EPS を内包するボイドスラブの火災時の伝熱挙動に関する研究

A STUDY ON HEAT TRANSFER OF VOID SLAB INCLUDING
EPS UNDER FIREPROOFING PERFORMANCE

西尾 悠平*, 野口 貴文**, 小田 康弘***, 武藤 尚之****

Yuhei NISHIO, Takafumi NOGUCHI, Yasuhiro ODA
and Hisayuki MUTO

Heat transfer at void slab under fireproofing performance was unknown in detail. To clear the mechanism of that makes us evaluate the fire performance of void slab by calculating. To reveal the heat transfer mechanism of void slab, authors conducted the experiment like heat test on pieces of void slab. It revealed that latent heat of water included in slab and thermoplastic and thermal insulation properties of EPS included in void were major impacts on heat transfer at void slab. In the case of consideration of latent heat of water and melting of EPS, it revealed that calculating heat transfer at void slab by finite difference method matched results of the experiment to some extent.

Keywords : Fire resistance, Void slab, Heat transfer, Heat test, Finite difference method

耐火性能, ボイドスラブ, 伝熱, 加熱試験, 差分法

1. はじめに

近年、発泡プラスチック系材料である EPS (Expanded Poly-Styrene) を用いて中空部を設けたボイドスラブ (図 1 参照) が住宅等に多く用いられている。ボイドスラブは、ボイド内部に EPS 等の可燃物を内包しており、可燃物が防耐火性能に影響を与えるとの懸念があるが、その影響は明らかになっておらず、内包する EPS に関して若干の違いがあったとしても、その都度、実大規模の耐火試験を実施し、個別に防耐火性能を評価せざるを得ない。そのため、ボイドスラブに内包される可燃物が火災時にどのような挙動を示すかを明らかにし、ボイドスラブの防耐火性能をより合理的に評価できるようにすることが強く望まれている。

既往のボイドスラブの耐火試験¹⁾において、ボイド内部において急激な温度上昇などが確認され、普通のコンクリートスラブにはない伝熱性状が確認された。しかし、火災時にボイド内部においてどのように熱伝達が行われているのかについて詳しくは分かっていない。

そこで、本論文では、ボイドスラブの伝熱性状をより詳細に把握するために、ボイドスラブの一部を切り出して耐熱ガラスを取り付けた試験体、並びに内部ボイド及びコンクリート中の水分を調整した試験体を作成し、火災時のボイド内部の挙動を確認し、伝熱性状を明らかにすることとした。そして、実験結果を基にボイドスラブ

の熱伝導モデルを作成し、ボイドスラブの熱伝導解析を試みた。

2. 実験 I

ボイドスラブの伝熱性状を明らかにするため、ボイド内部が観察可能となるように、耐熱ガラスを取り付けた試験体を用いて加熱実験を実施した。

2.1 試験体概要

図 2 に本研究で用いた EPS ボイドを示す。試験体は、EPS ボイド一個分のサイズを基準とし、厚さ 240mm、幅 200mm、長さ

図 1 ボイドスラブ

図 2 本研究で用いた EPS ボイド

* 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)

** 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
教授・博士(工学)

*** 五洋建設(株)建築企画部

**** (株)東京興業貿易商会本社技術工事部

Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

Penta-Ocean Construction Co., Ltd., Building Construction Business Planning Division
TOKYO KOGYO BOYEKI SHOKAI, LTD., Technical & Installation Div.

200mm に設定した。試験体を使用したコンクリートの材料を表 1 に、調査を表 2 に示す。耐熱ガラスを取り付けた試験体に関しては、ボイド内部が観察可能となるように、基準となるサイズの試験体からボイドの 3/4 を切り出した形（図 3 参照）で試験体を作製した。参考として、基準と同サイズの試験体「気-E-1」、及びボイド部を除いた部分と同体積のコンクリートのみの試験体「気-C-1」も作製し、加熱実験を実施した。ボイド内部を中空とした試験体「気-中-3/4」に関しては、コンクリート打設後に試験体内部の EPS を取り除き、耐熱ガラスを張り付けて作製した。試験体一覧を表 3 に示す。

