

強度増分の空隙量依存性を考慮した強度発現モデルの提案

芝浦工業大学	学生会員	増森 裕太郎
東京大学大学院	学生会員	酒井 雄也
東京大学生産技術研究所	正会員	岸 利治
芝浦工業大学	フェロー会員	魚本 健人

1. はじめに

コンクリートの品質を表す指標として、最も一般的に用いられるのが圧縮強度であり、その予測に関するニーズは高い。コンクリートの任意の材齢における強度発現の推定を試みたモデルとして、空隙率理論に基づいた Ryshkewitch¹⁾のモデルやゲルスペース比理論に基づく T.C. Powers²⁾のモデルなどがある。しかし、モデルの適用範囲は限られており、様々な材料・配合条件における強度発現を評価するには至っていない。一方、小田部が提案したモデル³⁾は、岸らにより開発された複合水和発熱モデル⁴⁾と関連させることで、普通ポルトランドセメント(OPC)のみならず、混合セメントを用いたコンクリートも対象としている。しかしモデルの適用性の確認は十分ではなく、例えば OPC では水セメント比 30%と 55%における検証にとどまっている。

そこで本研究では、一般性を有する強度発現モデルの構築を目的として、水セメント比 40%、55%および 70%のコンクリートの圧縮強度を測定し、その結果とモデルによる算定値を比較することで、強度発現モデルの適用性の確認と修正を行う。

2. 圧縮強度試験

2.1 試験概要

φ100×200mm の円柱供試体を用いて、圧縮強度試験を実施した。20 一定下の封緘養生とし、材齢 3, 7, 28 及び 91 日において JIS A 1108 に準拠した圧縮強度試験を行った。

2.2 使用材料および配合

普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³, 比表面積 3300cm²/g)、細骨材(乾燥密度 2.62 g/cm³, F.M.2.74cm²/g)及び粗骨材(乾燥密度 2.71g/cm³, F.M.6.82cm²/g)を使用した。コンクリートの配合を表-1 に示す。目標スランブは 12cm, 目標空気量は 4.5%である。圧縮強度試験結果を表-2 に示す。

3. 強度発現モデルに関する検討

3.1 小田部の強度発現モデルの概要

小田部は、複合水和発熱モデルを用いて鉱物の反応率を算出し、初期空隙量 $V_{cap.ini}$ とセメント粒子の外側に生成する外部水和物量 $V_{hyd.out}$ との体積比 $D_{hyd.out}$ (式(1))をパラメータとして式(2)より圧縮強度を求めている。モデルにおける空隙量及び水和物量の概念を図-1 に示す。

$$D_{hyd.out} = \frac{V_{hyd.out}}{V_{cap.ini}} \dots \dots \dots (1)$$

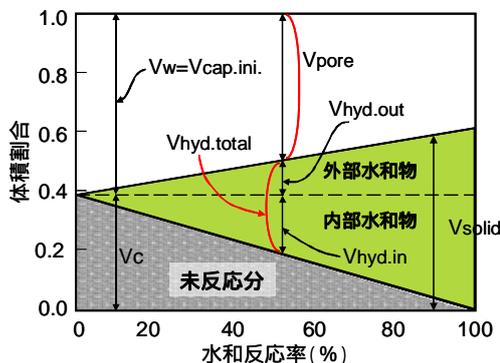


図 - 1 強度発現モデルにおけるパラメータ³⁾

表-1 配合表

セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				スランブ(cm)	Air (%)
			W	C	S	G		
OPC	40	43	180	451	709	979	12.8	4.7
	55	46		328	805	985	17.5	4.0
	70	49		258	886	961	14.5	3.6

表-2 圧縮強度

W/C (%)	圧縮強度(MPa)			
	材齢 3日	材齢 7日	材齢 28日	材齢 91日
40	28.3	36.5	45.7	52.7
55	19.8	24.0	34.5	36.6
70	12.8	18.4	26.1	30.0

キーワード 圧縮強度 強度発現モデル 空隙量

連絡先 〒135-8545 東京都江東区豊洲 3-7-5 芝浦工業大学 複合材料研究室 TEL 03-5859-8358

$$f_c = \Psi \cdot f_\infty \left[1 - \exp \left\{ -\alpha \left(k \cdot \frac{D_{hyd.out}}{\theta} \right)^\beta \right\} \right] \dots (2)$$

ここで、 Ψ は強度比、 f_∞ は最終到達強度(MPa)、 k は水和生成物分布の偏りを表す係数、 θ は粒子間隔を表す関数、 α と β は定数である。

3.2 強度発現モデルの適用性の確認

小田部のモデルは、OPC に関しては、水セメント比 30%、55% での適用性が確認されている(図-2(a)³⁾)。図-2(b)には本研究において測定した圧縮強度と解析結果を併せて示す。全ての水セメント比でやや乖離が生じており、特に水セメント比 70% においては、4 割近く過小評価している。そこで、水セメント比による強度発現傾向の変化を適切にモデルに組み込むための修正を行った。

