屋根防水層のふくれに及ぼす下地コンクリートの要因

屋根防水層のふくれ現象のメカニズムに関する研究・その1

INFLUENCE OF PROPERTY OF CONCRETE SUBSTRATE ON
BLISTERING OF MEMBRANE ROOFING

Study on blistering mechanism of membrane roofing—Part 1—

橋田 浩*, 田中享二**, 小池迪夫***

Hiroshi HASHIDA, Kyoji TANAKA and Michio KOIKE

This paper describes experimental and numerical investigations on pressure generation between membrane roofing and concrete substrate, in order to understand quantitatively the influence of property and moisture condition of concrete on blistering problem, which is one of the most common failures of membrane roofing. An air and water-vapor pressure in a void between concrete and a tight surface cover at elevated temperature was measured and a pressure diffusive equation in concrete for numerical analysis was derived. From both experimental and numerical results, it was proved that main factors of concrete substrate on the blistering pressure are moisture condition relating to water-vapor pressure and air-permeability. A numerical simulation of the blister growth presented has made clear that the numerical method proposed in this paper is useful for quantitative discussion on the blistering problem of membrane roofing.

Keywords : blister, membrane roofing, concrete, moisture, air-permeability, pressure

1. 序

屋根防水層のふくれは、アスファルト、シート、塗膜を問わず、実際の建築物に多発する欠陥のひとつであり Photo.1, ユーザーサイドからのクレームは非常に多い。ふくれは漏水に直結する現象とはいえないが、現実問題として美観をそこない、さらに防水層の劣化を促進する。そのため、その防止は重要な課題といえる。

しかしながら、ふくれには、下地コンクリートの水分状態、防水層と下地の接着、プライマー等の揮発性溶剤、防水層自身の変形特性、環境温度条件など、様々な要因が複雑に絡んでおり、その発生、成長メカニズムについては、いまだに未解明な部分が多い。そのため、問題の古さにもかかわらず、ふくれの明確な防止対策がないのが現状である。ふくれ対処防水工法としては、ふくれを生じさせる圧力を分散させるために防水層を絶縁工法あるいは点張り工法にする、圧力を抜いてしまう脱気工法にする等が行われている。しかし、その信頼性もあいまいなままであり、なんらかの理由でべた張りにしなければならぬ場合も少なくない。本研究は、以上の背景から、屋根防水層のふくれ現象のメカニズムを工学的に解

明することを目的としている。

ふくれに関してはいくつかのレポート^{4)~12)}があり、共通して、ふくれに影響する主要因として下地コンクリートの水分を指摘している。下地の含水量が多ければ、日射により水蒸気圧が上昇しふくれが生じやすくなること、さらに、防水層の下地に対する接着力の低下も予想されるからである。また、小池¹³⁾は空気熱膨張圧と水蒸気圧ならびに下地コンクリートの透気性を考慮するこ

Photo.1 Blister of bituminous built-up roofing membrane

本論文は、文献1)~3)に発表した内容を修正、加筆したものである。

* 東京工業大学工業材料研究所 助手

** 東京工業大学工業材料研究所 助教授・工博

*** 東京工業大学工業材料研究所 教授・工博

Research Associate of Tokyo Institute of Technology
Associate Prof. of Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Prof. of Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

とにより、ふくれが成長する過程を定性的に説明している。しかしながら、ふくれ状況と下地コンクリート状態の関係についての定量的な検討はほとんどなされていない。これには、ふくれの発生、成長を実験的に検証することが非常に困難であることが主要因として挙げられる。そこで本報では、まず、防水層と下地コンクリート境界の小容積空間に生じる圧力（以下、ふくれ圧力と呼ぶ。）を模擬試験体を用いて測定することにより、ふくれ圧力と下地コンクリート状態の関係について検討する。次に、このふくれ圧力の数値シミュレーションにより、ふくれ圧力に及ぼす下地コンクリートの要因およびふくれ圧力の発生メカニズムを明確化する。そして以上の結果を基に、ふくれ圧力がふくれ容積を拡大する機構を考慮して、ふくれの成長メカニズムについて基礎的な検討を加える。

2. 模擬試験体によるふくれ圧力測定

2.1 実験概要

2.1.1 下地コンクリート

コンクリートは水セメント比を 45, 60, 75 % の 3 種

Table 1 Mix proportions of concrete specimens

W/C (%)	Unit weight (kg/m ³)				Fine aggregate percentage
	Water	Cement	Sand	Gravel	
45	205	456	640	1047	38.4
60	195	325	772	1047	42.9
75	193	257	866	1015	46.5

Designed air content is 1 %, designed slump 18 cm and max. aggregate size 20 mm for all specimens.

