コンクリートに埋め込まれた金属系アンカーの 引抜き特性に及ぼす高温加熱の影響

INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURE HEATING ON PULL-OUT PROPERTIES OF MECHANICAL ANCHOR EMBEDDED IN CONCRETE

松沢晃一*, 橘高義典**, 刈田祥彦***

Koichi MATSUZAWA, Yoshinori KITSUTAKA and Akihiko KATTA

Surface layer of concrete becomes the most heavily damaged part affected by high temperature heating when concrete structure is subjected to fire accident. In the surface layer of concrete structures, the anchor bolts are used for fixing the equipment or the seismic strengthening elements. This paper reports on the investigation into the influence of high temperature heating up to 1000°C on pull-out properties of two types of mechanical anchor embedded in concrete. Relationship between the pull-out strength of anchors and the fracture energy was also investigated.

Keywords : Mechanical anchor, Pull-out properties, High temperature heating, Concrete, Fracture energy

金属系アンカー, 引抜き特性, 高温加熱, コンクリート, 破壊エネルギー

1. はじめに

現在, 様々な用途に用いられているコンクリート構造物は, 供用期間中に多くの劣化因子の影響を受けるが, その劣化因子の1つに熱がある。コンクリートは熱の影響を受けると強度特性などの性質が変化するため, 長期にわたり熱の影響を受ける焼却施設や発電所施設などでは, 供用時のコンクリートに対して温度制限値が設けられている場合がある¹⁾。また, 火災時においても, 高温加熱の影響によりコンクリートの性質は変化する。そのため, 熱の影響を受けたコンクリートに関しては多くの検討がなされている。圧縮強度や引張強度は, 加熱温度の上昇や, それにともなう含水状態によって変化し, 高温になるほど低下すること^{2)~10)}, そして, 引張強度の低下は圧縮強度の低下より大きいこと^{11)~13)}などが報告されている。

熱の影響を受けたコンクリートの検討に関しては, 破壊力学的手法を用いた検討もなされており, 試験材齢, 加熱温度, 加熱期間を変えた切欠き梁3点曲げ試験では, 破壊エネルギーは温度上昇とともに増加し, 300°Cを境に低下すること, 養生期間28日までは破壊エネルギーが増加すること^{14)~16)}, また, くさび割れ試験では, 破壊エネルギーは450°Cでピークに達し, その後は低下することなどが報告されている¹⁷⁾。そして, 著者ら^{18), 19)}は, コンクリート強度, 試験材齢, 養生条件を変化させたくさび割れ試験により, 試験条件と, 破壊靱性試験から得られる破壊パラメータである初期結合応力および破壊エネルギーとの関係について検討している。

コンクリート構造物が, 火災などにより最も熱の影響を受ける部分は, 受熱部である部材の表層部であるが, その表層部には設備機器の固定や耐震補強などの用途のために, アンカーボルト(以下, アンカー)が用いられている場合が少なくない。前述のとおり, コンクリートは熱の影響を受けると強度特性などの性質が変化するため, 表層部に施工されているアンカーの引抜き特性も変化することが予想される。

アンカーに関しては, 工法, 種類が多様であり設計指針も刊行されている²⁰⁾。その中には, 熱に関する検討がなされているものもある。頭付きアンカーに関する検討では, 加熱時の最高温度500°C, 埋め込み深さ30mmについて, 加熱中および加熱冷却後の引抜き試験を行っており, 一定引張荷重が作用しているアンカーは高温加熱により破壊すること, 加熱冷却後であっても, アンカーの引抜き荷重は加熱温度に比例して低下し, 加熱温度500°Cでの引抜き荷重は, 常温時と比較して約50%となることが報告されている²¹⁾。接着系あと施工アンカーに関する検討²²⁾では, かぶり厚さを変化させてコンクリート中に埋め込んだエポキシ樹脂被覆アンカーについて, 加熱時の温度1050°C, 加熱時間3時間の加熱時の温度変化の測定および自然除熱した後に引抜き試験が行われている。その結果, アンカーの表面温度を200°C以下に抑制するには, かぶり厚さ100mm以上, 100°C以下にするためにはかぶり厚さ200mm以上が必要であることが報告されている。

* 首都大学東京大学院都市環境科学研究科建築学域
助教・修士(工学)

** 首都大学東京大学院都市環境科学研究科建築学域
教授・工博

*** 首都大学東京大学院都市環境科学研究科建築学域
博士前期課程

Assist. Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Graduate School of Urban
Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan Univ., M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Graduate School of Urban
Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Engineering, Tokyo Metropolitan
Univ.

