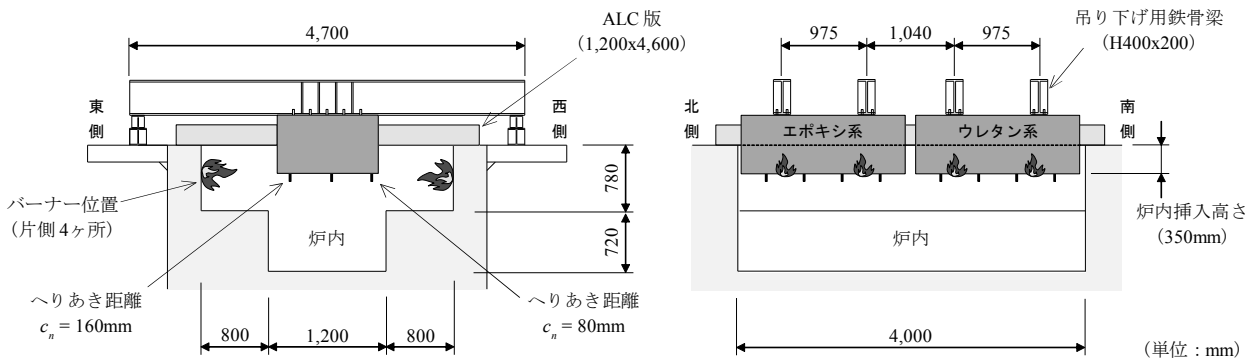


図-3 火災加熱試験のセットアップ (炉内断面図)

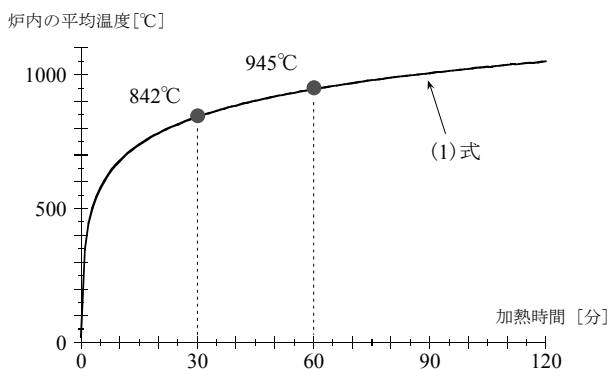


図-4 加熱曲線

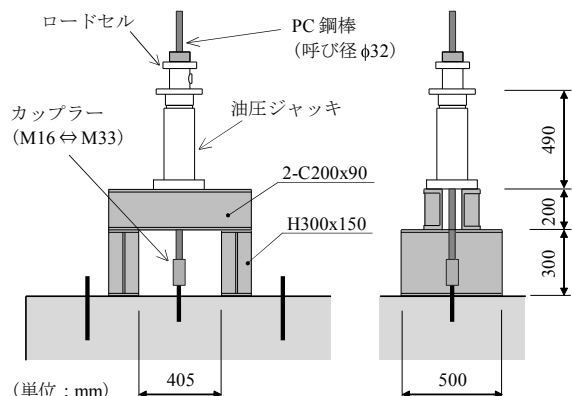


図-5 引抜き実験のセットアップ

の標準加熱曲線による時間 t [分]における炉内平均温度 T [°C]は、図-4に示すように描け、次式で表される。

$$T = 345 \log_{10}(8t+1) + 20 \quad \dots (1)$$

また、本実験ではコンクリートのシリンダー供試体も加熱試験ごとに3本ずつ炉内にて火災加熱した。

2.3 引抜き実験

引抜き実験のセットアップを図-5に示す。荷重装置は、接着系あと施工アンカーであるM16の全ねじ棒(PC鋼棒)を露出部分でカップラーを介して呼び径 $\phi 31$ のPC鋼棒に接続し、この太径のPC鋼棒を加力梁、センター

表-2 コンクリートの圧縮試験結果

		材齢 [日]	供試体数	ヤング係数 [N/mm ²]	圧縮強度 [N/mm ²]
加熱時間	0分	45	3	20800	28.7
	30分		3	1800	10.4
	60分		1	—	1.5

