

千葉工業大学
博士学位論文

ウレタンゴム系塗膜防水の通気緩衝工法における
脱気効果に関する研究

A Study on Effect of Deaeration
in Polyurethane Membrane System with Air-Permeable Layer

平成 28 年 9 月

1379508

古澤 洋祐

論文要旨

ウレタンゴム系塗膜防水の密着工法は、コンクリート下地にウレタンを直接塗布し塗膜を形成するものであり、直接塗布するという性質上、下地の影響を受けやすい性質を持っている。具体的には下地がひび割れた時の塗膜の破断と下地コンクリート内に存在する水分に起因する“ふくれ”の問題である。これら不具合を未然に防ぐための手段として、通気の優れる通気緩衝シートを下地コンクリートとウレタン防水層との間に挿入し、下地から発生する圧力をシートの通気層内に拡散させ、脱気装置を介して大気に逃がす工法が用いられ、一般的に通気緩衝工法と呼ばれている。

しかし、この工法の要となる通気緩衝シートの通気性能や、脱気装置の設置位置の指定や設置個数は、工法自体が経験的に開発、使用されてきたという経緯のため、どのようなものが適切なのかという議論が充分ではなく、その現象の定量的な把握や性能表示方法やそれを評価するための試験方法の開発、品質基準の策定が望まれている。更に防水実務の側からは、通気緩衝シートと脱気装置の脱気効果を統合した、定量的な脱気設計方法の確立が求められている。

本研究では、ウレタンゴム系塗膜防水における“ふくれ”の防止策として、現在最も有効な手段である、通気緩衝工法の脱気効果を定量的に評価することを目的としており、工法を構成している通気緩衝シートの通気性能と脱気装置の位置や個数による脱気効果への影響を、数値的根拠を基に明らかにし、定量的な設計方法の方向性を提示する。本論文は全 5 章から構成されており、各章の概要は以下のようになっている。

第 1 章「序論」では、本研究の背景を述べ、ふくれ防止の必要性を美観上の観点から示し、本研究の目的と位置づけを示した。

第 2 章「通気緩衝シートの通気効果の定量化」では、通気緩衝シートの通気性を定量化するために透気係数を導入した。またこれを的確に測定するために、通気緩衝シートの透気係数測定法を開発し、夏季の屋外環境下にてコンクリートを下地としたウレタンゴム系塗膜防水の密着工法と通気緩衝工法の防水層裏面に発生する圧力を測定した実験と、透気係数を用いた圧力変化の数値解析とを比較することで、通気緩衝工法における通気緩衝シートによる通気効果を明らかにした。

第 3 章「脱気装置の位置と数による脱気効果の定量化」では、コンクリート下地からの急激な圧力上昇を模擬できる試験装置を用いて防水層裏面を加圧し、圧力発生源、通気緩衝シートの通気層、脱気装置との関係による通気緩衝シートの通気層内での圧力挙動の測定を行い、これらの事象を数値的に解析する方法を開発し比較することで、脱気装置の位置と個数による脱気の効果を定量的に示した。これらから、通気緩衝工法の施工面積内での脱気装置からの最大距離が重要なパラメータであることを指摘した。

第 4 章「脱気設計方法の検討」では、脱気設計方法の一つの方向性として、開発した通気層内圧力分布を予測できる数値解析手法を利用した脱気設計プロセスを提示した。また、簡易的な脱気設計方法の一つの方向性として、脱気設計時に簡便に利用できる、脱気装置の設置位置に基づく評価方法と脱気設計のプロセスを提案した。

さらに、これらの脱気設計プロセスに従い、実際の屋上平面を対象として定量的な脱気設計を実践した。

第 5 章「結論」では、各章で得られた研究成果を要約し、本論文の総括結論を述べた。

Summary

A Study on Effect of Deaeration in Polyurethane Membrane System with Air-Permeable Layer

Polyurethane waterproofing adhesive membrane is obtained by directly coating polyurethane on a concrete substrate to form a membrane. However, direct coating intrinsically results in the membrane being easily affected by the substrate. In particular, rupturing of the membrane when cracks occur in the substrate and “blister” caused by water contained in the substrate concrete are the two issues that arise due to direct coating. One method to prevent these issues is the insertion of a buffer venting base sheet with good aeration properties (air-permeable sheet) between the concrete substrate and the polyurethane waterproofing membrane prior to membrane fabrication. The pressure from the substrate can be dispersed within the air-permeable sheet and released into the atmosphere through a deaerator. This method is generally referred to as the buffering porous construction method.

However, because this method has been empirically developed and used, the venting properties of the air-permeable sheet and guiding principles on where and how many deaerators should be placed have not been sufficiently discussed. Therefore, there is a need for quantitative understanding of the phenomena involved, which requires development of methods to describe performance, development of testing procedures for evaluation, and drafting of quality standards. Moreover, the establishment of quantitative deaeration design methodologies combining deaeration effects of the air-permeable sheet and deaerators is desired to realize practical waterproofing.

This research aims to prove the deaeration effect of the buffering porous construction method, which is currently the most effective way to prevent “blister” in waterproofing by polyurethane coating. The venting performance of the air-permeable sheet and the effect of the position and number of deaerators on the deaeration performance are clarified using numerical analysis. In addition, the course of action toward the development of quantitative

design methods is proposed. This dissertation comprises five chapters, which are summarized below.

Chapter 1, “Introduction”, introduces the background of this research, points out the necessity of preventing bulging from the viewpoint of aesthetics, and describes the goals and merits of this research.

Chapter 2, “Quantification of venting effect of air-permeable sheets” introduces a venting coefficient to quantify the venting performance of the air-permeable sheet. Furthermore, a method to measure the venting coefficient is described. The venting effect of an air-permeable sheet in the buffering porous construction method is clarified through comparative experiments; the experiments were conducted in an outdoor summer environment to measure the pressure at the back of the waterproofing layer of the waterproofing adhesive used in the buffering porous construction method on a concrete substrate. The measured pressure is compared with the numerical values of pressure change obtained using the venting coefficient.

Chapter 3, “Quantification of deaeration effect from position and number of deaerators” discusses the development of a testing device that can simulate rapid increase in pressure from the concrete substrate. This device is used to conduct experiments that require pressurization of the back of the waterproofing layer. The pressure behavior in the venting layer of the air-permeable sheet is clarified by identifying the relationships between the pressure source, venting layer, and deaerators. The maximum distance from the deaerator in the buffering porous construction area is found to be an important parameter. Moreover, a procedure to numerically analyze deaeration in the buffering porous construction method is developed to understand these phenomena from the viewpoint of numerical analysis.

Chapter 4, “Investigation of deaeration design methods”, suggests two approaches to deaeration design. Here, a deaeration design process is proposed that employs a numerical analysis technique developed by the authors that can predict the pressure distribution within the venting layer. Another deaeration design process allows simplified deaeration design by using the proposed method to evaluate the position of deaerators, where the relation between the maximum in-sheet distance from the deaerator and the maximum predicted pressure in the venting layer is given for each venting coefficient of the air-permeable sheet.

Moreover, quantitative design examples using actual rooftop plans based on these deaeration design processes are shown.

Chapter 5, “Conclusions”, summarizes the research achievements from each chapter and discusses the conclusions of this dissertation.

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 工法の沿革	
1.2 ふくれ防止の必要性	
1.3 研究の背景	
1.4 既往の研究	
1.5 研究の目的と構成	
第 2 章 通気緩衝シートの通気効果の定量化	22
2.1 はじめに	
2.2 通気緩衝シートの通気効果確認のための屋外実験	
2.3 通気緩衝シートの通気効果の数値解析	
2.4 まとめ	
第 3 章 脱気装置の位置と数による脱気効果の定量化	60
3.1 はじめに	
3.2 通気緩衝工法の通気層内圧力測定実験	
3.3 数値解析による脱気効果の定量化	
3.4 考察	
3.5 まとめ	

第4章 脱気設計方法の検討	97
4.1 はじめに	
4.2 数値解析による脱気設計プロセスの提案	
4.3 簡易的脱気設計プロセスの提案	
4.4 脱気設計例	
4.5 まとめ	
第5章 結論	116
付録	119
1. 視覚的観点からみたウレタン塗膜防水におけるふくれ	
2. 各種通気緩衝シートの透気係数測定	
研究に関連して著者が発表した論文	132

第 1 章

序論

- 1.1 工法の沿革
- 1.2 ふくれ防止の必要性
- 1.3 研究の背景
- 1.4 既往の研究
- 1.5 本研究の目的と構成

第1章 序論

1.1 工法の沿革

ウレタンゴム系塗膜防水工法は近年、屋上メンブレン防水の改修工事を中心に需要が伸びている。図 1.1 に(一社)日本防水材料連合会(JWMA)の発表している、近年の防水工法ごとの施工面積の推移を、また図 1.2 に 2015 年度の防水工法の施工面積割合をそれぞれ示す。近年では、シート防水とウレタンゴム系塗膜防水の施工面積が大きな割合を占めている。

ウレタンゴム系塗膜防水は、日本国において、1960 年代後半にアスファルト防水熱工法、モルタル防水工法の次に登場したもので、シート防水工法とほぼ同時期に位置する。1976 年に JIS A 6021「屋根防水用塗膜材」(現・建築用塗膜防水材)⁽¹⁾として制定され、「日本建築学会・建築工事標準仕様書 JASS8 防水工事」には、1981 年から第 4 節に「塗膜防水工事」⁽²⁾として制定された。

ウレタンゴム系塗膜防水工法の中で「密着工法(仕様)」とは、下地に下地材となるプライマーを介し、ウレタン樹脂の主剤と硬化剤の 2 液を施工現場で混合攪拌後塗布し、金鋸や櫛へら等で流し延べ、所定の膜厚を確保し塗膜を形成するものである。図 1.3 に密着工法(仕様)の概略図⁽³⁾を示す。プライマーが介在してはいるが、下地に直接塗布するという性質上、下地の影響を受けやすい性質を持っている。具体的には下地がひび割れた時の塗膜の破断と下地コンクリート内に存在する水分に起因する“ふくれ”の問題である。これら問題は改修工事の時のように、既存の押えコンクリート上にウレタン塗膜防水層を、直接施工する時には特に発生しやすい。押えコンクリートの目地部分は動きやすく、しかも多量の水分を含むことが多いためである。

これらを未然に防ぐための手段として 1978 年に、通気の優れた通気緩衝シート(旧名称：下張り緩衝材)を下地コンクリートとウレタン防水層との間に挿入し、下地から発生する圧力をシートの通気層内に拡散させ、脱気装置を介して大気に逃がす工法が上市された。日本建築学会標準仕様書 JASS8 防水工事には、1986 年版⁽⁴⁾に種別 L-US として、公共建築工事標準仕様書には平成元年版⁽⁵⁾に種別 x-1 として表記されるなど、多くの仕様書に採用されるようになり、密着工法(仕様)に対して「絶縁工法(仕様)」として分類されている。これに下地ムーブメントに対する緩衝効果⁽⁶⁾

も付与され、一般的には「通気緩衝工法」と呼ばれており、この工法の普及により、以前には多発していた防水層破断、ふくれといった問題はかなり減少した。しかし、これらに対して実験や解析に基づく現象の把握や、工学的な定量評価はなされてこなかった。

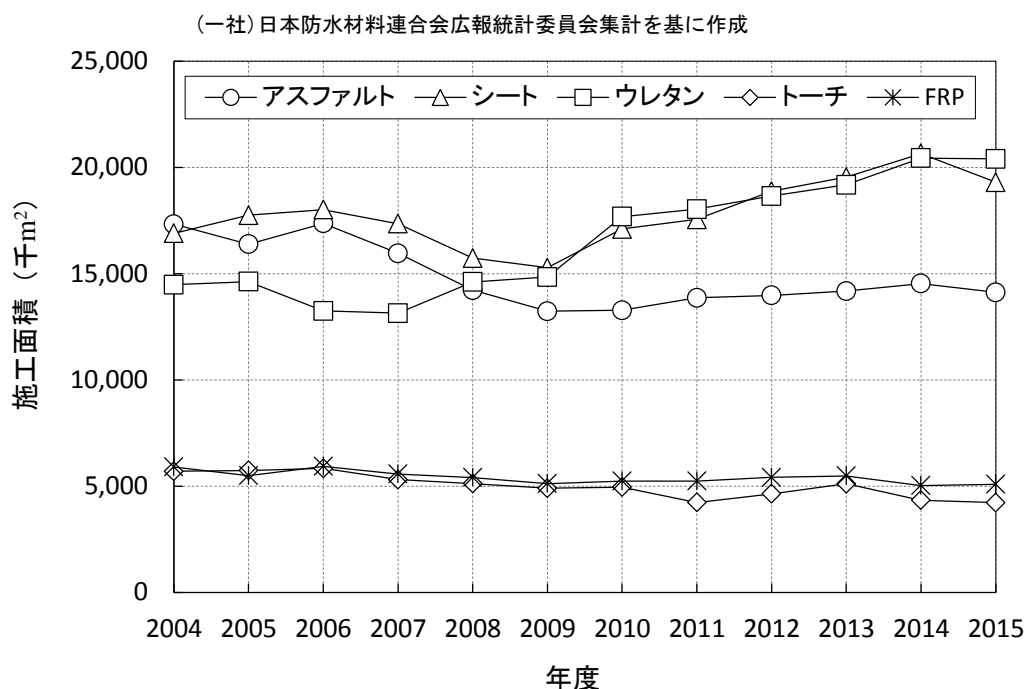


図1.1 防水工法別施工面積推移 (2004～2015年)

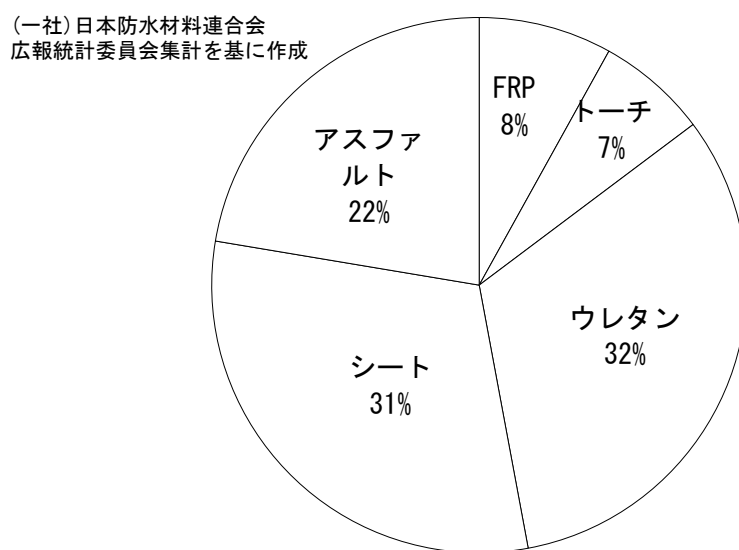


図1.2 防水工法施工面積割合 (2015年度)

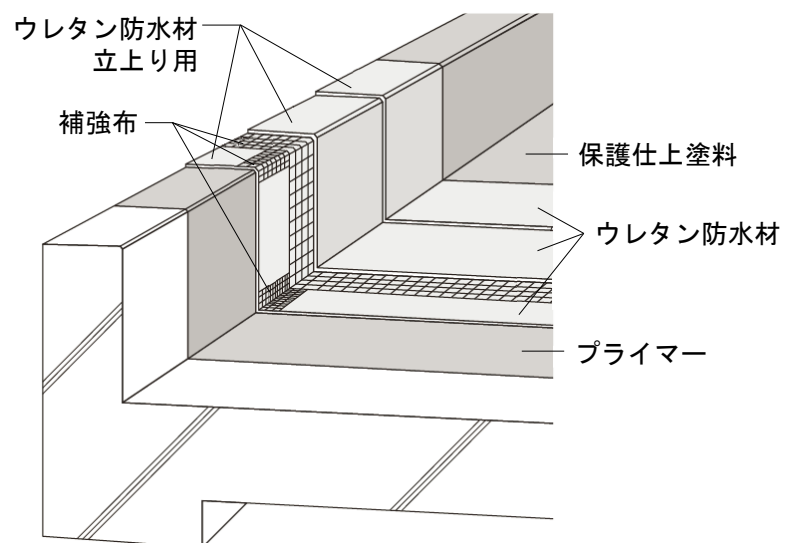


図1.3 ウレタンゴム系塗膜防水の密着工法(仕様) 概略図

1.2 ふくれ防止の必要性

通気緩衝工法の普及により、ふくれの問題はかなり減少してきているが、現在でも密着工法が、屋上の防水工事において採用されている。ふくれは材料が変形しているだけであり、直接漏水事故を引き起こすものではないため、密着工法において、しばしば発生する小さなふくれは、これまで建築実務者側からは、重大な瑕疵とは認識されてこなかった。では、ふくれを防止する必要性はどこにあるのか。

1.2.1 ふくれとしての定義の現状

ふくれとなっている変形部分は、防水材が伸ばされており、伸長した状態では劣化が早まることに加え、ふくれは日中に大きく夜間は小さくなるため、繰り返し疲労を受け、耐久性の観点からは望ましいことではない。これらを考慮して、これまでは劣化という観点から、特に大きな場合にのみ不具合として取り扱うことが一般的であり、建設大臣官房技術調査室監修の「建築防水の耐久性向上技術」⁽⁷⁾及び、建築物の長期使用に対応した外装・防水の品質確保ならびに維持保全手法の開発に関する研究⁽⁸⁾から、劣化診断を実施する際に、面積比の30%以上または1個の長径が300mm以上を補修の対象としているのが現状である。しかし、建物の所有者や利用者にとっては、小さなふくれでも、特にそれが複数発生している場合は、見て気持ちのよいものではない。そのため最近是比较的小さなふくれでも、美観上クレームとして指摘されるようになってきている。

そもそも、ふくれは施工時の気象や下地の状態の影響を受け発生するが、これらを完全に制御することは困難であり、ふくれの完全な防止は難しいことが多い。ウレタン塗膜防水を密着工法にて施工した場合の、コンクリート下地の下塗り材であるプライマーの組成によるふくれ発生率を検討した研究⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾が、防水材料メーカーを中心になされているが、現在の技術水準では、ふくれを完全に防止することは困難である。

1.2.2 美観上のふくれ

現状を踏まえると、一般の人々がどの程度の大きさ、数からふくれと認識し、さらに不快と感じるかを明らかにしておくことは、今後ウレタン防水層のふくれ対策を検討する上での重要な情報となる。筆者らは、本研究の事前の検討として、単一のふくれに対して、建物使用者側の観点で、どの程度の大きさからふくれと認識し、

さらには美観上不快と思うかを、建物使用者の立場で官能検査を用いた検討を行った。(別途付録に示す。)

官能検査の結果として図 1.4 に示す。観察距離数メートルでは、ふくれのサイズが直径約 30mm、高さ約 0.5mm くらいから、ふくれがあると認識され、実際のふくれで良くみられる直径 30mm 程度のものであれば、1.0mm 程度から不快と感じ始める人の数が多くなる。これは従来の耐久性の観点から見た長径 300mm のふくれよりも、建築物使用者が美観上不快に思うふくれは、より小さいものであることを示すものである。ウレタンゴム系塗膜防水の劣化という建築実務者側の観点から、比較的大きくなふくれとなるまで、不具合と認識されてこなかったものが、建物の所有者や使用者にとっては、比較的小さなふくれでも、美観上不快として認識される可能性がある。

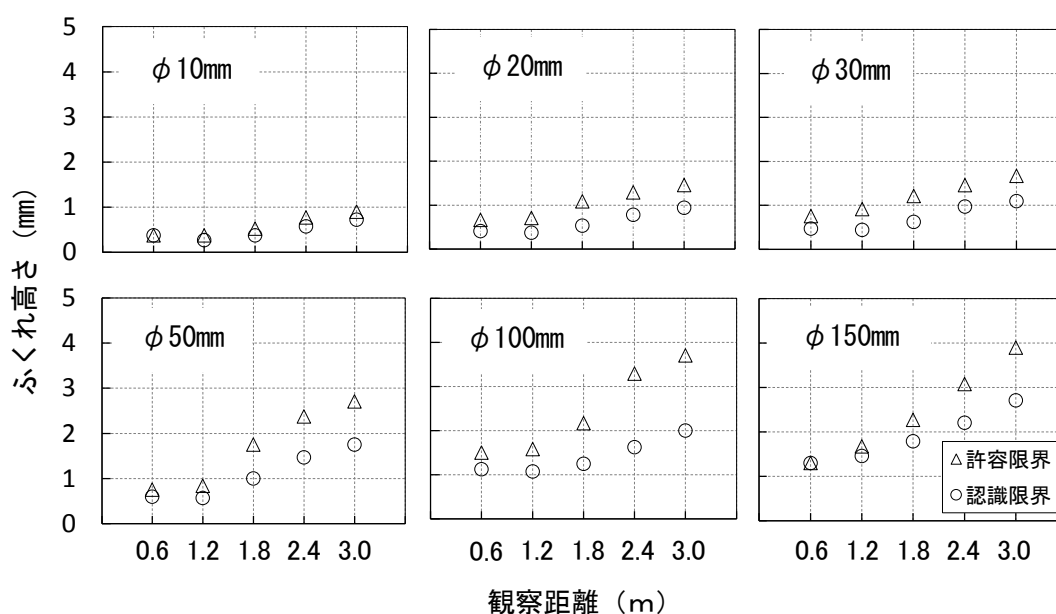


図1.4 官能試験結果

先にも触れた通り、防水改修工事での施工面積が特に顕著であり、ウレタンゴム系塗膜防水は、より建物使用者の目に触れやすいものとなってきている。更には、施工技術者の不足や、工期の短縮による下地となるコンクリートの養生不足などにより、益々ふくれの起きやすい状況になってきている現状を踏まえると、ふくれの防止は必要不可欠であり、防止のための手段を積極的に採用しなければならない。

通気緩衝工法は、ふくれを防止できる工法として長年施工されており、実績も豊富である。本研究において工学的にその効果を証明し、性能値や評価方法を整備することで、より信頼される工法として確立させる価値は大きい。

1.3 研究の背景

1.3.1 通気緩衝工法の構成

通気緩衝工法は、圧力を脱気装置まで導く通気層と、それを下地と接着させるための接着層、その上に雨水の浸入を防ぐ防水層、耐候性を付加させる保護仕上層とで構成される。図 1.5 に通気緩衝工法の概略図⁽³⁾、図 1.6 に脱気装置（脱気筒）の納まり⁽³⁾を示す。

表 1.1 に日本建築学会・建築工事標準仕様書 JASS8 防水工事⁽¹³⁾に記載されている仕様と、表 1.2 に建築工事監理指針及び公共建築改修工事標準仕様書⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾に記載の仕様を示す。工程 1 での接着剤以外による通気緩衝シートの取付け方法は、防水材料メーカーの仕様に任されている。脱気装置の取付けは、防水層施工前のこの工程の中で施工される。

工程 2 からのウレタン防水材料の塗布工程では、塗膜の厚さが 3mm となるように、工程を 2 回以上に分けて施工する（表中の塗布量【kg/m²】は硬化物密度が 1.0Mg/m³である材料の場合が示されている）。また、パラペット等の立上り部には、密着仕様が用いられ、塗膜の標準厚さは 2mm となっている。写真 1.1 に通気緩衝工法を施工した実例を示す。

ウレタン防水材料の塗布及び、保護仕上げ材の塗布による工程 2 は、耐久性にかかわる部分であり、工程 1 における通気緩衝シートの張付け工程は、脱気効果を確保するための重要な工程である。ただ、これらの仕様書には、通気緩衝シートの張付け方法は防水材料製造所の指定によるとされ、脱気装置を設置する場合、その位置、種類、個数は特記によるとされており、防水材料メーカーに委ねられているのが現状である。

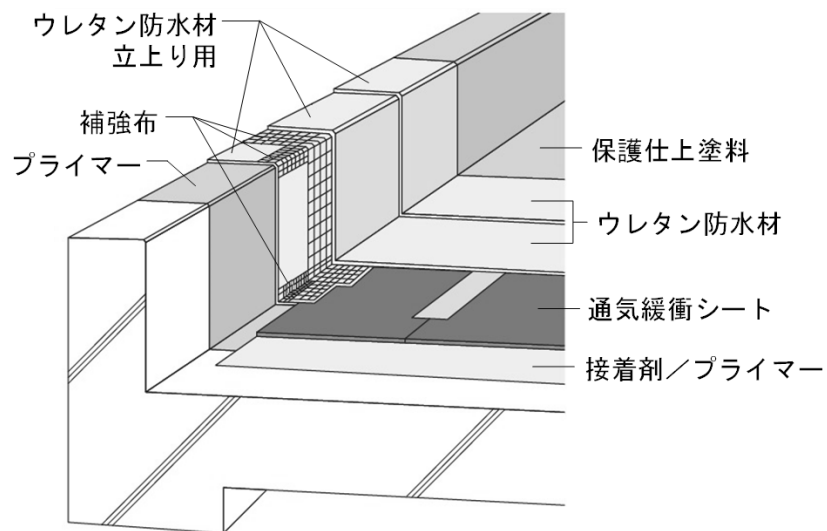


図1.5 ウレタンゴム系塗膜防水の通気緩衝工法 概略図

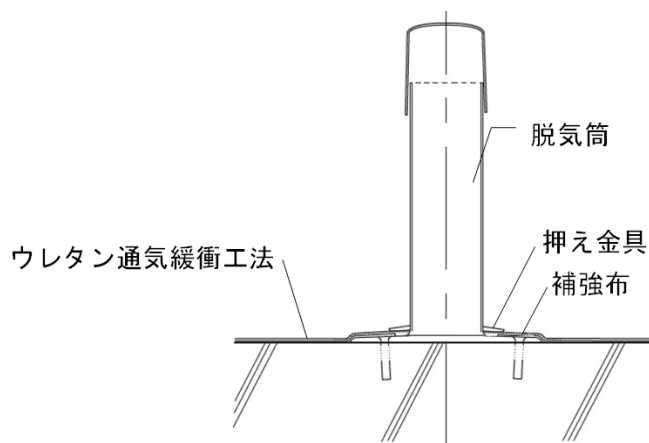


図1.6 脱気装置（脱気筒）

表1.1 ウレタンゴム系高伸長形塗膜防水工法・絶縁仕様（L-USS）⁽¹³⁾
 (p43 1.27表 抜粋)

部位 工程	平場（RC・PCa・ALC下地） （勾配 1/50～1/20）		立上り（RC下地）	
	工程-1	通気緩衝シート 張付け	[3.0kg/m ²]	プライマー塗り [0.2kg/m ²]
工程-2	ウレタンゴム系 高伸長形防水材塗り	補強布張付け （ウレタンゴム系 高伸長形防水材）		[2.0kg/m ²]
工程-3	ウレタンゴム系 高伸長形防水材塗り	ウレタンゴム系 高伸長形防水材塗り		
工程-4	—	ウレタンゴム系 高伸長形防水材塗り		
保護・ 仕上げ 工程	軽歩行用仕上塗料		仕上塗料（平場と同一材料とする）	
	工程-1	軽歩行用仕上塗料塗り [0.2kg/m ²]	仕上塗料塗り [平場と同一使用量とする]	

[RC：現場打ち鉄筋コンクリート，
 RCa：プレキャスト鉄筋コンクリート部材，ALC：ALCパネル]

表1.2 平成25年度版建築工事監理指針
 及び建築改修工事監理指針^{(14) (15)}

種別	X-1 （絶縁工法）	
工程	材料・工法	使用量 (kg/m ²)
1	接着剤塗り 通気緩衝シート張り	0.3
2	ウレタンゴム系塗膜防水材塗り	3.0
3	ウレタンゴム系塗膜防水材塗り	
4	仕上塗料塗り	0.2

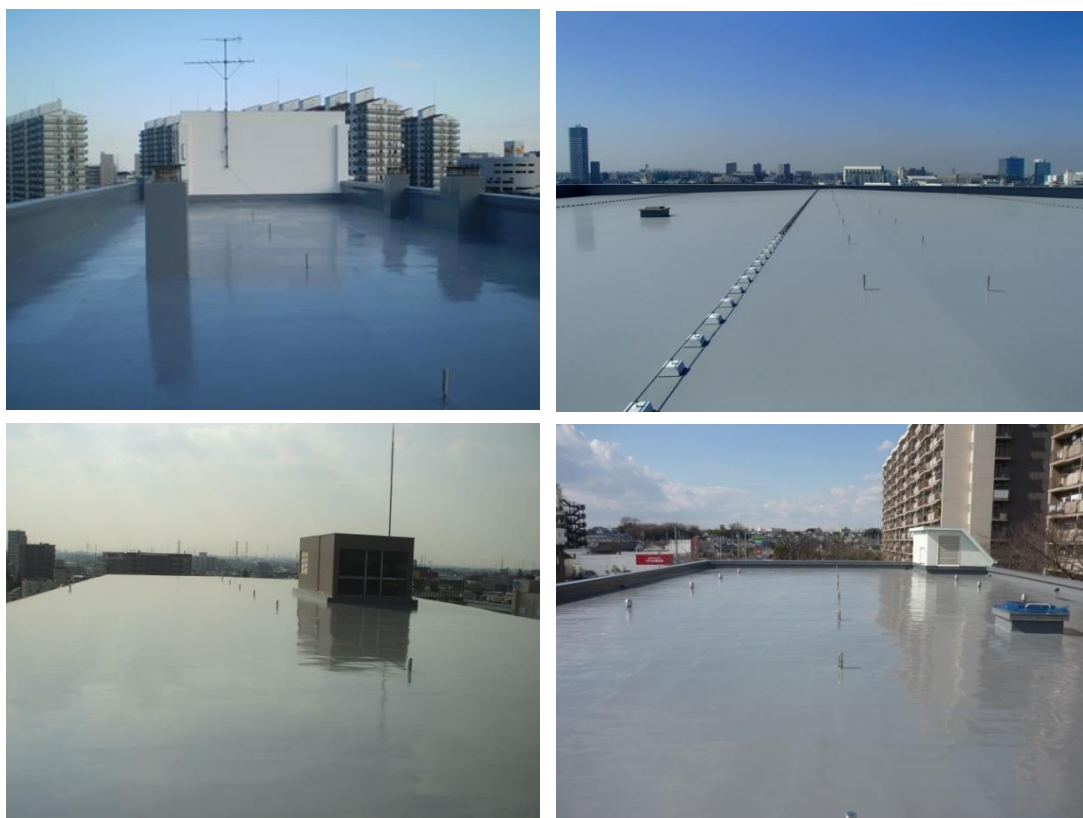


写真1.1 ウレタンゴム系塗膜防水の通気緩衝工法 実施工例

1.3.2 規格値の現状

通気緩衝工法の要となる通気緩衝シートの通気性能や、脱気装置の設置位置の指定や設置個数は、工法自体が経験的に開発、使用されてきたという経緯のため、その現象の定量的評価や性能表示法に関する検討が十分には行われて来なかった。このため、どのような設計が適切なのかという議論が十分ではなく、それを評価するための試験方法の開発、さらには品質基準の策定が望まれている。

以前、1986年版 JASS8⁽⁴⁾に初めて通気緩衝シートの試験方法が提案され、さらに1993年版 JASS8の解説のなかに品質基準(案)⁽¹⁶⁾として通気緩衝シートの物性値が提示されていた。具体的には図1.7に示すように、スレート板を下地とし、通気緩衝シートを施工後、側面から圧力の漏洩がないように、シーリング処理を行い、その上に塗膜防水を施工する。図1.8に示すような試験装置を試験体に取り付け、

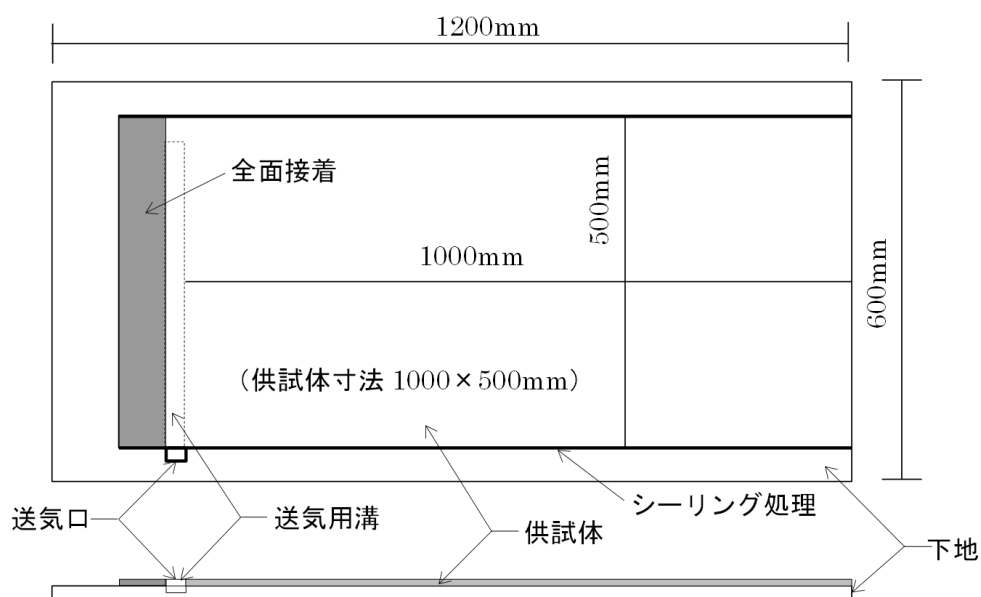


図1.7 下地との間の通気抵抗試験 試験体

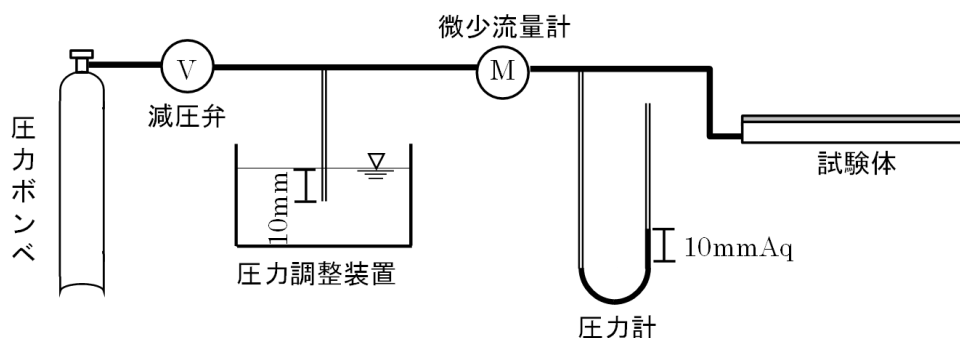


図1.8 下地との間の通気抵抗試験 試験装置

10mmAqの圧力空気を試験体の送気口から送り、微小流量計により1分当たりの流出空気を読み取る。表1.3に示す通気緩衝シート品質基準(案)では、通気性についてはシートの種類に関わらず、1分間の流出空気が170ml以上になるようにすると提示された。しかし、この試験法は試験結果が安定しない等の問題、また規格値等の意味が明快ではない等の理由(“1分間の流出空気が170cm³の場合のシステムは、不具合が生じていないという事例があり、参考となろう。”という記述のみ。)のため、それほど活用されないまま2000年⁽¹⁷⁾の改訂版からは、それが削除されてしまった。つまり、通気緩衝シートの通気性について、定量的な性能値は以前から確立されておらず、現在においては基準値が提示されていない。

表 1.3 通気緩衝シートの品質基準(案)⁽¹⁶⁾

通気緩衝シートの種類	主シートの材質	厚さ(mm)	加熱寸法変化(%)	下地ひび割れ抵抗負担指数(%/mm)	通気性 -98Pa {-10mmAq} (ml/min)
I	プラスチック 発泡体	≥2.5	-5~0	≤5.0	≥170
II	合成繊維不織布	≥1.0	-2~1	≤5.0	≥170
III	ポリマー改質アスファルトまたはゴムシート	≥1.5	-2~1	≤5.0	≥170
備考		JIS L 1096-1990 (荷重: 0.7kPa) {7kgf/cm ² }	JIS A 6021-1989 (80℃×168 時間)	KMK法 ひび割れ幅: 5mm 標線間隔: 5mm	

一方脱気装置については、各仕様書におおよその面積に対する設置個数の記載がされている(表1.4に日本建築学会・建築工事標準仕様書 JASS8 防水工事、表1.5に建築工事管理指針から抜粋した内容を、それぞれ年版ごとに表記する)。現在では、50m²に1箇所程度が主流となっている。これは、長年の施工実績により決定された経験則であり、この面積換算手法が実務で広く使用されている。

表 1.4 脱気装置の設置に関する記述

(日本建築学会・建築工事標準仕様書 JASS8 防水工事)

	面積範囲	内容
1986年版 ⁽⁴⁾	30～100m ²	・シート防水の項に、「30～100m ² 」の記載あり(68頁) ・ふくれ予防策として各種の脱気装置がある。(112頁)
1993年版 ⁽¹⁶⁾	—	通気緩衝シートは脱気装置との組合せで効果があることは明記されている。(179頁)
2000年版 ⁽¹⁷⁾	50～100m ²	一般に50～100m ² ごとに設置するが、屋上の構造、用途、防水下地の含水率などにより増設することがある。(238頁)
2008年版 ⁽¹⁸⁾	50～100m ²	一般に50～100m ² 程度ごとに設置するが、屋上の構造、用途、防水下地の乾燥状況などにより増設することがある。(258頁)
2014年版 ⁽¹⁹⁾	50～100m ²	一般に50～100m ² 程度ごとに設置するが、屋上の構造、用途、防水下地の乾燥状況などにより増設することがある。(273頁)

表 1.5 脱気装置の設置に関する記述

(建築工事監理指針及び建築改修工事管理指針)

		内容	掲載頁
平成元年版 ⁽⁵⁾	監理	50～100m ² に1か所	715
平成4年版 ⁽¹⁹⁾	改修	50～100m ² に1か所	138
平成5年版 ⁽²⁰⁾	監理	50m ² に1か所程度	811
平成9年版 ⁽²¹⁾	監理	50m ² に1ヶ所程度	768
平成10年版 ⁽²²⁾	改修	50m ² に1ヶ所程度	186
平成13年版 ⁽²³⁾	監理	50m ² に1箇所程度	828
平成14年版 ⁽²⁴⁾	改修	50m ² に1ヶ所程度	218
平成16年版 ⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾	監理・改修	50m ² に1箇所(1ヶ所)程度	監理：816, 改修：231
平成19年版 ⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾	監理・改修	50m ² に1箇所(1ヶ所)程度	監理：823, 改修：237
平成22年版 ⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾	監理・改修	50m ² に1箇所(1ヶ所)程度	監理：816, 改修：239
平成25年版 ⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾	監理・改修	50m ² に1箇所(1ヶ所)程度	監理：854, 改修：257

【注】監理：建築工事監理指針

改修：建築改修工事管理指針

このように、通気緩衝工法を構成する通気緩衝シートの通気性能や、脱気装置の設置位置の指定や設置個数は、概略が提示されているものの、その根拠は不明瞭であり、定量的にどのようなものが適切なのかという議論は十分にされていない。

通気緩衝工法の誕生から40年近く経った現在、ウレタンゴム系塗膜防水で屋上平場を施工する場合、ほぼ通気緩衝工法が採用されており、ウレタン防水の需要拡大とともに、今後も施工面積が増えていくと思われる。しかし、様々な種類の通気緩衝シートが現在市場に供給されており、防水施工者の不足も重なり、簡易的に施工できるものが好まれるようになってきている。定量的な性能値が定義されていないため、通気性能にも幅があると考えられる。

これらのことから、防水実務者からは、今後の新たなる通気緩衝工法を構成する部材の開発や、施工需要の拡大に合わせた、通気緩衝シートの通気性能と脱気装置の位置と個数による定量的な脱気効果を明らかにし、脱気設計方法を整備することが望まれている。

