コンクリート壁の耐火性能に及ぼす調合と含水率の影響

ON THE EFFECT OF MIX DESIGN AND WATER CONTENT UPON THE FIRE RESISTANCE OF CONCRETE WALLS

原田和典*, 寺井俊夫**

Kazunori HARADA and Toshio TERAJ

Variations of the fire resistance of concrete walls were numerically analyzed using a model of heat and mass transfer. The analysis was made in two steps. In the first step, the material properties such as thermal conductivity and density were estimated based on the mix design. Then, in the second step, the values are used in the model of heat and mass transfer, which gives the estimate of fire resistance time. By repeating this procedure, the variation due to the mix design of concrete was quantified. In a similar way, the variation due to the change of initial water content was also quantified. As a result, the effect of mix design dominates the variation of fire resistance of concrete. The effect of initial water content is small compared with that of mix design. Thus the effect can be approximated by a liner relationship as 3.3 minutes per 1% change in initial water content in case of 70 mm thick walls. By using this result, a diagram was presented to show the range of acceptable mix design for the required fire resistance time.

Keywords: fire resistance, concrete, heat and mass transfer, mix proportions, initial water content,
耐火性能、コンクリート、熱水分移動、調合、初期含水率

1. 序

コンクリート部材の熱的性質は、調合（骨材の種類と量）や養生条件（含水率）により大きく変化するが、それが耐火性能に及ぼす度合は現在のところ正確には不明であり、より合理的な耐火設計法の確立を阻む要因となっている。

これを標準火災試験^{2, 3)}等の実験的手法を用いて解明することは、原理的には可能であるが時間と費用の面からは不可能に近い。たとえば Lee らはコンクリート柱の耐火試験を多数行ない、粗骨材の種類による影響が大きいことを示しているが、定量的な関係を導くまでには至っていない⁴⁾。

それゆえ、解析的手法によりこれを定量化することが望まれている。本研究では、耐火試験におけるコンクリート壁の温度上昇を熱水分移動モデルにより解析し、コンクリートの調合と含水率の変化が耐火性能に及ぼす影響を調べる。

2. 解析方法

調合と含水率が耐火性能に及ぼす影響を調べるため、Fig.1 に示す方法を用いる。はじめに、コンクリートの調合および含水率を想定し、それに基づき熱水分移動に関する物性値を推算する(step 1)。推算値を熱水分移動モデルに用いて数値解析を行い(step 2)、その結果から耐火時間を評価する。この手順を多くの条件について繰り返せば調合および含水率と耐火時間との間の定量的な関係を得る。なお、耐力壁の場合には力学的な検討も必要になるが、本研究では非耐力壁に限ることとし、力学的な検討は行わない。

検討対象は、厚さ70mmのコンクリート平面壁とした。平面壁としたのは、一次元問題となり、解析と考察が簡明になるためである。ちなみに厚さ70mmのコンクリート壁は、現行の法令基準では1時間の耐火性能が認定されている⁵⁾。

本研究の一部は、第1回アジア火災科学技術会議¹⁾にて口頭発表した。

* 京都大学工学部建築学科 助手・博士(工学)

Instructor, Dept. of Architecture, Kyoto University, Dr. Eng.

** 近畿大学工学部建築学科 教授・工博

Prof., Dept. of Architecture, Kinki University, Dr. Eng.

加熱条件は ISO 834²⁾ とし、片側より標準加熱曲線

$$\theta_f = 345 \log_{10}(8t + 1) + \theta_0 \quad (1)$$

に規定される温度に従って加熱される場合を想定した。ただし、 θ_0 は初期温度、時間 t の単位は[分]である。耐火性能の評価も ISO 834 に基づき、非加熱側表面の温度が140°C上昇するまでの時間を耐火時間として定義する。

Fig.1 a flow chart to analyze the variation due to mix design and due to initial water content

2. 1 熱水分移動モデル

Fig.2 に示すようにコンクリートを多孔材料として扱う。実質部の熱伝導、空隙内のガス（空気、水蒸気）の拡散と対流、物理吸着水（含水）の脱着および拡散、結晶水の熱分解を考慮すると次式が適用できる⁶⁾。

(熱収支)

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla \theta) - L_s R_{sorp} - L_d R_{dcmp} \quad (2)$$

(空隙内ガスの収支)

$$\frac{\partial(\epsilon \rho_g)}{\partial t} + \nabla(\rho_g u) = R_{sorp} + R_{dcmp} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\epsilon \rho_v)}{\partial t} + \nabla(\rho_v u) = \nabla(D_v \nabla \rho_v) + R_{sorp} + R_{dcmp} \quad (4)$$

