

高靱性繊維補強セメント複合材料の材料特性

Material Properties of Strain-Hardening Cementitious Composites

細矢 博* 起橋孝徳* 河野政典*

要 旨

近年、高層集合住宅では、センターコア壁形式の建物が増加しつつあるが、コア壁を連結する梁は短スパン梁になることが多く、大地震時には高い応力が発生し、かつ大きな変形角が生じる。そこで、連結梁に、従来のRC梁よりもせん断耐力と変形性能に優れた高靱性梁を適用する試みが行われている。この高靱性梁には、モルタルにビニロン繊維を混入した高靱性繊維補強セメント複合材料SHCCが用いられる。しかし、SHCCは従来のコンクリートとは組成が異なる材料であり、物性が十分に把握されているとは言い難い。そこで、材料特性ならびに耐久性について検討した。その結果、SHCCのヤング係数、引張強度などの評価式を提案できた。また、促進中性化試験や凍結融解試験の結果から、SHCCは建物において要求される性能を発揮することが確認できた。

キーワード：高靱性繊維補強セメント複合材料、SHCC、材料特性、耐久性

1. まえがき

近年、高層集合住宅では、センターコア壁形式のチューブ構造の建物が増加しつつある。しかし、センターコアをコア壁で構成した場合、コア壁とコア壁を連結する梁は短スパン梁になることが多く、大地震時には高い応力が発生し、かつ大きな変形角が生じる。そのため、連結梁は脆性的なせん断破壊を引き起こす恐れがある。そこで、筆者らは、コア壁の連結梁に、従来のRC梁よりもせん断耐力と変形性能に優れ、さらにはエネルギー吸収能力にも優れた高靱性梁を適用する試みを行っている。

この高靱性梁には、モルタルにビニロン (Polyvinyl Alcohol ; PVA) 繊維を混入した高靱性繊維補強セメント複合材料 (Strain-Hardening Cementitious Composites、以下、SHCC と記す) を用いる。

しかし、SHCC は従来のコンクリートとは組成が大きく異なる材料であり、高靱性繊維補強セメント複合材料については、文献 2) などにその物性が解説されているものの、SHCC の物性は充分には把握されているとは言い難い。そこで、この SHCC を対象として、基本的な材料特性ならびに耐久性について検討した。

2. 使用材料および調合、フレッシュ試験結果

本報で対象とする SHCC に使用した材料を表-1に、SHCC の調合を表-2に示す。また、ビニロン繊維の諸元を表-3に、ビニロン繊維の外観を写真-1に示す。

調合は、設計基準強度の目標値を 30、48N/mm² に設

定し、水結合材比(W/B)を 50%と 37%の 2 水準とした。結合材(B)としては、普通ポルトランドセメントにフライアッシュを重量の 30%、膨張材を 20kg/m³内割り混入した。また、収縮低減剤を結合材重量の 2.0%混入した。さらに、SHCC の流動性(粘性)の確保と繊維を均一に分散させるためにセルロース系の増粘剤を混入した。

表-1 SHCC の使用材料

種類	記号	名称	物性値、種類
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度:3.16
細骨材	S	珪砂7号	密度:2.65
混和材	FA	フライアッシュII種	密度:2.20
	ex	膨張材	密度:3.14
混和剤	SP	高性能減水剤	密度:1.03~1.07
	ae	AE剤	密度:1.02~1.06
	sr	収縮低減剤	密度:1.00~1.03
	Cel	増粘剤	セルロース系
繊維	PVA	ビニロン	密度:1.3

表-2 SHCC の調合

W/B (%)	単位量(kg/m ³)					sr	Cel	PVA	
	W	B			S				(kg/m ³)
		C	FA	ex					
50	400	540	240	20	619	16.0	2.0	26	
37	330	604	268	20	718	17.8	1.0	26	

W:水、B:結合材、その他の記号は表-1参照

表-3 ビニロン繊維の諸元

直径 (mm)	長さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	切断伸度 (%)	ヤング率 (kN/mm ²)
0.04	12	1600	6	40

