コンクリートの載荷時熱ひずみに及ぼす養生条件と水セメント比の影響

コンクリートの高温時特性に及ぼす水分の影響(その2)

INFLUENCE OF CURING CONDITION AND WATER CEMENT RATIO
ON LOAD-INDUCED THERMAL STRAIN OF CONCRETE

Influence of water content on properties of concrete in high temperatures Part 2

山下平祐*, 吉田 徹**, 宍倉大樹***, 常世田 昌寿*, 平島岳夫****

Heisuke YAMASHITA, Toru YOSHIDA, Daiki SHISHIKURA,

Masatoshi TOKOYODA and Takeo HIRASHIMA

In the present study, the influence of the curing conditions (air-dried, oven-dried and sealed curing) and water/cement ratios (40%, 50% and 65%) on the load-induced thermal strain (LITS) of concrete specimens was investigated. The relationship between the LITS and specimen weight loss was also evaluated in order to develop a comprehensive model for the LITS. It was clarified from the present study that LITS due to dehydration and decomposition was much larger than that due to water evaporation. And, the numerical model for the LITS was proposed as a function of the weight loss of the specimens.

Keywords : Concrete, High Temperature, Load Induced Thermal Strain, Weight Loss, Curing Condition,
Water-Cement Ratio

コンクリート, 高温, 載荷時熱ひずみ, 重量損失, 養生条件, 水セメント比

1. はじめに

コンクリートが圧縮応力を受けながら温度上昇する際に生じる収縮ひずみ(以下, 載荷時熱ひずみと称す)は, 同時に発生する熱膨張ひずみを打ち消すほど大きなものである¹⁾。そのため, コンクリート系構造の耐火性を検討する際には, コンクリートの高温時応力-ひずみ関係と熱膨張ひずみに加え, 載荷時熱ひずみの性状を把握することが重要となる。前報(その1)²⁾ではコンクリートの高温時応力-ひずみ関係に及ぼす水分の影響について報告した。本報(その2)では, コンクリートの載荷時熱ひずみに及ぼす水分の影響について報告する。

載荷時熱ひずみ(LITS: Load-Induced Thermal Strain)は, Khouryら³⁾が提案したコンクリートの高温時ひずみ構成則に用いるひずみ成分の一つであり, コンクリートが一定圧縮応力のもとで加熱される際に生じるひずみの総和(Total Thermal Strain, 以下, 全ひずみと称す)から, その熱膨張ひずみと初期応力ひずみを差引いたひずみとして定義されている。このことから載荷時熱ひずみは, 温度上昇に伴う弾性係数低下により生じる弾性ひずみやひび割れの増加などにより生じる塑性ひずみ, 蒸発性水分の蒸発やセメント水和物

の脱水に伴い生じるクリープひずみなどを含む収縮ひずみと考えられる。Khouryらのモデルのような, コンクリート系構造の火災応答解析で使用することを目的とした構成則は他にも複数提案されており^{4), 5)}, いずれのモデルでも載荷時熱ひずみに関係するひずみはコンクリートの温度を主要因とした数式モデルで表されている⁴⁾⁻⁶⁾。一方, コンクリートの載荷時熱ひずみはセメント水和物の物理的・化学的反応の進行に伴い発生するため^{5), 7)}, コンクリート中の水分の影響を受けることが報告されている。例えば, 事前乾燥により水分を蒸発させたコンクリートの場合, 100℃~250℃程度の範囲で載荷時熱ひずみは小さくなる^{3), 8), 9)}。また, コンクリートの水セメント比が小さいほど載荷時熱ひずみは大きくなる¹⁰⁾⁻¹²⁾。したがって, 従来の温度を主要因とした数式モデルを水分条件の異なるコンクリートに対して汎用的に適用することは難しい。一方, 載荷時熱ひずみを高温下におけるセメント水和物の反応との関係で直接表すことができれば, 両者の関係は前述した水分の影響を包含したものになり, 従来よりも汎用的な数式モデルを作成することが可能になると考えられる。Sabeurら¹³⁾は, セメント水和物の脱水量をTGA(熱重量測定)から得た重量減少で表し, 載荷時熱ひずみとの関係を数式

本論は, 文献22), 23)に発表したものに, 検討を加えてまとめたものである。

* (一財)建材試験センター 博士(工学)

** 千葉大学大学院工学研究科 大学院生

*** (一財)建材試験センター

**** 千葉大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

Japan Testing Center for Construction Materials, Dr.Eng.

Grad. Stud., Graduate School of Engineering, Chiba Univ.

Japan Testing Center for Construction Materials

Prof., Graduate School of Engineering, Chiba Univ., Dr.Eng.