1.4 既往の研究

(1) 防水層のふくれに関する文献

防水層における“ふくれ”に関する研究は古くからなされており、主に形成メカニズムに関して多い。

橋田等⁽³¹⁾⁽³²⁾はコンクリート下地から発生する、水蒸気圧と空気の膨張圧による“ふくれ圧力”の発生は、下地コンクリートの透気性に強く依存することを、実環境を模擬した実験と数値解析により示し、コンクリート内の圧力拡散数値解析手法を用いることにより、ふくれの成長過程を定量的に説明できることを明らかにしており、これ以前の研究を総括出来る内容となっている。しかし、ふくれを形成するメカニズムに関する研究であり、ふくれの防止法まで踏み込んだ内容の研究はなされていない。

(2) 通気性に関する文献

通気緩衝シートの脱気効果に関する研究はそれほど多くはないが、初期の研究としては JASS8 のふくれ試験に準拠した通気試験が森山等⁽³³⁾によってなされている。引き続き透湿試験、ふくれ試験も北山等⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾によりなされ、試験結果の意義について述べられている。また通気性との関連で、呼吸性をもつシートの開発が添田等⁽³⁶⁾によりなされ、ふくれ防止に有効な防水システムとして提案されている。同様な材料・工法の開発が山田等⁽³⁷⁾、武田等⁽³⁸⁾によってもなされ、より作業性の考慮された通気緩衝シートが報告されている。

これらはいずれも各種の試験がされているものの、通気緩衝シートや工法の開発が目的であり、試験方法自体の開発や測定の意味等については議論されておらず、系統的な現象の評価には至っていない。またウレタンゴム系塗膜防水や通気緩衝工法が、わが国が中心として発展させた工法であるため、海外ではこの種の研究がほとんどない。

(3) 脱気装置に関する研究

脱気装置の研究は、松本等⁽³⁹⁾によって湿気と圧力を外気に放出することが出来ることを、透湿試験及び圧力減衰試験により証明しているが、装置単体での評価であり、コンクリート下地や通気緩衝シートとの相互関係及び設置位置や個数に関する議論はされていない。

海外においては、元々脱気装置自体が海外より日本に導入されたこともあり、古くから使用されている。しかし、コンクリートスラブ上には断熱材（ボード）が設けられ、その上に防水層を形成する工法が一般的であり、下地コンクリート及び断熱材中の湿気を排出する目的で使用される。海外においても日本と同様にふくれは問題とされており、断熱材中の圧力を排出させ、ふくれを防止する意味でも脱気装置は必要とあるが、定性的な報告⁽⁴⁰⁾のみであり、脱気のマカニズムまでは捉えられていない。

1.5 本研究の目的と構成

本研究では、ウレタンゴム系塗膜防水における“ふくれ”の防止策として、現在最も有効な手段である、通気緩衝工法の脱気効果を証明することを目的としている。工法を構成している通気緩衝シートの通気性能と脱気装置の位置や個数による脱気効果への影響を、数値的根拠を基に明らかにし、定量的な設計方法の方向性を提示する。

本論文は全5章より構成され、通気緩衝シートの通気効果、脱気装置の脱気効果、そしてそれらを基にした脱気設計法の3つに大別される。各章の概要は以下の通りである。

第2章「通気緩衝シートの通気効果の定量化」では、通気緩衝シートの通気性を定量化する性能値を的確に測定するために、透気係数測定法を開発し、夏季の屋外環境下にてコンクリートを下地とした、ウレタンゴム系塗膜防水密着工法と通気緩衝工法の防水層裏面に発生する圧力を測定した実験と、透気係数を用いた圧力変化の数値解析とを比較することで、通気緩衝工法における通気緩衝シートによる通気効果を定量的に明らかにする。

第3章「脱気装置の位置と数による脱気効果の定量化」では、コンクリート下地からの急激な圧力上昇を模擬できる試験装置を開発し、これを用いた防水層裏面の加圧実験により、通気緩衝シート通気層での圧力の挙動を圧力発生源、通気層、脱気装置との関係で明らかにする。また、この通気緩衝工法における脱気の数値解析手法を開発し、これらの事象を数値解析の面からも明らかにする。

第4章「脱気設計方法の検討」では、脱気設計方法の一つの方向性として、第3章で開発した数値解析手法に基づく脱気設計プロセスを示すとともに、簡易的な脱気設計方法の一つの方向性として、脱気設計時に簡便に利用できる脱気装置からの面積内最大距離に基づく評価方法と脱気設計のプロセスを提案する。また、これらの脱気設計プロセスに従い、実際の屋上平面図を用いて定量的な脱気設計を実践する。

第5章「結論」では、各章で得られた研究成果を要約し、本論文の総括結論を述べる。

【第1章での参考文献】

- (1) JIS A 6021 屋根防水用塗膜材：日本規格協会, 1976. 5
- (2) 1981年版建築工事標準仕様書・同解説 JASS8：日本建築学会, 1981. 2
- (3) ウレタン塗膜防水施工マニュアル：日本ウレタン建材工業会, pp. 82-95, 2012. 3
- (4) 1986年版建築工事標準仕様書・同解説 JASS8：日本建築学会, p. 68, p. 112, 1986. 3
- (5) 建築工事施工監理指針平成元年版：建設大臣官房官庁営繕部監修, 営繕協会, p. 715, 1992
- (6) 日本建築学会材料施工委員会塗膜防水補強布 WG：ウレタンゴム系塗膜防水における通気緩衝シートの性能と評価方法 3. 通気緩衝シートの透気性能と評価方法, 第6回防水シンポジウム資料集, pp. 137-155, 2011. 11
- (7) 建設大臣官房技術調査室監修「建築防水の耐久性向上技術」, 博報堂出版, 1987年
- (8) 古賀純子, 根本かおり, 濱崎仁, 鹿毛忠継, 本橋健司, 大久保孝昭, 田中享二：建築研究資料. NO. 145 建築物の長期使用に対応した外装・防水の品質確保ならびに維持保全手法の開発に関する研究, 独立行政法人建築研究所, p318, 2013. 8
- (9) 若林秀幸, 齊藤隆, 近藤照夫, 小倉哲義, 鈴木博, 今井田和典：下地コンクリートの含有水分がウレタン塗膜防水工法に及ぼす影響 その3 ふくれを発生させる簡易的実験方法；日本建築学会大会学術講演梗概 A-1, pp. 29-30, 2009
- (10) 今井田和典, 齊藤隆, 近藤照夫, 小倉哲義, 鈴木博, 若林秀幸：下地コンクリートの含有水分がウレタン塗膜防水工法に及ぼす影響 その4 プライマーの種類とふくれ発生の関係；日本建築学会大会学術講演梗概 A-1, pp. 35-36, 2010
- (11) 今井田和典, 近藤照夫, 齊藤隆, 鈴木博, 若林秀幸：下地コンクリートの含有水分がウレタン塗膜防水工法に及ぼす影響 その5 プライマーの種類とふくれの発生；日本建築学会大会学術講演梗概 A-1, pp. 7-8, 2011
- (12) 神山慶之, 齊藤隆, 今井田和典, 鈴木博, 若林秀幸：下地コンクリートの含有水分がウレタン塗膜防水工法に及ぼす影響 その6 プライマーの硬化性とふくれの発生；日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 739-740, 2013

- (13)2014 年版建築工事標準仕様書・同解説 JASS8：日本建築学会， p. 43, p. 273, 2014. 11
- (14)建築工事監理指針平成 25 年版：国土交通省大臣官房官庁営繕部監修， 公共建築協会， 2013
- (15)建築改修工事監理指針平成 25 年版：国土交通省大臣官房官庁営繕部監修， 建築保全センター， 2014
- (16)1993 年版建築工事標準仕様書・同解説 JASS8：日本建築学会， p. 182, 1993. 1
- (17)2000 年版建築工事標準仕様書・同解説 JASS8：日本建築学会， p. 238, 2000. 7
- (18)2008 年版建築工事標準仕様書・同解説 JASS8：日本建築学会， p. 258, 2008. 2
- (19)建築改修工事監理指針平成 4 年版：建設大臣官房官庁営繕部監修， 建築保全センター， 1992
- (20)建築工事施工監理指針平成 5 年版：建設大臣官房官庁営繕部監修， 公共建築協会， 1993
- (21)建築工事監理指針平成 9 年版：建設大臣官房官庁営繕部監修， 公共建築協会， 1998
- (22)建築改修工事監理指針平成 10 年版：建設大臣官房官庁営繕部監修， 建築保全センター， 1999
- (23)建築工事監理指針平成 13 年版：国土交通省大臣官房官庁営繕部監修， 公共建築協会， 2002
- (24)建築改修工事監理指針平成 14 年版：国土交通省大臣官房官庁営繕部監修， 建築保全センター， 2003
- (25)建築工事監理指針平成 16 年版：国土交通省大臣官房官庁営繕部監修， 公共建築協会， 2005
- (26)建築改修工事監理指針平成 16 年版：国土交通省大臣官房官庁営繕部監修， 建築保全センター， 2006
- (27)建築工事監理指針平成 19 年版：国土交通省大臣官房官庁営繕部監修， 公共建築協会， 2007
- (28)建築改修工事監理指針平成 19 年版：国土交通省大臣官房官庁営繕部監修， 建築保全センター， 2008

-
- (29) 建築工事監理指針平成 22 年版：国土交通省大臣官房官庁営繕部監修，公共建築協会，2010
- (30) 建築改修工事監理指針平成 22 年版：国土交通省大臣官房官庁営繕部監修，建築保全センター，2010
- (31) 橋田浩，田中享二，小池迪夫：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；日本建築学会構造系論文報告集，第 416 号，pp35-45，1990.10
- (32) 橋田浩，田中享二，小池迪夫：防水層下地としてのコンクリートスラブの特性とふくれ形成圧力挙動，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 2；日本建築学会構造系論文報告集，第 427 号，pp39-46，1991.9
- (33) 森山聡，土田恭義，北山大：防水層の通気性評価方法に関する研究，その 1 予備的検討；日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 907-908，1996
- (34) 北山大，土田恭義，森山聡：防水層の通気性評価方法に関する研究，その 2 ふくれ試験の実施；日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 355-356，1997
- (35) 北山大，新納敏文：防水層の通気性評価方法に関する研究，その 3 ふくれ空間内部温度湿度に関する実験的考察；日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 201-202，1998
- (36) 添田智美，北山大，新納敏文，近森芳裕，小野雅司，福田健太郎，福井善健，平山勲，鈴木悦之：透湿性防水シートの開発；日本建築学会技術報告集，第 16 号，pp. 31-36，2002.12
- (37) 山田靖司，野口秀夫，富岡賢一，渡辺光：密着通気クロスの開発及びそれを用いた防水層の性能試験，その 2 下地への接着力と通気性能；日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 919-920，2004
- (38) 武田晋治，阿知波政史，加藤香織，富岡賢一，野口秀夫：2 成分反応形アクリルゴム系塗膜防水材を用いた環境対応形通気緩衝工法の開発；日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 835-836，2005
- (39) 松本知大，黒木勝一：防水層における脱気装置の性能評価方法について；日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 833-834，2005
- (40) Korhonen, C&B. Charest, "Roof Blister, Cause & Cure", US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Report 95-19, July(1985)
-

第 2 章

通気緩衝シートの通気効果の定量化

2.1 はじめに

2.2 通気緩衝シートの通気効果確認のための屋外実験

2.3 通気緩衝シートの通気効果の数値解析

2.4 まとめ

第2章 通気緩衝シートの通気効果の定量化

2.1 はじめに

下地となるコンクリートとウレタン塗膜の間に敷設される通気緩衝シートは、第1章でも述べた通り 1979 年の工法誕生から様々な種類が上市されている。表 2.1 に、日本建築学会・建築工事標準仕様書 JASS8 防水工事⁽¹⁾に記載されている、現在市場に供給されている主な通気緩衝シートの種別と特徴を示す。

表 2.1 主な通気緩衝シートの種別と特徴（解説表 1.37⁽¹⁾）

種別		特徴	張付け方法
不織布タイプ	穴なし	特殊加工した不織布などの表層と、通気層となる不織布の下層を積層している	下地に接着剤を塗布して張り付ける
	穴あき	特殊加工した不織布などの表層と、通気層となる不織布の下層が積層され、一定間隔で全体に穴あき加工されている	下地に接着剤を塗布して張り付けた後に、立上り用または目止め用ウレタンゴム系防水材料をシートの穴に充填して張り付け、アンカー効果による接着力を持たせる
複合タイプ	自着	特殊加工した表層フィルムなどに改質アスファルト、不織布、プラスチック発泡体、プラスチックフィルム、ガラスクロス、ゴムシートなどを積層し、最下層に改質アスファルトやブチルゴムによる自着層を設けている	下地にプライマー塗付後に直接張り付ける
	接着剤	特殊加工した表層フィルムなどに改質アスファルト、不織布、プラスチック発泡体、プラスチックフィルム、ガラスクロス、ゴムシートなどを積層したもの	下地に接着剤を塗布して張り付ける
	機械的固定	特殊加工した表層フィルムなどに改質アスファルト、不織布、プラスチックフィルム、ガラスクロス、ゴムシートなどを積層したもの	下地にディスクとアンカーを用いて固定する

シートの種別は、構成材料により『不織布タイプ』と『複合タイプ』とに分かれている。下地への張付け方法としては、シート自体に接着層を有しているものは、下地にプライマーを塗布し、硬化後に張付ける。接着層を有していないものは、接着剤としての機能を付加したプライマーを塗布下地に塗布し、オープンタイムを待ち張付ける。また、シート防水工法では、ディスクとアンカーを用いた機械的固定により張付ける方法もある。

その中で、現在でも広く一般的に使用されているのが、写真 2.1 に示すようなポリエステル不織布に・ニードルパンチ加工（針で機械的に繊維同士を絡ませる加工）された穴あき不織布タイプの通気緩衝シートである。接着剤となるプライマーを塗布し、シートを張付けた後、写真 2.2 に示す様に、シートの穴あき部分に、粘度の比較的高いパテ状のウレタンを流し延べ、穴を埋めて硬化させる。この穴に流し込まれたウレタンが、下地と強固に貝柱の様に接着する工法である。一般的にこの工程を“目止め”といい、使用する材料を“目止め材”と呼ぶ。この後、目止め材の硬化を待ち、ウレタン防水層を 3mm の膜厚にて施工する。



写真2.1 通気緩衝シート（穴あき不織布タイプ）張付け工程



写真2.2 通気緩衝シート張付け時“目止め”工程

この種別を含め、様々な通気緩衝シートが市場に供給されているが、どのシートにおいても、コンクリート下地とウレタン防水層との間に挿入する目的は、下地の追従効果とふくれの防止効果である。特にふくれは、コンクリート下地に残存した水分と空隙中の気体が、太陽光より熱せられることにより圧力が発生し、防水層を押し上げることにより発生することが知られている⁽²⁾⁽³⁾。ふくれを防止するために、圧力を通気緩衝シート中に導き、大気に排出する性能を有していることは大前提である。ここには大きな抵抗がかからないようにする必要があり、シートは通気性（透気性）に優れているものでなくてはならない。

第1章でも触れた通り、通気緩衝シートを用いた工法は、経験的に開発されてきた経緯のため、そのふくれ防止効果と評価について定量的に検証されたことはなく、さらには実際に施工された通気緩衝シート通気層内について、何かしらの物理量の測定がなされたこともないというのが実情である。

近年の補修改修工事の増加に伴い、今後さらに多種多様の通気緩衝シートが市場に供給され、実務で使用されることが予想され、どのような通気緩衝シートであればふくれ防止に有効であるか、判断要素となる定量的な性能試験による性能目標値を示すことは急務である。また、通気緩衝工法では、排気のために脱気装置を設置しなければならないが、数や位置は、通気緩衝シートの通気性（透気性）のデータをもとに設計・設置される必要があり、これらの組合せが重要になってくる。

これらを背景に、本章では通気性（透気性）を的確に測定しうる試験法を開発し、同時に通気緩衝シートの通気性に関する解析モデルを提示した上で、実測結果を用いて塗膜防水工法における通気緩衝シートの通気効果を明らかにすることを目的とする。

2.2 通気緩衝シートの通気効果確認のための屋外実験

通気緩衝シートの通気効果を確認するための圧力測定法を考案し、これを用いて屋外の実環境において、コンクリート下地とウレタン塗膜防水間に発生する圧力測定を行った。

2.2.1 試験体

通気効果確認のための試験体としては、ある程度の面積が必要であるが、ここでは、防水の改修工事時にウレタンゴム系塗膜防水の下地となる、建物屋上の押えコンクリート（保護コンクリート）の伸縮目地の一般的な間隔も考慮に入れ、2m×2mの大きさとした。また、コンクリートの厚さは実際の屋根スラブを想定して150mmとした。コンクリートは通常の建築工事に使われる程度の、表2.2に示す調合とした。

表 2.2 下地コンクリートの調合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)						スランプ (cm)
	水*1	セメント*2	細骨材①*3	細骨材②*4	粗骨材	混和剤*5	
56.5	178	316	689	172	917	3.19	18

*1 上水道水・上澄水 , *2 普通ポルトランドセメント ,

*3 砕砂（栃木県佐野市閑馬町産） , *4 川砂（千葉県印旛郡栄町）利根川 ,

*5 AE減水剤標準型I種

(1) 試験体の構成

試験体の構成を図2.1に示す。コンクリート下地裏面の開放状態は、デッキプレートを用いた屋根スラブを下地とする場合や、押さえコンクリートを下地とする場合等、裏面が密閉されている状態も想定でき、コンクリート下地から発生する圧力が裏面から逃げない分、防水層裏面に発生する圧力も大きくなると想定できる。そこで、コンクリート下地裏面を開放したものと、密閉したものの2種類とした。

コンクリート裏面開放下地の1体はウレタンの密着工法（公共建築工事標準仕様書X-2（密着工法）及び日本建築学会・建築工事標準仕様書JASS8防水工事ウレタンゴム系高伸長形塗膜防水工法・密着仕様（L-UFS）に準ずる）とした。コンクリート裏面密閉ものはウレタンの密着工法と通気緩衝工法（穴あき不織布タイプ、厚さ

1.0mm) (公共建築工事標準仕様 X-1 (絶縁工法) 及び日本建築学会・建築工事標準仕様書 JASS8 防水工事 ウレタンゴム系高伸長形塗膜防水工法・絶縁仕様 (L-USS) に準ずる) の2種類とした。通気緩衝工法の試験体については、通常脱気装置を設置するが、本章では通気緩衝シートによる通気効果を検証するためにシート端部は大気に開放した。

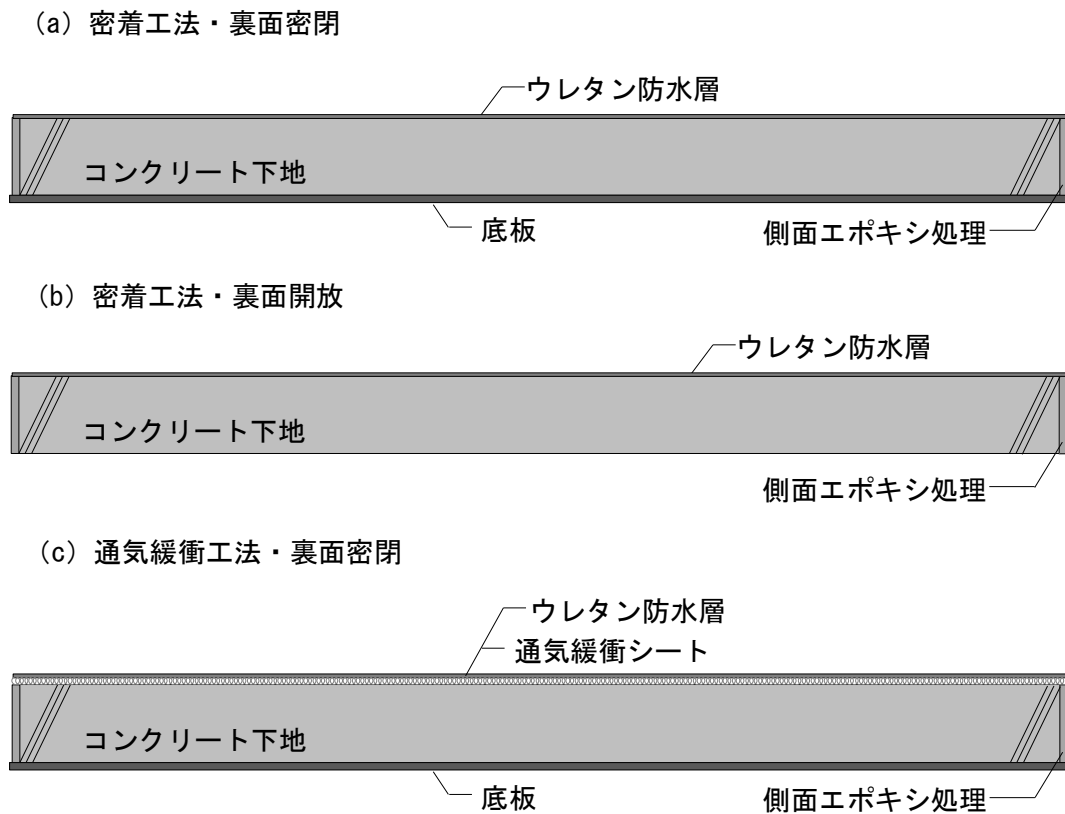


図2.1 試験体の構成

(2) 試験体の施工

写真2.3～2.5に示すようにメッシュ鉄筋の敷設してある型枠内にコンクリートを打設し、表面は金鋺で平滑に仕上げた。その際、後述の圧力測定の際に使用する直径22mm、深さ10mmの穴を、写真2.6に示すように金属製のジグを用いて丁寧に開けた。その後、写真2.7に示すように封緘養生を行った。

2週間後に写真2.8に示すように脱型を行い、直ちにコンクリート試験体側面を写真2.9に示すようにエポキシ樹脂によりコーティングを行った。これも後述の圧力測定時に、側面からの圧力散逸を防止するためである。試験体は3体作製したが、そのうちの2体はデッキプレート上を想定して底板を残した。1体は通常のコンクリートスラブを想定して底板を除去し、下地裏面を開放した。

さらに1週間放置後に、防水層の施工を開始した。つまり、コンクリートは打ち込みから3週間の屋外養生期間となる。これは実際の施工で多く行われる防水施工までの期間を模したものである。また、通気緩衝工法の試験体では、図2.2及び写真2.10に示すような納まりで、試験体の四方の端部に、雨水の浸入を防ぐためにL字のアンクルを取り付けた。

防水層施工の翌日に写真2.11に示すように、アクリル・ウレタン系の保護仕上材を塗布した。黒色は一般的ではないが、太陽光による下地の温度上昇を大きくするためである。その後、試験開始まで屋外環境下にて養生を行った。



写真2.3 試験体型枠



写真2.4 コンクリート打設



写真2.5 表面金鋳仕上げ



写真2.6 ふくれ模擬空間の作製

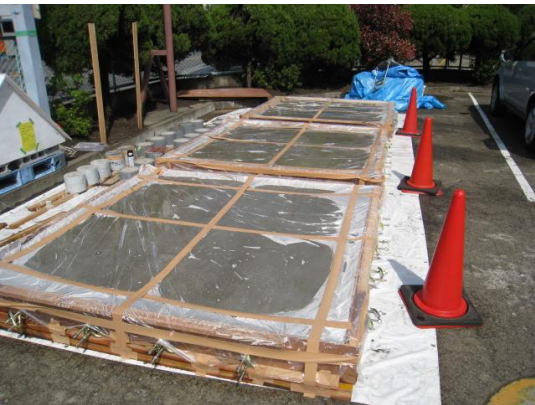


写真2.7 封緘養生

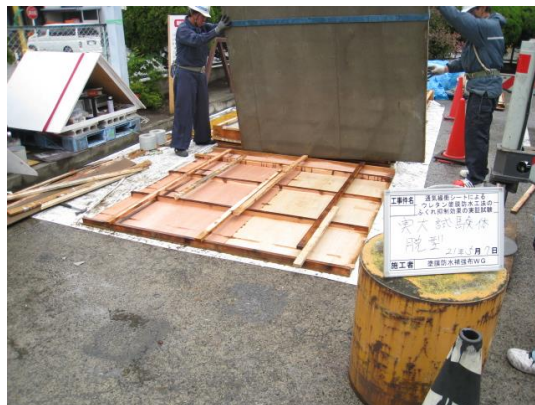


写真2.8 脱型



写真2.9 試験体側面エポキシ樹脂コーティング

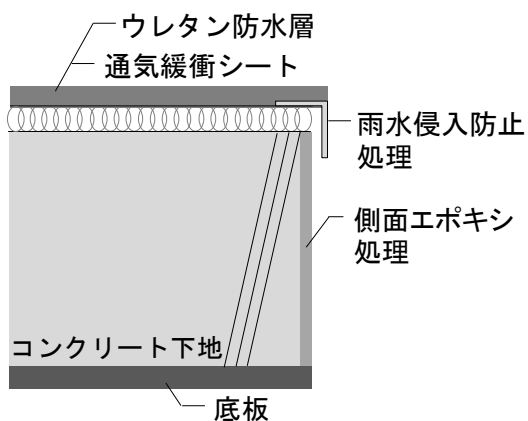


図2.2 通気緩衝工法試験体
側面納まり



写真2.10 通気緩衝工法試験体
側面納まり



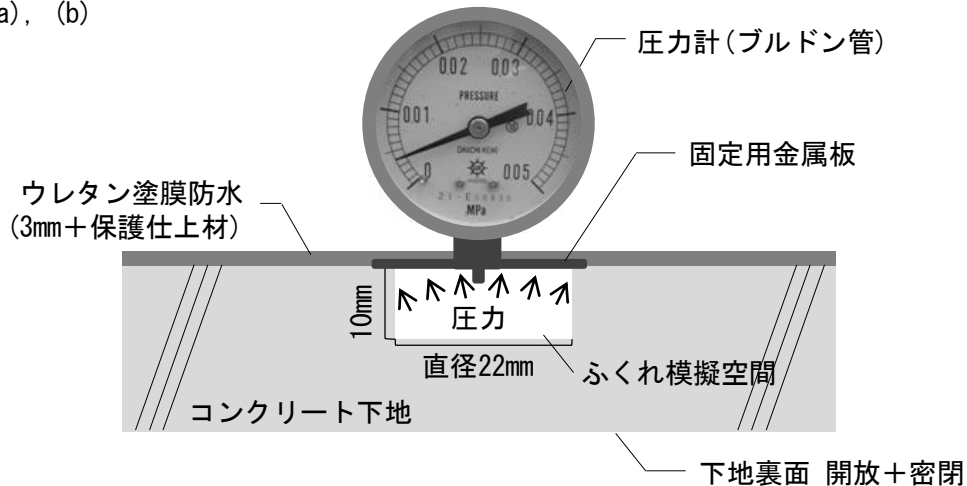
写真2.11 トップコート塗布

2.2.2 圧力測定部の概要

防水層と下地コンクリート間の圧力測定のために、既往の研究⁽²⁾⁽³⁾を参考に、事前に下地コンクリート打設の時に作製した直径22mm、深さ10mmの穴をあけ、これを使用する。これを『ふくれ模擬空間』とした。この上に、図2.3に示すように長野計器社製ブルドン管方式の圧力計を取り付けた。計測範囲は0~0.05MPa(0~50kpa)であり、正圧しか測定できない機構のため、防水層温度が低下する夜間に生じる可能性のある負圧⁽²⁾を測定できないという短所をもつが、もともと防水層のふくれの発生は正圧で生じる現象であり、ここでは正圧の測定を主な対象とした。また圧力測定に合わせて、別途用意したT型熱電対を、防水層裏面を測定できるように設置し、温度測定を行った。

【密着工法試験体】

(a), (b)



【通気緩衝工法試験体】

(c)

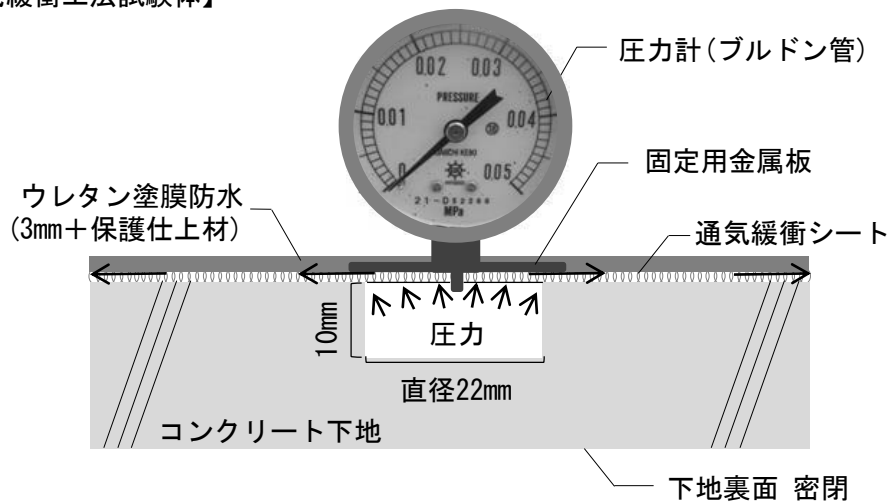


図2.3 圧力測定部

2.2.3 測定の概要

試験体は写真 2.12 に見られるような日当たりの良い敷地（埼玉県戸田市）に、水平に設置した。防水層裏面の温度を測定する T 型熱電対は、東京測器研究所製の静ひずみ測定機 TDS-303 に接続し測定値を収集した。測定は下記のように実施した。

（1）同時刻の圧力変化測定

防水層施工後、顕著な圧力上昇の見られるようになったから日から、圧力が大きくなる 12:00 の圧力変化を測定するために、毎日圧力計を目視にて測定し、ふくれ模擬空間内温度の測定値を 30 分おきに収集した。測定は夏期の 4 ヶ月間行った。

（2）一日の圧力変化測定

圧力の 1 日の変化を測定するために、梅雨明けの昼夜の温度変化が大きいと考えられる日に、24 時間 30 分おきに圧力計を目視にて測定を行い、防水層裏面の温度測定値を 30 分おきに収集した。



写真 2.12 試験の状況

2.2.4 測定結果

(1) 同時刻の温度と圧力測定結果

測定期間中の12:00における、防水層裏面の温度測定結果を図2.4に、ふくれ模擬空間内の圧力測定結果を図2.5に、それぞれ示す。測定期間中の模擬空間内の圧力は、ウレタン防水層密着工法の場合、コンクリート下地裏面が開放されている試験体では、それほど大きな圧力は観測されておらず、最大でも3kPaであったが、同じ密着工法でも裏面が型枠材で密閉されている場合は、ふくれ模擬空間内圧力が高まり、最大9kPa（防水層裏面温度55℃）を観測した。

一方、通気緩衝シートを挿入した工法では、下地コンクリート裏面が密閉されている場合でも、圧力上昇はほとんど見られず、ふくれ模擬空間内部の圧力は通気緩衝シートを通して、外部に放出されていることが確認された。

(2) 一日の温度と圧力変化測定結果

一日の測定期間中30分おきに収集した、防水層裏面の温度測定結果を図2.6、ふくれ模擬空間内圧力の測定結果を図2.7に示す。温度上昇に対応するように圧力も上昇していることが見て取れる。ふくれ模擬空間内の圧力は、密着工法の場合コンクリート下地裏面が開放されている試験体では、最大でも1kPaであったが、同じ密着工法でも裏面が型枠材で密閉されている場合は、模擬空間内圧力が高まり、最大8kPa（防水層裏面温度54℃）を観測した。一方通気緩衝シートを挿入した工法では、圧力の上昇はほとんど見られなかった。

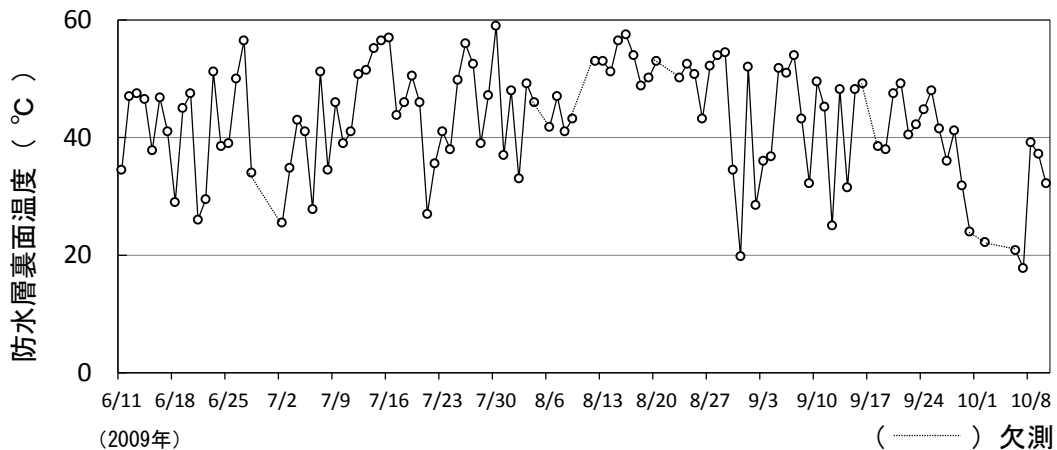


図2.4 12:00における測定期間中の防水層裏面の温度測定結果

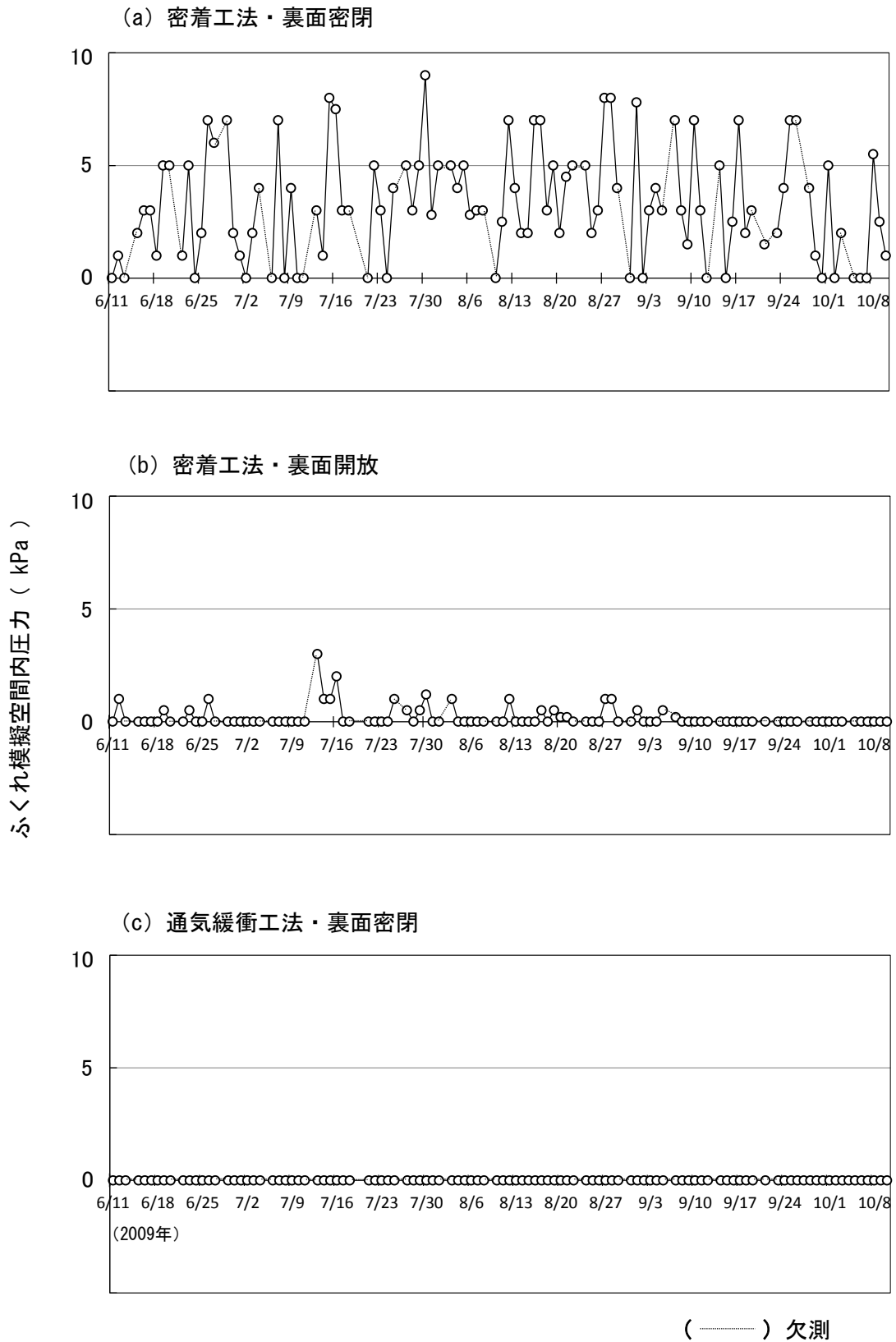


図2.5 12:00における測定期間中のふくれ模擬空間内圧力の測定結果

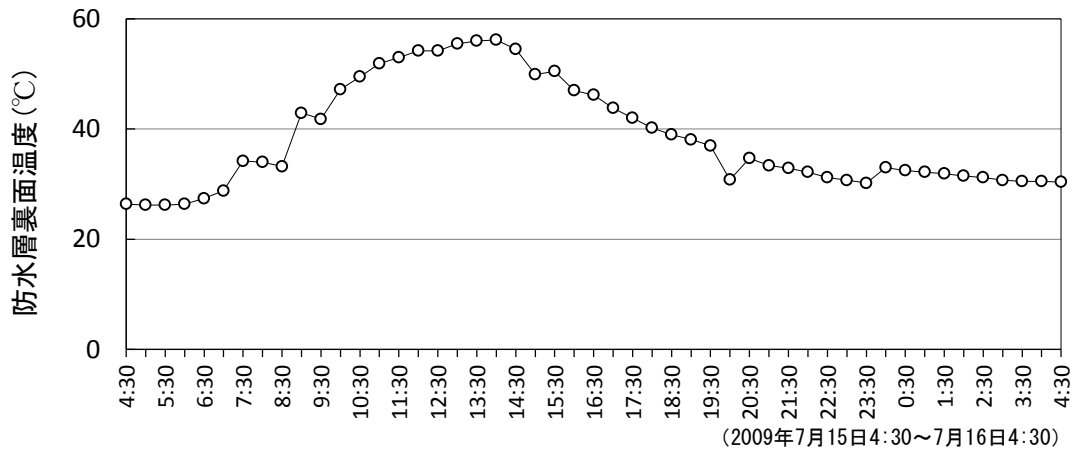


図2.6 一日の防水層裏面温度変化の測定結果

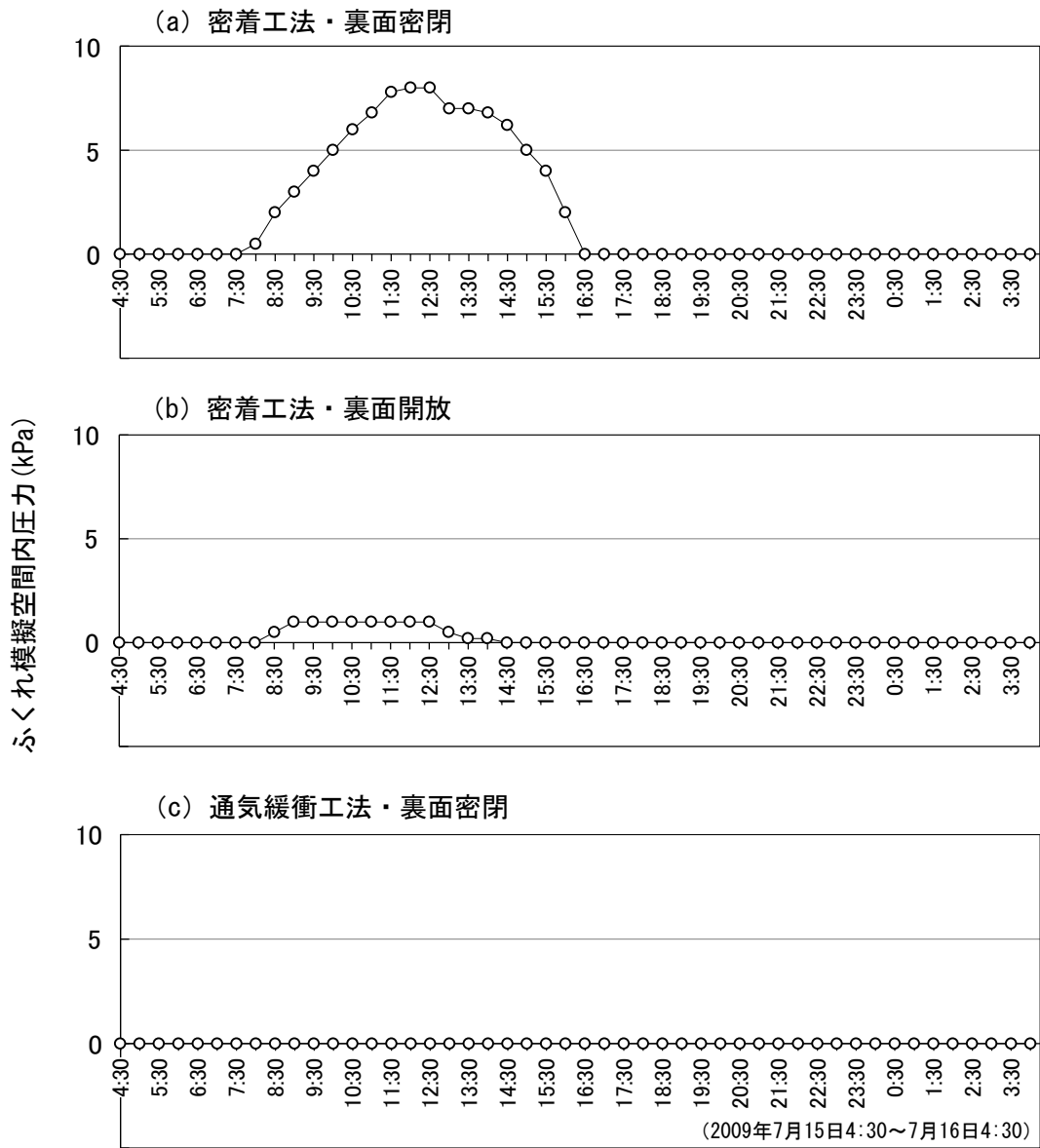


図2.7 一日のふくれ模擬空間内圧力変化の測定結果

2.3 通気緩衝シートの通気効果の数値解析

通気緩衝シートの使用による、防水層裏面に発生する圧力の状態を数値解析の面から検討することは、その役割を説明するばかりではなく、その効果を定量化することも可能となる。ここでは、通気緩衝シートの通気性を表す性能値の測定方法の開発を行うと共に、性能値を用いた数値解析を行い、通気緩衝シート使用による通気効果を明らかにする。