(物理吸着水および結晶水の収支)

$$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} = \nabla(\rho_0 D_w \nabla w) - R_{sorp} \quad (5)$$

$$\rho_0 \frac{\partial w_c}{\partial t} = -R_{dcmp} \quad (6)$$

ただし

(空隙内ガスの移動速度)

$$u = -\kappa_D \nabla P_g \quad (7)$$

(物理吸着水の脱着速度)

$$R_{sorp} = \gamma(w - w_{eq}) \quad (8)$$

(結晶水の熱分解速度)

$$R_{dcmp} = \rho_0 \sum_{k=1}^3 w_{c,k} A_k \exp(-E_k / RT) \quad (9)$$

(気体の状態方程式)

$$\rho_v = \frac{M_v P_v}{RT} \quad (10)$$

$$\rho_g = \rho_v + \rho_a = \frac{(M_v - M_a) P_v + M_a P_g}{RT} \quad (11)$$

である。式(9)における添字 $k=1$ はゲルの崩壊(100~400°C)を、 $k=2$ はポルトランドライト相(450~550°C)、 $k=3$ はCSH相の分解(600°C~)を表し、 $w_{c,k}$ はそれぞれの成分の残存量である。

数値解析では、Fig.3 に示す要素分割を用い、各要素の温度 θ 、空隙内ガスの全圧 P_g 、水蒸気分圧 P_v 、物理吸着水の含水率 w および結晶水の含水率 w_c を未知数とする定式化を行った。数値解法の詳細は既報に示した⁷⁾。境界条件と初期条件は Table 1 の値を用いた。

Fig.2 a model of heat and mass transfer in concrete during fire, considering the heat conduction, gas filtration, diffusion of water vapor and physically adsorbed water. These phenomena are coupled by sorption and decomposition

Fig. 3 division of wall slab into elements.

Table 1 boundary condition parameters

	exposed surface	unexposed surface
convective coeff. [W/m ² ·K]	23	23
ambient temperature [°C]	ISO 834*	4
resultant emissivity [-]	0.3	0.0
vapor transfer coeff. [m/s]	0.002	0.0006
initial temp. [°C]		4
initial water cont. [%-wt.]		3

*) see eq.(1)

2. 2 コンクリートの調合と物性値の関係

上述のモデルを用いて、コンクリートの調合と耐火性能の関係を定量化するためには、モデルに現れる物性値と調合との関係が必要になる。これらは、材料単体での物性値と、混合比率（単位容積重量）をもとに推算することが可能である。ここでは、その方法の概要を示す。詳細は文献⁸⁾に示されている。

コンクリート全体の体積のうち、粗骨材、細骨材、セメントペーストのそれぞれの体積比率を V_{ag} 、 V_s 、 V_p とする。密度、比熱、空隙率については、各構成材料の値を単純加算すれば良いので

$$\rho = \sum_i \rho_i V_i \quad (12)$$

$$\rho c = \sum_i \rho_i c_i V_i \quad (13)$$

$$\varepsilon_0 = 1 - \sum_i V_i \quad (14)$$

となる。ここに、添字 i は ag （粗骨材）、 s （細骨材）、 p （セメントペースト）のいずれかを表す。

熱伝導率については、Maxwellの式⁹⁾により二種混合材料の値を推算できる。 i 種（連続相）と j 種（分散相）を $(1-v)$ 対 v の体積比率で混合した材料の熱伝導率 λ_{i+j} は

$$\lambda_{i+j} = \lambda_i \frac{\lambda_j + 2\lambda_i - 2v_i(\lambda_i - \lambda_j)}{\lambda_j + 2\lambda_i + v_i(\lambda_i - \lambda_j)} \quad (15)$$

により与えられる。

数種の粗骨材と砂については、それら単独での密度、比熱、熱伝導率が Table 2、Fig. 4、5 のように得られており^{10~12)}、これらを任意の割合で混合した時の値は式(12)~(15)により計算できる。式(15)を、ペーストと

砂の混合、モルタルと粗骨材の混合の二段階に適用すれば任意の調合のコンクリートの熱伝導率を得ることができる。

透気率、水蒸気拡散係数、液状水拡散係数などの物質移動係数は、温度上昇過程に対する感度が低いこともあり、簡単のため空隙率依存性のみを考慮した。詳細は文献⁸⁾に示した。

Table 2 density and specific heat of constituents

	density [kg/m ³]	specific heat [J/kg·K]
cement	3150	920
sand	2650	830
lightweight aggregate	1550	795
basalt	2500	896
sandstone (1)	2690	829
sandstone (2)	3600	862
tuff	3600	858
chart	4000	828

Fig. 4 thermal conductivity of coarse aggregates (LW = lightweight, BA = basalt, S1, S2 = sandstone, TU = tuff, CH = chart)

Fig. 5 thermal conductivity of cement paste, cement mortar and sand.