アンカーの引抜き荷重と破壊パラメータである破壊エネルギーとの関係に関しては、Eligehausenら²³⁾が検討を行っている。頭付きアンカーの引抜き荷重について破壊力学による解析を行い、引抜き時の自由エネルギー（弾性ひずみエネルギー＋破壊エネルギー）の最小化により引抜き荷重を推定し、実験結果との相関が高いことを示している。また、橋高ら²⁴⁾は、様々な粗骨材を用いて作製した強度の異なるコンクリート中に埋め込まれた頭付きアンカーの引抜き試験および破壊靱性試験を行い、Eligehausenら²³⁾による評価式の有効性を確認するとともに、アンカー先端の径を考慮した評価式を提案している。

上述のように、頭付きアンカーや接着系あと施工アンカーに関しては、多くはないものの、高温加熱に対する検討もなされている。しかし、これらと同様に多く用いられている金属系アンカーに関しては、高温加熱に対する検討がなされていないのが現状である。そこで、本研究では、100℃から1000℃までの高温環境下に一定時間曝されたコンクリートに埋め込まれた金属系アンカーの引抜き特性について検討を行った。さらに、破壊力学的手法を用いて、引抜き荷重と破壊パラメータとの関係について考察を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

写真1に本研究で用いた金属系アンカー、表1にコンクリートの使用材料、表2に調合、表3に実験の要因と水準を示す。アンカーは、金属系アンカーである芯棒打込み式アンカーおよびアンダーカット式アンカーの2種類（両アンカーとも直径10mm）を用い、アンカーの埋め込み深さは30, 40, 50mmとした。コンクリートは、レディーミクストコンクリート工場（神奈川県相模原市）の2軸強制練りミキサ（公称容量1.7m³）を用いて製造された、呼び強度27、目標スランブ18cm、目標空気量4.5%のものを用いた。なお、コンクリートの製造から打込みまでの時間は約20分である。

供試体は、各試験条件につき、圧縮およびヤング係数測定用供試体（φ100×200mm）3体、破壊靱性試験用供試体（100×100×120mm）3体、アンカーの引抜き試験用供試体（250×250×150mm）3体とした。供試体は打込み後2日で脱型し、材齢13週まで標準養生を行い、加熱および各試験を行った。表4にフレッシュ性状と材齢4週および13週標準養生後の強度試験結果を示す。

金属系アンカーの施工には、通常、ハンマーが用いられるが、その場合、アンカーに対して垂直方向から衝撃を与えること、また、打撃による衝撃荷重を一定に保つことが困難であるため、施工誤差が実験結果に与える影響が懸念された。そこで、本研究では、油圧式万能試験機を用いてアンカーを施工することとした。施工時には、荷重と試験機の変位を測定し、アンカーの拡張が完了点到達後2kN増した時点で載荷を終了することとした。図1に結果例を示す。芯棒打込み式が3段階、アンダーカット式が2段階の荷重上昇を示しているが、これは、拡張部内側が芯棒打込み式で3段階、アンダーカット式で2段階拡張する構造となっているためである。また、芯棒打込み式と比較して、アンダーカット式の拡張完了時点での荷重が低いのは、削孔による拡張部の穴径が異なるためである。なお、アンカーは引抜き試験用供試体のコンクリート打込み側面（250×250mm）2面に行った（図2）。

写真1 金属系アンカー

表1 使用材料

材料	種類	記号	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度 3.16g/cm ³
細骨材	砕砂（相模原産）	S1	表乾密度 2.63g/cm ³ ，粗粒率 3.00
	砕砂（八王子産）	S2	表乾密度 2.63g/cm ³ ，粗粒率 3.00
	山砂（富津産）	S3	表乾密度 2.63g/cm ³ ，粗粒率 1.60
粗骨材	碎石（相模原産）	G1	表乾密度 2.66g/cm ³ ，実積率 60.0%
	碎石（八王子産）	G2	表乾密度 2.66g/cm ³ ，実積率 60.0%
混和剤	高性能 AE 減水剤	Ad	ポリカルボン酸系化合物

表2 調合（単位：kg/m³）

G _{max} (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S1	S2	S3	G1	G2	Ad
20	18	4.5	56.8	49.0	175	309	351	307	220	463	463	2.78

表3 実験の要因と水準

要因	水準
アンカー種類	芯棒打込み式，アンダーカット式
アンカー埋め込み深さ（mm）	30，40，50
加熱時最高温度（℃）	100，200，300，500，800，1000

表4 フレッシュ性状および強度試験結果

スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (kN/mm ²)	
		4 週	13 週	4 週	13 週
17.5	4.9	30.4	34.5	25.2	26.4

