



平成28年度建築基準整備促進事業

S17

積雪後の降雨の影響を考慮した積雪荷重の 設定に資する検討



- 【事業主体名】 株式会社雪研スノーイーターズ
千葉大学 大学院工学研究科
北海道立総合研究機構 北方建築総合研究所
国立研究開発法人 防災科学技術研究所
- 【共同研究者】 国立研究開発法人 建築研究所

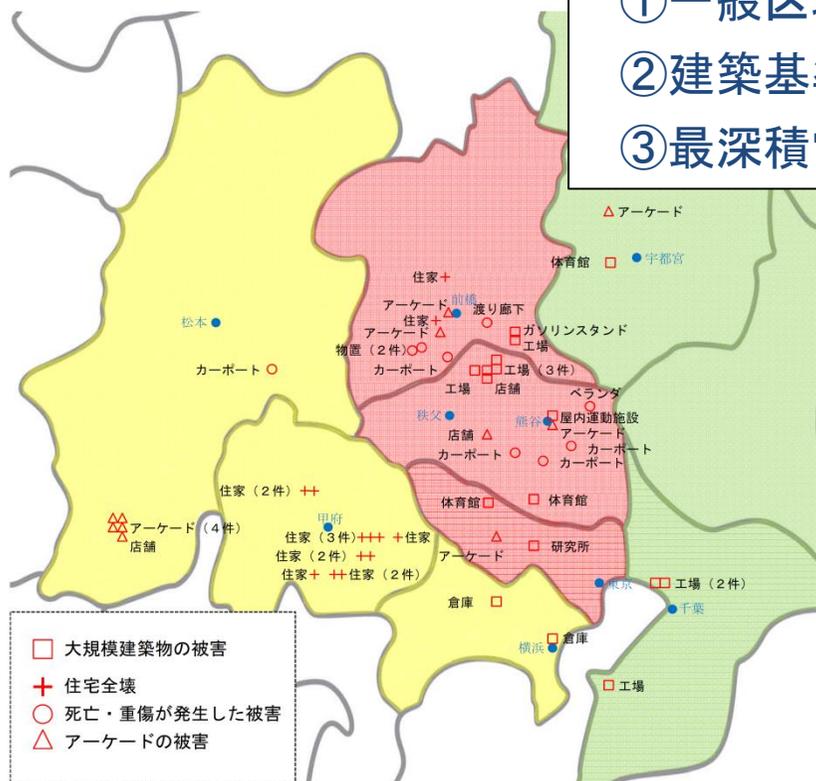


本事業の背景

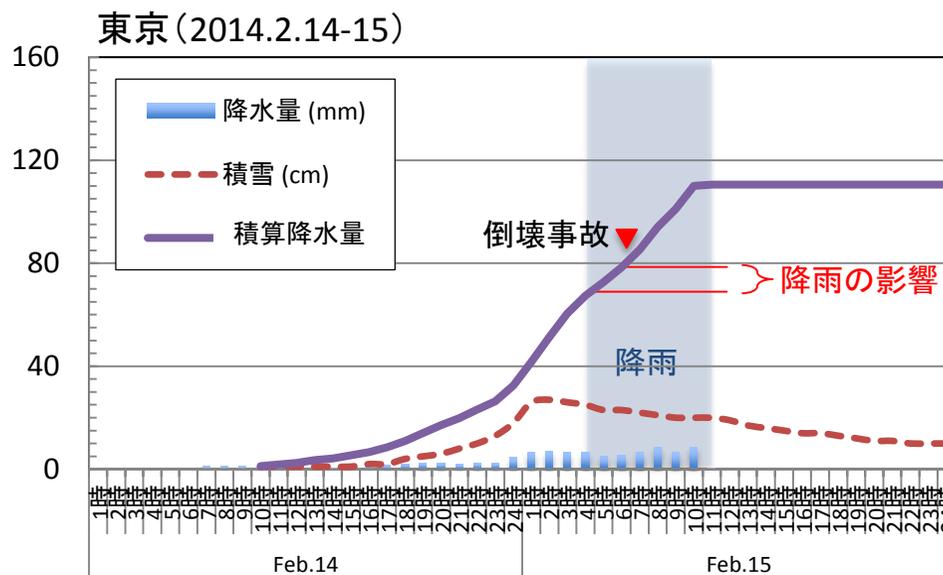
- 平成26年2月14-15日にかけて関東甲信で大雪が発生し、建築物の倒壊被害が発生。
- 被害は、大スパン・緩傾斜の屋根に被害が集中(ほとんどが**3度以下の緩傾斜**)。

- 降雪後に降雨が重なった地域に、建築物の被害が集中。
- 被害発生地域の特徴は以下の3点

- ①一般区域(多雪区域以外)
- ②建築基準法の垂直積雪量よりも大きい積雪
- ③最深積雪に対して相対的に降水量が大きい



2014年2月14日からの大雪により被害が発生した建築物
(建築物の雪害対策について報告書, 社会資本整備審議会 建築分科会建築物等事故・災害対策部会, 平成26年6月より引用)



