

# コンクリートの強度発現に及ぼす部材中水分の影響に関する研究

## A Study on the influence of moisture content on strength development in concrete members

河上 浩司 HIROSHI KAWAKAMI  
 西本 好克 YOSHIKATSU NISHIMOTO  
 蓮尾 孝一 KOICHI HASUO  
 松田 拓 TAKU MATSUDA

本研究では、圧縮試験後の供試体片を用いて測定した乾燥法による自由水、単位水量、骨材中の水分量、そして水分変化量を組み合わせてコンクリートのみかけの結合水を算出し、圧縮強度との相関性について確認実験を行った。その結果、圧縮強度について以下の知見を得た。

1)みかけの結合水を単位結合材量で除したみかけの結合水結合材比で評価すると、圧縮強度と非常に高い相関が得られる。

2)水結合材比が低くなるほどわずかな結合水量の差が強度へ与える影響が大きくなる。

キーワード：高強度コンクリート、圧縮強度、みかけの結合水

The apparent combined water content of compression test specimens that had been cut from each part of concrete members were measured. The following findings were obtained by evaluating the compressive strength in the ratio of binder amount to the apparent combined water. 1) The linear equation correlations are approved for the ratio and compressive strength respectively in the binder types and the water-binder ratio. 2) The inclination of the equation shows a high correlation to the ratio of water-binder.

**Key Words:** High-Strength Concrete, Compressive Strength, Apparent Binding Water

### 1. はじめに

コンクリートは、水結合材比が小さくなるほど得られる強度は高くなり、今日では  $150\text{N/mm}^2$  の強度が得られるような水結合材比が10%台の高強度コンクリートも製造されている。一方、セメントが完全に水和するためには質量で約44%の水が必要とされ<sup>1)</sup>、高強度コンクリートでは、セメントが完全に水和するのに単位水量が不十分であるにもかかわらず、低水結合材比になるほど得られる強度は高くなっている。

筆者等はこれまでに、各種結合材の高強度コンクリートを用いて模擬部材を作製し、乾燥条件下における部材内での強度分布について確認を行い、乾燥の影響が及ぶ範囲やその強度低下状況の確認を行った<sup>2),3),4)</sup>。本論では、この実験に併せて圧縮強度試験後の供試体片を使用して測定した  $105^\circ\text{C}$  乾燥法による質量含水率に加え、単位水量などその他のコンクリート中の水分に関する因子と合わせてみかけの結合水率を算出し、水分が強度発現へ与える影響について検討を行った結果を報告する。

### 2. 実験方法

#### (1) 概要と試験体形状

今回、検討に使用したデータは4シリーズの実験において収集した。各シリーズにおける検討養生方法と試験体の概要、1 調査当たりで作製した試験体数を表-1に示す<sup>2),3),4),5)</sup>。全てのシリーズで標準養生、 $20^\circ\text{C}$ 封かん養生および部材試験体（以下、試験体）から採取したコア供試体の圧縮強度を試験し、また、圧縮試験後の供試体片を集めて質量含水率を計測した。シリーズ1と2、ならびに4で用いた試験体は、大断面柱や壁から切り出した状況を模擬し、周囲の4面を断熱材とビニールで覆い、両端面からのみ放熱し乾燥を受けるモデルであり、その平面は図-1に示すとおりである。このうち、シリーズ1では片側1列にコンクリートを詰めた軽量型枠ごと埋め込み、水分移動を抑制し温度履歴のみを与えた埋込供試体とした<sup>2),3)</sup>。シリーズ2では、両端部の脱型材齢を4水準とし、脱型材齢の差による乾燥の影響とその影響深さについて比較を行った<sup>4)</sup>。シリーズ4は近年高強度コ

