

建築物の竜巻被害軽減 に向けた研究と課題

喜々津 仁密

構造研究グループ 主任研究員

報告の内容

1. 調査・研究の背景
2. 建築物等の竜巻被害の概要
3. 竜巻発生装置を活用した実験的研究の展開
4. 竜巻を想定した設計の方向性と課題
5. まとめ

調査・研究の背景(1)



- 平成24年5月、平成25年9月に関東地方で竜巻が発生し、相次ぐ竜巻の発生と被害の甚大さは**社会的にも大きなインパクト**を与えた。
- 竜巻は**発生頻度が低く**、通常の耐風設計で考慮するのは合理的ではない。また、観測網で捉えることがまれで、設計に反映できる**知見が不十分**である。⇒建築基準法では、竜巻による荷重外力は**想定されていない**。
- しかし、近年の竜巻被害をみると、**被害後の人命・財産・機能に与える影響**が無視できない事例も確認されており、通常の耐風設計の延長上で**竜巻に対する配慮**が求められる場合も予想される。

3

調査・研究の背景(2)



- 以上を背景にして、建築研究所では平成24年5月のつくば竜巻後すみやかに、基盤研究課題「**建築物の竜巻による被害発生メカニズムの解明(平成24~25年度)**」を開始した。科研費補助金の助成も受け、調査・研究を実施している。



調査

被害調査に基づく被害形態の分析



実験

竜巻発生装置を活用した実験的研究

4

建築物等の竜巻被害の概要



調査を実施したつくば竜巻、越谷竜巻の概要

発生月	調査実施場所	竜巻規模	人的被害(人)		住家被害(棟)		
			死亡	負傷	全壊	半壊	一部損壊
平24.05	つくば市 茨城県	F3	1	37	76	158	400
平25.09	越谷市他 埼玉県	F2	0	64	14	27	1000超

筑波北部工業団地内のテニスコートで撮影された動画

つくば竜巻・越谷竜巻による主な被害形態



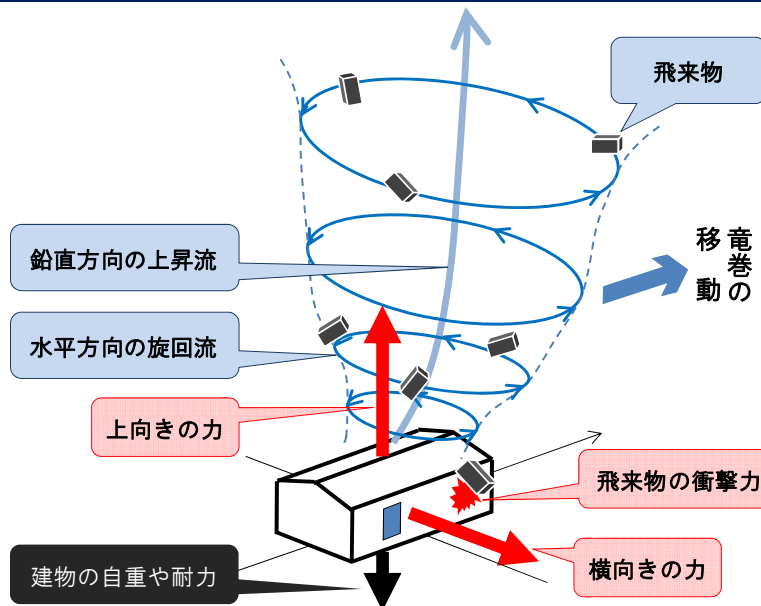
構造種別	① 木造建築物	② 鉄骨造建築物	③ RC造建築物
非構造部材の被害	a. 開口部の損壊	a. 開口部・外壁材の損壊	a. 開口部・建具の損壊
	b. 屋根ふき材と外壁材の脱落・飛散等	b. 屋根ふき材等の脱落・飛散	b. 内装材の損壊
構造部材の被害	c. 小屋組の破壊・飛散	c. 構造骨組の残留変形	
	d. 上部構造の倒壊	d. 上部構造の転倒	
	e. 上部構造の水平移動・飛散		
	f. 上部構造の基礎を伴う転倒		

その他の被害

- ・ 工作物の屋根の脱落
- ・ 塀の倒壊
- ・ トラック等の横転
- ・ 電柱や樹木の折損 等

7

竜巻による荷重外力の作用形態



8

木造建築物(小屋組の破壊・飛散)



木造小屋組の破壊・飛散は竜巻による典型的な被害形態であり、今般の調査でも多く確認された。一般に屋根の形状や勾配により風力係数は異なるが、つくば竜巻による突風では、屋根形状にかかわらず被害がみられた。
(つくば市)