モデル化している。そして、この数式モデルが、圧縮強度 40～120N/mm²のコンクリート試験体（寸法：直径 104×高さ 300mm）の実験データを追跡できると報告している。ただし、TGA で用いる微量サンプルと試験体では、脱水反応と温度の関係が異なるため、セメント水和物の脱水量は載荷時熱ひずみ測定時における試験体の重量減少で表した方がより適切である。しかし、載荷時熱ひずみと試験体の重量減少の関係を検討した研究は見当たらない。さらに、コンクリート中の水分が載荷時熱ひずみに及ぼす影響について検討した研究の多くは水セメント比が 40%未満の高強度コンクリートを対象としたものであり、水セメント比が 40%以上のより一般的なコンクリートを対象として、養生条件や水セメント比の違いが及ぼす影響を検討した研究は国内にはない。

以上を踏まえ、本報では水セメント比が 40%以上のコンクリートについて、養生条件および水セメント比の違いが載荷時熱ひずみに及ぼす影響を検討するため、一定圧縮応力下で加熱されるコンクリート試験体の全ひずみを測定する実験（以下、全ひずみ実験と称す）を行った。さらに、全ひずみ実験と同じ試験体を用いて重量減少測定実験も実施した。本報では、これらの実験結果を報告するとともに、実験から得られた載荷時熱ひずみと試験体の重量減少の関係を検討し、水分条件の異なるコンクリートにも適用できる、従来よりも汎用的な載荷時熱ひずみの数式モデル作成を試みた。

2. 試験体

全ひずみ実験および重量減少測定実験で使用した試験体（寸法：直径 75×高さ 150mm）は、前報²⁾で報告した試験体と同様に作製したものである。表 1 に試験体の条件、表 2 に試験体の呼称として本報で使用する試験体名を示す。試験体の調合、養生方法の詳細は前報²⁾を参照されたい。実験実施時における試験体の材齢は 348～485 日である。なお、前報²⁾で報告したように、実験期間前後における試験体の含水率や圧縮強度・弾性係数に大きな変化は確認されなかったことから、試験体間の材齢の違いが実験結果に及ぼす影響は小さいと考えられる。表 3 に、試験体の実験前における単位体積重量を示す。同条件の試験体間における単位体積重量のばらつき、および前報で使用した試験体との単位体積重量の差は 980 N/m³(0.1 tf/m³)未満に収まった。表 4 に、気乾試験体および封かん試験体の含水率を示す。なお本報では、試験体を 105℃で 14 日間乾燥することによって生じた重量減少量を蒸発性水分量、乾燥前の重量に対する蒸発性水分量の割合である湿量基準含水率を含水率(R_w)と称す。気乾試験体の含水率は、全ひずみ実験および重量減少測定実験で使った絶乾試験体の事前乾燥前後における試験体重量変化から算出した。封かん試験体の含水率は、105℃で 14 日間乾燥した際に生じた重量減少に対して、実験準備中に生じた蒸発性水分の蒸発による重量減少を差引いた値を用いて算出した。なお、実験準備は気乾状態で約半日かけて行い、その間に生じた重量減少は、準備前の重量に対する割合で平均 0.35%であった。

3. 試験体の重量減少

3. 1 重量減少測定実験

全ひずみと試験体の重量減少の関係を把握するため、全ひずみ実験と同条件の試験体による重量減少測定実験を、試験体条件ごとに

表 1 試験体の条件

水セメント比 W/C(%)	65, 50, 40
養生条件	気中養生
	事前乾燥 (105℃で 14 日間)
	封かん養生*

* 封かん養生は W/C=65%のみで実施した。

表 2 試験体条件ごとの試験体名

		W/C(%)		
		65	50	40
養生条件	気中養生 〔気乾試験体(A) Air-dried〕	65A	50A	40A
	事前乾燥 〔絶乾試験体(D) oven-Dried〕	65D	50D	40D
	封かん養生 封かん試験体(S) Sealed	65S	—	—

表 3 試験体の単位体積重量

試験体名	65A	65D	65S	50A	50D	40A	40D
最小値	21.8 (2.22)	21.3 (2.17)	22.4 (2.28)	22.1 (2.25)	21.4 (2.18)	22.5 (2.29)	21.8 (2.22)
最大値	22.0 (2.24)	21.7 (2.21)	22.7 (2.31)	22.4 (2.28)	21.7 (2.21)	22.7 (2.31)	22.1 (2.25)
平均値	21.9 (2.23)	21.5 (2.19)	22.6 (2.30)	22.2 (2.26)	21.6 (2.20)	22.5 (2.29)	21.9 (2.23)

表 4 試験体の湿量基準含水率 R_w

試験体名	65A	50A	40A	65S
R_w	2.10%	2.73%	3.19%	6.08%

・表中の含水率は、試験体条件ごとの平均値である。

2 回ずつ行った。重量減少測定実験では、試験体を全ひずみ実験と同じ加熱速度（1.5℃/分）で 800℃まで加熱しながら試験体重量の測定を行った。実験に使用した実験装置を図 1 および写真 1 に示す。実験では、箱型電気炉を用いて同種類の試験体を 2 体ずつ、合計 4 体の加熱を同時に行い、同種類の試験体のうちの 1 体で試験体重量、残りの 1 体で試験体内部温度を測定した。試験体は、電気炉の上方からステンレスワイヤーで吊したステンレス籠に入れた状態で加熱した。電気炉からの直接の輻射を避け内部温度差を緩和するため、試験体の外周にはセラミック製耐火クロスを巻きつけた。重量測定用試験体は、ワイヤーの途中にロードセルを介して吊した。なお、ロードセルは、炉蓋（厚さ 25mm のセラミックファイバーブランケット+厚さ 25mm のケイ酸カルシウム板）から 400mm 以上離して設置し、扇風機で微風を与え空冷した。これによりロードセル周辺の雰囲気温度が補償温度上限値 60℃未満となるようにした。また、試験体を設置する際には、炉蓋がワイヤーに干渉しないように注意した。温度測定用試験体には K 熱電対を埋め込み、重量測定用試験体の内部温度は温度測定用試験体と同じとみなした。図 2 に、重量減少測定実験における試験体内部温度測定位置を示す。電気炉の加熱制御は、4.1 節に後述する全ひずみ実験と同じく、試験体の上下端部における表面から深さ 6mm の位置での温度（図 2 中の T_1 , T_2 ）が 1.5℃/分で昇温するように行った。図 3 に、実験時における試験体内部温度と時間の関係の一例として、封かん試験体の測定結果を示す。図 3 では、試験体の軸方向において上下端部よりも中央部の温度が低くなった。同様の傾向は全ての実験において見られ、実験時の試験体内部の温度差は最大で 54℃となった。試験体内部温度を代表する「試験体温度」は、全ひずみ実験と同じく、試験体表面から深さ 6mm の位置で測定した温度の平均値とした。算出式を以下に示す。

