

配合条件がモルタルの引張軟化特性に及ぼす影響

The influences of mix proportions on tension softening characteristics in meso-scale mortar

北海道大学大学院工学院 ○学生員 大河内孝彦 (Takahiko Okochi)
北海道大学大学院工学院 学生員 三浦泰人 (Taito Miura)
北海道大学大学院工学院 正会員 佐藤靖彦 (Yasuhiko Sato)

1. はじめに

コンクリートは様々な要因がひび割れの進展に影響することから、そのひび割れ性状は極めて複雑なものとなる。近年、このようなひび割れ進展挙動を適切に評価するために、メソスケールの領域の力学特性に着目した検討^{1),2),3)}が行われている。

本論文では、最大骨材寸法（以下、 D_{max} と表す）および W/C の異なるモルタルの薄片供試体による曲げ試験および化学分析を行った。曲げ試験から得られる荷重変位曲線から逆解析により引張特性（弾性係数、引張強度、破壊エネルギー、引張軟化曲線）を同定するとともに、化学的性質として薄片供試体中の水和物量の定量分析と空隙率の測定を行った。また、供試体高さの違いが及ぼす影響を検証するために、供試体高さが同一で D_{max} が異なる薄片供試体についても検討を行った。最終的に、最大骨材寸法、W/C、水和物量と引張特性の関連性を評価した。

2. 実験内容

2.1 配合条件

セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、モルタルミキサーにより $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ の角柱供試体を作製した。配合条件および実験変数を表-1 に示す。本実験の実験変数は、水セメント比および最大骨材寸法である。水セメント比は 40 %、50 %、60 %とし、最大骨材寸法は 5 mm、3.35 mm、1.7 mm となるように篩を用いて調整した。なお、いずれの条件においても、砂とセメントの質量比は 1:3 である。打設 2 日後に脱型し、水中にて 28 日間養生を行った。

2.2 薄片供試体の作製方法

養生終了後の角柱供試体を用いて、コンクリートカッターにより薄片供試体の成形を行った。なお、この際、薄片供試体はブリーディングおよび骨材の偏りなどの要因を排除するため、打設面を切り落とした。

表-1 示方配合

W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)
40	217	543	1630
50	258	515	1546
60	294	490	1471

表-2 供試体一覧

供試体名	Dmax (mm)	W/C (%)
D1.7-W40	1.7	40
D1.7-W50	1.7	50
D1.7-W60	1.7	60
D3.35-W40	3.35	40
D3.35-W50	3.35	50
D3.35-W60	3.35	60
D5.0-W40	5.0	40
D5.0-W50	5.0	50
D5.0-W60	5.0	60
VD1.7-W50-7	1.7	50
VD1.7-W50-10	1.7	50
VD3.35-W50-10	3.35	50