切妻屋根



寄棟屋根



片流れ屋根

木造建築物(上部構造の倒壊)



上部構造の倒壊事例は、つくば竜巻、越谷竜巻双方で確認した。



竜巻によって作用した力が建築物の保有耐力を上回り、層崩壊した事例(昭和54年築)(越谷市)



近隣から飛来した建築物の上部構造の衝突によって倒壊した可能性がある事例(越谷市)

木造建築物(上部構造の基礎を伴う転倒)



(つくば市)

べた基礎の底面が地盤から離れ、上部構造とともに完全に裏返しになっていた。過去の建研/国総研の被害調査ではみられなかった被害形態である。



11

鉄骨造建築物(屋根ふき材等の脱落・飛散)



鉄骨造建築物の場合も木造と同様に、屋根ふき材等の脱落・飛散の被害形態が多くみられた。

文教関連施設(越谷市)



鋼板製屋根材と母屋が巻き上げられた際に、母屋に取り付けられた天井材も同時に上向きに引き上げられて破壊したものと考えられる。

12

RC造建築物(開口部・建具の損壊)

目隠しパネル
が全て飛散

5階

4階

3階

2階

堆積物
が多い

5階建て集合住宅(つくば市)

BRI TORNADO

手すりが手前に大きく引抜かれている

13

独立行政法人 建築研究所

Building Research Institute

飛来物による被害形態

屋根の衝突(つくば市)

電線に引っ掛かった飛来物(鋼板製屋根材)
(つくば市)

独立行政法人 建築研究所

Building Research Institute

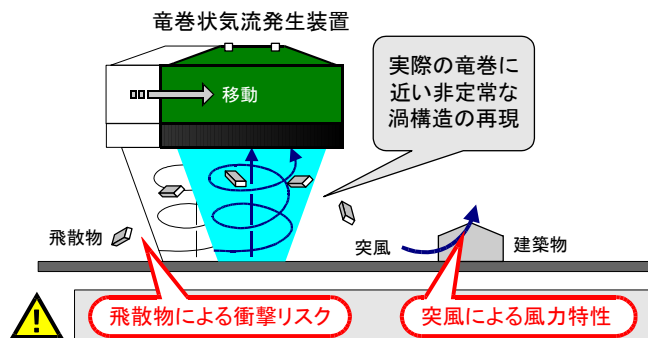
竜巻発生装置を活用した 実験的研究の展開

15

実験的研究の背景

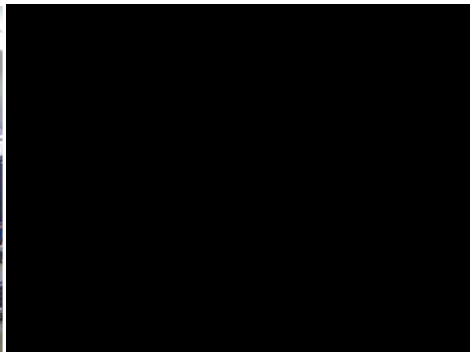
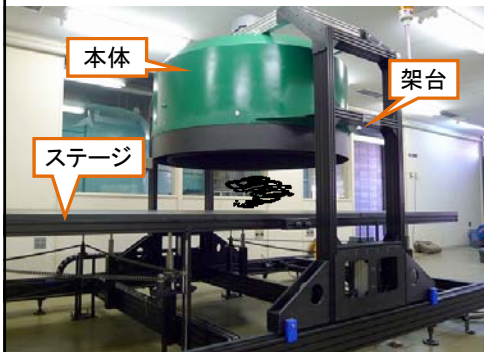


- 竜巻等突風による力は、通常の風洞実験で評価される風力特性と大きく異なるが、実験による知見は十分に蓄積されていないのが現状。
- 竜巻等突風による風力特性、飛来物による衝撃リスクを実験的に評価することを目的に、平成21年度に科研費補助金の助成を受け、**竜巻発生装置**を製作した(国総研、東大、京大防災研と共同実施)。



