CEB-FIP モデルを改良した高強度コンクリート構造部材の
力学特性発現モデルIMPROVED CEB-FIP PREDICTION MODELS FOR DEVELOPMENTS
OF COMPRESSIVE STRENGTH AND YOUNG'S MODULUS
OF HIGH-STRENGTH CONCRETE IN STRUCTURE

橋田 浩*, 黒田泰弘**, 山崎庸行***

Hiroshi HASHIDA, Yasuhiro KURODA and Nobuyuki YAMAZAKI

Experiments were carried out on high-strength concrete specimens subjected to temperature rise due to heat of hydration in structure in order to discuss the prediction models for their early-stage mechanical properties, i.e., compressive strength and Young's modulus. The concrete maturity is estimated by the equivalent age specified in CEB-FIP Model Code 1990. The developments of mechanical properties can be fairly expressed by the present model curves, regardless of the temperature histories, derived from adding a parameter for final setting time to the equations specified in the Code. Influences of water to cement ratio and type of cement on the model and reduction of the development in structure to the standard specimen cured in water at 20°C are also discussed.

Keywords : *high-strength concrete, prediction model, temperature history, compressive strength ,
Young's modulus, maturity, final setting*

高強度コンクリート, 予測モデル, 温度履歴, 圧縮強度, ヤング係数, マチュリティ, 凝結の終結

1. はじめに

高強度コンクリートは単位セメント量が多いため、構造部材は水和発熱による温度履歴を受け、圧縮強度やヤング係数などの力学特性の発現性状は、標準養生供試体とは異なってくる。しかしながら、一般には、標準養生供試体以外の力学特性データは不十分であり、構造設計や施工計画において実構造部材の若材齢における力学特性を予測する場合などに活用できるデータは少ない。したがって、標準養生供試体の基本データから実構造部材の力学特性発現を評価できるモデルがあれば非常に有意義である。信頼性の高いこのようなモデルが構築されれば、実大規模の確認実験をすることなく、高強度コンクリート構造体の強度管理も可能となる。また、温度応力や最近問題が指摘され始めている自己収縮応力の評価にも力学特性発現モデルは欠かせない。

しかしながら、我が国には、一般化された力学特性発現モデルは指針類に整備されていないため、既往の類似のデータや研究結果を参考にする、ケース・バイ・ケースの実験で確かめる、欧米諸外国のコードを利用するなどの方法で対処することになる。欧米のコードにしても、我が国のコンクリート材料との適合性、温度履歴を受ける構造部材への拡張性などは定かでない。

以上の背景から、本研究は、部材温度履歴を受けた供試体の力学

特性実験（実験1）、水セメント比やセメントの種類をパラメータにした実験（実験2）結果に基づき、高強度コンクリートの初期材齢から材齢91日程度までの圧縮強度ならびにヤング係数発現モデルを提案するものである。ここでの提案モデルは、温度履歴を受けた場合のマチュリティの妥当性と標準養生材齢28日の力学特性を基準に発現式が構成されていることなどの理由から、CEB-FIP Model Code 90¹⁾を基本としている。また、本実験対象は主に高強度コンクリートに限られているが、提案モデルは普通強度レベルのマスコンクリートにも有効であることも併せて示す。なお、本研究では、基礎、柱など比較的厚い部材を対象としており、力学特性に及ぼす養生中の乾燥の影響は考慮していない。

2. 実験1

2.1 概要

実験1は、表-1、表-2に示す普通ポルトランドセメント（OPC）または高ビーライト系セメント（BPC）を用いた2種類の高強度コンクリート供試体の標準養生ならびに構造部材としての温度履歴を受けた場合の力学特性発現を把握することを目的とした。表-2の f_c 、 E_c はそれぞれ標準養生材齢28日の圧縮強度とヤング係数である。

* 清水建設㈱技術研究所 主任研究員・工修
** 清水建設㈱技術研究所 研究員・工修
*** 清水建設㈱技術研究所 主席研究員・工修

Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.
Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.
Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.