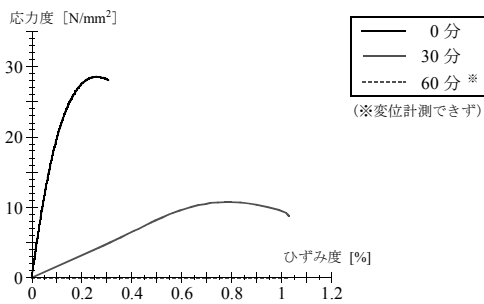
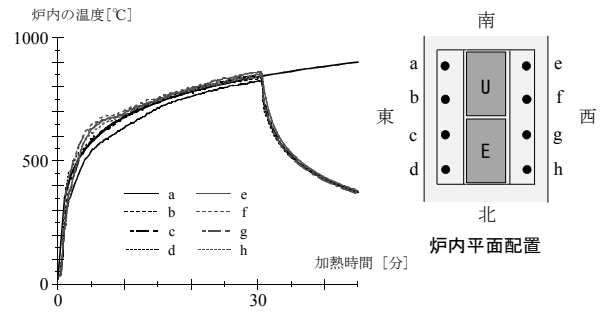
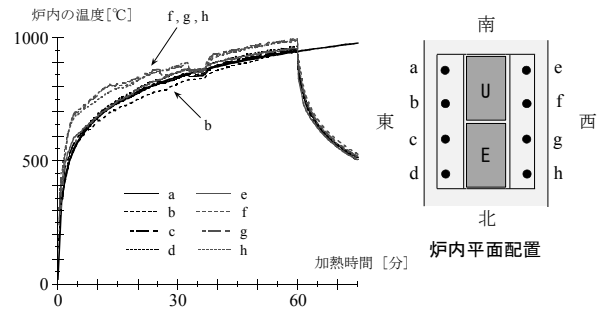


図-7 コンクリートシリンダー供試体の圧縮試験

ホールジャッキ、ロードセルに通して、最上部でナットにより固定する。加力梁は接着系あと施工アンカーから両端に200mm (12.5 d_a) 離れた位置で支持し、自己釣合型の荷重装置を構成する。コンクリートのコーン状破壊耐力は破壊面を45度として算定するが、本実験装置では埋込み長さ192mmより広い位置に反力を確保した条件となっている。実験はセンターホールジャッキによりアン

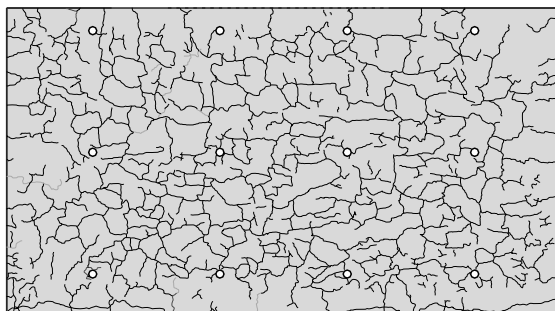


(1) 30分加熱時の温度変化

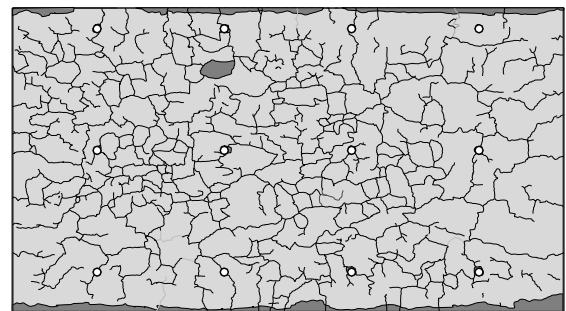


(2) 60分加熱時の温度変化

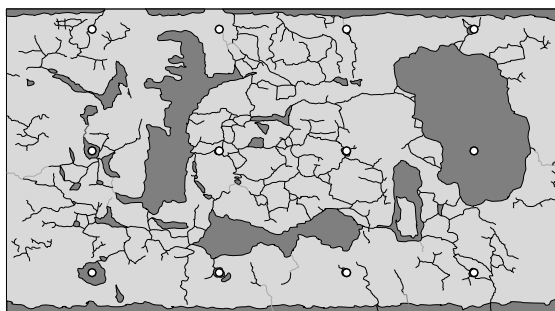
図-6 火災加熱試験における炉内の温度変化



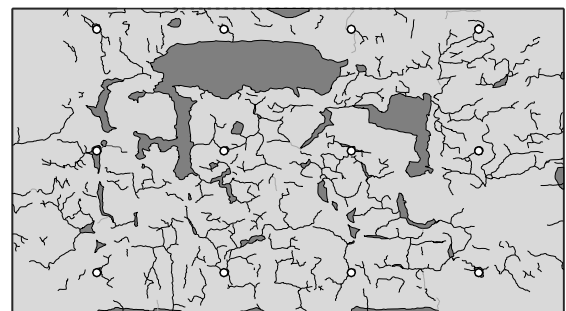
(1) 30分加熱試験後(エポキシ系)