Photo. 2 Concrete specimen cast in a mold

Fig. 1 Specimen for measurement of pressure increase in the studied void

類とし、スランプ 18 cm を目標に Table 1 に示す割合とした。コンクリートは、内径約 15 cm, 高さ 15 cm のプラスチックシリンダーに打設した。打設する際、Photo. 2 に示すように、円筒形の容器と金属棒を用いてコンクリートの表面に直径 38 mm, 深さ 25 mm の穴とそれにつながる貫通孔を設けるようにした。コンクリート硬化後それらを取り除き、ふくれ圧力測定の際にその穴はふくれの模擬空間となり、貫通孔は空間内の温湿度を測定するセンサーを挿入するために用いられる (Fig. 1)。実際のふくれは下地コンクリート面上に生じるものであるが、ここでふくれ模擬空間をコンクリート表層の穴としたのは、コンクリート面上に空間を作製するよりも、コンクリート層からの水分気化の影響が顕著であり、かつ、より安定した湿度測定が可能であると考えられるためである。

コンクリートは打設後 1 日で脱型し、4 週間水中養生とした。水中養生としたのは、次に述べる乾燥条件との組み合わせで、できるだけコンクリートの含水量を幅広く設定するためである。

2.1.2 コンクリートの乾燥条件

上記の養生後、コンクリートは Table 2 に示す種々の方法により乾燥させた。A の乾燥方法は下面からの乾燥がないコンクリートスラブを想定し、20°C, 40 % RH の環境でコンクリートの上面からのみ乾燥させるものであり、A-1, A-2 は乾燥期間により含水量が異なる。この際、コンクリート表層全体の乾燥状態がより均一となるように、ふくれ模擬空間上部のみアクリル板で封かんし、空間内部は外気に直接触れないようにした。また、通常的一面乾燥では非常に長期間でなければコンクリート内部まで乾燥が進行しないことから、B-1 の方法は、短期間でコンクリート全体がある程度均一に乾燥するように、105°C のオーブンで全面乾燥したのち、内部湿度がほぼ均一となるように封かん状態で約 2 カ月置くものである。また、B-2 はオーブンで絶乾としたものである。表には、コンクリートの含水状態の目安として、ふくれ

Table 2 Dried conditions of concrete specimens

W/C (%)	Conditioning	Relative humidity (%)	Effective porosity (%)
45	A-1	97	0.5
	A-2	72	2.0
	B-1	70	8.2
	B-2	0	15.1
60	A-1	97	0.7
	A-2	75	3.4
	B-1	77	9.1
	B-2	0	16.0
75	A-1	97	2.2
	A-2	76	5.7
	B-1	72	11.7
	B-2	0	16.9

All specimens were cured in water for 4 weeks before conditioning by the following A or B.

A: Drying in air at 20°C and 40% RH
from upper surface.
B: Oven drying at 105°C
from all the surfaces.
*: RH in the studied void at 20°C.
**: $\frac{\text{Volume of water lost}}{\text{Volume of concrete}}$

圧力測定時におけるふくれ模擬空間の室温 (20°C) での相対湿度, および飽水状態から減少した水分量を気相の空げき量として考えた時のコンクリート容積に対する空げき量の割合を示している (以下, これを有効気相空げき率と呼ぶ)。ふくれ模擬空間の湿度が同じ 70 %RH 程度でも, オープンにより乾燥したものの方がよりコンクリート全体の水分量が少ない。

2.1.3 圧力測定用試験体

所定の乾燥を終了したコンクリートは, 裏面に熱電対をてん付したアクリル板をふくれ模擬空間上部に取り付け, 側面および上面をエポキシ樹脂でコーティングした。2 日間封かん状態を保った後, Fig.1 に示すように, 水銀マノメータ (内径 0.5 mm) および湿度・温度計 (Vaisala 社製) を取り付け, 実験に供した。湿度・温度計の湿度センサー部は静電容量式薄膜センサーであり, 温度センサーは Pt 100Ω である。湿度センサーは飽和塩を用いた校正器で適時校正した。

2.1.4 加熱および測定条件

赤外線ランプを用いた加熱装置により, 作製した試験体の上部面を加熱し, 温度上昇に伴うふくれ模擬空間内部の圧力上昇および温湿度変化を測定した。この際, 試験体の側面は断熱材により囲い, 側面からの放熱を少なくした。実験では, 熱電対による測定温度である, ふくれ模擬空間上部を 20°C から 60°C まで 1 時間で上昇させ, さらに 1 時間 60°C に保った後, 加熱を停止した。60°C は実際の露出形黒色防水層一地下コンクリート境界に生じる最高温度に近いものと考えられる。また, ふくれ模擬空間の圧力はマノメータで 5 分ないし 10 分間隔で読み取るようにし, 測定値は大気圧との差圧とした。