東京における降雪後の降雨時の気象時系列図

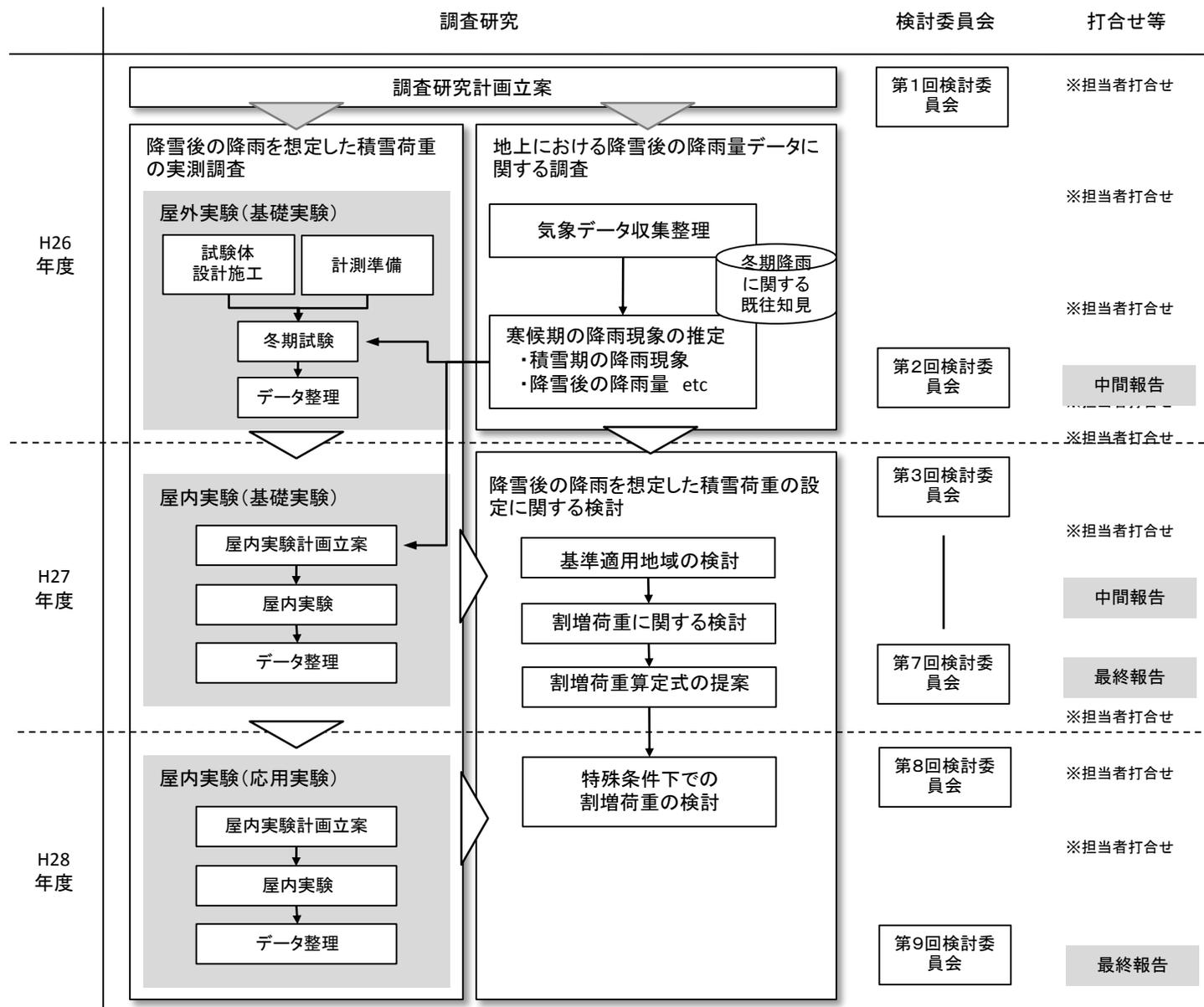
●平成26年度～平成27年度

平成26年2月に関東地方で発生した大雪による建築物の被害の原因と考えられる、降雨による積雪荷重増加の推定とその設計基準への反映を目的として、①積雪期の降雨若しくは降雪後の降雨量に関するデータ整理及び解析、緩勾配屋根を有する建築物の屋根の規模や傾斜に応じた、②降雪後の降雨を想定した積雪荷重の実測調査(屋外実物模型実験及びデータ補完のための屋内実験)を行った上で、③降雪後の降雨を想定した積雪荷重の設定に関する検討をおこなう。(本スライドp4~6)

●平成28年度

平成27年度の成果を取りまとめる段階で、特殊な条件における積雪荷重の設定方法の検討も必要という意見をふまえ、これまでに得られていない以下の知見を得るため検討を行い、必要な情報を収集する。

- 1) 樋(とい)の有無と排水メカニズムに関する実験と分析(本スライドp9~13)
- 2) 勾配変化や谷部のある屋根面の積雪後降雨荷重に関する実験と分析(本スライドp14~22)
- 3) 樋(とい)の条件と屋根勾配の変化を考慮した積雪後降雨荷重の設定方法(本スライドp23~25)



調査の流れ

1. 屋外実験(平成26年度:基礎実験)

実大の試験屋根を用いた降雨実験を行い、屋根の諸元(スパン長、勾配)と積雪深と、降雨による割増荷重の関係を明らかにする。

		スパン長(棟～軒)		
		5m	20m	50m
屋根 勾配	2°(約1/30)	○	○	○
	10°(約1/16)	○	—	—



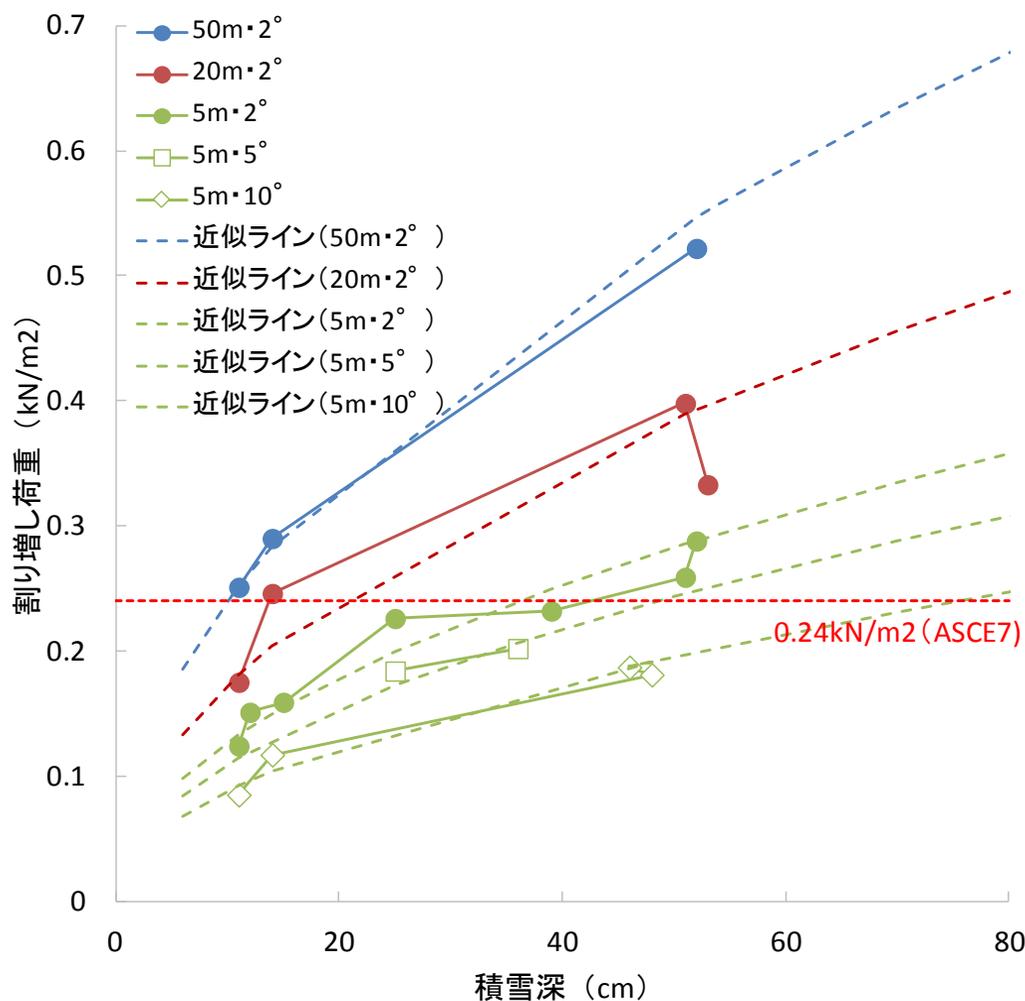
2. 屋内実験(平成27年度:基礎実験)

屋外実験で足りなかった実験シリーズ(屋根の諸元、積雪深)を補完し、割増荷重との関係性を定量化する目的で、5m屋根に限定し、低温実験施設における人工降雪を用いた実験を行った。



実測調査 (H26~H27)結果に基づく降雨の割増荷重の検討

- 低密度の積雪に一定強度の降雨を与えたときの荷重増加量の傾向が明らかになった。
- 積雪深や屋根スパン長さが大きいほど、また勾配が小さいほど、割増荷重は増加する。
- 長スパン屋根においてASCE7の基準値(0.24kN/m²)を超える荷重増加が見られる。



- 積雪深とともに割増し荷重は増加するが、その増加率は小さくなる。
- 割増し荷重は、積雪深の平方根に比例すると考え、(1)式で近似した。

$$y = a\sqrt{x} \quad (1)$$

y: 割増し荷重 a: 係数 x: 積雪深

- 係数aは下表のようになった。

スパン長(m)	勾配(°)	係数a
50	2	75.8
20	2	54.5
5	2	40.0
5	5	34.4
5	10	27.6

- 本結果を適用して、降雪時の降雨を考慮した積雪荷重の算定方法を以下に検討する。

図 全実験結果による屋根形状及び積雪深と割増し荷重の関係

【まとめ】

- 平成26年度屋外実験、及び平成27年度屋内実験により、屋根諸元(スパン長、勾配)と積雪深に応じた、降雨による割り増し荷重を計測した。
- その結果、積雪深、スパン長が大きいほど、勾配が小さいほど、割り増し荷重は大きくなることわかった。
- 実験結果を定量化し、降雨による影響を考慮した積雪荷重(S)の算定式を次式のように導いた。

$$S = \alpha \cdot S_s$$

$$\alpha = k_1 + \sqrt{\frac{A'}{\mu_d d}}$$

S_s : 建築基準法施行令(以下、令)第86条に定める屋根上の積雪荷重(N/m²)

k_1 : 積雪荷重の低減係数 A' : 屋根形状(スパン長、勾配)で決まる係数(cm)

d : 令第86条第1項に定めるその地方における垂直積雪量(cm)