2. 3 予測精度の検討

ここで、上述の方法の精度について検討しておく。Fig. 1 に示したように予測は二段階からなり、ステップ

1では、コンクリートの調合から物性値を推算する。予備的に行った感度解析によれば、熱伝導率の感度が非加熱側表面温度経過に対しては圧倒的である。ゆえに、熱伝導率の推算精度が解析全体の精度を左右する。

調合が既知のコンクリートの高温時の熱伝導率を測定した例はあまり多くないが、上田らは砂岩コンクリートと軽量コンクリートの値を報告している¹³⁾。この調合から推算した値を測定値と比較した結果を Fig. 6 に示す。これより、推算値は測定値よりも平均で約10%大きめの結果を与え、標準誤差は約8%である。

現状では比較できるデータが十分ではないため、明確な結論を下すまでには至らないが、本推算法は多くの場合熱伝導率を過大に評価する側の誤差を持つようである。熱伝導率が過大であると、ステップ2の耐火性能予測では耐火時間を短く評価する側の誤差を生ずる。他の物性値については感度が低いので、推算値に誤差があっても熱伝導率の誤差の影響に比べて相対的に無視しうる。

解析の第2ステップでは、熱水分移動モデルが持つ理論誤差が介在しうる。モデル自体の精度検証のため、モルタル平板を実験に供した。その一方で、同一調合のモルタルについて熱伝導率を測定し、その値を用いて計算を行った。両者は非常に良く一致し^{6, 14)}、モデル自体が有する理論誤差は、ステップ1の熱伝導率の推算誤差に比べて無視しうる。

Fig.6 prediction error in thermal conductivity of sandstone and lightweight concrete. Data were measured by Ueda et al.¹³⁾

3. 解析

3. 1 コンクリートの調合と耐火性能の関係

(1) 骨材の種類による影響

粗骨材、細骨材、セメントペーストの体積比率を Table 3 の値に固定し、粗骨材の種類を人工軽量骨材(LW)、弦武岩(BA)、砂岩(S1、S2)、凝灰岩(TU)、チャート(CH)の6種類の骨材のいずれかとした場合について計算を行った。推算した熱伝導率を Fig. 7 に、絶乾密度を Fig. 8 に示す。粗骨材の種類により熱伝導率は大きく変

化し、最も大きいのはチャート、最も小さいのは人工軽量骨材である。

絶乾密度は、人工軽量骨材を用いると約1700[kg/m³]であるが、比重が大きな骨材(S2、TU)を用いると2400程度となり、全体で約2割強の変動がある。

コンクリートの初期含水率は砂岩(S1)については3%-wt.とした。他の調合のコンクリートでは絶乾密度が異なるため、単位体積あたりの含水量が等しく63[kg/m³]となるように値を設定した。

Table 3 mix proportion of concrete

	volume fractions [m ³ /m ³ -bulk]
coarse aggregate*	0.362
fine aggregate	0.299
cement	0.087
water**	0.068
sum	0.816

* LW, BA, S1, S2, TU or CH

** hydrated water only. (Excl. excess water)

Fig.7 estimated thermal conductivity of six kinds of concrete (See Fig.4 for symbols. Mix proportions are shown in Table 3)

type of aggregate

Fig.8 estimated density of six kinds of concrete (oven dry condition, See Fig.4 for symbols.)

計算結果から非加熱側表面温度の経過のみを抽出して Fig. 9 に示す^{注1)}。骨材の種類により温度経過が大きく

影響され、温度の横ばい（物理吸着水の脱着に伴う潜熱吸収のため温度上昇が一時的に停滞する現象）の継続時間は約9～20分の間で変動する。温度が140℃上昇するまでの時間を耐火時間として定義すると54～83分となる。熱伝導率の大小と耐火時間の長短とは良く対応しており、熱伝導率の大きいほど耐火時間は短くなる。

Fig.9 calculated unexposed surface temperature for different kind of aggregate. (See Fig.4 for symbols.)