2. 2 実験方法

図 4 に示すように、小型炉を用いて耐火実験を実施し、バーナーを用いて試験体の下面より加熱し、試験体底部より 50mm 下の位置に熱電対を設置し、温度を測定した。また、ビデオ及び目視により試験体の様子を観察した。加熱は、ISO 834 に規定されている標準加熱温度曲線『 $T=345\log(8t+1)+20$ (t in minute)』²⁾に従って 2 時間加熱を行い、その後 6 時間経時変化を測定した。図 3 に示す位置に熱電対を設置し、コンクリート、ボイド内部及び裏面（加熱面より 15, 35, 55, 120, 170, 210, 225, 240mm）において温度を測定した。また、コンクリートのみの試験体「気-C-1」に関しては、コンクリート内部及び裏面（加熱面より 15, 35, 55, 90, 110, 130, 150, 170mm）において温度を測定した。

2. 3 実験 I における結果及び考察

耐熱ガラスを取り付けて内部を可視化した試験体「気-E-3/4」の

表 1 コンクリートの使用材料

	種類	産地	密度(表乾) g/cm ³
細骨材(S)	陸砂	大井川	2.60
粗骨材(G)	砕石	青梅	2.66
セメント(C)	普通ポルトランドセメント(3.16g/cm ³)		
混和剤	AE 減水剤(マスターポリヒード 15S)		

表 2 コンクリートの調合

目標強度	W/C	細骨材率	単位量(kg/m ³)				混和剤	空気量
N/mm ²	%	%	W	C	S	G	C×(%)	%
25	71	44.5	175	246	811	1037	0.5	2.0

図 3 可視化した試験体概要（試験体「気-E-3/4」及び「気-中-3/4」）

表 3 試験体一覧（実験 I）

試験体名	ボイド部	寸法(幅×奥行×高さ)mm
気-E-3/4	EPS	200×150×240
気-中-3/4	中空	200×150×240
気-E-1	EPS	200×200×240
気-C-1	無	200×200×170

※気：コンクリートを気中で乾燥。
E：ボイド部分に EPS がある。中：ボイド部分に EPS がない。C：ボイド部分がなくコンクリートのみの
3/4：試験体サイズが基準サイズの 3/4（幅 200×奥行 150）。1：試験体サイズが基準サイズ（幅 200×奥行 200）

内部温度及び裏面温度の経時変化、ボイド部分を有する試験体「気-E-3/4」、「気-中-3/4」及び「気-E-1」のボイド内部温度（加熱面より 120mm の位置）の経時変化、各試験体の裏面温度の経時変化をそれぞれ図 5、図 6 及び図 7 に示す。参考として、試験体「気-E-1」と同様の厚さのボイドスラブ（図 1）の耐火試験を実施した際の測定値も図 5、図 6 及び図 7 に示す。なお、耐火試験に用いたボイドスラブの断面図及び温度測定箇所は、図 8 に示す通りである。

試験体「気-E-1」のボイド内部の温度履歴は、実大のボイドスラ

図 4 実験装置

図 5 気-E-3/4 における内部及び裏面温度の経時変化

図 6 ボイド内部（加熱面より 120mm）における温度経時変化

図 7 裏面における温度経時変化

ブの耐火試験で計測された温度履歴と同様に、加熱開始から温度が上昇し、その後 100℃で一定時間停滞後に再度温度上昇するという傾向を示した。また、裏面温度の履歴に関しても、コンクリートのみの試験体「気-C-1」とは異なり、加熱を停止する 120 分頃に温度が急上昇する変曲点が存在し、耐火試験の温度履歴と同様の傾向を示し、ボイドスラブの一部を切り出した試験体においても、同様な伝熱性状を確認できた。

EPS を内包する試験体「気-E-3/4」及び「気-E-1」においては、ボイド内部の温度が 100℃付近で停滞する様子、及び裏面温度が加熱終了後に急激に上昇する様子が確認された。試験体「気-E-3/4」のボイド内部の経時変化、及び実験終了後の様子を図 9 に示す。