μ_d : 令第86条第4項に定める屋根形状係数

【必要な追加検討】

- 1) 樋(とい)の有無と排水メカニズムに関する実験と分析
- 2) 勾配変化や谷部のある屋根面の積雪後降雨荷重に関する実験と分析
- 3) 樋(とい)の条件と屋根勾配の変化を考慮した積雪後降雨荷重の設定方法



H28基整促で継続検討

3. 屋外実験(平成27年度:応用実験)

H28基整促の要件(勾配変化や谷部のある屋根面の積雪後降雨荷重に関する実験と分析)に引用可能な実験。

○M形屋根、腰折屋根、(基準)平板屋根の試験屋根

○平成28年2月に3回実施

H27積雪後の降雨の影響を考慮した積雪荷重の設定に資する
検討業務より引用



4. 屋内実験(平成27年度:応用実験)

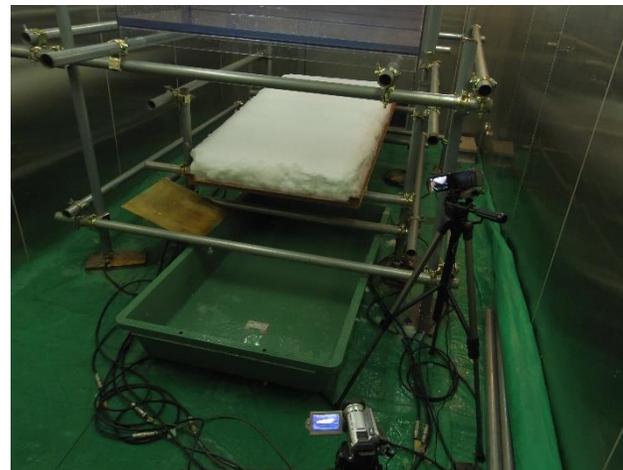
H28基整促の要件(樋(とい)の有無と排水メカニズムに関する実験と分析)に引用可能な実験。

○小型試験屋根を用いた、軒先の積雪状況や軒どいの状況に着目した試験

○軒どいなし、軒どいあり、軒どい排水不良

○積雪密度(130~350kg/m³)で実施

H27積雪後の降雨の影響を考慮した積雪荷重の設定に資する
検討業務より引用



5. 屋内実験(平成28年度:応用実験)

H28基整促の要件(勾配変化や谷部のある屋根面の積雪後降雨荷重に関する実験と分析)に対応する実験。H27応用実験の結果を受けて、新庄低温実験棟で実施。

○M形・腰折屋根、(基準)平板屋根(スパン長5m)

○軒先の積雪状況についても着目

○2屋根×5回=10実験シリーズ



H28年度

樋(とい)の有無と排水メカニズムに関する実験と分析

軒どいの積雪状況などによる排水状況・荷重状況(実験4:H27屋内応用実験)

- 軒どいに積雪があった場合でも、ピーク荷重に大きな違いは見られない(右図)。
- 積雪深と密度が大きく類似している2点の傾向を見ても(下図)ほぼ同じ傾向を示している。
- 目視でも、軒どい内の積雪が排水を阻害している様子はない。

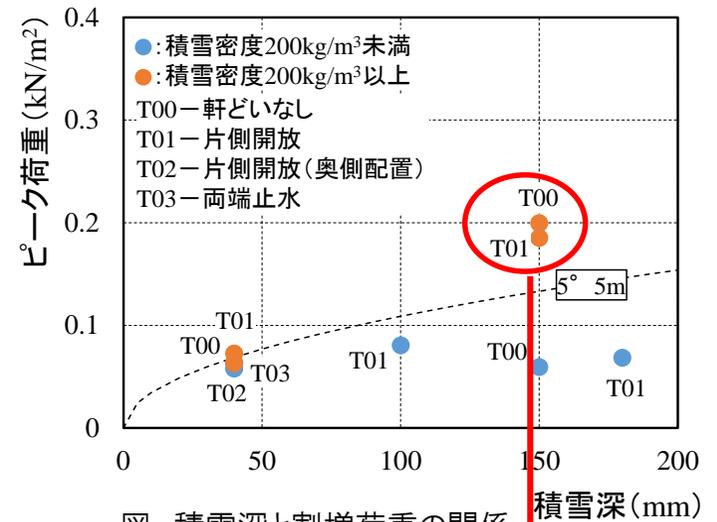
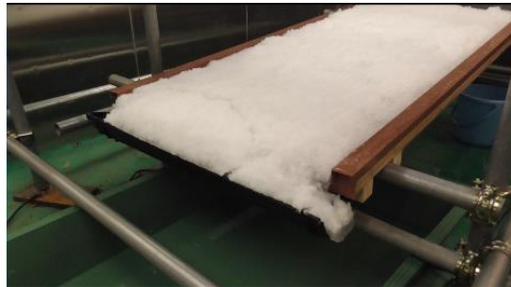


図 積雪深と割増荷重の関係 (H27屋内応用実験)

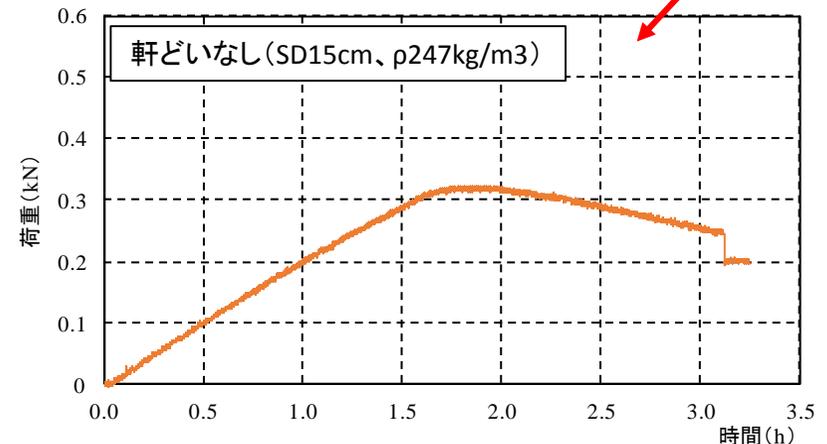
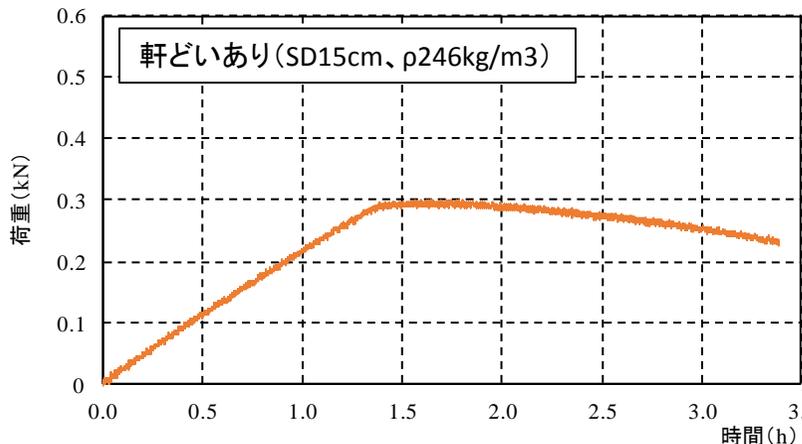


図 降雨による割増荷重の時系列

軒どいの積雪状況などによる排水状況・荷重状況(実験5:H28屋内応用実験)

- 降雨前に軒どい内に積雪が充填されていても(写真①)、降雨と屋根面を浸透してくる排水により、軒先の雪がざらめ雪化し、やせ細ってくる(写真②)。
- さらに、軒どい内に空洞ができ、屋根から排水されやすくなる。
- 最終的に、軒どい内にまとまった積雪は存在せず(③)、崩れた軒先の雪は軒どい内でスノージャム化する(④)。
- このような状況で、軒先排水が阻害され、屋根全体の荷重が増加することはないと考えられる。