2.2 実験結果

Fig.2 にふくれ模擬空間の温度変化の例を示す。熱電対と湿度・温度計の両測定値を示しており, 前者は測定空間の最上部, 後者は下部の温度を意味している。実験に供したすべての試験体において, ふくれ模擬空間内の温度変化は Fig.2 に近いものであった。

Fig.3 は, 各試験体におけるふくれ模擬空間内の圧力

Fig.2 Temperature changes in the studied void

上昇と相対湿度変化の結果を示している。相対湿度変化は各乾燥条件における試験体の代表的な一例を示しており, それぞれの条件内では他の試験体の結果もほぼそれに準じていた。絶乾状態である B-2 を除く各試験体において急激な温度上昇にもかかわらず相対湿度低下が小さいことから, コンクリートからふくれ模擬空間への放湿が顕著であり, 水分気化による水蒸気圧の上昇が大きいことが分かる。

乾燥条件 A-1 のコンクリートは 40 %RH (20°C) の環境で 2~3 日間, 一面乾燥したものであり, ふくれ模擬空間の相対湿度が 97 %RH, 内部は飽水状態に近い。これらの試験体では, ふくれ模擬空間の圧力上昇は非常に高い。また, A-2 のそれらは, 同様の乾燥を 4~5 カ月継続し, ふくれ模擬空間内の相対湿度が 70 %RH 程度になった時の結果であり, 圧力上昇は A-1 に比べ, やや低いものとなった。一方, 乾燥条件 A に比べ, オープンで乾燥した条件 B のコンクリートは圧力上昇はかなり小さくなり, 絶乾のコンクリートではいずれの水セメント比においても極端に小さい。これらの結果は, ふくれ模擬空間の相対湿度より, むしろ, コンクリート全体の水分量がふくれ圧力と密接な関係にあることを示している。

また, 条件 A では水セメント比による圧力上昇の差異はほとんどないが, 条件 B では, $W/C=75\%$ の試験体に発生する圧力が最も小さく, かなり乾燥が進んだ場合には水セメント比による影響が現れるものと思われる。

3. コンクリートの圧力逸散を考慮しない場合のふくれ圧力

Fig.3 中の破線は, ふくれ模擬空間の圧力上昇にもかかわらず空間内の空気がコンクリート中へ全く逸散しないと仮定した場合の圧力変化を示している。つまり, 完全な定容積空間での空気の熱膨張圧と水蒸気圧の上昇分の合計値の変化を示している。熱膨張圧は熱電対と湿度・温度計による空間上下部の測定温度の平均温度から, また, 水蒸気圧は湿度・温度計による空間下部の相対湿度と温度の測定値から求めている。それぞれの乾燥条件内ではこの値もほぼ同一となるので一例のみを示している。

この値と乾燥条件 A における測定値はかなり近く, ふくれ圧力は熱膨張圧と水蒸気圧の上昇分であるとみなせるのがわかる。しかし, 乾燥条件 B では, 測定値とは大きな差があり, 圧力の一部がコンクリート中へ逸散していることが明らかである。このように, 乾燥条件によっては, コンクリートの圧力逸散を考慮しなければふくれ圧力状況を説明できない。今回の実験で用いたコンクリートは水中養生 4 週後の乾燥としているのに対し, 実際のコンクリートスラブは打設後から気中養生に近い状

Fig.3 Measured pressure increase and relative humidity in the studied void

態で乾燥が進むことから、ふくれ圧力のコンクリート中への逸散は無視できないと想定され、ふくれを論ずるうえでの重要な因子と考えられる。

4. コンクリートの圧力逸散を考慮した場合のふくれ圧力

4.1 基礎理論

コンクリート空げき中のある温度における湿り空気の圧力を乾燥空気分圧と水蒸気分圧に分けて考えれば、

$$P = \frac{P_0}{\rho_0 T_0} \rho T + P_v \quad (1)$$

となる。ここで P は全圧、右辺第一項は乾燥空気分圧で ρ は乾燥空気密度、 T は絶対温度であり、 P_v は水蒸気分圧である。また、添字の 0 はそれぞれの初期値を意味し、 P_0 は全圧の初期値であるが、初期温度が 20°C 程度であれば乾燥空気分圧の初期値とみなせる。

温度が上昇し、空気の圧力が高まり、ダルシー流れに従って、浸透するとすれば、

$$v = -(k/\mu) \text{grad } P \quad (2)$$

である。ここで v は流速 (m/s), k は透気係数 (m^2), μ は空気粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), P は圧力 (Pa) である。

また、コンクリートの有効気相空げき率を ϵ とすれば、流体の連続方程式は次式となる⁽⁴⁾。

$$\epsilon \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(\rho v) \quad (3)$$

