

論文 強度・含水状態の異なるコンクリートの100 未満加熱時における力学性状の変化

酒井 正樹^{*1}・都築 正則^{*1}・溝淵 麻子^{*2}・一瀬 賢一^{*3}

要旨：本研究は、圧縮強度24N/mm²、36N/mm²相当のコンクリートに対して、脱型直後より4種類の乾燥条件にて含水状態を調整し、材齢91日より加熱温度と加熱期間を変えた100 未満の加熱を行い、力学性状の変化についての基礎データの収集と、加熱および乾燥が圧縮強度・静弾性係数におよぼす影響を検討したものである。その結果、加熱による圧縮強度の変化は、水セメント比・加熱開始時の含水状態の違いに関わらず、乾燥よりも熱の影響を受けやすいことがわかった。静弾性係数の変化は、加熱開始時の含水状態の違いに関わらず脱型時基準の質量減少率と高い相関が認められ、熱よりも乾燥の影響を受けやすいことがわかった。

キーワード：コンクリート，加熱，乾燥，含水状態，圧縮強度，静弾性係数

1. はじめに

コンクリートの熱影響に関しては、火災などの極めて短期間のうちに高温加熱を受ける場合と、使用期間を通じて長期に渡って加熱を受ける場合があり、それぞれに対して数多くの研究報告がある。

熱影響と力学性状に関しては、加熱温度が100 未満でも圧縮強度、引張強度、静弾性係数などの力学性状の低下が報告されている。たとえば高ら¹⁾、岸谷ら²⁾、志村ら³⁾は50 ~ 80 の温度において、長期間の高温乾燥による含有水分の変化により、ある範囲の含水率において圧縮強度が低下することを示している。しかしながら100 未満加熱がコンクリートの力学性状におよぼす影響に関しては、過去に多くの研究^{たとえば4)}が行われているものの、材料条件や試験条件など結果に影響をおよぼす要因が多く、試験条件によって結果は異なっている。

本研究は、圧縮強度24N/mm²と36N/mm²相当のコンクリートに対して、脱型直後より4種類の乾燥条件にて異なる

含水状態に調整した後、加熱温度および加熱期間を変えた100 未満の加熱を行い、力学性状の変化についての基礎データの収集と、加熱および乾燥が圧縮強度・静弾性係数におよぼす影響を検討したものである。

2. 実験概要

2.1 実験条件

実験の組合せを表-1に示す。

コンクリートは、圧縮強度24N/mm²と36N/mm²相当の2種類とした。試験体は、100mm × 200mmの強度試験用テストピースとし、各条件に対する試験体数は3体とした。加熱開始時の含水状態を変化させる目的で、打込み後48時間での脱型後より材齢91日まで、4種類の養生条件にて養生を行った。

試験体の加熱は材齢91日より行った。加熱時に試験体はシールせず、全面から乾燥する条件にて加熱を行った。加熱温度は20、40、65、90、加熱期間は1日、3日、7日、28日のそれぞれ4種類とした。

試験の流れ(養生・加熱方法)を図-1に示す。

表-1 実験の組合せ

項目	摘要	水準
調合	24 N/mm ² 相当 [Fm24]	2
[記号]	36 N/mm ² 相当 [Fm36]	
養生条件	標準水中 91日 [S91]	4
[記号]	封緘 91日 [F91]	
	標準水中 56日+気中*35日 [K35]	
	気中*91日 [K91]	
加熱温度	20℃, 40℃, 65℃, 90℃	4
加熱期間	1日, 3日, 7日, 28日	4

※1「気中」は20℃60%R.H.の恒温恒湿室に静置

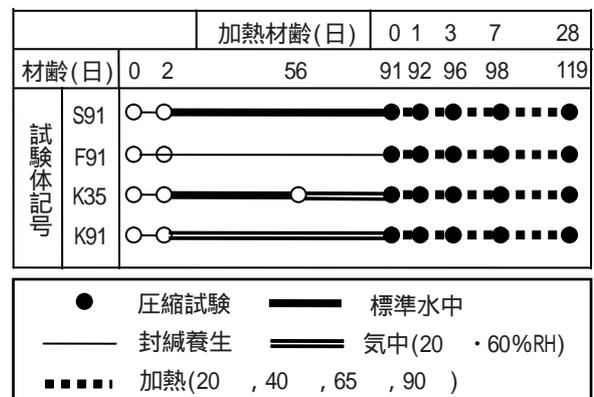


図-1 試験の流れ(養生・加熱方法)