図1 アンカー施工時の荷重－変位曲線

図2 引抜き試験用供試体概要

図3 加熱履歴

2.2 加熱方法

図3に炉内での加熱履歴を示す。供試体加熱時の炉内最高温度は100, 200, 300, 500, 800, 1000℃とし、比較用として加熱なし(20℃)の供試体についても試験を行った。加熱には、プログラム調整器付きマuffle炉(炉内寸法 W310×D610×H310mm, 左右2面加熱)を用いた(図4)。炉内での均一加熱を行なうために、供試体は左右のヒーターからの距離が同一になるよう炉内の中央に設置した。昇温速度は0.5℃/minとし、炉内温度が目標温度に達した後は、その温度を1時間保持して加熱を終了した。そして、供試体温度が外気温度と同程度になるまで炉内で自然除熱し、試験を行った。

図5にコンクリートの中心および表面、また、アンカー先端部にK型熱電対を設置した供試体を昇温速度0.5℃/minで1000℃まで加熱した際の各部分の温度変化を示す。加熱中はコンクリート表面に対して、最大温度差20℃程度で内部が温度上昇し、除熱中の内外温度差は最大50℃程度であった。なお、炉内温度が1000℃に達してもコンクリート温度は1000℃には至らず、960℃程度であった。

2.3 試験方法

2.3.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108に準じて行なった。また、同時にコンプレッソメーターを用いてヤング係数を測定した(JIS A 1149)。

2.3.2 破壊靱性試験

破壊靱性試験は、供試体自重の影響や、炉内での均一加熱を考慮して、切欠き梁による3点曲げ試験方法^{25), 26)}と同様にモードI型(引張型)の破壊が小型供試体(100×100×120mm)で得られるくさび割裂試験(図6)を採用した^{27), 28)}。くさび割裂試験用供試体は、加熱前に供試体中央にダイヤモンドカッター(刃厚1mm)を用いてリガメント高さが50mmとなるように切欠きを入れ、くさびの挿入により引張破壊を生じさせることとした。試験に用いた治具の寸法などは、RILEMで提案されている方法²⁹⁾に準じた。また、最大荷重以降の軟化域を精度良く検出するため、試験には加力部、油圧装置、フィードバック機能を有する制御装置からなるクローズドループシステム型(閉回路機構)のサーボ・コントロール式油圧試験機(MTS社製)を用いた。なお、供試体の安定破壊が得られるように、切欠き端部の開口変位の変位速度を0.02mm/minに設定し、開口変位の計測には変位制御用の高感度クリップゲージを使用した。

2.3.3 破壊特性の評価

破壊特性の評価は、くさび割裂試験より得られる荷重-開口変位(CMOD)曲線を多直線近似法^{27), 30)-32)}により逆解析して求めた引張軟化曲線より算出される破壊パラメータ²⁶⁾によった。逆解析による多直線近似方法は、実験により求められた荷重-開口変位(CMOD)曲線のデータを利用して結合応力-開口変位(COD)の関係を非線形ひび割れ方程式の繰り返し演算により求める際に、計算により既に求めている一部の結合応力-開口変位(COD)関係を繰り返し演算の構成則として適用し、逐次解析をする手法を採用している。

破壊特性の評価は、破壊パラメータである破壊エネルギーにより評価した。破壊エネルギーは、引張軟化曲線で囲まれた面積であり、ひび割れ進展抵抗性を示す値となる。この値が小さいとひび割れは進展しやすく、逆に大きくなると、ひびわれが進展しにくいことを意味する。

図4 炉内での供試体配置および熱電対設置箇所

図5 加熱時の供試体各部分の温度変化

図6 破壊靱性試験(くさび割裂試験)概要

2.3.4 アンカー引抜き試験

アンカーの引抜き試験には油圧式引張試験機を用い、試験時の荷重および変位を測定した。また、アンカーの破壊特性を検討するために、アンカー施工表面の破壊面積、破壊深さ、引抜き後のアンカー拡張部の径も測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの力学特性

図7に圧縮強度と加熱温度の関係を示す。圧縮強度は加熱温度300℃までは同程度であり、その後は、加熱温度の上昇とともに直線的に低下している。

図8にヤング係数と加熱温度の関係を示す。ヤング係数は温度の影響を大きく受けるとされている^{7), 8)}。本研究では、加熱温度100℃で若干低下し、その後は、加熱温度の上昇とともにヤング係数が急激に低下している。