2.3.1 圧力挙動理論式

既往の論文⁽²⁾より、防水層裏面に発生する圧力挙動の理論式は、水蒸気圧、空気膨張圧の変化と圧力のコンクリート中への拡散から成る。この発生圧力が、通気緩衝シート内の通気層を通して大気へ拡散する。また拡散は、透気性を表す透気係数から導くことが出来る。以下に、圧力挙動の理論式を示す。

コンクリートの空隙中の温度における湿り空気の圧力を、乾燥空気の分圧と水蒸気分圧に分けて考えれば、

$$P = \left(\frac{P_0}{\rho_0 T_0} \right) \rho T_K + P_V \quad (2.1)$$

となる。ここで、 P は全圧、右辺第一項は乾燥空気の分圧で ρ は乾燥空気の密度、 T_K 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℃程度であれば、乾燥空気の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、ダルシーの流れに従って浸透するとすれば、

$$\vec{v} = \left(\frac{k}{\mu} \right) \text{grad } P \quad (2.2)$$

である。ここで \vec{v} は流速 (m/s)、 k は透気係数 (m^2)、 μ は空気の粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)、 P は全圧 (Pa) である。

また、コンクリートの有効気相空隙率、つまり、気体の透過可能な水分で満たされていない空隙量のコンクリート全体の容積に対する割合 (以下、有効空隙率と呼ぶ) を ε とすれば、流体の連続方程式は次式となる。

$$\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(\rho v) \quad (2.3)$$

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 (2.1)、(2.2)、(2.3) の3式より、

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \left(\frac{P_0 k T_K}{\rho_0 \varepsilon T_0} \right) \text{div} \frac{\rho}{\mu} \text{grad} P + \frac{P_0 \rho}{\rho_0 T_0} \frac{\partial T_K}{\partial t} + \frac{\partial P_V}{\partial t} \quad (2.4)$$

となる。(2.4)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。

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \left(\frac{P_0 k}{\varepsilon \mu} \right) \text{div} \text{grad} P + \frac{\partial P_a}{\partial t} + \frac{\partial P_V}{\partial t} \quad (2.5)$$

ここで、 $\partial P_a / \partial t$ は熱膨張による圧力変化を表す。従って、コンクリートの空隙中の圧力変動は熱伝導や濃度拡散と相似の関係となり、拡散係数はコンクリートの透気係数および有効空隙率により定まる。 $\partial P_a / \partial t$ は、熱伝導による温度変化により導くことができ、 $\partial P_V / \partial t$ は、温度変化によるコンクリート中の相対湿度の変化が小さいとみなせることから、やはり温度変化のみで決定できる。

2.3.2 圧力発生 の理論式

(2.5) 式における P_a (圧力の乾燥空気分圧 (Pa)) はボイル・シャルルの法則により、次式から得られる。

$$P_a = \frac{273.15+T}{293.15} \times 101325 \quad (2.6)$$

ここで、 T は太陽光により温められた下地コンクリート中の温度 (°C) を表す。

P_V (圧力の水蒸気分圧 (Pa)) はテテンの実験式により、次式から得られる。

$$P_V = 611 \times 10^{\left(\frac{7.5 \times T}{7.5 + T} \right)} \quad (2.7)$$

2.3.3 数値解析モデルと解析方法

数値解析で対象としたモデルは、2.2での屋根スラブを想定した屋外実験の測定モデルとした。

(1) 数値解析モデル

防水層裏面では、温度上昇により圧力が上昇しようとするが、圧力は下地コンクリートと通気緩衝シートを通して拡散する。この状態を、圧力の拡散および熱伝導を考慮した図2.8から2.10に示すメッシュ間隔を縦1mm、横10mmとした二次元拡散モデルに置き換えた。なお、実測で用いた下地コンクリート裏面密閉の試験体であるが、底板のコンパネと側面との完全密閉が難しく、実際には多少の隙間が残っている。そのためモデルでは下端の両節点のみは大気に開放されているとした。解析は前進差分法により行い、差分計算におけるそれぞれの節点では、熱伝導による温度勾配から熱膨張圧と水蒸気圧の変化が生じ、圧力勾配に伴う拡散が生じるものとした⁽²⁾。

(2) 熱伝導解析

圧力発生の理論式に用いる、下地コンクリートの数値解析モデルにおける各セルの温度 T (°C) を、熱伝導解析により求める。離散式を(2.8)式に示す。

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \Delta t \left\{ \left(\kappa_{x(i+\frac{1}{2},j)} \frac{(T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n)}{\Delta x^2} - \kappa_{x(i-\frac{1}{2},j)} \frac{(T_{i,j}^n - T_{i-1,j}^n)}{\Delta x^2} \right) + \left(\kappa_{z(i,j+\frac{1}{2})} \frac{(T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n)}{\Delta z^2} - \kappa_{z(i,j-\frac{1}{2})} \frac{(T_{i,j}^n - T_{i,j-1}^n)}{\Delta z^2} \right) \right\} \quad (2.8)$$

ここで、 κ はコンクリートの熱拡散率 $1.05 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$ である。 $T_{i,j}^n$ の i, j は、図2.8から2.10の数値解析モデルにおける、 x 軸 z 軸方向の座標番号を、 n は時間ステップをそれぞれ表している。境界条件として、下地コンクリート表面部及び側面ライニング処理部は、図2.6の一日の防水層裏面温度変化の測定結果と差分計算を行い、底面密閉部及び裏面開放部は、常に 20°C として差分計算を行った。

(3) 圧力拡散解析

熱伝導解析により求めた各メッシュにおける温度を用いて、(2.6)式、(2.7)式にて発生圧力 $P(\text{Pa})$ を算出し、同時に (2.5) 式を用いて、コンクリート中及び通気緩衝シート層に拡散させる。(2.9)式にコンクリート層の離散式の基本式を示す。

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + \Delta t \left\{ \left(D'_{x(i+\frac{1}{2},j)} \frac{(P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n)}{\Delta x^2} - D'_{x(i-\frac{1}{2},j)} \frac{(P_{i,j}^n - P_{i-1,j}^n)}{\Delta x^2} \right) + \left(D'_{z(i,j+\frac{1}{2})} \frac{(P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n)}{\Delta z^2} - D'_{z(i,j-\frac{1}{2})} \frac{(P_{i,j}^n - P_{i,j-1}^n)}{\Delta z^2} \right) \right\} + \Delta P \quad (2.9)$$

$$\text{ここで、} \Delta P = (P_a^{n+1} - P_a^n) + (P_v^{n+1} - P_v^n) \quad (2.10)$$

$$D' = \frac{P_0 k'}{\varepsilon \mu} \quad (P_0 : \text{大気圧}(=101,325 \text{ Pa}),$$

$$k' : \text{コンクリートの透気係数 (m}^2\text{)}) \quad (2.11) \quad \text{である。}$$

$P_{i,j}^n$ の i, j は、図 2.8 から 2.10 の数値解析モデルにおける、 x 軸 z 軸方向の座標番号を、 n は時間ステップをそれぞれ表している。 Δt は 1.0×10^{-6} (sec) として解析した。また、通気緩衝シート層の離散式の基本式を (2.12) 式に示す。

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + \Delta t \left\{ \left(D_{x(i+\frac{1}{2},151)} \frac{(P_{i+1,151}^n - P_{i,151}^n)}{\Delta x^2} - D_{x(i-\frac{1}{2},151)} \frac{(P_{i,151}^n - P_{i-1,151}^n)}{\Delta x^2} \right) + \left(-D'_{z(i,151-\frac{1}{2})} \frac{(P_{i,151}^n - P_{i,150}^n)}{\Delta z^2} \right) \right\} \quad (2.12)$$

$$\text{ここで、} D = \frac{P_0 k}{\varepsilon \mu} \quad (k : \text{通気緩衝シートの透気係数 (m}^2\text{)}) \quad (2.13) \quad \text{である。}$$

(4) 圧力拡散解析時の境界条件

図 2.11 に数値解析モデルにおける境界条件を示す。図 2.8 のコンクリート下地裏面を開放したモデルでは、裏面に面する点の圧力と大気圧との差分計算を行い、コンクリート下地裏面を密閉したモデルでは、裏面に面する点で下方向に拡散が生じないものとした。下地コンクリート表面にはウレタン塗膜防水層が施工されている

ものとし、表面に面する点では、拡散してきた圧力は上方には拡散しないものとして解析を行うこととした。

図 2.10 の下地表面に通気緩衝シートを施工したモデルでは、コンクリート表面まで拡散してきた圧力が、通気緩衝シート内に拡散し、通気緩衝シート内では上方には拡散しないものとし、通気緩衝シートの拡散係数により横方向に拡散するとした。また通気緩衝シート端部では、外気に面する点の圧力と外気圧との差分計算を行う。

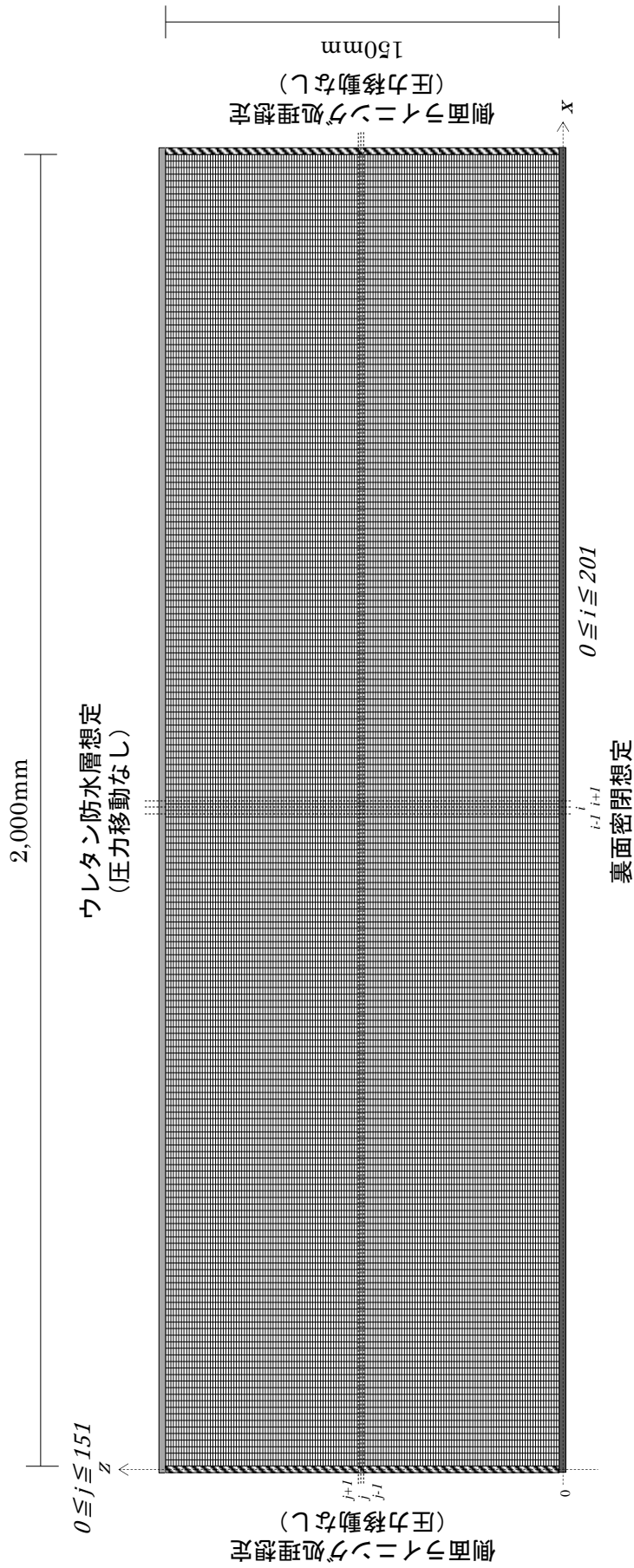


図2.8 数値解析モデル ((a) 密着工法・裏面密閉)

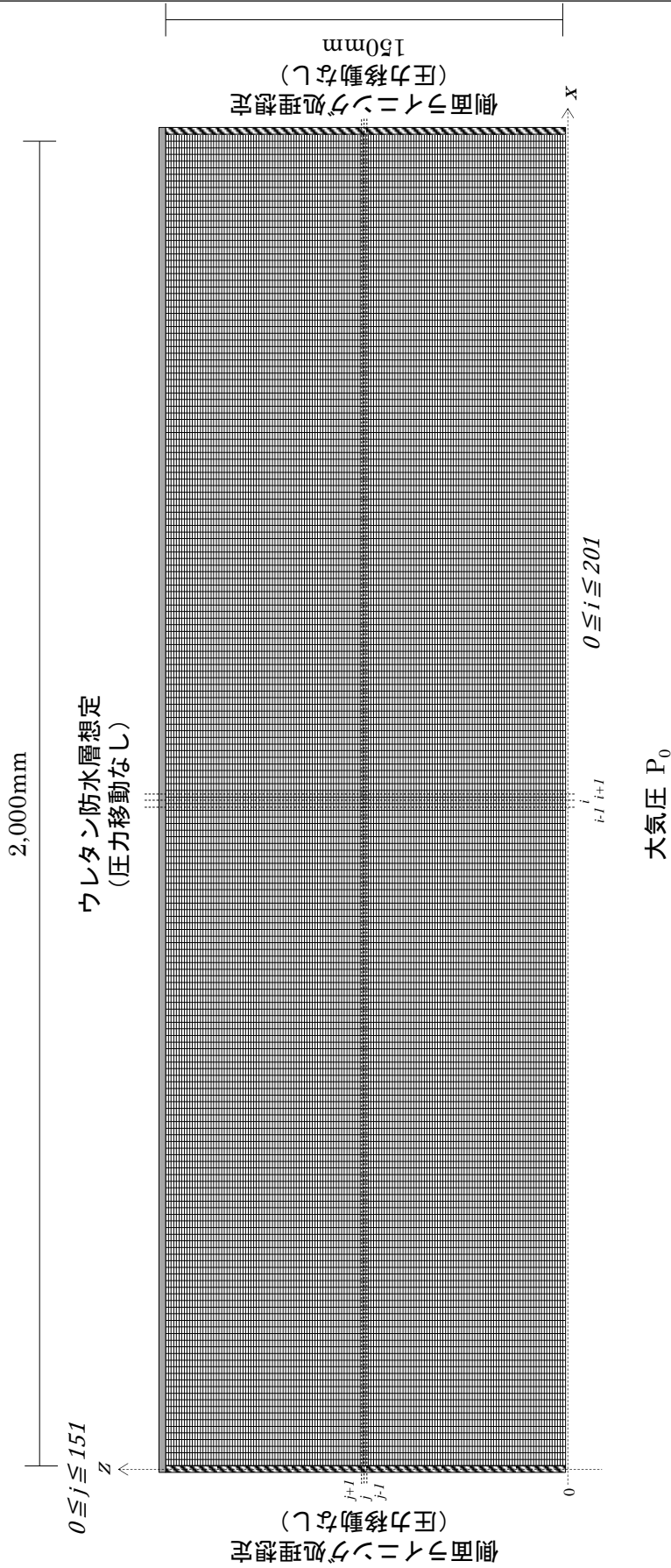


図2.9 数値解析モデル (b) 密着工法・裏面開放)

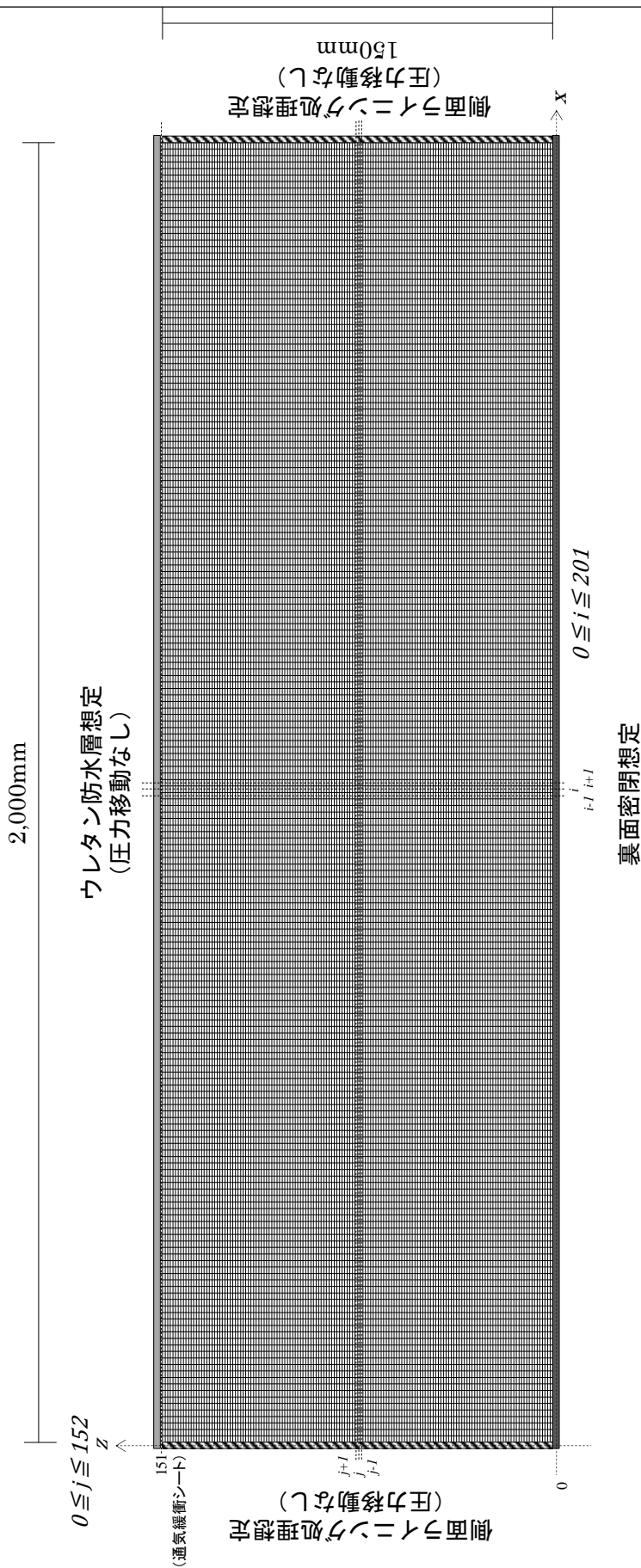


図2.10 数値解析モデル (c) 通気緩衝工法・裏面密閉)

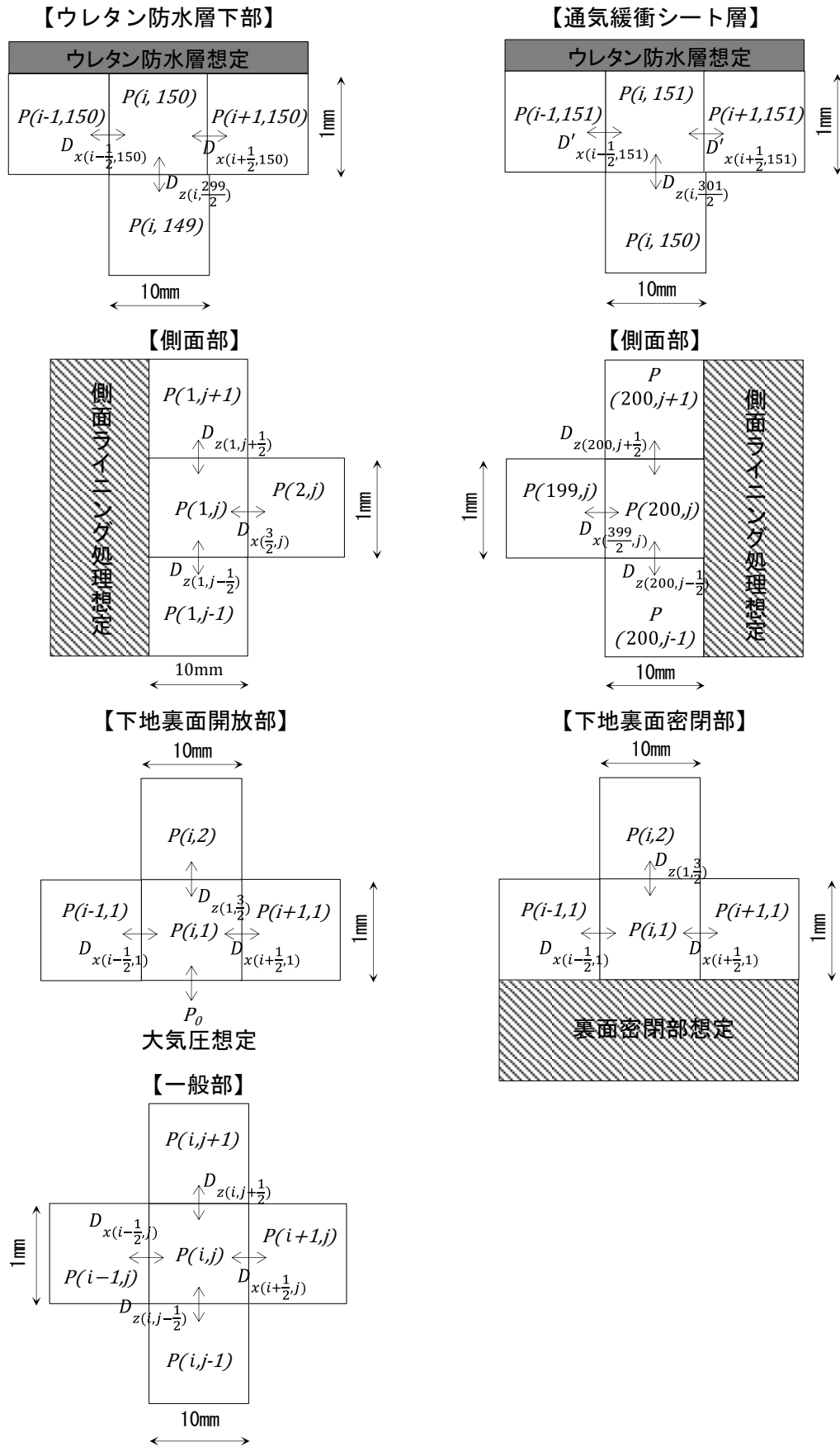


図2.11 境界条件

2.3.4 通気緩衝シートの通気性の測定

通気緩衝シート内の圧力拡散の数値解析には、通気緩衝シート透気係数が必要であり、通気性を表す物理量として定量化することにより、性能値として提示することができる。そこで、通気緩衝シートの透気係数を測定する装置を開発した。

(1) 装置の開発

通気緩衝シートの役割は、下地から発生する圧力を分散・放出させることである。そのためここで開発する試験装置は、この状態を再現する方法とした。

ここで、作製した装置の構成は図 2.12 に示すものであり、通気緩衝シート層の一方に圧力を加え、多端から流出する空気量を測定する。基本原理は 1986 年版 JASS8 に提案されているメンブレン防水層の性能評価試験方法（案）「下地との間の通気抵抗試験」を基としたものであるが、透気係数を測定するためにいくつかの変更と改善を行った。

まず、測定系における流量計の設置位置である。試験法で指示されていた位置は、おそらくは試験のしやすさを優先させたためと推定されるが、流量計が試験体の前方に設置されている。しかし、この位置では気体がまだ圧縮状態にあり、例えば圧力を変えた測定を行おうとすると、空気の密度が変わるためにたえず補正が必要となる。この点を改善し、気体が試験体を通過した後の位置に設置することとした。

次に試験体を施工する下地板であるが、その材質を石綿スレート板から金属材に変更した。石綿スレート板はコンクリートと材質が近いので下地材としては望ましいが、精度の良い平面が確保しにくいこと、また下地板に関しては、送気・排気のための溝が必要であるが、材料が脆いため、溝切り加工が難しい。これも測定値を不安定にした要因のひとつと推定される。そのためここでは、試験体の取り扱い易さも考慮して、アルミニウム合金を用いた。

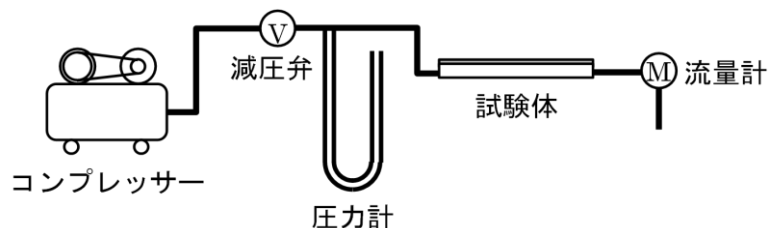


図2.12 測定装置の構成

(2) 試験体

試験体は JASS8 試験法と同様に測定有効幅を 300mm としたが、試験体長さは、通気緩衝シート長さの透気係数に及ぼす影響も調べる目的で、図 2.13 に示すような 300、500、1000、2000mm の 4 段階を用意した。試験体下地となる、アルミニウム板（試験体長さ 500mm）写真 2.13 に示す。

防水層の施工は通常行われる手順に準拠したが、今回は下地板がセメント系材料ではないため、下地との十分な接着を確保するため、コンクリート用プライマーの代わりに金属用プライマーを使用した。その他通気緩衝シート、ウレタン防水材等々は、前節の屋外実験で使用したのと同じである。施工手順は、プライマーを塗布し、次に通気緩衝シートを張り付けた。なお、送気用溝上にシートの穴あき部分が重ならないように注意して張り付けるものとする。次に通気緩衝シートの穴部分を埋める目止め用ウレタンを塗布し、その硬化を待ち、その上からウレタン系塗膜防水材を、厚さ 3mm となるように塗布した。その際、通気緩衝シートの両端部はエポキシ樹脂で完全に封をし、端部からの空気の漏洩を防止した。なお通気緩衝シートは屋外実験でも使用した、写真 2.14 に示す厚さ 1.0 mm の穴あき不織布タイプ（以下 通気緩衝シート A）のものである。完成した試験体を写真 2.15 に示す。

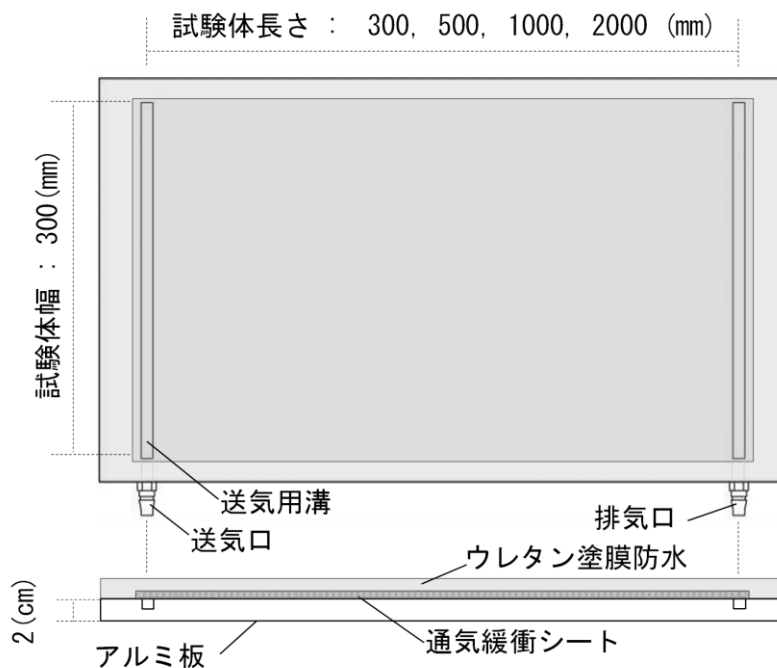


図2.13 試験体図

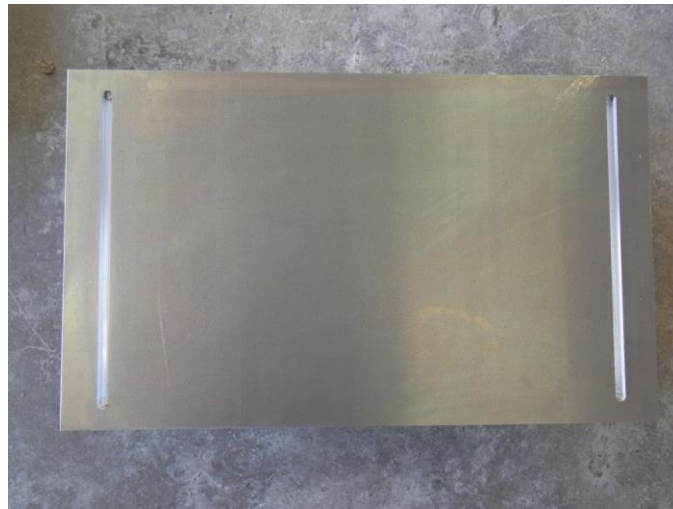


写真2.13 試験体下地 (例 試験体長さ500mm)

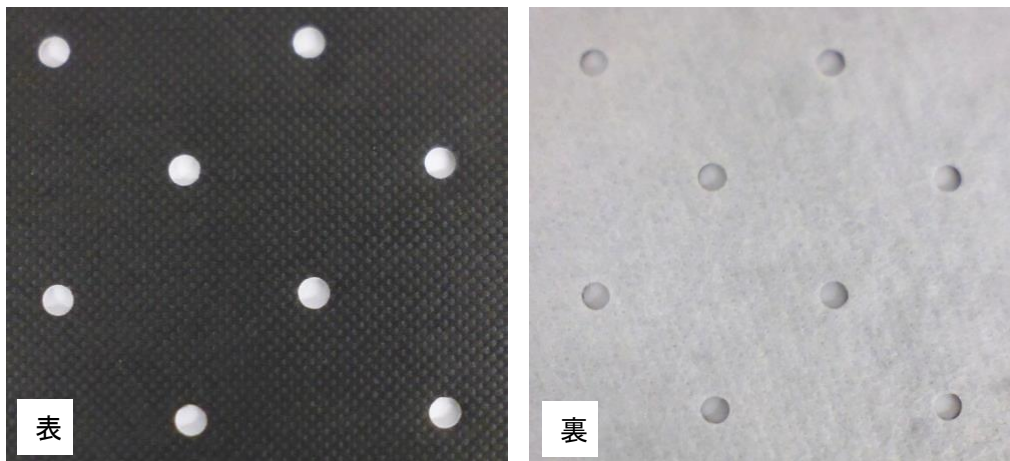


写真2.14 通気緩衝シートA (穴あき不織布タイプ)

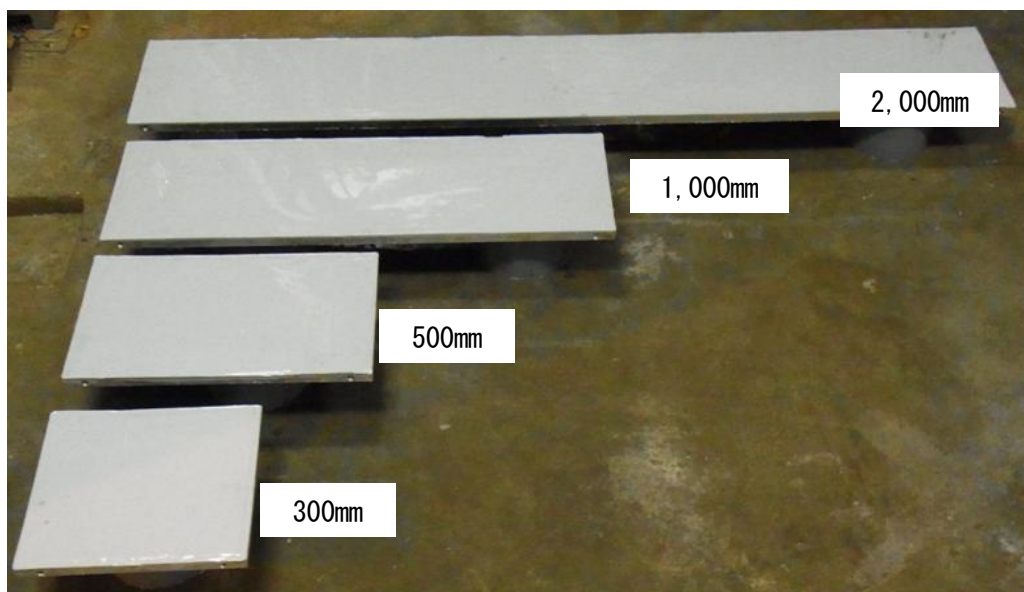


写真 2.15 透気係数測定用試験体

(3) 試験方法

測定状況を写真 2.16 に示す。試験装置に試験体を取り付け、圧縮空気を試験体の送気口から送り込んだ。なおその時の負荷圧力であるが、1986 年度版 JASS8 試験法では 10mmAq (98Pa に相当) と低圧のため、測定される流出空気量が微量となり、測定値が安定しないという問題があった。前節のふくれ模擬空間の圧力の実測では、はるかに高い 9kPa 程度が観測されており、ここでは 100Pa ごとに圧力を高めながら 2kPa までの範囲で測定を行った。なお測定は、すべて 20℃の恒温室内で行った。

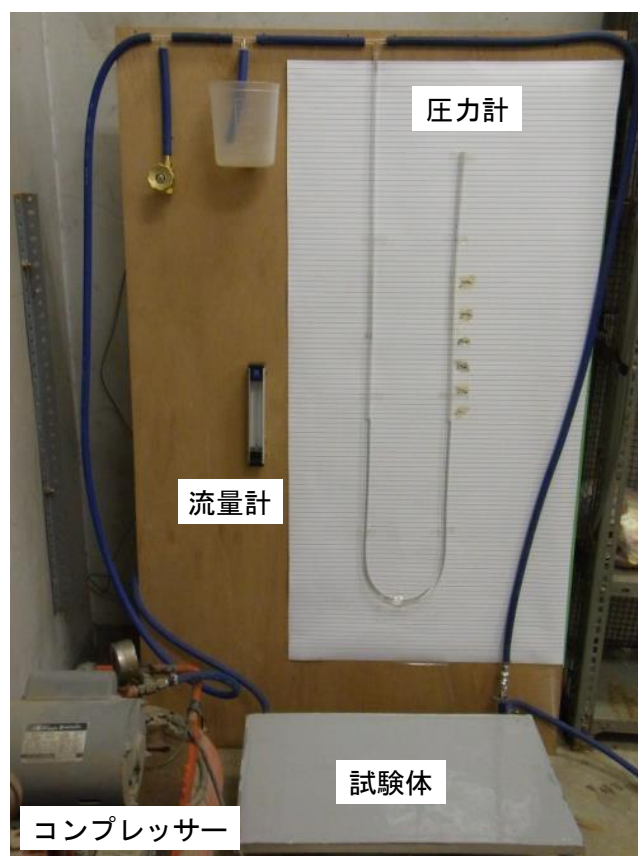


写真 2.16 試験装置

(4) 測定結果

JASS8における試験法では、試験体への流入空気量を測定することになっており、経験的に流量が $170\text{cm}^3/\text{min}$ ($0.17\ell/\text{min}$) 以上あれば良いとされている。しかし、これがどのような物理的意味をもつのか明確ではなかった。そのためここでは、測定の意味の明確な透気係数の形で定量化し、測定の意味が明確になるようにした。

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 (2.14) 式より求めた⁽⁴⁾。

$$k = \frac{2d\mu P_0 Q}{(P_1^2 - P_0^2)A} \quad \text{— (2.14)}$$

ここで k : 通気緩衝シートの透気係数(m^2)、 Q : 透気量(m^3/s)、 d : 試験体長さ(m)、 P_0 : 大気圧($=101,325 \text{ Pa}$)、 P_1 : ($=$ 大気圧+載荷圧力 Pa)、 A : 透気面積 (通気緩衝シートの厚み \times 有効幅) ($=3.0\times 10^{-4} \text{ m}^2$)、 μ : 空気粘性係数 ($=1.8\times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)である。

図 2.14 に測定した各試験体の透過後の流量 (ℓ/min) と圧力の関係を示す。この流量をもとに透気量 Q (m^3/s) を計算した。圧力との関係を図 2.15 に示す。

この透気量と載荷圧力を (2.14) 式を基に計算し、透気係数と圧力との関係を図 2.16 に示す。試験体を通して流出流量の測定が出来始めるのが、試験体の長さによるが、 200Pa もしくは 300Pa であった。その後は加圧力の増加に伴い透気係数は少しずつ上昇するが、 500Pa からは安定した。1986年版 JASS8 試験法で、測定結果の安定しなかった理由はこの透気係数の変わりやすい領域、すなわち 200Pa 以下の透気の安定しない領域の測定であったためと思われる。そのためここでは、この安定した領域の透気量をもとに透気係数を求めた。それぞれの長さの試験体、3体の平均値から、本測定で使用した通気緩衝シートの透過係数 $5.0\times 10^{-10} \text{ m}^2$ を算出した。また、試験体長さの影響も多少見られ、試験体長さが長くなるに従って、透気係数は多少上昇する傾向は見られるが、試験体長による差は、わずかであった。