ボイド内部における温度の経時変化を見ると、EPS をそのまま埋め込んだボイドスラブ試験体「気-E-3/4」及び「気-E-1」においては、10～20 分間 100℃で停滞するという温度履歴を示したのに対し、EPS を取り除いた試験体「気-中-3/4」に関しては、ボイド内部の温度が 100℃付近で停滞するという現象が観察されなかった。100℃で停滞するという現象は、水の潜熱、及び EPS のガラス転移時の吸熱が考えられる。しかし、EPS のガラス転移に使用される熱量は、水の潜熱と比べて非常に小さいため、水の潜熱が主な原因として考えられ、EPS をくり抜いて中空としたボイドスラブ試験体「気-中-3/4」においては、ボイド内部の温度が 100℃で停滞する現象は確認されていないことより、水の潜熱の影響に加えて、EPS によるボイド内部空間の透水性の低下、及び断熱性の向上も 100℃で温度が停滞する要因として考えられる。

裏面温度の経時変化をみると、同体積のコンクリートのみの試験体「気-C-1」で最も高い温度が計測された。ボイドが中空の試験体

図 8 耐火試験で用いたボイドスラブの断面及び温度測定点

図 9 気-E-3/4 におけるボイド内部の経時変化

は初期の温度上昇が最も早く、EPS が埋まっているボイドスラブ試験体「気-E-3/4」及び「気-E-1」は初期の温度上昇が遅かった。

試験体「気-E-3/4」におけるボイド内部の様子を見ると、ボイド内部の温度が停滞し始めた 40 分前後より EPS が溶け始め、加熱開始より 75 分後にはボイド内部の下半分の EPS の大部分が溶融し、加熱が終了する 120 分頃にはほぼ全ての EPS が溶融した。また、実験終了後に表面の耐熱ガラスを取り外したところ、EPS が全て溶融していることが確認された。

以上のことから、ボイド内部において EPS の燃焼反応は発生しておらず、ボイドスラブの伝熱性状には、EPS の断熱性及び透湿性、並びにコンクリート中の水分の蒸発潜熱が影響すると考えられる。

3. 実験Ⅱ

実験Ⅰより、ボイド内部において EPS の燃焼反応は発生しておらず、ボイドスラブの伝熱性状には EPS の断熱性、透湿性及びコンクリート中の水分の蒸発潜熱が影響すると考えられた。

そこで、ボイド内部において EPS が果たす役割、及び水分の潜熱の影響を確認するために、ボイド空間にエポキシ樹脂を塗布することによって意図的に耐水性を高めてボイド内部に意図的に水分が留まるようにした試験体、及びボイド下部のコンクリートを事前に乾燥炉に入れることによって意図的に著しく水分量を低下させた試験体を作成し、加熱実験を実施した。加熱方法は 2. 2 と同様に図 4 に示す小型炉を用いて実施した。

3. 1 試験体概要

試験体の寸法は実験Ⅰと同様にボイド一個分のサイズ (200×200×240mm) とした。ボイドの下部分 (下部コンクリート) とそれ以上の部分 (上部コンクリート) を別々に打設し、脱型後モルタルにより接着して試験体を作製した。試験体に使用したコンクリートの材料を表 1 に、調合を表 4 に示す。粗骨材は施工性を考慮して寸法 5～10mm のものを使用した。ボイド部が中空の試験体に関しては、コンクリート打設後に EPS を取り除くことにより作製した。ボイド空間からの熱の伝わりを含めた伝熱性状を確認するため、熱電対を図 10 に示す①～⑦の位置、及び加熱面に設置した。

試験体一覧を図 11 に示す。下部コンクリートの乾燥状態、及びボイド部の状態 (中空、中空+エポキシコーティング、EPS)、並びにボイド内部の水分状態を変更した計 6 種類とした。下部コンクリートが気乾状態の試験体に関しては、養生後、温度 20℃、相対湿

表 4 コンクリートの調合

W/C	細骨材率	単位量(kg/m³)				混和剤	空気量
		W	C	S	G	C×(%)	
%	%						%
60	40.2	163	272	738	1123	1.0	4.5

図 10 温度測定箇所及び試験体概要図

度 60%の環境下に静置し、絶乾状態の試験体に関しては、養生後、105℃乾燥炉に重量減少が無くなるまで置いた。「絶-中コ水」のボイド内部水分に関しては、下部コンクリートの絶乾前後の重量の差分より算定し、水を入れたチャック付プラ袋をボイド内部に設置することによって模擬した。