*技術研究所



写真-1 ビニロン繊維

本調合の SHCC には、硬化後に部材の靱性（変形性能）とせん断強度を確保するため、既往の研究³⁾を参考に、ビニロン繊維を体積比で 2.0% 混入した。

SHCC のフレッシュ試験結果を表-4に、スランプフロー試験状況例を写真-2に示す。練り上りの目標値は、SHCC の流動性、混和性の確保の観点から、スランプフローを 52.5±7.5cm、凍結融解抵抗性能の確保の観点から、空気量を 8.0±2.0%としたが、W/B=50%、37%、いずれの調合もその目標値を満足していた。

3. 材料物性

3.1 圧縮強度と材齢との関係

W/B=50%、37%の調合でのSHCCの圧縮強度と材齢との関係を図-1に示す。図中では、標準水中養生のほか、封緘養生（20℃恒温）の場合も示している。標準水中養生では、W/B=50%の調合の圧縮強度は、材齢28日で 33N/mm²、材齢91日で 46N/mm²になった。一方、W/B=37%の調合では、材齢28日で 43N/mm²、材齢91日で 62N/mm²になった。本調合では、フライアッシュを 30%内割りにしているため、長期に渡り圧縮強度の増進がみられた。また、封緘養生における圧縮強度は、標準水中養生の場合と同様な傾向を示した。

3.2 ヤング係数

ヤング係数と圧縮強度との関係を図-2に示す。本調合の SHCC のヤング係数は、図中に示すコンクリートを対象とした既往の式 E_{c1} ⁴⁾、ならびに高靱性繊維補強セメント複合材料 HPCRCC を対象とした式 E_{c2} ²⁾では評価できないことがわかる。そこで、HPCRCC のヤング係数の式 E_{c2} を参考に、その係数と指数を修正した下式を SHCC のヤング係数の評価式とした。

$$E_c = 2.19 \times 10^4 \times (\gamma / 18.5)^{1/2} \times (\sigma_B / 60)^{2/3} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

γ : 単位体積重量(=18.7kN/m³)

本調合における SHCC の材料試験の平均値

σ_B : SHCC の圧縮強度(N/mm²)

3.3 圧縮強度時ひずみ度

圧縮強度時ひずみ度（圧縮強度に至ったときのひずみ度）と圧縮強度との関係を図-3に示す。

表-4 SHCC のフレッシュ試験結果

W/B (%)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	SHCC温度 (°C)	気温 (°C)
50	53.0×51.5	7.8	28	25
37	47.0×47.0	7.6	32	25