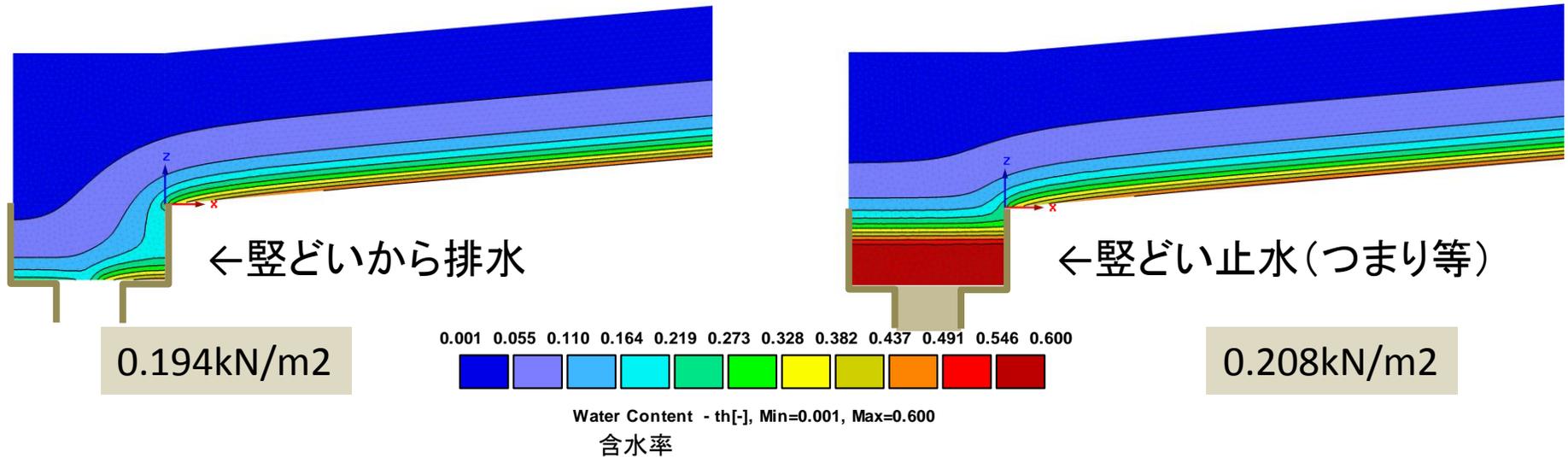
写真 軒どい積雪の変質過程

軒どいの排水状況荷重状況

●計算条件

屋根形状: 5m、5° 積雪深: 20cm 軒樋のサイズ: 幅20cm・深さ10cm・φ8cm

※飽和一不飽浸透モデルによるシミュレーション



- 排水がある場合、軒どいに極端な帯水はほとんどない。
- 排水がない場合、軒どい内部は帯水して、とい上部から排水される形となるが、屋根部分は排水がある場合と含水の状態に違いは見られない。
- 割増荷重の差は、屋根全体で0.014kN/m²であり、概ねとい内部の水量の違いである。屋根が大きくなると、その差は相対的に小さくなる。

■ 飽和-不飽和浸透流支配方程式(Richards式)

不飽和土壌中の水分の移動を表す式として、Lorenzo Adolph Richardsにより、多孔質体の飽和水分移動を表すDarcy則と連続の式より導出された支配方程式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

K: 不飽和透水係数、 ϕ : 圧力水頭
z: 位置水頭、 θ : 体積含水率
t: 時間

■ 水分移動特性モデル(van Genuchtenモデル)

多孔質体の水分保持と不飽和透水係数は、飽和度(体積含水率)により変化するとされている。本解析では、水分保持と不飽和透水係数等の水分移動特性に関する代表的なモデルであるvan Genuchtenモデルを用いた。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(1 + |\alpha h|^n \right)^{-m}$$

$$K(S_e) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2$$

S_e : 有効飽和度、 θ_r : 残留体積含水率、 θ_s : 飽和体積含水率
 α 、 n 、 $m (=1-1/n)$: 水分保持曲線を与えるパラメータ
 K_s : 飽和透水係数、 l : 間隙結合係数(0.5)

■ 用いた解析ソフト

チェコのPC-PROGRESS社が開発販売しているHYDRUS(2Dバージョンを利用)を採用

Richards式、van Genuchtenモデルを基に、van Genuchten氏が初期段階を開発したソフトを基に、発展したソフト

H28年度
勾配変化や谷部のある屋根面の積雪後降雨荷重
に関する実験と分析

M形屋根の排水状況荷重状況(実験4:屋外応用実験, 実験5:H28屋内応用実験)

●荷重計測の結果

(屋外実験)浸透速度が速いざらめ雪層が卓越しており、割増荷重は小さかった。

(屋内実験)降雨強度の影響はあると考えられるものの、既往の関係に比して荷重は大きかった。

●目視観測による考察

- 谷どい内は、降雨前は雪で充填されていても、降雨開始に伴い谷どい内に排水が始まると、とい内の積雪が速やかに帯水してシャーベット状になる。
- シャーベットになる過程でそのボリュームは小さくなり、また脆弱であるため、谷どい内に空隙ができ、積雪が崩落していく。
- 谷どい内の積雪深はより減少し、より水が流れやすくなる。一般的な縦どい(ドレーン)上に積雪が載っていても、特に支障なく排水が継続し、写真にあるような状態でピーク荷重を記録した。



M形屋根の排水状況荷重状況(実験4:屋外応用実験, 実験5:H28屋内応用実験)

- 谷どいがある分、その内部の積雪が水を吸収することで、一時的に水が排水しづらい状態となって、基礎実験で行ったような軒先に雪が何もない状況に比べて、荷重が若干増加する可能性はある。
- ただし、軒どい同様、屋根全体の割増荷重に比べると小さいとすることができる。
- また、雪があることで豎どいの排水が阻害される現象は確認されず、多量の水が谷どい内に貯留するとは考えられない。

腰折屋根の実験結果(実験5:H28屋内応用実験)

- 既往の近似曲線による荷重に比して、平板・腰折屋根の荷重が大きい
 → 降雨強度の違い(H28実験が大きかった)
- 0.2kN/m²近辺の腰折屋根は、平板屋根よりも割増荷重が大きい、供試体の積雪深の違いによるものと考えられる。
- この実験からは、腰折屋根と平板屋根(合成勾配)の割増荷重は同等と言えらる。