*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 工修 (正会員)
 *2 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 (正会員)
 *3 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 博(工) (正会員)

2.2 コンクリートの使用材料，調合，基礎性状

コンクリートはレディーミクストコンクリートとした。
セメントは，JIS R 5210 に適合する普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)を使用した。

骨材は，細骨材として飯能産砕砂(表乾密度 2.63g/cm³)，富津産山砂(表乾密度 2.60g/cm³)，秩父産砕砂(表乾密度 2.67g/cm³)を質量比 50:20:30 で混合したもの，粗骨材として飯能産砕石 2005(表乾密度 2.65g/cm³)，西多摩産砕石 2005(表乾密度 2.67g/cm³)を質量比 60:40 で混合したものを使用した。

混和剤は，Fm24 ではリグニンスルホン酸系 AE 減水剤をセメント重量に対して 1.0%，Fm36 ではポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤をセメント重量に対して 0.85% 添加した。

コンクリートの調合を表 - 2 に示す。水セメント比は，60% (調合管理強度 Fm : 24N/mm²) と 48% (調合管理強度 Fm : 36N/mm²) の 2 種類とした。

コンクリートの基礎性状試験結果を表 - 3 に示す。打設時のフレッシュ性状は，Fm24 と Fm36 とともに目標スランプ 18 ± 2.5cm，目標空気量 4.5 ± 1.5% を満足した。

2.3 測定項目と測定方法

測定項目は，質量，圧縮強度，静弾性係数とした。また，養生条件の違いを評価するため，600 の電気炉中で恒量になるまで強熱して得た質量より行った。測定結果は 2 体の試料の平均値とした。なお，試料には骨材も含まれているため，結合水量の算定時には粗骨材および細骨材の骨材量を考慮した補正を行った。

質量の測定は，脱型時(材齢 2 日)，養生終了・加熱開始時(材齢 91 日)，加熱終了時(加熱材齢 1，3，7，28 日)に行い，以下の式(1)を用いて，脱型時を基準とした質量減少率を算定した。

$$(質量減少率) = (W_1 - W_0) / W_0 \times 100 \quad (\%) \quad \dots(1)$$

ここに，W₀ : 脱型時の質量(g)

W₁ : 所定材齢における質量(g)

圧縮強度，静弾性係数の測定は，養生終了・加熱開始時(材齢 91 日)および加熱終了時(加熱材齢 1，3，7，28 日)に行い，JIS A 1108 に準じた圧縮強度試験および JIS A 1149 に準じた静弾性係数試験を行った。

セメントに対する結合水量は，養生終了時(材齢 91 日)に測定した。測定に用いた試料は，試験体 1 体全てを粒

径 5mm 程度まで粉碎した後，二分器により約 100g まで縮分し，骨材ごと振動ミルで微粉碎したものとした。結合水量の測定は，試料を 105 の電気炉中で乾燥させた後，約 1g を分取して精秤し，600 の電気炉中で恒量になるまで強熱して得た質量より行った。測定結果は 2 体の試料の平均値とした。なお，試料には骨材も含まれているため，結合水量の算定時には粗骨材および細骨材の骨材量を考慮した補正を行った。

2.4 加熱試験方法

加熱試験には，送風式加熱炉を使用した。常温にて試験体を加熱炉に入れた後，20 /h で所定の加熱温度まで昇温させ，計画した加熱温度にて所定の期間加熱を行った。加熱を終えた試験体は，加熱炉から取り出した後，恒温恒湿室(20 ± 60% R.H.) に 24 時間静置し，試験体温度が常温となったところで質量測定，圧縮試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 養生終了時におけるコンクリートの物性

養生終了時(材齢 91 日)における圧縮強度，静弾性係数，結合水量を図 - 2 に示す。

各種養生後の圧縮強度は，Fm24，Fm36 とともに K35 > S91 > F91 > K91 の順を示した。K35 (標準水中 56 日 + 気中 35 日) の圧縮強度が，S91 (標準水中 91 日) よりも大き