図7 圧縮強度と加熱温度の関係

図8 ヤング係数と加熱温度の関係

図9 くさび割裂試験による荷重－開口変位曲線

図10 破壊エネルギーと加熱温度の関係

表5 アンダーカット式アンカーの引抜き破壊形状（埋め込み深さ 40mm）

加熱温度	20℃	100℃	200℃	300℃	500℃	800℃	1000℃
破壊表面							
コーン側面							

3.2 コンクリートの破壊特性

3.2.1 荷重－開口変位曲線

図9にくさび割裂試験により得られた荷重－開口変位曲線を示す。加熱の有無や加熱温度に関係なく、全ての供試体で安定した荷重－開口変位曲線が得られた。最大荷重は加熱を行なわなかった供試体（20℃）と比較して、加熱温度 100℃で若干低下した後、200℃で増加して最大となっている。その後は、300℃で 100℃と同程度まで低下し、500、800、1000℃と加熱温度が上昇するとともに急激に低下している。また、最大荷重時のグラフ形状は、加熱温度が低い場合は尖っているが、加熱温度が高くなると次第に丸みを帯びるように変化し、最大荷重以降の荷重低下も加熱温度が低い場合は急勾配だが、加熱温度の上昇とともに緩やかな低下となっている。

3.2.2 破壊エネルギー

図10にくさび割裂試験における荷重－開口変位曲線を基に、多直線近似解析法によって求めた引張軟化曲線から算出された破壊エネルギーと加熱温度の関係を示す。破壊エネルギーは、加熱温度 300℃までは増加していき、その後は加熱温度の上昇とともに直線的に低下している。

破壊エネルギーは引張軟化曲線で囲まれた面積であるが、初期結合応力が大きく、開口変位の増加にともなう結合応力の低下が緩やかな場合に値が大きくなる。開口変位の増加にともなう結合応力の低下が緩やかとなる要因としては、加熱による微細ひび割れの発生が影響していることが考えられる。ひび割れが進展する際には、ひび割れ先端に破壊進行領域が形成される。その部分に欠陥が存在しなければ骨材などの影響を受けるものの、コンクリート中のひび割れはほぼ直線的に進展していく。しかし、微細ひび割れなどの欠陥が存在する場合には、ひび割れは、その微細ひび割れを介して進展するために、破壊が蛇行し、その結果、破壊に要するエネルギーが大きくなると思われる。

写真2 アンカー引抜き時に割裂破壊した供試体

3.3 アンカーの引抜き特性

3.3.1 破壊特性

表5にアンカーの引抜き破壊形状の例として、アンダーカット式アンカーの埋め込み深さ 40mm の破壊形状を示す。芯棒打込み式、アンダーカット式ともに、ほとんどがコーン状破壊となったが、加熱温度 200℃以上では割裂破壊もみられた（写真2）。高温加熱によりコンクリートの引張強度が低下したためであると考えられる。なお、コーン状破壊をした供試体は、加熱温度が低いと破壊先端部のコンクリートの形状が鋭角だが、加熱温度の上昇とともに先端部の形状が緩やかとなり、コーンも下側（母材側）に膨らむ傾向にある。

図11に各アンカーのコンクリート表面の破壊面積と加熱温度の関係を示す。なお、本研究における破壊面積は、コーン破面の水平投影面積である。また、データが示されていない箇所は、アンカーの引抜き時に供試体が割裂破壊し、破壊面積が計測できなかったためである。

芯棒打込み式、アンダーカット式とも、埋め込み深さや加熱温度との関係について、明確な傾向はみられない。これは、高温加熱によりコンクリートの特性が変化するが、特に、表層部は影響が大きいためであると思われる。なお、グラフはコーン状破壊となった供試体の平均値を示しているが、同条件下でもばらつきは大きかった。

(a) 芯棒打込み式

(b) アンダーカット式

図 11 破壊面積と加熱温度の関係

(a) 芯棒打込み式

(b) アンダーカット式

図 12 破壊深さと加熱温度の関係

写真 3 加熱および引抜き試験後のアンダーカット式アンカー
(埋め込み深さ 40mm)

(a) 芯棒打込み式

(b) アンダーカット式

図 13 拡張部の径と加熱温度の関係

図 12 に各アンカーの破壊深さと加熱温度の関係を示す。なお、本研究における破壊深さは、コーン状破壊した際に、コンクリート塊がアンカーに付着していた部分の長さとした。また、データが示されていない箇所は、アンカーの引抜き時に供試体が割裂破壊し、破壊面積と同様に破壊深さが計測できなかったためである。