3.3 強度発現モデルの修正

コンクリートの圧縮強度は、空隙量の減少により指数関数的に上昇することが鎌田らにより報告されている³⁾。すなわち、水和により外部水和物が生成された場合、強度増分はその時点での空隙量に依存する。上記のような非線形性を考慮するため、式(3)~(5)に基づいて強度発現を算定することとした。あるステップにおいて新規に生成された外部水和物量は式(3)で表され、その時点での強度増加率は式(4)により評価される。これらをパラメータとして強度増分を算定し、足し合わせることで強度を求めている。

$$\Delta V_{hyd.out(i)} = V_{hyd.out(i)} - V_{hyd.out(i-1)} \dots (3)$$

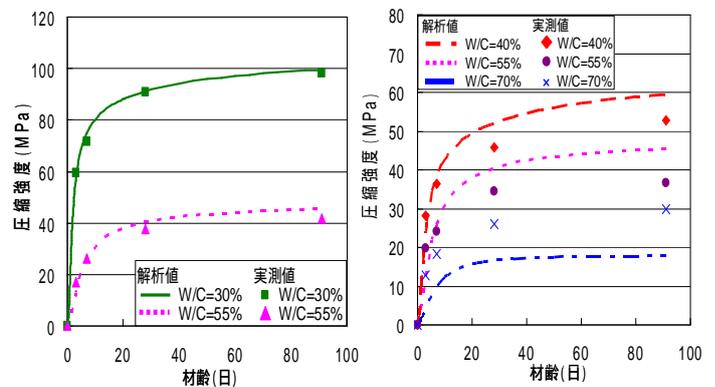
$$D_{solid(i)} = \frac{V_{solid(i)}}{1 - V_{solid(i)}} = \frac{V_{solid(i)}}{V_{pore(i)}} = \frac{V_{hyd.out(i)} + V_{c(i)}}{V_{pore(i)}} \dots (4)$$

$$f_c = \sum_{i=0}^{\infty} f_\infty \left\{ 1.0 - \exp \left[-\alpha (\beta \cdot D_{solid(i)})^\gamma + \chi \right] \cdot \Delta V_{hyd.out(i)} \right\} \dots (5)$$

ここで f_∞ 、 α 、 β 、 γ 、 χ は定数であり、感度解析により 120、1.95、0.50、5.0、0.55 とした。

3.4 修正モデルの検証

修正したモデルを用いて算定した圧縮強度を、本研究及び小田部により実施された実験結果³⁾と併せて図-3 に示す。実験において、圧縮強度の増加量は水セメント比の減少に伴い顕著になる。修正されたモデルはそのような傾向を比較的精度良く表現できていることから、本モデルで採用したコンセプトにより、強度発現機構が適切にモデル化されているものと考えられる。



(a) 小田部による検討³⁾ (b) 本研究における検討

図-2 強度発現モデルによる解析結果と実測値との比較

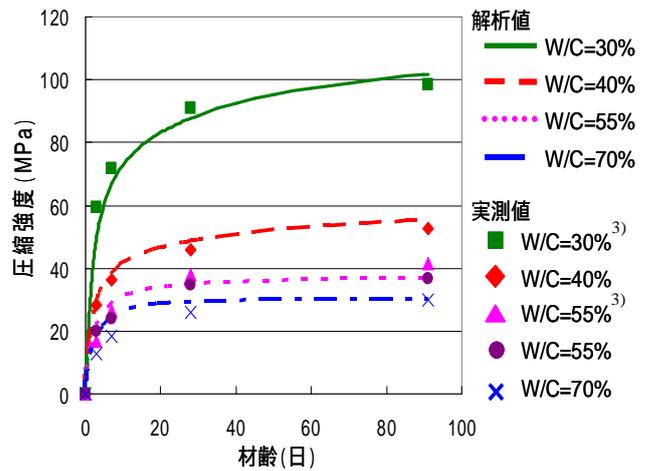


図-3 修正されたモデルによる解析と実験結果の比較

4. まとめ

小田部の強度発現モデルを修正し、空隙量に依存する強度増分を足し合わせることで圧縮強度を算出するモデルとした。修正されたモデルを用いて圧縮強度を算定した結果、OPC の水セメント比 30~70% の範囲において、実験で得られた傾向を捉えることができた。

参考文献

- 1) Ryshkewitch, E.: Composition and strength of porous sintered alumina and zirconia, J. Am. Ceram. Soc., Vol.36, pp.65-68(1953)
- 2) T.C.Powers: The Physical Structure and Engineering of Concrete, Portland Cement Association Research Department Bull.90, Chicago(1958)
- 3) 小田部裕一: 複合水和発熱モデルの一般化と水和組織形成に着目した強度発現モデルの開発, 東京大学学位論文(2004)
- 4) 岸利治, 前川宏一: ポルトランドセメントの複合水和発熱モデル, 土木学会論文集, No.526, Vol.29, pp.99-109(1995)
- 5) 鎌田英治, 吉野利幸, 寺井靖人: コンクリートの強度と細孔構造に関する実験, セメント技術年報 No.31, Vol.64, pp.256-259(1977)