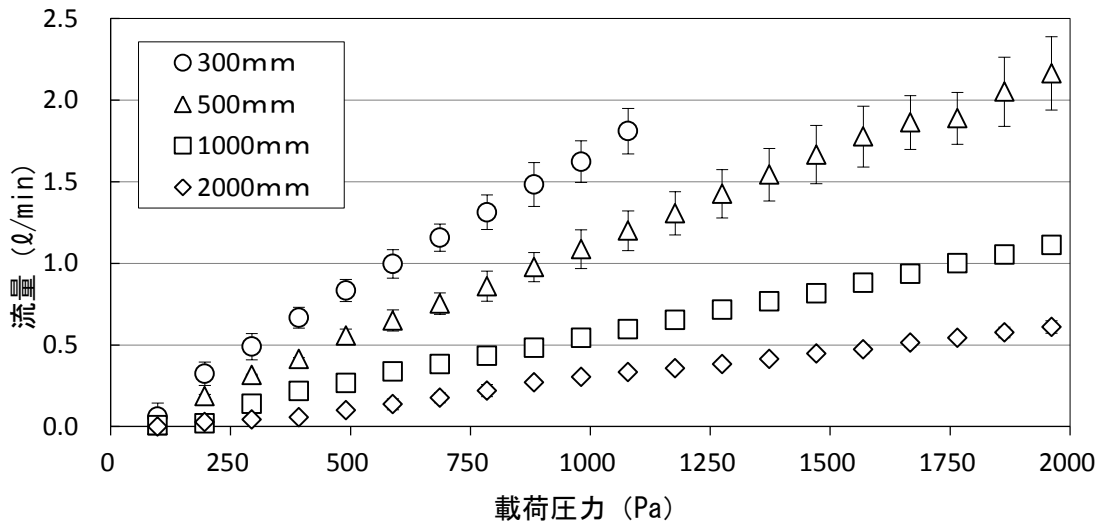


図2.14 試験体長さごとの载荷圧力と流量の関係

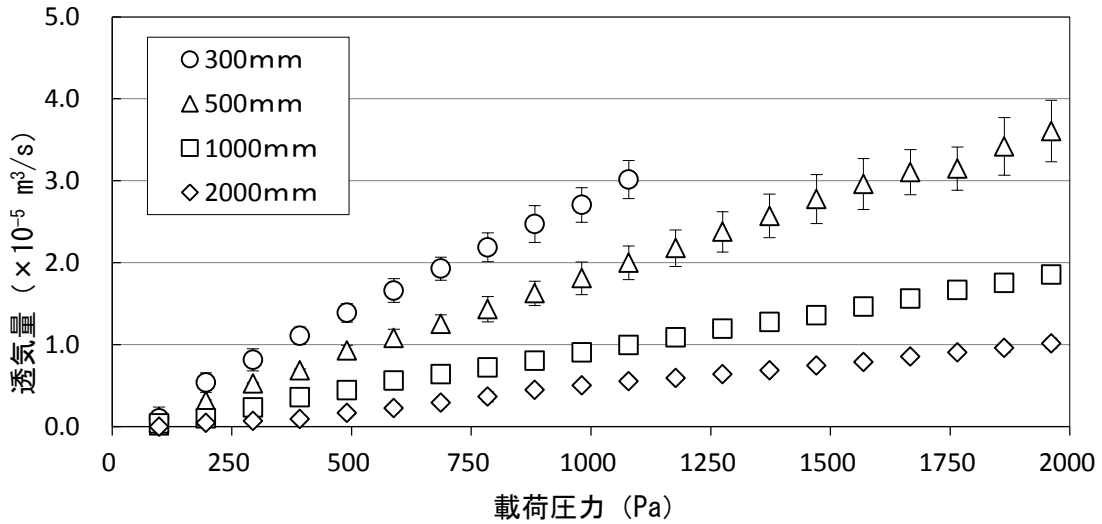


図2.15 試験体長さごとの载荷圧力と透気量の関係

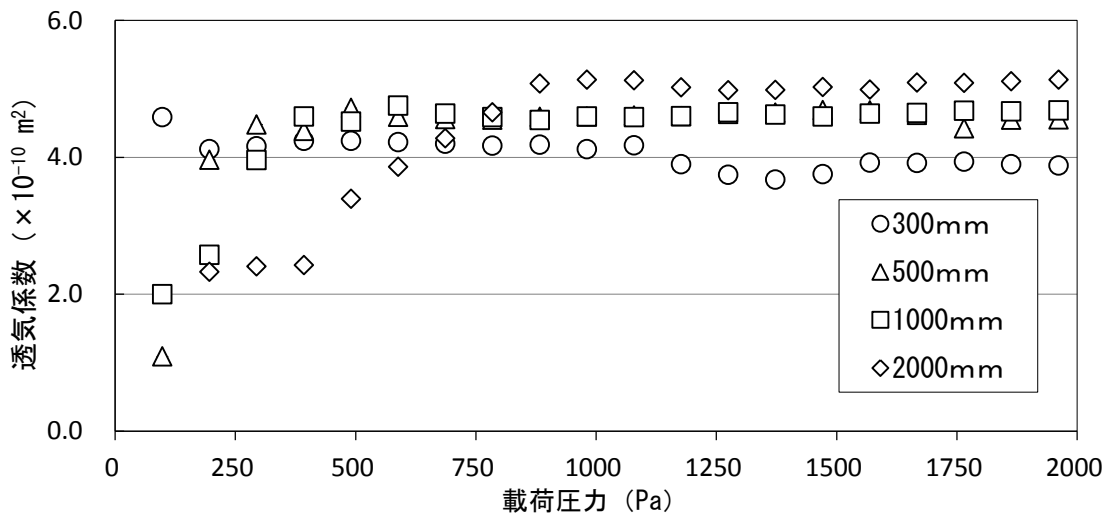


図2.16 試験体長さごとの载荷圧力と透気係数の関係

2.3.5 コンクリートの透気係数の測定

(1) 対象とするコンクリート

2.3.4 で、通気緩衝シートの透気係数を算出したが、コンクリートの透気係数は2.2の屋外試験で使ったコンクリート下地から測定終了後に、写真2.17に示す直径100mmのコアを抜き取り、透気試験を行い算出することとした。試験体1体につき3サンプル、計9個のコア抜きサンプルを使用する。なお写真2.18に示す通り、コア抜き後は防水層を除去し、コンクリート表層の細孔構造を傷つけない程度に表面を薄く研磨した。

(2) 透気試験用試験体の作製

透気試験を行う際は、試験体側面から気体の漏気を遮断しなければならない。そのため、図2.17のように、呼び径100mm、外径114mm、厚さ3.1mm (JIS K 6741)の塩ビ薄肉管をかぶせて底板を付け、粘性の低いエポキシ樹脂を流し込み硬化させる。硬化後に、写真2.19に示す通り脱型し、透気試験用の試験体とした。

(3) 透気試験装置の作製

既往の研究⁽²⁾⁽³⁾を参考に図2.18に示す透気試験装置を作製した。塩ビ管を脱型した試験体にo-リングを取り付け、図2.19のように金属製の蓋を両端から被せ、両端から圧力の漏れがないように締めつけた。取付け後の試験体を写真2.20に示す。

(4) 透気試験方法

コンプレッサーにより圧力安定装置に気体を流し込み、載荷圧力0.5MPa (=5kgf/cm²)まで上昇させ、その後試験体の端部に圧力を載荷させる。試験体を通過した気体を水上置換法により捕集し、透気量(m³/s)を算出する。測定状況を写真2.21に示す。



写真2.17 屋外試験時の
コンクリート下地コア抜きサンプル



写真2.18 防水層を取り除いたコア抜きサンプル

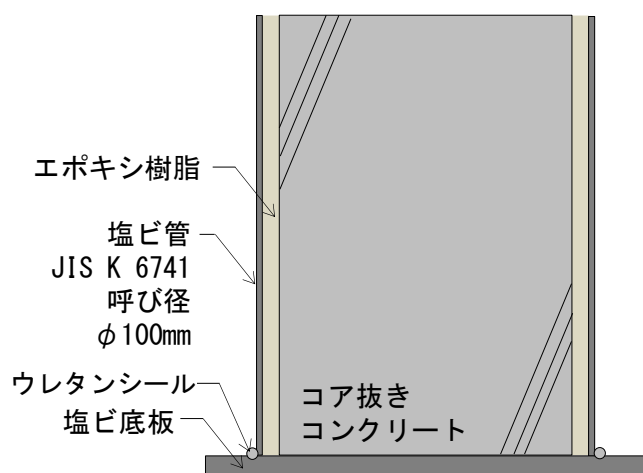


図2.17 コア抜きサンプルの
側面加工方法



写真2.19 塩ビ管の脱型

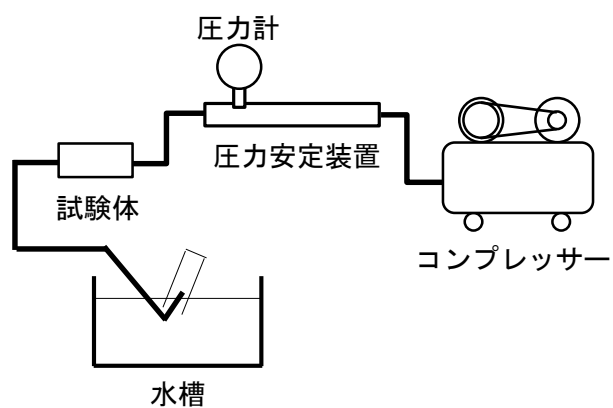


図2.18 コンクリートの透気試験装置の構成

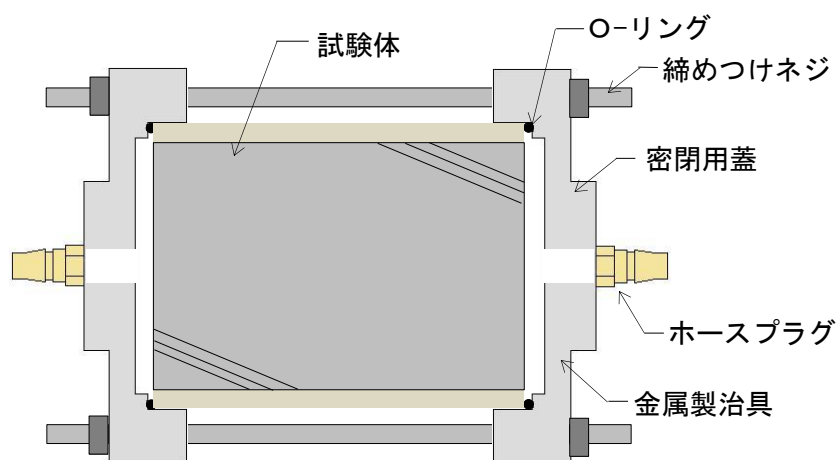


図2.19 加圧用金属治具の取付け



写真2.20 試験体の取付け



写真2.21 コンクリートの透気係数測定状況

(5) 透気試験結果

コンクリートの透気係数は、2.3.4の通気緩衝シートの透気係数の算出と同様に、(2.15)式から求めた。

$$k' = \frac{2d\mu P_0 Q}{(P_1^2 - P_0^2)A} \quad \text{— (2.15)}$$

ここで k' はコンクリートの透気係数 (m^2)、 d は試験体厚さ (m)、 Q は透気量 (m^3/s)、 P_0 : 大気圧 (=101,325 Pa)、 P_1 : (=大気圧+載荷圧力 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。

実大試験体からコア抜きした、各3つのサンプルの透気係数の平均値を表2.3に示す。数値解析では、各試験体でこの透気係数を用いる。

表 2.3 透気試験結果

実大試験体	透気係数 (m^2)
(a) 密着工法・裏面密閉	0.82×10^{-16}
(b) 密着工法・裏面開放	1.87×10^{-16}
(c) 通気緩衝工法・裏面密閉	1.23×10^{-16}

2.3.6 数値解析のための入力値

2.2の屋外実験での一日の圧力変化の測定期間は、図2.6と2.7に示した通り模擬空間内圧力および防水層裏面温度を30分ごとに24時間測定しており、比較的高いふくれ模擬空間内の圧力上昇の観察されている。そのため、数値解析はこの期間について実施した。なお数値解析の各入力値は以下のとおりである。

(1)温度データは図2.6に示した、防水層裏面の30分ごとの温度測定値を用いた。

(2)通気緩衝シートAの透気係数は、2.3.4の通気緩衝シートの通気性測定試験により得られた測定値を用いた。コンクリートの透気係数は、表2.3の測定結果を用いた。

(3)ふくれ模擬空間内部の湿度は、コンクリートの養生条件で差があると思われるが、コンクリート打設後2ヶ月以内であり、まだ十分な水分が存在していると考えられ、常に飽和しているものとした。また、コンクリートの有効空隙率については、透気係数との関係について研究⁽²⁾がなされてきたが、これらを参考に5%とした。通気緩衝シートの有効空隙率は、シートの素材はポリエステル製の不織布であり、コンクリートに比べ遥かに大きいことから、100%とした。

2.3.7 解析結果

数値解析結果を、屋外実験の一日の圧力変化測定の結果と合わせて図 2.20 に示す。ふくれ模擬空間の内部圧力は日中に上昇し、午後からは低下するが、解析結果も屋外実験の測定結果と同様な傾向が得られている。特に下地コンクリート裏面が密閉されている場合は特に圧力が高まり、解析でも **7kPa** と少し屋外実験より小さめの値になっているが、大きく上昇する結果が得られた。

下地裏面開放の場合は、圧力は **0.3kPa** とそれ程高くない。解析では午後から夕方にかけて、若干負圧となっているが、屋外実験では負圧が測定できないブルドン管式圧力計による測定のため、圧力ゼロとなっている。

一方、ウレタン塗膜防水層下に通気緩衝シートを挿入すると、屋外実験では圧力がほとんど上昇してないことが示されているが、数値解析でも同様の結果が得られている。これらの結果から通気緩衝シートの使用は、下地コンクリートとウレタン防水層間に発生する圧力を通気させる効果を有していることが明らかとなった。

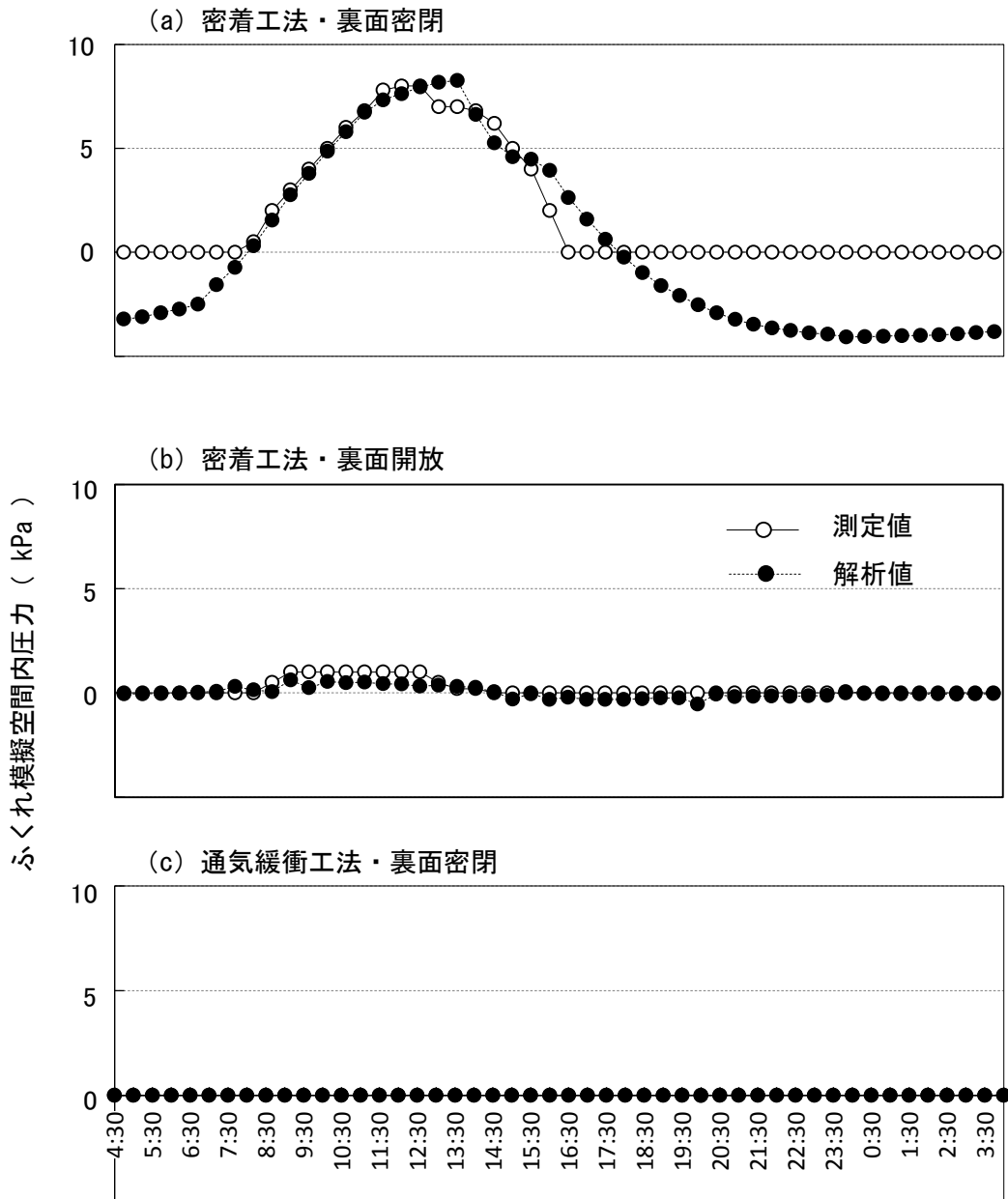


図2.20 ふくれ模擬空間内圧力の数値解析結果と屋外実験測定結果

2.4 まとめ

本章では、ウレタンゴム系塗膜防水の通気緩衝工法に用いられる、通気緩衝シートの通気性能を定量化するために、透気係数を導入した。また、これを的確に測定しうる試験法を開発し、それによる試験結果を用いた数値解析により、ウレタンゴム系塗膜防水における通気緩衝シートの通気効果を明らかにした。本章で得られた結果をまとめると以下の通りである。

(1) 下地コンクリートにふくれ模擬空間を作った試験体を用いて、屋外で圧力を測定し、圧力はスラブ面の閉封状態に強く依存することを明らかにした。

(2) 屋外実験から、下地コンクリートとウレタン防水層の間に、通気緩衝シートを敷設することにより、圧力上昇を顕著に抑制できることを明らかにし、通気効果を証明した。

(3) 通気緩衝シートの透気係数測定法を開発し、不織布タイプの通気緩衝シートの透気係数を明らかにした。

(4) 透気係数を用いてふくれ模擬空間内の圧力変化の数値解析を行い、屋外実験結果と比較しながら、通気緩衝シートの通気性を定量化する方法の有効性を示した。

【第2章での参考文献】

- (1) 2014年版建築工事標準仕様書・同解説 JASS8:日本建築学会, pp270-271, 2014. 11
- (2) 橋田浩, 田中享二, 小池迪夫: 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, 日本建築学会構造系論文報告集, 第416号, pp35-45, 1990. 10
- (3) 橋田浩, 田中享二, 小池迪夫: 防水層下地としてのコンクリートスラブの特性とふくれ形成圧力挙動, 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2, 日本建築学会構造系論文報告集, 第427号, pp39-46, 1991. 9
- (4) Arian E. Schedegger: The physics of flow through porous media, University of Toronto Press, pp.100-103, 1974

第 3 章

脱気装置の位置と数による

脱気効果の定量化

- 3.1 はじめに
- 3.2 通気緩衝工法の通気層内圧力測定実験
- 3.3 数値解析による脱気効果の定量化
- 3.4 考察
- 3.5 まとめ

第3章 脱気装置の位置と数による脱気効果の定量化

3.1 はじめに

前章までは、通気緩衝シートをコンクリート下地とウレタン塗膜との間に敷設した場合の通気効果について述べた。ただし試験体及び数値計算モデルでは、通気緩衝シートの端部は開放としており、大気に開放している部分は大きい。これは、下地から発生した圧力は、通気緩衝シートを伝わって外部に排出出来るかという確認であり、通気緩衝シートの圧力の抜けやすさを表す物理量として、透気係数をその測定法と共に示した。この透気係数を用いて、屋外環境における防水層裏面に発生する圧力の数値解析と実験結果を比較することで、通気緩衝シートの通気性を定量化する測定方法の有効性を示した。

しかしながら、通気緩衝工法では脱気装置を取り付けることを前提としており、通気緩衝シート単体で用いることはない。そこで、通気緩衝シートと脱気装置を組み合わせた場合についても、防水層裏面に発生する圧力を低減させることによる脱気効果があるのかどうか、検証する必要がある。

通気緩衝工法において、脱気装置の取付け位置や個数については、第1章でも述べた通り、大きく50~100m²に1箇所程度という指示しか与えられておらず、その数値も防水材料メーカーが工法を開発していく中で経験的に確立されていった経緯がある。近年建物屋上の用途は多様化し、通気緩衝工法の施工面の形状も複雑化しており、その効果が十分に発揮されないまま施工されてしまう可能性も否定できない。設計者、施工者が合理的に設計施工できる設計法が必要とされている。

脱気設計は、圧力発生部分から脱気装置まで導く通気緩衝シートの選定と、脱気のための脱気装置の位置と数を決定することであるが、その前提として圧力発生部分から脱気装置まで、圧力が平面的にどのように拡散されてゆくのかの研究が必要である。

これらを背景に、本章では防水層裏面の通気緩衝シートの通気層（以下、通気層）内での圧力の挙動を圧力発生源、通気層、脱気装置との関係で明らかにし、脱気装置の位置と数の脱気効果への影響を明らかにすることを目的とし、防水層下地からの圧力上昇が顕著な場合を想定した、防水層裏面からの加圧実験、及び数値解析による定量化を行う。

3.2 通気緩衝工法の通気層内圧力測定実験

ここでは、通気緩衝工法の脱気効果を確認するために、夏季の防水層下地からの圧力上昇が顕著な場合を想定した、防水層裏面を加圧できる装置を開発し、これを用いた加圧実験を行い、通気緩衝工法の脱気装置の設置位置と個数、防水層からの加圧面積との脱気効果への関係を、通気緩衝工法の通気層内の圧力最大値を比較することにより明らかにする。

3.2.1 圧力発生と脱気を検討するための試験体の考え方

ふくれは防水層と下地コンクリートとの接着力の脆弱な部分、あるいは局所的な非接着部分が、防水層裏面に圧力が発生することにより剥離し、形成されることが知られている。そのため防水層のふくれ研究では、コンクリートを下地として作られることがほとんどである。

しかし、実際の屋上面では密着工法で施工された場合、ふくれの起きる場所は1箇所と限らず広範囲に複数であることが多い。これは塗膜を押し上げる防水層裏面からの圧力が、広範囲にわたっていることを意味する。特にここで研究対象としているウレタンゴム系塗膜防水通気緩衝工法は、改修工事での採用が多く、既存の防水層押さえコンクリートの上に施工されることが多い。そのような場合は、コンクリート内部に多量の水分を含むため、屋上面全体が太陽光に曝される等の最悪の状況としては、押さえコンクリート層全体が圧力発生源となることもある。

このような状況を実験的に再現するためには、全面あるいは任意の位置で圧力を発生させ、かつ圧力を排気させる脱気装置の取り付け位置も任意に設置できることが望ましい。コンクリートを下地とした場合、圧力の発生方法として温度上昇を与える手法^{(1) (2)}が行われる場合が多いが、何れの試験体下地も比較的小さなものであり、屋上の規模で圧力を均一かつ任意に制御することは極めて難しい。そのためここではそれらを考慮し、人工的に任意の場所で圧力上昇を制御できる防水層下地を開発し、実験を試みた。

3.2.2 防水層下地の作製

通気緩衝工法では、圧力が通気層内を伝達するため、あまり小さな試験体ではその効果が調べにくい。また、通常用いられる脱気装置の直径も数 cm あり、ある程度の大きさの試験体を必要とする。これらに対して、写真 3.1 に示すような、本実験に適用可能なサイズのコンクリート養生槽 (4.80m×3.25m×0.65m) があったため、これを利用することとした。図 3.1 に防水層下地の概要を示すが、この場合に想定される試験体の面積は約 15m²となる。これはやや小ぶりではあるが、実屋根に近いサイズである。また実験では、防水層部分を任意の位置で下面から加圧しなければならないが、そのため裏面に加圧予備空間もあることが望ましい。その空間として深さ 0.65m の養生槽部分も利用できる。なお、ここで利用した養生槽は、鉄筋コンクリート製の古いものであり、圧力漏えい防止のため、硬質ウレタン防水材で養生槽表面を全面にわたりライニングを施した。

先に述べた通り、多くの防水層はコンクリート下地である。ただコンクリートでは防水層裏面に任意の圧力を任意の場所に生じさせることが難しいため、塩ビ板に多数の孔を開け、そこを通して防水層裏面を加圧する方式とした。そのため、塩ビ板(厚さ 10mm)に直径 5mm の孔を 50mm 間隔で開けた。

なお、15m²分の継ぎ目のない 1 枚板を用意することは難しく、多数の塩ビ板を継ぎ合わせることに伴って継ぎ目ができてしまう。また、コンクリート養生槽との接着面も隙間のないように固定する必要であった。硬質塩化ビニルは一般的に、樹脂系接着剤との接着が弱いため、事前に塩ビ同士、かつコンクリート養生槽天板面との接着面に接する塩ビ板側面には、1 液ウレタン系のプライマーを塗布して半日間養生を行った。

写真 3.2 に下地作製の過程を示す。まず、アルミ製の横架材を差し渡し、次に養生槽壁面天端にシーリング材を線状に塗布し、その上から孔の開けられた塩ビ板を押し付けながら敷き並べた。これは、コンクリート養生槽と塩ビ板間の隙間を塞ぎ、漏気を防ぐためである。なお、塩ビ板同士の接合部も漏気のないようにシーリング処理を行った。また、下地の一部には、加圧予備空間内に給気をするための、開口部を設けた。加圧予備空間内から見た下地裏面を写真 3.3 に示す。



写真3.1 コンクリート養生槽
(4.80m×3.25m×0.65m)

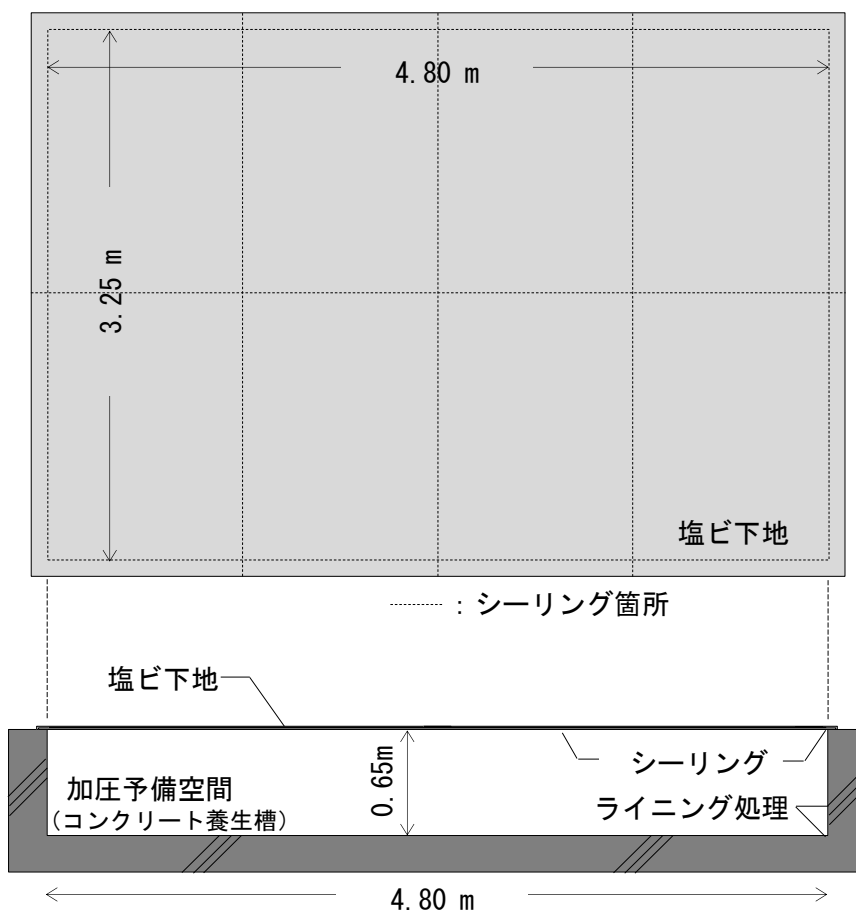


図3.1 試験体下地の設置



写真3.2 防水層下地作製過程

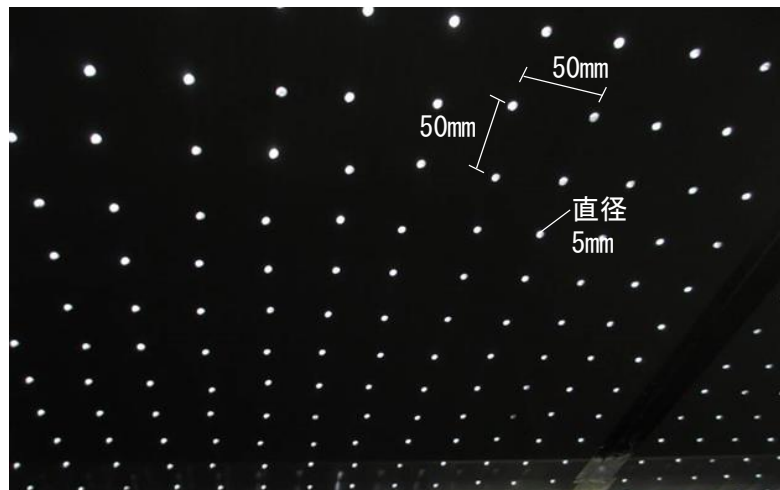


写真3.3 下地裏面から見た加圧孔

3.2.3 防水層裏面からの加圧のための空気流量制御実験

加圧は下地の隅部よりパイプを挿入し、加圧予備空間（養生槽）にコンプレッサーより加圧空気を送り込み、塩ビ板の孔を通して防水層裏面を一定の加圧速度で制御し加圧する方式とした。そこで、事前に通気緩衝シートの通気層を防水層裏面から加圧するための、加圧空気流量を決定する実験を行った。

(1) 加圧空気流量決定のための圧力測定方法

通気緩衝工法の通気層内を防水層裏面から加圧するための入力値として重要なものは、加圧速度とその最大圧力である。既往の研究⁽¹⁾⁽²⁾では、コンクリート下地に温度サイクルを加えた室内での測定結果があるが、本研究以外で夏場のふくれが最も起きやすい屋外環境下にて、実際に防水層裏面に発生する圧力を測定した事例はなく、通気緩衝シートの通気層内圧力が測定された事例もない。そこで、2章にて屋外実験を行った一日の圧力変化の測定での、裏面密閉・密着工法の防水層裏面に発生した圧力の測定結果を模擬することとした。図3.2は、測定期間中に大きな圧力を観測した時の、早朝から夜にかけての半日間の測定値である。防水層裏面の圧力は明け方から昼にかけて急速に上昇し、おおよそ4.5時間で最大8,000Pa（8kPa）まで到達した。そのため実験では、これを基に0.49 Pa/secで上昇させることにした。

加圧空気流量の制御は、図3.3及び写真3.4に示すように、流量を安定させるために減圧弁にて調整した上で流量計にて一定の流量に調整し、さらにその量をデジタルマスフローメーターで確認し、養生層内に流入させるようにした。この場合は空気の全く漏れのない状態で密着工法とする必要があり、塩ビ下地に開けた孔を完全に閉鎖し、ウレタン防水材を厚さ3mmになるように塗布した。また、試験体に用いた下地材は10mm厚さの塩ビ板であり、それほど剛性が高くないため、給気による加圧予備空間内圧力上昇に伴い、下地塩ビ板が上方に変形することが懸念される。その防止のため、実験に先立ち写真3.5に示すように全面に錘を載せた。ピット内圧力に対して必要とされる、1m²当たりにより上部に乗せる錘の重さを図3.4に示す。

加圧空気流量を一定になるよう維持し、空間内圧力が最大1,000Paとなるまで、流量を変えて測定を行った。2章の屋外実験では、密着工法において、ふくれ模擬空間内圧力として8,000Paまで測定されているが、通気緩衝シートを使用した防水層では、シートを通して圧力が排出されるため、あまり高い圧力にならないと考えられる。そのため

この程度の範囲までとした。圧力上昇は、加圧予備空間内の圧力を測定できるように設置された差圧計の測定値を、グラフテック(株)製のデジタルデータ収集器にて、1秒ごとに記録した。

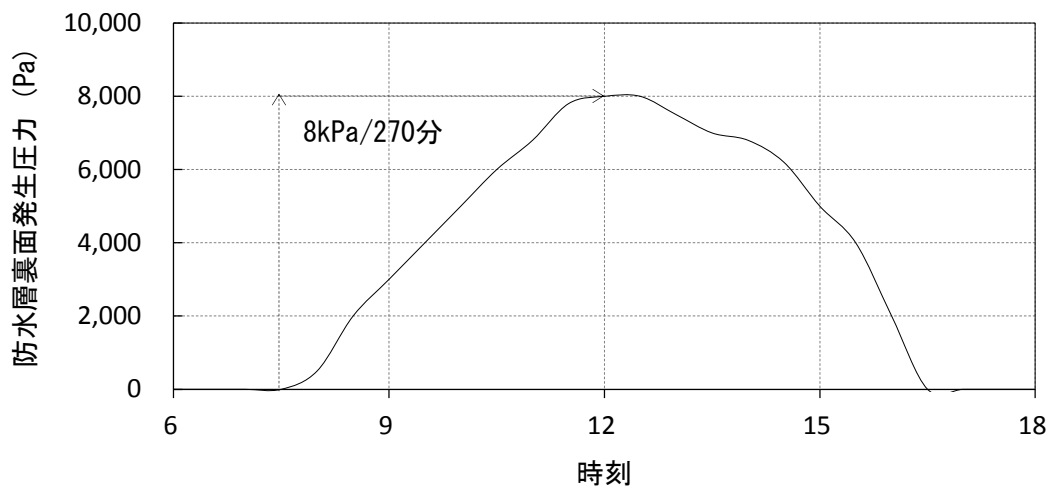


図3.2 2章 屋外実験②での圧力の経時変化の実測値

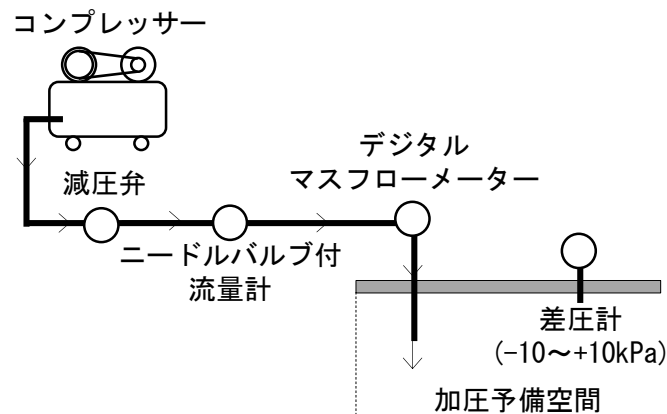


図3.3 防水層裏面からの加圧のための加圧予備空間への加圧空気流量の制御

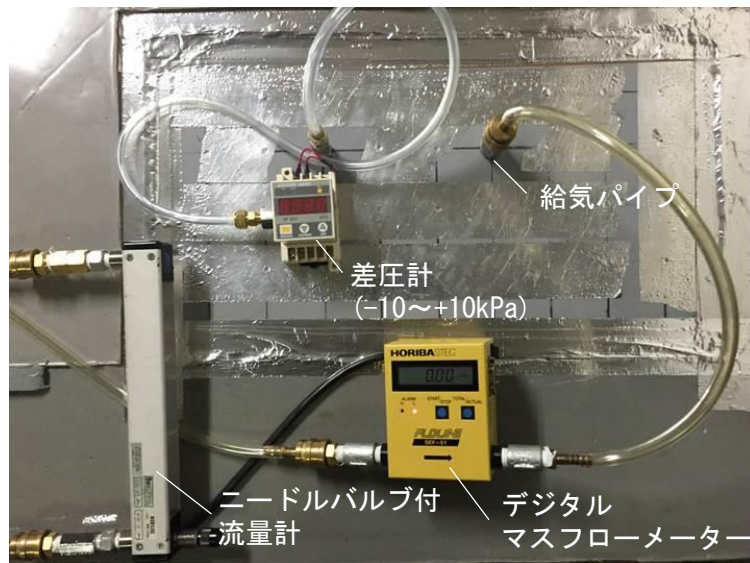


写真3.4 加圧予備空間への加圧空気流量の制御と圧力測定



写真3.5 反力の確保

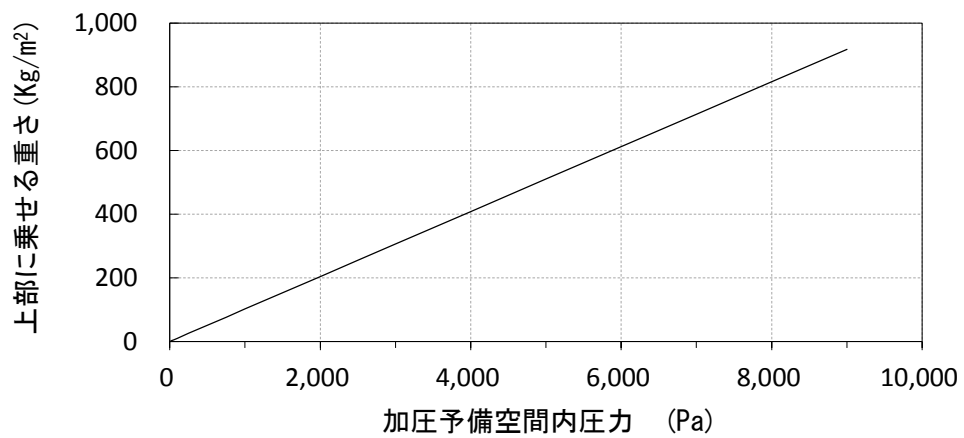


図3.4 反力の確保

(2) 加圧空気流量と加圧速度の測定結果

加圧空気流量と加圧速度の測定結果を図3.5に示す。この結果より、流入速度 4.0ℓ/minの時にほぼ目標とする圧力上昇速度となったため、これをここでの実験に用いる加圧空気流入速度とした。