表-1 各シリーズの概要

|                        | 検討養生 |        |       |    |                                  |
|------------------------|------|--------|-------|----|----------------------------------|
|                        | 標準水中 | 20℃封かん | 小型試験体 |    |                                  |
|                        |      |        | コア    | 埋込 | 概要 (W×D×H, 脱型材齢)                 |
| シリーズ1 <sup>2),3)</sup> | ○    | ○      | ○     | ○  | 900×300×250, 材齢7日, 3~4体          |
| シリーズ2 <sup>4)</sup>    | ○    | ○      | ○     | —  | 900×300×210, 材齢1, 3, 5, 7, 日, 6体 |
| シリーズ3 <sup>5)</sup>    | ○    | ○      | ○     | —  | 500×500×400, 材齢25日, 1~5体         |
| シリーズ4 <sup>6)</sup>    | ○    | ○      | ○     | —  | 900×300×210, 材齢3日, 封かん, 4体       |

表-2 使用材料

| シリーズ  | 材料名             | 物性   | 記号     |
|-------|-----------------|--|--------|
| シリーズ1 | 普通ポルトランドセメント    | 密度 3.15g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3370cm <sup>2</sup> /g | N1     |
|       | 川砂 (鬼怒川産)       | 表乾密度 2.58g/cm <sup>3</sup> 吸水率 2.68% 粗粒率 2.75        | S1     |
|       | 硬質砂岩砕石 (葛生産)    | 表乾密度 2.67g/cm <sup>3</sup> 吸水率 0.97% 実積率 60.1%       | G1     |
|       | AE減水剤           | リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体                                |        |
|       | 高性能AE減水剤        | ポリカルボン酸系   |        |
| シリーズ2 | 普通ポルトランドセメント    | 密度 3.15g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3300cm <sup>2</sup> /g | N2     |
|       | 低熱ポルトランドセメント    | 密度 3.24g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3240cm <sup>2</sup> /g | L1     |
|       | シリカフェーム         | 密度 2.2g/cm <sup>3</sup> 比表面積 22.6m <sup>2</sup> /g   | SF1    |
|       | 川砂 (鬼怒川産)       | 表乾密度 2.61g/cm <sup>3</sup> 吸水率 2.68% 粗粒率 2.75        | S2     |
|       | 硬質砂岩砕石 (葛生産)    | 表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup> 吸水率 0.97% 実積率 58.9%       | G2     |
|       | 高性能AE減水剤, AE減水剤 | シリーズ1と同様   |        |
| シリーズ3 | 低熱ポルトランドセメント    | 密度 3.24g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3290cm <sup>2</sup> /g | L2     |
|       | シリカフェーム         | 密度 2.2g/cm <sup>3</sup> 比表面積 22.6m <sup>2</sup> /g   | SF2    |
|       | 骨材              | シリーズ1と同様   | S1, G1 |
|       | 高性能AE減水剤        | ポリカルボン酸系   |        |
| シリーズ4 | 中庸熱ポルトランドセメント   | 密度 3.21g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3260cm <sup>2</sup> /g | M1     |
|       | 川砂 (鬼怒川産)       | 表乾密度 2.53g/cm <sup>3</sup> 吸水率 2.09% 粗粒率 2.47        | S3     |
|       | 硬質砂岩砕石 (葛生産)    | シリーズ2と同様   | G2     |
|       | 高性能AE減水剤        | ポリカルボン酸系   |        |

ンクリートへの適用が増加しつつある中庸熱ポルトランドセメントの強度確認実験に併せてデータを収集した。シリーズ3の試験体は、より大断面の部材の内部を模擬したもので、500×500×400mmのほぼ立方体のブロックの周囲6面を断熱材とビニールで覆っている<sup>5)</sup>。

(2) コンクリート

各シリーズでの使用材料を表-2に示す。検討を行った結合材の種類は普通ポルトランドセメント (以下、Nセメント) と低熱ポルトランドセメント (Lセメント), 中庸熱ポルトランドセメント (Mセメント) そしてLセメント質量の10%を内割りでシリカフェーム (SF) と置換したLSFの4種類である。化学混和剤は、シリーズ1と2では水結合材比40%を境にして、40%以上ではAE減水剤を、40%未満では高性能AE減水剤を使用した。シリーズ4ではすべて高性能AE減水剤を使用した。また、超高強度領域の検討を行ったシリーズ3では超高強度コンクリート用の高性能減水剤を使用した。