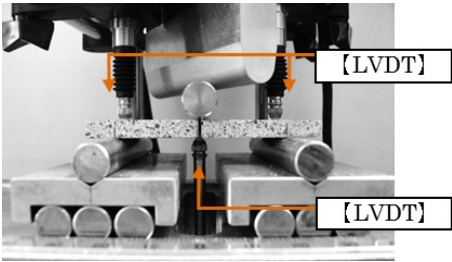


写真-1 曲げ試験状況

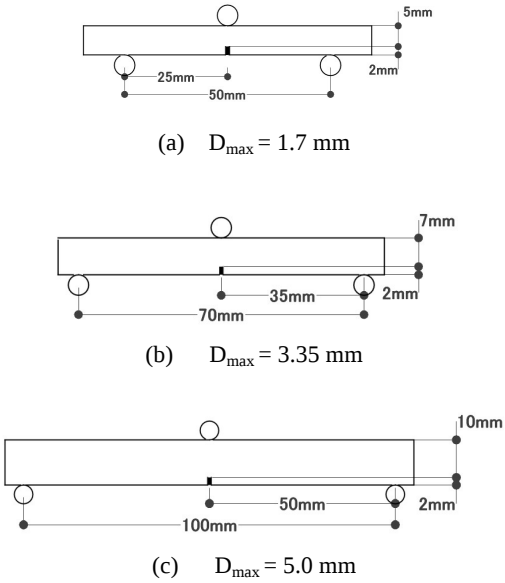


図-1 薄片供試体

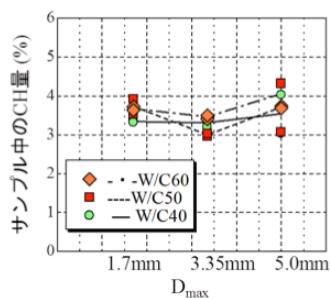


図-2 各 W/C における CH 量

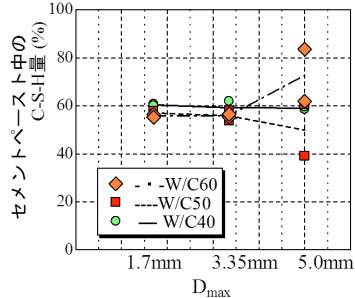


図-3 各 W/C における C-S-H 量

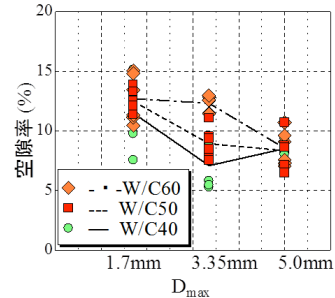


図-4 各 W/C における空隙率

$D_{\max}$ ごとの薄片供試体の寸法は、次の通りである。 $D_{\max}=1.7\text{ mm}$ の薄片供試体は、 $7\times 30\times 70\text{ mm}$ 、 $D_{\max}=3.35\text{ mm}$ の場合は、 $10\times 30\times 80\text{ mm}$ 、 $D_{\max}=5\text{ mm}$ の場合は $12\times 30\times 110\text{ mm}$ である。これらの薄片供試体の寸法は、供試体の高さを $D_{\max}$ の 2 倍以上となるように設定するとともに、供試体の支点間距離と高さの比を 5 に統一にした。また、安定的な破壊を起こすために全ての供試体には載荷点直下に幅 1 mm、深さ 2 mm の切欠きを設けた。なお、同一条件における供試体数は 5 体とした。

また、本実験では $D_{\max}$ の違いにより供試体高さが異なる。そのため、供試体高さが同じであり $D_{\max}$ のみが異なる供試体を用いて、その影響の検証を行った。なお $D_{\max}=1.7\text{ mm}$ では $h=7\text{ mm}$ と $h=10\text{ mm}$ 、 $D_{\max}=3.35\text{ mm}$ では $h=10\text{ mm}$ の供試体について検討を行った。この時の配合は表-1 での $W/C=50\%$ と同様である。また養生日数は 28 日とした。

2.4 実験方法

(1) 曲げ試験

曲げ試験は、写真-1 に示すような 3 点曲げ試験である。載荷方法は変位制御とし載荷速度は $1\mu\text{m/sec}$ とした。この際、LVDT 変位センサーを支点と載荷点直下に設置し測定を行った。

(2) 化学分析

化学分析⁵⁾に用いる試料は、曲げ試験後の薄片供試体を鉄乳鉢で粗粉碎し、ボールミルで $100\text{ }\mu\text{m}$ 以下となるまで粉末化したものである。

着目した水和物は CH と C-S-H である。CH は TG-DTA による熱分析によって測定し、C-S-H は重液分離法とサリチル酸メタノール法を駆使してサンプル中の C-S-H 量を測定した。なお、本論文では、CH は試料全体に対する質量比、C-S-H は骨材を取り除いたセメントペースト中の質量比として表される。

空隙率は曲げ試験後の供試体から 5mm 角のサンプル切り出し測定を行った。本実験では以下の式を用いて空隙率として表す。

$$\text{空隙率} = P = \frac{W_w - W_d}{V_w} - \frac{\rho_w}{\rho_{\text{sp}}} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

ここで、 W_w : 湿潤重量、 W_d : 乾燥重量、 V_w : 体積
 ρ_w : 水の密度

2.5 引張軟化曲線の推定

引張軟化曲線の推定には JCI-S-001-2003⁶⁾を用いた。このプログラムは、仮想ひび割れモデルに基づいており、破壊領域を仮想ひび割れと線形弾性体でモデル化し、曲げ試験から求められた荷重変位曲線をもとに逆解析することで引張軟化曲線を算出した。

3. 実験結果と考察

(1) セメント水和物量

W/C ごとの $D_{\max}$ と水和物の関係を図-2, 3 に示す。CH 量においては、 $D_{\max}$ および W/C の違いによる影響は小さい。また、C-S-H 量についても $D_{\max}=5.0\text{ mm}$ のときにばらつきが多いものの、全体的に $D_{\max}$ の変化に伴って変動するような明瞭な傾向は見られない。これは $D_{\max}$ の変化によって供試体中の水和反応に影響を与えないためであると考えられる。