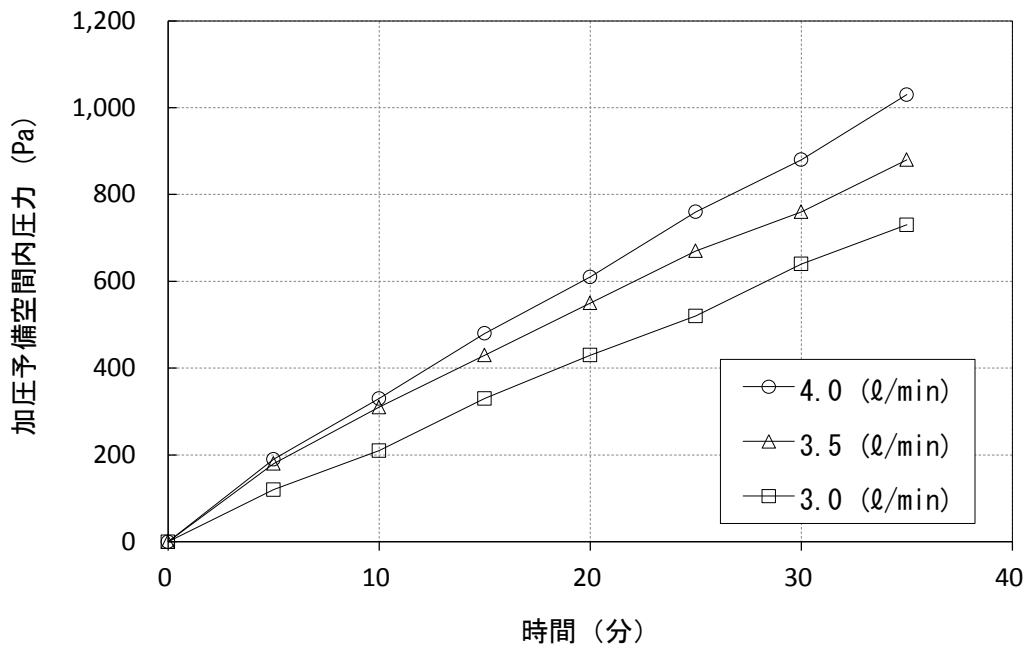


図3.5 加圧空気流量と加圧速度の測定結果

3.2.4 試験防水層の構成と施工

作製した防水層を裏面から加圧するための下地の上に、試験防水層を施工する。密着工法の防水層の撤去及び加圧のための孔を開放し、試験を行う通気緩衝工法を施工する。防水層は、図 3.6 に示すウレタン塗膜の下側に通気緩衝シートの敷設されている一般的な構成であり、日本建築学会・建築工事標準仕様書 JASS8 防水工事⁽³⁾における、ウレタンゴム系高伸長形塗膜防水工法・絶縁仕様 (L-USS)、建築工事監理指針及び建築改修工事監理指針⁽⁴⁾⁽⁵⁾における X-1 (絶縁工法) である。

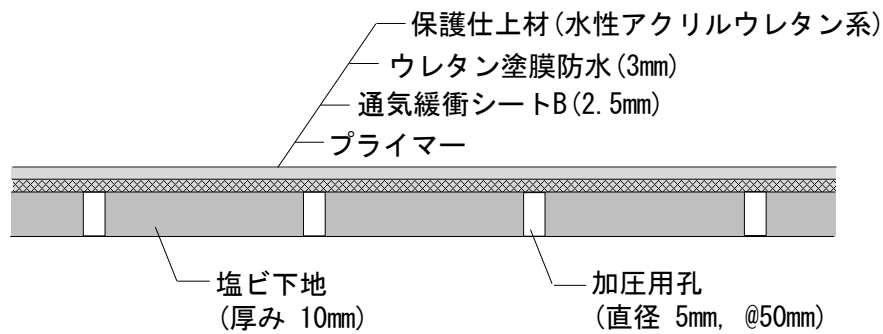


図3.6 通気緩衝工法の構成

まず、塩ビ板上にウレタン系プライマーを塗布した。次いで、写真 3.6 に示す厚さ 2.5mm のポリエステル繊維を積層した穴あき通気緩衝シート(以下 通気緩衝シート B)を敷設し、その上に JIS A 6021 に規定されるウレタン防水材を厚さ 3mm になるように塗布した。なお、硬化後のウレタン防水材の力学的特性を表 3.1 に示す。施工後は、温度 23℃、湿度 50%環境下で1週間養生を行った。

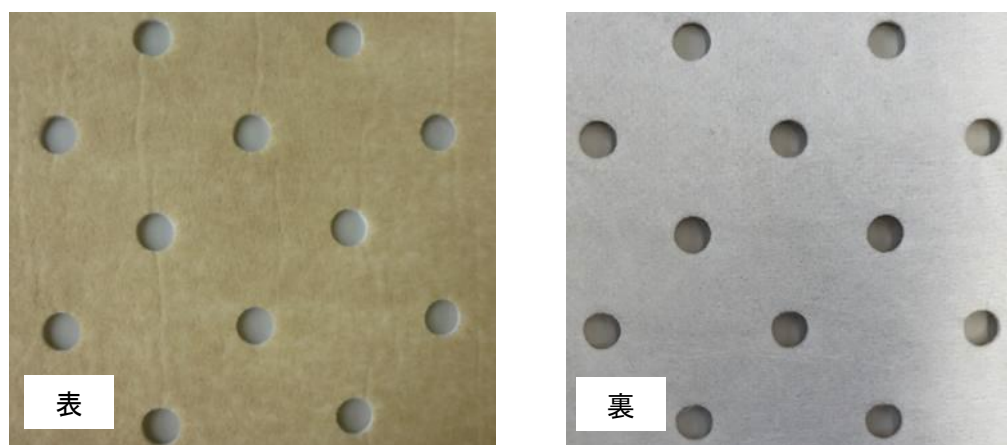


写真3.6 通気緩衝シートB (穴あき不織布タイプ)

表3.1 ウレタン塗膜の物性値

300%モデュラス	破断時強度	破断時伸び
1.82 MPa	3.15 MPa	607 %

(ダンベル3号形試験体10本の平均値)

3.2.5 脱気装置の作製

実務では多種多様な脱気装置が使用されているが、基本的には通気緩衝シートを介して、防水層裏面の圧力を排出する構造をもつ円筒状のものが多い。特に筒の長さの規定はないが、脱気装置が1960年代後半にアメリカ合衆国より輸入され使用が開始され、日本国にて生産が開始されてからも、基本的な構造は変わっていない。屋根に設置される雨水排水のためのストレーナーの詰まりや集中豪雨により、雨水が滞留することによる、脱気装置内への雨水の浸入を防ぐ意味で、建築防水分野では筒の高さは20cm程度が主流となっているようである。

本研究では同様な構成をもつ内径50mmの脱気装置を、図3.7及び写真3.7に示すようにアクリル樹脂で製作した。内筒には差圧計の取り付け用プラグを取り付け、脱気装置の内部の圧力が測定できるように工夫した。なお、この試作した脱気装置は、上部の内筒部分と、図3.8及び写真3.8に示す下部土台がネジで固定されており、上部だけの交換が可能である。これを図3.9及び写真3.9に示すネジ式の蓋と交換することにより、ここからの脱気を封じることができるようになっている。また、蓋の上部には内部への貫通孔が開けられており、通気層内の圧力測定を可能とした。図3.10に脱気装置の納まりを示す。設置位置は防水層中央部とコーナー近傍の2か所とした。ここでは脱気装置の取付け施工は、一般的に行われているものと同様に通気緩衝シートを施工した後に行った。

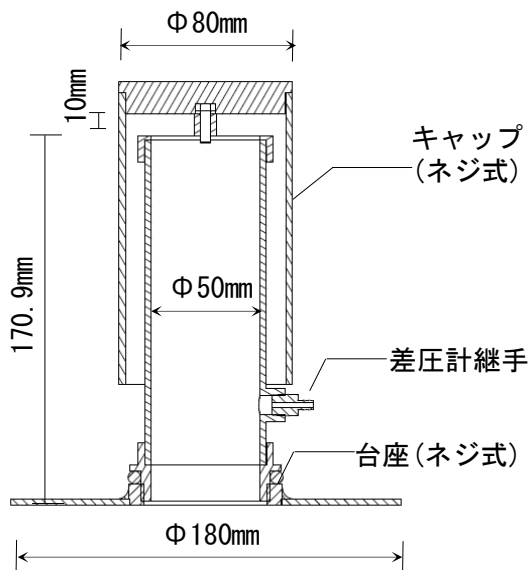


図3.7 開放型脱気装置 断面図



写真3.7 作製した脱気装置

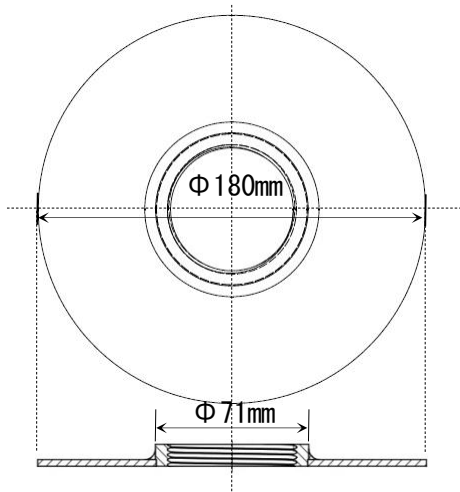


図3.8 台座（ネジ式）
平面図・断面図

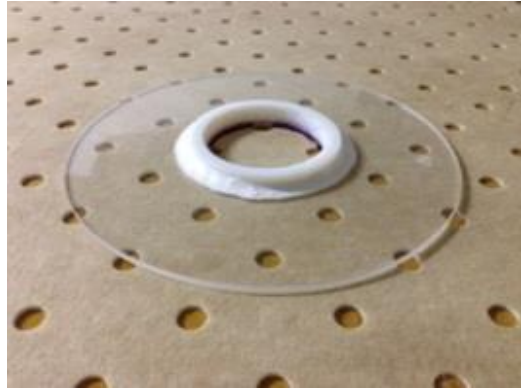


写真3.8 作製した台座

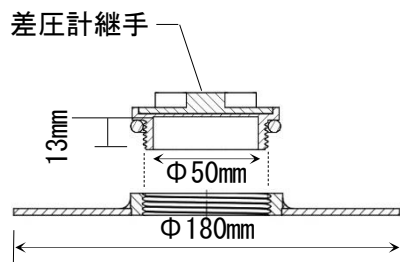


図3.9 脱気を封じるための蓋
断面図

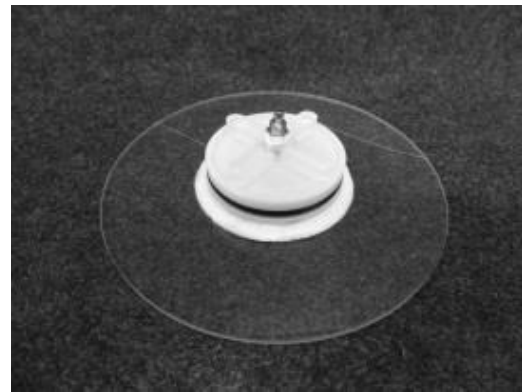


写真3.9 作製した脱気を封じる
ための蓋

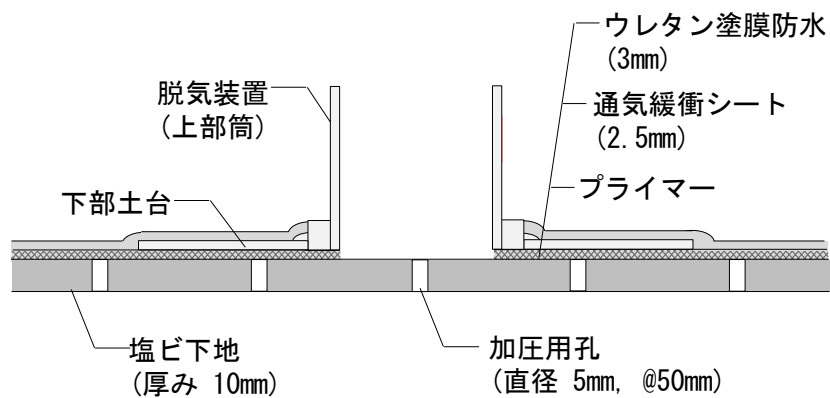


図3.10 脱気装置の納まり

3.2.6 圧力の測定方法

通気層内の圧力を測定するために、通気緩衝シートの数か所に測定孔を設けた。測定孔近傍の納まりを図 3.11 に示す。設置は図 3.12 に示す防水層の対角線上の 10 か所(No.1～10)であり、脱気装置の設置される中央部とコーナー部を、やや密に配した。また、脱気装置が設置される、No.6 及び No.10 の箇所の通気層内の圧力を測定する際には、先に述べた脱気を封じるための蓋を設置し測定することとした。

また、脱気装置を取り付けた場合は、通気緩衝シートの通気層を通して加圧された空気が大気中に排出されることにより、通気層内圧力はかなり低くなることが予想されたため、低圧を測定することができる、(株)山本電機製作所製の、圧力レンジ 0～100Pa

($\pm 1.5\%$ F.S.) マノシスデジタル微差圧計を測定孔に取り付け圧力を測定した。いずれの圧力計も、室温 23°C に保たれている実験室内の気圧を 0Pa として差圧を測定することとし、グラフテック(株)製のデジタルデータ収集器にて、0.5 秒ごとに記録する。

なお、加圧予備空間内の圧力も測定できるように、長野計器(株)製の圧力レンジ-10～+10kPa ($\pm 1.0\%$ F.S.) のデジタル微差圧計も設置した。

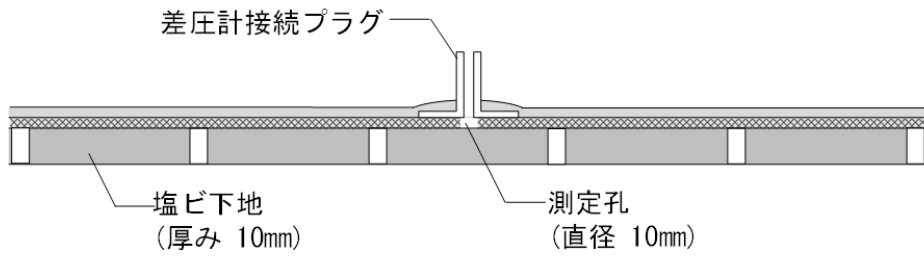


図3.11 測定孔近傍の納まり

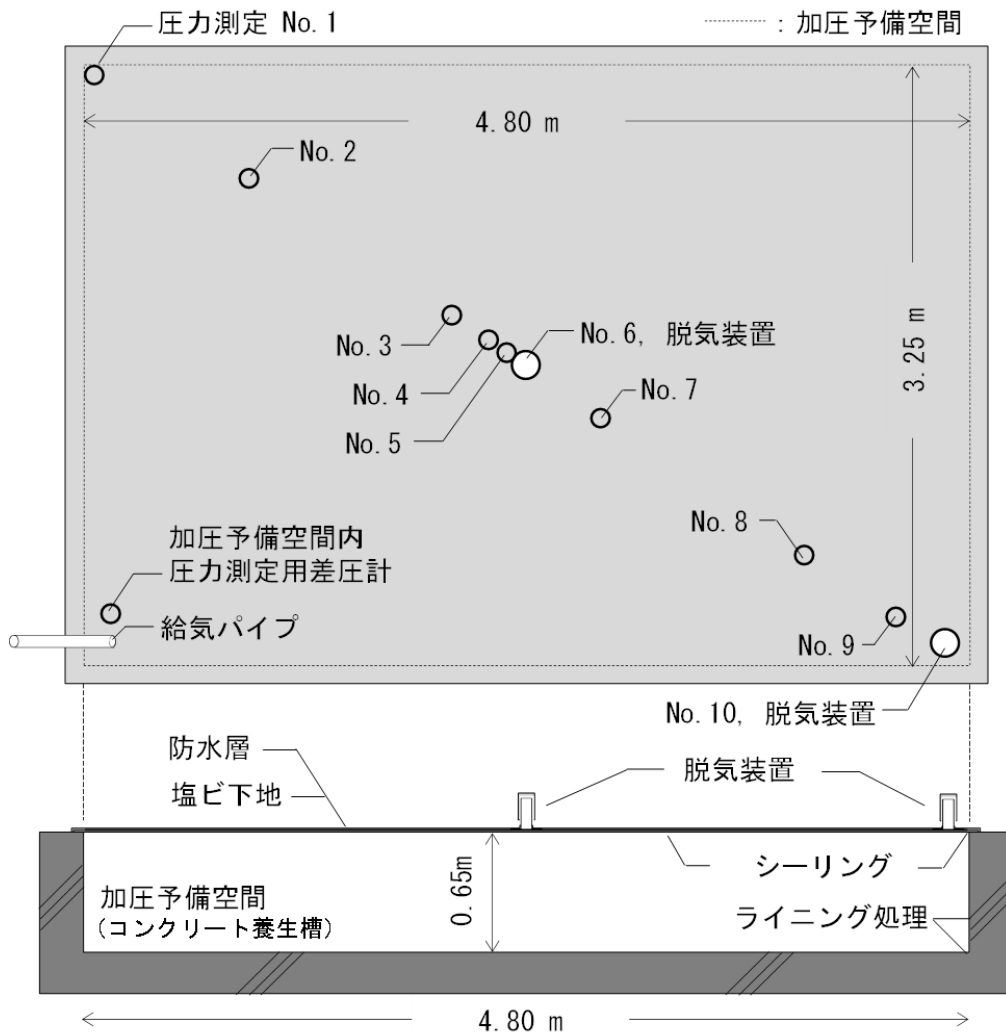




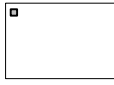
図3.12 脱気装置の位置と測定箇所

3.2.7 通気緩衝工法の通気層内圧力測定実験の種類

実際の屋根面での防水層下地から発生する圧力は、ごく一部の場から、最悪のケースとして屋根面全面から発生する場合等いろいろなケースがある。これらを考慮して、ここでは想定される防水層下地からの圧力発生規模に応じて、試験体裏面の全面加圧、1/2 面積加圧、一部加圧（10cm 角相当）の3種類の実験を行った。

また、脱気装置の位置については、中央部1か所、コーナー部1か所、同時に2か所（中央部及びコーナー部）の3種類とした。従って全体では表3.2に示す9パターンの実験を行った。

表3.2 実験の種類

実験番号	加圧の範囲	脱気装置の位置※
1	全面 	中央部
2		コーナー部
3		中央部及びコーナー部
4	1/2 面積 	中央部
5		コーナー部
6		中央部及びコーナー部
7	一部 10cm×10cm 	中央部
8		コーナー部
9		中央部及びコーナー部

※ 脱気装置の位置



3.2.8 通気緩衝工法の通気層内圧力測定実験の手順

試験の状況を写真 3.10 に示す。全面加圧の場合は、コンプレッサーからの空気を減圧弁にて圧力を低下させ、流量計で所定の流入速度 4.0ℓ/min に調整する。これを加圧予備空間に流入させ、防水層下面から加圧を開始し、防水層面各位置での圧力を測定する。測定値は 1 秒ごとにデータロガーに記録した。

1/2 面積加圧の時は写真 3.11 の様に加圧予備空間の中央部に間仕切り壁を設け、半分の部分を加圧した。この場合は容積が半分になるので、流入速度も半分 (2.0ℓ/min) とした。

一部加圧の場合の実験では流量をさらに微量としなければならず、このような給気方法では制御が難しかった。そのためこの場合は、注射器の筒の部分に空気を貯め込み、これを手動でゆっくりと押し込む方法により局部的に防水層裏面を加圧した。ここでの一部は 10cm 角を想定しているので、5cm 間隔で開けられた孔 4 個に、写真 3.12 の様に直接ビニールホースを接続させ、注射器から 0.0073ml/min になるように手動で加圧した。

また、角実験の測定継続時間は、加圧空気流量制御実験で、1,000Pa までの到達時間が約 35 分であったことを踏まえ、35 分間とした。なお、この工法においては脱気装置により圧力の上昇が小さく、加圧予備空間内圧力上昇に伴う下地塩ビ版の変形は、塩ビ下地と防水層による自重で十分耐えられることに加え、通気層が錘により変形し、通気が阻害される恐れがあったため錘を載せる必要はないと考えた。



写真3.10 試験状況



写真3.11 1/2面積加圧時 間仕切り壁



写真3.12 一部加圧の方法

3.2.9 実験結果

各差圧計の測定開始から測定終了までの、経過時間毎の測定結果を、実験 1, 4, 7 の脱気装置が中央部 1 箇所設置された場合を図 3.13 に、実験 2, 5, 8 の脱気装置がコーナー部に 1 箇所設置された場合を図 3.14 に、実験 3, 6, 9 の脱気装置が中央部及びコーナー部に設置された場合を図 3.15 にそれぞれ示す。通気層内圧力測定は 10 点で行われているが、脱気装置設置箇所を除き、全ての実験及び測定箇所で、加圧空気流入直後から通気層内圧力は高まり始め、数分後にほぼ上限に達し、ほぼ一定の圧力を保持した。

また図 3.16 から図 3.18 には、実験 1 から実験 9 までのすべての実験結果について、開始 35 分後（実験終了直前）の通気層内圧力を○印で示す。なお、図中の破線は次節で述べる数値解析結果である。

当然のことであるが、全ての実験で圧力は脱気装置のところでゼロとなる。最も高くなるのは、脱気装置から遠い位置での測定点であり、今回の実験では、実験 2（圧力が全面から発生、かつ脱気がコーナー部 1 箇所）が他の実験に比べて厳しい条件であり、最大 17Pa となった。

加圧面積の影響については全面の場合に高く、1/2 になると多少低下し、局所的な加圧の場合はほとんど圧力が上昇しなかった。また脱気装置については、脱気装置の数が 1 箇所の場合は、中央部設置時に圧力は低くなり、コーナー部設置時は高くなった。また 2 ヶ所に設置すると圧力はかなり低下した。

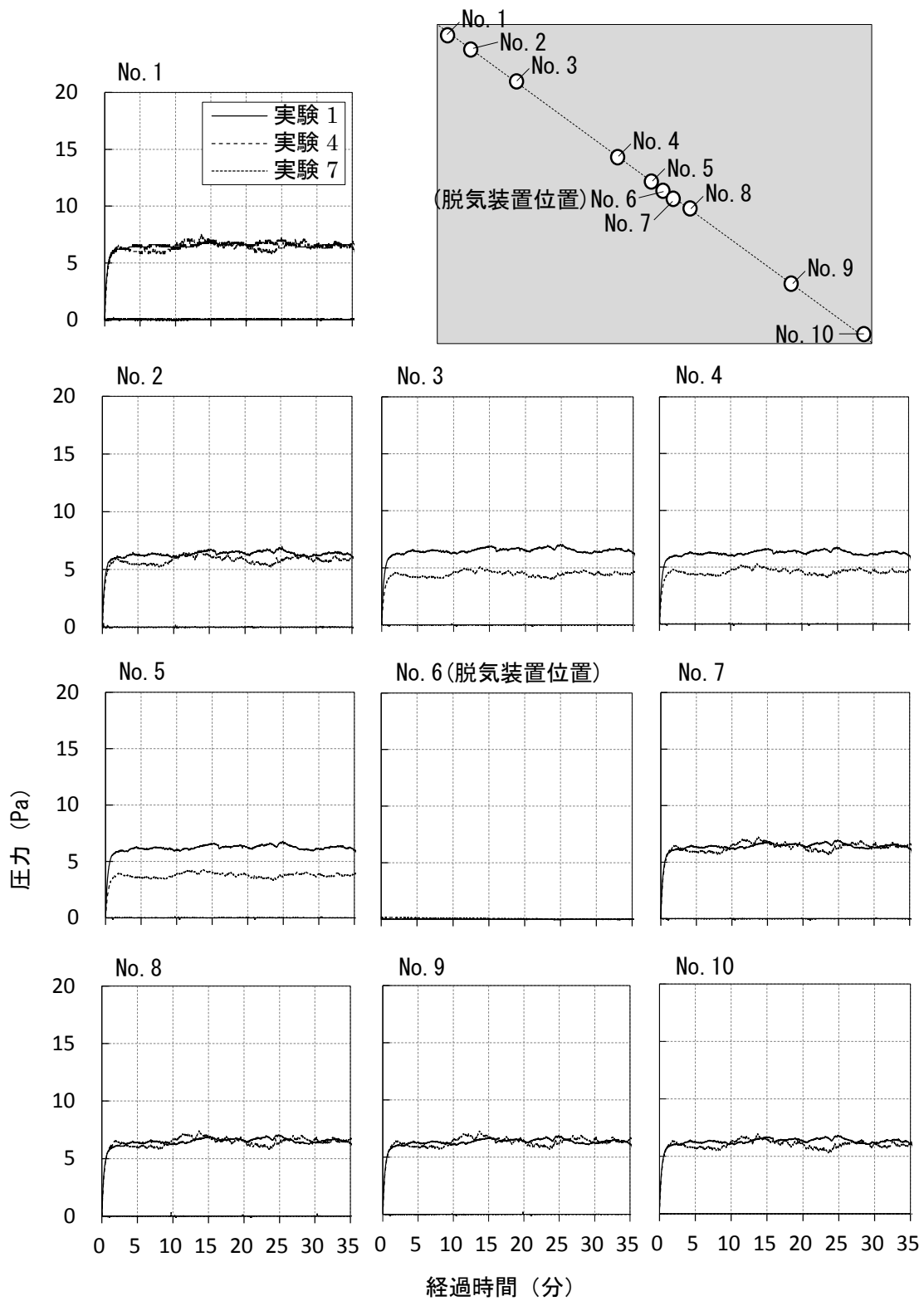


図3.13 実験1, 4, 7 測定結果
(脱気装置中央部1箇所の場合)

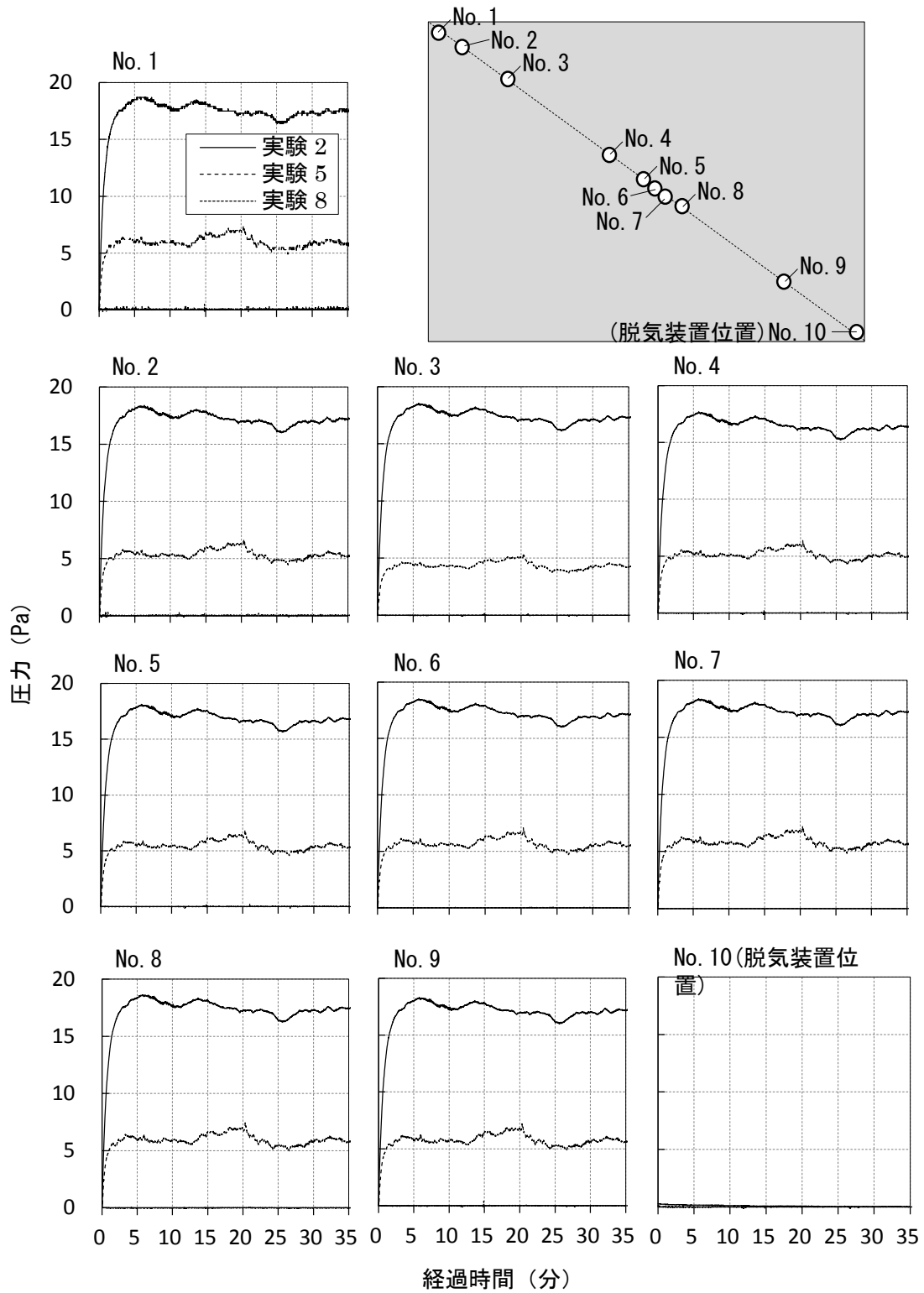


図3.14 実験2, 5, 8 測定結果
(脱気装置がコーナー部1箇所)

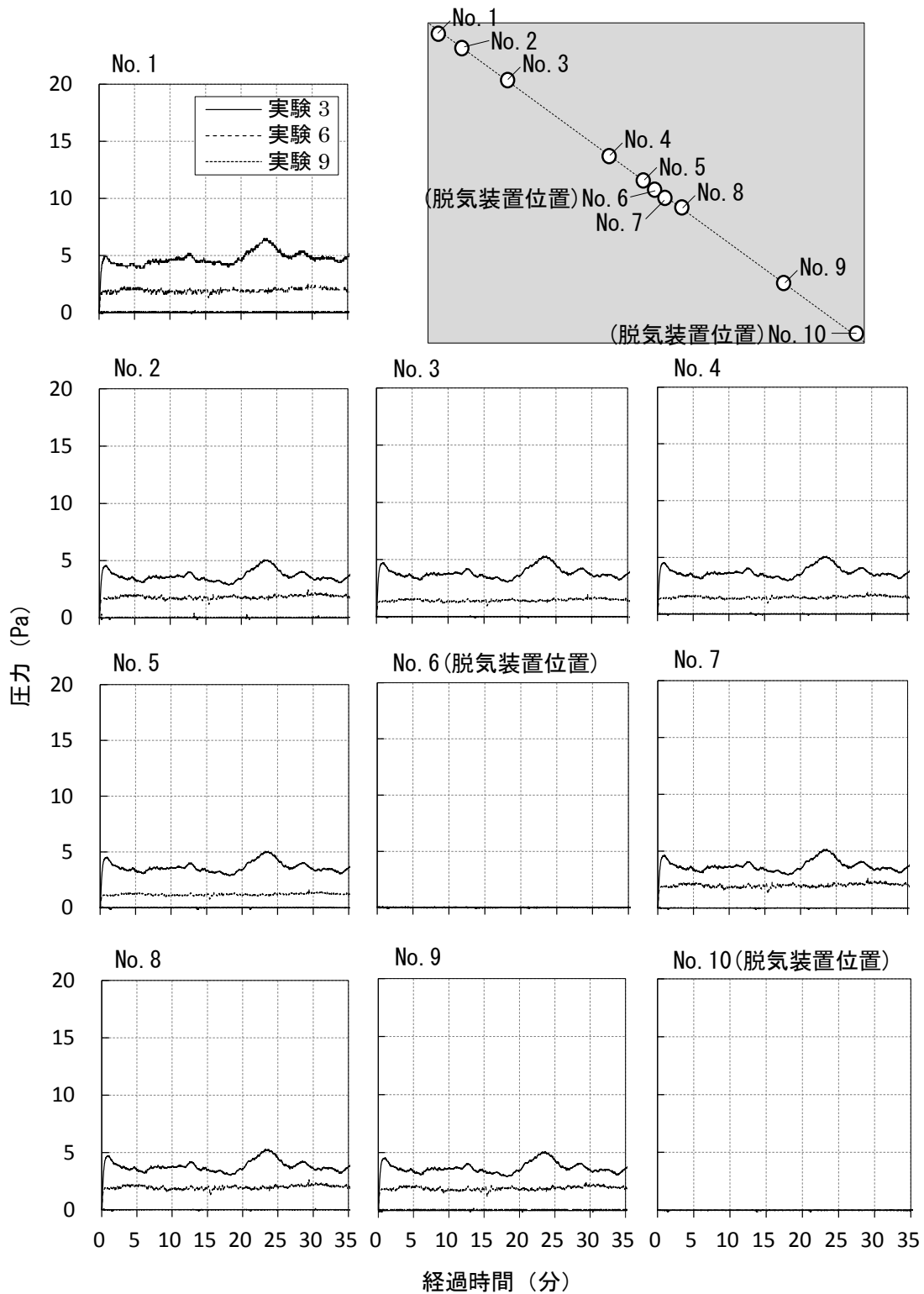


図3.15 実験3, 6, 9 測定結果
(脱気装置が中央部及びコーナー部)

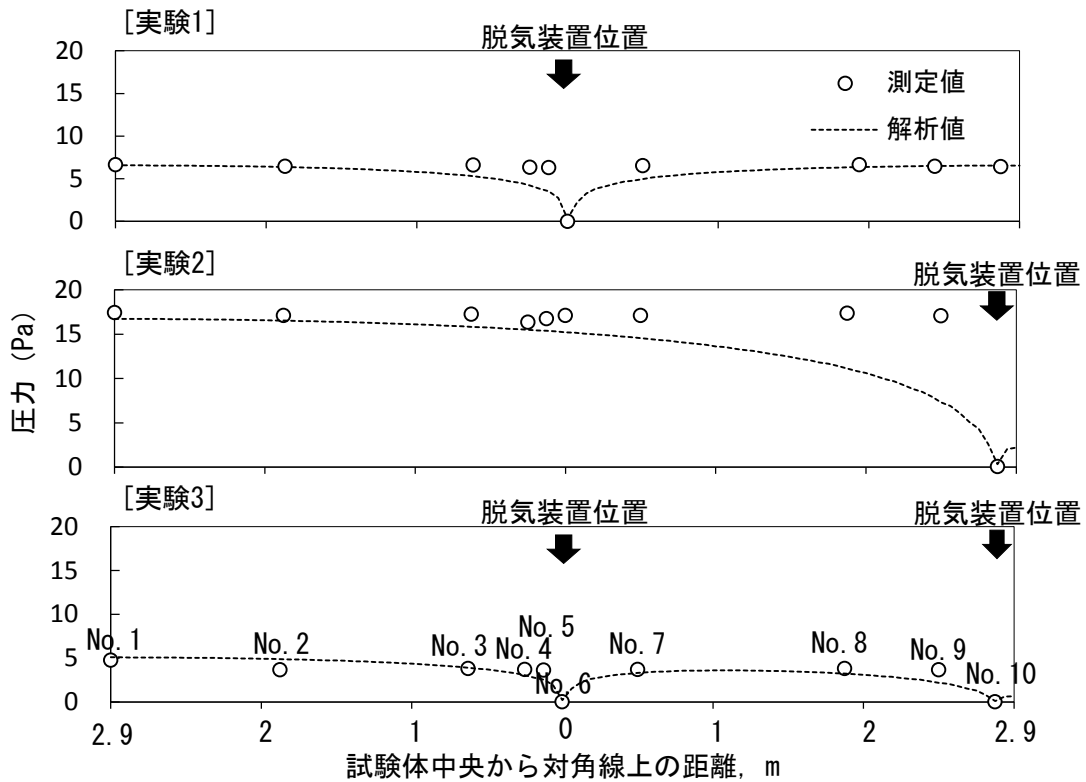


図3.16 全面加圧での通気層内圧力測定結果(35分後)と数値解析結果

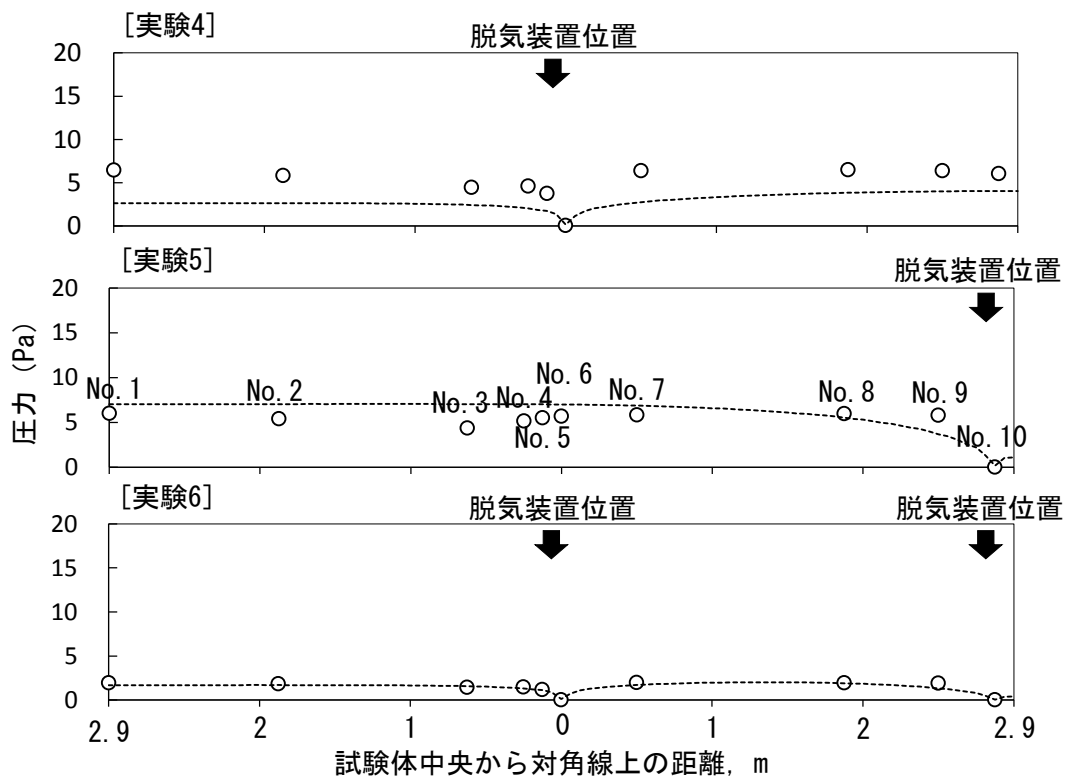


図3.17 1/2面積加圧での通気層内圧力測定結果(35分後)と数値解析結果

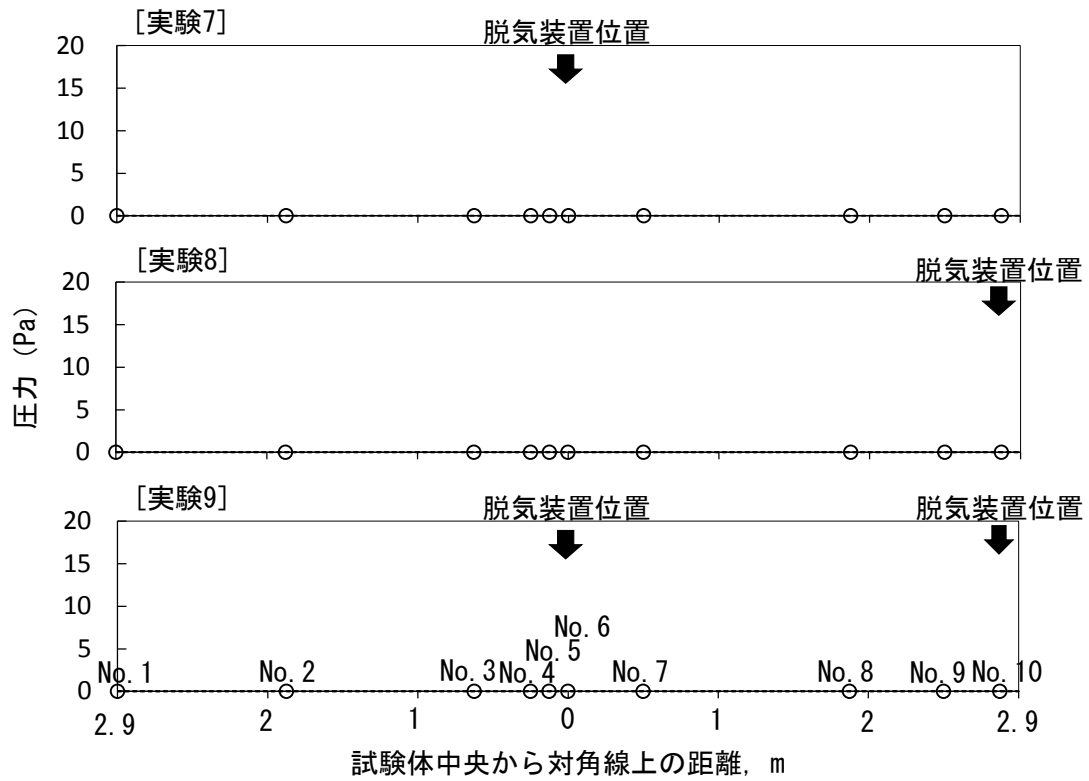


図3.18 一部加圧での通気層内圧力測定結果(35分後)と数値解析結果

3.3 数値解析による脱気効果の定量化

実験では脱気装置を用いた時の、ウレタンゴム系塗膜防水通気緩衝工法による脱気効果を、限られた組み合わせでしか調べることができないが、これを数値解析により知ることができれば、多くの組み合わせの圧力発生個所及び脱気装置の数・設置位置での情報を、実験ほど労力をかけることなく得ることができる。本節では、圧力上昇範囲と脱気の位置及び個数による、通気緩衝工法の通気層内圧力分布を予測できる数値解析手法を開発し、脱気効果を定量的に明らかにする。