実験に使用したコンクリートの調合とフレッシュ時の水分率を表-3に示す。記号は結合材種類と水結合材比の組合せで示している。フレッシュ時の水分率とは、コン

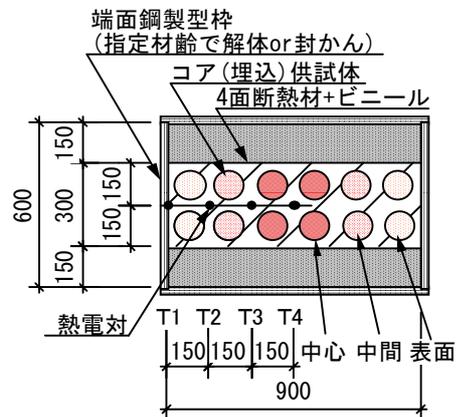


図-1 試験体平面 (シリーズ1, 2, 4)

クリートの単位水量と、骨材の吸水率と単位容積質量の積で示される表乾状態での骨材吸水量をコンクリート単位容積質量で除したものであり、両者を足した全水分率と単位容積質量の積は後の養生中の水分の出入りを評価するための内部水分量の初期値とした。コンクリート中の単位水量はコンクリート質量の6.0~9.0%程度であり、また、骨材中の水分量は1.0~1.4%程度であることがわかる。

表-3 コンクリート調合

| シリーズ | 調合記号  | W/B (%) | B/W | s/a (%) | 目標Air (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |    |     |     |      | フレッシュ水分率(%) |      |      |
|------|-------|---------|-----|---------|-----------|-------------------------|-----|----|-----|-----|------|-------------|------|------|
|      |       |         |     |         |           | W                       | C   | SF | S   | G   | All  | 単位水量        | 骨材吸水 | 全水量  |
| 1    | N60   | 60.0    | 1.7 | 45.8    | 4.5       | 175                     | 292 | —  | 813 | 995 | 2275 | 7.69        | 1.38 | 9.07 |
|      | N40   | 40.0    | 2.5 | 40.6    | 4.5       | 183                     | 458 | —  | 657 | 995 | 2293 | 7.98        | 1.19 | 9.17 |
|      | N30   | 30.0    | 3.3 | 43.8    | 3.0       | 160                     | 533 | —  | 724 | 963 | 2380 | 6.72        | 1.21 | 7.93 |
| 2    | N30   | 30.0    | 3.3 | 44.8    | 3.0       | 160                     | 533 | —  | 750 | 937 | 2380 | 6.72        | 1.23 | 7.95 |
|      | L40   | 40.0    | 2.5 | 42.1    | 4.5       | 183                     | 458 | —  | 693 | 968 | 2301 | 7.95        | 1.22 | 9.17 |
|      | L30   | 30.0    | 3.3 | 45.2    | 3.0       | 160                     | 533 | —  | 762 | 937 | 2392 | 6.69        | 1.23 | 7.92 |
|      | LSF30 | 30.0    | 3.3 | 50.8    | 3.0       | 150                     | 450 | 50 | 873 | 858 | 2381 | 6.30        | 1.33 | 7.63 |
| 3    | LSF30 | 30.0    | 3.3 | 52.8    | 2.0       | 150                     | 450 | 50 | 907 | 842 | 2399 | 6.25        | 1.35 | 7.61 |
|      | LSF25 | 25.0    | 4.0 | 50.4    | 2.0       | 150                     | 540 | 60 | 824 | 842 | 2416 | 6.21        | 1.25 | 7.46 |
|      | LSF20 | 20.0    | 5.0 | 46.3    | 2.0       | 150                     | 675 | 75 | 699 | 842 | 2441 | 6.15        | 1.10 | 7.25 |
|      | LSF16 | 16.7    | 6.0 | 41.5    | 2.0       | 150                     | 810 | 90 | 575 | 842 | 2467 | 6.08        | 0.96 | 7.04 |
| 4    | M40   | 40.0    | 2.5 | 48.0    | 3.0       | 170                     | 425 | —  | 827 | 921 | 2343 | 7.26        | 1.33 | 8.58 |
|      | M30   | 30.0    | 3.3 | 49.7    | 3.0       | 160                     | 533 | —  | 827 | 858 | 2378 | 6.73        | 1.28 | 8.01 |
|      | M25   | 25.0    | 4.0 | 47.0    | 3.0       | 160                     | 640 | —  | 741 | 858 | 2399 | 6.67        | 1.17 | 7.84 |