写真-2 スランプフロー試験状況例

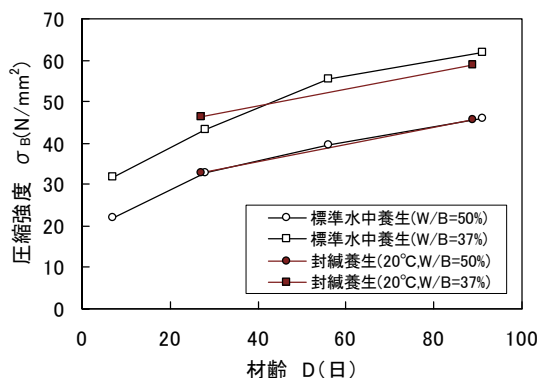


図-1 圧縮強度-材齢関係

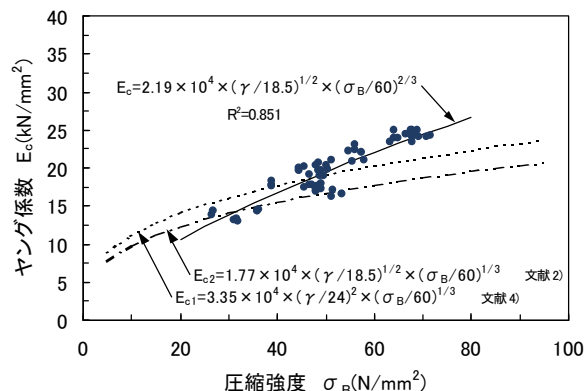


図-2 ヤング係数-圧縮強度関係

SHCC の圧縮強度時ひずみ度は、圧縮強度が大きくなるにつれて小さくなるというコンクリートとは異なる傾向を示した。SHCC は圧縮強度が小さいほど、より圧縮靱性があるといえる。圧縮強度時ひずみ度は、部材の曲げ強度を求めるため断面解析を行うときに S-S 曲線の設定に必要なため、試験値を下式のように回帰した。

$$\varepsilon_0 = -1012 \cdot \ln(\sigma_B) + 8027 \quad (\times 10^{-6}) \quad (2)$$

σ_B : SHCC の圧縮強度(N/mm²)

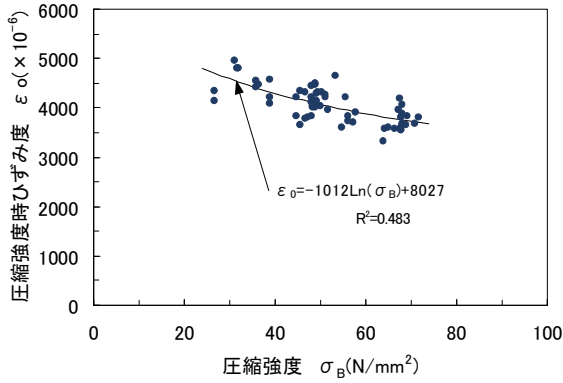


図-3 圧縮強度時ひずみ度-圧縮強度関係

3.4 引張強度

高靱性繊維補強セメント複合材料の引張試験は、様々な試験方法が提案されているが定まった方法はない。そこで、SHCCを対象に、建築研究所引張試験方式⁹⁾(以下、建築研究所方式と記す)と一軸引張試験方式(以下、一軸引張試験に用いる供試体がドッグボーンに似ていることからドッグボーン方式と記す)の引張強度の関係を把握する試験を行った。

建築研究所方式による引張試験の状況を写真-3に示す。供試体は、φ100×L200mmの円柱供試体であり、その引張試験方法は文献5)に詳しい。一方、ドッグボーン方式による引張試験に用いる供試体の形状・寸法を図-4に示す。また、ドッグボーン方式の引張試験の状況を写真-4に示す。本方式の引張試験における供試体の支持条件は、上端ピン、下端固定である。

建築研究所方式の引張試験により得られた引張強度と圧縮強度との関係を図-5に示す。引張強度は、圧縮強度が大きくなると大きくなる傾向があることがわかるが、増加度合いは緩慢であり、かたばらつきが若干みられる。ここで、SHCCの圧縮強度と引張強度との関係式を求める。図-5に示す文献6)で推奨されているコンクリートの圧縮強度と割裂引張強度との関係式σ_{t1}を参考に、その係数を修正した下式をSHCCの引張強度の評価式とした。

$$\sigma_t = 0.069 \sigma_B^{0.75} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (3)$$

σ_B: SHCCの圧縮強度(N/mm²)

3.5 建築研究所方式とドッグボーン方式による引張強度の関係、ならびに引張応力度-ひずみ度曲線の比較

建築研究所方式で得られた引張強度とドッグボーン方式で得られた引張強度との相関を図-6に示す。建築研究所方式で得られた引張強度は、ドッグボーン方式で得られた引張強度に対し25~45%程度小さかった。近似式を次式に示す。

$$A \sigma_t = 0.936_B \sigma_t^{0.270} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (4)$$

A σ_t: 建築研究所方式による引張強度(N/mm²)

B σ_t: ドッグボーン方式による引張強度(N/mm²)