$$T_w = (T_1 + T_2 + 2 \cdot T_3) / 4 \quad \dots (1)$$

T_w ：重量減少測定実験での試験体温度（℃），

T_1 , T_2 , T_3 ：試験体表面から深さ 6mm での温度（図 2 参照）（℃）

3. 2 重量減少と温度の関係

重量減少測定実験では、同条件の試験体による2回の実験でほぼ同等な測定結果が得られた。図4に、各実験条件における重量減少率と試験体温度の関係を一例ずつ示す。重量減少率は下式より算出した。

$$R_{wl} = (W_{init} - W_{pres.}) / W_{init} \times 100 \quad \dots (2)$$

R_{wl} : 重量減少率(%),

W_{init} : 重量測定用試験体の初期重量

(14.0 N(1430.0 gf)~15.1 N(1538.5 gf))

$W_{pres.}$: 重量測定用試験体の測定時の重量

気乾試験体および封かん試験体の重量減少率は100℃から急激に増加する一方、絶乾試験体の重量減少率は200℃までほとんど変化しなかった。気乾試験体および封かん試験体の急激な重量減少は、重量減少率が表4に示す各試験体の含水率に達すると緩やかになる

図1 重量減少測定実験装置 (概観)

図2 試験体内部温度測定位置 (重量減少測定実験)

図3 試験体内部温度と時間の関係 (重量減少測定実験)

ことから、蒸発性水分の蒸発に因ると考えられる。蒸発性水分の蒸発は、気乾試験体では約200℃、封かん試験体では約250℃まで継続した。気乾試験体の急激な重量減少が100℃~200℃程度で発生することは既往の報告と一致する^{4), 14), 15)}。200℃からは絶乾試験体の重量減少も始まる。これは、ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)や水酸化カルシウムを主成分とするセメント水和物において、化学吸着水の放出など脱水反応が生じることによる¹⁶⁾。

気乾試験体および封かん試験体の蒸発性水分の蒸発が終了した250℃以降、同じ水セメント比の気乾試験体と絶乾試験体では、重量減少率と試験体温度の関係から得る勾配が同等になった。試験体の初期含水率が、250℃以上での重量減少に影響しないことは既往の研究でも報告されている¹⁴⁾。一方、図5に示すように、250℃から500℃にかけて、水セメント比65%の封かん試験体における重量減少率の増加は、同じ水セメント比の気乾試験体・絶乾試験体の1.2倍程度になった。また、同温度領域においては水セメント比が小さい試験体ほど重量減少率の増加が大きくなり、水セメント比40%の試験体の増加は水セメント比65%の1.5倍程度となった。封かん試験体や

写真1 重量減少測定実験装置 (電気炉内の状況)

図4 重量減少率と試験体温度の関係

水セメント比が小さい試験体はセメント水和物の含有量が比較的多いため、セメント水和物の脱水による重量減少が多くなったと考えられる。

500℃～600℃では、全ての試験体において重量減少率の勾配が急になった。この要因として、水酸化カルシウムの分解による重量減少が考えられる。Anderberg らは、試験体を 500℃で加熱した際、水酸化カルシウムの分解による重量減少が時間の経過に伴い発生することを報告している⁴⁾。600℃以降では、セメント水和物内の化学吸着水の放出は終了する一方¹⁶⁾、ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)の分解^{16), 17)}が発生する。重量減少測定実験で生じた試験体の反応と温度の関係を表 5 にまとめる。

4. 全ひずみ・熱膨張ひずみ

4. 1 全ひずみ実験の概要

表 6 に示すように、全ひずみ実験の実験要因は、水セメント比、養生条件、応力レベルとした。載荷応力 σ は水セメント比毎に設定し、表 6 に示す気乾試験体の常温時圧縮強度 σ_b に応力レベルを乗じた値とした。応力レベル 0 は無載荷加熱実験であり、熱膨張ひずみを測定するために行った。全ひずみ実験は、実験要因ごとに 1 体ずつ実施した。

全ひずみ実験で使用した実験装置は前報²⁾と同じである。全ひずみ実験における試験体内部温度測定位置を図 6 に示す。全ひずみ実験では、熱電対の埋め込みが実験結果へ影響しないよう、試験体表面から深さ 6mm の位置でのみ内部温度を測定した。試験体の加熱は、試験体に設定応力レベルに相当する荷重を載荷した直後から開始し、試験体の上下端部における表面温度(図 6 中の T_1, T_2)が 1.5℃/分で昇温するように電気炉の加熱制御を行った。そして、試験体への載荷荷重を一定に保ったまま、 T_1, T_2 の平均が 800℃に達するか、試験体が破壊するまで加熱を継続し、その間に生じる試験体の上下端部間の鉛直相対変位を測定した。