3.3.1 通気緩衝シートの透気係数の測定

3.2 での実験で使用した通気緩衝シート B を用いて、2 章にて開発した透気試験の試験体を作製し、載荷圧力と透気量の関係から透気係数を算出した。図 3.19 に透気係数の測定結果を示す。これにより、使用した通気緩衝シートの透気係数 $1.8 \times 10^{-10} (\text{m}^2)$ を得た。

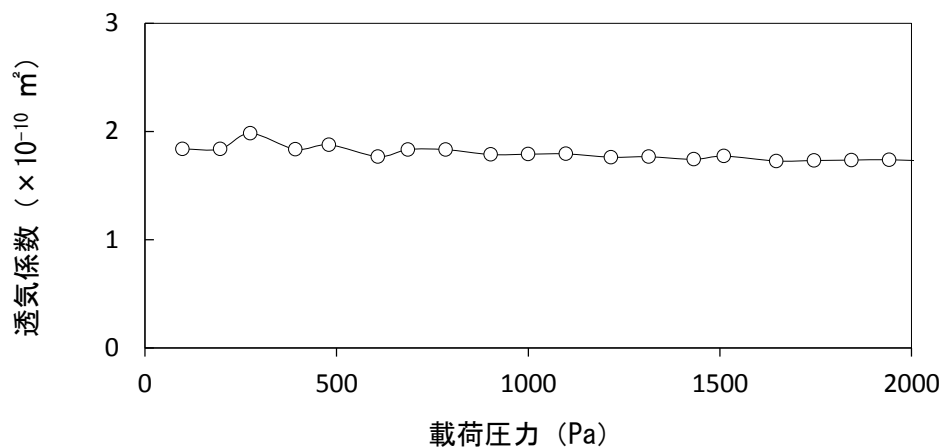


図3.19 透気係数測定結果

3.3.2 解析モデル

数値解析モデルを図 3.20 に示す。対象とする防水層の面積は 4.80m×3.25m であり、これを 50mm×50mm のメッシュの二次元拡散モデルに置き換えた。透気係数を用い、(3.1) 式により圧力の移動のしやすさを表す拡散係数 D (m²/s) を算出した。

$$D = \frac{P_0 k}{\mu} \quad (3.1)$$

k は通気緩衝シートの透気係数 (m²)、 μ は空気の粘性係数 (Pa・s)、 P_0 は大気圧(= 101,325 Pa)である。

また脱気装置は直径 50mm の円筒状であり、大気に開放されている。そのため、それに相当する 1 個分のセルは大気に開放されているモデルとした。

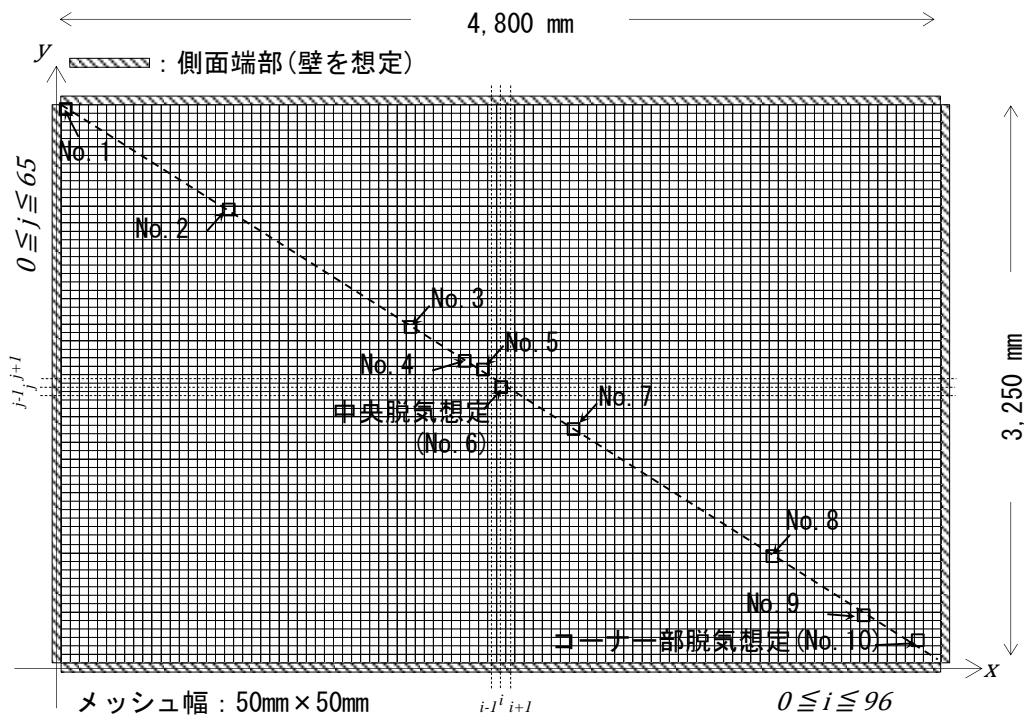


図3.20 数値解析モデル

3.3.3 数値解析の考え方と方法

防水層下地から発生した圧力が、単位時間あたり ΔP (30Pa/min) 上昇し、平面的に通気層を拡散し、最終的に脱気装置から排出される。2章でのコンクリート下地表面からの熱伝導による圧力発生と圧力拡散を考慮した式を、一定上昇させた圧力を通気緩衝シートの通気層内で水平方向に拡散させる式に変形した。これを図 3.21 の様に二次元中心差分を前進差分法で、 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-5}$ (sec)にて解析し、数値解析モデルの各セルに発生する通気緩衝工法の通気層内圧力 P を算出する。この計算に用いる離散式を (3.2) 式に示す。

$$P_{ij}^{n+1} = P_{ij}^n + \Delta t \left\{ \left(D_{x(i+\frac{1}{2},j)} \frac{(P_{i+1,j}^n - P_{ij}^n)}{\Delta x^2} - D_{x(i-\frac{1}{2},j)} \frac{(P_{ij}^n - P_{i-1,j}^n)}{\Delta x^2} \right) + \left(D_{y(i,j+\frac{1}{2})} \frac{(P_{i,j+1}^n - P_{ij}^n)}{\Delta y^2} - D_{y(i,j-\frac{1}{2})} \frac{(P_{ij}^n - P_{i,j-1}^n)}{\Delta y^2} \right) + \Delta P \right\} \quad (3.2)$$

また、側面端部及び角部については、図 3.19 及び図 3.20 の様に外側には拡散しない方法としている。さらに、ここでは脱気装置を想定しているので、それに対応する1つのセル部分では、図 3.21 の様に大気圧 P_0 との差分を拡散係数 $D_0=1(\text{m}^2/\text{sec})$ として式に加え、(3.3) 式の様に変換した。

$$P_{ij}^{n+1} = P_{ij}^n + \Delta t \left\{ \left(D_{x(i+\frac{1}{2},j)} \frac{(P_{i+1,j}^n - P_{ij}^n)}{\Delta x^2} - D_{x(i-\frac{1}{2},j)} \frac{(P_{ij}^n - P_{i-1,j}^n)}{\Delta x^2} \right) + \left(D_{y(i,j+\frac{1}{2})} \frac{(P_{i,j+1}^n - P_{ij}^n)}{\Delta y^2} - D_{y(i,j-\frac{1}{2})} \frac{(P_{ij}^n - P_{i,j-1}^n)}{\Delta y^2} \right) + \Delta P \right\} - P_{ij}^n \quad (3.3)$$

P_{ij}^n の i, j は、図 3.20 の数値解析モデルにおける、 x 軸 y 軸方向の座標番号を、 n は時間ステップをそれぞれ表している。

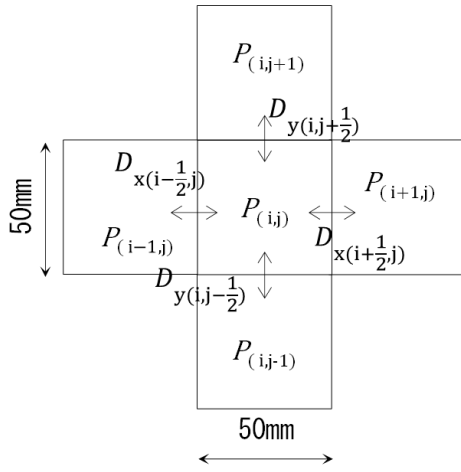


図3.21 一般部解析

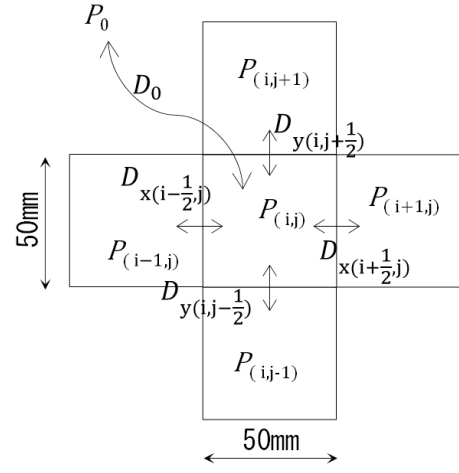


図3.22 脱気部解析

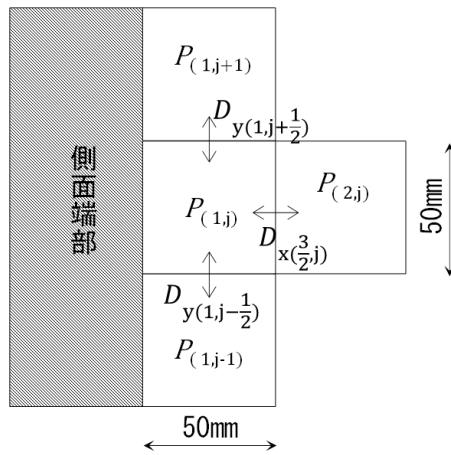


図3.23 側面端部解析

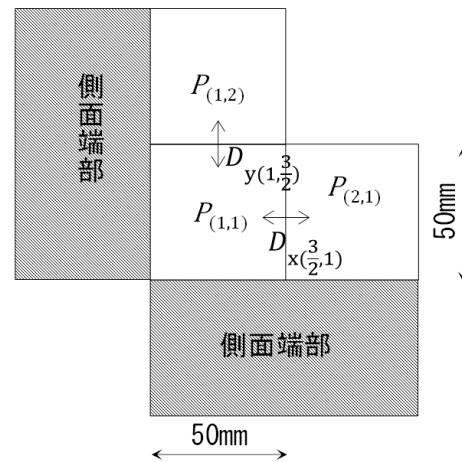


図3.24 角部解析

3.3.4 数値解析の種類と解析結果

数値解析は3.2と同じ実験1から実験9までの9パターンについて行った。各実験に対する数値解析結果を図3.16から図3.18に破線で示す。

数値解析結果は、通気層内圧力は脱気装置に向かって低下する、圧力発生面積が広い場合に裏面圧力が高くなる等の傾向が表現できている。脱気装置位置周辺での測定値が解析値よりも高くなっているが（おそらく加圧予備空間内での加圧空気の制御の問題と考えられるが）、全体として概ね実験結果と良い整合性を示しており、ここで示した数値解析方法が、通気層内の圧力の推定に有効であると思われる。

また、図3.25から図3.27に加圧の範囲ごとにまとめて、各実験における数値解析結果の圧力分布を示す。

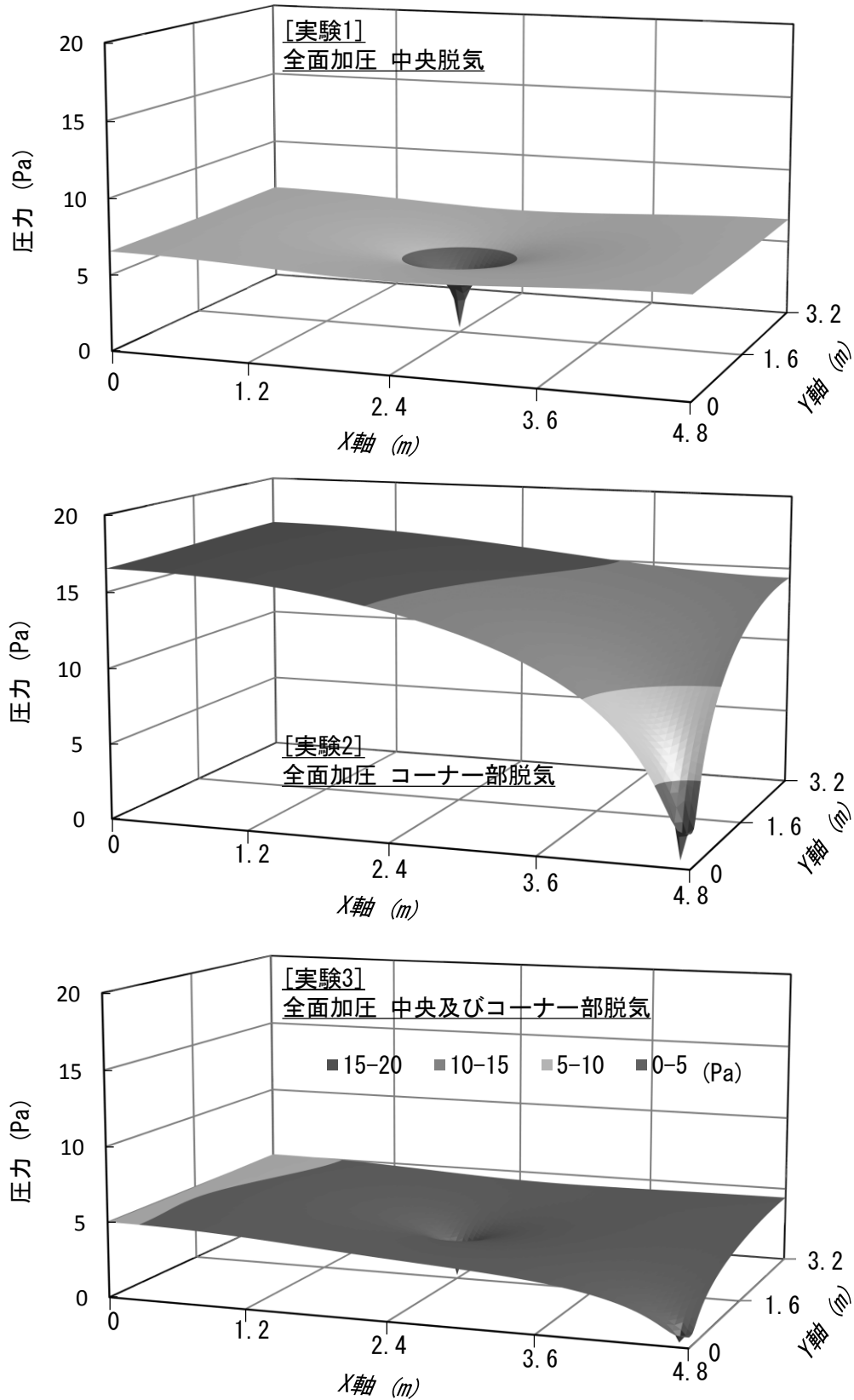


図3.25 数値解析結果圧力分布（全面加圧時）

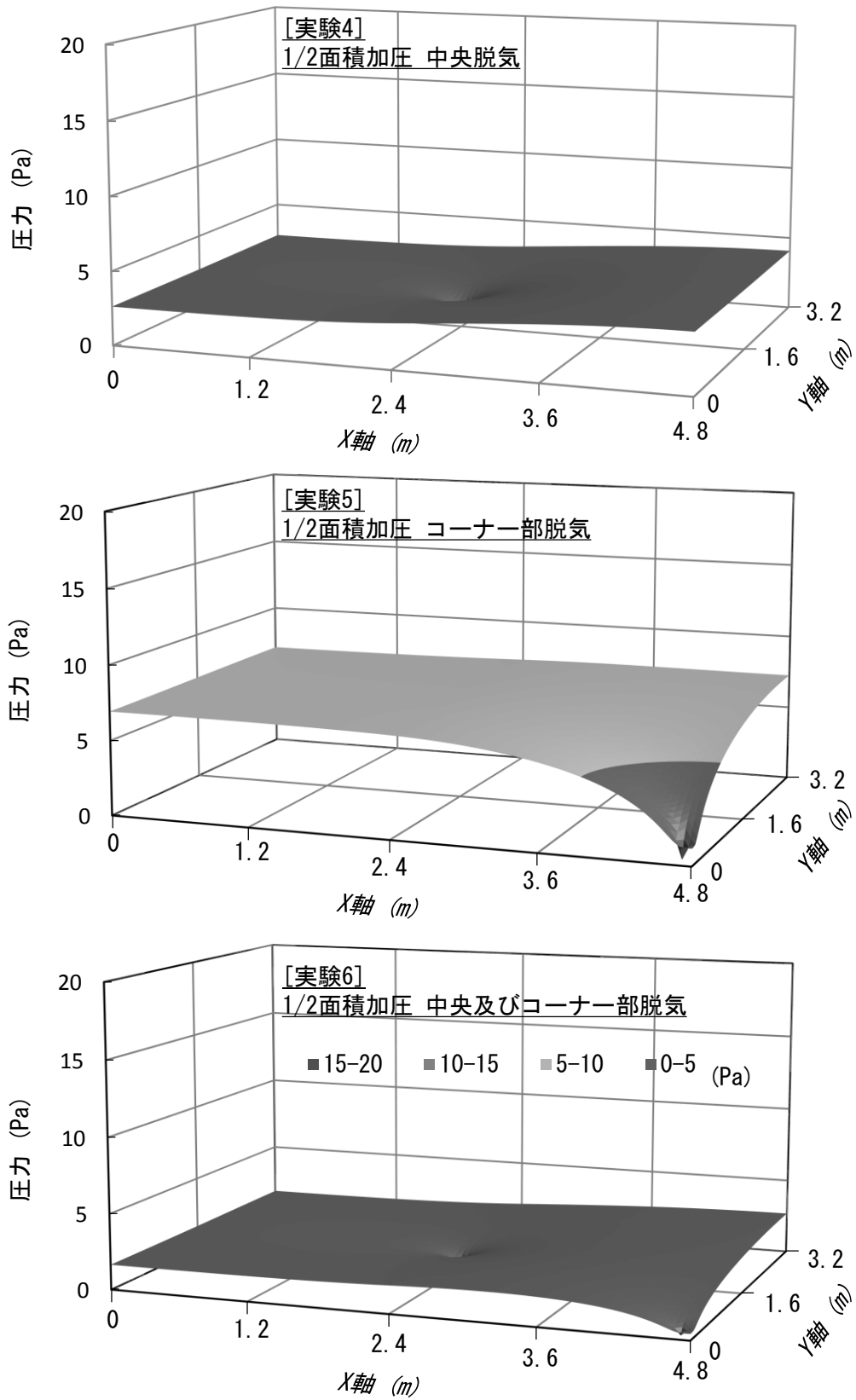


図3.26 数値解析圧力分布図 (1/2面積加圧時)

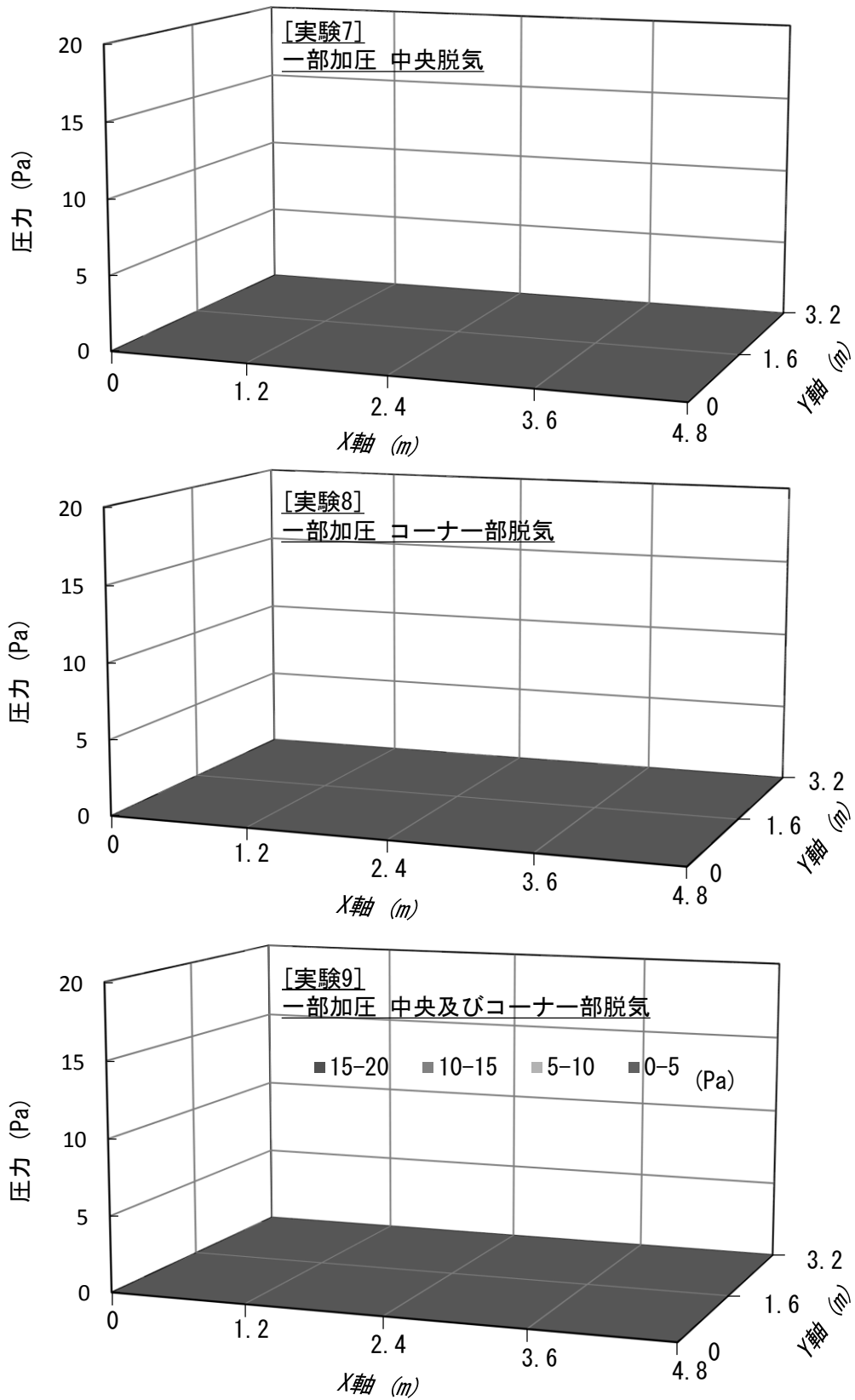


図3.27 数値解析結果圧力分布図（一部加圧時）

3.4 考察

3.4.1 密着工法との比較と脱気装置の数による効果

防水層裏面を全面加圧した時の、密着工法の場合と脱気装置を設置した通気緩衝工法の場合の最大圧力の比較を図 3.28 に示す。

密着工法では、1,000Pa（想定は 8,000Pa）まで防水層裏面圧力は上昇するが、脱気装置を 1 箇所設置した通気緩衝工法により十数 Pa まで圧力は激減し、脱気装置を 2 箇所に増やすと数 Pa まで減少する。これにより、通気緩衝工法における脱気装置の設置数を増やすことは、防水層裏面の圧力は低下させ、脱気に有効であることを示した。

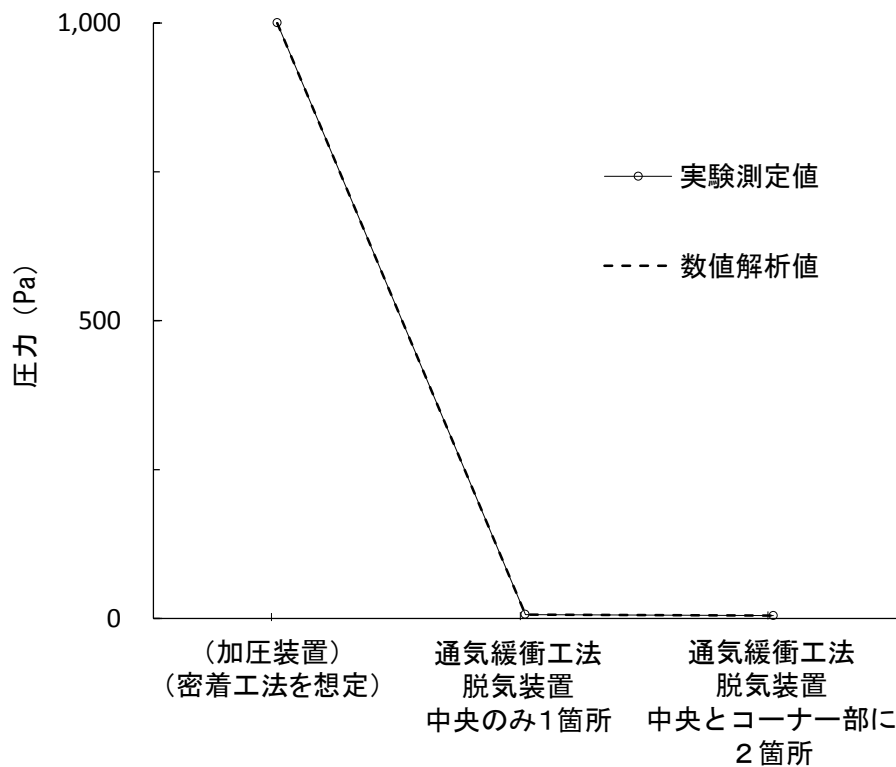


図3.28 密着工法と通気緩衝工法の脱気装置の数による圧力最大値の比較

3.4.2 脱気装置の位置が防水層裏面圧力の分布に及ぼす影響

図 3.25 の脱気装置を、中央（実験 1）とコーナー部（実験 2）に設置した時の、通気層内の数値解析による圧力分布を比較すると、いずれも脱気装置からの距離が一番離れた位置で最大圧力となり、脱気装置に向かって圧力は低下し、特に脱気装置近傍で激減する。そして設置位置の影響は顕著であり、通気緩衝工法を施工した面積内で脱気装置からの最大距離が長いコーナー部の設置では最大圧力が 10Pa を超えるが、最大距離が短い中央部設置の場合は 5Pa に低下する。このことは、脱気装置の数以外にも、どの位置に設置するかも実務では重要であることを示すものであり、特に脱気装置からの通気緩衝工法施工面積内での最大距離が長いほど、通気層内の圧力が高くなる傾向が示された。

3.5 まとめ

ウレタンゴム系塗膜防水通気緩衝工法屋根を模した試験体により、脱気装置の位置と数による脱気効果について検討を行い、通気緩衝工法の通気層内圧力分布を予測できる数値解析手法を開発し、実験結果と比較することで脱気効果を定量的に明らかにした。これにより、脱気装置の数を増やすことで脱気効果は増し、設置位置により同じ面積に1箇所であっても、脱気装置からの面積内での最大距離により、脱気効果に違いがあることを指摘した。本章で得られた主な知見は以下のとおりである。

(1) 通気緩衝工法において脱気装置を設置することにより、防水層裏面の圧力を著しく低減させることができることを明らかにした。

(2) 下地からの圧力発生面積が大きくなると通気緩衝工法の通気層内圧力は高くなり、脱気装置の数が多くなるに従って圧力は低下することを指摘した。

(3) 通気緩衝工法が施工された面積内で、脱気装置からの距離が一番離れた位置で最大圧力となり、脱気装置の設置位置により通気層内の圧力分布は大きく変わることを指摘した。このことから、面積内で脱気装置からの距離が最小となる位置に設置した場合に、最も脱気効果を有することを明らかにした。このことは脱気装置までの距離が重要であることを意味する。

(4) 通気緩衝工法における通気層内圧力分布を予測できる数値解析手法を開発し、通気緩衝工法の位置と数による脱気効果を定量化した。

【第3章での参考文献】

- (1) 橋田浩, 田中享二, 小池迪夫: 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, 日本建築学会構造系論文報告集, 第416号, pp35-45, 1990.10
- (2) 橋田浩, 田中享二, 小池迪夫: 防水層下地としてのコンクリートスラブの特性とふくれ形成圧力挙動, 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2, 日本建築学会構造系論文報告集, 第427号, pp39-46, 1991.9
- (3) 2014年版建築工事標準仕様書・同解説 JASS8: 日本建築学会, 2014.11
- (4) 建築工事監理指針平成25年版: 国土交通省大臣官房官庁営繕部監修, 公共建築協会, 2013
- (5) 建築改修工事監理指針平成25年版: 国土交通省大臣官房官庁営繕部監修, 建築保全センター, 2014

第 4 章

脱気設計方法の検討

- 4.1 はじめに
- 4.2 数値解析による脱気設計プロセスの提案
- 4.3 簡易的脱気設計プロセスの提案
- 4.4 脱気設計例
- 4.5 まとめ

第4章 脱気設計方法の検討

4.1 はじめに

ここまでの、ウレタンゴム系塗膜防水通気緩衝工法の、通気緩衝シートの通気性と脱気装置の位置と数による脱気効果を定量的に明らかにし、下地から発生した圧力を排出した際の通気層内圧力分布を予測できる数値解析手法を開発した。これらによると、脱気装置までの距離が離れるほど、防水層裏面の圧力は上昇することがわかった。つまり、工法を施工する面積内で、脱気装置から最大距離にある箇所が最大の圧力となる。脱気設計法としては、この最大圧力が設定の圧力以内に抑えるようにするプロセスを辿る方法が考えられる。

本章では脱気設計方法の一つの方向性として、開発した数値解析手法を用いたプロセスと、脱気装置の設置位置による評価方法を用いたプロセスを提示し、実際の建物を想定した脱気設計事例を示す。

4.2 数値解析による脱気設計プロセスの提案

前章にて開発した、通気緩衝工法の通気層内圧力分布を予測できる数値解析手法を、脱気設計のツールとして実務で利用することは、通気緩衝シートの性能値と脱気装置の位置と個数による、脱気の効果を定量的に設計者及びユーザーへ、わかりやすく示すことができる。そこで、これを用いた脱気設計のプロセスを脱気設計方法の一つの方向性として図 4.1 に示すように提案する。

まず、通気緩衝工法を施工する建物屋上の図面を、数値解析のモデルとして作成し、同時に通気緩衝工法の選定を行う。通気緩衝工法の選定と共に固有の許容限界圧力 P が与えられ、工法を構成する通気緩衝シートは、2章にて開発した透気係数 k の測定方法を用いて、シートごとに固有の値が与えられる。

これらの情報と脱気装置の位置を入力し、数値解析を実行後、解析された範囲内での最大圧力 P_{max} を算出する。この解析最大圧力が通気緩衝工法ごとに与えられた許容限界圧力よりも下回っていれば、設計は終了となり、上回っていれば、通気緩衝工法の選定及び脱気装置の位置を再検討する。

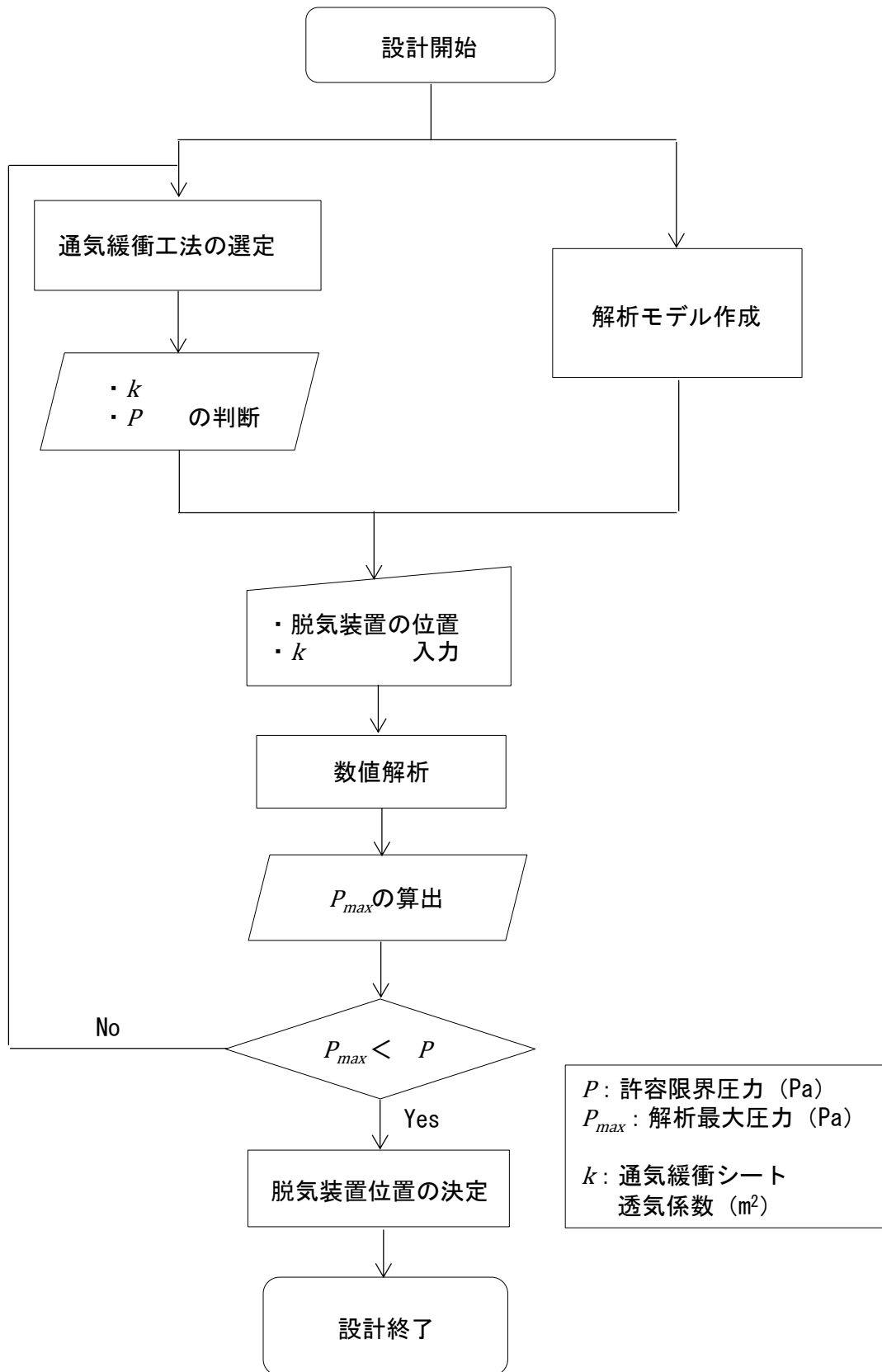


図4.1 数値解析による脱気設計のプロセス

4.3 簡易的脱気設計プロセスの提案

数値解析による脱気設計方法は、数値解析の専門知識が必要であり、かつ屋上の面積が大きくなればなるほど、解析作業に時間を要する。また、単純な形状の屋上や、防水改修工事時に設備機器や配管が少ない場合に対して、その都度数値解析による方法で設計を行うことは非効率的である。そこで、脱気設計方法の一つの方向性として、脱気装置の設置位置により通気層内に発生する最大圧力を予測し、簡易的に評価できる脱気設計方法の検討を行った。

4.3.1 脱気装置の設置位置による評価方法の考え方

前章の結果から、通気緩衝工法が施工された面積内で脱気装置からの距離が最も離れた場所で通気層内の圧力は最大となり、その距離が長くなると通気層内の圧力も大きくなることが予測された。この脱気装置から最大圧力となる箇所までの距離、つまり脱気装置から最も離れた位置までの距離を面積内最大距離 L_{max} として定義し、これに対応する圧力最大値の傾向を開発した数値解析方法により求め、両者の関係性を探ることにより、脱気装置の設置位置による簡易的な評価方法を検討した。

4.3.2 対象とする屋上モデル

通気緩衝工法で施工する屋上面積として、現在の脱気装置の設置に関する仕様を考慮に入れ、 100m^2 を想定して面積内最大距離を変化させられるように、縦横比を変化させた屋上モデルを、表 4.1 に示す形状を想定した。

また、脱気装置の設置位置を各縦横比のモデルにて、これも面積内最大距離を変化させるためであるが、図 4.2 に示す①：中央、②：長手側面、③：短手側面、④：コーナー部の4パターンを想定した。

一方、通気緩衝シートの透気係数 k は、現在市場に流通しているものを考慮に入れ、 $0.5 \times 10^{-10} \sim 10.0 \times 10^{-10}$ (m^2) の範囲を想定した。

表4.1 脱気装置の設置位置による評価方法検討のための
100m²数値解析モデルの縦横比

縦横比	縦距離 (m)	横距離 (m)	縦横比	縦距離 (m)	横距離 (m)
1:1	10.00	10.00	1:6	4.10	24.40
1:2	7.00	14.28	1:7	3.80	26.35
1:3	5.70	17.54	1:8	3.55	28.20
1:4	5.00	20.00	1:9	3.35	29.85
1:5	4.50	22.22	1:10	3.15	31.75

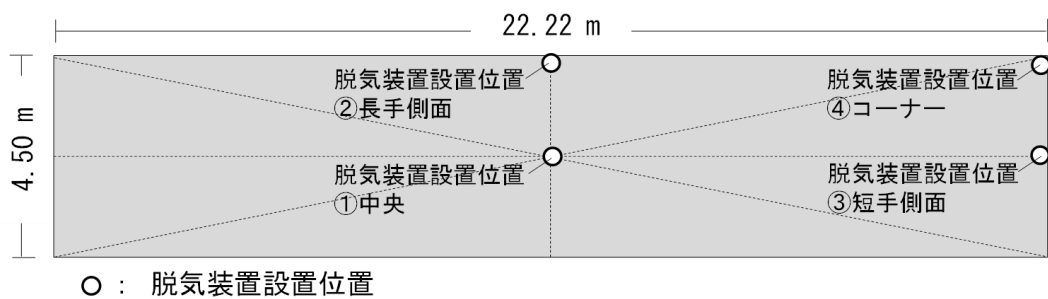


図4.2 脱気装置設置想定位置 (例 縦:横=1:5)

