

DM/SI 法によるコンクリートの諸性状

Physical Properties of DM/SI Concrete

北海道大学大学院 工学研究科 ○学生員 福島道人 (FUKUSHIMA Michito)

北海道大学大学院 工学研究科 正員 堀口敬 (HORIGUCHI Takashi)

北海道大学大学院 工学研究科 フェロー 佐伯昇 (SAEKI Noboru)

1. まえがき

主に月面上での適用を想定して、液体の水を用いずセメントと骨材を乾燥状態で混合し、高温高压の蒸気を噴き付けることによってコンクリートを作成する方法として T.D.Lin 博士が考案した Dry Mix / Steam Injection Method (以下 DM/SI 法と呼ぶ) がある。この方法は主としてモルタル供試体を用いた実験結果が知られており、コンクリートに適応した報告は少ない。本研究は DM/SI 法における骨材、配合、蒸気噴射時間、締固め法等の影響を検討し、コンクリート供試体への応用を検討したものである。

2. 実験の概要

2.1 DM/SI 法での作成方法

本実験では $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 及び $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 円柱型枠を用いた。蒸気噴射にはオートクレーブを用い、9 気圧 180℃の蒸気を噴射した。昇温昇圧には 1 時間、降温降圧には 10 時間をかけた。

2.2 推定水セメント比

DM/SI 法では練り混ぜ水を使用しないため、通常の水セメント比 (W/C) を求めることは出来ない。そこで、蒸気噴射前の乾燥混合物 (セメント+骨材) の重量と蒸気噴射後自由水を飛ばした供試体の重量との差を結合水量とし、そこから計算した値を推定 W/C とした。本研究では 105℃で蒸発する水分を自由水と定義した。

2.3 その他

本文中の強度とは全て圧縮強度のことであり、強度・重量・推定 W/C 等は全て供試体 3 本の平均値である。

3. 実験結果と考察

3.1 蒸気噴射時間の影響

既往の研究では温度及び圧力 (オートクレーブではボイラーからの飽和水蒸気により高圧力を得ているためこの 2 つは比例する) を上げた方が短時間で高強度が得られるとして 9 気圧 180℃で 18 時間を最適値としている¹⁾。9 気圧 180℃というのは通常のオートクレーブの限界値である。しかし、 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 以上のサイズとなると 18 時間では水和が不十分で形をなさない。そこで 9 気圧 180℃蒸気浸透時間を 54 時間と 80 時間という長時間での実験を行った。乾燥混合物の締固めには 40mm x

40mm x 160mm モルタル試験用の突き棒 (重量 1kg、底面 40mm x 40mm) を用い、配合は C:S=1:2、セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には豊浦標準砂を使用した。結果を図-1 に示す。56 時間では 22.6MPa、80 時間では 40.3MPa の強度を得、18 時間では形にすらならなかったサイズの作成に成功した。これにより大型供試体には長時間の蒸気噴射が必要であることが判明した。また、 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ と $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ を比較すると強度、推定 W/C ともに同程度であり、 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ に関しては 80 時間で十分であると考えられる。

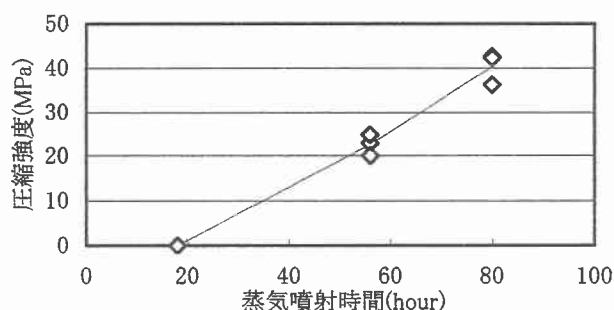


図-1 蒸気噴射時間と圧縮強度の関係

3.2 骨材の影響

一般にオートクレーブ養生ではシリカフェーム等を加えることにより水和生成物中の水酸化カルシウム $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がシリカ SiO_2 と反応し高強度を得ると言われている。これが DM/SI 法にも当てはまるかを検討するため、シリカ 99%以上である豊浦標準砂と通常の川砂を用いて比較した。骨材以外の供試体作成条件は 3.1 と同様とした。結果、標準砂が 40.3MPa に対し、川砂は 23.1MPa と明らかな差が見られた。骨材自体の強度の差を考慮しても違いは歴然としており、DM/SI 法においてもシリカの添加は有効であることが確認された。

3.3 締固め方法の影響

締固めを強くすれば空隙が少なくなり強度が上がるということが予想されたため、 $\phi 100\text{mm}$ の金属円盤を用意し、締固めの際の突き棒落下回数を変化させて締固め度の違う供試体を作成した。骨材は川砂で他の条件は 3.1 と同様とした。乾燥混合物の空隙率が 26.0%と 23.8%の 2 種類を得、強度はそれぞれ 23.1MPa、46.1MPa となった。これにより、締固め度の重要性が確認された。また、