図 6 試験体内部温度測定位置 (全ひずみ実験)

図 7 試験体内部温度と時間の関係 (全ひずみ実験における半径方向の温度分布)

全ひずみ実験時における試験体内部温度の分布状況を確認するため、全ひずみ実験と同じ加熱条件で試験体の加熱を行いながら、図 6 中の $T_1 \sim T_{12}$ の測定を行った。測定は水セメント比 65%の気乾試験体・絶乾試験体・封かん試験体について行った。封かん試験体の半径方向および軸方向における温度分布の測定結果を図 7 および図 8 にそれぞれ示す。図 7 に示すように、試験体の半径方向では表面から中心に向かって温度がやや低くなるが、試験体表面と中心の温度

表 5 実験で生じた試験体の反応と温度の関係

試験体温度	試験体の反応
100～200℃	気乾試験体の蒸発性水分の蒸発
100～250℃	封かん試験体の蒸発性水分の蒸発
200～600℃	化学吸着水の放出などセメント水和物の脱水
500～600℃	Ca(OH) ₂ の分解
600℃～800℃	C-S-H の分解

表 6 全ひずみ実験の実験条件

W/C	養生条件(試験体名)	応力レベル σ/σ_b	加熱温度
65%	気中養生(65A)	0・0.1・0.3・ 0.5・0.7	常温～ 800℃
	事前乾燥(65D)		
	封かん養生(65S)		
50%	気中養生(50A)	常温時圧縮強度 σ_b (N/mm ²) ²⁾ ： 26.5(W/C=65%) 37.0(W/C=50%) 49.2(W/C=40%)	
	事前乾燥(50D)		
40%	気中養生(40A)		
	事前乾燥(40D)		

図 5 各試験体の 250～500℃における重量減少率の増分

図 8 試験体内部温度と時間の関係 (全ひずみ実験における軸方向の温度分布)

差は概ね 20℃以下で推移し、30℃以上になることはなかった。一方、図 8 に示すように、試験体の軸方向では中央部は上下端部より温度が低くなり、その温度差の最大は約 60℃となった。本実験装置では、試験体の上下端部に接する加力鋼材からの熱伝導により試験体を加熱するため、軸方向の試験体内部温度差が大きくなる。また、昇温過程では軸方向の温度分布は非線形な関係になるため、図 8 に示すように、上下端部と中央部の中間の温度（図 6 中の T_5, T_6 ）は中央部の温度（図 6 中の T_3, T_4 ）と同程度になった。気乾試験体と絶乾試験体でも同様の傾向が見られた。以上の測定結果から、試験体の半径方向の温度分布は一樣とみなし、「試験体温度」は試験体表面から深さ 6mm の位置で測定した温度の平均値とした。また、軸方向における非線形な温度分布を考慮し、上端部、下端部および中央部 2 点の測定値から以下のように平均値を算出した。

$$T_t = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) / 4 \quad \dots (3)$$

T_t : 全ひずみ実験での試験体温度(℃),

T_1, T_2, T_3, T_4 : 試験体表面から深さ 6mm での温度(図 6 参照)(℃)

なお、全ひずみ実験時における試験体の軸方向内部温度差は最大で 73℃となり、RILEM が定めた全ひずみ実験方法¹⁸⁾における許容値である 20℃よりも大きくなった。ただし、実験の再現性は高く、各実験における加熱性状のばらつきは小さかったことから、以降に示す実験結果の相互比較による検討においては内部温度差の影響は小さいと考えられる。

4. 2 全ひずみ・熱膨張ひずみと温度の関係

応力レベル 0 の全ひずみ実験から得た熱膨張ひずみと試験体温度の関係を図 9 に示す。熱膨張ひずみは、温度に対して非線形に増加するが、600℃を超えると増加の勾配が緩やかになり、800℃で約 $15000 (\times 10^{-6})$ のひずみとなった。この傾向は、図 9 に示す Eurocode¹⁹⁾の提案値と概ね一致した。試験体の養生条件および水セメント比が熱膨張ひずみへ及ぼす影響は見られなかった。

応力レベル 0～0.7 の全ひずみ実験から得た全ひずみと試験体温度の関係の一例として、水セメント比 65%の気乾試験体における測定結果を図 10 に示す。なお、図の縦軸は膨張ひずみを正、収縮ひずみを負として表している。また、载荷時熱ひずみの影響を分かりや

すくするため、初期応力ひずみは差引いて示した。応力レベル 0 の実験で膨張側に発生する全ひずみは応力レベルの増加に伴い減少し、応力レベル=0.7 の実験では概ね 0 となった。これは、応力レベルの増加に伴い载荷時熱ひずみが増大し、熱膨張ひずみを打消す程のひずみが生じたことを意味する。応力レベル 0.5 と 0.7 の実験では 800℃に到達する前に試験体が破壊した。次章では、下式に示すように、全ひずみから熱膨張ひずみを差引くことで算出した载荷時熱ひずみについて考察する。