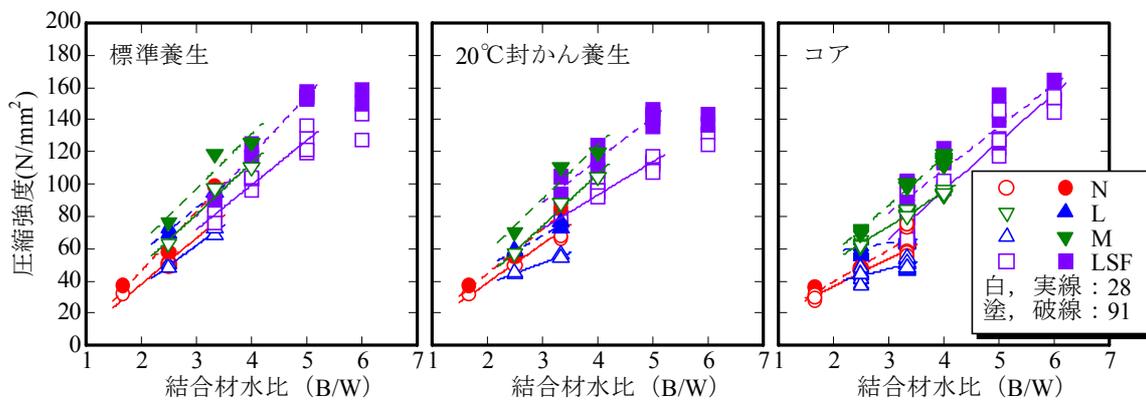


図-2 圧縮強度

3. 実験結果

(1) 圧縮強度

標準養生，20℃封かん養生および試験体より採取したコア供試体の強度発現を図-2に示す。なお，シリーズ1と2，そして4におけるコア強度は，表面部のコアは乾燥の影響を受けやすいと考えられるため除外している。図中，材齢28日強度は白抜のプロットと実線の回帰線で，91日強度は黒塗のプロットと破線の回帰線で示した。ただし，標準養生と20℃封かん養生におけるLSFでは，結合材水比 6.0 において頭打ちがみられたため，回帰線は結合材水比 5.0 以下で算出した。コアでは，明確な頭打ちを確認できないので結合材水比 6.0 までの範囲で回帰を行った。養生方法と頭打ち現象との関係については，高温履歴を受けることによりシリカフェームがより活性化し高強度化する可能性があるという報告<sup>6)</sup>もあるが，不明確であり今後の課題である。

標準養生の回帰線は，結合材の種類に関わらず同一材齢であれば傾きはほぼ一致しており，回帰線に極端な相違は確認できなかった。

一方，20℃封かん養生やコア供試体の回帰線は結合材

種類ごとにまちまちとなっている。これは，20℃封かん養生では十分な水の供給がないこと，さらにコアでは結合材の種類によって発熱量が異なるために温度履歴に差が生じることや，内部での水分移動の影響が加わることが原因の一つと考えられる。

(2) 質量含水率

コンクリートの質量含水率は，圧縮強度試験後の供試体の中心部から破片を集めて105℃で乾燥させて質量を恒質量になるまで計測し，乾燥前後の質量変化から質量含水率を算出した。

各結合材と質量含水率の分布の範囲を図-3に示す。同一水結合材比におけるプロットは，それぞれ上から最高値，平均値，そして最低値の順に示している。全体的に同一の水結合材比であれば，NセメントやMセメントに比べ，LセメントやLSFの質量含水率は大きくなる傾向が確認できる。結合材種類ごとに比較すると，水結合材比の低下に伴い質量含水率は低下していく。