ここで ρ は湿り空気の密度であるが、空気中の水蒸気重量はごくわずかであり、先の乾燥空気の密度と同じものと近似できる。

以上3式より、

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{P_0 k T}{\rho_0 \epsilon T_0} \text{div} \frac{\rho}{\mu} \text{grad} P + \frac{P_0 \rho}{\rho_0 T_0} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial P_v}{\partial t} \quad (4)$$

となる。(4) 式の右辺第二項は温度変化に伴う空気の熱膨張圧の変化を示している。ここで、温度変化およびそれに伴う空気の粘性係数の変化、空気密度の変化が第一項の係数変化に与える影響が小さいと考えれば、次の近似式が得られる。

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{P_0 k}{\epsilon \mu} \text{div grad} P + \frac{\partial P_a}{\partial t} + \frac{\partial P_v}{\partial t} \quad (5)$$

ここで、 $\partial P_a / \partial t$ は熱膨張による圧力変化を表す。したがって、コンクリート空げき中の圧力変化は熱伝導や濃度拡散と相似の関係となり、圧力の逸散性つまり拡散係数はコンクリートの透気係数および有効気相空げき率により定まる。

4.2 コンクリートの透気係数および有効気相空げき率の測定

4.2.1 透気係数および有効気相空げき率測定用試験体

コンクリート試験体の水セメント比、調合条件および養生条件はふくれ圧力測定実験と同様である。ただし、試験体の大きさを考慮し、粗骨材の最大寸法は 15 mm とした。試験体は直径 15 cm, 厚さ 5 cm とし、試験体の乾燥途中の内部中心湿度を測定するために、湿度測定用の試験体を別途作製した。試験体の外観を Fig. 4 に示す。

4.2.2 透気試験

試験体は水中養生終了後、円筒側面をシールし、20°C, 40 % RH の環境下で両面から乾燥させた。内部相対湿度を測定しながら、所定の乾燥が進んだ時点で同条件の試験体の中から 3 体を取り出し、重量減少から有効気相

Fig. 4 Specimens for air-permeability test

Fig. 5 Equipment for air-permeability test

Fig. 6 Relations between air-permeability and relative humidity in concrete

Fig. 7 Relations between air-permeability and effective porosity of concrete

空げき率を求め、透気係数を測定した。また、養生終了後、オープンで絶乾とした試験体の測定も行った。

透気試験は Fig. 5 に示す装置を用いて行った。載荷圧力は $12 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($=1.2 \text{ kgf/cm}^2$ 、大気圧に対する相対的な圧力増加は $2 \times 10^4 \text{ Pa}$) とした。これは、ふくれ模擬空間内の最高測定圧力にほぼ等しくなるように定めたものである。透気係数は、ダルシーの式に空気の圧縮性を考慮し、定常流の透気量を測定することにより、次式から計算した^{14)~16)}。

$$k = \frac{2 d \mu P_2 Q}{(P_1^2 - P_2^2) A} \dots \dots \dots (6)$$

ここで k は透気係数 (m^2)、 d は試験体の厚さ (m)、 Q は透気量 (m^3/s)、 P_1 は載荷圧力 (Pa)、 P_2 は大気圧 (Pa)、 A は透気面積 (m^2)、 μ は空気の粘性係数 ($=1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) である。

4.2.3 コンクリートの透気係数および有効気相空げき率

試験体の内部中心湿度と透気係数の関係を Fig. 6 に示す。乾燥の尺度としてコンクリートの内部中心湿度(コンクリート全体の平均湿度に近い値と考えられる¹⁷⁾)を考えると、コンクリートの透気性はコンクリートの乾燥に伴い、また、水セメント比の増大に伴い大きくなるのが分かる。

次に、Fig. 7 に有効気相空げき率と透気係数の関係を示す。実線は水セメント比 45 および 60 % の中心傾向を、破線は水セメント比 75 % のそれを示している。コンクリートの透気性は、内部空げきがどの程度水分で密閉されているかによって左右されることから、有効気相空げき率でかなり決まることが報告されているが¹⁷⁾、本実験結果からも、水セメント比 75 % の高空げき率の場合にやや傾向が異なるものの、水セメント比にかかわらず透気係数は有効気相空げき率に強く依存する。水セメント比 75 % の傾向がやや異なるのはコンクリート内部空げき状態の差異によるものと思われる、Fig. 3 の乾燥条件 B において圧力状況に水セメント比の影響が現れる一因となっていると考えられる。