$$LITS = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_{th} \quad (4)$$

LITS : 载荷時熱ひずみ, ε_{tot} : 全ひずみ, ε_{th} : 熱膨張ひずみ

5. 载荷時熱ひずみ

5. 1 養生条件の影響

载荷時熱ひずみに及ぼす養生条件の影響を図 11 に示す。蒸発性水分の蒸発が载荷時熱ひずみに及ぼす影響は、100℃～200℃において顕著に表れた。気乾試験体では、蒸発性水分の蒸発が活発に生じる約 100℃～200℃で载荷時熱ひずみが発生した。一方、絶乾試験体では、約 200℃まで载荷時熱ひずみはほとんど発生しなかった。気乾試験体の蒸発が終了する 200℃以降、両試験体の差は一定、もしくは小さくなった。同様の傾向は、水セメント比が 35%以下の高強度コンクリートについても報告されている^{3), 8), 9)}。また、既報⁹⁾と同様、約 200℃までの温度域では、両試験体の差は応力レベルが大きくなるほど増加し、応力レベル=0.7 の実験では最大で約 $2500 (\times 10^{-6})$ となった。100℃～200℃で気乾試験体の载荷時熱ひずみが発生したのは、乾燥クリープが発生するためと考えられる。蒸発など水分の移動がある状態で生じるクリープひずみは、水分の移動がない状態で生じる場合よりも発生量が増大することが知られており、この増分が乾燥クリープと呼ばれている²⁰⁾。応力レベルが大きくなると、気乾試験体の乾燥クリープの発生量が多くなるため、絶乾試験体との差が増加したと考えられる。

水セメント比 65%の封かん試験体では、気乾試験体よりも载荷時熱ひずみが増加する傾向が見られた。この傾向は 100℃を超えると表れ始め、セメント水和物の脱水が始まる 200℃程度からより顕著

図 9 熱膨張ひずみと試験体温度の関係

図 10 全ひずみ・熱膨張ひずみと試験体温度の関係（試験体名：65A）

に表れた。両試験体の差は応力レベルが大きくなるほど増加し、応力レベル 0.7 の実験では約 $9000(\times 10^{-6})$ に達した。封かん試験体と気乾試験体の載荷時熱ひずみに差が生じた要因として、載荷時熱ひずみを構成するひずみの一種である脱水クリープ¹³⁾の発生量が両試験体で異なることが挙げられる。3.2 節で示したように、封かん試験体は気乾試験体よりもセメント水和物の脱水による重量減少率の増加が大きいため、脱水に伴い生じる脱水クリープの発生量が多くなったと推察される。なお、文献 3) において、試験体の初期含水率は 250°C 以上における載荷時熱ひずみに影響を及ぼさないことが報告されている。

5. 2 水セメント比の影響

載荷時熱ひずみに及ぼす水セメント比の影響を図 12 に示す。水セメント比の違いによる影響は気乾試験体、絶乾試験体ともに、セメント水和物の脱水が始まる 200°C 程度から顕著に表れた。試験体の

水セメント比が小さいほど載荷時熱ひずみが大きくなる傾向がみられ、応力レベル 0.3 の気乾試験体と比較すると、水セメント比が 65% と 40% の試験体の差は 800°C で約 $10000(\times 10^{-6})$ に達した。水セメント比の違いによる差は応力レベルが大きくなるほど増加した。また、応力レベル 0.5 と 0.7 における試験体の破壊温度は、水セメント比が小さい試験体ほど低くなる傾向が見られた。文献 11) では、水セメント比による影響は 300°C 以上で大きくなることが報告されており、その要因として、高温時強度に対する載荷応力の比である有効応力の変化などが挙げられている。本研究においても、水セメント比が小さい試験体ほど高温時強度残存率の低下が大きいため²⁾、温度上昇に伴い高温時圧縮強度に対する載荷応力の割合が大きくなる。これにより載荷時熱ひずみ中の塑性ひずみが増大し、破壊温度も低下したと考えられる。ただし、水セメント比の違いによる強度残存率の低下が顕著になるのは 400°C を超えてからである²⁾。そのため、

図 11 載荷時熱ひずみと試験体温度の関係（養生条件の影響）

図 12 載荷時熱ひずみと試験体温度の関係（水セメント比の影響）

より低い 200℃から 400℃の温度域では、試験体間の脱水量の違いにより脱水クリープの発生量が変化することで、載荷時熱ひずみの差が表れたと考えられる。

水セメント比の影響をより広く検討するため、応力レベル 0.3 における載荷時熱ひずみについて、本報と既報⁹⁾の結果を比較して図 13 に示す。既報で使用した試験体は、コンクリートの水結合材比が 18%, 24%, 35%の気乾試験体であり、粗骨材は本報と同種の硬質砂岩である。既報では、150℃以上の温度域で本報よりも載荷時熱ひずみが大きくなっているが、水結合材比の違いによる影響は明確でない。試験体間の水セメント比の違いは本報 (65%/40%=1.6) よりも既報 (35%/18%=1.9) の方が大きいにもかかわらず、載荷時熱ひずみの差の最大値は本報 (約 8000 (×10⁻⁶)) の方が既報 (約 6000 (×10⁻⁶)) よりも大きくなった。水セメント比が 38%未満になると、調合中のセメント量を増やしても未水とセメント粒子が増えるばかりでセメント水和物量はほとんど変わらない²¹⁾。そのため既報の試験体では、水結合材比の違いによる脱水量の差が小さい²³⁾。また、水結合材比の違いが高温時強度残存率へ及ぼす影響も、既報の試験体ではあまり表れていない²⁾。これらの要因により、既報では水結合材比による影響が小さくなったと考えられる。