(2) 空隙率

図-4 に W/C ごとの $D_{\max}$ と空隙率の関係を示す。W/C が 50%と 60%では $D_{\max}$ の増加に伴い空隙率の低下が見られる。しかし 40%では 3.35mm の時に大きく空隙率の低下が見られる。この挙動は図-7 (a), 図-8 における 40%, 3.35mm でも確認できる。

(2) 応力変位曲線

図-8 に W/C ごとの $D_{\max}$ と曲げ強度の関係を、図-5 に W/C ごとの $D_{\max}$ における応力変位曲線をそれぞれ示す。なお、本実験では、薄片供試体ごとの断面積の差異の影響を無視できないため、以下の式を用いて応力変位曲線として表す。

$$\sigma = \frac{4PL}{3bh^2} \quad \text{式(2)}$$

ここで、 P : 荷重、 L : スパン長、 b : 幅、 h : 厚さ

図-8 より W/C が 40%の際には骨材寸法が増加するにつれ直線的に曲げ強度は低下する。一方 W/C が 50%では 5 mm の時に曲げ強度が極端に小さく、60%では $D_{\max}$ による差異は見られない。この傾向は、応力変位曲線を比較した図-5 において鮮明に観察できる。さらに、図-5 より、W/C によらず $D_{\max}$ の増加に伴い剛性の低下がみられるとともに、ポストピーク後の挙動についても緩やかになる傾向がみられる。

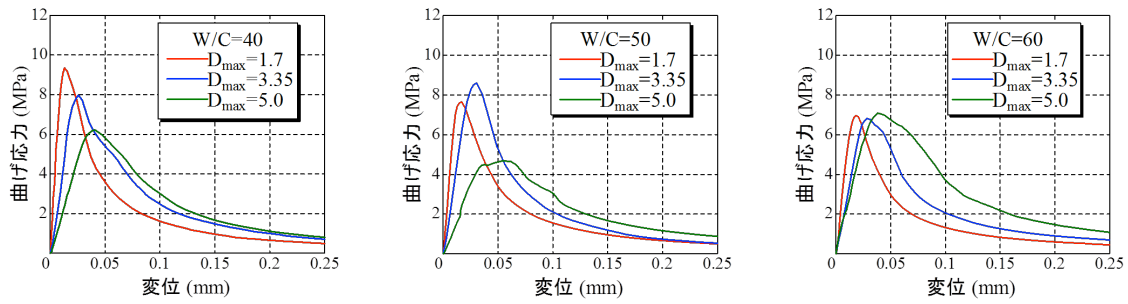


図-5 W/C ごとの $D_{\max}$ と応力変位曲線の関係 (左: W/C=40, 中央: W/C=50, 右: W/C=60)

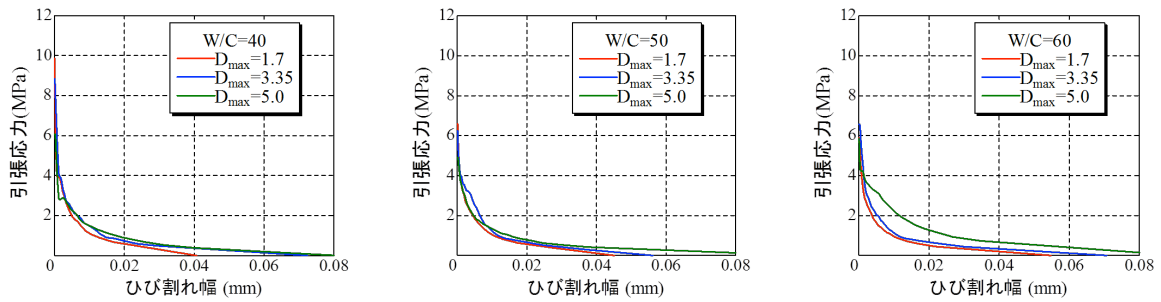
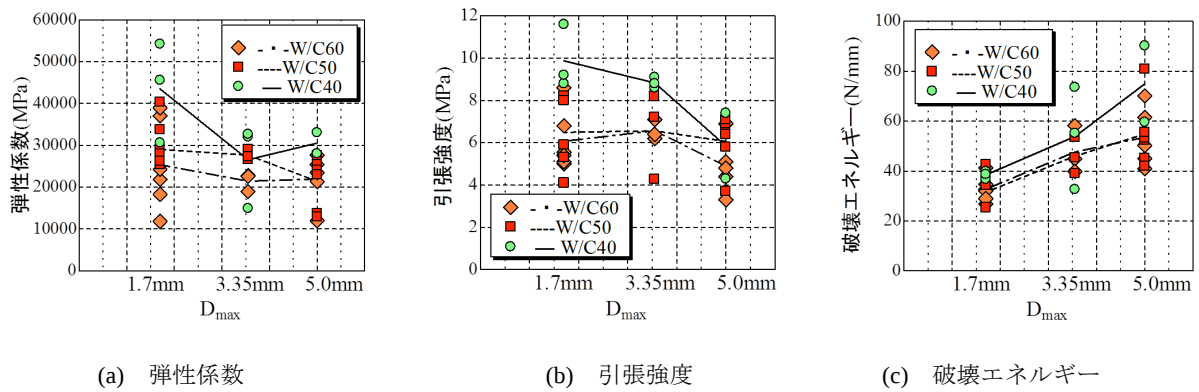