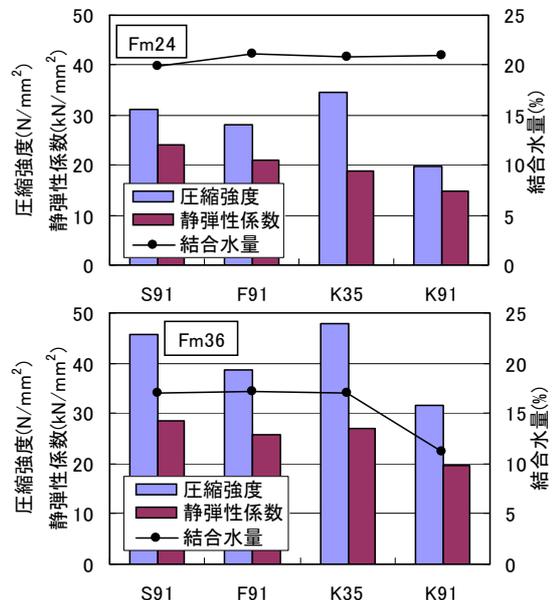


図 - 2 各種養生後のコンクリートの基礎性状

表 - 2 コンクリートの調合

Fm (N/mm ²)	W/C (%)	目標スランプ (cm)	目標AIR (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
24	60	18.0	4.5	50	182	303	900	894
36	48	18.0	4.5	50	170	357	887	894

表 - 3 コンクリートの基礎性状試験結果

Fm (N/mm ²)	W/C (%)	実測スランプ (cm)	実測AIR (%)	圧縮強度(N/mm ²)		静弾性係数(kN/mm ²)
				4週水中	13週封緘	
24	60	18.0	4.7	24.8	28.2	20.9
36	48	16.5	4.8	39.1	38.7	25.8

なくなったのは、乾燥によるみかけの強度増加⁵⁾の影響と考えられる。

結合水量は、Fm24では養生条件に関わらず同程度であり、Fm36ではK91のみ小さくなった。Fm24とFm36でのK91の測定値については、今後の検討が必要である。

各種養生後の質量含水率を図-3に示す。ここでの質量含水率は、絶乾状態との質量差から求めたものである。また、S91(標準水中91日)の質量含水率を100%とした時の、各種養生後の含水率の割合を併せて示した。

含水率は、S91 > F91 > K35 > K91の順を示した。S91の含水率を100%とすると、Fm24ではF91で80%、K35で59%、K91で35%まで低下し、Fm36ではF91で80%、K35で74%、K91で47%まで低下した。

また、Fm36ではFm24に較べて同一の養生条件に対し水分が抜けにくくなっており、組織が緻密化していることが推察される。

以上より、S91、F91、K35については、養生終了時の圧縮強度は調合管理強度Fm以上となり、結合水量が概ね等しく、養生終了時の含水状態がそれぞれ異なる試験体となった。しかし、K91については、他の養生条件に較べて圧縮強度が低く、養生終了時の圧縮強度は調合管理強度Fm未満となり、特にFm36では結合水量も小さい試験体となった。

3.2 加熱による質量変化

加熱温度と質量減少率の関係を図-4に示す。

加熱温度の違いを比較すると、Fm24、Fm36ともに養生条件に関わらず、加熱温度が高いほど質量減少率は大きく、各加熱材齢において、加熱温度と質量減少率の低下量は概ね比例関係となった。

加熱温度20では、加熱28日における質量減少率の増加量は0%~2.5%であり、加熱による乾燥の影響は小さいと考えられる。一方、加熱温度90では、養生条件に関わらず、加熱1日で加熱開始時の半分以下の含水率となり、加熱7日ではほぼ絶乾に近い状態となった。

3.3 加熱による圧縮強度変化

(1) 加熱温度の影響

図-5に加熱温度と圧縮強度の関係を、図-6に加熱開始時の含水状態の違いによる、加熱温度と加熱開始時に対する圧縮強度残存率の関係を示す。図中の凡例は、試験体3体の測定値をマークで示し、平均値を結線して示した。圧縮強度試験体3体の測定値の標準偏差()は0.1N/mm²~2.0N/mm²であった。