5. 3 応力レベルの影響

載荷時熱ひずみと応力レベルの関係を図 14 に示す。応力レベルが 0.4 以下の既往実験では、載荷時熱ひずみは応力レベルに比例して増加することが報告されている^{3), 15)}。本報では、塑性ひずみの影響が大きくなる応力レベル 0.5 と 0.7 の実験でも、載荷時熱ひずみは応力レベルと概ね比例関係にあることが確認された。また、試験体の養生条件や水セメント比によらず、載荷時熱ひずみは応力レベルと比例関係にあることも確認された。

5. 4 載荷時熱ひずみと重量減少率の関係

5.1 節および 5.2 節では、試験体温度との関係に基づき、載荷時熱ひずみに及ぼす養生条件および水セメント比の影響について考察を行った。本節では、試験体の重量減少との関係に基づき、載荷時熱ひずみの考察を行う。

載荷時熱ひずみと重量減少率の関係を図 15 に示す。図 15 に示すように、載荷時熱ひずみと重量減少率の関係は養生条件ごとに分かれる。同じ養生条件で比較すると、載荷時熱ひずみと重量減少率の関係は水セメント比によらず同等であり、この性状は全ての応力レベルにおいて確認された。応力レベル 0.3 の関係では、水セメント比の違いによる載荷時熱ひずみの差は 5000 (×10⁻⁶) 以下であり、図 12 に示す温度との関係における差 (約 10000 (×10⁻⁶)) の半分以下となった。

図 15 の応力レベル 0.3 の関係に示すように、気乾試験体および封かん試験体では、重量減少率が表 4 に示す各試験体の含水率に到達するまで、載荷時熱ひずみの増加は比較的小さい。この載荷時熱ひずみの大部分は蒸発性水分の蒸発に伴い生じる乾燥クリープと考えられる。一方、各試験体の重量減少率が含水率を超えると、載荷時熱ひずみは重量減少率の増加に伴い急激に増加することが確認された。このことから、載荷時熱ひずみの大部分はセメント水和物の脱水および分解に伴うクリープであると考えられる。蒸発性水分を含まない絶乾試験体の載荷時熱ひずみも大部分は脱水・分解に伴うクリープであり、重量減少率の増加に伴い急増した。応力レベル 0.3 における、重量減少率が含水率に到達する前に発生した載荷時熱ひずみ (以降、LITS_{ev} と称す) と重量減少率の関係を図 16 に示す。また、重量減少率が含水率に到達した後に発生した載荷時熱ひずみ (以降、LITS_{dh} と称す) と重量減少率 $R_{w1, dh}$ (= R_{w1} - 含水率) の関係も併せて示す。絶乾試験体の載荷時熱ひずみは全て LITS_{dh} とした。LITS_{dh} は LITS_{ev} の 10 倍以上の大きさとなることから、載荷時熱ひずみはセメント水和物の脱水や分解に伴い大きく増大するひずみであると考えられる。これは、既往の研究における指摘と一致する^{5), 7)}。LITS_{dh} と重量減少率の関係は、養生条件および水セメント比によらず概ね同等であり、図 16 に示すように 1 つの曲線に概ね収められた。これより、載荷時熱ひずみを重量減少率との関係で表すことで、試験体の水セメント比や養生条件の違いによる影響を包含した関係を得られることが確認された。他の応力レベルにおいても、LITS_{dh} と重量減少率の関係からは上記と同様の性状が得られた。

図 13 載荷時熱ひずみと試験体温度の関係
〔高強度コンクリート⁹⁾との比較〕
応力レベル: 0.3

〔65A, 65D, 65S の比較〕
図 14 載荷時熱ひずみと応力レベルの関係
〔65A, 50A, 40A の比較〕

図 15 载荷時熱ひずみと重量減少率の関係
(実験値と算出値(式(6),(7))の比較)

図 16 $LITS_{ev}$ ・ $LITS_{dh}$ と重量減少率の関係(応力レベル: 0.3)

6. 荷重時熱ひずみの数式化

荷重時熱ひずみが応力レベルと比例関係にあることに着目した Terro は、荷重時熱ひずみを応力レベル 0.3 の値で除することで標準化する方法を提案している⁶⁾。図 17 に、Terro の方法に倣い、試験体条件ごとに標準化した荷重時熱ひずみと応力レベルの関係を示す。図 17 には下式により算出した値を示すが、0～1000(×10⁻⁶)で除した算出値はばらつきが大きくなるため除外した。

$$LITS_{norm}(R_{wl}) = LITS(R_{wb}, \sigma/\sigma_b) / LITS(R_{wb}, 0.3) \quad \dots (5)$$

$LITS_{norm}(R_{wl})$: 標準化した荷重時熱ひずみ

$LITS(R_{wb}, \sigma/\sigma_b)$: 応力レベル σ/σ_b での荷重時熱ひずみ

$LITS(R_{wb}, 0.3)$: 応力レベル 0.3 での荷重時熱ひずみ

標準化した荷重時熱ひずみと応力レベルの間には、概ね同一の勾配を持つ比例関係が見られた。これは、図 14 に示したように、養生条件や水セメント比によらず荷重時熱ひずみと応力レベルは比例関係にあるためである。この比例関係に基づき、標準化した荷重時熱ひずみを応力レベルの一次関数として、図 17 に示すように近似した。その際、近似式を応力レベル 0.3 での値と原点を通る直線として定めることで、無荷重の状態では荷重時熱ひずみが生じない条件とした。この近似式を用いて、荷重時熱ひずみを応力レベル 0.3 での値との比による関数として下式のように表した。

$$LITS(R_{wb}, \sigma/\sigma_b) = 3.4 \cdot \sigma/\sigma_b \cdot LITS(R_{wb}, 0.3) \quad \dots (6)$$