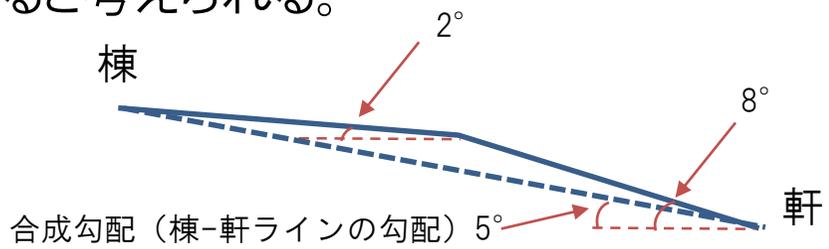


図 腰折屋根イメージ

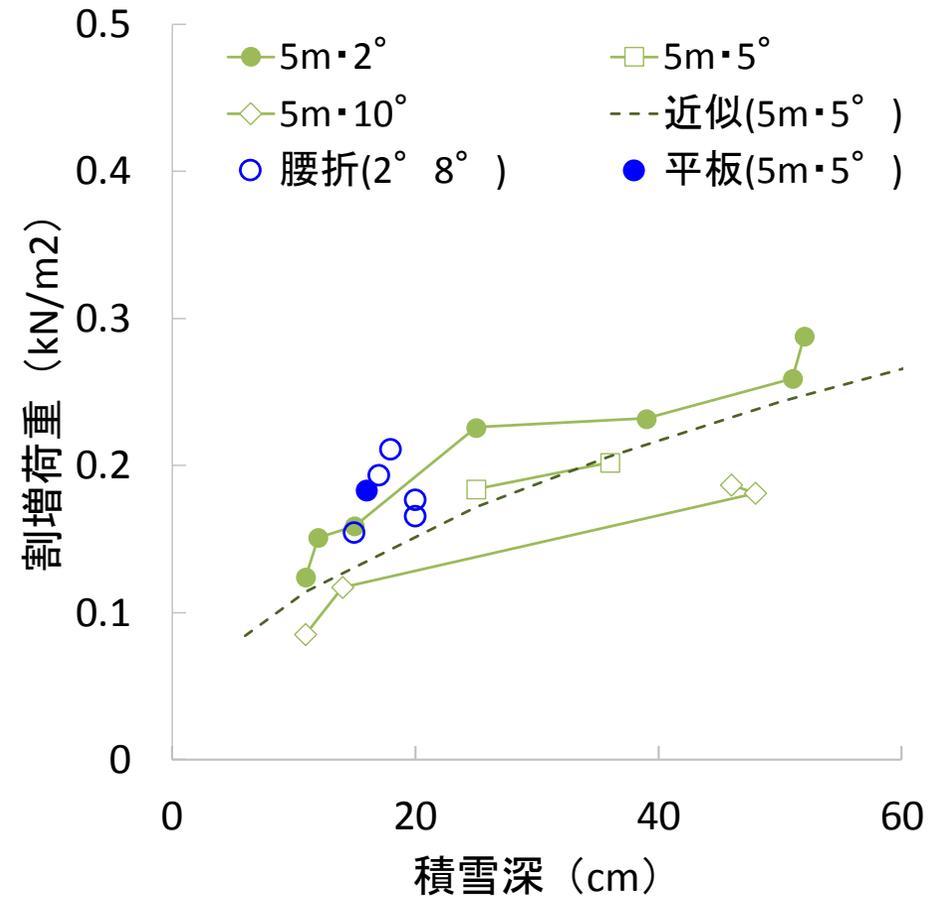


図 積雪深と割増荷重の関係 (腰折屋根と基準平板屋根のプロット)

勾配変化のある屋根面の積雪後降雨荷重に関する実験と分析

腰折屋根の実験結果(実験3:H27屋外応用実験, 実験5:H28屋内応用実験)

- 帯水層厚、あるいは全層水量の分布は概ね定性的に明らかになった。
- 同じ勾配の屋根面で、水下的の方が厚く(多く)なる。
- この計測結果からは、腰折屋根と平板屋根(合成勾配)の平均的な割増荷重の関係に言及できない。

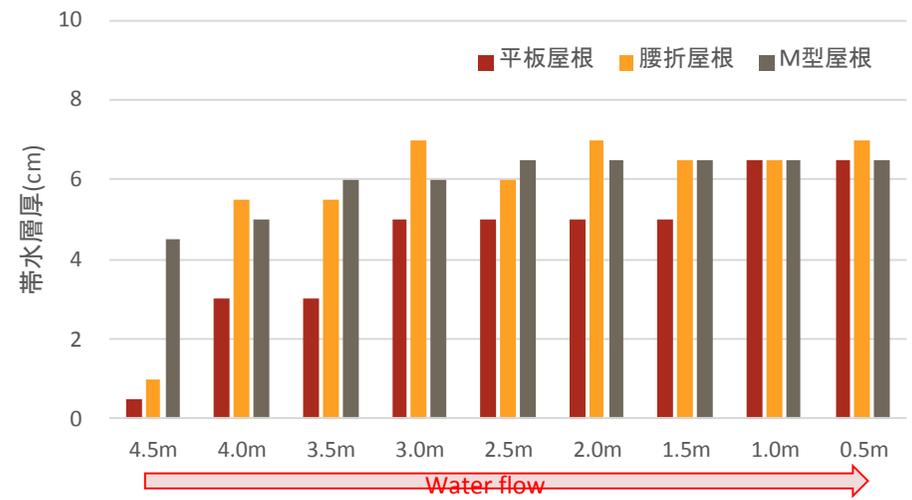


図 帯水層厚の分布(H27、第2回実験)

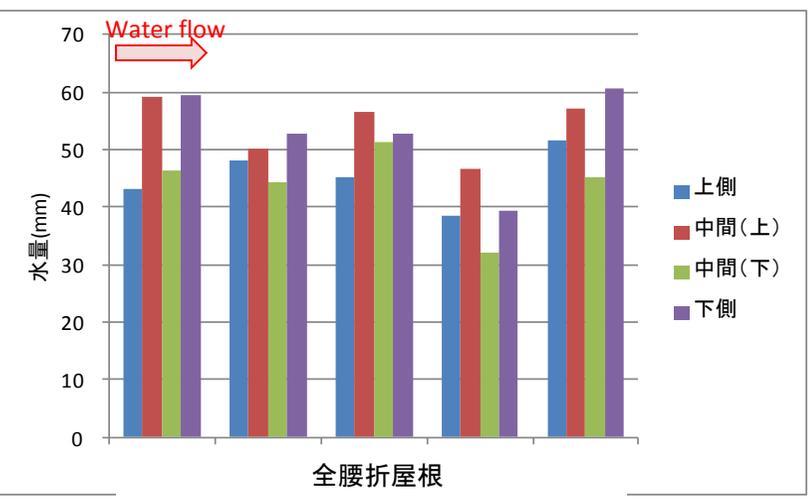
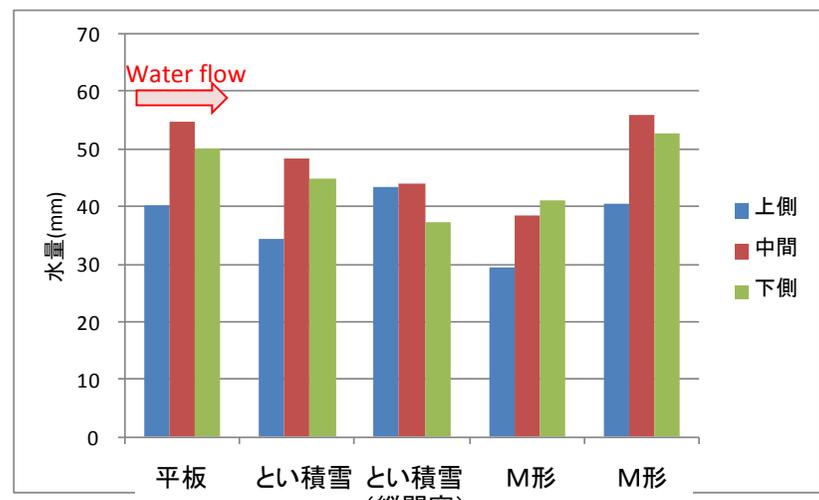


図 全層水量の分布(H28、全5回)

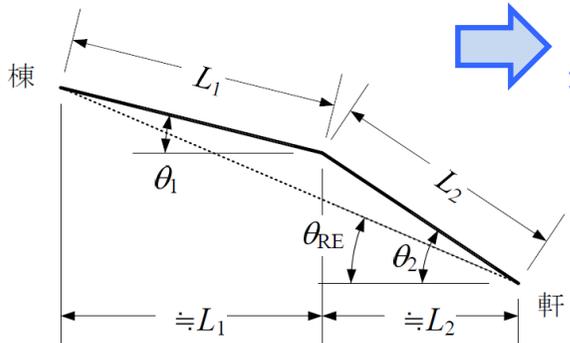
勾配変化のある屋根面の積雪後降雨荷重に関する実験と分析

腰折屋根の結果(机上検討)