4.3.3 数値解析概要

解析モデルは3章で開発した方法に準じ、50mm×50mmのメッシュにてモデルをそれぞれ作製した。作製した数値解析モデルの一例として、縦：横=1：1の場合を図4.3に示す。

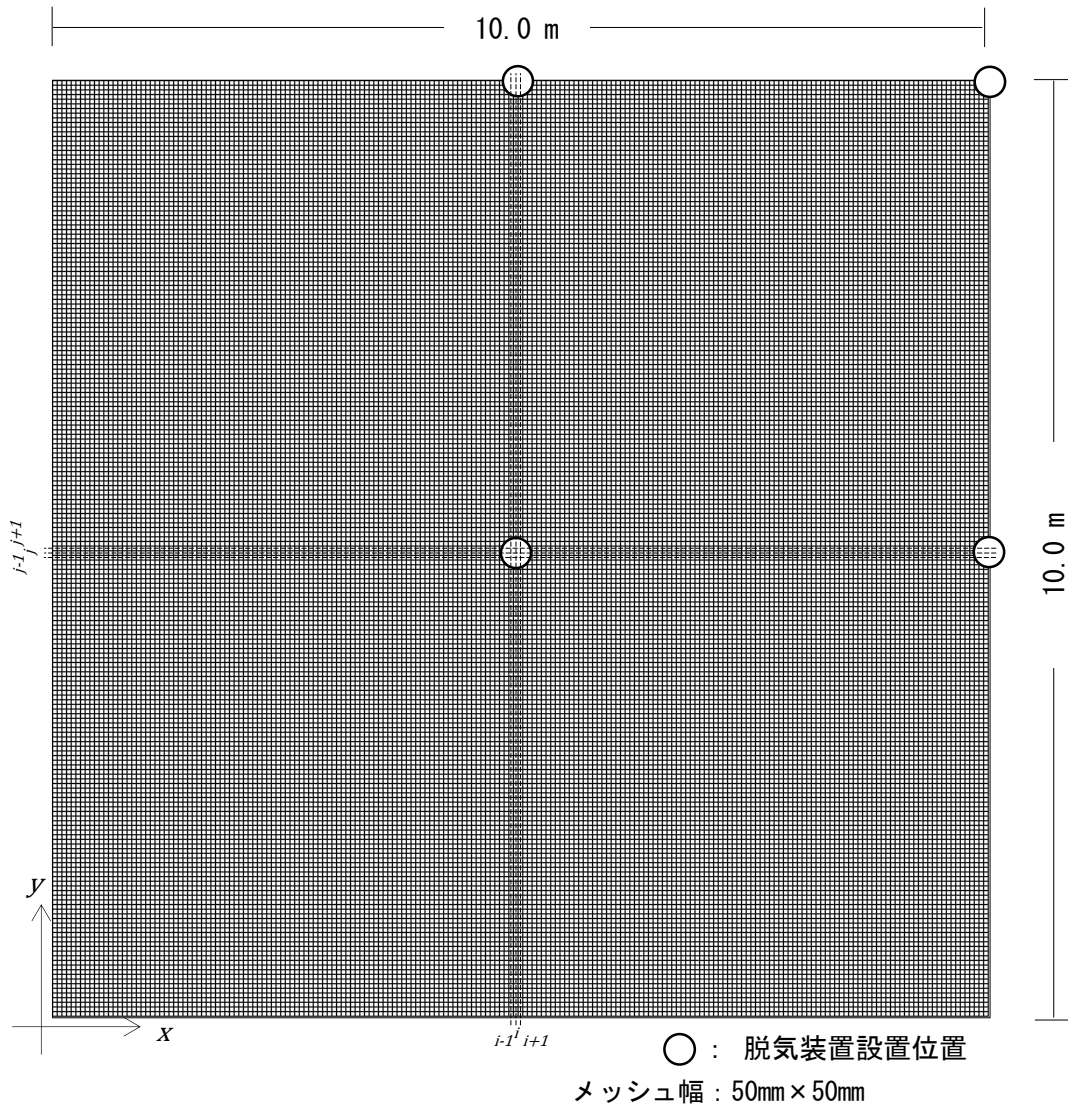


図4.3 数値解析モデル（例 縦：横=1：1）

4.3.4 数値解析結果

図4.4に想定した通気緩衝シートの透気係数 k ごとの、面積内最大距離 L_{max} と数値解析から得られた解析最大圧力 P_{max} との関係を示す。100m²を想定した数値解析において、全ての結果で脱気装置からの面積内の最大距離にある箇所において、最大圧力となり、脱気装置の設置位置により若干の傾向は見られるが、面積内最大距離と解析圧力最大値はよく対応しており、脱気装置からの面積内最大距離を用いて、圧力最大値を予測することが可能であることが示された。

また、この結果は、現在の脱気装置の設置基準である50~100m²に1箇所程度設置する場合、設置位置によって大きく脱気効果に違いがあることを意味するものである。

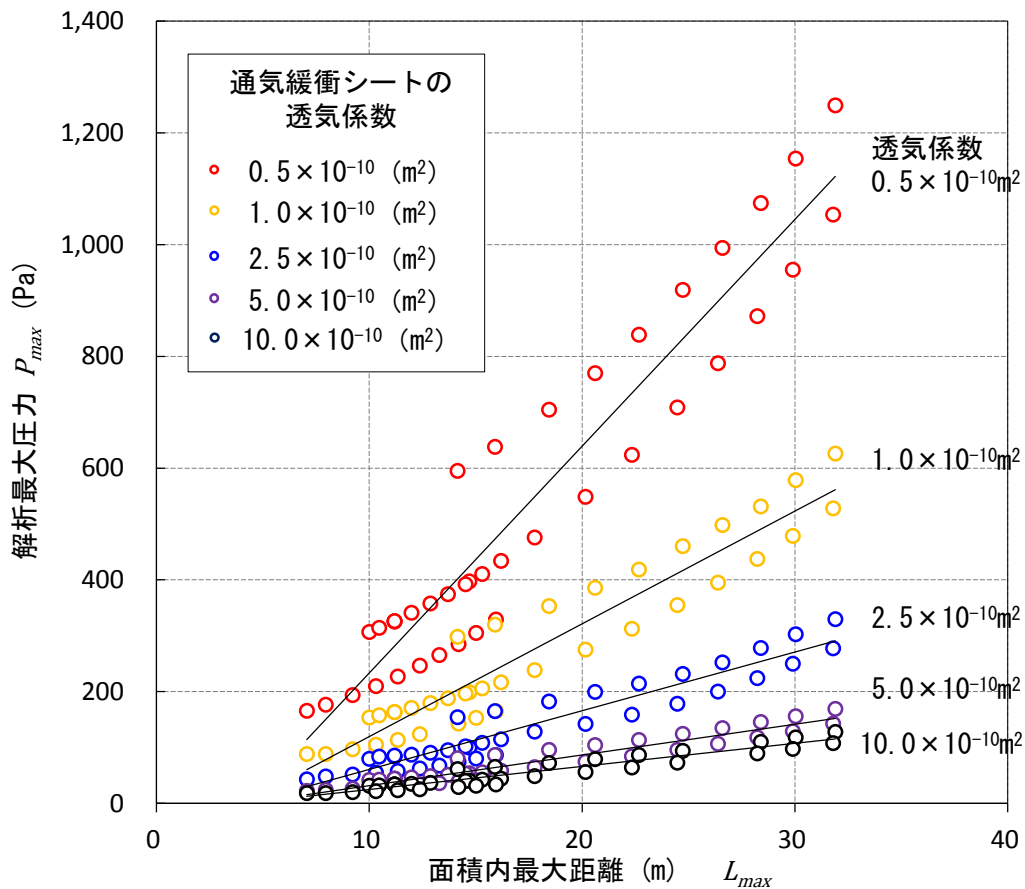


図4.4 通気緩衝シートの透気係数ごとの面積内最大距離と解析最大圧力との関係

4.3.5 脱気装置の設置位置による評価方法と簡易的脱気設計プロセスの提案

脱気装置の設置位置による評価方法として、通気緩衝シートの透気係数ごとに、脱気装置からの面積内最大距離により、通気層内に発生する最大圧力を予測する方法が利用可能である。ここから、前節の数値解析による脱気設計プロセスと同様に、通気緩衝工法ごとに固有の許容限界圧力 P が与えられることで、その工法固有に脱気装置からの面積内でとることのできる設計最大距離 L が想定できると、この距離より短く図面上で、脱気装置からの面積内最大距離 L_{max} をとれば、結果的に許容限界圧力 P 以下にすることができ、簡易的に脱気装置位置による評価が可能である。つまり、図 4.4 の解析最大圧力 P_{max} を許容限界圧力 P に、面積内最大距離 L_{max} を設計最大距離 L に置き換え、図 4.5 とすることで可能となる。そこで、簡易的な脱気設計方法の一つの方向性として、この脱気装置位置に基づく評価方法を用いた脱気設計プロセスを図 4.6 のように提案する。

評価の事前作業として、先ず通気緩衝工法の選定を行い、工法ごとに個別に設定された許容限界圧力 P 及び工法を構成する通気緩衝シートの透気係数 k の値が判断される。よって、許容限界圧力 P から図 4.5 を用いて設計最大距離 L が求められる。同時に屋上図面を作成し、図面上に脱気装置の位置を仮設定し、面積内最大距離 L_{max} を測り取る。評価方法は、この設計最大距離 L と面積内最大距離 L_{max} の値の大きさを判断する作業である。当然、 L_{max} の値が L の値よりも大きければ、許容限界圧力 P よりも通気層内の圧力が大きくなってしまう。 L の値よりも L_{max} の値が小さくなるよう脱気装置の位置を決定し、設計終了となる。これが図面上でとることができなければ、通気緩衝工法の選定及び脱気装置の位置を再検討する。

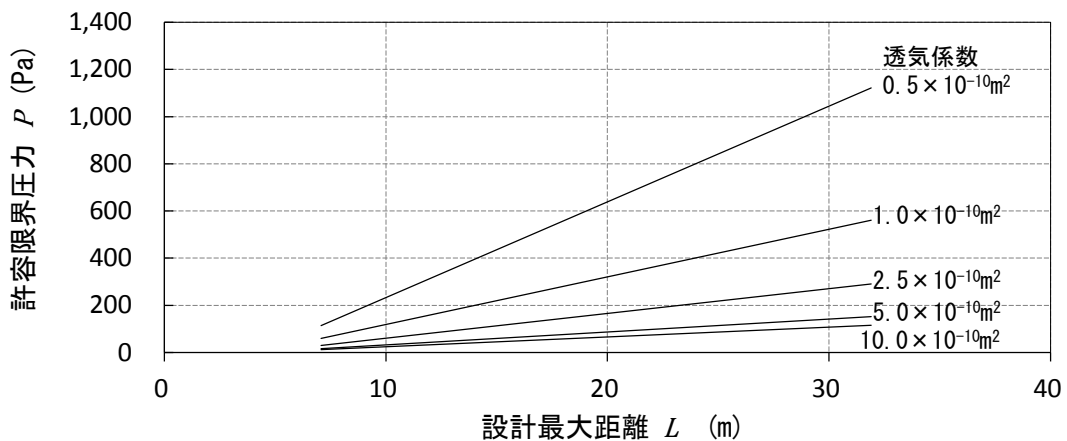


図4.5 通気緩衝シートの透気係数ごとの許容限界圧力 P から設計最大距離 L の算出

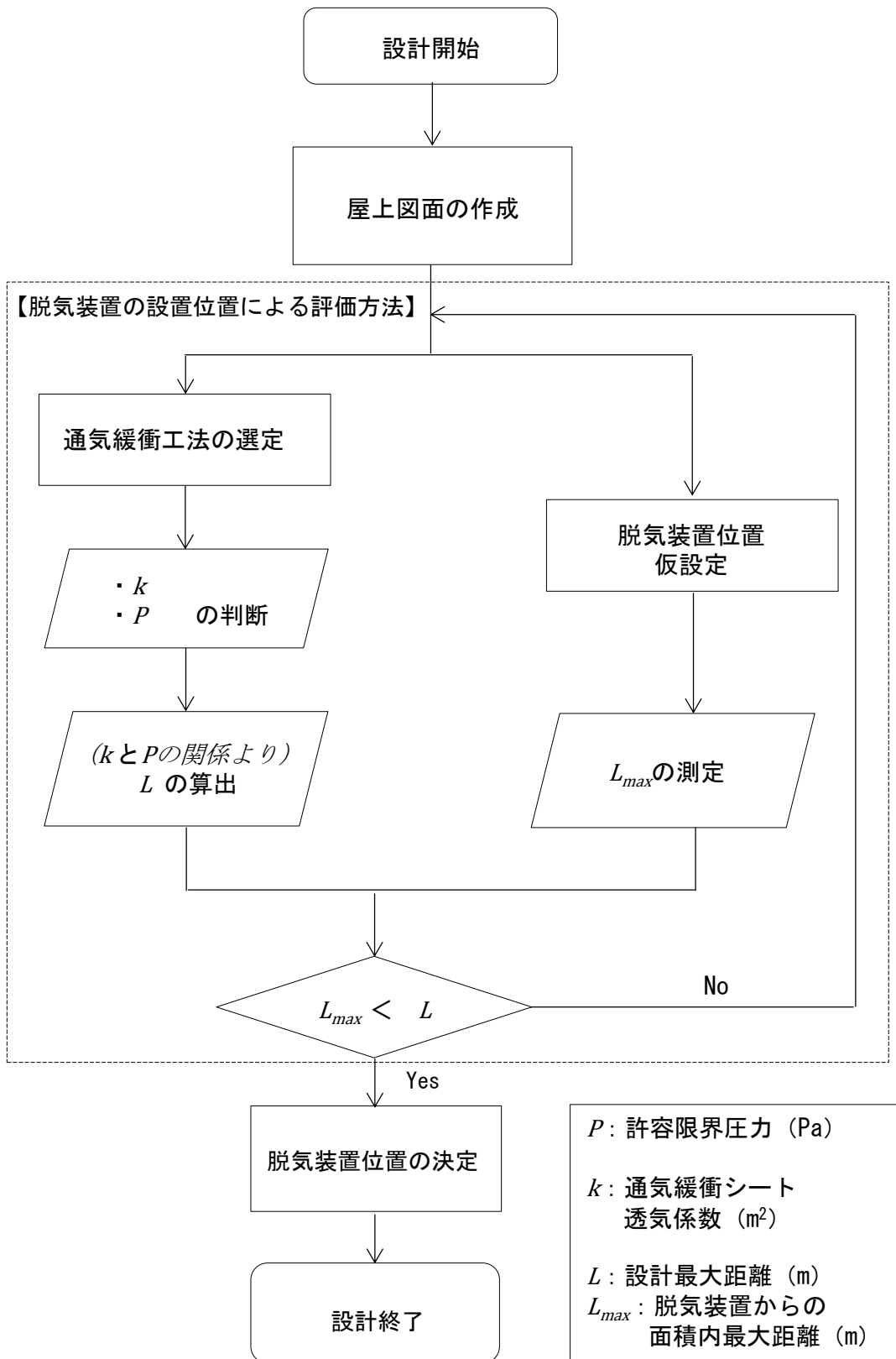


図4.6 脱気装置からの面積内最大距離による評価方法を用いた脱気設計のプロセス

4.4 脱気設計例

これまでに提案した脱気設計プロセスを用いて、実際の建物のモデルにて脱気設計を行った。図4.7に屋上平面図を示し、設計の条件は下記のように想定する。

(想定) 設計透気係数 : 2.5×10^{-10} (m²)

許容限界圧力 : 300 (Pa)

設計最大距離 : 30 (m) (図4.5より)

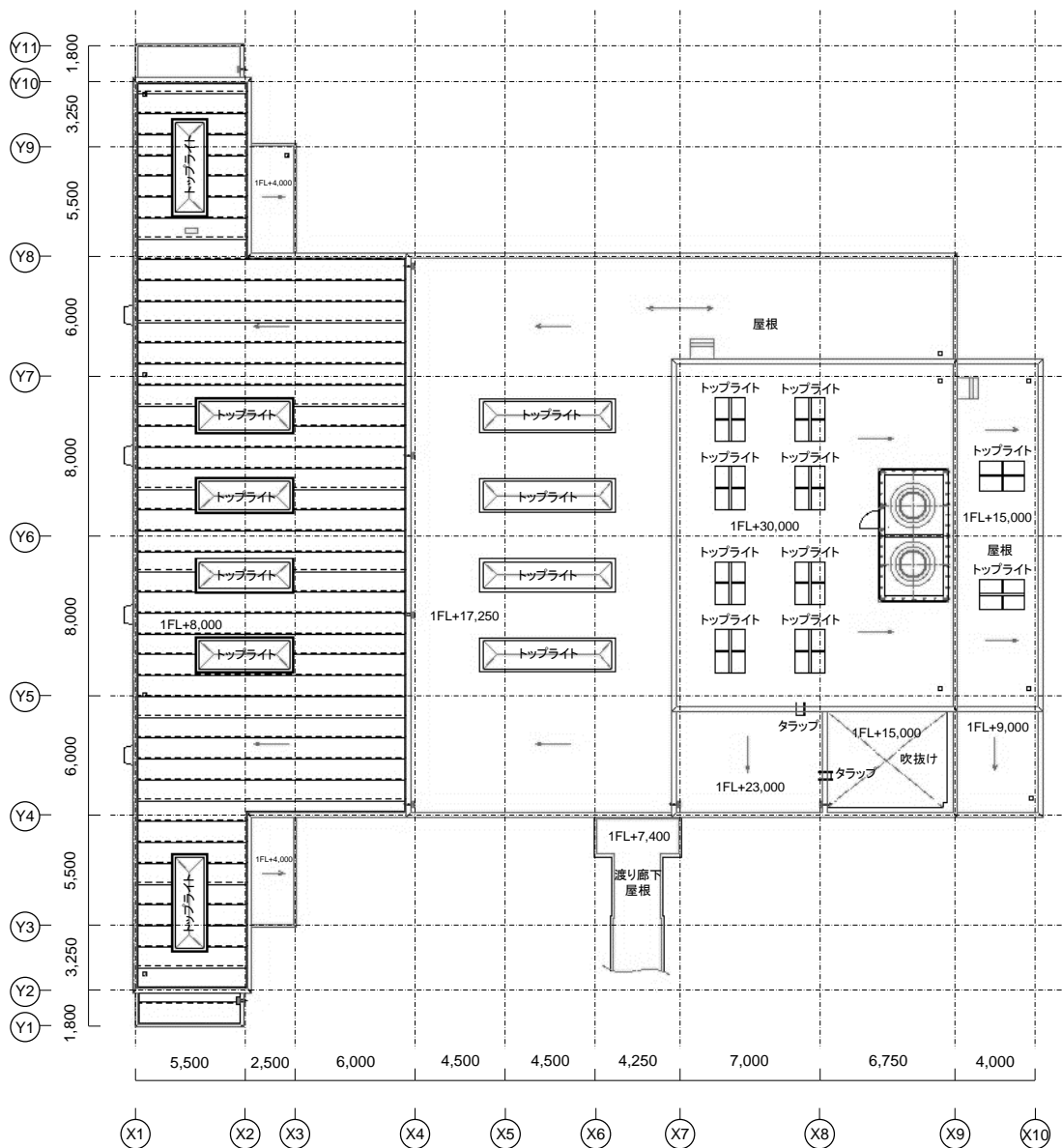


図4.7 脱気設計例 平面図

① 数値解析による脱気設計プロセス

例として示した平面図において、数値解析を用いた脱気設計方法を実践する。

(1) 脱気装置2箇所

図4.8に脱気装置が端部に計2箇所設置された場合の数値解析結果を示す。この場合の解析限界圧力 P_{max} は 284 (Pa) であり、許容最大圧力 P として仮に設定した 300 (Pa) を超えていないため、設計終了となるが、安全を考え脱気装置の増設を検討するべきと考えられる。

(2) 脱気装置3箇所

図4.9に脱気装置が端部に計3箇所設置された場合の数値解析結果を示す。この場合の解析最大圧力 P_{max} は 168 (Pa) < 300 (Pa) であり、許容限界圧力を超えていないため、設計終了となる。

(3) 脱気装置4箇所

図4.10に脱気装置が端部に計4箇所設置された場合の数値解析結果を示す。この場合の解析限界圧力 P_{max} は 98 (Pa) < 300 (Pa) である。当然脱気装置の数を増やせば、その効果が大きくなり、同様に許容限界圧力を超えていないため、設計終了となる。

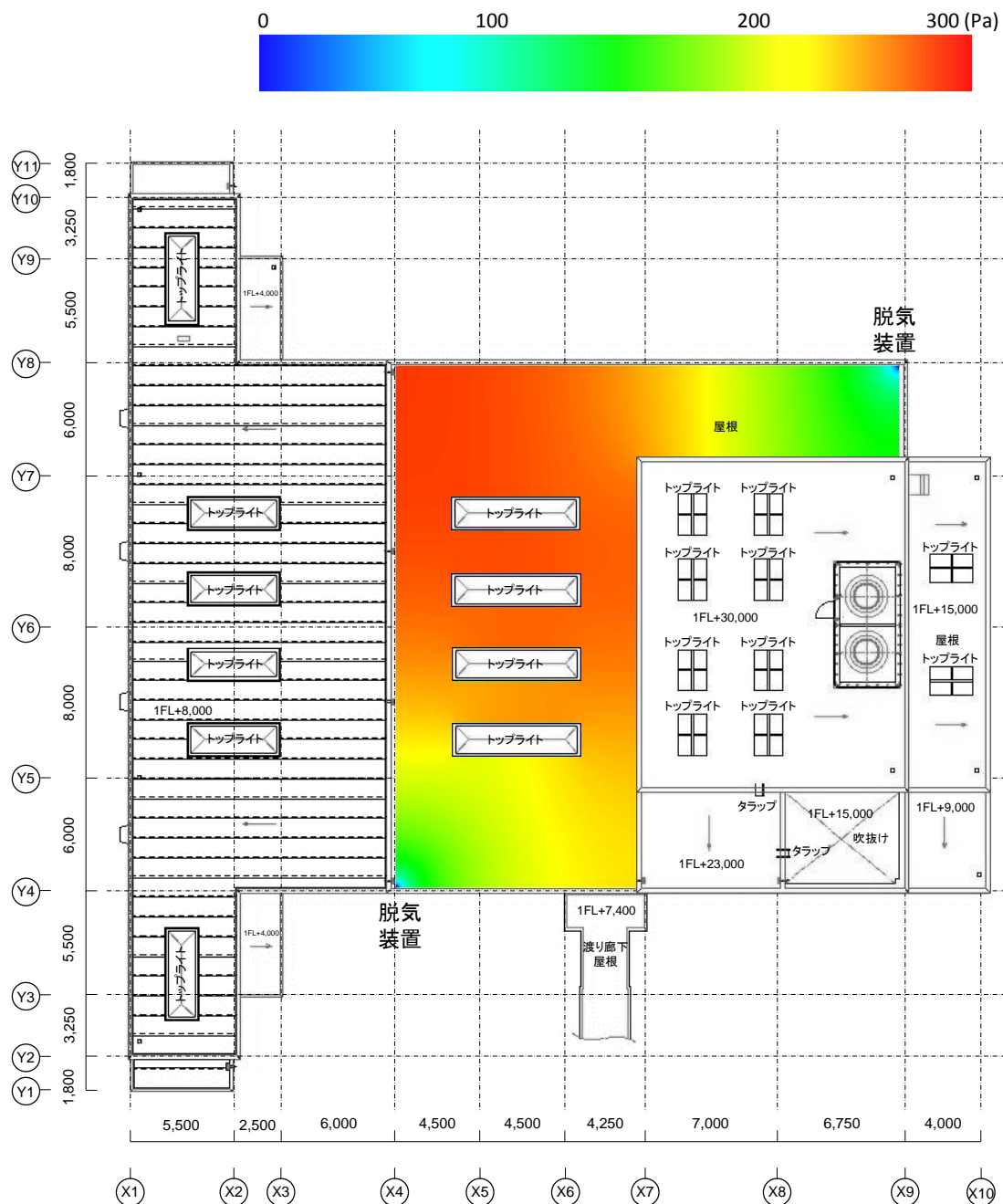


図4.8 解析結果 脱気装置 2箇所

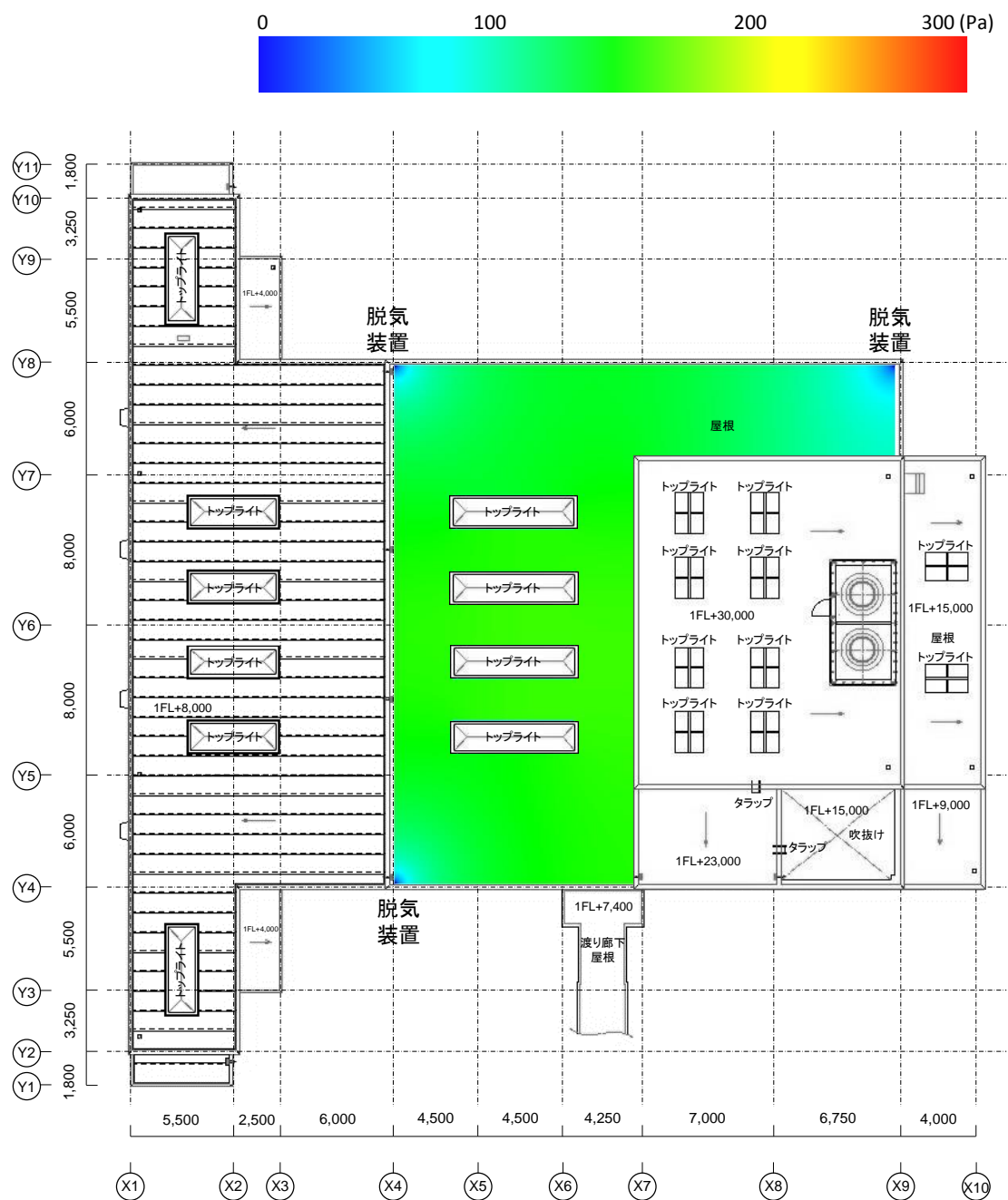


図4.9 解析結果 脱気装置3箇所

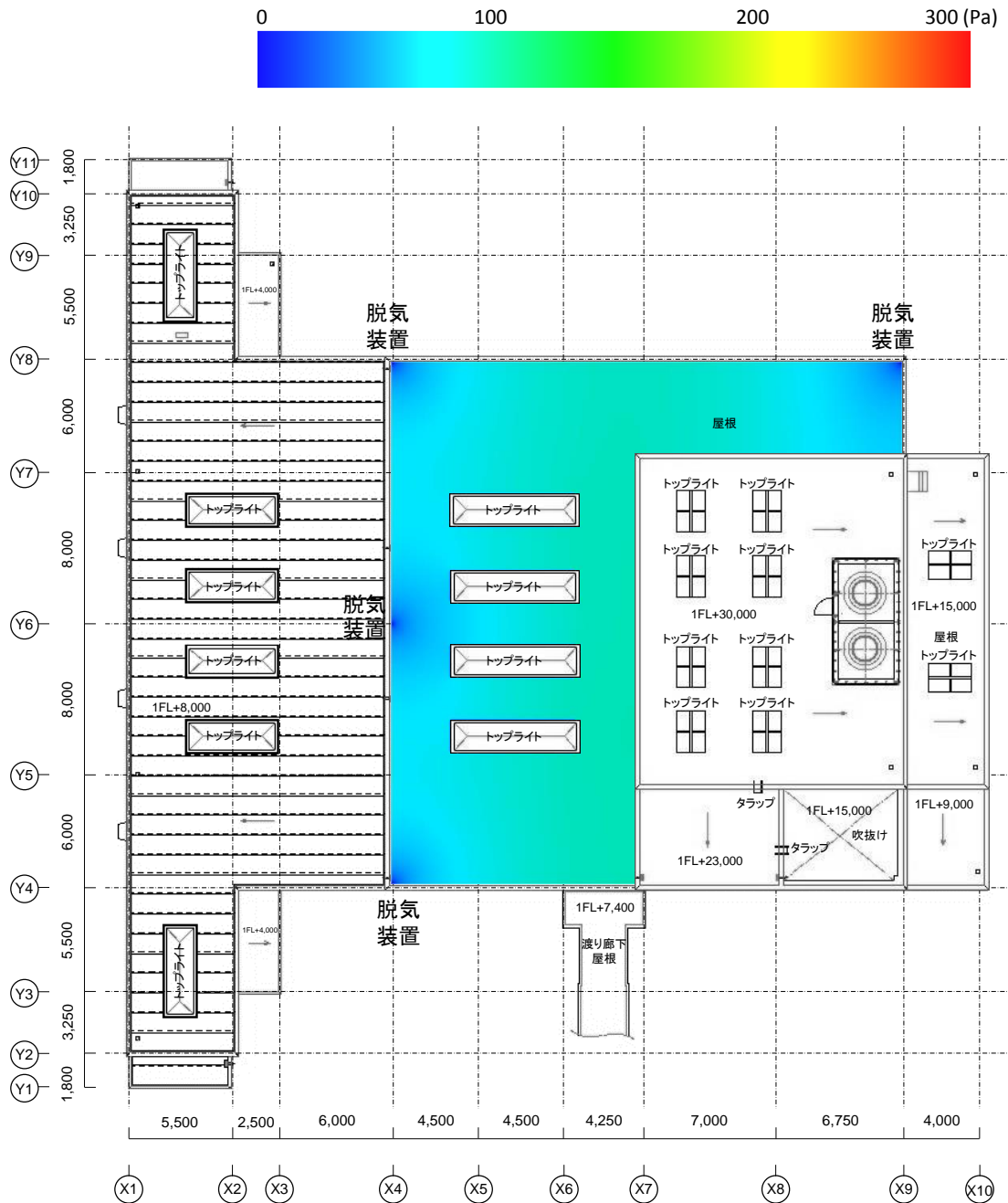


図4.10 解析結果 脱気装置4箇所

② 簡易的脱気設計プロセス

屋根面の積極的利用を想定しない場合や、脱気装置の設置位置を問わない場合、なるべく脱気装置の設置箇所を少なくしたい場合は、面積内最大距離をなるべく短くするように、中心部への設置が望ましい。

許容限界圧力を 300 (Pa) 以下にしたい場合、図 4.5 を参照し、設計最大距離を 30 (m) 以下にするように、脱気装置の位置を検討する。図 4.11 のように、面積内最大距離が、設計最大距離を超えないように、脱気装置を設置するには 2 箇所の設置が考えられる。この場合、最大で離れている地点までの距離は、 $L_{max}=15.54$ (m) < 30 (m)、 $L_{max}=20.47$ (m) < 30 (m) であり、設計最大距離を超えていないため、設計終了となる。

図 4.12 にこれを数値解析した場合も示す。解析最大圧力は 157 (Pa) < 300 (Pa) であり、許容最大圧力を超えていないことが確認できる。

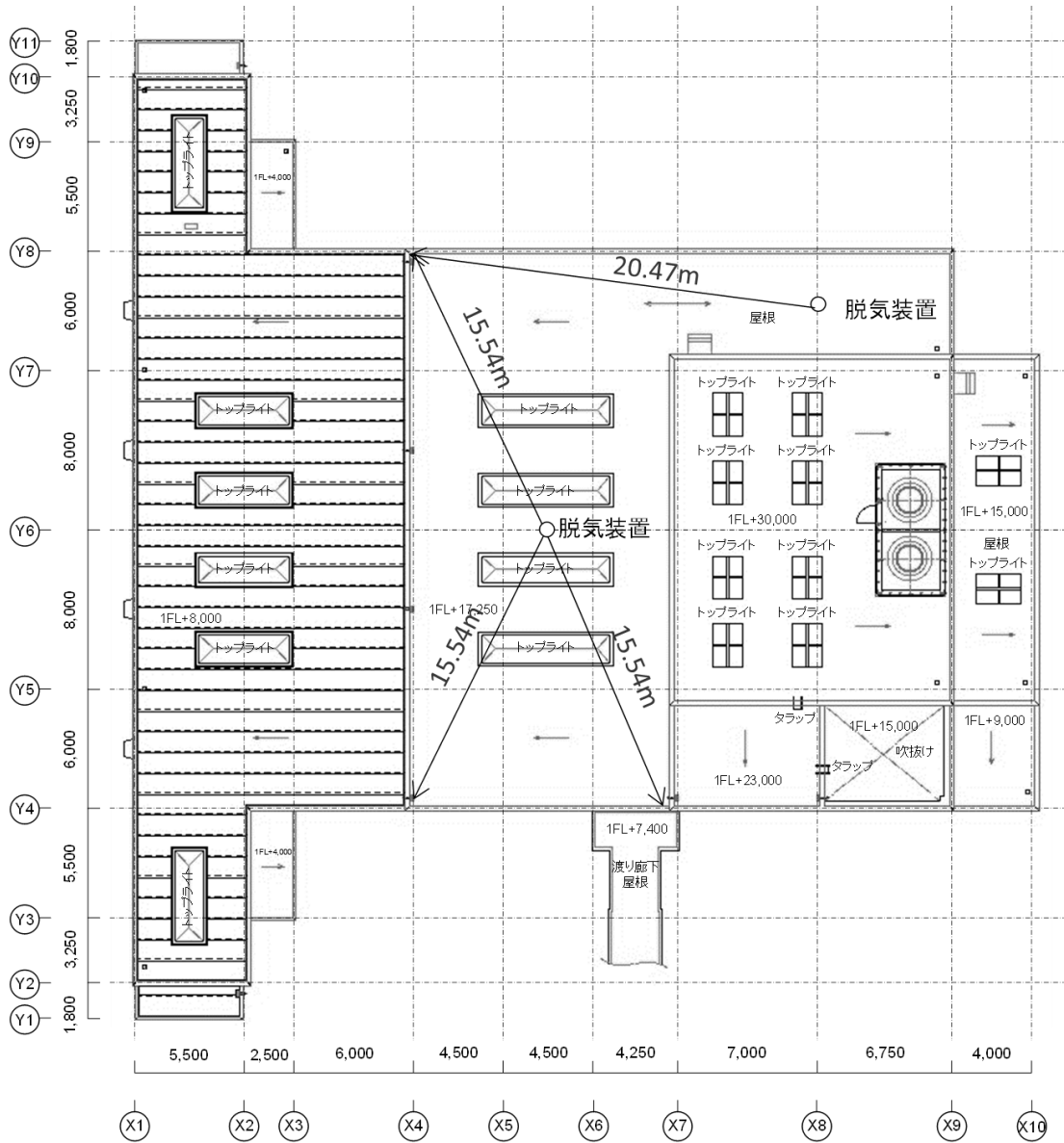


図4.11 脱気装置の設置位置による評価方法を用いた脱気設計例

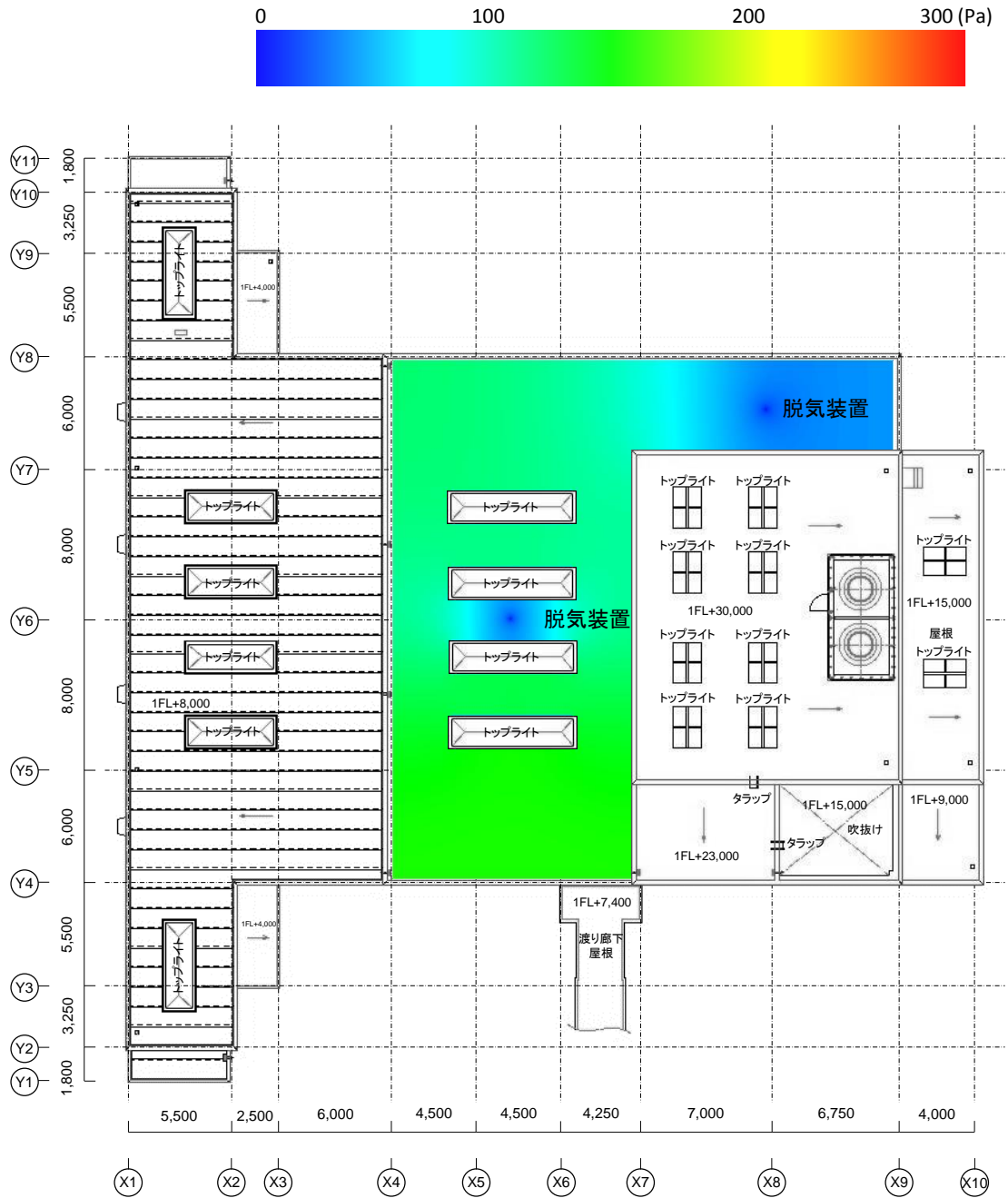


図4.12 脱気装置の設置位置による評価方法を用いた脱気設計例
(数値解析結果)