また、図 16 に示すように、応力レベル 0.3 での $LITS_{ev}$ および $LITS_{dh}$ を重量減少率のべき関数としてそれぞれ近似した。式中の定数は、 $LITS_{ev}$ は R_{wl} が 1% と 2% の時の実験値の平均、 $LITS_{dh}$ は R_{wl} が 3% と 4.5% の時の実験値の平均を近似式が通るようにそれぞれ定めた。そして、 $LITS_{ev}$ および $LITS_{dh}$ の近似式を組み合わせることで、応力レベル 0.3 での荷重時熱ひずみを以下のように数式化した。

$$LITS(R_{wb}, 0.3) = -785 \times R_{wl}^{0.43} \times 10^{-6} \quad [R_{wl} \leq R_{wc} \text{ の場合}]$$

$$LITS(R_{wb}, 0.3) = (-785 \times R_{wc}^{0.43} - 560 \times (R_{wl} - R_{wc})^{2.39}) \times 10^{-6} \quad [R_{wl} > R_{wc} \text{ の場合}]$$

… (7)

図 15 に、式 (6) および式 (7) を用いて算出した荷重時熱ひずみの値と実験値の比較を示す。0.5 以下の応力レベルでは、実験結果と算出値は概ね一致する結果となった。一方、応力レベル 0.7 では、算出値が実験値よりも小さくなるケースが見られた。これは、図 17 に示すように、応力レベル 0.3 に対する応力レベル 0.7 の荷重時熱ひずみの比を実験値よりも小さめに見積もる形で数式化を行ったためである。

7. まとめ

本報では、コンクリートの養生条件(気中養生, 封かん養生, 105℃での事前乾燥)および水セメント比(40%, 50%, 65%)がその荷重時熱ひずみに及ぼす影響を、加熱速度 1.5℃/分の全ひずみ実験および重量減少測定実験によって検討した。また、実験から得られた荷重時熱ひずみと試験体の重量減少率の関係を検討した。以下に本研究から得られた知見を示す。

- (1) コンクリート中の蒸発性水分の蒸発が荷重時熱ひずみに及ぼす影響は 100℃～200℃において顕著であり、全ての水セメント比において気乾試験体は絶乾試験体よりも荷重時熱ひずみが大きくなった。

図 17 標準化した荷重時熱ひずみと応力レベルの関係

- (2) 200℃以上の温度域では、セメント水和物の脱水および分解が荷重時熱ひずみに及ぼす影響が顕著になり、水セメント比 65%では封かん試験体の荷重時熱ひずみが気乾試験体よりも大きくなった。また、気乾試験体、絶乾試験体ともに、水セメント比が小さくなると荷重時熱ひずみは大きくなった。
- (3) 荷重時熱ひずみへの影響は、蒸発性水分の蒸発よりも、200℃以上の温度域で生じるセメント水和物の脱水および分解による方が著しく大きかった。
- (4) 応力レベルが 0.1～0.7 の範囲で、荷重時熱ひずみは、養生条件や水セメント比によらず応力レベルに比例して増加した。
- (5) 以上の結果を踏まえ、試験体の重量減少率を要因とした荷重時熱ひずみの数式モデルを提案した。そして、従来の温度を要因としたモデルとは異なり、提案モデルは本報で検討した養生条件や水セメント比のコンクリートに対して汎用的に適用できることを示した。

次報その 3 では、前報と本報の実験結果から得た応力ひずみ関係および全ひずみに関する構成則を用いてひずみ拘束実験の熱応力解析を行い、本報で提案した荷重時熱ひずみモデルの妥当性をより詳細に検討する予定である。

謝辞

本研究で報告した実験は、後藤暁氏(当時 千葉大学学生, 現 東京セキスイハイム株式会社)に協力いただき実施したものである。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会 編: 構造材料の耐火性ガイドブック, p.79, 丸善, 2009.3
- 2) 山下平祐, 常世田昌寿, 鈴木澄江, 白岩昌幸, 平島岳夫: コンクリートの高温時力学的特性に及ぼす養生条件と水セメント比の影響 コンクリートの高温時特性に及ぼす水分の影響 その 1, 日本建築学会構造系論文集 第 720 号, pp.385-393, 2016.2
- 3) Gavriel A. Koury, Brian N. Grainger, Patrick J.E. Sullivan: Strain of concrete during first heating to 600℃ under load, Magazine of Concrete Research, Vol.37, No.133, pp.195-215, 1985.12
- 4) Anderberg Y. and Thelendersson S.: Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperature 2.Experimental Investigation and Material Behaviour Model, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology, Bulletin No.54, Lund, Sweden, 1976
- 5) Schneider U.: Concrete at High Temperatures – A general Review, Fire Safety Journal, 13, No1, pp.55-68, 1988

