低水結合材比モルタルの圧縮強度増進性状と温度時間関数の適用について

大成建設㈱　正会員　○木ノ村幸士
東京大学大学院　正会員　石田　哲也

1．はじめに

著者らは，低水結合材比モルタルを対象とした既往の検討[1]において，材齢 91 日以降に高温を負荷した場合に，空隙構造が顕著に緻密化し圧縮強度が大幅に増加するとの知見を得た．一方，各種セメント硬化体の圧縮強度は，養生温度や材齢に依存し，積算温度や等価材齢を用いた温度時間関数で一義的に表現しうることが知られている[2),3),4)]．本検討では，高温負荷時に後発的な水和が確認された上記結果を含む各種養生条件での圧縮強度を，温度時間関数で整理し，常温・高温養生の影響を一義的に扱う温度時間関数を強度推定に適用する際の留意点を考察した．

2．試験概要

(1) 対象配合

作製した供試体の配合を**表-1** に示す[1]．いずれも低熱ポルトランドセメント（LPC）を用い，フライアッシュ（FA）を内割りで 30%置換した低水結合材比（W/B=30%）の配合である．細骨材に陸砂を 100%用いた「LFA」と，内部養生効果を期待し細骨材容積の 20%を人工軽量細骨材（ALS，吸水率 14.9%）で置換した「LFA-ALS」の 2 種類を設定した．供試体はφ5×H10cm である．材齢 1 日で脱型，7 日まで 20℃湿布養生後，91 日まで 20℃封緘養生を継続した．

(2) 養生条件及び試験条件

材齢 91 日以降の養生条件を**表-2** に示す．20℃封緘を継続するケースと所定の材齢で 60℃環境に曝露する 3 ケースを設定した．圧縮強度試験は，各所定の材齢において常温環境下で実施した．

表-1 モルタル供試体の配合[1]

配合種類	W/B (%)	FA/B (%)	S/B (-)	ALS/S (容積%)	空気量 (%)
LFA	30	30	2.5	0	2.5
LFA-ALS				20	

表-2 養生条件の設定[1]

略称	1日	7日	91日	273日 (材齢)
20S	封緘	20℃湿布	20℃封緘	
91d-60V			20℃封緘	60℃90%RH
273d-60S			20℃封緘	60℃封緘
273d-60V			20℃封緘	60℃90%RH

3．試験結果

(1) 材齢による整理

材齢と圧縮強度の関係を**図-1**（実線）に示す．両配合の傾向は概ね一致しているが，養生条件 91d-60V では LFA-ALS の強度は高温負荷後に横ばいを示す点が異なっており，ALS 界面周辺での破壊が示唆される．また，LFA-ALS の 273d-60S，60V では高温負荷後大きく強度増進している．この点については，後述する高温負荷に伴い生じる内部供給水や ALS 内包水が，大きく逸散することなく後発的な水和の進展に寄与し，界面周辺が改質された可能性が高いことを SEM 観察等から別途確認している[1]．

$$M = \sum (T - T_0)\Delta t \quad \cdots \quad (式1)$$

ここに，M：積算温度（DD），
T：期間Δtのコンクリート温度の平均（℃）
T_0：基準温度（-10℃），Δt：期間（日）

(2) 積算温度による整理

式 1 に基づき，積算温度と圧縮強度の関係を整理した[2]．両者の関係を**図-2** に示す．まず LFA の結果に着目する．LPC 硬化体の強度は，C_2S の水和反応が顕著になる時期から著しく増進するため，積算温度を用いた単一直線では表現できないとの指摘もあるが[5]，本検討で扱う強度は後期材齢が主であり，養生条件に関わらず両者には良好な相関が認められる．一方で，養生温度により収束強度に差異が見られる．積算温度を用いた評価は，簡易に諸条件での圧縮強度を推定できるため大変便利であるが，そもそも収束強度を推定できないこと，また，

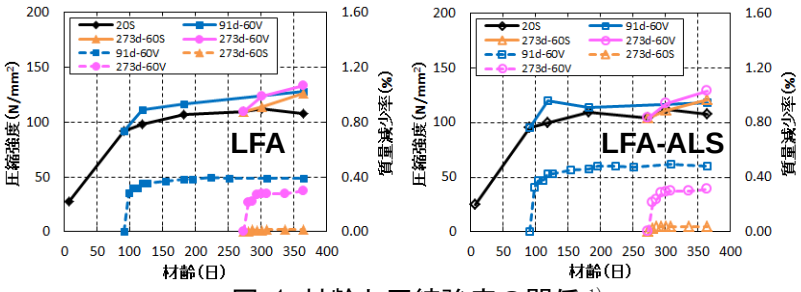

図-1 材齢と圧縮強度の関係[1]

キーワード　低水結合材比，圧縮強度増進性状，積算温度，等価材齢，温度時間関数
連絡先　〒163-0606　東京都新宿区西新宿 1-25-1　大成建設（株）原子力本部　TEL 03-5381-5315

内挿により強度推定する場合も養生条件が実環境と極端に異なっていないか，さらには実環境で想定する積算温度が，既知データの存在する積算温度に対してどの位置にあるかを確認することが重要である．LFA-ALS については，ペースト強度が 120N/mm^2 付近に達すると ALS 界面周辺が破壊し強度一定となる兆候が示唆されるが，養生条件 273d-60S，60V では界面周辺の改質に従い，再度ペースト強度が支配的な従来の直線上に移動すると推測される．