芯棒打込み式アンカーの場合は、加熱温度の上昇とともに若干ではあるが破壊深さが大きくなる傾向がみられる。これは、高温加熱によりコンクリート強度が低下し、その結果、アンカーの摩擦による定着力がコンクリート強度を上回ること、引抜き時のアンカーのすべり量が小さくなったと考えられる。アンダーカット式アンカーの場合は、埋め込み深さ 50mm のデータが異なっているが、コンクリートが加熱されても破壊深さはほとんど変化しない傾向にある。これは、アンダーカット式アンカーは、アンカー拡張部に相当する位置に拡張部が適合するような拡大穴を穿孔して定着するため、芯棒打込み式アンカーで起こるような摩擦によるすべりが少ないものと考えられる。

写真 3 に加熱後のアンカーの例として、引抜き試験を終えた埋め込み深さ 40mm のアンダーカット式アンカーを示す。加熱の有無によるアンカー自体の大きな変形などは確認されなかった。しかし、加熱温度の上昇とともにアンカー表面に施されているメッキの変色を確認された。また、加熱温度 800°C 以上では、メッキ部分の膨張も確認された。

図 13 にアンカー拡張部の径と加熱温度の関係を示す。アンダーカット式アンカーで拡張部の径に若干のばらつきがみられるが、高温加熱によってアンカー拡張部が、収縮や膨張などの影響を受けることはないものと思われる。

3.3.2 引抜き特性

図 14 および図 15 に各加熱温度におけるそれぞれのアンカー引抜き時における荷重-変位曲線を示す。載荷初期は、芯棒打込み式アンカーの勾配が急であるのと比較して、アンダーカット式アンカーは緩やかである。これは、アンカーの定着方法が異なるためであると考えられる。芯棒打込み式アンカーは、拡張部がコンクリート削孔部を押し広げるように定着するのに対し、アンダーカット式アンカーは、拡張部が適合するような拡大穴を穿孔して定着するため、初期のアンカーの定着力が異なっていると思われる。

また、荷重上昇後は、芯棒打込み式アンカーの荷重低下が緩やかなのに対し、アンダーカット式アンカーは比較的早く荷重が低下している。アンダーカット式アンカーは最大荷重後に破壊が進行するが、芯棒打込み式アンカーは最大荷重後、その荷重を維持したままアンカーと定着部である程度すべりが生じていると考えられる。

高温加熱の影響に関しては、両アンカーとも加熱温度の上昇とともに、最大荷重後の荷重低下が緩やかになっている。これは、高温加熱によりコンクリートに微細なひび割れが生じたため、引抜きによる破壊が直線的に進展せずに微細なひび割れを介して蛇行しながら進展したためであると考えられる。

3.3.3 引抜き荷重

図 16 に引抜き荷重と加熱温度の関係を示す。芯棒打込み式アンカーは、加熱温度 300°C まで引抜き荷重の変化は小さく、20°C と比較して $\pm 10\%$ の範囲を推移している。そして、加熱温度 300°C 以降になると、引抜き荷重は急激に低下し、500°C で 60~90%、800°C で 20~30%、また、1000°C では 10~20% に低下している。埋め込み深さが深いほど、加熱温度の上昇にともなう荷重低下は小さい。

図 14 各加熱温度における芯棒打込み式アンカーの荷重－変位曲線

図 15 各加熱温度におけるアンダーカット式アンカーの荷重－変位曲線

アンダーカット式アンカーは、20℃の引抜き荷重と比較して、埋め込み深さ 40mm では加熱温度 200℃まで引抜き荷重が低下し、300℃で再び増加している。一方、埋め込み深さ 30mm および 50mm では 300℃まで増加している。なお、その増加は 300℃で 140%程度である。アンカーの引抜き荷重は、埋め込み深さにより、加熱温度 300℃までは挙動が異なるものの、300℃以降では芯棒打込み式アンカーの場合と同様に、引抜き荷重は急激に低下し、500℃で 55～95%、800℃で 14～24%、そして、1000℃では 9～12%まで低下している。

高温加熱の影響を受けたコンクリートは破壊特性が変化し、ひび割れ進展抵抗性を示す破壊エネルギーは、養生条件や加熱時間によって異なるものの、加熱温度 300～500℃で最大となっている^{16)–19), 33)}。本研究においても、破壊エネルギーは加熱温度 300℃で最大となっており（図 10）、アンカーの引抜き荷重とコンクリートの破壊エネルギーには、関係性があると考えられる。そこで、アンカーの引抜き荷重とコンクリートの破壊エネルギーの関係性について後述することとする。