コンクリートは、実機プラントで練り混ぜ、アジテータ車で実験場に輸送したものから採取して供試体とした。供試体採取は練混ぜ後約2時間を経過して完了しており、採取時のコンクリート温度はOPCで約30℃、BPCで約25℃であった。供試体は採取後から、20℃一定の恒温槽、または上下面を断熱した1×1×1mの模擬部材（図-1）の中心部または隅角部の温度履歴を追跡させた水槽内で封かん養生とした。20℃一定の恒温槽で養生した供試体は、材齢3日以降20℃水中養生としており、以後これを標準養生供試体と見なして検討する。また、これらの供試体と同様の養生を行った試料について、JIS A 6204付属書Iに準拠してブロッカー貫入抵抗試験を行い凝結時間を測定した。

各養生供試体の圧縮強度ならびにヤング係数は、練混ぜ完了後3、6、12、18、24、36時間、2、3、7、28、91日に測定した。ヤング係数は、圧縮強度試験における応力-ひずみ曲線から求めた割線ヤング係数である。ひずみは、材齢1日以前の供試体については試験機の荷板間の変位量から求め、材齢1日以降はコンプレッソメータで測定した。

2.2 結果および考察

1) マチュリティ則の比較

各養生供試体の温度履歴を図-2に示す。このように養生温度が異なるコンクリートの強度発現を評価するためにマチュリティの概

表-1 実験1の使用材料

材料	記号	種類、物性
セメント	OP	普通ポルトランドセメント 比重3.16、比表面積3,400cm ² /g
	BP	高ビーライト系セメント 比重3.21、比表面積4,170cm ² /g
細骨材	S	砕砂、山砂の混合砂 比重2.62、吸水率1.52%、粗粒率2.78
粗骨材	G	硬質砂岩砕石（最大粒径20mm） 比重2.68、吸水率0.72%、粗粒率6.58
混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

表-2 実験1の割合

種類	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	f _c (N/mm ²)	E _c (×10 ⁴ N/mm ²)
			kg/m ³					
OPC	28.0	44.4	165	589	719	922	96.1	3.92
BPC	27.0	47.0	170	630	741	854	92.7	3.68

図-1 温度追従用模擬部材

図-2 供試体の温度変化

念が利用される。マチュリティ則としては、積算温度方式、アレニウス式を応用したHansenらの相当材齢方式^{2),3)}が代表的であり、20℃養生を基準にした場合の等価な材齢 t_e （日）は、それぞれ次のように表される。

積算温度方式

$$t_e = \int_0^t \left(\frac{T+10}{30} \right) dt \quad (1)$$

相当材齢方式

$$t_e = \int_0^t \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+T} \right) \right] dt \quad (2)$$

ここに、 $T=dt$ 時間中の養生温度（℃）、 dt =時間（日）、 $R=8.314$ (J/(mol·K))（ガス定数）、 E は活性化エネルギー（化学反応エネルギーとしての水和熱でセメント固有の値）で、以下の値となる。

$$T < 20^\circ\text{C} \quad E = 33.5 + 1.47(20 - T) \text{ (kJ/mol)}$$

$$T \geq 20^\circ\text{C} \quad E = 33.5 \text{ (kJ/mol)}$$

また、CEB-FIP Model Code 90¹⁾に採用されているマチュリティ則は、相当材齢方式を簡易化した以下の式であり、平成8年版土木学会コンクリート標準示方書・設計編のクリープの項に有効材齢と称して取り入れられている。

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (3)$$

ここに、 t_T =有効材齢（日）、 $T(\Delta t_i)$ =期間 Δt_i における温度（℃）、 Δt_i =温度 T の継続時間（日）、 $T_0=1^\circ\text{C}$ である。CEB-FIPの有効材齢（以下、単に有効材齢という）と相当材齢との違いは、前者が20℃以下での活性化エネルギーの変化を考慮していない点である。これらのマチュリティを比較して表-3に示す。養生温度20℃以上では、相当材齢および有効材齢は、積算温度に比べ、温度の影響をより強く評価している。

図-3、図-4にOPC、BPCの圧縮強度およびヤング係数の発現を、材齢、積算温度材齢または有効材齢との関係で示す。マチュリティ則により温度条件に係わらず力学特性発現を統一的に表せるようになるが、特に有効材齢をマチュリティとすると、温度履歴を受けた供試体でも、材齢7日程度までの初期材齢では標準養生供試体とほとんど同一の曲線で表せることがわかる。また、模擬部材の中心部と隅角部における温度履歴の差異が力学特性発現に及ぼす影響は、最終材齢までほとんど認められなかった。