3.2 実験Ⅱにおける結果及び考察

試験体「絶-中コ水」、「気-E」及び「絶-E」の①～⑦の位置における温度の経時変化をそれぞれ図12、図13及び図14に示す。

ア)ボイド上方部分(③, ⑦)における温度履歴

いずれの試験体においてもボイド部上端にあたる③と⑦で同様の温度履歴を示した。

イ)ボイド側面部分(⑤, ⑥)における温度履歴

ボイド内部にEPSが含まれている試験体「気-E」及び「絶-E」においては⑤が先に昇温し、その後⑥で遅れて昇温するという経過をたどるのに対し、図12に示すように、ボイド内部にEPSが含まれていない試験体「絶-中コ水」においては⑤、⑥が同時に昇温し、その後加熱面に近い⑤の温度がより高くなるという経過をたどった。これは、EPSによってボイドより上方のコンクリートの伝熱が抑制されていること、またEPSの溶融に伴いボイド部より上方のコンクリートへの伝熱がボイド部を介して進展することを示す。

ウ)ボイド部下端(①)及びボイド内部(②)における温度履歴

各試験体のボイド部下端(①)及びボイド内部(②)における加熱開始0～180分の温度の比較を図15に示す。ボイド部下端(①)においては、下部コンクリート及びボイド内部に水分を有する試験

体「気-中コ」、「絶-中コ水」及び「気-中、気-E」では、加熱開始より30分後辺りで温度上昇が緩やかになるのに対し、下部コンクリート及びボイド内部に水分を含まない試験体「絶-中コ」及び「絶-E」では、温度上昇が緩やかになることなく上昇している様子が見て取れる。ボイド内部(②)においては、ボイド内部に水入れた試験体「絶-中コ水」及び下部コンクリートが気乾でボイド内部にEPSがある試験体「気-E」の試験体で温度の上昇が停滞している様子が確認できた。「気-中コ」と「気-中」の測定結果を見比べると、エポキシ樹脂を塗布した「気-中コ」の方がボイド部下端(①)とボイド内部(②)において温度の上昇が少し遅いことが確認され、エポキシ樹脂のコーティングによってボイド内部に若干水分が留まりやすくなっていたと考えられる。しかし、ボイド内部(②)における差はその他の試験体と比べると小さく、エポキシ樹脂コーティングの与える影響は比較的小さいと考えられる。ボイド内部にEPSを設置した試験体「気-E」及び「絶-E」においては、加熱開始より120分頃に温度が一時的に降下したが、EPSが上部コンクリートとの界面で

図13 試験体「気-E」における温度履歴

図14 試験体「絶-E」における温度履歴

-----:コーティングを施した箇所
※気:コンクリートを気中で乾燥とした。絶:下部コンクリートを絶乾とした。E:ボイド部分にEPSがある。
中:ボイド部にEPSがない。コ:ボイド側面及び上面部をエポキシ樹脂でコーティング。
水:ボイド部分に水入りのチャック付プラ袋を設置

図11 試験体概要(実験Ⅱ)

図12 試験体「絶-中コ水」における温度履歴

ボイド下端(①)

ボイド内部(②)

図15 ①及び②における各試験体の温度履歴

剥がれ落ち、上部コンクリートへの熱の移動量が急激に上昇したためと考えられる。

以上、ア)、イ)及びウ)より、ボイド内部において 100℃で停滞する要因は、主として水分の蒸発潜熱の影響であると言える。ただ、実際に 100℃で停滞する試験体は、下部コンクリートからボイド内部へ流入する熱量の関係から EPS によってボイド空間に熱が留まる試験体「気-E」のみであった。

ボイドスラブの伝熱性状を考える上では、コンクリート中の水分による潜熱、及び EPS の熔融を含めたボイド空間における伝熱を考慮する必要があると言える。

4. 温度解析

実験Ⅰ及び実験Ⅱにおける結果及び考察より、ボイドスラブにおける熱伝導には、コンクリート内部の水分の潜熱、並びに EPS の低い熱伝導率及び熔融の影響が大きいことが確認された。ボイドスラブの熱伝導解析は既往の研究で実施されている^{3) 4)}ものの、EPS の熔融は考慮されていない。そこで、水の潜熱、及び EPS の熔融を考慮した解析モデルを検討してボイドスラブの温度解析を行った。