4.5 まとめ

ウレタンゴム系塗膜防水通気緩衝工法の脱気設計方法の検討を行い、脱気設計のプロセスを、脱気設計方法の一つの方向性として提案した。これを用いた脱気設計への適用例を示し、提案した脱気設計方法の有用性を示した。本章で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 脱気設計方法の一つの方向性として、開発した通気緩衝工法の通気層内圧力を予測する数値解析方法を用いた、脱気設計のプロセスを提案した。

(2) 通気緩衝シートの透気係数ごとに、脱気装置からの面積内最大距離と通気層内最大圧力予測値との関係を示すことで、脱気設計時に利用できる、脱気装置の設置位置による評価方法を提示した。また、簡易的な脱気設計方法の一つの方向性として、脱気設計のプロセスを提案した。

(3) 現在の脱気装置の設置基準である、50~100m²に1箇所程度設置する場合、設置位置によって、大きく脱気効果に違いがあることを指摘した。

(4) 提案したプロセスにより、実際の屋上平面図を用いた、定量的な脱気設計事例を記載した。

なお本研究では、これらの脱気設計プロセスの具体的な実設計への適応までは至っておらず、今後さらに検討する必要がある。

具体的には、個々の通気緩衝工法別に設定されるべき許容限界圧力 P の設定は、通気層内圧力の上昇による下地と防水層の接着力限界から求める方法と、防水層の変形による美観の面から許容限界を求める方法とが考えられ、安全率の取り方を含め、今後試験方法の整備が必要となる。

また、脱気装置の設置位置による評価方法による脱気設計プロセスでは、脱気装置を複数設置した場合の面積内最大距離 L_{max} の取り方や、圧力の低減効果についても、今後検討していく必要がある。

第 5 章

結論

第5章 結論

本研究は、ウレタンゴム系塗膜防水における“ふくれ”の防止策として、現在最も有効な手段である、通気緩衝工法の脱気効果について研究したものであり、工法を構成している通気緩衝シートの通気性能と脱気装置の位置や個数による脱気効果への影響を、実験及び数値解析を基に定量的に明らかにし、定量的な脱気設計方法の方向性を示した。以下に本研究の総括を述べる。

(1) 通気緩衝シートの通気効果の定量化

第2章では、通気緩衝シートの通気性能を定量化するために、透気係数を導入した。また、これを的確に測定しうる試験方法を開発し、それによる試験結果を用いた数値解析と屋外実験での結果を比較することにより、ウレタンゴム系塗膜防水における通気緩衝シートの通気効果を定量的に明らかにした。

(2) 脱気装置の位置と数による脱気効果の定量化

第3章では、ウレタンゴム系塗膜防水の通気緩衝工法屋根を模した試験体により、脱気装置の位置と数による脱気効果について検討を行い、通気緩衝工法の通気層内圧力分布を予測できる数値解析手法を開発し、実験結果と比較することで脱気効果を定量的に明らかにした。

さらに、通気緩衝工法が施工された面積内で、脱気装置からの距離が一番離れた位置で最大圧力となり、脱気装置の設置位置により通気層内の圧力分布は大きく変わることを指摘した。このことから、面積内で脱気装置からの距離が最小となる位置に設置した場合に、最も脱気効果を有することを明らかにした。

(3) 脱気設計方法の検討

第4章では、通気緩衝工法の脱気設計方法の検討を行い、一つの方向性として、開発した通気層内圧力分布を予測できる数値解析手法を利用した、脱気設計プロセスを提示した。また、通気緩衝シートの透気係数ごとに、脱気装置からの面積内最大距離と通気層内最大圧力予測値との関係を示すことで、脱気設計時に利用できる、

脱気装置の設置位置による評価方法を提示し、簡易的な脱気設計方法の一つの方向性として、脱気設計のプロセスを提案した。

さらに、これらの脱気設計プロセスにより、実際の屋上平面図を用いて定量的な脱気設計事例を記載した。

このように本研究により、通気緩衝シートの性能値である透気係数と、脱気装置の位置や個数による通気層内の圧力の上昇値を基に、定量的に脱気効果の検証が可能となった。また、脱気設計方法の一つの方向性として提示したプロセスは、防水実務にて利用するためには種々の課題を解決する必要があるが、非常に有用な手段の一つであり、脱気設計方法の確立に向けて、さらなる研究課題に取り組んでいきたいと考えている。

<付録>

1. 視覚的観点からみたウレタン塗膜防水におけるふくれ
2. 各種通気緩衝シートの透気係数測定

1. 視覚的観点からみたウレタン塗膜防水におけるふくれ

1-1 はじめに

ウレタン防水層は防水皮膜が非常に柔軟であるため、下地からの圧力に対して変形しやすく、写真 1-1 のようにふくれが生じるという問題があった。しかし、ふくれは材料が変形しているだけであり、直接漏水事故を引き起こすものではないため、重大な瑕疵とは認識されてこなかった。ただ、その部分は防水材が伸ばされており、伸長した状態では劣化が早まることに加え、ふくれは日中に大きく夜間は小さくなるため、繰り返し疲労を受け、耐久性の観点からは望ましいことではない。

これらを考慮して、これまでは劣化という観点から、特に大きな場合にのみ不具合として取り扱うことが一般的であり、建設大臣官房技術調査室監修の「建築防水の耐久性向上技術」⁽¹⁾及び、建築物の長期使用に対応した外装・防水の品質確保ならびに維持保全手法の開発に関する研究⁽²⁾から、劣化診断を実施する際に、面積比の30%以上または1個の長径が300mm以上を補修の対象としているのが現状である。しかし、建物の所有者や使用者にとっては、小さなふくれでも、特にそれが複数発生している場合は、見て気持ちのよいものではない。そのため最近是比较的小さなふくれでも、美観上クレームとして指摘されるようになってきている。

ふくれは施工時の気象や下地の状態の影響を受け発生するが、これらを完全に制御することは困難であり、ふくれの完全な除去は難しいことが多い。このような状況を踏まえると、一般の人々がどの程度の大きさ、数からふくれと認識し、さらに不快と感じるかを明らかにしておくことは、今後ウレタン防水層のふくれ対策を検討する上での重要な情報となる。

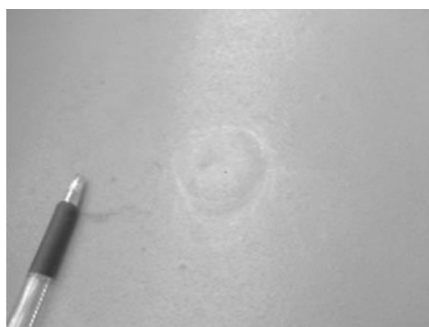


写真1-1 ふくれの例

本研究ではまず単一のふくれに対して、建物使用者側の観点で、どの程度のふくれから不具合と認識されるかを明らかにすることを目的としており、ウレタン防水層表面に発生したふくれ状のものが、どの程度の大きさからふくれと認識し、さらには美観上許容出来なくなるかを、建物使用者の立場で検討した結果を報告する。

1-2 ふくれの視認開始限界と美観上の許容限界把握のための官能試験

1-2-1 環境条件の設定

建物使用者がふくれとして認識しやすい環境条件は、観察距離や光沢度に合わせた照射角度、もしくは、それらに寄らず目立ちやすい低照射角の場合であるが、ウレタン塗膜防水におけるふくれは、梅雨明けから夏場にかけて発生しやすいと言われている。多くのふくれの原因として考えられる、コンクリート下地とウレタン防水層間に発生する圧力は、本論2章に示した屋外にて実測した結果によると、7月初旬の梅雨明けから秋口にかけての、太陽が昇り切った正午付近で、大きな圧力が発生する結果が得られている。図1-2に東京（約北緯35度）の正午での太陽高度の年間変化を示し、その中で、7月から8月にかけての範囲を破線で示す。ふくれの起きやすい夏場の環境を想定すると、太陽高度は65~75°の付近となる。また、照度も屋外を想定し、比較的大きなものとして30,000 (lx) の照明を使用し、これを70°の角度で照射することとした。

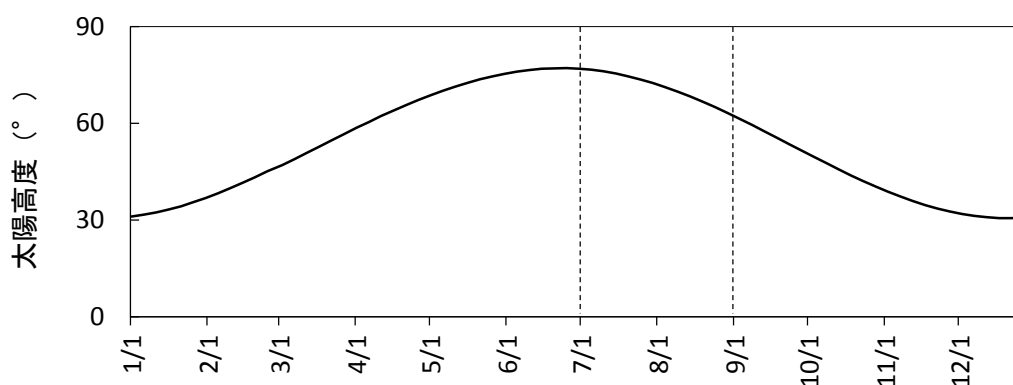


図1-1 正午における太陽高度 年間変化 (例 東京都 (北緯35度))

1-2-2 試験体

ウレタン塗膜防水で施工された防水層で見られるふくれの中には、歪な形も見られるが、本研究では大きさとして定義がしやすいように円形のモデルとし、図 1-2 に示す大小 6 種類（直径 10, 20, 30, 50, 100, 150mm）の大きさとした。試験体は 1m × 1m、厚み 10mm の塩ビ板の中央部に、直径 5mm の圧力注入口を設け、この中心に所定の径にてふくれを人工的に発生させるものとし、図 1-3 に示すように、下地の塩ビ板とその上に施工するウレタン防水を接着させないように、模擬剥離部を設けた。この模擬剥離部には離型剤を塗布し、それ以外の部分にはプライマーを塗布した。その後、目標膜厚 3mm で JIS A6021 に準拠されるウレタン塗膜防水材（平場用）を施工した。また、表面の光沢度はウレタン塗膜防水層の経年劣化した状態

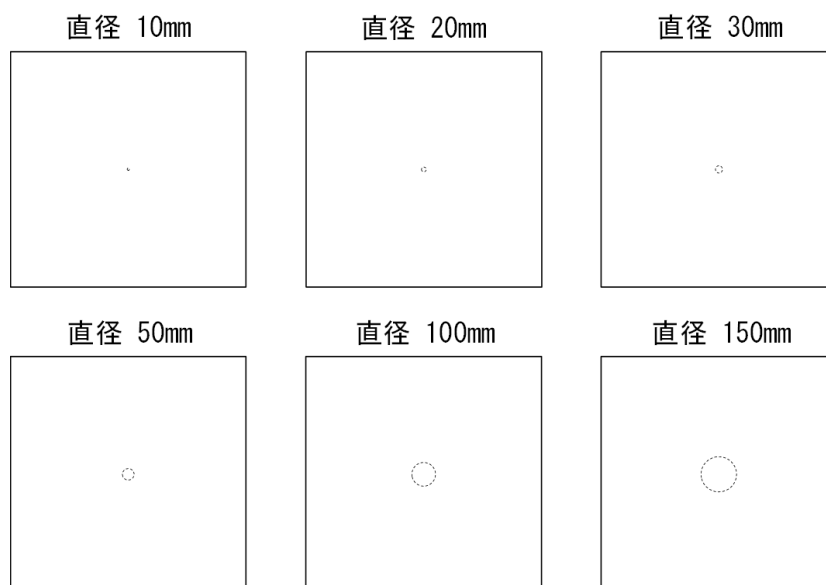


図1-2 ふくれの大きさの種類

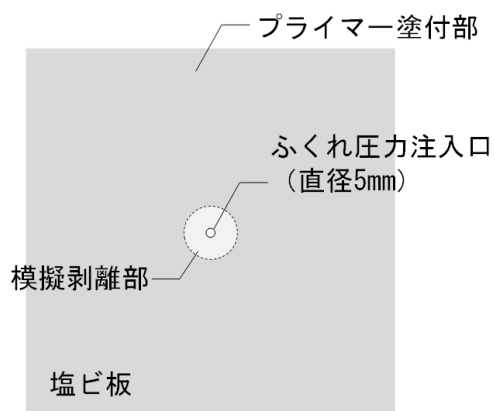


図1-3 人工ふくれ発生部

を想定することとし、60° 光沢度 30 となるように調整した、艶消しの保護仕上材を塗布した。

ふくれを発生させる方法として、図 1-4 に示すようにシリンジにより発生させた圧縮空気を、バルブを取り付けた耐圧チューブを通し、試験体裏面の圧力注入口から注入し、人工的にふくれを発生させた。尚、ふくれ高さはレーザー変位計により測定し、目標ふくれ高さになった時点でバルブを閉めて、高さを維持した。

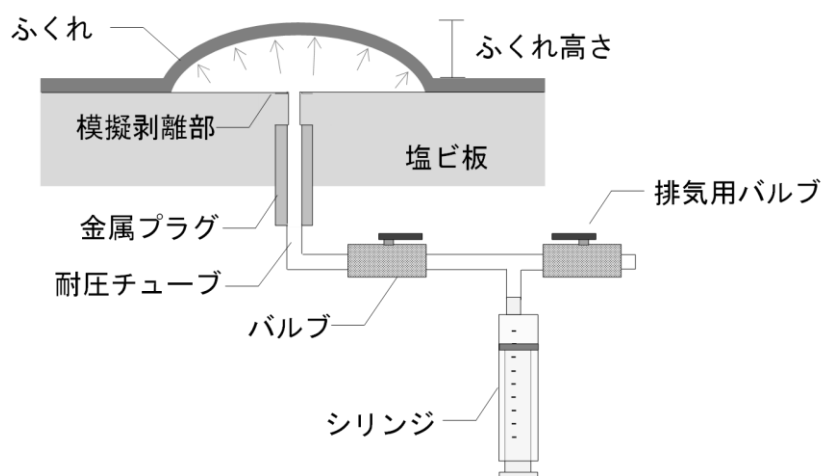


図1-4 人工的なふくれの発生方法

1-2-3 試験方法

ウレタン塗膜防水における、視覚的に“ふくれ”と見なす認識限界と美観上の許容限界を、建物使用者の立場で検討するために、極小変化法（極限法）による官能検査を実施した。図 1-5 に試験の概要を示す。なお、ふくれまでの観察距離は 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0m の 5 段階とした。

6 種類のふくれの大きさの試験体ごとにふくれの高さを 0mm から 0.25mm ずつ増加させ、高さを維持した状態で、被験者に各観察距離にて「ふくれとして認識できるか」否かを判断してもらい、その境界のふくれの高さを記録した。更に、認識できる場合は、「このふくれは美観上許せるか」否かの判断をしてもらい、同様にふくれの高さを記録した。その後折り返し、高さを 0.25mm ずつ減少させ、ふくれとして認識できない高さまで実験を行った。被験者は 21～23 歳の男女 10 人とした。

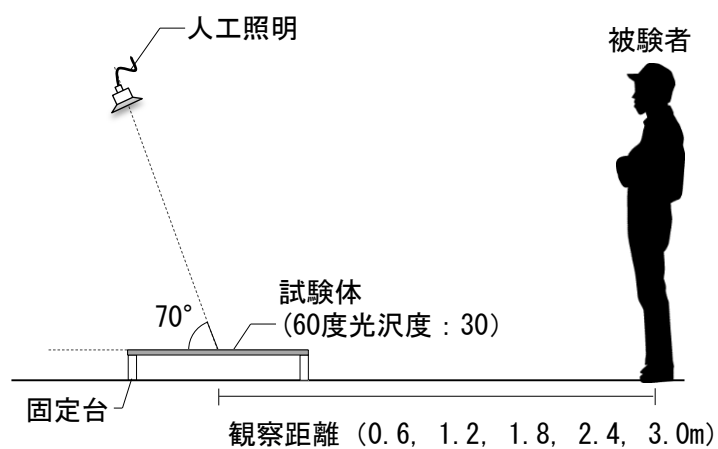


図1-5 照射角度と観察距離

1-2-4 試験結果

官能検査の結果として、ふくれの大きさごとの、観察距離とふくれ高さの関係を図1-6に示す。

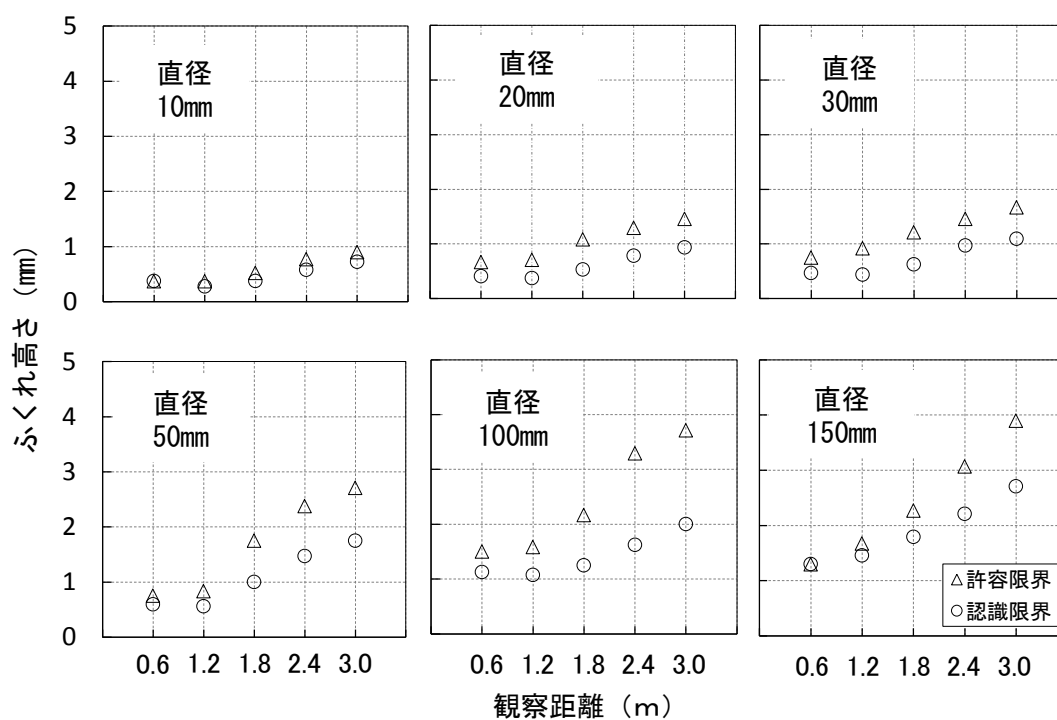


図1-6 官能試験結果

ふくれとして認識される高さは、被験者からふくれまでの距離が近いほど低くなっていることから、当然のことではあるが近いほど認識しやすくなり、近距離（1.2m未満）では認識にほとんど差はない。また、ふくれ直径が増加すると、ふくれと認識する限界と美観上の許容限界、ふくれ高さも高くなる傾向が見られた。図 1-7 に、観察距離 0.6m と 3.0m の、ふくれの大きさと高さの関係を示す。

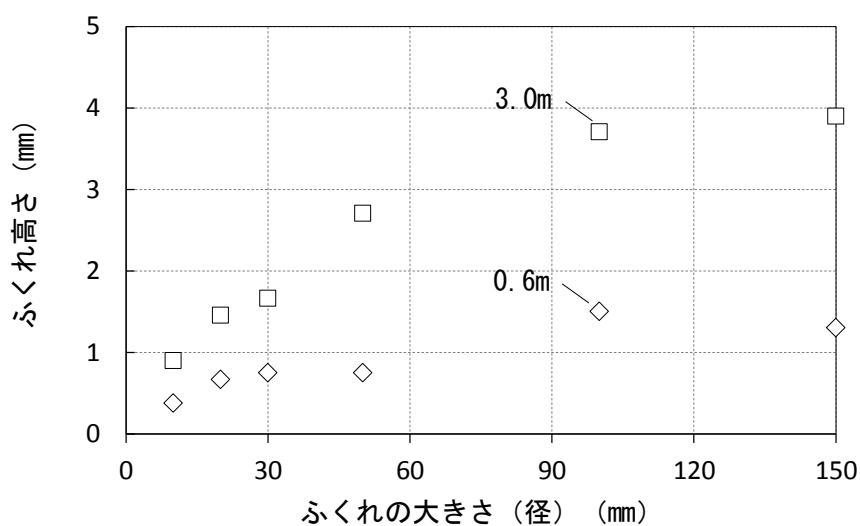


図1-7 ふくれの大きさごとの許容限界
(観察距離 : 0.6m, 3.0m)

1-3 まとめ

本研究で得られたことを以下にまとめる。

(1) ふくれの認識は、ふくれの大きさの影響が大きいですが、観察者からふくれまでの距離の影響を受け、距離が近い場合に認識されやすくなる。

(2) ふくれの発生が最も顕著となる晴天の正午頃の約北緯 35 度を例にすると、観察距離数メートルでは、ふくれのサイズが直径 30mm 程度のものでは、高さ約 0.5mm くらいから、ふくれがあると認識される。

(3) ふくれの高さが高くなると、許容出来ないと感じる。実際のふくれでよくみられる直径 30mm 程度のものでは、高さが 1.0mm 程度から許容できないと感じ始める人の数が多くなる。

これは従来の耐久性の観点から見た、長径 300mm 以上のふくれよりも、建築物使用者が美観上許容出来ないふくれは、より小さいものである可能性を示した。

2. 各種通気緩衝シートの透気係数測定

2-1 はじめに

本論 1 章でも述べたように、通気緩衝シートの通気性能に関する記述として、1986 年版 JASS8⁽³⁾に初めて通気緩衝シートの試験方法が提案され、さらに 1993 年版 JASS8 の解説のなかに品質基準（案）⁽⁴⁾として通気緩衝シートの物性値が提示されていたが、通気の定量的な意味が明確でない事や、試験結果が安定しない等の理由から、2000 年⁽⁵⁾の改訂版からそれが削除されてしまった。現在、建築防水の市場では様々な種類の通気緩衝シートが供給されているが、通気性能に関する規格が存在しないのが現状であり、定量的な性能値が定義されていないため、通気性能にも幅があると考えられる。

そこで、本論 2 章にて開発した、通気緩衝シートの通気性能を定量化することのできる透気係数測定法により、現在市場に流通している通気緩衝シートの透気係数の把握を試みた。

2-2 通気緩衝シートの透気係数測定試験概要

2-2-1 通気緩衝シートの種類

透気係数の測定試験を行う通気緩衝シートは、現在市場に流通し、一般的に使用されているものを選択し、表 2-1 に示す 10 種類のものを使用した。本論の 2 章にて用いた通気緩衝シートは試験体記号①、3 章にて用いた通気緩衝シートは試験体記号②である。

表 2-1 通気緩衝シートの種類と通気層厚み

試験体記号	種別		通気層厚み
①	不織布タイプ	穴あき タイプ	1.0 mm
②			2.5 mm
③			1.5 mm
④			1.2 mm
⑤		穴なし タイプ	2.5 mm
⑥			1.2 mm
⑦	複合タイプ	接着剤タイプ	0.5 mm
⑧		自着 タイプ	0.2 mm
⑨			0.2 mm
⑩			0.5 mm

2-2-2 試験体及び試験装置

本論 2.3.4 に示した、試験体長さ 500mm のアルミ板を下地として、各通気緩衝シートを製造所の指定する施工手順にて施工を行い、翌日まで室内環境を 20℃、50%に保った恒温室内にて養生を行い、全ての試験体で、同じウレタン防水材を厚さ 3mm となるように塗布し、同環境にて 7 日間の養生を行い、試験体とした。試験装置は、本論の写真 2.16 に示した透気係数測定装置を使用した。

2-2-3 測定方法

測定はすべて 20℃に保たれた恒温室内で行い、圧力を 100Pa ごとに圧力を高めながら 2kPa までの範囲とし、流出する透気量を流量計にて測定を行った。

2-3 通気緩衝シートの透気係数測定試験結果

測定した圧力と透気量の関係と各通気緩衝シートの厚みを、2章にて示した、通気緩衝シートの透気係数の換算式である(2.14)式に当てはめ、透気係数を求めた。

図 2-1 に、各通気緩衝シートの載荷圧力と透気係数の関係を示す。

不織布タイプの通気緩衝シートは、圧力によらず一定の値を示した。一方、アスファルトやブチルなどを使用した、通気溝などにより通気をさせる、複合タイプの通気緩衝シートの場合、圧力の上昇と共に透気係数が大きくなっていることから、通気溝に変形が生じていることが見て取れる。

2-4 まとめ

現在市場に流通している代表的な通気緩衝シートを、2章にて開発した、通気緩衝シートの透気係数測定方法を用いて測定を行った。

不織布タイプの通気緩衝シートは、今回実験を行った範囲内では、通気層内の圧力に依存することなく、安定して透気係数が測定出来、幅広い範囲で測定された。また、複合タイプの通気緩衝シートでは、通気層内の圧力により透気係数が変化することがわかった。これは、圧力が大きくなると通気が良くなるという製品の特長でもあるが、微小ではあるが防水層の変形が生じていることになる。3章で開発した、通気緩衝工法の通気層内圧力分布を予測することができる数値解析手法は、圧力により透気係数を変化させることが必要になると考えられる。

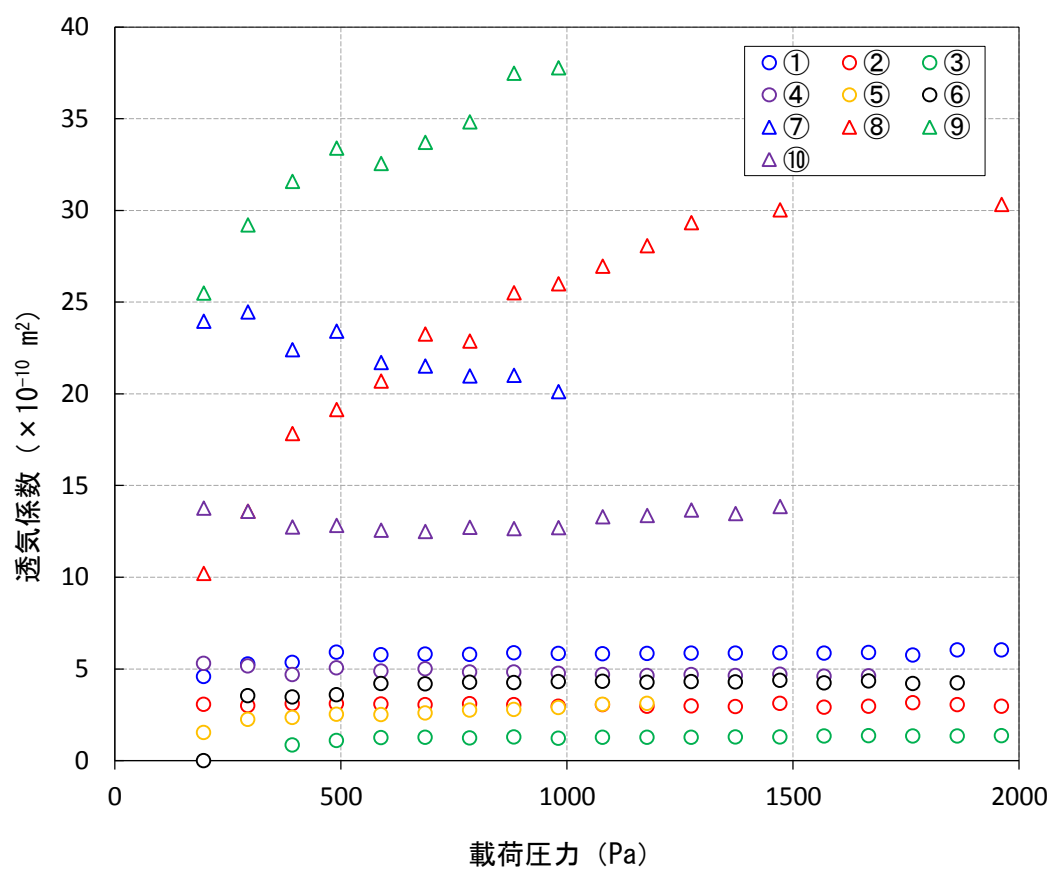


図2-1 透気係数測定結果

【付録での参考文献】

- (1) 建設大臣官房技術調査室監修「建築防水の耐久性向上技術」，博報堂出版，1987年
- (2) 古賀純子，根本かおり，濱崎仁，鹿毛忠継，本橋健司，大久保孝昭，田中享二：建築研究資料. NO.145 建築物の長期使用に対応した外装・防水の品質確保ならびに維持保全手法の開発に関する研究，独立行政法人建築研究所，p318，2013.8
- (3) 1986年版建築工事標準仕様書・同解説 JASS8：日本建築学会，p. 68, p. 112, 1986.3
- (4) 1993年版建築工事標準仕様書・同解説 JASS8：日本建築学会，p. 182, 1993.1
- (5) 2000年版建築工事標準仕様書・同解説 JASS8：日本建築学会，p. 238, 2000.7

<研究に関連して著者が発表した論文>

<研究に関連して著者が発表した論文>

(1) 査読付き論文

1. 古澤洋祐, 橋田浩, 塚越雅幸, 渡辺光, 田中享二: 塗膜防水通気緩衝工法のふくれ圧力低減効果の評価方法の開発, 日本建築学会構造系論文集, 第 666 号, pp. 1401-1406, 2011. 8
2. 古澤洋祐, 石原沙織, 田村和夫, 田中享二: ウレタンゴム系塗膜防水通気緩衝工法における脱気装置によるふくれ圧力低減効果, 日本建築学会構造系論文集, 第 715 号, pp. 1367-1374, 2015. 9

(2) 国際会議

1. Yousuke FURUSAWA and Kyoji TANAKA : Prediction of pressure inhibition of polyurethane membrane with air permeable sheet for blistering; Proceedings of 9th Japan/Korea Joint symposium on Building Materials & Construction, pp.103-108, 2010.09
2. Yousuke FURUSAWA, Saori ISHIHARA, Kazuo TAMURA and Kyoji TANAKA : Investigation of a Method to Analyze the Blister Pressure Distribution in Polyurethane Membrane with Air-Permeable Waterproofing Methods; Proceedings of International Conference on Building Envelope Systems and Technologies(ICBEST 2014), USB, 2014.06 (Aachen, Germany)
3. Yosuke FURUSAWA, Saori ISHIHARA and Kyoji TANAKA : Effect of exhaust apparatus on pressure distribution in polyurethane membrane system with air-permeable layer; Proceedings of 12th Japan/Korea Joint symposium on Building Materials & Construction, pp.237-242, 2015.07

(3) 口頭発表

1. 古澤洋祐, 田中享二:通気緩衝シートのウレタン塗膜防水工法のふくれ抑制効果の実証実験 : ふくれ圧力測定 ; 2009 年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 105-108, 2010.03
2. 渡辺光, 古澤洋祐, 田中享二: 通気緩衝シートのウレタン塗膜防水工法のふくれ抑制効果: その 1 ふくれ圧力測定 ; 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 37-38, 2010
3. 古澤洋祐, 塚越雅幸, 田中享二:通気緩衝シートのウレタン塗膜防水工法のふくれ抑制効果: その 2 通気緩衝シートの圧力抑制効果の予測 ; 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 39-40, 2010
4. 古澤洋祐, 田中享二: 塗膜防水・通気緩衝工法のふくれ圧力低減効果の評価方法の開発 ; 2010 年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 89-92, 2011.03
5. 野口秀夫, 古澤洋祐, 渡辺光, 田中享二:塗膜防水通気緩衝工法のふくれ圧力低減効果の評価方法の開発: その 1 通気緩衝シートの透気係数測定方法の開発 ; 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 1-2, 2011
6. 古澤洋祐, 橋田浩, 塚越雅幸, 渡辺光, 田中享二:塗膜防水通気緩衝工法のふくれ圧力低減効果の評価方法の開発: その 2 透気係数を用いた数値計算による考察 ; 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 3-4, 2011
7. 古澤洋祐, 若林秀幸, 田中享二, 蓮村和人, 齊藤隆, 渡辺光, 鈴木博:ウレタン塗膜防水通気緩衝工法のふくれ圧力抑制効果:コンクリート初期材齢におけるふくれ圧力の実測 ; 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 923-924, 2012
8. 古澤洋祐, 古市光男, 中沢裕二, 鈴木博, 島村浩行, 長谷川清勝, 小関晋平, 上ノ山悦治: 絶縁工法における脱気性能: その 1 通気係数による影響 ; 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 721-722, 2013
9. 河野壮人, 石原沙織, 古澤洋祐, 田中享二:ウレタン塗膜防水における通気緩衝シートと脱気装置によるふくれ圧力低減効果:圧力発生装置の開発と実大試験体における圧力測定 ; 2013 年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 217-220, 2014.02

-
10. 古澤洋祐, 石原沙織, 田中享二:ウレタン塗膜防水通気緩衝工法のふくれ圧力分布解析手法の検討 その 1. 防水層の通気層内部圧力分布についての基礎的研究 ; 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1209-1010, 2014
 11. 菅沼翔大, 古澤洋祐, 廣瀬隆行, 石原沙織, 田中享二:ウレタン塗膜防水通気緩衝工法のふくれ圧力分布解析手法の検討 その 2. 脱気装置の違いによる圧力低減効果 ; 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1211-1212, 2014
 12. 鈴木博, 古市光男, 古澤洋祐, 石原沙織, 田中享二:ウレタンゴム系塗膜防水通気緩衝工法における脱気装置によるふくれ圧力低減効果 その 1. 試験体と測定方法 ; 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1135-1136, 2015
 13. 古市光男, 鈴木博, 古澤洋祐, 石原沙織, 田中享二:ウレタンゴム系塗膜防水通気緩衝工法における脱気装置によるふくれ圧力低減効果 その 2. 実験方法と結果 ; 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1137-1138, 2015
 14. 古澤洋祐, 鈴木博, 古市光男, 石原沙織, 田中享二:ウレタンゴム系塗膜防水通気緩衝工法における脱気装置によるふくれ圧力低減効果 その 3. 数値解析方法の検討と考察 ; 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1139-1140, 2015

(4) その他

1. 日本建築学会材料施工委員会塗膜防水補強布 WG : ウレタンゴム系塗膜防水における通気緩衝シートの性能と評価方法 3. 通気緩衝シートの透気性能と評価方法, 第 6 回防水シンポジウム資料集, pp. 156-179, 2011. 11
2. 日本建築学会材料施工委員会防水層の通気工法における脱気設計 WG : ウレタン防水層の脱気設計法, 第 8 回防水シンポジウム資料集, pp. 1-36, 2015. 11

【受賞歴】

1. 2010 年 3 月 2009 年度日本建築学会関東支部若手優秀研究報告賞
「通気緩衝シートのウレタン塗膜防水工法のふくれ抑制効果の実証実験 :
ふくれ圧力測定」
2. 2011 年 3 月 2010 年度日本建築学会関東支部若手優秀研究報告賞
「塗膜防水・通気緩衝工法のふくれ圧力低減効果の評価方法の開発」

-
3. 2014年11月 2014年度日本建築学会大会(近畿)学術講演会 材料施工委員会 若手優秀発表

「ウレタン塗膜防水通気緩衝工法のふくれ圧力分布解析手法の検討 その1.
防水層の通気層内部圧力分布についての基礎的研究」

4. 2015年7月 優秀講演賞(社会人) Proceedings of 12th Japan/Korea Joint symposium on Building Materials & Construction

「Effect of exhaust apparatus on pressure distribution in polyurethane membrane system with air-permeable layer」

謝 辞

本論文は、筆者が東京工業大学大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻・田中享二研究室在籍時に、修士論文としてまとめた内容を基礎として、千葉工業大学大学院工学研究科工学専攻・田村和夫研究室および石原沙織研究室、AGC ポリマー建材株式会社において行った、ウレタンゴム系塗膜防水の通気緩衝工法における脱気効果に関する研究をまとめたものです。

千葉工業大学教授 田村和夫先生には、新たな分野にもかかわらず社会人学生として受け入れていただき、本研究の遂行ならびに本論文の取りまとめにあたり、懇切なる御指導を賜り、単眼的な筆者の研究の幅を広げる多くの示唆をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

東京工業大学名誉教授 田中享二先生には、筆者が東京工業大学在籍時から今日に至るまで、本研究に終始懇切なる御指導、御助言を賜りました。社会人として博士課程への入学を勧めていただき、研究者としての心構え、研究に挑む姿勢を学ぶことができました。心より感謝と敬意を表します。

千葉工業大学准教授 石原沙織先生には、東京工業大学田中研究室在籍時から、研究者の先輩としての的確な御助言をいただき、常に励ましの御言葉をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

東京工業大学教授 横山裕先生、千葉工業大学教授 中野克彦先生、同大学教授 山田丈富先生、同大学名誉教授 池永博威先生には、本論文の作成、審査にあたり、適切な御指摘と貴重なご意見をいただきました。篤く御礼申し上げます。

AGC ポリマー建材(株) 技術研究所 齊藤隆所長には、社会人学生として博士学位取得へ挑戦する機会を与えていただくとともに、常に励ましの御言葉をいただきました。篤く御礼を申し上げます。技術研究所の皆様には、日頃から様々な助言をいただき、筆者が業務を行いながら研究を実施するために多大なご配慮をいただきました。皆様の御協力に心より感謝と御礼を申し上げます。

材料生産系ゼミを通して、研究に対し貴重な御意見を頂きました、東京工業大学准教授 三上貴正先生、ものづくり大学教授 高橋宏樹先生、東海大学准教授 横井健先生、並びに各研究室所属の皆さまに、心より感謝申し上げます。

本研究の基礎を築き、研究への御助言や数値解析プログラムの作成に多大なる御協力をいただいた、清水建設(株)技術研究所副所長 橋田浩博士、徳島大学助教 塚越雅幸先生に深く感謝いたします。

研究を進めるにあたり、実験に多大なるご協力、御意見をいただきました、日本ウレタン建材工業会 技術委員長 鈴木博氏、レオン工業(株) 代表取締役 渡辺光氏、日新工業(株)古市光男氏、清水建設(株)松尾隆士博士をはじめとする、日本建築学会材料施工委員会防水工事運営委員会 塗膜防水用補強布 WG、防水層の通気工法における脱気設計 WG、ウレタン塗膜防水層のふくれの不具合認識評価 WG 委員の皆さまに心より感謝いたします。

実験装置の作製を快く協力して下さいました、(株)山装 廣瀬隆行氏、実験材料の供給に迅速に対応していただきました、クリエート商事(有)代表取締役 村野保由氏に心より感謝申し上げます。

千葉工業大学・石原沙織研究室の皆様には、試験体の作製や実験にご協力いただくとともに、研究室での生活を通じ多くの事を学ばせていただきました。心より感謝申し上げます。特に、河野壮人氏、菅沼翔大氏、梅本康裕氏、和田渉平氏、工藤健氏、佐藤光輝氏には、公私にわたり大変お世話になりました。篤く御礼を申し上げます。

最後に、心の支えになって下さいました全ての皆さまに深く感謝し、これを謝辞とさせていただきます。