- Colbeck(1977), O'Rourke(2001)の不飽和-飽和層の積雪モデルを援用した近似と数値解析(飽和不飽和浸透モデル)の比較による検討を行う。
- 右図は、腰折屋根の荷重と、区間2の勾配の平板屋根の比(下図)、あるいは合成勾配の平板屋根の荷重の比である。

山折($\theta_1/\theta_2 > 1$)は合成勾配で評価する
 近似計算では、勾配比が小さく(折れ方が急)になると、合成勾配だと危険であるが、HYDRUSではそれ程荷重比は変わらない(右上図)。

谷折($\theta_1/\theta_2 < 1$)は緩勾配で評価可能
 合成勾配だと著しく過小評価(荷重比<1)することがあるが(右上図)、緩勾配だと1以上と安全側(右下図)。



ただし、 L_2 が L_1 に比べ短い場合、過大評価になる可能性

図 腰折屋根モデル

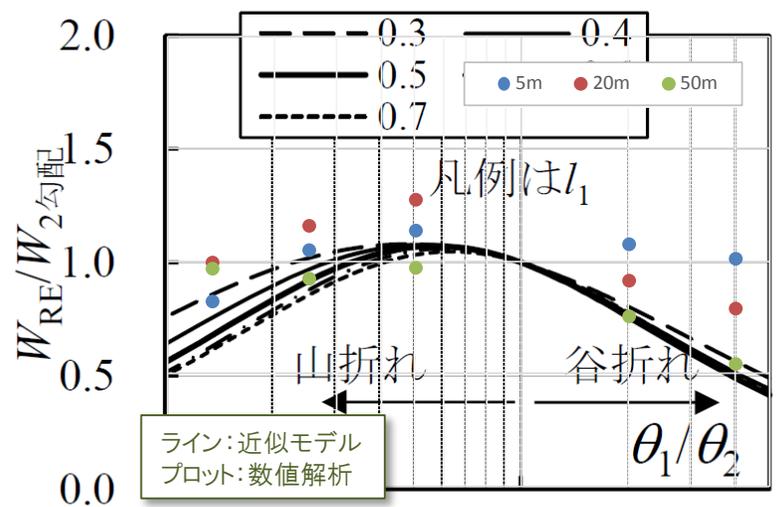


図 勾配比(合成勾配)と飽和層荷重比の関係

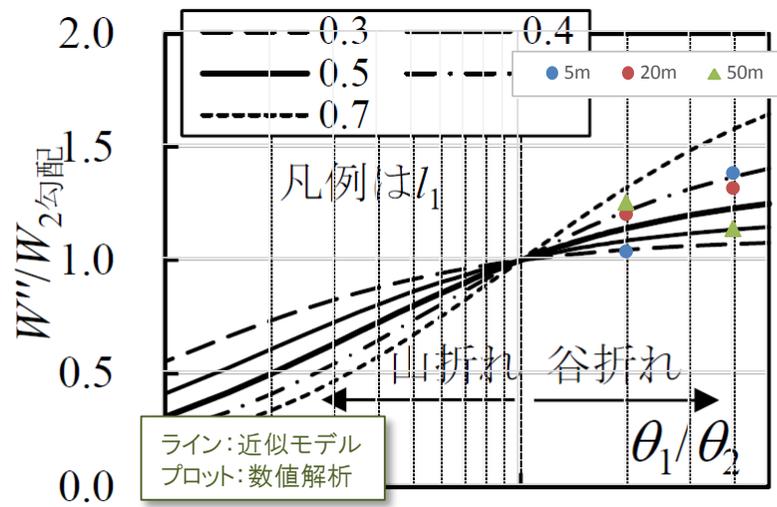


図 勾配比(緩勾配)と飽和層荷重比の関係

勾配変化のある屋根面の積雪後降雨荷重に関する実験と分析

腰折屋根の結果(机上検討)

- 谷折($\theta_1 / \theta_2 < 1$)で、 L_2 が L_1 に比べ短い場合の検討。
- 等価勾配での評価を考える。

等価勾配 θ_{eq} : 2勾配に分けて得られた帯水層荷重を与える単勾配屋根の勾配

$$\theta_{eq} = 1 / \left(\frac{l_1^2}{\theta_1} + \frac{2l_1l_2 + l_2^2}{\theta_2} \right)$$

$$l_1 = L_1 / (L_1 + L_2), \quad l_2 = 1 - l_1$$

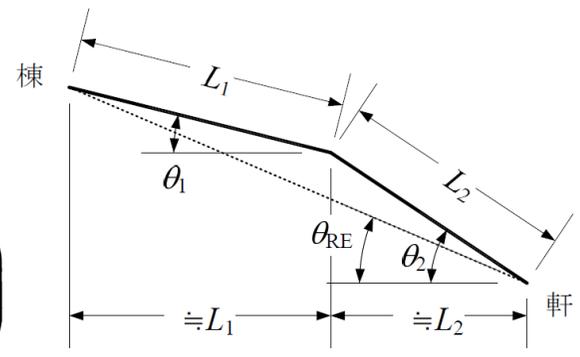


図 腰折屋根モデル

- 山折れで L_2 が極端に短い場合、等価勾配は θ_1 とほぼ同等になり(図1赤線)、谷折れで L_2 が極端に短い場合、等価勾配は θ_2 に比べてかなり大きくなる(図2赤線、 θ_2 だと過大評価)。
- 数値解析により、2勾配で計算した荷重に対する等価勾配で計算された荷重の比は、ほぼ1に近い(右下図)。 ⇒ 谷折れ屋根における等価勾配での評価の妥当性

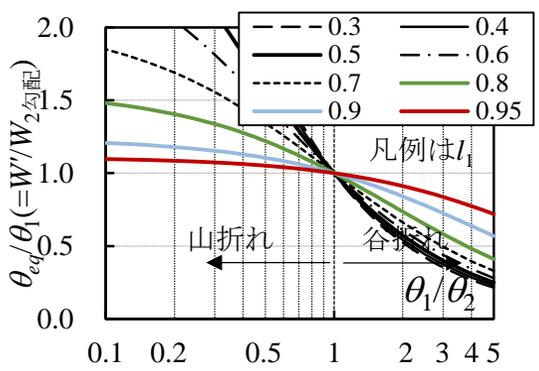


図1 θ_1 に対する等価勾配 θ_{eq} の比

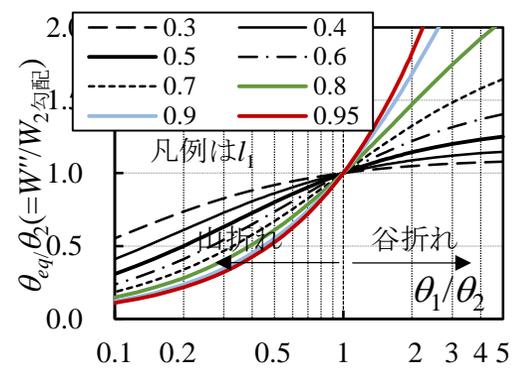


図2 θ_2 に対する等価勾配 θ_{eq} の比

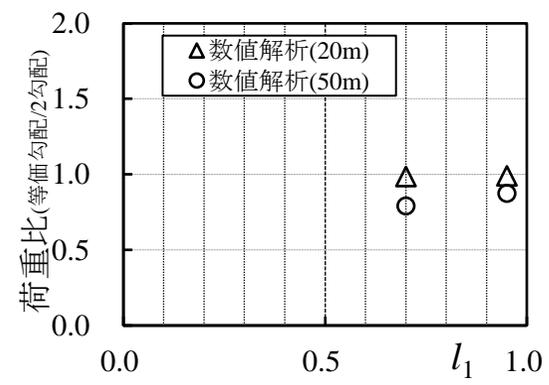


図3 2勾配と等価勾配の荷重比 (谷折れ、 $\theta_1=8^\circ$ $\theta_2=2^\circ$)

円弧屋根(机上検討)