4.1 解析モデルの概要

本論では図 16 に示すように、ボイドを含む部分 (A) とそれ以外の部分 (B) の 2 つに分けて、それぞれ一次元に簡略化したモデルを用いて差分法で解析を行った。A はコンクリート、空気及び EPS の 3 要素で構成され、B はコンクリート要素のみで構成されている。

図 16 解析モデル概要

EPS は実際の形状では下部コンクリートとも接しているが、EPS の主な影響は、裏面側のコンクリートへの伝熱を抑制すること、及びボイド内部に熱を蓄積することと考え、本解析モデルにおいては、図 16 に示すように、EPS は下部コンクリートとは接さず、加熱面からの熱伝導は空気要素を通して行うこととした。

要素 1 つの基本的な層の厚さ (Δx) を 5mm とし、第 i 層 (温度 T_i , 熱伝導率 λ_i , 密度 ρ_i , 比熱 C_i) における微小時間 Δt の温度上昇 ΔT_i を式(1)より算出した。

$$\Delta T_i = \frac{\lambda_i (T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1})}{C_i \rho_i \Delta x^2} \cdot \Delta t \tag{1}$$

表 5 に解析に用いた主要な物性値及び特性値を示す。

コンクリートの物性値については、比熱、熱伝達率及び熱伝導率は「コンクリート標準示方書」⁵⁾に示されている値を基本とした。コンクリートは、絶乾時には熱伝導率が低くなることが知られており、熱物性に関しては「建築材料の熱・空気・湿気物性値」⁶⁾を参考に、本論文では表 5 の通りとした。また、コンクリートの含有水分は移動せず、100℃で蒸発し、水分がある場合は温度上昇しないと仮定した。気乾状態の含水率は 5%、絶乾状態では 0%とし、微小時間 Δt の間に第 i 層において蒸発する水分量 ΔW_i は、水分の蒸発潜熱を q_w として式(2)の通りとした。

$$\Delta W_i = \frac{\lambda_i (T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1})}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta t}{q_w} \tag{2}$$

EPS 要素に関しては EPS のガラス転移点が 100℃であることから、100℃以上の温度で EPS の変形が発生していると考えられるが、ガラス転移点以後の変形は考慮せず、熔融温度である 230℃を超えた時点で熔融することとし、以後、空気要素として扱うこととした。

空気要素に関しては、実験Ⅰの結果よりボイド内部における温度勾配が殆どないことから、対流によってボイド内部温度が一定となっていると仮定し、要素数を 1 とした。空気層が厚い場合、対流の影響が大きくなると予想され、ボイド内部の熱伝導は主に空気の

図 17 解析モデルにおいて用いた加熱温度

表 5 解析に用いた物性値一覧

要素		物性値					その他の特性値
		比熱 J/kgK	密度 kg/m³	熱伝導率 W/mK	要素厚さ mm	要素疑似体積 (×10³) mm³	
コンクリート	気乾	1155	2160	2.7	Δx	5	水分潜熱量 : 2255.2[kJ/kg] 初期含水率 : 5(気乾)、0(絶乾) [%]
	絶乾	1155	2000	1.5			
空気	EPS 要素消失前	1006	1.2	-	116	16.65	熱伝達率 : 13[W/m²K]
	E1 消失後				119	19.70	
	E1, E2 消失後				120	22.76	
	E1, E2, E3 消失後				121	25.81	
	E1, E2, E3, E4 消失後				120	28.86	
EPS		1255.2	20.1	0.035	Δx	5	熔融温度 : 230[℃]
加熱面		-	-	-	-	-	熱伝達率 : 37.5[W/m²K]
裏面		-	-	-	-	-	熱伝達率 : 13[W/m²K]

対流によって行われていると仮定し、本解析モデルにおいてはボイド内部の輻射を考慮せず、熱伝達率は「コンクリート標準示方書」⁵⁾を参考に $13\text{W/m}^2\text{K}$ とした。空気要素の厚さ Δx_i (mm) は疑似的に「ボイド体積/ボイド部分底面積」とした。また、ボイド体積は実際に用いた EPS ボイドより算出した。