4.3 ふくれ圧力シミュレーション

4.3.1 仮定条件

シミュレーションの条件として以下の仮定をする。

- 1) ふくれ圧力測定用試験体の計算モデルは Fig. 8 に示すものとし、湿度・温度計挿入のための貫通孔はないものとする。
- 2) ふくれ模擬空間の相対湿度は温度変化によらず初期値から変化しないものとして水蒸気圧を求める。
- 3) コンクリート空げき中の相対湿度の初期値はふくれ模擬空間のそれと同じとし、やはり温度変化によらず初期値から変化しないものとして水蒸気圧を求める。
- 4) 圧力の拡散および熱伝導は円柱二次元拡散とし、前進差分式を用いて数値計算する。それぞれの節点では熱

Fig. 8 Model of concrete specimen with the studied void for numerical solution

Table 3 Characteristic values for heat conduction of concrete

Specific heat	920 J/(kg·K)
Density	2300 kg/m ³
Thermal conductivity	1.6 W/(m·K)
Heat-transfer coefficient (Bottom surface)	12 W/(m ² ·K)

伝導による温度変化から熱膨張圧と水蒸気圧の変化が生じ、さらに、圧力勾配に伴う拡散が生じることになる。

5) 有効気相空げき率は Table 2 に示した測定値を用い、透気係数はその空げき率と Fig. 7 の関係より求める。実際には試験体内部で水分勾配があるので有効気相空げき率、透気係数とも均一ではないが、ここではコンクリート全体の平均値で代表する。

6) 熱伝導計算に必要な物性値は Table 3 に示すものとする。

ここで、2)、3) の仮定は、Fig. 3 に示したように、圧力上昇時におけるふくれ模擬空間の相対湿度変化が 10 % RH 程度であること、また、そのことからコンクリート内部空げきの相対湿度変化も小さいと考えられることによる(なお、後述のようにこのシミュレーションを実環境へ対応させることを考えると、厳密な相対湿度変化の予測は困難であり、相対湿度一定としても十分なシミュレーションが可能であることが望ましい)。また、乾燥条件 A のコンクリートでは、実際には下層のコンクリート空げきほど相対湿度は高く、ふくれ模擬空間の湿度と同じではないが、結果的には、ふくれ圧力に及ぼすその影響はほとんど問題とならない。

4.3.2 境界条件および初期条件

実験での温度測定点が限られていること、ふくれ模擬空間での境界条件があいまいなこと、から境界条件に関しては以下のように考えることとする。

- 1) ふくれ模擬空間の熱膨張圧変化は Fig. 2 に示した空間上下部の平均温度の変化より、水蒸気圧は空間下部の温度変化より求める。
- 2) ふくれ模擬空間の側面部分のコンクリート層の熱膨張圧および水蒸気圧の変化は、その層全体の温度がふく

れ模擬空間の平均温度と等しいものとして求める。

3) 各節点の温度は、ふくれ模擬空間底面のコンクリート表面温度が空間下部の測定温度と等しいものとし、その深さ位置でのコンクリートの節点温度もそれに等しいものとして熱伝導計算により求める。

4) 試験体側面は断熱状態とし、圧力逸散もないものとする。

5) 試験体底面の圧力は大気圧とする。

また、初期条件としては、各節点温度および圧力は

20°C、大気圧とする。

4.3.3 実験結果との比較

Fig.9 にふくれ模擬空間の測定圧力変化および計算値を水セメント比ごとに示す。図中、圧力上昇の大きい順に、乾燥状態 A-1、A-2、B-1、B-2 のそれぞれの試験体における測定値と計算値である。ここで行ったシミュレーションはかなり単純化されているものの、いずれの試験体においても、計算値は温度変化に伴う圧力変化状況、および、乾燥状態による圧力上昇の差異をよく再現している。

以上より、コンクリートの要因として、水蒸気圧源としての含水状態だけでなく、透気性状を考慮することによりふくれ圧力と下地コンクリート状態を明確に関係づけることができ、コンクリートの圧力逸散性を考慮した(5)式でふくれ圧力状況をほぼ表現できると考えられる。

5. ふくれ成長シミュレーション

4.3 で示したふくれ圧力の数値計算方法に基づき、夏期実環境に近い温度条件でのふくれ成長過程のシミュレーションを行う。

まず、Fig.10 に示すような下地コンクリート面上の防水層に、容積 0.75 cm³ の 1/6 球面の小さな空げきがあり、その容積が変化しない場合のふくれ圧力状況をシミュレーションする（このような小空げきは、大きさを問題としなければ、防水層の未接着部、防水層施工時の空気の抱き込み、溶融アスファルト流し張り時におけるコンクリートの水蒸気によるボイド、など必ず存在すると考えられる）。ここで、空げきの温度は同じく Fig.10 に示したように毎日 20°C～55°C の繰り返しとし、空げき内の相対湿度は温度変化によらず常に 100 %RH を保つとして、圧力を計算する。計算結果を Fig.11 に示す。図には透気係数の大きい（有効気相空げき率も大きい）