- 飽和-不飽和浸透モデルを用いて、スパン長(水平長)と合成勾配が等しい円弧屋根・平板屋根の割増荷重を比較。
- 円弧屋根の軒先に、わずかに厚い帯水層が見られたものの、ほぼ全域で水分量の鉛直分布は一様であった。
- 円弧屋根と平板屋根(合成勾配)の荷重は概ね一致した結果となった。

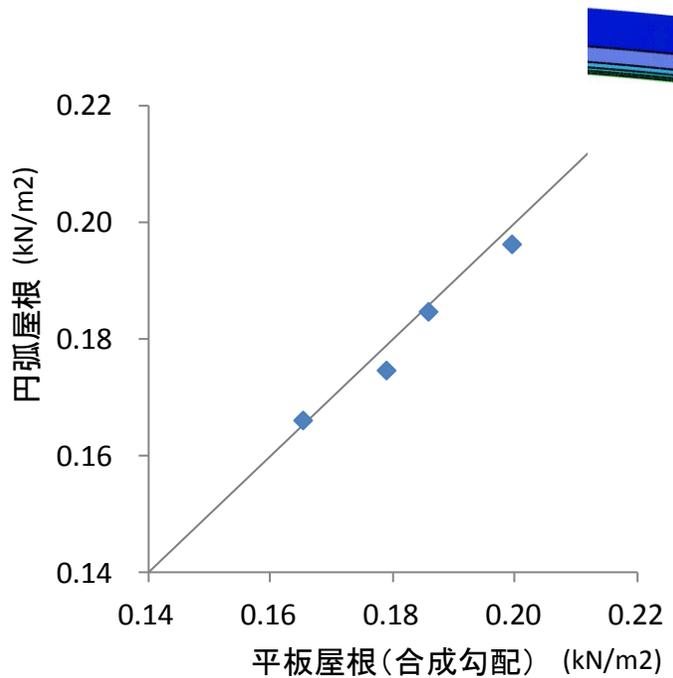


図 平板屋根と円弧屋根の荷重の比較

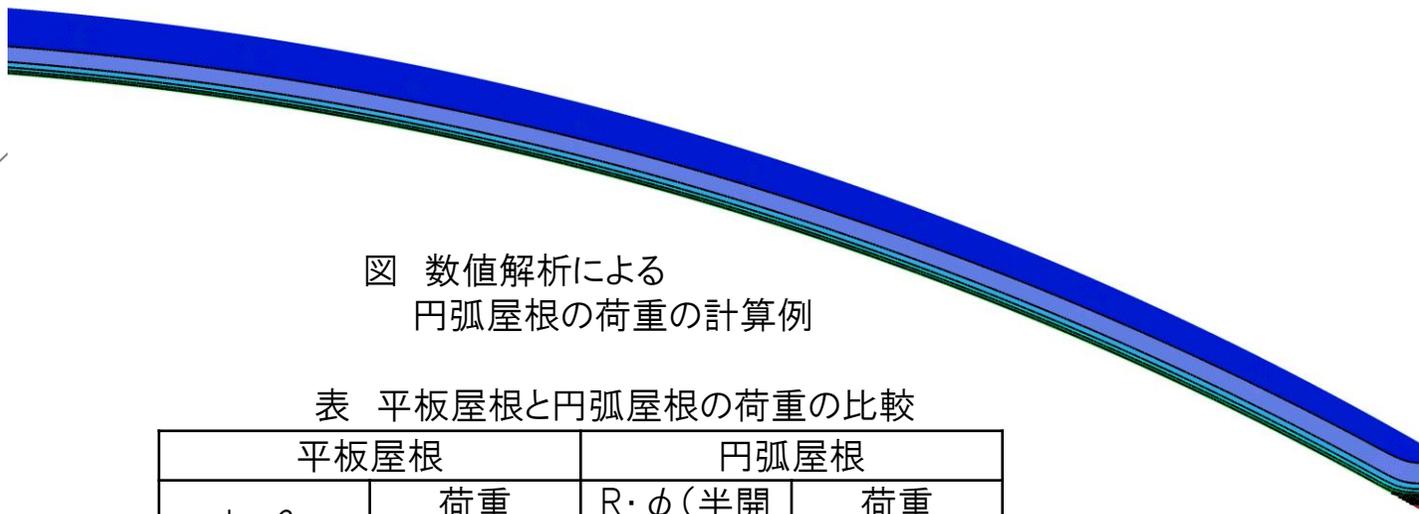


図 数値解析による
円弧屋根の荷重の計算例

表 平板屋根と円弧屋根の荷重の比較

平板屋根		円弧屋根	
$L \cdot \theta$	荷重 (kN/m ²)	$R \cdot \phi$ (半開角)	荷重 (kN/m ²)
5m・15°	0.165	10m・30°	0.166
10m・15°	0.186	20m・30°	0.185
5m・8°	0.179	18m・16°	0.175
10m・8°	0.199	36m・16°	0.196

円弧屋根(机上検討)

- Colbeck(1977), O'Rourke(2001)の不飽和一飽和層の積雪モデルを援用し近似を行う。
- その結果、半開角 Θ が小さければ、以下の式により、円弧屋根と棟-軒合成勾配の平板屋根の荷重は同等に扱うことができることが示された。

帯水層について、
単位幅当たりの流量

$$q(\varphi) = \alpha k_s \varphi h(\varphi) = IR\varphi$$

帯水層の高さ(厚さ)

$$h = IR/(\alpha k_s)$$

帯水層の増分荷重

$$W_{\text{円弧}} = \rho_w g \phi \cdot IR^2 \Theta / (\alpha k_s)$$

合成勾配をもつ平板屋根の帯水層の増分荷重

$$W_{\text{RE}} \approx \rho_w g \phi \cdot IR^2 \Theta^2 / (2\alpha k_s \Theta/2) = W_{\text{円弧}}$$