Fm24とFm36ともに、K91を除けば、加熱温度が高いほど、加熱後の圧縮強度は若干低下しており、概ね同様の傾向を示した。

K91は、加熱温度が高くなっても強度低下の割合が他の養生に較べて小さかった。これは、加熱開始までの乾燥が影響しているものと推察する。

加熱日数の違いを比較すると、加熱1日、3日、7日後

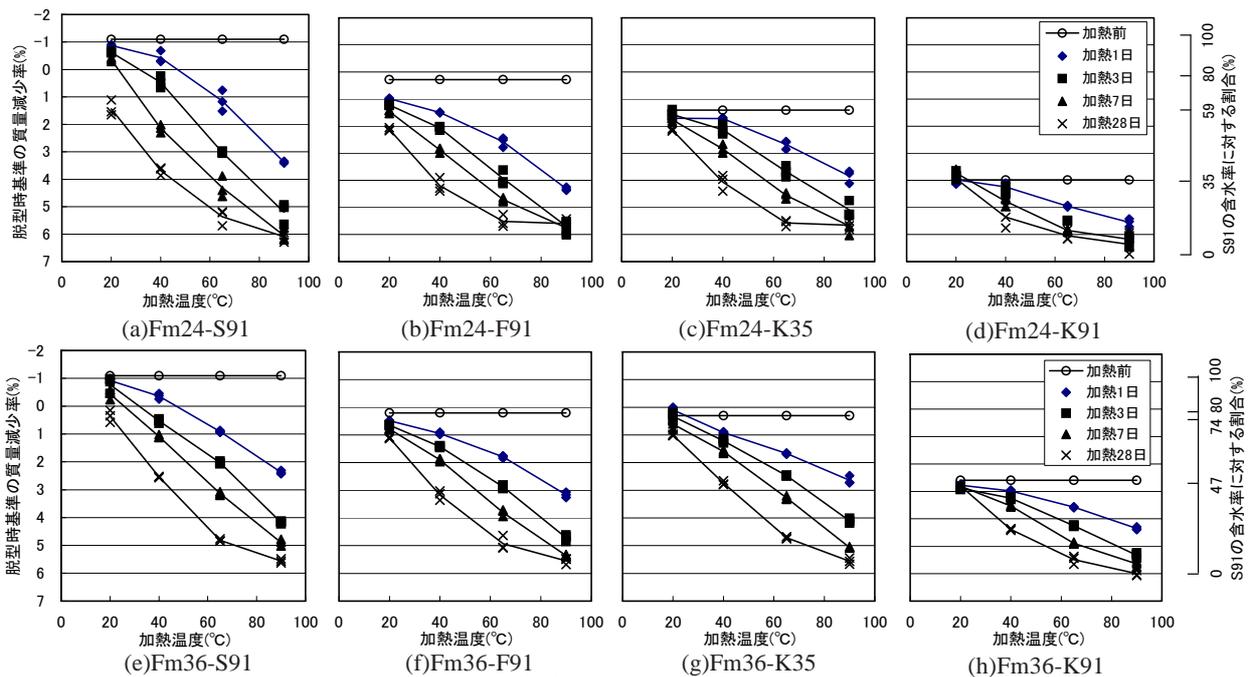
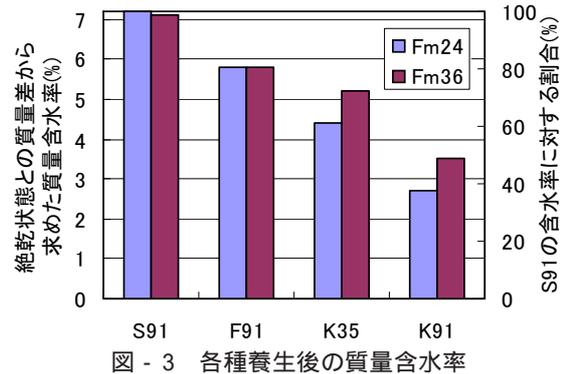


図-4 加熱温度と質量減少率の関係

の圧縮強度は概ね等しく、加熱28日後の圧縮強度は同等か若干の増加が認められた。

養生条件の違いを比較すると、S91とF91は、加熱温度20、40、65において大きな強度低下は見られなかった。加熱温度20、40では圧縮強度残存率はほとんど100%を超えており、加熱温度65でもほとんど90%を超えていた。圧縮強度が増加した理由として、軽微な加熱により未水和セメントの水和が促進されたためと考えられる。また、加熱温度90では、加熱28日において圧縮強度残存率は、S91で90%～100%程度、F91で85%～95%程度となった。

K35は、S91に較べて加熱前の圧縮強度が高く、加熱後の強度低下の割合が大きくなった。この理由としては、基準とした加熱開始時の圧縮強度が、乾燥によるみかけの強度増加の影響で高くなったことによるものと考えられる。