表-3 各種マチュリティの時間当たりの増分 20℃基準

養生温度 (°C)	積算温度	相当材齢	CEB-FIP 有効材齢
-10	0.000	0.026	0.210
0	0.333	0.151	0.367
10	0.667	0.497	0.616
20	1.000	1.000	0.998
30	1.333	1.574	1.566
40	1.667	2.408	2.388
50	2.000	3.587	3.547
60	2.333	5.217	5.145
70	2.667	7.424	7.302
80	3.000	10.355	10.161

2) 発現モデル式

マチュリティと圧縮強度の関係を表す発現モデルとしては、対数曲線型、指数曲線型、双曲線型などが提案されている。これらのなかで、次式に示す指数曲線型のCEB-FIPモデル¹⁾は、標準養生材齢28日の特性を基準とし、圧縮強度とヤング係数のモデルに共通性があることから、実用性が高いと考えられる。

圧縮強度発現モデル

$$f(t) = f_c \cdot \exp\left\{s \left[1 - \left(28/(t/t_1)\right)^{0.5}\right]\right\} \quad (4)$$

ヤング係数発現モデル

$$E(t) = E_c \cdot \exp\left\{s/2 \left[1 - \left(28/(t/t_1)\right)^{0.5}\right]\right\} \quad (5)$$

ここに、 f_c 、 E_c =標準養生材齢28日における圧縮強度またはヤング係数、 s =セメントの種類の影響による係数で、発現の相対速度を表す係数（ただし、値が小さいほど発現が速く、ヤング係数は圧縮強度の2倍の発現速度であることを意味している）、 t =有効材齢(日)、 $t_1=1$ 日である。また、 s 値として、早強高強度系セメントは0.2、普通・早強系セメントは0.25、低発熱系セメントは0.38が示されている。

図-3 圧縮強度およびヤング係数発現におけるマチュリティの比較：OPC

図-4 圧縮強度およびヤング係数発現におけるマチュリティの比較：BPC

図-5 圧縮強度およびヤング係数の測定値と発現モデル：実験1

る。

ただし、筆者が文献4)で指摘しているように、CEB-FIPモデルのままでは有効材齢1日程度までの適合性は良好でなく、特性発現の起点として凝結時間を導入する必要がある。後述する実験2の結果も含め種々検討した結果、圧縮強度発現、ヤング係数発現とも凝結の終結時間を起点と考えることで、モデルの適合性が向上することが確認された。また、初期高温履歴を受けると、水和生成物の形態の変化⁹⁾、水和反応の停滞¹⁰⁾により、標準養生に比べ長期的な強度増進が小さいことが一般に知られている。低水セメント比のコンクリート部材であれば、自己乾燥による水和の停滞も考えられる。これらの影響を定量化することは現状では困難であるが、構造部材を対象としたモデルとしては考慮する必要がある。以上の検討から、次のようなCEB-FIPモデルの改良式を提案できる。

圧縮強度発現

$$f(t) = a_f \cdot f_c \cdot \exp \left\{ s_f \left[1 - \left(\frac{28 - t_{fs} / t_1}{(t - t_{fs}) / t_1} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad (6)$$

ヤング係数発現

$$E(t) = a_E \cdot E_c \cdot \exp \left\{ s_E \left[1 - \left(\frac{28 - t_{fs} / t_1}{(t - t_{fs}) / t_1} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad (7)$$

ここに、 a_f, a_E は標準養生供試体に対する圧縮強度とヤング係数の発現低減率、 s_f, s_E は圧縮強度とヤング係数の発現係数、 t_{fs} は凝結の終結時間(日)であり、その他は(4)、(5)式と同じである。

図-5に、力学特性の測定値と回帰したモデル曲線を示す。ここで、圧縮強度の発現係数と発現低減率は、部材温度履歴を受けた供試体の測定値を最小二乗法で回帰して求めているが、ヤング係数の