Fig.9 Experimental and calculated pressure changes in the studied void

Fig.10 Membrane-concrete model with a original void and temperature change for calculation of pressure increase in the void or blister growth

Fig. 11 Calculated pressure changes in the void without blister growth

Fig. 12 Scheme of a simple blister growth
(a) : original void, (c) to (d) : blister growth

Fig. 13 Calculated blister growth

コンクリート Pe-1 と透気係数の小さい Pe-2 の場合が示してある。ここで、Pe-1 の透気性は実験における水セメント比 75 % の乾燥状態 A-2 に、Pe-2 は水セメント比 45 % の A-2 や 75 % の A-1 にほぼ匹敵するものである。Pe-1 の圧力上昇は最高 0.8×10^4 Pa 程度であり、温度低下に伴い圧力が負圧となるものの、翌日までにまたほぼ初期圧力に戻るという変化を示す。一方、透気係数が小さいコンクリート Pe-2 の圧力上昇は最高 2×10^4 Pa 以上と大きく、温度変化にほぼ沿った圧力変化を示しながら日数の経過とともにわずかずつ負圧側に移行している。なお、このような繰り返しの温度変化に対するふくれ圧力変化については、次報で実験的に検証する予定である。

次に、同様な条件下で、空げきの圧力上昇を空げきの容積拡大に置き換え、以下のようなふくれ成長モデルを仮定する。

- 1) 初期状態で防水層一下地境界に小さな空げき（微小ふくれ）があり、内部圧力は大気圧とする（Fig. 12, a）。
- 2) 温度上昇に伴い、空げき容積一定のまま圧力が増大する。
- 3) 空げき内部の圧力上昇がある値になった時、空げき円周が一定長さはく離し、空げき容積が少し拡大して内部圧力は初期状態となる（Fig. 12, b, c）。
- 4) この後は、温度上昇に伴い内部圧力は変化せずに容積が拡大する。
- 5) 空げきの形状が初期状態と相似となった時、容積拡大は停止する（Fig. 12, d）。
- 6) 以上 2)～5) の繰り返しでふくれが成長していく。

7) ただし、温度が低下し、内部圧力が初期状態より小さくなった時は、ふくれ形状はそのまま保持され、容積一定のまま圧力低下する。再び温度上昇し、圧力が初期状態となった時、2) または 4) に戻る。

この仮定のもとで、はく離する時は円周が 1 cm 拡大するとして行ったシミュレーションの 10 日目までの結果を Fig. 13 に示す。圧力上昇 1×10^4 Pa で防水層がはく離するとすれば、その圧力まで達しない Pe-1 ではふくれの成長はないのに対し、Pe-2 では少しではあるがふくれは成長する。また、圧力上昇が 0.5×10^4 Pa ではく離するとすれば、Pe-2 は同じく少ししか成長しないのに対し、Pe-1 のふくれの成長率は極端に大きくなる。これは Pe-1 では温度上昇時圧力一定のまま容積拡大する段階で、ふくれ空間下部のコンクリート層および周辺部のコンクリート層の圧力の方が逆に大きくなり、弱点部であるふくれ空間への圧力勾配による流入空気量が多くなるからである。また、温度低下時、ふくれ空間が負圧となっている間の流入空気量も一因となっている。つまり、下地コンクリートの透気性が小さい場合には防水層のわずかなはく離は起こりやすいといえるがふくれは成長しにくく、逆に透気性が大きく、かつ防水層の接着力が弱い場合はふくれは急速に成長することになる。

以上のシミュレーションは、単純なふくれ成長モデルに基づいており実状を十分に再現したものではないが、下地コンクリートの透気性状を考慮することにより、経験的にも納得できるふくれの成長が起こり得ることを示している。また、ふくれの成長が防水層の下地との接着力（防水層の面内応力等の抵抗力も含む）と下地コン

リートの透気性状の相互関係に大きく左右されること、およびそれらの条件を明らかにすればふくれの成長過程を定量的に評価できることを示唆していると考えられる。なお、シミュレーションに用いたコンクリートの透気係数 $1 \times 10^{-19} \sim 10^{-17} \text{ m}^2$ は実際のコンクリートスラブとして有りうるものと考えられる。