16

竜巻発生装置の概要

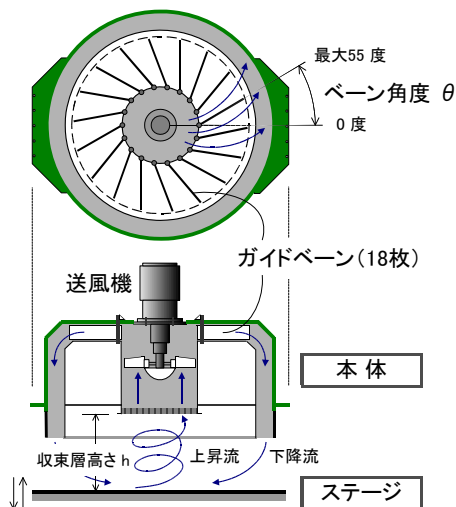


横方向に移動可能

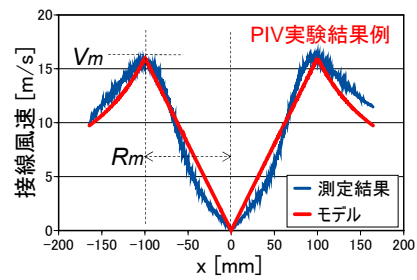
旋回流の発生機構と実験気流のランキン渦モデルへの適合性



旋回流の発生機構は、送風機の回転数、ガイドベーンの角度及びステージの高さを自在に変化させるものである。



実験気流が竜巻の工学モデル(ランキン渦モデル)に適合することを確認。



卓越開口の有無を考慮した建築物模型の風圧実験(1)



- 工場その他の非住家施設の真上を竜巻が通過する状況を再現し、模型の壁と屋根に作用する風圧を測定して竜巻による風力特性を評価した。
- 模型の各壁面には、一様なすき間と飛来物による衝撃痕等を想定した卓越開口(開口比3.3%)を設ける。
- 風力特性は、風力(=外圧-内圧)の測定値を基準となる速度圧で除した風力係数で評価する。
- 風速の縮尺は1/10、模型の大きさの縮尺は1/350である。

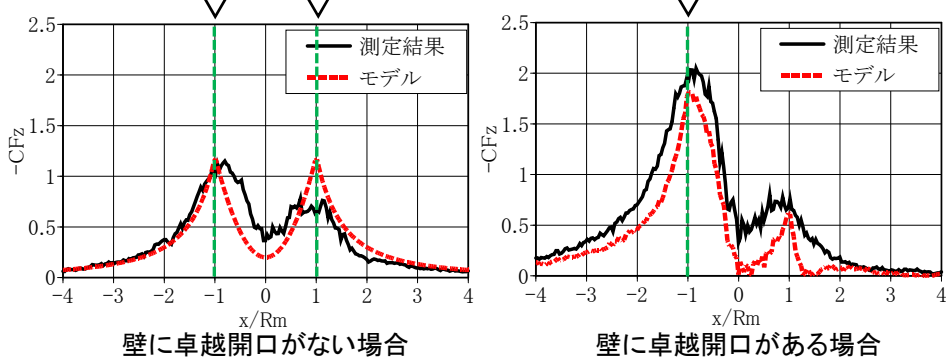


19

卓越開口の有無を考慮した建築物模型の風圧実験(2)



最大接線風速が模型中心に作用するタイミング



注) 横軸は模型中心(原点)に対する、移動する装置中心の相対位置を表す



竜巻通過時に飛来物の衝突による開口部の損壊(卓越開口の発生)は、屋根に作用する荷重増加(上記の結果では約2倍)にもつながる。開口部の損壊を防ぐため、耐衝撃性に配慮したガラスの採用、雨戸等による開口部の防御措置が重要かつ有効である。

20

実験結果に基づく竜巻による突風荷重の提案(屋根の場合)



$$W_t(x) = \frac{1}{2} \rho V_m^2 \cdot C_{Fz}(x) \cdot v$$

竜巻による突風荷重

ρ : 空気密度

V_m : ランキン渦を仮定した最大接線風速

x : 建築物中心に対する竜巻モデル中心の座標

C_{Fz} : 屋根に作用する風力係数、 v : ばらつきの補正係数

$$C_{Fz}(x) = C_a(x) + C_w(x) = C_{ae}(x) + C_{we}(x) - C_i(\alpha_i, x)$$

$$= \begin{cases} \frac{x^2}{R_m^2} (C_{we}^* - \alpha_i \varepsilon_r + 1) - 2(1 - \alpha_i \varepsilon_r) - (1 - \alpha_i) C_{wi}(x) & (|x| \leq R_m) \\ \frac{R_m^2}{x^2} (C_{we}^* + \alpha_i \varepsilon_r - 1) - (1 - \alpha_i) C_{wi}(x) & (|x| > R_m) \end{cases}$$

屋根の風力係数

R_m : ランキン渦を仮定したコア半径

C_{we}^* : 外圧係数

ε_r : すき間の大きさに応じた係数、 C_{wi} : 卓越開口に最も近い壁面上の外圧係数

α_i : 内圧効果に対するすき間と卓越開口の寄与の程度を表す係数

21

竜巻被害の事例に基づく風圧実験(1)