(2) 30分加熱試験後(ウレタン系)



(3) 60分加熱試験後(エポキシ系)



(4) 60分加熱試験後(ウレタン系)

図-8 火災加熱試験後のコンクリート表面(アンカー設置面)におけるひび割れ状況

カーに引抜き力を与え、試験体が最大荷重 P_{max} （以後、引抜き耐力）を発揮し、その後、引抜き耐力の半分程度以下に荷重が低下するまで行った。ただし、埋込み長さが272mm(17 d_a)と最も大きい試験体については、PC鋼棒のねじ部に降伏が確認された時点で载荷を終了している。

3. 実験結果と考察

3.1 火災加熱試験の結果

火災加熱試験における炉内の温度変化を図-6に示す。60分加熱試験ではやや西側の温度の立ち上がりが高くなったが、炉内温度の平均では、ISO 834の標準加熱曲線をほぼ再現できている。

次いで、火災加熱試験ごとに設置したコンクリートのシリンダー供試体による圧縮試験結果を図-7、表-2に、また火災加熱試験後のコンクリート塊の上面におけるひび割れ状況を図-8に示す。シリンダー供試体による圧縮強度は、引抜き実験当日で平均28.7N/mm²であるが、30分加熱を経験したものは10.4N/mm²、60分加熱を経験したものは1.5N/mm²にまで低下している。

火災加熱試験を経験したコンクリート塊の上面(図-8)をみると、30分加熱後では多数のひび割れが観察され、60分加熱後では爆裂による表面コンクリートの剥離が観察された。ひび割れの最大幅は、30分加熱後では0.95mm程度、60分加熱後では2.2mm程度であった。また、爆裂によるコンクリート表面の剥離は、最大のもので深さ27mm程度、範囲198,000mm²程度に及んだ。

3.2 荷重-変形関係(引抜き実験)

接着剤にエポキシ系樹脂を用いた試験体について、引抜き実験より得られた荷重-変形関係を図-9に示す。縦軸の荷重 P はロードセルの計測値、横軸の変形 δ はアンカー上部のカップラー位置に取り付けた変位計の計測値である。図は左端から右端へと埋込み長さ l_e が80, 112, 160, 272mm(5, 7, 10, 19 d_a)と大きく、また上段から下段へとへりあき距離 c_n が80, 160, 480mm(5, 10, 30 d_a)と大きい試験体(4×3=12種)の結果を示しており、さらに線種の違いにより加熱時間を表している。なお、縦軸のスケールは埋込み長さごとに変化させている。