23.8%のものと同様の落下回数に加え、ハンマーで振動を与えることにより 22.8%の空隙率のものを得たが、強度は 35.5MPa であった。これは振動によりセメントと骨材の分離が起ったためと考えられる。締固めの際には振動を与えず、軸方向の圧縮力のみを加えるのが良いことが確認された。結果を表-1 にまとめて示した。

表-1 締固め方法の影響

振動	乾燥混合物の空隙率	強度
無	26.0 %	23.1 MPa
無	23.8 %	46.1 MPa
有	22.8 %	35.5 MPa

3.4 配合の影響

配合の違いが強度に影響を与えることは既往の研究からも明らかであるが、本実験では各配合における推定 W/C 及び乾燥混合物の空隙率を計算し、それぞれの関連を考察した。骨材には川砂を用い、締固めはφ100mmの金属円盤に重量1kgの突き棒を150mmの高さから30回落下させるという方法で、一定の締固め度を狙った。その他の条件は3.1と同様とした。結果を表-2 に示す。

表-2 配合の影響

C:S	乾燥混合物の空隙率	推定 W/C	強度
1:3	21.5 %	10.1 %	40.3 MPa
1:2	23.8 %	9.1 %	46.1 MPa
1:1	28.7 %	8.0 %	53.5 MPa

セメントの割合が多くなるにつれて乾燥混合物の空隙率が増えているが、逆に強度は上昇している。これは、粒度分布の違いが粉体の締固め度に影響を及ぼすものの、富配合のモルタルほどセメントが水和反応により膨張し、空隙を埋めるためと考えられる。反応後の空隙率は今回は計測していないが、強度から推測すると乾燥混合物の空隙率とは反比例することが考えられる。

3.5 粗骨材の影響

9気圧180℃蒸気噴射時間が18時間までの場合では小さな供試体サイズまでしか作れなかったこともあり、粗骨材抜きモルタルを作成してきたが、時間を延長することで大型供試体にも適応できることが明らかになった。今、粗骨材を含んだいわゆる「コンクリート」の作成への要求が強くなることは当然である。本実験では配合を変えた数種類のコンクリート供試体を作成した。各配合の推定 W/C と圧縮強度を表-3 に示す。

表-3 コンクリートの場合

C:S:G	推定 W/C	強度
30:30:40	8.7 %	30.0 MPa
20:40:40	8.6 %	39.4 MPa
25:25:50	7.8 %	30.0 MPa
17:33:50	9.1 %	40.2 MPa
20:20:60	8.5 %	25.1 MPa
13:27:60	9.9 %	30.0 MPa

C:セメント S:細骨材 G:粗骨材 (重量比)

C:S:G=20:40:40 や 17:33:50 では 40MPa 程度の強度を発現しており、締め固め方法を工夫すれば更なる強度増加も期待でき、コンクリートにも DM/SI 法を適用できることが確認された。

3.6 推定水セメント比

本研究では計測された推定水セメント比 (W/C) は全て 10%前後であるが、通常のコンクリートではセメントが完全に水和するのに必要な水分量は W/C にして 23%程度と言われているが、今回の値はその半分以下である。その原因の一つとして、DM/SI 法の水和生成物が通常の方法 (Wet-Mix 法) とは違うことが挙げられる。また、DM/SI 法では W/C=12~15%という報告もある²⁾。本実験では自由水を飛ばすための乾燥温度を 105℃としているが、105℃では結合水の一部が飛んでしまうとの報告もあり、正確な結合水量を計測するには更なる研究を要する。

4. まとめ

- 本実験から次のことが言える。
- 蒸気噴射時間を延ばすことで従来よりも大型の供試体に適応することが明らかになった。
- シリカ質の骨材若しくは添加材を用いることで強度の増加を図ることが出来る。
- 乾燥混合物の締固め度を上げることで大幅な強度の増加を図ることが出来るが締固めの際に振動を加えると材料の分離が起こり強度低下を招くので注意が必要である。
- 富配合の方が乾燥混合物の空隙量が増える可能性もあるが強度は増加する。
- 粗骨材を入れたいわゆるコンクリートに対しても DM/SI 法を適用することが出来る。
- 推定水セメント比は 10%前後と低い値となった。推定水セメント比の測定方法については更なる検討が必要とされる。

5. あとがき

米航空宇宙局 (NASA) が月から火星へと予算配分をシフトしてきており、一時活発であった月面基地建設の議論も下火になってきている。また、DM/SI 法の研究は国内では本研究室のみにて行われているという状況である。しかしながら DM/SI 法は月面コンクリートのみならず地球上のプレキャストコンクリートとしての可能性も十分に秘めたものであり、今後、他研究機関においても積極的な研究がなされることを期待し、あとがきとしたい。

参考文献

1) T.D.Lin : The Dry Mix / Steam Injection Method for Producing High-Strength Concrete in One Day, ACI, SP-149-37, pp665-667,(1993)
2) W.M.Lin, C.L.Hwang, Y.N.Peng : Characteristics of Microhydrates Formed under Steam Conditions, ACI Materials Journal May-June 2000, pp309-324, (2000)