3.4 アンカーの引抜き荷重と圧縮強度の関係

図 17 に高温加熱後のそれぞれのアンカーの引抜き荷重とコンクリートの圧縮強度の関係を示す。芯棒打込み式、アンダーカット式のどちらの金属系アンカーを用いた場合も、既往研究³⁴⁾と同様に、高温加熱の影響を受けた場合でも、アンカーの引抜き荷重とコンクリートの圧縮強度との間には相関があることがわかる。

図 16 引抜き荷重と加熱温度の関係

図 17 引抜き荷重と圧縮強度の関係

3.5 アンカーの引抜き荷重と破壊エネルギーの関係

アンカーの引抜き特性に関する解析的研究としては、有限要素法を用いた検討が多くなされているが、破壊力学を用いた検討は少ないが、Eligehausen ら²³⁾がそれらについて検討を行っている。ここでは、頭付きアンカーを用いた検討を行っており、アンカーの引抜き時の最大荷重と破壊エネルギーの関係を式(1)で表している。

$$F_{\max} = f(\xi) \cdot (E_C \cdot G_F)^{0.5} \cdot h_V^{1.5} \quad (1)$$

ここに、 $F_{\max}$ ：アンカー引抜き時の最大荷重、

$f(\xi)$ ：アンカー引抜き時の荷重－ひび割れ進展関係から求めた最大値 (=2.1)

E_C ：コンクリートのヤング係数、

G_F ：コンクリートの破壊エネルギー、

h_V ：アンカーの埋め込み深さ

図 18 に本研究で得られた芯棒打込み式およびアンダーカット式の 2 種類のアンカーについての実測値と、Eligehausen らにより提案された式(1)により算出された計算値との関係を示す。この図をみると、どちらのアンカーを使用した場合でも、実測値と計算値は概ね比例関係にあることがわかる。また、本研究では母材に関して、高温加熱の影響を受けたコンクリートを対象としていることから、高温加熱の影響を受けた場合でも、アンカーの引抜き荷重と破壊エネルギーには相関があるものと推察される。しかし、実測値と計算値を比較すると、1:1 の対応とはなっておらず、計算値の方が大きくなっている。これには、用いるアンカーの種類や、それにとまう引抜き特性の違い、アンカーの径や埋め込み深さ、また、コンクリートの特性など様々な要因が考えられる。これらの関係に関しては、今後の課題とする。

4. まとめ

本研究では、100℃から 1000℃までの高温環境下に一定時間曝されたコンクリートに埋め込まれた金属系アンカーの引抜き特性について検討を行った。また、アンカーの引抜き荷重を評価する方法として、破壊力学的手法を用いて、引抜き荷重と破壊パラメータとの関係について考察を行った。その結果、本研究の範囲内で以下のことが明らかとなった。

- (1) アンカーの引抜き破壊形状は、芯棒打込み式、アンダーカット式の両アンカーとも、多くがコーン状破壊となるが、加熱温度 200℃以上では割裂破壊となる場合もある。また、加熱温度が低いとアンカー拡張部である破壊先端部のコンクリートの形状が鋭角であるが、加熱温度が上昇するとともに先端部の形状が緩やかとなり、コーンも、下側（母材側）に膨らむような形状になる傾向にある。
- (2) 表面の破壊面積と、埋め込み深さや加熱温度との関係については、明確な関係性はみられない。また、破壊深さと加熱温度の関係は、芯棒打込み式アンカーは加熱温度の上昇とともに若干ではあるが破壊深さが大きくなり、アンダーカット式アンカーは加熱されても破壊深さはほとんど変化しない傾向にある。
- (3) 加熱の有無によるアンカー自体の変形などは見られないが、加熱温度の上昇とともにアンカー表面に施されているメッキの変色、また、加熱温度 800℃以上では、メッキ部分の膨張が確認できる。

図 18 アンカーの引抜き荷重の実測値と計算値との関係

- (4) アンカーの引抜き特性は、両アンカーとも加熱温度の上昇とともに、最大荷重後の荷重低下が緩やかになる。
- (5) 芯棒打込み式アンカーの引抜き荷重は、加熱温度 300℃までの変化は小さいが、300℃以降になると急激に低下する。なお、埋め込み深さが深いほど、加熱温度の上昇にとまう荷重低下は小さい。
- (6) アンダーカット式アンカーの引抜き荷重は、埋め込み深さにより、加熱温度 300℃までは挙動が異なるが、300℃以降では芯棒打込み式アンカーと同様に急激に低下する。
- (7) 高温加熱後のアンカーの引抜き荷重と、コンクリートの圧縮荷重の関係には相関がある。
- (8) 既往の提案式により、アンカーの引抜き荷重とコンクリートの破壊力学パラメータである破壊エネルギーの関係について検討した結果、計算値と実測値は、概ね比例関係にある。また、この比例関係は、高温加熱の影響を受けた場合にも適応できると推察される。