火災加熱を行っていない常温時(0分)では、埋込み長

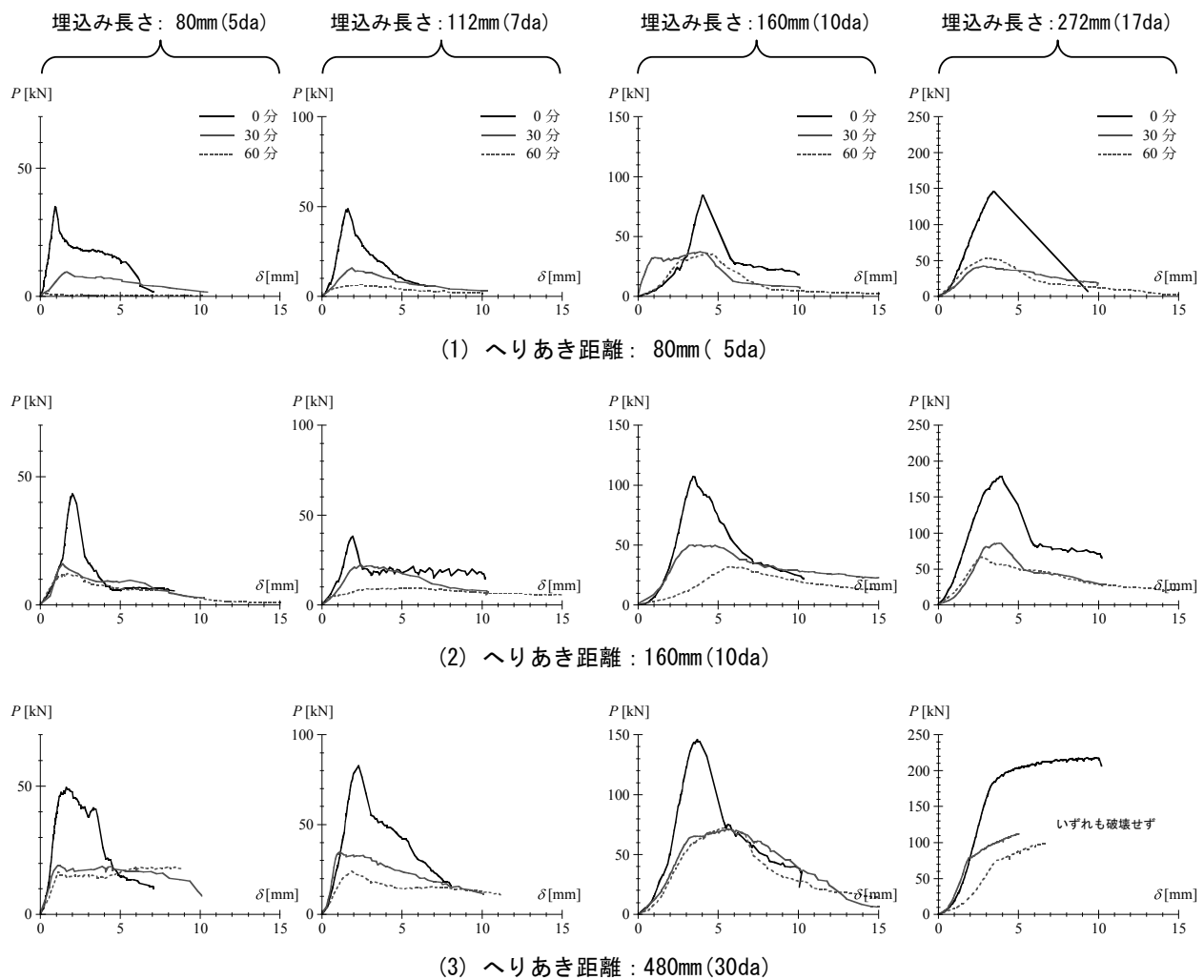


図-9 荷重-変形関係(エポキシ系)