K91は、他の養生条件に較べて、加熱開始時の圧縮強度が10N/mm²以上低く、加熱温度に関わらず大きな強度低下は見られなかった。

(2) 加熱による乾燥の影響

図-7に質量減少率と圧縮強度の関係を、図-8に加熱開始時の含水状態の違いによる質量減少率と加熱開

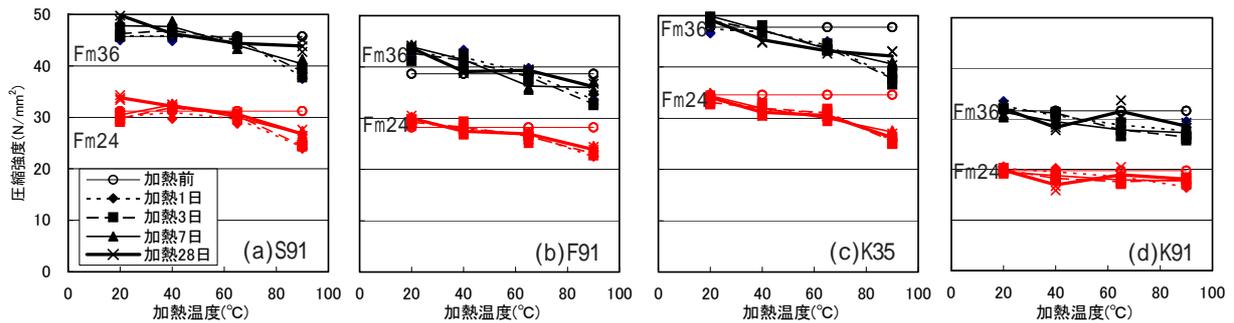


図-5 加熱温度と圧縮強度の関係

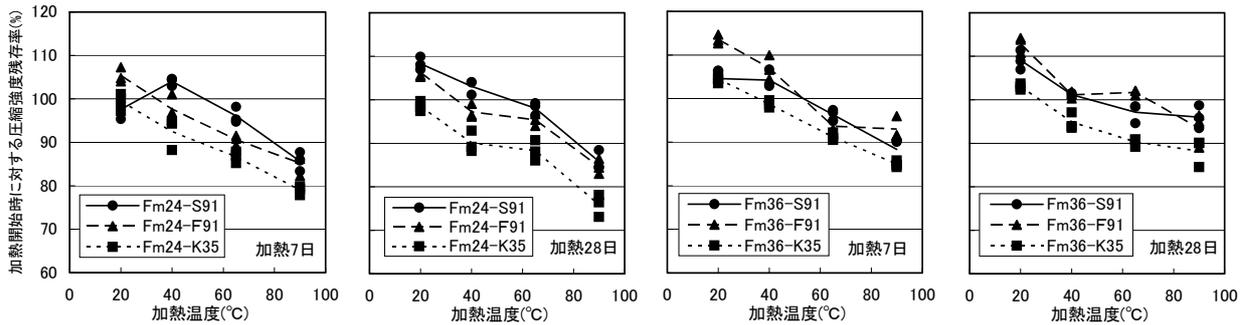


図-6 加熱温度と圧縮強度残存率の関係（加熱開始時の含水状態の影響）

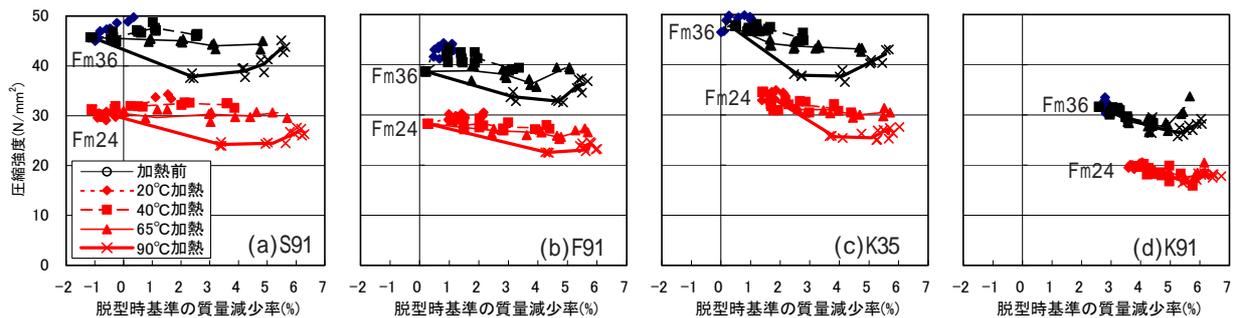


図-7 質量減少率と圧縮強度の関係

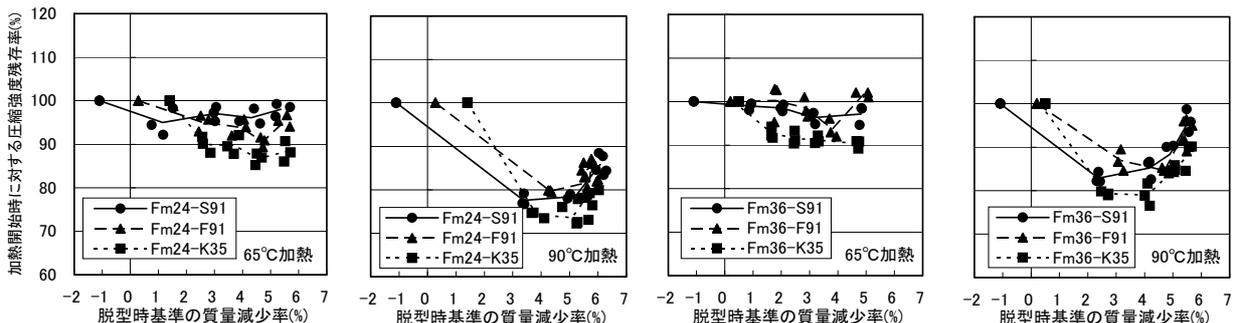


図-8 質量減少率と圧縮強度残存率の関係（加熱開始時の含水状態の影響）

始時に対する圧縮強度残存率の関係を示す。

Fm24とFm36ともに、K91を除けば、質量減少率と加熱後の圧縮強度の変化は、概ね同様の傾向を示した。

加熱温度の違いを比較すると、S91、F91およびK35は、加熱温度20、40、65と加熱温度90において異なる傾向を示した。

加熱温度65以下の場合は、質量減少率が大きくなる乾燥過程において、圧縮強度の低下は見られなかった。加熱による質量減少率の増加量は、加熱温度20で約1%、40で約4%、65では約7%となり、加熱温度65ではほとんど絶乾状態となった。