加熱温度は、図 17 に示す通り、加熱過程では ISO 834 に規定されている標準加熱温度曲線とし、冷却過程では既往の耐火試験¹⁾で得られた加熱面温度の実測値とした。裏面の熱伝達率に関しては、「コンクリート標準示方書」⁵⁾を参考に $13\text{W/m}^2\text{K}$ とした。加熱面の熱伝達率に関しては、自然対流熱伝導率は表面と流体の温度差の $1/4$ 乗に比例することが知られている⁷⁾ことから、本解析モデルにおいては「コンクリート標準示方書」⁵⁾における熱伝達率の値に 2.88 を乗じ、 $37.5\text{W/m}^2\text{K}$ とした。なお、2.88 は $13\text{W/m}^2\text{K}$ における温度差を 5°C とし、加熱面における温度差を試験体「気-E-1」において測定した加熱時の加熱温度及び加熱面温度(加熱面から 15mm および 35mm 離れた位置におけるコンクリート内部温度(a, b)の直線近似より算出)より、 $(\text{加熱温度}-\text{加熱面温度})^{0.25}/5^{0.25}$ として算出した。

A と B において、それぞれで差分法により解析を行った後、A と B の間で熱をやり取りし、各時間における最終的な温度を求めた。実験 I の試験体「気-E-3/4」で観察されたように、ボイド部における EPS は、加熱面側から溶融し、加熱開始より 75 分経過後には、ボイド内部の上半分の EPS の外周厚さが約半分になり、ボイド内部の下半分の EPS が溶融していることが、図 9 より確認できる。また、実験 II の試験体「気-E」及び「絶-E」における③、⑤、⑥及び⑦の温度履歴を観察すると、ボイド側面部の下の方(⑤)では、ボイド内部温度(②)の温度上昇が緩やかになり始める加熱開始より 40~60 分後に変曲点があり、温度が急上昇するのに対し、ボイド側面部の上の方、及びボイド上端部(③、⑥、⑦)においては、加熱開始より 100~110 分後に変曲点が存在している。ボイド部と周辺コンクリートとの熱のやり取りは、EPS 溶融初期においては、ボイド部の下の方で始まり、EPS がほとんど溶融した後に、ボイド部の上の方においても熱の交換が開始されると考えられる。

以上のことから、空気要素側の EPS 要素 2 つが溶融した後に、図 18 に示すように、A の空気要素と B の側面部下方のコンクリート要素との間で熱の交換を開始し、EPS 要素 4 つ全てが溶融した後に、A の空気要素と B の空気要素に接する側面部コンクリート要素

図 18 解析モデルにおける EPS 要素の溶融と熱交換

との間で熱交換を行うように設定した。

コンクリート要素間の熱交換の計算の際には、図 19 に示すように、A から B への熱流束及び接触面積を A 及び B の温度勾配と熱伝導率より算出し、第 i 層において Δt の間に A から B へ

$$Q_{A \rightarrow B, i} = q_{A \rightarrow B} S_{AB} \Delta t \quad (3)$$

の熱量が移動するとし、熱交換後の第 i 層における A 及び B の温度は、それぞれ以下の式で算出した。

$$T_{A, i} = T_{A, i} - \frac{Q_{A \rightarrow B, i}}{C_{A, i} \rho_{A, i} V_{A, i}} \quad (4) \quad T_{B, i} = T_{B, i} + \frac{Q_{A \rightarrow B, i}}{C_{B, i} \rho_{B, i} V_{B, i}} \quad (5)$$

A の空気要素と B のコンクリート要素との間の熱交換の計算の際には、AB 境界における空気要素の温度を図 19 に示すように設定し、A の空気要素から B のコンクリート要素への熱流束を求め、空気要素から第 i 層のコンクリートへ

$$Q_{A \rightarrow B, i} = q_{A \rightarrow B, i} S_{AB} \Delta t \quad (6)$$

コンクリート要素間の熱交換

空気要素-コンクリート要素間の熱交換

図 19 解析モデルにおける熱交換概要

図 20 ボイド内部(②)及び裏面(④)における温度履歴(実測値)