発現係数は、後述する圧縮強度発現係数との関係式から求めている。なお、回帰にあたり凝結の終結時間は標準養生における実測値を用いた。

モデル曲線は、圧縮強度発現、ヤング係数発現とも温度履歴に係わらず良好に再現できている。BPCの標準養生材齢91日の特性値はモデルよりもかなり大きくなっているものの、部材温度履歴を受けた材齢91日の特性値とモデルはよく合致していることから、実部材の特性発現を予測することを前提とした標準養生モデル曲線としては適当と考えられる。BPCにおいて、部材温度履歴を受けた供試体の材齢91日における力学特性値が標準養生供試体の値よりも小さくなるのは、おそらく自己乾燥による水和の停滞が原因と考えられる。以上から、各発現係数と発現低減率の一般化ができれば、標準養生材齢28日における特性値ならびに凝結の終結時間を適切に設定することで、構造部材の圧縮強度およびヤング係数発現を予測できることになる。なお、低減率は、圧縮強度ではOPCで0.82、BPCで0.94となっているが、ヤング係数では特に考慮する必要はないと考えられた。

3. 実験2

3.1 概要

実験2では、表-4、表-5に示す、5種類のコンクリートについて標準養生供試体の力学特性を測定し、水セメント比およびセメントの種類が力学特性発現に及ぼす影響について検討した。測定項目、方法は実験1に準じている。

3.2 結果および考察

図-6に測定結果と最終的に求められた発現モデル曲線を示す。いずれのモデル曲線も測定値を良好に再現している。ここで、圧縮

強度発現係数 s_f は(6)式で回帰して求めているが、ヤング係数発現 s_E は次式の関係から求めている。

$$s_E = 0.5s_f - 0.025 \quad (8)$$

これは、実験1の結果も含め、ヤング係数発現を(7)式で回帰して圧縮強度発現係数との関係を検討した結果、図-7のように高い相関が得られたことによる。なお、本来のCEB-FIP Model Code 90における関係は $s_E = 0.5s_f$ である。

表-4 実験2の使用材料

材料	記号	種類、物性
セメント	OP	普通ポルトランドセメント 比重3.15、比表面積3,270cm ² /g
	BP	高ビーライト系セメント 比重3.20、比表面積4,110cm ² /g
	BB	高炉セメントB種 比重3.04、比表面積3,850cm ² /g
細骨材	S	陸砂 比重2.59、吸水率1.63%、粗粒率2.80
粗骨材	G	硬質砂岩碎石（最大粒径20mm） 比重2.65、吸水率0.60%、粗粒率6.75
混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
	AE	AE減水剤（OP55のみ）

表-5 実験2の調合

種類	W/C %	s/a (%)	W	C	S	G	f_c (N/mm ²)	E_c ($\times 10^4$ N/mm ²)
			kg/m ³					
OP27	27	42.9	163	604	686	930	93.9	3.70
OP40	40	45.0	168	420	780	975	69.5	3.48
OP55	55	48.1	182	331	834	920	36.7	3.01
BP27	27	43.1	163	604	692	930	103	3.83
BB27	27	42.2	163	604	666	930	102	3.91

次に、図-8に示すように、普通ポルトランドセメントの s_f は水セメント比が大きくなるほど大きくなり、本実験範囲では次式の関係が得られた。

図-7 s_f と s_E の関係

図-8 水セメント比と s_f の関係：普通ポルトランドセメントの場合

図-6 圧縮強度およびヤング係数の測定値と発現モデル：実験2

図-9 友澤らの結果³⁾と発現モデル

$$s_f = 0.39(W/C) + 0.099 \quad (9)$$

また、セメントの種類が異なるOP27、BP27、BB27の高強度コンクリートの s_f は、それぞれ0.19、0.28、0.37となっている。CEB-FIP Model Code 90では、発現係数 s_f はセメントの種類のみで決定されているが、このように、水セメント比ならびにセメントの種類の両要因の影響で発現係数は異なってくることがわかる。なお、(8)および(9)式の関係は、今後より多くのデータに基づいて回帰することで、一般性の高いものになると考えられる。

4. 提案モデルの検証

友澤らは、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比0.28、0.38、0.55のコンクリートについて、温度履歴を受けた模擬試験体のコア供試体および標準養生供試体の圧縮強度発現と相当材齢の関係について報告している³⁾。模擬試験体は4面を断熱した1×0.5×0.9mの大きさで、最高到達温度は、水セメント比0.28、0.38、0.55でそれぞれ約70℃、60℃、50℃となっている。報告されている関係図を、若干の相違はあると思われるが、相当材齢をそのまま有効材齢と見なして示したのが図-9である。