一方、加熱温度90の場合は、加熱開始後より急激に質量減少率が増加して乾燥が進み、質量減少率が3%~5%となったところで圧縮強度が低下した。その時の圧縮強度残存率はS91、F91の場合80%~85%、K35の場合75%~80%程度となった。しかしながら、更に乾燥が進み、絶乾状態に近づくにつれて圧縮強度の増加が見られ、加熱28日において、圧縮強度残存率はFm24で80%~90%、Fm36で90%~100%まで回復した。

長期加熱時における、ある範囲の含水率での圧縮強度の低下と回復の現象については、既往の研究^{1)~3)}でも見られる。本実験でも、加熱温度90において、質量減少率が3%~5%となったところで圧縮強度の低下と絶乾に近づくにつれて圧縮強度の回復が見られたが、加熱温度65以下では圧縮強度の低下は見られず、既往の研究に較べて熱影響を受けにくかったといえる。

本試験条件において、水セメント比・加熱開始時の含水状態の違いに関わらず、加熱温度65において既往の研究で見られるような、ある範囲の含水率での圧縮強度の低下と回復の現象が見られなかった理由については、今後の検討が必要である。

K91は、加熱温度の違いによる強度変化の割合が他の養生に較べて小さかった。しかしながら、絶乾状態に近づくにつれて、他の養生条件と同様に若干ではあるが圧縮強度の回復が見られた。