一方、筆者らは、既往の研究¹⁾において、SHCC梁のせん断強度を算出する際、建築研究所方式により得ら

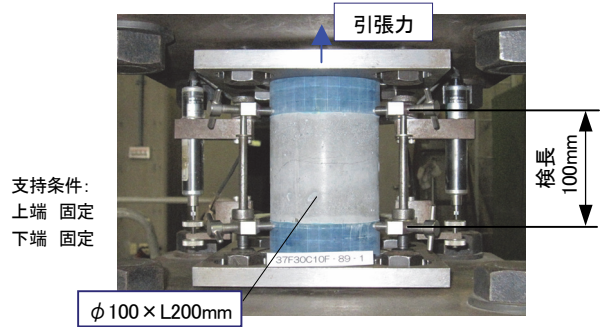


写真-3 建築研究所方式の引張試験

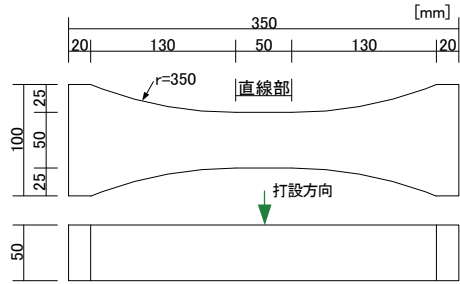
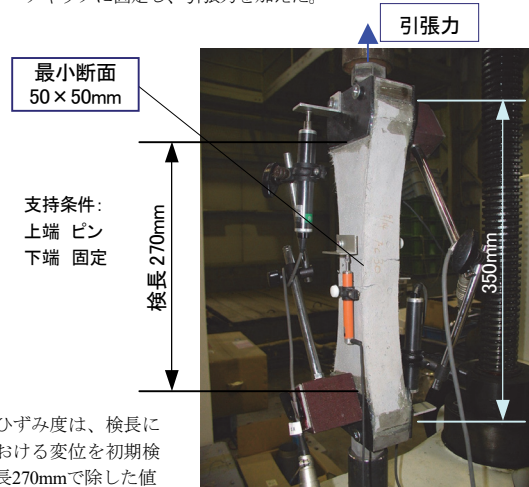


図-4 ドッグボーン方式の供試体の形状・寸法

M24のボルトを溶接した鋼板をエポキシ樹脂系接着剤で供試体上下端面に接着させ、上端ではボルトにユニバーサルジョイントを装着し、一方、下端ではボルトを直接に試験機のヘッドチャックに固定し、引張力を加えた。



ひずみ度は、検長における変位を初期検長270mmで除した値

写真-4 ドッグボーン方式の引張試験

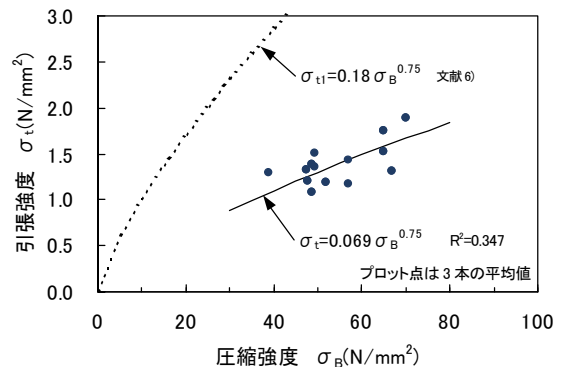


図-5 引張強度-圧縮強度関係

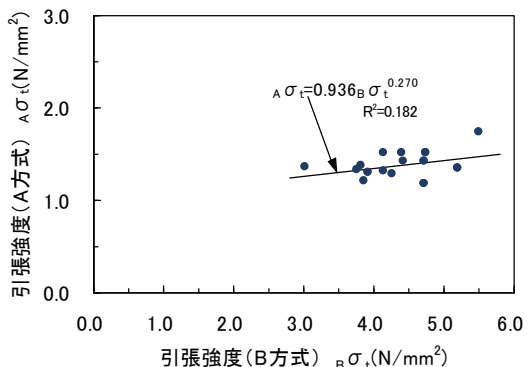


図-6 建築研究所(A)方式の引張強度試験値と
ドッグボーン(B)方式の引張強度試験値との関係

れた SHCC の引張強度を用いて、終局強度型耐震設計指針のせん断強度式の修正式によりせん断強度を求め、その計算値が実験値と概ね良い対応を示すことを確認している。このことから、SHCC 部材における引張強度としては、ドッグボーン方式の引張強度より建築研究所方式の引張強度を用いる方が適合性が良いと考えられる。

