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

EXPERIMENTAL STUDY ON PULL-OUT BEHAVIOR OF CAST-IN-PLACE ANCHOR BOLT
IN CONCRETE UNDER HIGH TEMPERATURE

橋本 純*, 瀧口 克己**

Jun HASHIMOTO and Katsuki TAKIGUCHI

This paper presents experimental study on the behavior of cast-in-place anchor bolt embedded in concrete subjected to high temperatures up to 500°C, with the specific objectives to obtain basic experimental data and to examine the response of cast-in-place anchor bolts to high temperature exposure. The specimens with two kinds of embedment depth of anchor bolt, 3cm and 5cm, are prepared. Under constant tensile load applied to the anchor bolt, the specimen is heated and the relation between the pull-out strength and temperature at fracture is examined. As to the process of heating, two different rate of temperature elevation, 10°C/min. and 0.75°C/min, were prepared. As a result of the test, regardless of different parameters studied in this experiment, comparison with the earlier research results indicated that identical ratio of pull-out strength of anchor bolt was obtained when the same temperature of concrete surrounding the bolt head was applied.

Keywords : Concrete, Anchor bolt, high temperature, pull-out strength, embedment depth
コンクリート, アンカーボルト, 高温, 引抜き耐力, 埋め込み深さ

1. 序

現在コンクリート構造物はいたるところに存在している。火災や事故によって高温にさらされる可能性があり, 安全性を確保するには高温加熱を受けたコンクリート構造物の挙動が問題となる。加熱によってコンクリートの強度特性や熱特性は変化すると報告されている^{1)~6)}。また, 高温にさらされたコンクリートの内部では熱応力や熱膨張, 含水分の蒸発による水蒸気圧などが生じている⁷⁾⁸⁾。コンクリートの含水状態によっては局所的な爆裂が起こるという報告もある⁹⁾¹⁰⁾。したがって, コンクリート構造物が短期あるいは長期的に高温を受けた場合, その耐力の低下が懸念される。しかし, 上記に挙げた様々な要因が複雑に関係してくるため高温下のコンクリートの挙動に関する情報はいまだ十分に得られてなく, コンクリート構造物の熱挙動を把握することは困難である。したがって, コンクリート構造物に高温と外力を同時に作用させた場合の挙動を実験によって把握することは有効であると考えられる。

筆者らは, コンクリート構造物としてコンクリートに埋め込まれたアンカーボルトに着目した。アンカーボルトは構造躯体コンクリートへの機器類の固定などを目的として, その引抜き耐力にも期待して多く用いられている。アンカーボルトはコンクリートの表面に埋め込まれているため, コンクリートが加熱された場合引抜き耐力に熱の影響が顕著に表れると予想される。前報¹¹⁾において埋め込み深さ 3cm としたコンクリートに埋め込んだアンカーボルトの 500°C までの加熱下における引抜き実験及び結果を報告した。500°C までの高温下で引抜き耐力は最大 20% まで低下した。また 500°C に加

熱した後常温に冷却した場合, アンカーボルトの引抜き耐力は常温での耐力の 50% を示した。しかし, 前報で得られた結果はボルトの埋め込み深さや加熱経路が限定されている。アンカーボルトの引抜き耐力は埋め込み深さに大きく依存している。また, 加熱経路によってコンクリート内部の温度差が変化するため, 埋め込み深さや加熱経路を変えて実験データを蓄積することは, 高温下でのアンカーボルトの引抜き破壊の要因を把握するために必要である。

本研究では前報で報告した埋め込み深さ 3cm のアンカーボルトの加熱下での引抜き実験を加熱時の温度の上昇速度を変えて行うとともに, 埋め込み深さ 5cm とした同様の引抜き実験を行う。前報および本報で得られた実験結果より埋め込み深さの違うアンカーボルトの高温下での引抜き耐力を比較検討し, 高温加熱とアンカーボルトの引抜き耐力の関係を決定する要因について検討することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体

表 1 に試験体リスト, 表 2 に試験体に使用した鋼材の力学特性を示す。また, コンクリートの調合を表 3 に, 使用骨材の品質を表 4 に示す。試験体数はアンカーボルトの埋め込み深さ 3cm とした試験体 (ABT-S) 23 体, 5cm とした試験体 (ABT-L) 20 体である。本実験では, コンクリートと高温の関係を調べるために, アンカーボルトが引張力を受けた場合の破壊形式としてコンクリートのコーン状破壊を想定して試験体を設計している。しかし, 加熱を伴った試