シリーズ1とシリーズ2の一部の試験体について，コア供試体や埋込供試体の質量含水率の材齢による変化を図-4に示す。コア供試体と埋込供試体の質量含水率を比

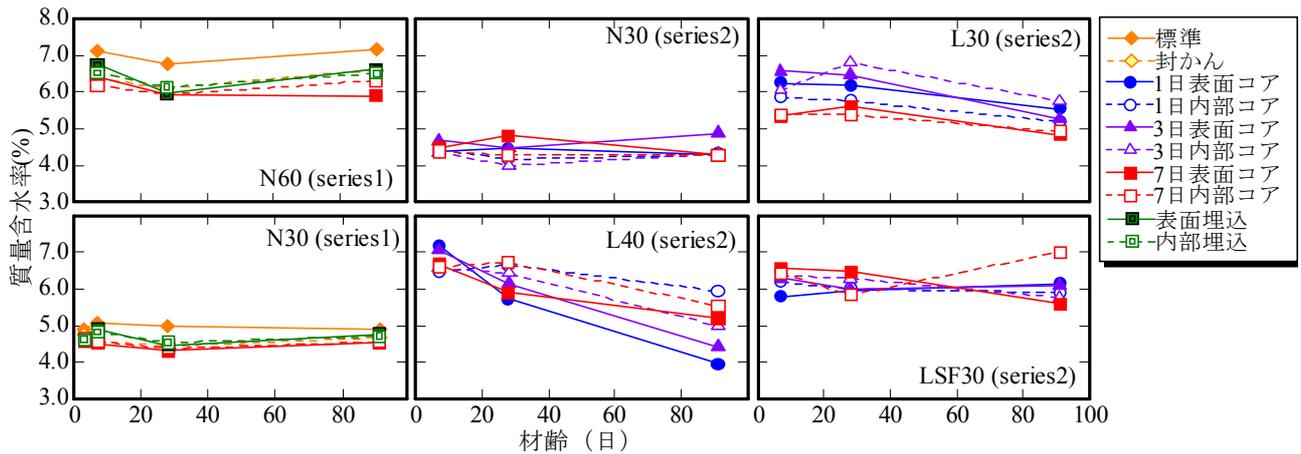


図-4 質量含水率の変化

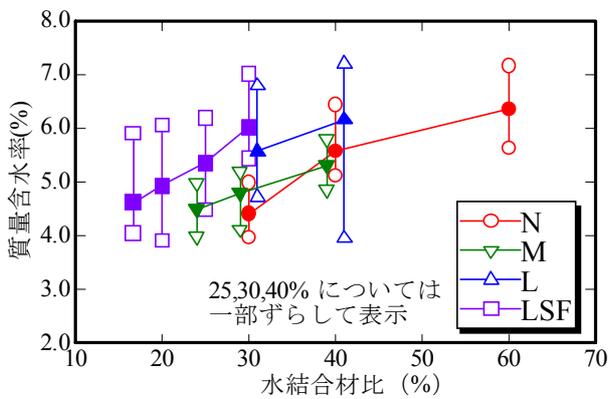


図-3 質量含水率の範囲

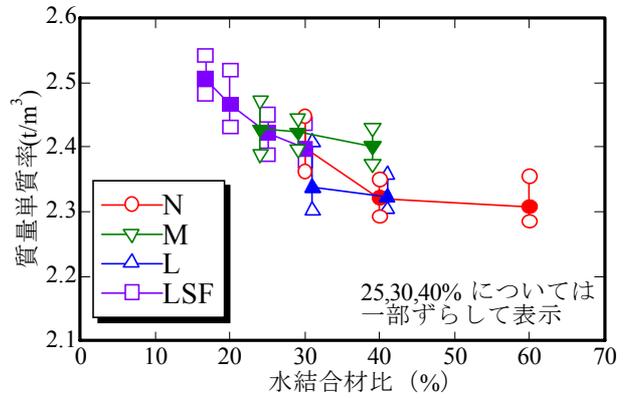


図-5 単位容積質量の範囲

較すると、N60では埋込供試体のほうが高く、また材齢91日では深さ方向での変動が小さくなる。一方、コアでは深さ方向で変動がみられ、材齢91日では表面部のコアの質量含水率が低い。N30ではコア供試体と埋込供試体の質量含水率の差は小さく、またコアでも深さ方向の変動は小さい。シリーズ2の結果をみると、L40では材齢1,3日から乾燥を与えた試験体より採取したコア供試体のうち表面部のコア供試体では質量含水率は極端に低下した結果がみられる。一方、L30とLSF30の質量含水率の変動幅はN30に比べ大きい、試験体の表面部のコアでも質量含水率が極端に低下することはなく、試験体内で均一に近づいている。水結合材比が低下するにつれて試験体内の水分分布が均一になっていく傾向があることを確認できた。