図-6 W/C ごとの $D_{\max}$ と引張軟化曲線の関係 (左: W/C=40, 中央: W/C=50, 右: W/C=60)



(a) 弾性係数

(b) 引張強度

(c) 破壊エネルギー

図-7 W/C ごとの $D_{\max}$ と力学特性値の関係

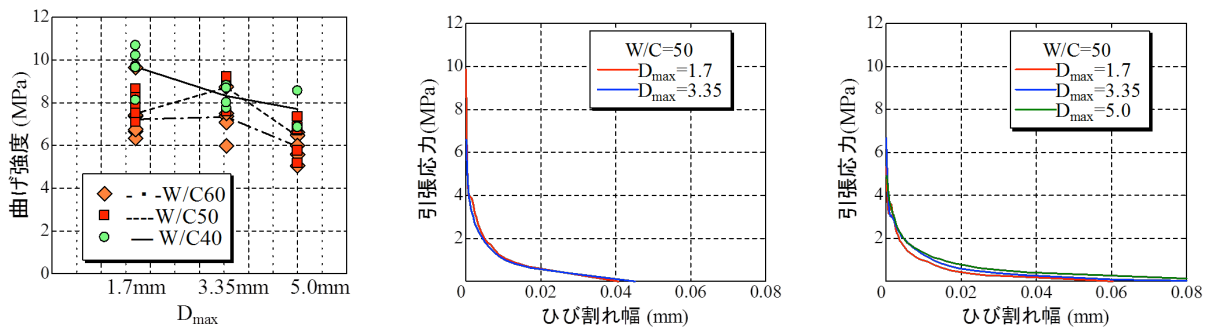
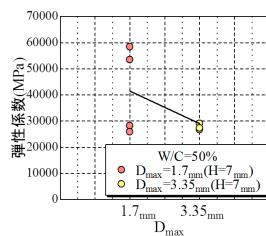
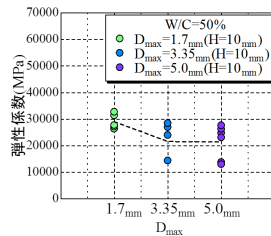
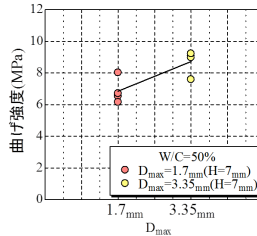
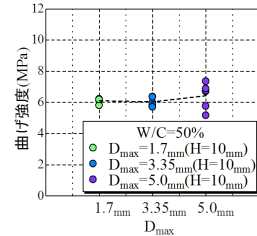
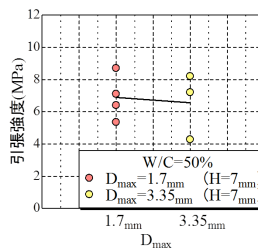
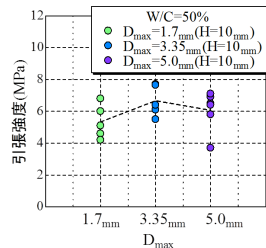
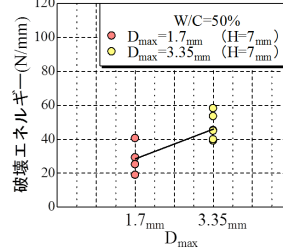
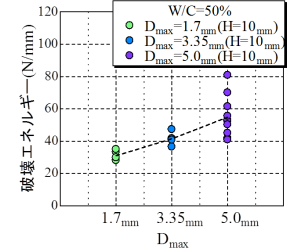