* 東京工業大学 大学院生
** 東京工業大学 教授・工博

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology
Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

表1 試験体リスト

試験体名	試験体数	b×D×h(mm)	アンカーボルト 埋め込み深さ	コンクリート	
				圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
ABT-S	23	240×240×120	M12×80 30mm	46.2	3.75
ABT-L	20	500×500×180	M16×120 50mm	38.6	3.31

シリンダー供試体寸法 圧縮強度: φ100mm×200mm
引張強度: φ100mm×100mm

表2 鋼材の力学特性

	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)
アンカーボルト M12	378	446	1.91
アンカーボルト M16	361	469	2.02
異形鉄筋 D13	358	528	1.93

表3 コンクリートの調合

試験体	水セメント比 (%)	質量 (kg/m ³)					混和剤 (ポゾリスNO.70)
		水	セメント	細骨材①	細骨材②	粗骨材	
ABT-S	50.5	183	363	548	235	953	0.907
ABT-L	52.5	185	353	553	237	944	0.882

表4 使用骨材

試験体	骨材の種類		最大寸法 (mm)	表乾密度 (g/cm^3)	粗粒率	吸水率 (%)
ABT-S	細骨材①	千葉県君津産砂	5	2.59	2.39	2.45
	細骨材②	東京都青梅産砕砂	5	2.61	3.05	1.13
	粗骨材	東京都奥多摩産碎石	20	2.67	6.59	0.44
ABT-L	細骨材①	千葉県君津産砂	5	2.59	2.39	2.33
	細骨材②	東京都青梅産砕砂	5	2.61	3.07	1.16
	粗骨材	東京都奥多摩産碎石	20	2.66	6.62	0.61

験であることを考慮して、アンカーボルトとして使用した M12及び M16の材料試験を行った。アンカーボルトの力学特性は実験に使用したボルトと同一のボルトから取り出した供試体により得られた。圧縮強度及び引張強度は、試験体と同一バッチのコンクリートで作製したシリンダー供試体の圧縮試験及び割裂試験により得られた。試験体のコンクリート打設は試験体下面から行った。試験体及びシリンダーの養生は、打設後試験直前まで型枠内で湿潤養生とし、実験当日に脱型を行った。

アンカーボルトの埋め込み深さ 3cm の試験体は前報と同様である。各試験体ともに $b \times D \times h = 240 \times 240 \times 120$ mm であり、M12×80 をアンカーボルトとして使用した。アンカーボルトの埋め込み深さ 5cm とした試験体を図1に示す。各試験体ともに $b \times D \times h = 500 \times 500 \times 180$ mm である。図2にアンカーボルト埋め込み図を示す。アンカーボルトとして M16 を使用し、試験体中央に埋め込み深さ 5cm として埋め込んだ。試験体の曲げ破壊防止のために D13 を 4 本使用した。四角ナット及び鋼管は載荷装置に固定するために埋め込んだ。全20体中 5 体に試験体内部温度を測定するため熱電対を計13ヶ所埋め込んだ。温度測定点はアンカーボルト部分に2ヶ所、コンクリート部分10ヶ所、および鉄筋部分に1ヶ所とした。ボルトおよび鉄筋の温度測定にセラミックファイバー被覆熱電対を、コンクリートの

図1 試験体 (ABT-L)

図2 アンカーボルト埋め込み詳細

図3 載荷・加熱概念図

図4 載荷装置 (ABT-L)

温度測定に外径1.6mmのシース熱電対を使用した。また、これらの熱電対を試験体内部に固定するためにM3全ねじを用いた。

2.2 載荷装置

ABT-S及びABT-Lの載荷に異なる載荷装置を用いた。しかし、図3の載荷・加熱概念図に示すようにアンカーボルトに鉛直方向に引張力を加え、試験体上面から加熱を行うという実験のシステムは同じである。