### (3) 単位容積質量

単位容積質量の測定値の例を図-5に示す。プロットは図-3と同様に上から最大値、平均値、そして最小値の順で示している。個々の調合における単位容積質量の変動幅は質量含水率の変動に比べて小さい。また、単位容積質量は水結合材比の低下に伴い増加する傾向にあるが、

結合材種類による比較を行うと結合材種類との明確な関係は確認できない。ここで、M40では表-3に示した調合上の目標空気量とともに実際の空気量が小さいため、単位容積質量はN40やL40より大きくなった。また、L30の単位容積質量はN30やM30、そしてLSF30と比較して小さいが、これは、L30では表-3中の目標空気量に比べ実際の空気量が大きくなったことが原因である。養生による差に関しては、外部から水が供給される標準養生では単位容積質量が大きくなる傾向がみられたが、水結合材比の低下に伴い養生による単位容積質量の差は小さくなった。

コア供試体と埋込供試体の単位容積質量の結果の例を図-6に示す。全体的に材齢28日以降では質量含水率の変動は小さい。それぞれ比較すると、N60ではコア供試体と埋込供試体の単位容積質量の差が大きい、N30では両者の差は小さい。また、シリーズ2のL40では、材齢1日や3日で脱型した表面部コアは内部のコアより単位容積質量が小さくなっており、若材齢で脱枠した場合には乾燥の影響を受けて単位容積質量が減少すると考えられる。その他の試験体では水平方向の分布について明確な傾向は確認できない。