被害発生メカニズム解明の一例として、基礎を伴い上部構造が転倒した木造住宅を想定した突風の作用状況を実験的に再現。

実験結果に基づき、転倒開始時の風速推定と可視化を試みた。

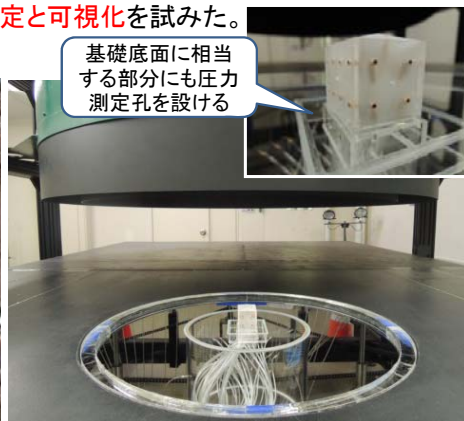
竜巻の推定中心経路



反転したべた基礎
国土地理院 提供

飛散方向

基礎底面に相当する部分にも圧力測定孔を設ける



実際の被害状況の例
(基礎を伴い上部構造が転倒した木造住宅)

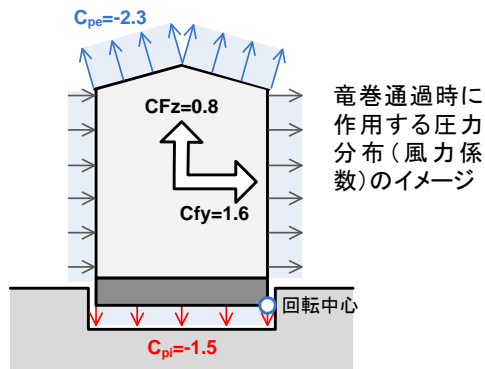
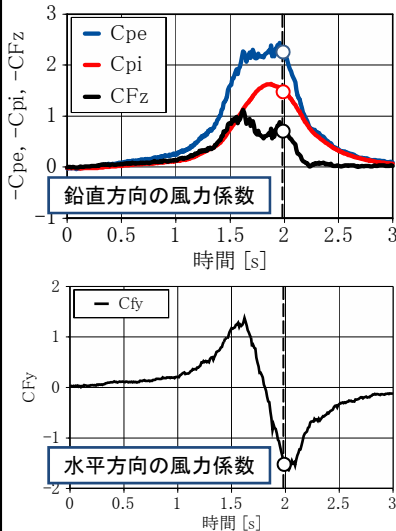
竜巻発生装置を活用した風圧実験状況
(模型縮尺1/280)

22

竜巻被害の事例に基づく風圧実験(2)



建築物に作用する鉛直、水平方向の風力によって生ずる転倒モーメント M_h 、 M_v と建築物の自重による転倒抵抗モーメント M_w との関係から風速を推定する。



$M_w < M_h + M_v$ の関係から、転倒開始風速 $V=82\text{m/s}$ となる。

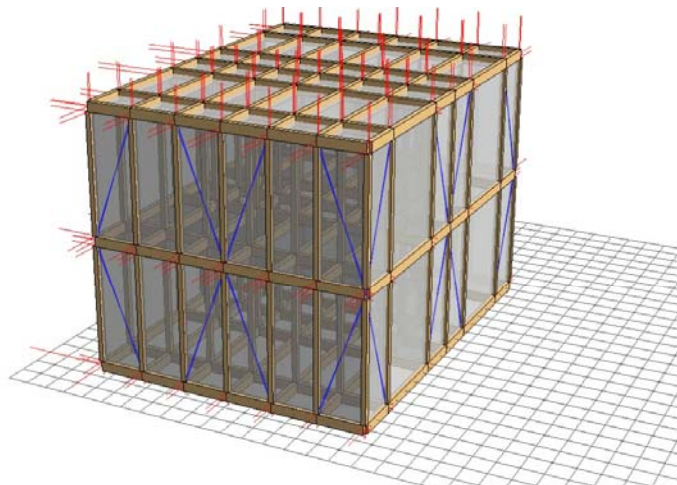
! 竜巻状気流を考慮することで、実況により近い風速の推定が可能となる。

23

竜巻被害の事例に基づく風圧実験(3)



風圧実験で得た各点の風圧データ(時刻歴)を倒壊解析ソフトウェア(wallstat ver.2.01)の入力データとして与えて、木造住宅の転倒開始時の状況を可視化




解析協力:
中川貴文主任研究官
(国総研)