ABT-Sの載荷装置は前報と同様である。アンカーボルトに接続した加力ビームに錘を吊るすことによって、アンカーボルトに引張力を作用させた。ABT-Lの載荷に用いた載荷装置図を図4に示す。加力には5t油圧ジャッキを用いた。荷重増加時は静的単調引張載荷とし、一定引張荷重を与える場合にはジャッキの微調整により荷重の低下を防いだ。アンカーボルトの引張荷重の大きさは油圧ジャッキ上部に取り付けたロードセルによって測定した。試験体は下から4本のボルトによって載荷装置に固定し反力を取っている。加熱はニクロム線を用いた電気ヒーターにて、図3に示すようにアンカーボルトを埋め込んだ試験体上面から行った。加熱面の空気温度(以下表面温度とする)を熱電対により測定し、この温度により加熱時の温度上昇速度(以下加熱速度とする)と最高温度を制御した。電

図5 加熱経路

表5 常温での引抜き耐力

試験体名	常温での引抜き耐力 (kN)	P_0 (kN)
ABT-S	16.3	17.3
	17.8	
	17.7	
ABT-L	36.3	37.6
	37.0	
	39.6	

気ヒーターの性能はABT-Sの実験で用いた電気ヒーターと同様に加熱速度を制御しない場合に毎分約10℃となるように設計している。試験体周囲およびヒーター外部には断熱材を取り付け、加熱時の熱損失を防止した。

2.3 実験方法

加熱経路を図5に示す。加熱経路Iは加熱速度を制御せずにヒーターの性能に任せた毎分約10℃として表面温度が500℃に達するまで加熱を行う。500℃に達した後は2時間500℃を保ち加熱終了とする。加熱経路IIは、加熱速度を毎分0.75℃とし500℃まで加熱を行い、500℃到達後、加熱経路I同様2時間温度を保つ。加熱経路IIIは、加熱速度毎分約10℃で300℃まで加熱し2時間300℃を保ち加熱終了とする。各加熱経路ともに加熱終了後は試験体を気中に放置することで常温まで冷却する。

ABT-S, ABT-Lともに常温における引抜き試験を行い、常温での引抜き耐力の平均値 P_0 を求めた。ABT-Sは前報で報告した加熱速度毎分10℃を用いた実験結果との比較のために、加熱経路IIを用いて一定引張力下での加熱試験を行った。アンカーボルトに一定引張荷重 P を作用させ試験体の加熱を行い、試験体が破壊した時点で実験終了とした。一定引張荷重 P は P_0 の40%から80%の範囲とした。加熱終了までに破壊しなかった試験体は、冷却後引張荷重を増加することで、加熱後の引抜き耐力を調べた。

ABT-Lは、ABT-Sの実験結果と比較し埋め込み深さの違いによる影響を調べるため、加熱経路I及びIIを用いて P_0 の20%から80%の範囲で一定引張荷重をアンカーボルトに作用させ加熱試験を行った。加熱中に破壊しなかった試験体については、加熱後の引抜き耐力を調べた。また、引張荷重を0N、つまりアンカーボルトに引張荷重を作用させない状態で加熱経路IIIを用いて加熱・冷却を行い、加熱後にアンカーボルトの引抜き試験を行い、加熱後の残存引抜き耐力を調べた。

3. 実験結果

表5に常温での引抜き耐力とその平均値 P_0 を示す。アンカーボルト埋め込み深さ5cmの試験体はコーン状破壊であったのに対し、埋め込み深さ3cmの試験体はアンカーボルトから放射状にひび割れが生じアンカーボルトが引抜けている。一定引張荷重 P を常温での引抜き耐力の60%を一定引張荷重としてアンカーボルトに作用させて行った加熱試験の結果を図6に示す。加熱速度毎分10℃とした場合、埋め込み深さ5cmのアンカーボルトは表面温度368℃で破壊

(a) ABT-L(加熱経路I)

(b) ABT-L(加熱経路II)

(c) ABT-S(加熱経路II)

図6 一定引張力下での加熱試験結果

(a) ABT-S

(b) ABT-L

図7 破壊時表面温度と引抜き耐力の関係

した。一方、加熱速度毎分0.75℃として加熱を行った場合、アンカーボルトの埋め込み深さ5cmの試験体は表面温度223℃で、また埋め込み深さ3cmの試験体もほぼ同じ表面温度217℃で引抜き破壊を起こした。図7に加熱中に破壊した試験体の破壊時の表面温度とアンカーボルトの引抜き耐力の関係を示す。縦軸は常温での引抜き耐力で除している。アンカーボルト埋め込み深さ3cmの実験結果については前報で報告した結果と合わせて示している。異なる埋め込み深さにも関わらず、破壊時の表面温度と引抜き耐力の関係はほぼ一致した。加熱温度が高いほど引抜き耐力の低下が大きく、加熱速度毎分10℃の場合表面温度が500℃に到達するまでに常温での耐力の約20%まで低下した。破壊時、埋め込み深さ3cm、5cmの試験体共に