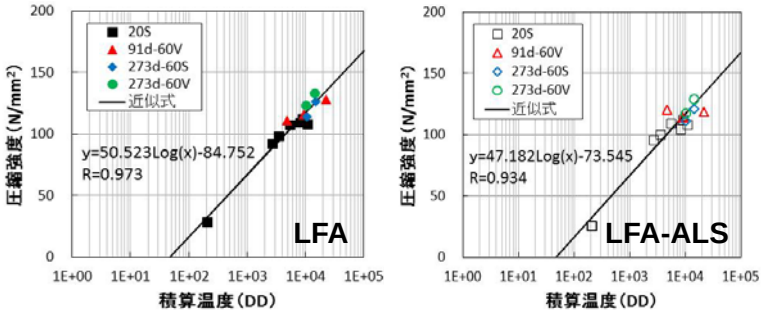

図-2 積算温度と圧縮強度の関係

(3) 等価材齢による整理

強度の発現勾配や収束傾向を表現できる関数として，見かけの活性化エネルギーに基づく等価材齢（式 2）とゴンペルツ曲線（式 3）を用いた整理を行った [2),3)]．結果を**図-3** に示す．図中の標準曲線は，20S の材齢 91 日強度から F_{int} を規定し，20S の各材齢での強度に対して非線形最小二乗法により実験定数 a, b を決定した．また E は規定した標準曲線に対し，全試験結果の等価材齢を回帰させ決定した．

$$t_e = \sum_0^t \exp\left(\frac{-E}{R}\left(\frac{1}{T_c}-\frac{1}{293}\right)\right)\times\Delta t \quad \cdots \text{（式2）}$$

ここに，t_e：等価材齢，E：見かけの活性化エネルギー(J/mol)
R：気体定数8.314J/molK
T_c：期間Δtの間のコンクリートの平均温度(K)
Δt：温度T_cである時間(日)

$$F = F_{int}\cdot\exp(a\cdot t_e^b) \quad \cdots \text{（式3）}$$

ここに，F_{int}：コンクリートの最終到達強度(N/mm²)，a,b：定数

LFA の結果に着目すると，91d-60V は標準曲線よりやや下方に位置するのに対し，273d-60S, 60V は上方に位置している．つまり，後者は 20℃養生時の強度から規定した標準曲線に対して，後発的な水和の進展影響が大きいことを意味している．低 W/C 配合では高温封緘時に硬化体内部の相対湿度が上昇するとの実験事例がある [6)]．常温では閉じ込められたインクボトル水や層間水等が高温負荷に伴い空隙中に内部供給されると仮定すると，事前の封緘期間が長いほど外部への水分逸散は抑制（封緘では遮断）されることから，未反応残存粒子との後発的な水和の進展度の違いにより強度増加に差異が生じたと推察される（**図-1** 参照）．一方，標準養生 28 日強度が 60N/mm^2 程度の LPC モルタルでは，50℃水中養生でも標準曲線上に整理できるとの報告がある [4)]．両者を勘案すると，本検討で見られた標準曲線からの乖離は，低 W/B 配合かつ内部相対湿度が高く維持される場合に特徴的に現れる挙動である可能性が示唆される．この点については，今後さらに検証する必要がある．

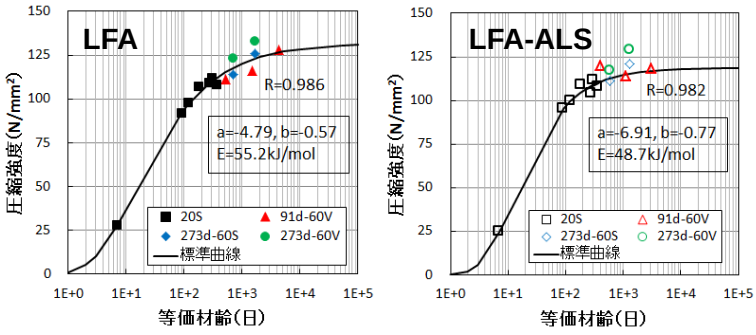

図-3 等価材齢と圧縮強度の関係

なお，LFA-ALS については，ALS 界面の改質影響により高強度域の強度が支配されるため，LFA に比べ推定精度は劣っている．ALS には自己収縮低減効果が期待されるが，自己収縮が問題となるのは主として低 W/B 配合である．高強度を発現する低 W/B 配合で ALS を含む場合には，等価材齢により強度を一義的に評価することは困難を伴う．

4．まとめと課題

各種養生条件で得た低水結合材比モルタルの圧縮強度を，積算温度及び等価材齢による温度時間関数を用いて整理した．その結果，両手法とも圧縮強度と高い相関があることを確認した．一方で，適用上の限界も明らかとなった．精緻な強度推定には，水和反応，空隙構造形成過程，水分の移動・平衡特性等の温度依存性を相互に連関させた高度な解析手法が必要となるが，背景を理解し，要求精度や用途に応じて推定手法を選択することが肝要である．

参考文献

1) 木ノ村幸士，石田哲也：水分の移動・平衡に着目した低水結合材比モルタルの物性変化，コンクリート工学年次論文集，2015（投稿中）
2) 日本建築学会：寒中コンクリート工事施工指針・同解説，1998
3) ASTM C 1074：Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, 2000 ASTM Standards Vol.04.02
4) 谷口円ら：セメント種類がモルタルの強度増進の温度依存性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.415-420，2009
5) 小山宣幸ら：低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの積算温度に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.1，pp.523-528，1997
6) Park and Noguchi：Autogenous shrinkage of cement paste hydrated at different temperatures; influence of microstructure and relative humidity change, Proc. of 3rd international research seminar on self-desiccation and its importance in concrete technology, pp.93-101, Lund, Sweden, 2002