図 21 ボイド内部(②)及び裏面(④)における温度履歴(解析値)

の熱量が移動するとし、熱交換後の空気要素及び第 i 層における B の温度はそれぞれ以下の式で算出した。

$$T_A = T_A - \sum_{i=15}^{n+15-1} \frac{Q_{A \rightarrow B,i}}{C_o \rho_o V_o} \quad (7) \quad T_{B,i} = T_{B,i} + \frac{Q_{A \rightarrow B,i}}{C_{B,i} \rho_{B,i} V_{B,i}} \quad (8)$$

4.2 解析結果

実験Ⅱにおいて使用した試験体「絶・中コ水」、「気-E」及び「絶-E」に関して、ボイド内部（②）及び裏面（④）の温度の実験結果と解析値を図 20 及び図 21 に示す。なお、試験体「絶・中コ水」に関しては、空気要素において、含有水分が 100℃まで上昇した後に、下部スラブの空気要素に接するコンクリート要素において潜熱が発生するように設定した。

消失前後の温度履歴が実験値と異なるが、コンクリート中の水分及びボイド部の EPS の有無を変化させた場合、解析値と実験値で温度履歴は同様の傾向を示していることが確認された。下部スラブに水分潜熱を設定することによって、加熱より 60 分の間に発生するコンクリート水分の影響による温度上昇の違い、及びボイド内部温度が 100℃で停滞する現象をほぼ再現できた。試験体「絶・中コ水」においては、実験値と比べてボイド内部温度が低くなる傾向を示したが、これはボイド内部の水分の温度上昇と水蒸気への相変化を潜熱として設定しているため、水分からボイド部への熱伝導を考慮できていないことが原因と考えられる。

加熱より 60 分以後は EPS 要素の熔融等が発生するようになるが、実験結果と比較すると、解析においてはボイド内部温度の上昇が急激となり、裏面温度の上昇は遅くなる傾向を示した。これは、解析モデルにおいては、EPS の消失を融点である 230℃になった時点と設定しているが、実際には、ガラス転移点である 100℃に到達した以降において EPS の熱伝導率及び体積が変化するため、EPS の物性値の変化を考慮できていないことが原因として挙げられる。また、気化した水分がボイド内部に留まり、ボイド内部の熱伝達に影響を与えていることも考えられ、試験体「絶・中コ水」においては、その影響によって裏面温度の温度履歴に差が出ていると考えられる。

5. まとめ

EPS の有無、及びコンクリートの水分量等の条件を変更した EPS を内包するボイドスラブに対して、加熱実験を実施し、また、実験結果を基にコンクリート内部の水分潜熱、及び EPS の消失を組み込んだ一次元の差分法モデルを用いて、ボイドスラブの熱伝導解析を実施し、以下の結論を得た。

- ボイドスラブの一部を切り出した試験体においても、耐火試験と同様の伝熱性状が得られることが確認された。
- ボイド内部において EPS の燃焼反応は発生しておらず、ボイドスラブの伝熱性状には EPS の断熱性、透湿性及びコンクリート中の水分の蒸発潜熱が影響することが確認された。
- ボイドスラブの伝熱性状を考える上で、コンクリート中の水分による潜熱、及び EPS の温度による熔融を含めたボイド空間における伝熱を考慮する必要がある。

- コンクリート内部の水分潜熱、及び EPS の消失を組み込んだ一次元の差分法モデルによって、ボイドスラブにおける熱伝導をある程度再現することが可能であることが確認された。

解析モデルの精度を向上させるために、ボイド内部の EPS の物性変化、及び水分の移動に伴う熱移動の影響をモデルに組み込むことが今後の課題として挙げられる。

また、本解析モデルによって、ボイドスラブの耐火性能が予測可能であり、耐火性能の審査のための性能評価機関による実大規模の実験実施を軽減することに有効であると考えられる。

謝辞

試験体作製及び実験実施に際し、東京大学の田村政道氏、棚池裕氏、松本悠実氏、中田清史氏、田中義起氏らの協力を得た。記して謝意を表す。

記号	添字
T	i : 第 i 層の要素
λ	o : 空気要素
C	A : A の要素
ρ	B : B の要素
Δt	
Δx	
V	
q_w	
$Q_{A \rightarrow B}$	
$q_{A \rightarrow B}$	
S	
S_{AB}	