加熱面のコンクリートが爆発音を伴って粉砕し、コンクリート片が飛び散った。一方、アンカーボルトに同じ引張荷重が作用している時、加熱速度が速い場合と比較して、加熱速度が遅い場合は100℃程低い温度でアンカーボルトの引抜き破壊が起こった。この時、常温時と似た破壊状況であったが、加熱面は大きなコンクリート片となって破壊した。加熱速度を毎分0.75℃とした場合、表面温度250℃付近で常温での耐力の40~50%まで低下した。しかし、引張荷重が常温での引抜き耐力の40%以下の場合、500℃まで加熱してもアンカーボルトが引抜けることはなかった。

図8に加熱後常温まで冷却し行った引抜き試験の結果を示す。埋め込み深さ3cmの試験体2体を用いて、一定引張荷重を常温での引

(a) ABT-S(加熱経路II)

(b) ABT-L(加熱経路II)

(c) ABT-L(加熱経路III)

図8 加熱後の引抜き試験結果

(a) ABT-S

(b) ABT-L

図9 加熱冷却後の引抜き耐力と加熱温度の関係

抜き耐力の50%, 加熱速度毎分0.75℃として500℃までの加熱試験を行った。前報において同様の条件下で行った実験では表面温度220℃付近で試験体は破壊したが, 本実験では加熱終了まで引抜き破壊が起きなかった。1体は冷却途中でアンカーボルトが引抜け, 他1本の冷却後の残存引抜き耐力は12.0kN (0.7 P_0) であった。埋め込み深さ5cmの試験体で一定引張荷重を常温での引抜き耐力の30%, 加熱速度毎分0.75℃として加熱試験を行った場合も同様に加熱中に破壊しなかった。この試験体において表面温度が500℃に達した時点で加熱終了とし, また冷却時に除荷した。冷却後の残存引抜き耐力は18.4kN (0.5 P_0) となり, 加熱速度毎分10℃として500℃まで加熱を行い冷却した場合の残存引抜き耐力と同等の値を示した。また, 加熱速度毎分10℃で300℃まで加熱, 冷却を行った埋め込み深さ5cmの試験体の引抜き耐力は25.5kN であった。加熱後常温まで冷却し引抜き試験を行った試験体の加熱時の最高表面温度と引抜き耐力の関係を図9に示す。埋め込み深さに関係なく, 加熱後の引抜き耐力と加熱温度の関係はほぼ一致している。加熱速度毎分10℃の場合, 加熱後のアンカーボルトの引抜き耐力は加熱温度に比例して低下し, 500℃の加熱後の引抜き耐力は常温での耐力の約50%となった。しかし, 加熱速度毎分0.75℃で500℃まで加熱し冷却した場合の引抜き

耐力は埋め込み深さ5cmでは常温での耐力の約50%, 埋め込み深さ3cmでは約70%と違いが見られた。

ABT-Lについて加熱時の試験体内部の温度履歴を図10に示す。加熱速度毎分10℃及び毎分0.75℃において試験体下部のコンクリート部分が100℃を超えると温度上昇が暫く停滞している。また, 同じ水平面上にあるコンクリート温度を比較すると, ボルトの下に位置する測定点3, 5はそれぞれ測定点8, 9より若干高くなっている。これらは, ABT-Sにも同様の傾向が見られた。

4. 考察

4.1 アンカーボルトの埋め込み深さの違いに関する検討

本実験ではアンカーボルトを埋め込んだ試験体上面から加熱を行っており, 試験体内部には鉛直方向に温度分布が発生するため, 加熱温度と引抜き耐力の関係にアンカーボルトの埋め込み深さが影響すると予想された。しかし, 埋め込み深さ3cm及び5cmの実験結果を比較すると, 加熱温度とアンカーボルトの引抜き耐力の関係に大差はなかった。