W/B=50%の調合による SHCC について、供試体 3 体の引張応力度(σ_t)—ひずみ度(ε_t)曲線を代表例として図-7、図-8 示す。ここで、図-7は建築研究所方式の引張試験により得られた曲線、図-8はドッグボーン方式の引張試験により得られた曲線である。

建築研究所方式の曲線では、ひずみ硬化域が明瞭に出ておらず、最大引張強度時のひずみ度の平均値は 0.44%であった。一方、ドッグボーン方式の曲線では、高靱性繊維補強セメント複合材料特有のひずみ硬化域が明瞭にみられ、最大引張強度時のひずみ度の平均値は 0.87%であった。試験方法によって、σ_t—ε_t 曲線が異なり、最大引張強度、最大強度時ひずみ度が異なることがわかる。これは、供試体の形状、SHCC の打設方向・打設方法、支持条件の違い等による影響が大きいとされる。

3.6 ドッグボーン方式による引張強度と曲げ試験から導出した引張強度との関係

ドッグボーン方式により得られた引張強度の試験値と、土木学会規準の試験方法⁷⁾により得られた曲げ強度の試験値から計算して導出した引張強度の計算値⁸⁾との関係を図-9に示す。その際の曲げ試験の状況を写真-5に示す。また、W/B=50%と37%の調合による SHCC 供試体各 3 体の曲げ試験で得られた曲げモーメント(M)—曲率(φ)曲線の一例を図-10に示す。なお、曲げ試験の供試体寸法は B100×D100×L400mm である。

図-9から、ドッグボーン方式の引張強度の試験値と曲げ試験から求めた引張強度の計算値には相関関係がみられた。以上の結果より、回帰すると下式が得られた。

$$B\sigma_t = 0.955\sigma_c \quad (5)$$

Bσ_t: ドッグボーン方式による引張強度(N/mm²)

σ_c: 曲げ試験から導出した引張強度(N/mm²)

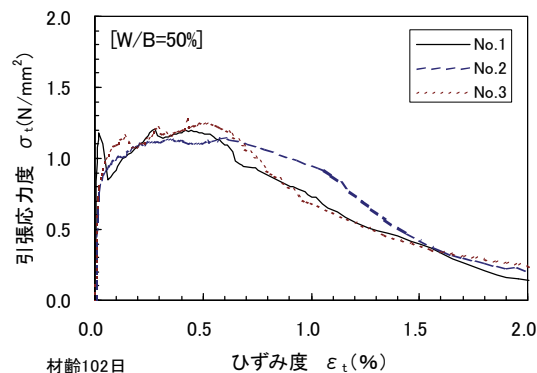


図-7 引張応力度—ひずみ度曲線 (建築研究所方式)

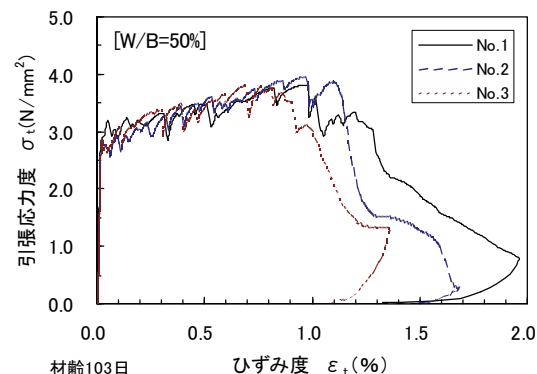


図-8 引張応力度—ひずみ度曲線(ドッグボーン方式)