表-4に圧縮強度残存率におよぼす各影響要因の寄与率を示す。ここでは、K91を除いて検討した。

Fm24とFm36ともに、加熱後の圧縮強度残存率は加熱

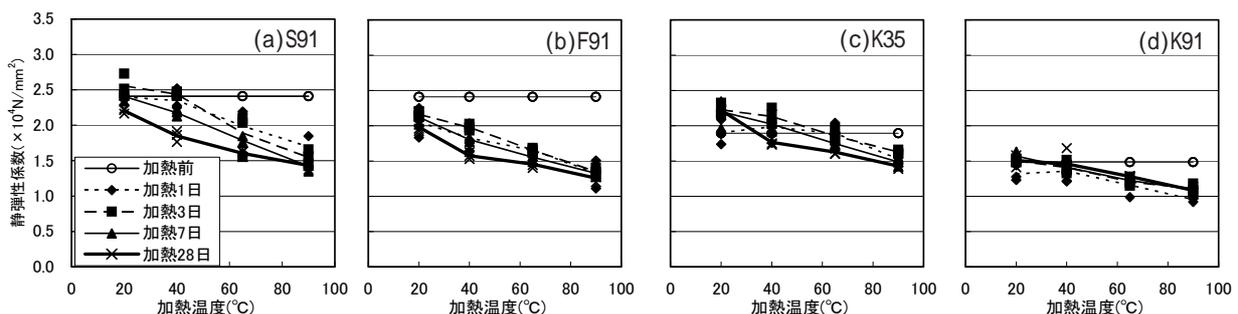


図-9 加熱温度と静弾性係数の関係 (Fm24)

温度と高い相関が認められ、加熱による圧縮強度の変化は、乾燥よりも熱の影響を受けやすいことが考えられる。

3.4 加熱による静弾性係数変化

(1) 加熱温度の影響

Fm24の加熱温度と静弾性係数の関係を図-9に示す。図中の凡例は、試験体3体の測定値をマークで示し、平均値を結線して示した。静弾性係数試験体3体の測定値の標準偏差()は $0.02 \times 10^4 \text{N/mm}^2 \sim 0.20 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ であった。

いずれの養生でも、加熱温度が高いほど、加熱後の静弾性係数は低下しており、概ね同様の傾向を示した。

また、Fm36においても、加熱後の静弾性係数の変化はFm24と同様の傾向を示した。

図-10に加熱温度と同材齢の標準水中養生に対する静弾性係数比(加熱・乾燥の影響を受けていない試験体に対する比)を示す。

Fm24とFm36を比較すると、加熱温度が高いほど、Fm24の方がFm36よりも静弾性係数の低下が大きくなった。特にK91では、加熱温度によらずFm24での静弾性係数の低下が大きかった。

加熱温度の違いを比較すると、K91を除けば、加熱温度20では、Fm24の方がFm36よりも静弾性係数が大きく、静弾性係数比は80%~100%であった。この理由として、加熱温度20では熱影響を受けず、加熱材齢の経過に伴い、水和が進行して組織が緻密になったことが考えられる。一方、加熱温度40、65、90では、Fm36の方がFm24よりも静弾性係数が大きくなった。圧縮強度が高いほど、加熱および乾燥が静弾性係数におよぼす影響は小さいと考えられる。