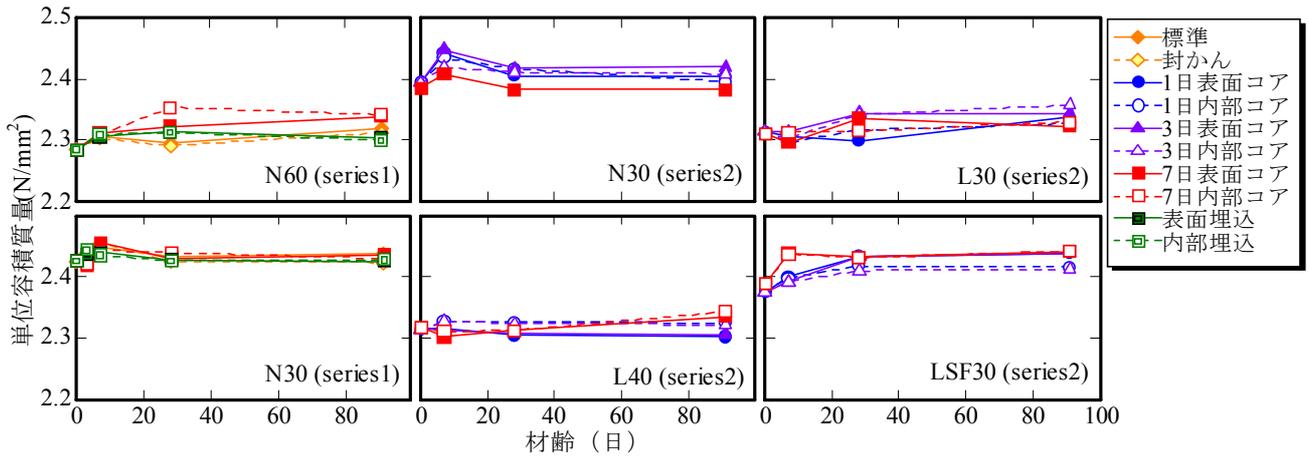


図-6 単位容積質量の変化

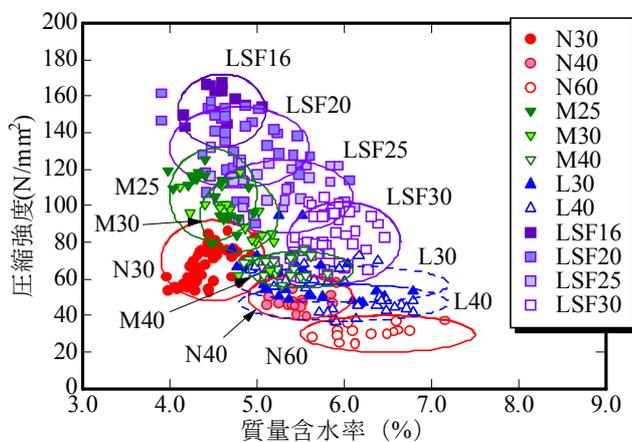


図-7 質量含水率と圧縮強度

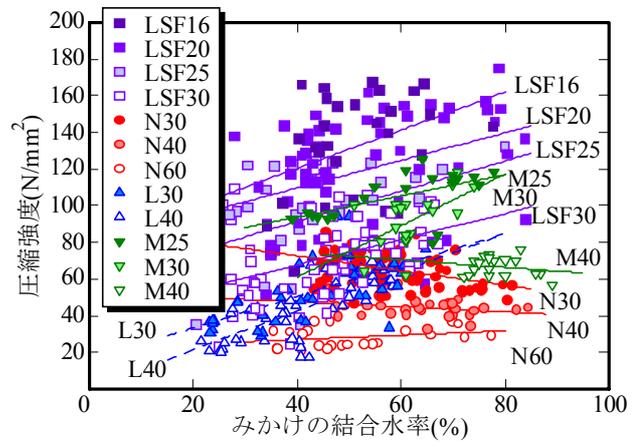


図-8 みかけの結合水率と圧縮強度

#### 4. 考察

##### (1) 質量含水率と圧縮強度

材齢28日と91日における、質量含水率と圧縮強度との関係を図-7に示す。結合材種類ごとに分布の領域が異なるものの、どれも水結合材比が小さいほど質量含水率は低く、圧縮強度は高強度になる傾向がある。結合材種類で比較すると、同一水結合材比で強度が等しい場合は、Nセメントの質量含水率はLセメントやLSFよりも小さい。しかし、個々の調合について検討した場合、その分布は団子状であり明確な傾向を見出すことはできなかった。

##### (2) 結合水率と圧縮強度

コンクリートの調合上の単位水量と骨材中の水分量、フレッシュ時の単位容積質量、圧縮試験時のテストピースの単位容積質量および質量含水率をもとにみかけの結合水量を式(1)により算出した。

$$W_b = W_0 + W_g \pm \Delta W - W_c \quad (1)$$

$W_b$  : みかけの結合水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$W_0$  : 単位水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$W_g$  : 骨材に含まれる水分量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

(調合上の骨材量 $\times$ 吸水率)

$\Delta W$  : 吸水・乾燥による水分変化量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

(単位容積質量変化により評価)

$W_c$  : 質量含水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

みかけの結合水量を単位水量で除した、みかけの結合水率(%)と圧縮強度との関係の一部を図-8に示す。みかけの結合水率は広範囲にわたり分布し、今回の検討ではその範囲は20~80%に及んだ。また、結合材種類や水結合材比により分布の範囲が異なるが、水結合材比が低いほど高強度側に分布する。しかしながら、各調合の回帰線の傾きがばらばらなだけでなく分布の変動も大きい。

続いて、みかけの結合水量を調合上の単位結合材量で除してみかけの結合水結合材比を算出し、圧縮強度との関係の評価した結果を図-9に示す。なお、図中にはそれぞれの調合について原点を通る直線により回帰を行った