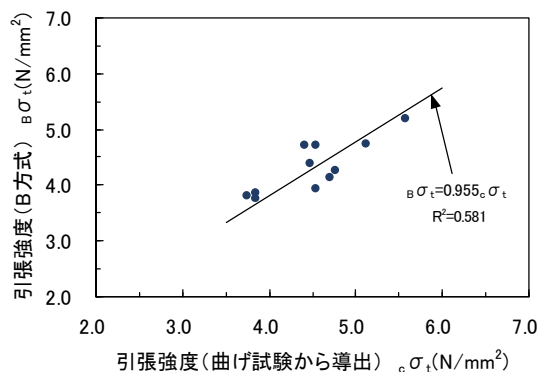


図-9 ドッグボーン(B)方式の引張強度試験値と
曲げ試験から導出した引張強度計算値との関係

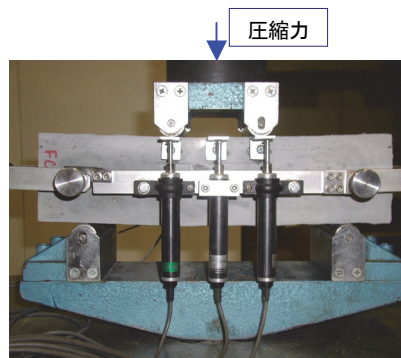


写真-5 曲げ試験

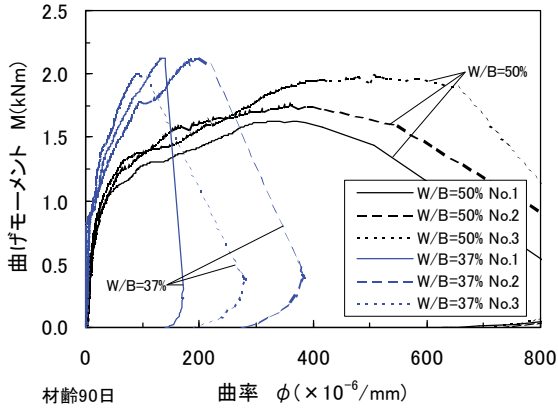


図-10 曲げモーメント-曲率曲線

また、図-10 から、W/B=50%の調合の SHCC の M-φ 曲線においてはたわみ硬化がみられ、曲げひび割れが発生した後も耐力が低下することなく曲率が増大し、最大強度時の曲率の平均値は $400 \times 10^{-6}/\text{mm}$ にも及ぶことがわかる。しかし、それに対し W/B=37%の調合の SHCC の M-φ 曲線では、曲げ強度は増大するが最大強度時の曲率は低下するという現象がみられた。これにより、SHCC の場合には、強度が増大すると靱性が低下するという傾向があることがうかがえる。これは、前述した様に、圧縮強度が増大すると圧縮強度時ひずみ度が低下することに対応している。

4. 耐久性試験

4.1 乾燥収縮

表-2 に示した W/B=50%と W/B=37%の調合の SHCC 供試体について乾燥収縮試験を行った。乾燥収縮ひずみ度と乾燥材齢との関係を図-11 に示す。

乾燥収縮ひずみ度は、基本的に JIS A 1129-3 に準拠して計測した（初期の水中養生は材齢 7 日まで行った）。乾燥収縮ひずみ度は、材齢 26 週で、W/B=50%では $\epsilon = 1407 \times 10^{-6}$ 、W/B=37%では $\epsilon = 890 \times 10^{-6}$ であった。

これとは別に、φ100×L200mm の SHCC 供試体を製作し、この中に埋め込み型のひずみ計を設置して JIS A 1129-3 による基長測定までの膨張量を計測した。その結果、初期膨張ひずみ度は、W/B=50%では $\epsilon = 217 \times 10^{-6}$ 、W/B=37%では $\epsilon = 288 \times 10^{-6}$ であった。上記の材齢 26 週での乾燥収縮ひずみ度に初期膨張ひずみ度を加味すると、乾燥収縮ひずみ度は、W/B=50%、37%の調合で、それぞれ $\epsilon = 1190 \times 10^{-6}$ 、 $\epsilon = 602 \times 10^{-6}$ となる。材齢 26 週の乾燥収縮ひずみ度は、W/B=50%の調合の場合、JASS 5 で示されている計画供用期間の長期、超長期の乾燥収縮率の指標⁹⁾である $\epsilon = 800 \times 10^{-6}$ を上回る結果となった。このことから、SHCC は、水結合材比(W/B)が大きい調合では、乾燥収縮ひび割れ発生の可能性が高いと判断され、拘束を受ける部材に使用する場合には、ひび割れ発