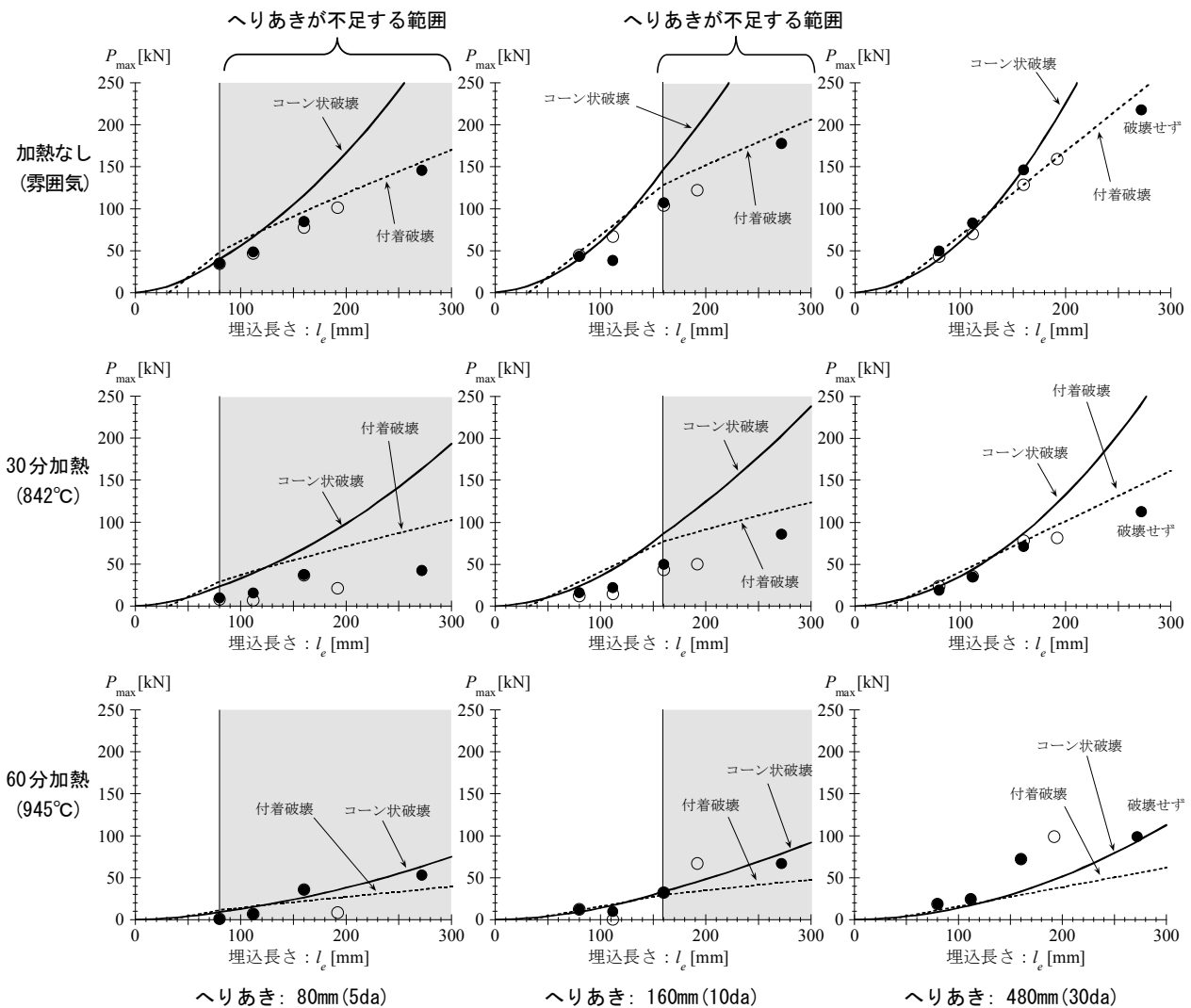


図-10 引抜き耐力の実験結果と耐力評価式による計算結果の比較 (●: エポキシ系, ○: ウレタン系)

さが大きくなる(左端→右端)ほど、また、へりあき距離が大きくなる(上段→下段)ほど、接着系あと施工アンカーが発揮できる引抜き耐力 P_{max} が大きくなっている。

これに対して、30分加熱後の引抜き耐力 P_{max} は、埋込み長さとのへりあき距離の増加に応じて上昇する傾向は同様であるが、耐力の大きさそのものは常温時の半分程度以下にまで耐力が低下していることが分かる。一方、60分加熱後の引抜き耐力 P_{max} では、30分加熱後に対して耐力が低下しているものと、ほぼ同程度の耐力を発揮しているものがある。耐力低下が見られるのは、へりあき距離、埋込み長さが小さい試験体である。特に埋込み長さ、へりあき距離ともに80mm(5 d_a)と最も小さい試験体では引抜き耐力がほぼゼロとなる結果が得られている。

引抜き耐力発揮時の変形についてみると、多くの試験体では火災加熱後は剛性も低下しており、常温時とほぼ同程度の変形で引抜き耐力を発揮している。

3.3 引抜き耐力の評価(引抜き実験)

(1) 耐力評価式

前節の荷重-変形関係より得られた引抜き耐力に対し

て、既往の耐力評価式⁴⁾の適用について検討する。まず、コーン状破壊耐力 P_{a2} については、破壊面の有効投影面積 A_c とコーン状破壊に対するコンクリートの引張強度 σ_t の積として表される。なお、へりあき距離の不足による耐力低減は、有効投影面積の減少として反映される。

$$P_{a2} = \sigma_t \cdot A_c \quad \dots (2)$$

ここで、 σ_t : コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度 (= $0.31\sqrt{F_c}$)

一方、接着剤とコンクリートの界面における付着破壊による引抜き耐力 P_{a3} は、アンカーの表面積と付着強度 τ_a の積として表せる。へりあき距離の不足による低減係数 α_n については、文献4)に依る。

$$P_{a3} = \alpha_n \cdot \tau_a \cdot \pi \cdot d_a \cdot (l_e - 2d_a) \quad \dots (3)$$