図11にABT-LおよびABT-Sについて破壊時の試験体内部の温度分布を示す。これらの試験体内部温度は, 熱電対を埋め込んだ

図10 加熱時の試験体内部温度履歴

図11 破壊時の試験体内部温度分布

(a) ABT-S

(b) ABT-L

図12 ボルト頭部温度と引抜き耐力の関係

試験体で行った温度測定の結果より求めたものである。ボルトの頭部より深い位置にあるコンクリート部分では温度が著しく低下している。これはボルトとコンクリートでは熱伝導率が大きく異なり、ボルトはよく熱を伝えるのに対し、コンクリートは熱を伝えにくいためである。また、図10の試験体内部の温度履歴において、測定点3が測定点8より若干高い温度を示していることも、ボルトの熱伝導率が大きいためと考えられる。

3cm, 5cmの埋め込み深さにおいて加熱速度毎分10℃の時、破壊時の表面温度が同じであった。また試験体内部温度を比較すると、破壊時のボルト頭部も同じ温度であった。本研究ではアンカーボルトが引張力を受けた場合の破壊形式としてコンクリートのコーン状破壊を想定して試験体を設計しているため、アンカーボルトの埋め込み深さは3cm及び5cmと比較的浅く設定している。これらのことから、同じ加熱経路で加熱を行った場合埋め込み深さが3cm, 5cmと異なっても加熱の初期段階ではボルト頭部温度に差があまり生じなかった。

加熱速度が遅い場合にも引抜き破壊時のボルト頭部温度はほぼ同じ温度となっている。加熱に時間をかける場合、熱伝導率の違いによる影響が少ない。そのため、埋め込み深さ5cmの試験体が埋め込み深さ3cmの試験体に比べてわずかであるが破壊時の表面温度は高い温度に達している。

アンカーボルトに引張力を加えた場合、コンクリート中を伝わる力として、ボルト頭部から試験体表面へと向かう力とボルト埋め込み方向に対して垂直な面上において円状に作用する力がある。ボルトの埋め込み深さ3cm, 5cmとして行った試験結果より、表面温度が同じ時にはボルト頭部温度もほぼ同じとなっている。このボルト頭部及びその周辺のコンクリートの温度とコンクリート内部を伝達する応力の関係が加熱下のアンカーボルトの引抜き耐力を決定する要因の一つと考えられる。

4.2 温度の上昇速度の違いに関する検討

破壊時のボルト頭部温度と引抜き耐力の関係を図12に示す。異なる加熱速度で加熱した場合の結果を比較すると、ボルト頭部温度が160℃までの範囲では、破壊時のボルト頭部温度と引抜き耐力の関係はほぼ一致している。

加熱時温度の上昇速度が速い場合、試験体表面の温度は非常に高くなっているが、それは試験体加熱面のごく表層部に限られており、

試験体内部の温度差が大きい。一方、上昇速度が遅い場合には試験体内部の温度差は小さくなっている。つまり、ボルト頭部温度に着目すると、遅い加熱速度の場合、速い加熱速度の場合のボルト頭部温度に達した時、表面温度は速い加熱速度の時より低くなる。

しかし、ボルト頭部温度が160℃を超えると、破壊時のボルト頭部温度と引抜き耐力の関係は一致していない。加熱速度が速い時アンカーボルトの引抜き耐力は20%まで低下したのに対して、加熱速度が遅い場合の引抜き耐力の低下は50%程度であった。表面温度250℃で40%近くまで低下するにもかかわらず、500℃まで加熱を行ってもそれ以下には耐力は低下しない。アンカーボルトに常温での引抜き耐力の20%から50%の範囲で引張荷重を加えて加熱速度毎分10℃で加熱試験を行った試験体は埋め込み深さ3cmは8体、埋め込み深さ5cmは5体あり、埋め込み深さ5cmの試験体1体を除いて全ての試験体が加熱中に破壊した。同様の引張荷重の範囲で加熱速度毎分0.75℃の加熱試験を行った結果、埋め込み深さ3cmは7体中4体が、埋め込み深さ5cmは6体中3体が引抜き破壊しなかった。

加熱速度が速い場合には、急激な加熱によってコンクリート表面に爆裂が起こることがある。爆裂は急激な温度上昇、熱応力、含水量などが原因に挙げられるが、特に爆裂の主因は水蒸気圧の大きさによると考えられており、これらの条件が複合して爆裂が発生する。本実験において、試験体は試験当日まで湿潤養生としており、加熱速度毎分10℃で加熱を行った試験体が破壊した際大きな爆裂音を伴った。また、破壊時加熱されたコンクリート表面全体が粉碎し飛び散ったことから、加熱速度が速い場合、加熱面であるアンカーボルトを埋め込んだコンクリート表面に爆裂が生じたと推測できる。引張荷重が小さい場合、このコンクリート表面の爆裂が引抜き破壊を誘発したと考えられる。