- 6) Mohamad J. Terro: Numerical Modeling of the Behavior of Concrete Structures in Fire, *ACI Structural Journal*, pp.183-193, 1998
- 7) D. Gawin, F. Pesavento, B.A.Schrefler: Modelling of deformation of high strength concrete at elevated temperatures, *Materials and Structures*, pp.218-236, 2004
- 8) 右田周平, 平島岳夫, 前田孝一: 高強度コンクリートの高温時力学的特性に及ぼすポリプロピレン繊維および水分の影響, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.34, No.1, pp.1126-1131, 2012
- 9) 山下平祐, 平島岳夫, 吉田徹: 火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究-その 4.コンクリートの高温時全体ひずみに与える水分の影響-, *構造工学論文集*, Vol.61B, pp.1-7, 2015
- 10) 丹羽博則, 長尾覚博, 江戸宏彰, 上杉英樹, 齋藤光: 20°C~600°Cまでの高温載荷加熱を受けるコンクリートのひずみ挙動, *日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2*, pp.249-250, 1999.9
- 11) Jin Tao, Xian Liu, Yong Yuan, Luc Taerwe: Transient strain of self-compacting concrete loaded in compression heated to 700°C, *Materials and Structures*, pp.191-201, 2013
- 12) 崔景喆, 金主庸, 崔亨吉, 金武漢: 超高強度コンクリートの高温ひずみ特性を考慮した提案式の検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.37, No.1, pp.991-996, 2015
- 13) Hassen Sabeur, Fekri Meftah: Dehydration creep of concrete at high temperatures, *Materials and Structures*, pp.17-30, 2008
- 14) Gavriel A. Koury, Brian N. Grainger, Patrick J.E. Sullivan: Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents, *Magazine of Concrete Research*, Vol.37, No.132, pp.131-144, 1985.9
- 15) Jean-Christophe Mindeguia, Izabela Hager, Pierre Pimienta, Helene Carre, Christian La Borderie: Parametrical study of transient thermal strain of ordinary and high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, pp.40-52, 2013
- 16) U. シュナイダー著, 森永繁, 山崎庸行, 林章二訳: コンクリートの熱的性質, 技報堂, 1983.12
- 17) G.F.Peng, S.Y.N.Chan, M.Anson: Chemical kinetics of C-S-H decomposition in hardened cement paste subjected to elevated temperatures up to 800°C, *Advances in Cement Research*, pp.47-52, 2001
- 18) RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures- Recommendations Part 7 Transient creep for service and accident conditions, *Materials and Structures*, Vol.31, pp. 290-295, 1998
- 19) Eurocode 2: Design of concrete structures Part1-2: General rules- Structural fire design, The European Standard EN1992-1-2, p.26, 2004
- 20) Z.P. Bazant, J.C. Chern: Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism, *Materials and Structures*, Vol.18, No.103, pp. 1-20, 1985
- 21) A. M. Neville: Properties of Concrete, pp.26-30, Person Education Limited, 2002
- 22) 山下平祐, 吉田徹, 平島岳夫: 火災時におけるコンクリートの全体ひずみに与える水分の影響, *日本建築学会大会学術講演梗概集 防火*, pp.29-32, 2015.9
- 23) 吉田徹, 山下平祐, 平島岳夫: 火災加熱を受けるコンクリートの重量減少, *日本建築学会大会学術講演梗概集 防火*, pp.67-68, 2015.9

INFLUENCE OF CURING CONDITION AND WATER CEMENT RATIO ON LOAD-INDUCED THERMAL STRAIN OF CONCRETE

Influence of water content on properties of concrete in high temperatures Part 2

Heisuke YAMASHITA *, *Toru YOSHIDA* **, *Daiki SHISHIKURA* ***,
Masatoshi TOKOYODA * and *Takeo HIRASHIMA* ****

* Japan Testing Center for Construction Materials, Dr.Eng.

** Grad. Stud., Graduate School of Engineering, Chiba Univ.

*** Japan Testing Center for Construction Materials

**** Prof., Graduate School of Engineering, Chiba Univ., Dr.Eng.

When concrete is heated under a sustained load, a large amount of shrinkage occurs to compensate for thermal expansion. This shrinkage was termed the load-induced thermal strain (LITS), and must be considered when performing a deformation analysis of reinforced concrete structures that are subjected to fire. In the constitutive strain models used in such analyses, the LITS is a function of the concrete temperature. However, the relationship between the LITS and temperature is influenced by the water of the concrete, making it difficult to apply these models to concrete with different water conditions. In the present study, the influence of the curing conditions (air-dried, oven-dried and sealed curing) and water/cement ratios (40%, 50% and 65%) on the LITS was investigated based on results obtained from the transient tests for measuring total thermal strain of concrete specimens. The relationship between the LITS and specimen weight loss was also evaluated in order to develop a comprehensive model for the LITS that is appreciable to concrete with different curing conditions and water/cement ratios.

In the transient tests for measuring total thermal strain, specimens were heated at a constant rate of 1.5°C/min. up to 800°C under constant load. The ratio of the constant load to compressive strength of air-dried specimens at room temperature was settled between 0.1 and 0.7. The LITS was calculated by subtracting value of the free thermal strain from the total thermal strain. The heating rate in the transient tests for measuring the weight loss was same as the tests of the total thermal strain. The main results obtained from the present study are as follows:

- (1) The influence of the water evaporation on the LITS was evident between 100°C and 200°C.
- (2) The influence of the dehydration and decomposition of the cement hydrate on the LITS was evident above 200°C.
- (3) The LITS due to dehydration and decomposition was much larger than that due to water evaporation.
- (4) The relationship between the LITS and load level was seen to be linear, regardless of the curing conditions or water/cement ratio.
- (5) The numerical model for the LITS was proposed as a function of the weight loss of the specimens. And, it was indicated that the proposed model could be appreciable to concrete with different curing conditions and water/cement ratios.

(2015 年 12 月 10 日原稿受理, 2016 年 5 月 31 日採用決定)