6. 結 論

- 1) 防水層のふくれを生じさせる圧力（ふくれ圧力）は温度上昇に伴う空気の膨張圧と水蒸気圧であり、下地コンクリートの放湿作用のためその水蒸気圧は大きい。
- 2) 下地コンクリートの乾燥が進行するほどふくれ圧力は小さくなる。これは、水蒸気圧が減少するとともに、コンクリート中への圧力逸散が大きくなるためである。
- 3) ふくれ圧力の逸散はコンクリートの透気性に主に依存し、透気性はコンクリートの含水状態、特に有効気相空げき率に影響される。
- 4) ふくれ圧力状況を表す拡散方程式を提示し、数値シミュレーションによってふくれ圧力に及ぼす下地コンクリートの主要因が、透気係数と水蒸気圧源としての含水状態であることを明確にした。
- 5) 4) に示した数値計算方法に基づいてふくれの成長シミュレーションを行い、その成長過程を定量的に評価できる可能性を示唆した。

謝 辞

研究費の一部に昭和 61, 62, 63 年度文部省科学研究費補助金（一般研究 C）「防水層ふくれ現象のメカニズムの解明、研究代表者小池迪夫」を使用しました。関係者各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小池迪夫, 田中享二, 橋田 浩: コンクリート-仕上層境界に温度上昇により発生する圧力の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp. 1~2, 1988
- 2) 小池迪夫, 田中享二, 橋田 浩: コンクリートの透気性からみたふくれ圧力逸散性についての検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp. 3~4, 1988
- 3) 橋田 浩, 小池迪夫, 田中享二: 下地コンクリート中へ

のふくれ圧力拡散シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp. 61~62, 1989

- 4) Griffin, C.W. : Manual of Built-up Roof System 2nd ed., McGraw-Hill Book Company, pp. 279~303, 1982
- 5) Laaly, H. O., Dutt, O. and Feldman, R. F. : Interply Adhesion and Blistering of Bituminous Built-up Roofing Membranes, Durability of Building Materials, 2, pp. 209~228, 1985
- 6) Puterman, M., Soroka, I. and Bentur, A. : Deterioration of Externally Exposed Waterproofing Systems of Flat Roofs, Durability of Building Materials, 2, pp. 275~286, 1985
- 7) Cash, G. G. : Moisture and Built-up Roofing, Proc. 2nd International Symposium on Roofing Technology, NBS-NRCA, pp. 416~427, 1985
- 8) 奈良利夫: 防水層のふくれと防止対策, 建築仕上技術, pp. 34~38, 1979 年 5 月
- 9) 小林孝悌: 屋根外壁の排気システムについて, 防水ジャーナル, pp. 45~57, 1982 年 11 月
- 10) 奈良利夫: 脱気構法の可能性と問題点, 防水ジャーナル, pp. 59~61, 1982 年 11 月
- 11) 菅原正尚, 小野 正, 松本洋一: 屋根防水層のふくれ防止に関する研究 (ふくれに及ぼす要因の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp. 519~520, 1986
- 12) 菅原正尚, 小野 正, 松本洋一: 屋根防水層のふくれ防止に関する研究 (ふくれ発生の危険性評価について), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp. 551~552, 1987
- 13) Michio KOIKE : Study on Blistering in Self-Finished Felt Roof Covering-Field Experimental and Semi-Theoretical Investigation, 日本建築学会論文報告集 第 97 号, pp. 1~9, 1964
- 14) Scheidegger, A. E. : The physics of flow through porous media 3rd ed., University of Toronto Press, 1974
- 15) 長滝重義, 氏家 勲: コンクリートの透気性, セメント・コンクリート, No. 455, pp. 24~31, 1985
- 16) Dhir, R. K., Hewlett, P. C. and Chan, Y. N. : Near surface characteristics of concrete : intrinsic permeability, Magazine of Concrete Research, 41, No. 147, June pp. 87~97, 1989
- 17) 長滝重義, 小西伸彦, 氏家 勲: コンクリートの透気性に及ぼす含水率の影響, セメント技術年報 40, pp. 174~177, 1986

(1990 年 4 月 2 日原稿受理, 1990 年 7 月 31 日採用決定)

英文要約 (Summary)

1. Introduction

In this study we intend to clarify the blistering mechanism of membrane roofing which is one of the most common failures with it (Photo.1). This paper, part 1, deals with experimental and numerical investigations on pressure generation between membrane and concrete substrate, in order to understand quantitatively the influence of property and moisture condition of concrete on blistering problem.

2. Measurement of Pressure Increase in a Void at Elevated Temperature

Concrete specimens, of which mix proportions are shown in Table 1, were made as shown in Photo.2 and Fig.1. All concrete specimens were cured in water for 4 weeks before drying conditioning by A-1, A-2, B-1 or B-2 (see Table 2). Then the specimens were prepared for a heating test, where pressure increase in a studied void of specimen was measured by a mercury manometer (see Fig.1). The studied void was assumed a small blister chamber with constant volume, between membrane roofing and concrete substrate. Fig.2 shows typical temperature changes in the void during the heating test and Fig.3 does pressure increase in it of each specimen with the variations in both dried condition and water-cement ratio. The pressure increase in the void depends on dried conditioning of concrete, especially porosity excluded pores filled with water which the authors call effective porosity, described in Table 2.