ここで、 α_n : へりあき不足による低減係数 ($c_n < l_e$ のとき、 $\alpha_n = 0.5(c_n/l_e) + 0.5$)

(2) 実験結果と計算結果の比較

引抜き実験より得られた引抜き耐力 P_{\max} を、横軸を埋込深さ l_e として図-10に示す。図は左端から右端へとへりあき距離 c_n が 80, 160, 480mm (5, 10, 30 d_n) と大きく、また上段から下段へと加熱時間が長い試験体の結果を示しており、さらにプロットの違いにより接着剤を表している。また、図中の着色した領域は、埋込み長さ l_e がへりあき距離 c_e より小さい範囲である。

これら実験結果に対して、(2), (3)式を用いた計算結果をそれぞれ太実線、破線にて併せて示す。(2)式のコンクリート基準強度 F_c については、加熱時間に応じてそれぞれのシリンダー供試体より得た圧縮強度(表-2)を用いて計算した。一方、(3)式の付着強度 τ_a については、文献4)ではコンクリート強度 21 N/mm^2 を基準として $\sqrt{F_c/21}$ の関係を用いて強度を変化させている。ここでは常温時の付着強度には 20 N/mm^2 を用い、火災加熱試験後の付着強度には先の関係を用いてコンクリート強度の常温時からの低下率の平方根で強度低下するとし、それぞれ $12.0, 4.6 \text{ N/mm}^2$ として計算した。なお、多くの試験体の破壊形式は、浅いコーンを伴う付着破壊であった。

上記の材料強度の仮定に基づく計算結果は、火災加熱を経験したアンカーの引抜き耐力の低下傾向をよく捉えている。30分加熱後の試験体については、へりあき距離の不足による耐力低下傾向もよく再現できており、文献4)の低減係数 α_n 、および付着強度へのコンクリート強度の反映が、火災加熱後も有効であることが確認できる。一方、60分加熱後の試験体では、計算結果が実験結果を下回る試験体が多く、シリンダー供試体により代表させたコンクリート強度では強度低下を十分に反映できていないと言える。今後、高温加熱後の付着強度を確認するための要素実験が必要である。

4. まとめ

本論文では、接着系あと施工アンカーの引抜き耐力に及ぼす火災加熱の影響に着目した構造実験を行った。本実験で得られた結果を以下にまとめる。

[1] 火災加熱の冷却後に接着系あと施工アンカーが発揮できる引抜き耐力は低下する。また、その程度は埋込み長さ、へりあき距離ともに小さい方が顕著で

あった。一方、接着剤(エポキシ系、ウレタン系)の違いが残存引抜き耐力に及ぼす影響は小さかった。

[2] 加熱時間30分(842℃)では、付着強度 τ_a にシリンダー供試体におけるコンクリート強度の低下を反映することにより、実験における引抜き耐力の低下を十分に説明できた。また、へりあき距離の不足による影響に関しても、文献4)の低減係数 α_n の高い適用性が確認できた。

[3] 加熱時間60分(974℃)では、付着強度 τ_a にシリンダー供試体におけるコンクリート強度の低下を反映した耐力の計算結果は、実験結果を過小評価する結果となった。

今後の課題としては、高温加熱後の付着強度の低下傾向を把握するための要素実験、火災加熱時に外力が作用した状態での実験が必要であると考えている。

参考文献

- 1) 大森正秀ほか：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、pp.635-636、2011.8
- 2) 稲田 扶、滝口克己：コンクリートに埋め込まれたボルトの引抜き耐力にひび割れが及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.721-722、1994.9
- 3) 瀧口克己、橋本 純：熱を受けるコンクリート埋め込みボルトの引抜き耐力に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集、第563号、pp.131-137、2003.1
- 4) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010.11

謝辞

本研究は、大阪工業大学 工学部建築学科の卒業研究(担当:猪熊雅仁君、緑本紗季さん)として実施しました。実験計画に際しては日本ヒルティ(株)の大和征良氏にご助言いただきました。また、実験で使用したPC鋼棒については高周波熱錬(株)にご提供いただきました。実験に際しては、火災加熱試験では八幡工学実験場 技術員の安盛義人氏、野呂純之氏に、引抜き実験では大学院生の巽信彦君、卒論生の佐藤亮太君にご協力いただきました。ここに記して関係各位に謝意を表します。