謝辞

本研究を実施するにあたり、サンコーテクノ(株) 八木沢康衛氏に多大なるご協力をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：原子炉建屋構造設計指針・同解説、1988
- 2) 岸谷孝一、嵩英雄、椎葉大和、奥野亨：各種セメントモルタルの耐熱性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.157-158、1971.11
- 3) 岸谷孝一、嵩英雄、奥山治也、奥野亨：20～300℃の高温にさらされたコンクリートの諸性状に関する研究 その1、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.143-144、1972.10
- 4) 岸谷孝一、嵩英雄、奥山治也、奥野亨：20～300℃の高温にさらされたコンクリートの諸性状に関する研究 その2、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.145-146、1972.10
- 5) 長尾覚博、中根淳：高温履歴を受けるコンクリートの物性に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.457、pp.1-10、1994.3
- 6) 廣永道彦、蔵重勲、井元晴文：セメント硬化体の熱影響に関する検討－温度 65℃におけるセメント系材料の質変状況について－、電力研究所報告、N04013、2004
- 7) 安部武雄、古村福次郎、戸祭邦之、黒羽健嗣、小久保勲：高温度における高強度コンクリートの力学特性に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集、No.515、pp.163-168、1999.1
- 8) 松戸正士、西田浩和、片寄哲務、安部武雄：高温加熱後の超高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.603、pp.171-177、2006.5

- 9) 本田義博, 大岡督尚, 藤巻敏之: 高強度コンクリートの耐火性能に関する実験的研究, その1 定常温度の一軸試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2 分冊, pp.23-24, 1996.9
- 10) 河辺伸二, 一瀬賢一, 川口徹, 長尾覚博: 高温加熱を受けたコンクリートの強度特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.377-382, 2003
- 11) Sammy Y. N. Chan, Gai-fai Peng and John K. W. Chan : Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature, Material and Structure, Vol.29, pp.616-619, 1996.12
- 12) A. N. Noumowe, P. Clasters, G. Debicki, M. BolvinY. : High Temperature Effect on High Performance Concrete (70-600C) Strength and Porosity, SP-145 Durability of Concrete, Third International Conference, pp.157-172, 1994
- 13) P. A. Jähren : Fire Resistance of High Strength/Dense Concrete with Particular Reference to the Use of Condensed Silica Fume, SP-114, pp.1013-1049, 1989
- 14) Binsheng Zhang, Nenad Bicanic, Christopher J. Pearce, and Gojko Balabanic : Assessment of Toughness of Concrete Subject to Elevated Temperatures from Complete Load-Displacement Curve-Part II Experimental Investigations, ACI Materials Journal, September-October, pp.556-566, 2000
- 15) Binsheng Zhang and Nenad Bicanic : Residual Fracture Toughness of Normal- and High-Strength Gravel Concrete after Heating to 600°C, ACI Materials Journal, May-June, pp.217-226, 2002
- 16) B. Zhang, N. Bicanic, C. J. Pearce and G. Balabanic : Residual fracture properties of normal- and high-strength concrete subjected to elevated temperatures, Magazine of Concrete Research, 52, No.2, Apr., pp.123-136, 2000
- 17) Jiangtao Yu, Kequan Yu, Zhoudao Lu : Residual fracture properties of concrete subjected to elevated temperatures, Materials and Structures, DOI 10.1617/s11527-012-9823-4, 2012
- 18) 松沢晃一, 橋高義典: 高温加熱の影響を受けたコンクリートの破壊特性, 日本建築学会構造系論文集, No.680, pp.1477-1483, 2012.10
- 19) 松沢晃一, 橋高義典: 高温加熱の影響を受けたコンクリートの破壊特性に及ぼす材齢および養生の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.688, pp.1027-1034, 2013.6
- 20) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針・同解説 (改定), 2010
- 21) 橋本純, 滝口克己: 熱を受けるコンクリート埋め込みボルトの引抜きに関する実験, 日本建築学会構造系論文集, No.568, pp.123-129, 2003.6
- 22) 寺島悟, 沢出稔, 丹羽亮, 秋山友昭, 松崎育弘: 加熱されたコンクリートの耐火性評価とあと施工アンカーに関する研究, その1, 一面3時間加熱, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 分冊, pp.691-692, 1994.9
- 23) Elgehausen. R and Sawade. G. : A fracture mechanics based description of the pull-out behavior of headed studs embedded in concrete, RILEM report, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Chapman and Hall, pp.281-299, 1989
- 24) 橋高義典, 上村克郎, 高瀬克憲: 高強度コンクリートのボルト引抜き耐力に及ぼす粗骨材種類の影響, コンクリート工学年次論文報告集, 第13巻, 第1号, pp.245-250, 1990.6
- 25) RILEM AAC13.1 : Determination of the specific fracture energy and strain softening of AAC, RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials, pp.156-158, 1994
- 26) 切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法, JCI-S-001-2003
- 27) 橋高義典, 高橋仁智: 破壊力学手法によるひび割れ分散を考慮した繊維補強軽量コンクリートパネルの曲げ破壊解析, 日本建築学会構造系論文集, No.541, pp.37-42, 2001.3
- 28) 神山力, 橋高義典, 田村雅紀: 各種コンクリートの破壊特性の試験方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol23, No.3, pp.91-96, 2001
- 29) RILEM AAC13.1 : Determination of the specific fracture energy and strain softening of AAC, RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials, pp.156-158, 1994
- 30) 橋高義典, 上村克郎, 中村成春: コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析, 日本建築学会構造系論文集, No.453, pp.15-25, 1993.11
- 31) 橋高義典: 引張軟化曲線の多直線近似解析によるコンクリートの弾塑性破壊パラメータの評価, 日本建築学会構造系論文集, No.469, pp.17-24, 1995.3
- 32) G. V. Guinea, M. Elices and J. Planas : Stress Intensity Factors for Wedge-splitting Geometry, Int. J. of Fract. 81, pp.113-124, 1996
- 33) Graham Baker : The effect of exposure to elevated temperatures on the fracture energy of plain concrete, Materials and Structures, Vol.29, pp.383-388, 1996
- 34) 清水泰, 遠藤利根徳: あと施工アンカーの引き抜き耐力に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 分冊, pp.595-596, 1987.10

INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURE HEATING ON PULL-OUT PROPERTIES OF MECHANICAL ANCHOR EMBEDDED IN CONCRETE

Koichi MATSUZAWA^{}, Yoshinori KITSUTAKA^{**} and Akihiko KATTA^{***}*

^{*} Assist. Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan Univ., M. Eng.

^{**} Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.

^{***} Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Engineering, Tokyo Metropolitan Univ.

Surface layer of concrete becomes the most heavily damaged part affected by high temperature heating when concrete structure is subjected to fire accident. In the surface layer of concrete structures, the anchor bolts are used for fixing the equipment or the seismic strengthening elements. There are large variety of concrete anchors and construction methods in anchorage. And many design recommendations are published. About the anchors used for many situations, there are some investigations on pull-out behavior of chemical anchors subjected to high temperature heating. However, the properties on metal-based mechanical anchors affected by high temperature heating have not been cleared.

In this research, the influence of high temperature heating up to 1000°C on pull-out properties of two types of mechanical anchors, which were a hammer drive anchor and an undercut anchor, embedded in concrete was investigated. Relationship between the pull-out strength of anchors and the fracture energy was also investigated.

Follow conclusions were found within the range of this study

- (1) Failure mode of both the hammer drive anchor and the undercut anchor, loaded in tension was almost the cone type failure. However, the splitting type failure was observed when specimens were heated over 200°C.
- (2) Relationships between the heating temperature and the surface failure area or the anchorage depth were not clarified. The failure depth of hammer drive anchor tended to become deeper with the increase of heating temperature, but the failure depth of undercut anchor extensively changed with the increase of heating temperature.
- (3) The deformation of anchor by heating was not confirmed, but the color of gilding was changed with a temperature rising and expanded over 800°C.
- (4) Regard to load-displacement curves, the load reduction after the maximum load became gradual by the increase of heating temperature.
- (5) The pull-out strength of hammer drive anchor a little changed up to a heating temperature of 300°C, but decreased as the heating temperature beyond 300°C.
- (6) The pull-out strength of undercut anchor was changed by accordance of an anchorage depth up to a heating temperature of 300°C.
- (7) There is an association between the pull-out strength of anchor bolt subjected to high temperature heating and compressive strength of concrete.
- (8) Good correspondence was obtained between an actual value observed by the experiment and the theoretical value calculated by the homer evaluation formula substituting the pull-out strength and fracture energy. In addition, it was suggested that the formula could predicting the pull-out strength of anchor bolts under the condition of high temperature heating.

(2014年 4月10日原稿受理, 2014年 9月17日採用決定)