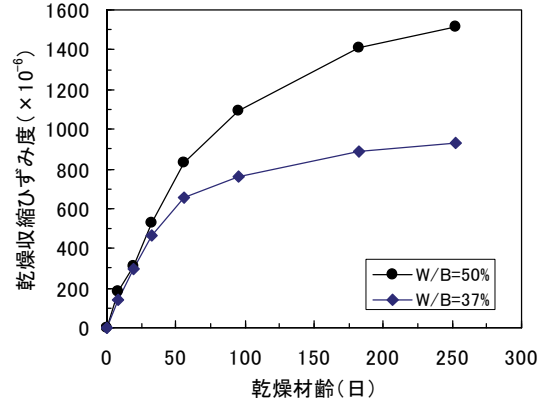


図-11 乾燥収縮ひずみ度-乾燥材齢関係

生の防止対策が必要になるといえる。

4.2 中性化速度

W/B=50%と W/B=37%の調合の SHCC 供試体の促進中性化試験を JIS A 1153 に準拠して行った。中性化深さと促進中性化材齢との関係を図-12 に示す。

中性化深さは、促進中性化材齢が 194 日で、W/B=50%では 19.9mm、W/B=37%では 2.3mm であった。促進中性化試験は CO₂ 濃度 5%で行っており、大気中の CO₂ 濃度を 0.05%と仮定すると、促進中性化材齢 194 日は、実建物の材齢では約 53 年に相当すると想定される¹⁰⁾。この中性化速度からすれば、W/B=50%の調合の場合でも、建物の供用期間を 100 年とすると、中性化深さは 28mm 程度と推定され¹⁰⁾、その中性化深さは、建物の設計被り厚さを 40mm とすると、許容の範囲内に収まるといえる。

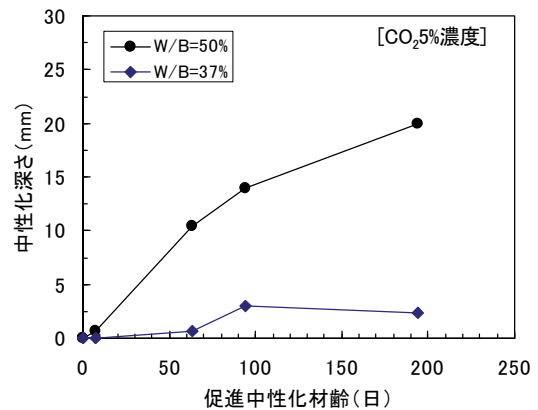


図-12 中性化深さ-促進中性化材齢関係

4.3 凍結融解抵抗性

W/B=50%と W/B=37%の調合の SHCC 供試体について凍結融解試験を JIS A 1148 に準拠して行った。相対動弾性係数と凍結融解サイクル数との関係を図-13 に示す。

W/B=50%の調合では、相対動弾性係数は、サイクル

数が300サイクルで85%を満足していた。一方、W/B=37%の調合では、相対動弾性係数はサイクル数が増加しても低下することなく、ほぼ100%もしくはそれを上回っており、十分な凍結融解抵抗性能を保持していることがわかった¹¹⁾。このことから、W/B=50%、W/B=37%のいずれの調合も空気量の目標値を $8.0 \pm 2.0\%$ と設定しているが、その妥当性を確認した。