(2) 骨材の量による影響

前項の検討により、粗骨材に軽量骨材(LW)を用いると温度上昇が最も遅く、チャート(CH)を用いると最も温度上昇が早いことが明らかとなったので、これら2種類の骨材について体積比率 V_{ag} を0～0.43 [m^3/m^3]の範囲で変化させた。

推算した熱伝導率を Fig. 10 に示す。チャートでは体積比率が増加するに従って熱伝導率は大きくなる。一方、人工軽量骨材ではモルタルの値からわずかに小さくなる程度である。

非加熱側表面温度の経過を Fig. 11 に示す。前項と同様に、熱伝導率と耐火時間とは良く対応している。チャートでは粗骨材量が増えるにつれて耐火時間が短くなるが、人工軽量骨材ではその変化はほとんど無い。

3. 2 初期含水率の影響

コンクリートの含水状態はその耐火性に複雑な影響を及ぼす。一般に高含水率のコンクリートは熱伝導率の大きいので、この点では耐火性能に対して不利に働く。一方、含水率が高いコンクリートは物理吸着水の脱着に要する熱量が増加するので温度の横ばい現象が長い時間継続し、温度上昇を抑える効果がある。この点は耐火性能

Fig.10 estimated thermal conductivity of chart (CH) and lightweight (LW) concrete for various mix proportions.

Fig.11 calculated unexposed surface temperature of various mix proportions of coarse aggregate in case of chart (CH) and lightweight (LW) concrete.

に対して有利に働く。

そこで、前節の砂岩コンクリート(S1)について初期含水率を1、2、4%に変えて計算を行ない、非加熱側表面温度経過の変化を調べた。含水率の増加に伴う熱伝導率の変化は、空隙内ガスの一部が水で置換されたと考えると Fig. 12 のように推算される。

非加熱側表面温度の経過を Fig. 13 に示す。初期含水率が1%の場合には温度の横ばいは約4分しか継続しないが、4%では約12分となる。それに伴い耐火時間が長くなり、その変動範囲は64～74分となる。耐火時間の変動が初期含水率に対して近似的に線形と見なすと、その感度係数は3.3[$min. / (\% \cdot wt.)$]となる。

Fig.12 variations in thermal conductivity by water content in case of sandstone (S1) concrete. (See Table 3 for mix proportions)

Fig.13 calculated unexposed surface temperature for different initial water content in case of sandstone concrete (See Table 3 for mix proportions.)

4. 考察

3.1節の計算で得られた耐火時間を、粗骨材の熱伝導率の常温から800°Cまでの平均値 $\overline{\lambda_{ag}}$ [W/m.K]

$$\overline{\lambda_{ag}} = \frac{1}{780} \int_{20}^{800} \lambda_{ag}(\theta) d\theta \quad (16)$$

と粗骨材の体積比率 V_{ag} [m³/m³]の関数として Fig. 14 に示す。図中の黒丸が計算値であり、その他の点は内挿してプロットしたものである。

この関係を利用して必要な耐火時間を得るための方法について考察する。いま仮に70mmの壁に対して要求耐火時間を60分とすると、Fig. 14 を利用して耐火時間が60分以上となるようなコンクリートの調合を選べば良い。ただし、同図は初期含水率が3%の場合について作成され

ているので、含水率の変動に対する余裕が必要である。Fig. 13 より初期含水率が3%から1%に変動すると耐火時間は約7分短くなる。よって Fig. 14 にて耐火時間が67分となる範囲の調合を選べば十分である。

Fig.14 fire resistance time as a function of temperature averaged thermal conductivity of coarse aggregate defined by eq.(16) and volume fraction of coarse aggregate. Contour line (67min.) shows the limit of mix proportions acceptable for 60 minutes of fire resistance, considering the variation of the initial water content.

5. 結論

コンクリートの調合と初期含水率が耐火性能に与える影響を、熱水分移動のモデルを用いて定量化した。コンクリートの調合については、粗骨材の種類（天然骨材5種類、人工軽量骨材1種類）と体積比率の関数として耐火時間を表した。その結果、耐火時間は骨材の種類と量に大きく依存し、厚さ70mmの壁では、54～83分の範囲で変動した。

初期含水率による変動についても検討し、初期含水率が1～4%の範囲で変動すると、耐火時間は約10分変動することを示した。

耐火性能に及ぼす度合を比較すると、コンクリートの調合によるものが圧倒的に大きい。このことから、初期含水率の影響を近似的に線形に重ねあわせることにより、要求耐火性能を満たすために許容されるコンクリートの調合の範囲を求める方法について考察した。