また、S91、F91、K35では、加熱温度90において、静弾性係数比はFm24で50%~60%、Fm36で60%~70%まで低下した。

K91では、他の養生に較べて、加熱開始時において静

表-4 圧縮強度残存率におよぼす各影響要因の寄与率

寄与率(R ²)		加熱温度	加熱期間	質量減少率
圧縮強度 残存率	Fm24	0.69	0.01	0.40
	Fm36	0.69	0.01	0.38

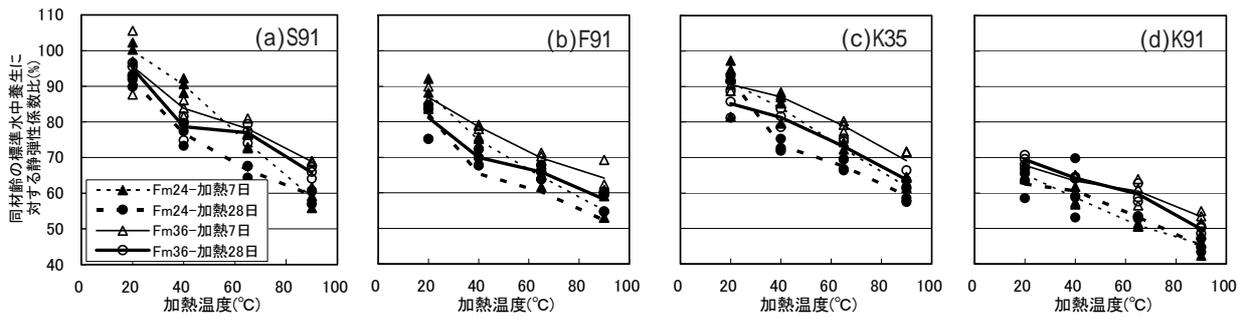


図 - 10 加熱温度と同材齢の標準水中養生（非加熱・非乾燥）に対する静弾性係数比

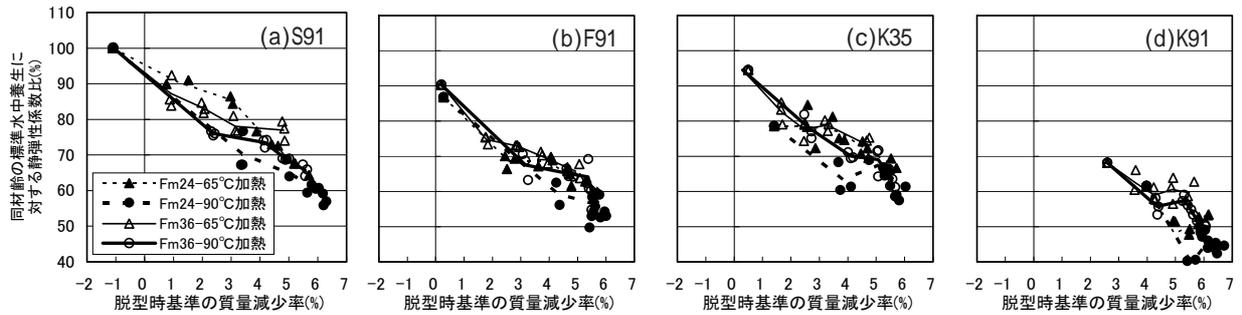


図 - 11 質量減少率と同材齢の標準水中養生（非加熱・非乾燥）に対する静弾性係数比

弾性係数比が70%以下であり、加熱温度90において、静弾性係数比は40%程度まで低下した。

(2) 加熱による乾燥の影響

図 - 11に質量減少率と同材齢の標準水中養生に対する静弾性係数比(加熱・乾燥の影響を受けていない試験体に対する比)を示す。

Fm24とFm36ともに、K91を除けば、質量減少率と静弾性係数比には比例関係が見られ、加熱温度に関わらず高い相関関係がみられた。

また、質量減少率3%～5%において、静弾性係数比の低下が一時的に停滞したが、更に加熱を受けると、いずれの養生条件でも質量減少率は6%程度のほぼ絶乾に近い状態となり、静弾性係数比は40%～60%まで低下した。

表 - 5に静弾性係数残存率におよぼす各影響要因の寄与率を示す。ここでは、K91を除いて検討した。

Fm24とFm36ともに、加熱後の静弾性係数残存率は脱型時基準の質量減少率と高い相関が認められ、加熱による静弾性係数の変化は、熱よりも乾燥の影響を受けやすいことが考えられる。

4. まとめ

100 未満加熱を受けたコンクリートの圧縮強度・静弾性係数について、以下のことが明らかとなった。

- (1) 加熱後の圧縮強度は、水セメント比・加熱開始時の含水状態にはほとんど影響されず、加熱温度が高いほど低下する傾向がある。
- (2) 加熱温度65と90ではともに、加熱28日においてほとんど絶乾状態まで乾燥を受けるが、加熱温度90では、乾燥が進行する過程において、圧縮強度の低下と回復が生じる。

表 - 5 静弾性係数残存率に及ぼす各影響要因の寄与率

寄与率(R^2)		加熱温度	加熱期間	質量減少率
静弾性係数 残存率	Fm24	0.59	0.08	0.60
	Fm36	0.74	0.11	0.81

- (3) 加熱による圧縮強度の変化は、加熱温度と高い相関があり、乾燥よりも熱の影響を受けやすいことが考えられる。
- (4) 加熱後の静弾性係数は、圧縮強度が低いほど低下しやすい傾向があり、加熱開始時の含水状態はほとんど影響しない。
- (5) 加熱による静弾性係数の変化は、脱型時基準の質量減少率と高い相関があり、熱よりも乾燥の影響を受けやすいことが考えられる。

参考文献

- 1) 嵩英雄ほか：高温にさらされたコンクリートの性状の変化に関する研究，コンクリート工学年次講演論文集，pp.25-28，1979.5
- 2) 岸谷孝一ほか：高温にさらされたコンクリートの性状の変化に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.267-268，1980.9
- 3) 志村重顕ほか：高温に長期間さらされたコンクリートの諸性質に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.603-604，2002.8
- 4) 川瀬清孝ほか：高温下(80～250)におけるコンクリートの強度性状について，日本建築学会学術講演梗概集，pp.477-478，1977.10
- 5) H.J.Gilkey：The Effect of Varied Conditions Upon the Compressive Strength of Mortar and Concrete；Proc. ACI，Vol.22，pp.395-436，1986