図-8 W/C ごとの $D_{\max}$ と曲げ強度の関係

(a) $h=7\text{mm}$

(b) $h=10\text{mm}$

図-9 供試体高さ h が同じ場合の引張軟化曲線の比較

(a) $h = 7 \text{ mm}$ (b) $h = 10 \text{ mm}$ 図-10 供試体高さごとの $D_{\max}$ と弾性係数の関係(a) $h = 7 \text{ mm}$ (b) $h = 10 \text{ mm}$ 図-10 供試体高さごとの $D_{\max}$ と曲げ強度の関係(a) $h = 7 \text{ mm}$ (b) $h = 10 \text{ mm}$ 図-11 供試体高さごとの $D_{\max}$ と引張強度の関係(a) $h = 7 \text{ mm}$ (b) $h = 10 \text{ mm}$ 図-12 供試体高さごとの $D_{\max}$ と破壊エネルギーの関係

(3) 引張軟化曲線

荷重変位曲線から逆解析により求めた引張軟化曲線を図-6に示す。W/C が 40%, 50%において、 $D_{\max}$ が引張軟化曲線の形状におよぼす影響はみられないものの、最大ひび割れ幅については骨材の増加とともに増加する傾向にある。なお、W/C が 60%の場合において、 $D_{\max}$ が 5 mm の曲線では若干の形状変化がみられた。すなわち W/C が 60%ではより大きな引張応力を負担する結果となったが、それ以外の曲線を比較すると、図-5 で明瞭に見られた $D_{\max}$ の影響は、引張軟化曲線には現れない。

(4) 力学的特性

図-7に W/C ごとの $D_{\max}$ と力学特性値の関係を示す。図 7-(a) で示す弾性係数についてはばらつきが大きいものの、 $D_{\max}$ の増加に伴いわずかながらに減少傾向がみえる。図 7-(b) で示す引張強度については、 $D_{\max}$ が大きくなるほど強度が低下する傾向がある。図 7-(c) に示す破壊エネルギーでは $D_{\max}$ が大きいほど増加傾向がみられる。これは、骨材の架橋効果によるものであると推測できる。

(6) 供試体寸法の高さの違いによる影響

図-9に供試体高さ h が同じ場合の引張軟化曲線の比較を示す。これより引張軟化曲線に関しては $D_{\max}$ の増加に伴い緩やかな挙動を示す傾向があるものの、 $D_{\max}$ の違いが引張軟化曲線に及ぼす影響は小さいといえる。

また、図-10に W/C が 50%の時の異なる $D_{\max}$ で供試体高さが同じ場合の弾性係数の比較を示す。これより弾性係数は $D_{\max}$ の増加に伴い減少傾向が見られ、高さが増すと弾性係数も低下する傾向が確認できる。

曲げ強度は図-11から確認できるように、 $D_{\max}$ の増加に伴い増加傾向が見られ、供試体高さが大きいほど強

度が下がる傾向が見られる。破壊エネルギーについては $D_{\max}$ の増加に伴い増加傾向が見られ、供試体高さが小さいほど $D_{\max}$ の違いが及ぼす影響は大きい傾向が見られる。

4. まとめ

本実験では以下の知見が得られた。

1. W/C と $D_{\max}$ の違いが供試体中のセメント水和物量におよぼす影響はわずかである。
2. $D_{\max}$ の増加にともない、破壊エネルギーの増加がみられた。

参考文献

- 1) Kohei Nagai, Yasuhiko Sato, Tamon Ueda: Mesoscopic simulation of fracture of mortar and concrete by 2D RBSM, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.3, pp.359-374, 2004
- 2) Kohei NAGAI, Yasuhiko SATO and Tamon UEDA : Three-dimensional mesoscopic simulation of concrete under biaxial stress condition by RBSM コンクリート年次論文集, vol.25, No.2, 2005
- 3) Jeffrey THOMURE, John BOLADER Jr. and Minoru KUNIEDA: Reducing meshes bias on fracture within rigid-body-spring networks, J.Struct. Mech. Earthquake Eng., JSCE, No.682/I-56
- 4) 三浦泰人, 佐藤靖彦: NaCl 溶液に浸漬させたモルタルの引張特性とそのモデル化, 日本材料学会, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 11 巻, pp.43-50, 2011.10
- 5) 小林一輔: コア採取によるコンクリート構造物の劣化診断法, 森北出版, 1998
- 6) 日本コンクリート工学協会: 切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法, 2003