同図における標準養生のモデル曲線において、発現係数は水セメント比と(9)式の関係から求め、凝結の終結時間はいずれも0.5日と仮定している。また、コア供試体のモデルは、さらに発現低減率を変数として回帰することで求めている。いずれの水セメント比についても、標準養生、温度履歴を受けたコア供試体とも発現モデルは測定値を良好に再現しており、本提案モデルの妥当性が確認できる。また、これらの結果から、本提案モデルは高強度コンクリートのみならず普通強度レベルのマスコンクリートに対しても有効であること、普通ポルトランドセメントの場合の発現低減率は水セメント比に係わらずおよそ0.85であること、コンクリートの凝結の終結時間としては暫定的に0.5日が採用できることなどがわかる。

5. まとめ

初期高温履歴を受ける高強度コンクリート構造部材の初期材齢から材齢91日程度までの力学特性（圧縮強度ならびにヤング係数）発

現モデルを提案することを目的として行った本研究の結果は以下のようによまとめられる。

- 1) CEB-FIPの有効材齢（または相当材齢）をマチュリティとすることで、温度履歴を受けた構造部材の力学特性発現は、材齢7日程度までの初期材齢では、標準養生供試体の特性発現とほとんど同一の曲線で表すことができる。
- 2) CEB-FIPの力学特性発現モデルに、発現の起点としての凝結の終結時間、ならびに標準養生供試体に対する発現低減率をパラメータに加えた改良モデルは、高強度コンクリートの標準養生供試体ならびに構造部材の力学特性発現を良好に再現できる。力学特性発現係数と発現低減率の一般化ができれば、標準養生材齢28日における特性値と凝結の終結時間を適切に設定することで、初期高温履歴を受ける構造部材の力学特性発現の予測が可能である。
- 3) 改良モデルにおける圧縮強度とヤング係数の両発現係数には、コンクリートの種類に係わらず、一次の相関関係が成立する。また、水セメント比と圧縮強度発現係数にも、普通ポルトランドセメントで一次の相関関係が認められた。これらの関係式はより多くのデータを蓄積することで一般性を高めることが可能と考えられる。
- 4) 改良モデルにおける構造部材の標準養生供試体に対する発現低減率は、圧縮強度については普通ポルトランドセメントで0.85前後、高ビーライト系セメントで約0.95であったが、ヤング係数については特に考慮する必要はなかった。ただし、これら値の一般性についてはさらに検討を要する。

以上の結果から、高強度コンクリートの標準養生供試体ならびに実構造部材の初期材齢から材齢91日程度までの圧縮強度ならびにヤング係数発現モデルを提案した。また、本モデルは普通強度レベルのマスコンクリートなどに対しても有効と考えられる。

謝辞

本研究の発想は、(社)日本コンクリート工学協会「自己収縮研究委員会」WG3の活動を通じて得られたものである。広島大学 田澤栄一教授（委員長）、宇都宮大学 佐藤良一教授（WG3主査）をはじめとした委員会のメンバーに謝意を表する。また、実験データの一部は住宅都市整備公団と清水建設（株）との共同研究で得られたものであることを付記する。

参考文献

- 1) CEB-FIP Model Code 1990, Comité Euro-international du Béton, 1990
- 2) Freiesleben Hansen, P., and Pedersen, J.: Maturity of Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete, Nordisk Betong (Stockholm), V. 21, pp. 19-34, 1977
- 3) 友澤史紀, 牛島 栄: 最近の積算温度方式の発展とその応用, セメント・コンクリート, No.527, pp.66-73, 1991
- 4) 自己収縮研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.93-113, 1996
- 5) 地濃茂雄, 仕入豊和: コンクリートの強度発現性状におよぼす温度履歴条件 (20~90℃) の影響, 日本建築学会論文報告集, 第337号, pp.8-13, 1984
- 6) 牛島 栄, 酒井芳文, 原田和樹: 高強度コンクリートの内部温度履歴が強度発現に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No. 46, pp.93-113, 1992

(1997年7月9日原稿受理, 1998年5月21日採用決定)