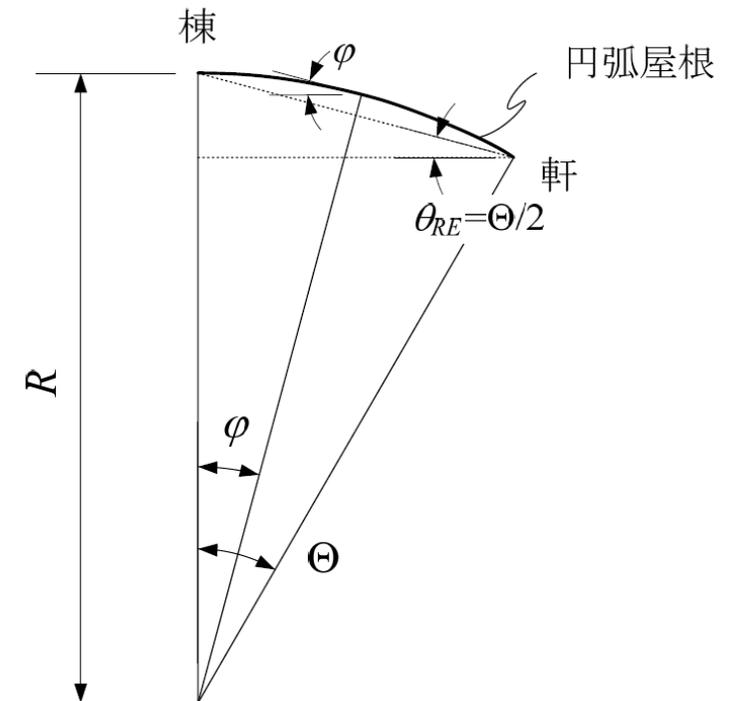
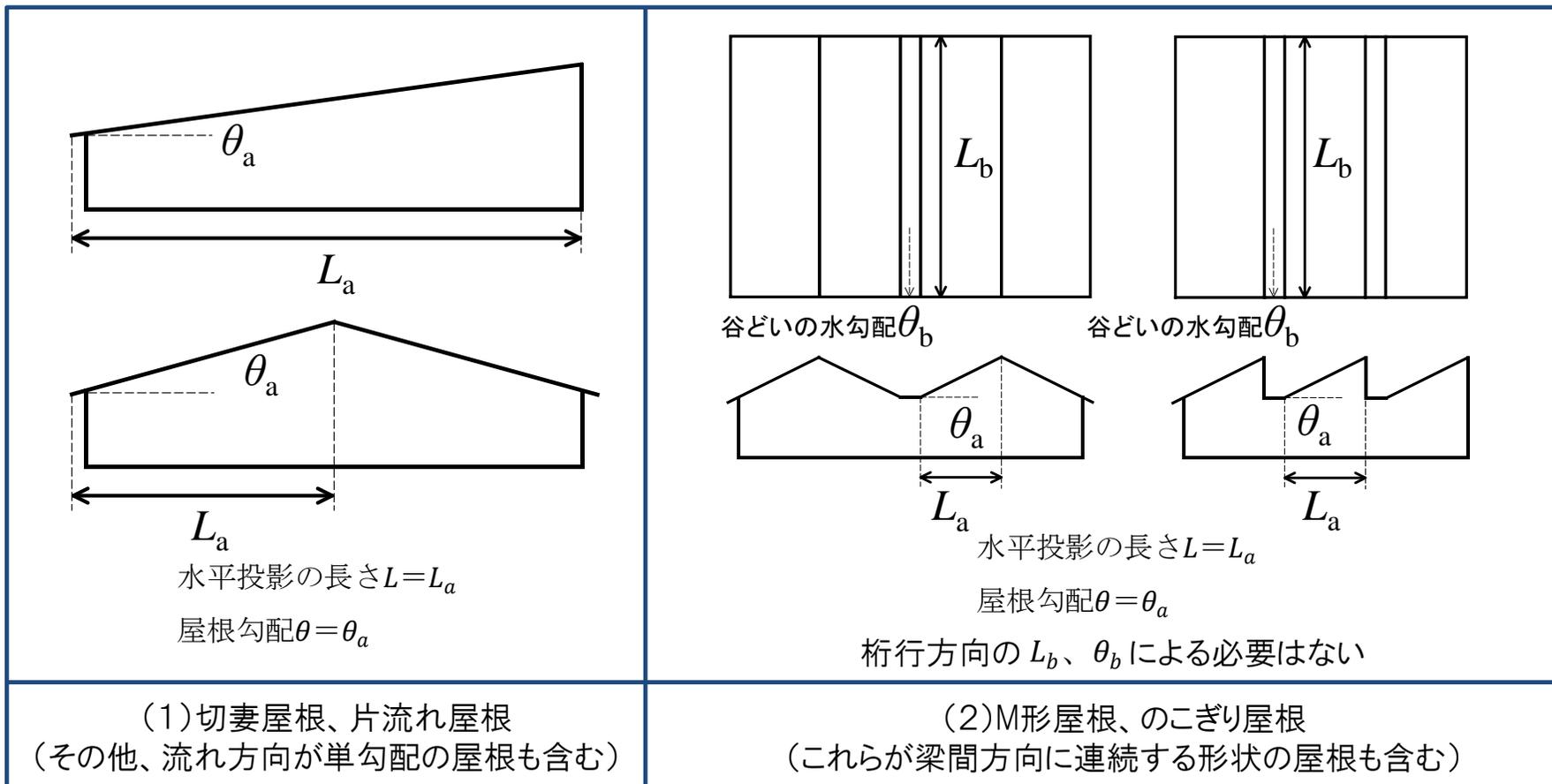
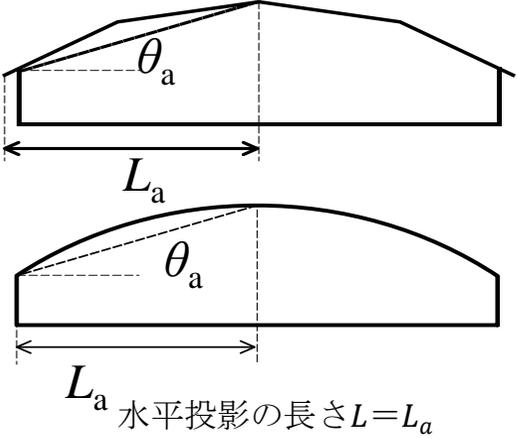
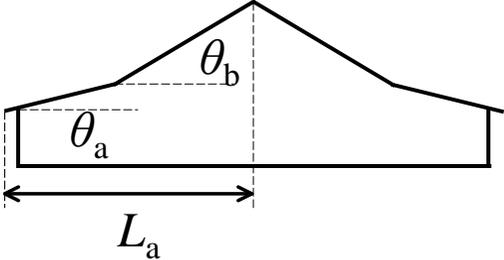


図 円弧屋根モデル

H28年度
樋(とい)の条件と屋根勾配の変化を考慮した
積雪後降雨荷重の設定方法

- これまでの検討結果をもとに、特殊条件下での降雨による割増荷重のあり方を整理した。
- 積雪荷重に乗ずる割増係数 α の計算では、屋根の水平長さ(以下、 L と表記)及び屋根勾配(以下、 θ と表記)が必要。
- 代表的な屋根の形状について、以下の(1)から(4)に示す数値 L 、 θ の取り方を参考にすることができるものとする。



 <p> L_a 水平投影の長さ $L=L_a$ 屋根勾配 $\theta=\theta_a$ </p> <ul style="list-style-type: none"> ● 屋根の上端と下端を直線的に結んだときの勾配を数値 θ とすることができる。 	 <p> L_a 水平投影の長さ $L=L_a$ 屋根勾配 $\theta=\theta_a$ または θ_{eq} </p> <ul style="list-style-type: none"> ● 水上側の数値 θ_b ではなく、水下側の屋根上の帯水層における荷重増加の影響を考慮し、水下側の数値 θ_a を用いて計算する。又は後述の等価勾配を屋根勾配とする。 <p>※等価勾配: 計算式で得られる、2勾配屋根と等しい帯水層荷重を与える等価な単勾配屋根</p>
<p>(3) 腰折屋根、円弧屋根</p>	<p>(4) 谷折屋根</p>

- 割り増し係数の計算は、雨水が円滑に排水される条件を前提にして設定されたものである。
- 屋根上で適切に排水するため、所有者、管理者等においては屋根の谷部や軒先に設ける樋（とい）に詰まり等が生じないように、適切に維持管理を行うべきである。

(1) 樋（とい）の有無と排水メカニズムに関する実験と分析

- ▶ 軒どい内部が積雪で充満しても、降雨の排水に伴いとい内部の積雪が融雪により小さくなる。排水が阻害される等して全体の荷重増加にはつながることはなかった。
- ▶ 豎どいが詰まった場合も、といの上面からオーバーフローすることで荷重増加にはつながらないと推察された。

(2) 勾配変化や谷部のある屋根面の積雪後降雨荷重に関する実験と分析

- ▶ 谷どいがある場合も、軒どい同様に排水阻害による荷重増加は見られなかった。
- ▶ 数値解析等から、腰折屋根（山折れ）と円弧屋根では、棟-軒の合成勾配を持つ平板屋根で割増荷重を評価することができる。
- ▶ 同じく腰折屋根（谷折れ）では、緩勾配側の平板屋根、若しくはスパン長と勾配から求まる等価勾配の平板屋根で割増荷重を評価することができることを示した。

(3) 樋（とい）の条件と屋根勾配の変化を考慮した積雪後降雨荷重の設定方法

- ▶ 切妻屋根、片流れ屋根、M形屋根、のこぎり屋根、腰折屋根（山折れ、谷折れ）、円弧屋根における、降雨による割増荷重算定の際のスパン長 L と勾配 θ の設定方法を提示した。
- ▶ 切妻やM型屋根は、水が流れる方向の屋根勾配を、山折れや円弧屋根は合成勾配を、谷折れ屋根は緩勾配側の勾配または等価勾配を用いることとした。