Fig.3 also shows typical relative humidity changes in the void and it was confirmed that water-vapor pressure is significant because the fall of relative humidity was a little in spite of the temperature increase.

3. Pressure in the Void Without Consideration of Pressure Diffusion into Concrete

The broken lines in Fig.3 are estimated values of pressure increase with constant volume based on the each typical relative humidity and temperature changes measured in the void. The estimated value, namely a total value of air-expansive and water-vapor pressure increase, is close to the pressure increase measured in the concrete conditioned by A-1 or A-2. On the other hand, as for B-1 or B-2, it can be seen from the significant difference between them that air pressed in the void obviously diffuses into concrete body. Thus the pressure diffusion into concrete becomes remarkable as drying of concrete advances. These results indicate that the mechanism of pressure generation in a void, which promote blister growth in membrane roofing, can not be explained without consideration of the pressure diffusion into concrete substrate.

4. Pressure in the Void With Consideration of Pressure Diffusion into Concrete

From a state of air and water-vapor mixture (Eq. (1)), Darcy's law (Eq. (2)) and a continuity condition (Eq. (3)), we get a pressure diffusive equation in concrete for blistering problem (Eq. (5)), that is :

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{P_0 k}{\epsilon \mu} \operatorname{div} \operatorname{grad} P + \frac{\partial P_a}{\partial t} + \frac{\partial P_v}{\partial t}$$

where P is pressure in a void between membrane roofing and concrete or pores in concrete, P_0 is the initial pressure, k is air-permeability of concrete, ϵ is the effective porosity of concrete, μ is viscosity of air, P_a is thermal expansive pressure of dry air and P_v is water vapor pressure. Separately from this diffusion problem, both $\partial P_a / \partial t$ and $\partial P_v / \partial t$ can be calculated from the temperature change in concrete due to heat conduction.

Air-permeability and the effective porosity are required as the parameters for solving the pressure diffusion. Fig.4 and 5 show concrete specimens and a equipment for air-permeability test performed. Fig.7 shows measured air-permeability as a function of the effective porosity of concrete. Air-permeability of concrete is mostly determined by the effective porosity. So air-permeability of the concrete specimen with the studied void mentioned above was determined from the measured values of the effective porosity in Table 2 and the relations indicated in Fig.7. Then we calculated the pressure change in the studied void using this information and Eq. (5).

Fig.9 compares the results of the numerical calculation for the pressure increase with the measured ones. Because the both results agree well, it was proved that the pressure generation can be expressed by Eq. (5) and that the pressure diffusion into concrete is important for discussion on blistering of membrane roofing.

5. Simulation of Blister Growth

A simple blister growth was numerically simulated by translating the pressure increase in a void into an expansion of it. Fig.10 shows a membrane-concrete model and temperature change in the void for the numerical simulation. Fig.11 shows the pressure changes calculated in case that the void doesn't expand. Pressure in the void on Pe-1 concrete, which has the larger air-permeability, is much less than that of Pe-2. Fig.13 shows blister growths of the original void up to 10 days simulated based on the blistering mechanics illustrated in Fig.12. It

must be noted that the void on Pe-1 concrete grows more rapidly than that of Pe-2 when the peeling of membrane around the void occurs at lower internal pressure such as 0.5×10^4 Pa, in spite of the less pressure in the original void with constant volume.

A void between membrane and concrete substrate can grow to a large blister like this because air in pores of concrete around the void is allowed to penetrate into it due to a reverse pressure gradient during the growth of it. Thus the mechanism of blistering can be clearly understood by taking the air-permeability of concrete into account.

6. Conclusion

- 1) It was confirmed that the pressure increase in a void between membrane roofing and concrete substrate to originate a blister is a total value of air-expansive and water-vapor pressure increase at elevated temperature, where the water-vapor pressure is significant because of the evaporation of water which concrete contains.
- 2) The pressure in the void reduces as drying of concrete advances because not only does the water-vapor pressure reduce but also the pressure diffusion into concrete substrate becomes remarkable.
- 3) The pressure diffusion is mainly determined by air-permeability of concrete, and air-permeability is strongly depends on the effective porosity of concrete.
- 4) A pressure diffusive equation in concrete for blistering problem was proposed and it was proved from the numerical simulation that main factors of concrete substrate on the blistering pressure are moisture condition relating to water-vapor pressure and air-permeability.
- 5) A simple simulation of blister growth was presented and it was suggested that the numerical simulation method proposed in this paper is useful for quantitative discussion on the blistering problem of membrane roofing.