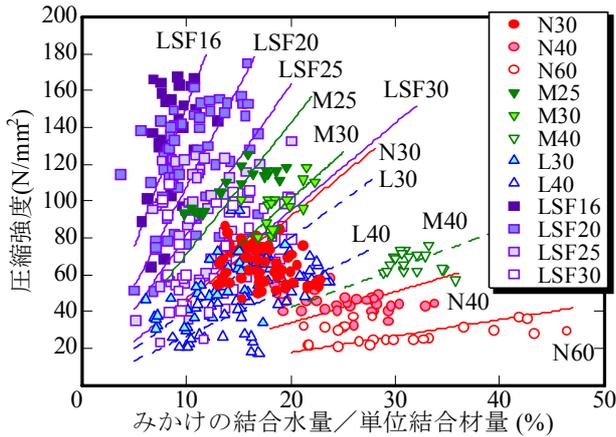


図-9 みかけの水結合材比と圧縮強度

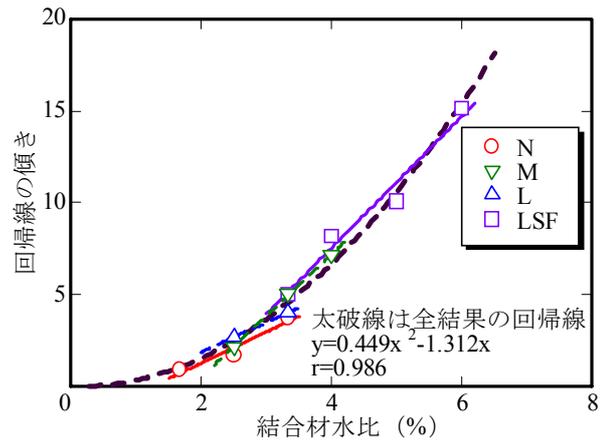


図-10 関係式の傾き

結果を併せて示す。回帰線に対しばらつきが大きいのは結合水を様々な要因から間接的に算出しているため、個々の差異が重ね合わされた結果と考えられる。

低強度領域のコンクリートから超高強度領域のコンクリートまで、傾きは連続的に大きくなっていく傾向が確認できる。ここで、同一のみかけの結合水結合材比のときは、調合上の水結合材比が小さいコンクリートほど高強度となる。また、みかけの結合水結合材比が大きい、すなわち、みかけの結合水量が増加すると高強度化するが、水結合材比が小さいほど、回帰式の傾きは大きくなるため、わずかな結合水量の差が強度に大きな影響を与えることがわかる。

図-9中の回帰式の傾きを結合材水比で整理した結果を図-10に示す。すべての結果は原点を通る二次曲線で良好に回帰され連続性が確認できる。すなわち、結合水量と水結合材比により、低強度から超高強度領域までコンクリートの強度を連続的に評価できる可能性が示唆された。

### 5. まとめ

今回の実験により、高強度コンクリートの圧縮強度と内部水分との関係について以下の知見が得られた。

- 1) 水結合材比が小さいコンクリートでは、養生方法による質量含水率の変動は小さくなる。
- 2) みかけの結合水結合材比により、低強度領域から超高強度領域までのコンクリートの圧縮強度を評価できる可能性を示した。
- 3) コンクリートの水結合材比が低下するほど結合水量が強度に与える影響が大きくなった。

本論は、限られた条件と試験結果から検討を行った結果である。今後は、データの収集を引き続き行い結合水と強度との関係を、さらに検討する所存である。

謝辞：本研究を行うに当たりサンプルを提供いただきました住友大阪セメント(株)、(株)ポリリス物産の関係諸氏に感謝いたします。また、貴重なアドバイスを頂きました宇都宮大学 榊田佳寛教授に深謝いたします。

### 参考文献

- 1) (社)コンクリート工学協会：コンクリート便覧「第二版」、技報堂出版、1996
- 2) 皆川淳ほか：構造体中でのコンクリート強度発現の変動に関する基礎的実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.24, No.1, pp.945-950, 2002.6
- 3) 佐藤幸恵ほか：高強度コンクリートの構造体内部での含水率の変化と強度発現性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.25, No.1, pp.1031-1036, 2003.7
- 4) 河上浩司ほか：型枠解体材齢が構造体コンクリート強度に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.25, No.1, pp.1025-1030, 2003.7
- 5) 河上浩司、西本好克：Fc100/mm<sup>2</sup>級の超高強度コンクリートの強度発現に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.24, No.1, pp.369-374, 2002.6
- 6) 菅俣 匠ほか：セメント-シリカフェーム系結合材の水和反応と強度発現性の関係に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.26, No.1, pp.1287-1292, 2004