注1) 計算を行うと、各時刻での温度、空隙内ガスの全圧および水蒸気分圧、物理吸着水および結晶水の含水率の分布が得られる。本論文では、紙面の都合により、非加熱側表面温度経過のみを示す。

記号

Alphabets

A	pre-exponential factor [s^{-1}]
c	heat capacity [$J/kg \cdot K$]
D_v	vapor diffusion coefficient [m^2/s]
D_w	water diffusion coefficient [m^2/s]
E	energy of activation [$J/kmol \cdot K$]
L_s	heat of sorption [J/kg]
L_d	heat of decomposition [J/kg]
M	molecular weight [$kg/kmol$]
P	pressure [Pa]
R	universal gas constant [$=8314 J/kmol \cdot K$]
R_{sorp}	rate of desorption [$kg/m^3 \cdot s$]
R_{dcmp}	rate of decomposition [$kg/m^3 \cdot s$]
T	absolute temperature [K]
t	time [s]
t_{fr}	fire resistance time [s]
V	volume fraction [m^3/m^3]
w	content of physically adsorbed water [$kg/kg\text{-dry}$]
w_c	content of water of crystallization [$kg/kg\text{-dry}$]
w_{eq}	equilibrium water content [kg/kg]

Greek letters

ϵ	void fraction [$m^3\text{-void}/m^3\text{-bulk}$]
γ	rate constant of desorption [$kg/m^3 \cdot s$]
λ	thermal conductivity [$W/m \cdot K$]
ρ	density [$kg/m^3\text{-void}$]
ρ_0	density of concrete [kg/m^3]
θ	temperature [$^{\circ}C$]
θ_f	fire temperature [$^{\circ}C$]
κ_D	Darcy's permeability [$m^2/Pa \cdot s$]

subscripts

a	air
ag	aggregate
g	gaseous mixture
k	stage of decomposition
p	paste
s	sand
v	vapor
0	reference (oven dry)

参考文献

- 1) Harada, K., Terai, T., "Fire Resistance of Concrete Walls", Proc. 1st. Asian Conference on Fire Science and Technology, pp. 215-219, 1992
- 2) ISO834 - Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction, 1985
- 3) 昭和44年建設省告示第2999号、1969
- 4) Lee, T., T., Lin, T., D., "Fire Performance of Reinforced concrete Columns", Symp. on Applications of Fire Science to Fire Engineering, Denver, pp. 176-205, 1984
- 5) 昭和39年建設省告示第1675号、1964
- 6) Harada, K., Terai, T., "Heat and Mass Transfer in an Intensely Heated Mortar Wall", Fire Safety Science, vol. 3, (Proc. 3rd Int. Symp. on Fire Safety Science), pp. 781 - 790, 1991
- 7) Terai, T., Harada, K., "Fire Behaviour of Concrete Members Taking into Account Simultaneous Transfer of Heat and Moisture", Proc. Asian Fire Seminar 93', pp. 49 - 58, Science University of Tokyo, 1993
- 8) 寺井俊夫、原田和典、「火災時のコンクリートの熱伝導とそのモデル」、第12回日本熱物性シンポジウム、pp. 181-184, 1991
- 9) Maxwell, J., C., "A Treatise on Electricity and Magnetism", Vol. 1, Chapter IX, First Edition, General Publishing Company, Toronto, 1873
- 10) 原田和典、寺井俊夫、早崎伸一、「高温時のコンクリートの熱物性値に関する研究」、日本建築学会近畿支部研究報告集、第29号・計画系、pp. 29-32、1989
- 11) 原田和典、寺井俊夫、「コンクリートの高温時の熱伝導率推算方法に関する研究」、日本建築学会近畿支部研究報告集、第32号・計画系、pp. 157-160、1992
- 12) 「耐火試験時のコンクリート床内の熱及び水分同時移動に関する研究」、昭和62年度文部省科学研究費補助金〔試験研究(1)61850107、研究代表者:寺井俊夫〕研究成果報告書、1988
- 13) 上田哲夫、寺井俊夫、十倉毅、石原毅、小南和也、行貝光史、「コンクリートの高温時の熱物性値に関する実験的研究」、日本建築学会近畿支部研究報告集、第27号(計画系)、1987
- 14) 原田和典、寺井俊夫、「モルタル版の加熱実験の数値計算によるシミュレーション」、日本建築学会大会(中国)学術講演梗概集A、pp. 1053 - 1054、1990

(1995年4月19日原稿受理, 1995年11月6日採用決定)