なお、上記の調合試験に先立ち、予備試験として、空気量4%、8%、12%の3水準の調合試験を行い、それぞれの凍結融解試験を行った。その結果、空気量8%、12%では、300サイクルに至っても相対動弾性係数は90%以上であったが、空気量4%では、70サイクルで相対動弾性係数は急激に低下して40%を下回り、目標性能を満足できなかった。このため、本報で対象とするSHCCの調合では、空気量の目標値を $8.0 \pm 2.0\%$ に設定した。

5. まとめ

モルタルにビニロン繊維を2.0vol%混入した高靱性繊維補強セメント複合材料SHCCの材料特性を検討した。その結果、対象としたSHCCの調合の範囲では、以下の知見が得られた。

- i. SHCCのヤング係数は、式(1)により評価できる
- ii. 建築研究所方式による引張試験から得られる引張強度は、式(3)により概ね評価できる
- iii. SHCCの曲げ試験から求めた引張強度の計算値により、ドッグボーン方式による引張強度、さらには建築研究所方式による引張強度を推定できる
- iv. 促進中性化試験では、中性化深さは、促進中性化材齢194日で20mm程度であった。この中性化速度では、供用期間中(100年)の建物におけるSHCC部材の中性化深さは28mm程度となり、被り厚さの範囲以内に収まると推定される
- v. 空気量を8%程度とした場合、SHCCは十分な凍結融解抵抗性能を保持する

6. あとがき

SHCCの材料特性ならびに耐久性を把握することができた。今後、超高層建物のコア壁の連結梁にSHCCを適用できるように、構造的な面も含め、さらに検討を進めていきたい。

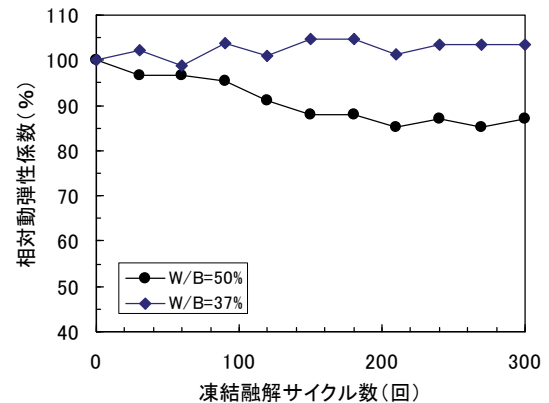


図-13 相対動弾性係数-凍結融解サイクル数関係

【参考文献】

- 1) 細矢 博、福山 洋、岸本 剛、河野政典、「高靱性繊維補強セメント複合材料を用いた梁の構造実験」、日本建築学会技術報告集、第16巻、第32号、pp.133-138、2010.2
- 2) 土木学会、「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計施工指針(案)」、コンクリートライブラリー、No.127、2007.3
- 3) 清水克将、金久保利之、閑田徹志、永井 覚、「PVA-ECCのひび割れ面でのせん断伝達機構と部材のせん断耐力評価」、日本建築学会構造系論文集、第619号、pp.133-139、2007.9
- 4) 日本建築学会、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」、pp.50-52、2010
- 5) 佐藤幸博、福山 洋、諏訪田晴彦、「高靱性セメント系複合材料の一軸引張-圧縮繰返し試験方法の提案」、日本建築学会構造系論文集、第539号、pp.7-12、2001.1
- 6) 日本建築学会、「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」、pp.68-70、2008
- 7) JSCE-G552-1999、「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法、コンクリート標準示方書[規準編]」、土木学会規準および関連規準、2005
- 8) JCI-S-003-2005、「繊維補強セメント複合材料の曲げモーメント-曲率曲線試験方法」、JCI規準
- 9) 日本建築学会、「建築工事標準仕様書・同解説、JASS 5、鉄筋コンクリート工事 2009」、pp.185-190、2009
- 10) 日本建築学会、「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説」、pp.92-108、2004
- 11) 日本建築学会、「建築工事標準仕様書・同解説、JASS 5、鉄筋コンクリート工事 2009」、pp.616-619、2009