参考文献

- 1) 野口貴文, 西尾悠平: ボイドスラブの耐火性能評価試験に対する考察, その 1. モデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp. 221-222, 2012. 8
- 2) ISO834-1: Fire-resistance tests-Elements of building construction-, Part1 General requirements, 1999
- 3) 佐藤眞一郎, 王徳東, 小山正豪, 鍵谷勝, 渡辺栄一, 李宇光, 平島岳夫, 上杉英樹, 野口貴文: ボイドスラブの載荷加熱試験に関する数値解析 その 1, 載荷加熱試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 61-62, 2005. 9
- 4) 王徳東, 佐藤眞一郎, 小山正豪, 鍵谷勝, 渡辺栄一, 李宇光, 平島岳夫, 上杉英樹, 野口貴文: ボイドスラブの載荷加熱試験に関する数値解析 その 2, 数値解析 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 63-64, 2005. 9
- 5) 土木学会, コンクリート委員会: コンクリート標準示方書[設計編], pp. 332-343, 2007
- 6) 日本建築学会: 建築材料の熱・空気・湿気物性値, pp.10-14, 2003
- 7) 田中俊六, 武田仁, 岩田利枝, 土屋喬雄, 寺尾道仁, 秋元孝之: 最新 建築環境工学[改訂 4 版], pp. 181-199, 2014

A STUDY ON HEAT TRANSFER OF VOID SLAB INCLUDING EPS UNDER FIREPROOFING PERFORMANCE

Yuhei NISHIO *, *Takafumi NOGUCHI* **, *Yasuhiro ODA* ***
and Hisayuki MUTO ****

* Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science, Dr. Eng.

** Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

*** Penta-Ocean Construction Co., Ltd., Building Construction Business Planning Division

**** TOKYO KOGYO BOYEKI SHOKAI, LTD., Technical & Installation Div.

Heat transfer at void slab under fireproofing performance was unknown in detail. To clear the mechanism of that makes us evaluate the fire performance of void slab by calculating. At the existing fireproof test report about void slab, it indicates that void affect heat transfer for some reason. To reveal the heat transfer mechanism of void slab, authors conducted two experiments like fireproof test on pieces of void slab.

At the chapter 2, the authors confirm what happened in void during the fire by using the piece of void slab which has fireproof glass on a lateral side to observe void slab's inside as the first experiment. There are 4 specimens, which are void slab with EPS and fireproof glass, void slab with fireproof glass, void slab with EPS and slab without void. It revealed that EPS included in the void was not burning but gradually melting during the fireproof test and that EPS and water included in concrete has some relationship with heat transfer at void slab.

At the chapter 3, the authors check the impact of water included in concrete and EPS included in void slab on heat transfer at void slab by using pieces of void slab, included water and included EPS of which and water permeability in the void are controlled by drying concrete, taking EPS away from the void and coating epoxy resin on the surface of the void as the second experiment. It revealed that latent heat of water included in slab and thermoplastic and thermal insulation properties of EPS included in void were major impacts on heat transfer at void slab.

At the chapter 4, the authors make the heat transfer calculating model about void slab with consideration of latent heat of water and melting of EPS by using finite difference method. The model was mainly divided into two parts, one of which is consisted of concrete, void and EPS, and the other of which is consisted of only concrete. Basically, two parts are calculated individually, but heat transfer between the two parts gradually occurred with EPS melting. In this model, wet concrete has latent heat of water and heat absorption happens when temperature on concrete over 100°C and dried concrete has no latent heat of water. The authors set that EPS has melting point on 230 °C and positons of EPS become position of void after EPS melt. The authors applied this model for the test specimens used in the chapter 3 and it revealed that calculating heat transfer at void slab by finite difference method matched results of the experiment to some extent.

As a result, the author revealed how to transfer heat on void slab by conducting the experiment imitating fireproof test and that the calculation method based on the experiments matched results of the experiment to some extent.

(2016年9月10日原稿受理, 2017年3月23日採用決定)