4.3 加熱後の引抜き耐力の検討

加熱した後冷却を行った場合アンカーボルトの埋め込み深さ3cm及び5cmの残存引抜き耐力と加熱温度の関係はほぼ一致した。コンクリートを加熱及び冷却することで、コンクリート内部に熱応力が発生する。本実験では加熱をアンカーボルトを埋め込んだコンクリート表面から行い、アンカーボルトに引張荷重が加わった際に力が伝達するコンクリート部分は特に温度変化が激しかった。加熱時、冷却時のコンクリート内部に生じる温度差が大きいほど熱応力が大きくなり、熱ひずみも増大する。そのため加熱温度が高いほど、

また加熱速度が速いほど加熱後の引抜き耐力の低下が大きくなると考えられる。

5. 結

本研究では、アンカーボルトの埋め込み深さを3cmおよび5cmとして高温を受けるコンクリートに埋め込んだアンカーボルトの引抜き試験を行った。加熱は試験体表面温度上昇速度を毎分10℃及び0.75℃とし、常温から500℃までの範囲で行った。本実験結果より得た知見を以下に示す。

- ・加熱時の試験体表面温度上昇速度が同じ場合、埋め込み深さ3cm及び5cmのアンカーボルトの引抜き耐力低下率と表面温度の関係はほぼ一致した。
- ・ボルト頭部温度が常温から160℃までの範囲では、試験体表面温度上昇速度が異なる加熱下でアンカーボルトの引抜き耐力の低下率とボルト頭部温度の関係は一致し、引抜き耐力は40%まで低下した。しかしボルト頭部温度が160℃を超えると、加熱速度毎分10℃の場合引抜き耐力が20%まで低下したが、加熱速度毎分0.75℃の場合は本実験の加熱条件下では引抜き耐力は40%より低下することとはなかった。加熱中のアンカーボルトの引抜き耐力をボルト頭部温度で全ての領域を評価できるとは限らないといえる。
- ・500℃までの加熱後常温に冷却したアンカーボルトの引抜き耐力は、最大50%まで低下する。加熱・冷却時コンクリートに生じる熱ひずみによって引抜き耐力が低下すると考えられる。

参考文献

- 1) 古村福次郎：高温におけるコンクリート力学的性質に関する研究(その1)，日本建築学会論文報告集，No. 172，pp.11～18，昭和45年6月
- 2) 古村福次郎：高温におけるコンクリート力学的性質に関する研究(その2)，日本建築学会論文報告集，No. 173，pp.17～24，昭和45年6月
- 3) 古村福次郎：高温におけるコンクリート力学的性質に関する研究(その3)，日本建築学会論文報告集，No. 174，pp.1～7，昭和45年6月
- 4) 一瀬賢一，長尾覚博：高温加熱を受けた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. 541，pp.23～30，2001年3月
- 5) 安部武雄，古村福次郎，戸祭邦之，黒羽健嗣，小久保勲：高温における高強度コンクリートの力学的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年1月
- 6) 宮本圭一，大内富夫，安部武雄，上杉英樹：高温における高強度コンクリートの力学的特性，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp.79～80，2000年9月
- 7) 長尾覚博，中根 淳：高温を受けるコンクリート部材の水分移動と圧力形成に関する模型実験，日本建築学会構造系論文集，No. 452，pp.1～10，1993年10月
- 8) 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年3月
- 9) 長尾覚博，丹羽博則，江戸宏彰，川地 武：火災時における高強度コンクリートの爆裂に関する一考察，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp.41～44，1998年9月
- 10) 有政 紘，寺井俊夫：骨材およびコンクリートの加熱による爆裂，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp.77～78，2000年9月
- 11) 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，No. 563，pp.131～137，2003年1月
- 12) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，1985年2月
- 13) Eligehausen, R., and Balogh, T.; Behavior of Fasteners Loaded in Tension in Cracked Reinforced Concrete, ACI Structural Journal, Vol. 92, No. 3, pp.365-379, 1995
- 14) ACI Committee 349; Proposed Addition to Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures (ACI 349-79), ACI Proceedings V. 75, No. 8, pp.329-335, AUGUST 1978

(2003年2月10日原稿受理，2003年3月31日採用決定)