竜巻を想定した設計 の方向性と課題

25

つくば竜巻・越谷竜巻等をふまえた課題認識(1)



- ① 建築基準法では、竜巻によって生ずる荷重・外力は
想定されていない。
- ② 屋根の飛散、飛来物による損壊等の典型的な被害
形態のほか、過去には見られなかった新たな被害形
態(木造住宅の転倒、集合住宅の広範囲の外装材の
損壊)が確認された。
⇒ 実態に即した竜巻による荷重・外力の設定
- ③ 竜巻が工業団地を直撃したことで、複数の事業所施
設の内外装材が損壊した。その結果、一時的な事業
停止等の間接被害が見込まれた。
⇒ 施設の機能継続性の確保

26

つくば竜巻・越谷竜巻等をふまえた課題認識(2)



- ④ 今後の課題として、特に人命・財産・機能保護の観点で、竜巻による被害を最小限にすることが期待される重要な用途建築物(重要建築物)に対しては、竜巻にぜい弱な部位の設計検証の考え方(つまり、竜巻による被災リスクを少しでも軽減させる対策)をきめ細かく整備することが求められる。

⇒ 既往の調査研究の成果、国内外での関連動向を参考にして、建築物の対竜巻設計の検討を実施

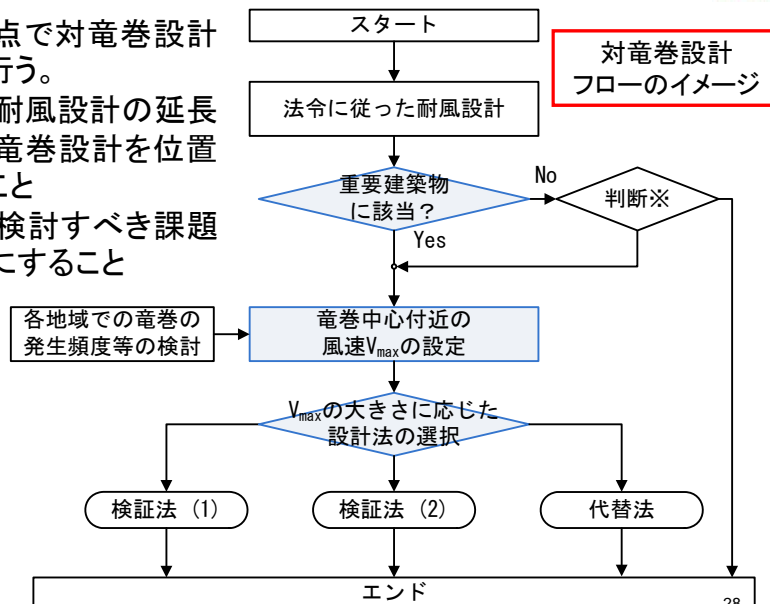
27

建築物の対竜巻設計の検討



以下の観点で対竜巻設計の検討を行う。

- 通常耐風設計の延長上に対竜巻設計を位置づけること
- 今後の検討すべき課題を明確にすること

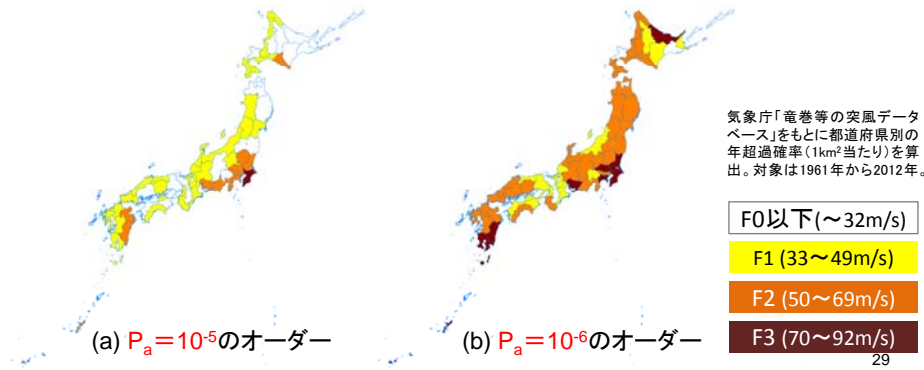


28

竜巻の発生頻度等を考慮した最大風速 V_{max} の設定



- 設計検証の基本となる竜巻中心付近の最大風速 V_{max} は、地域ごとに異なると考えられる。
- 年超過確率 P_a を指標とした都道府県別の風速値をみると、例えば関東平野、濃尾平野、宮崎平野等を含む地域で相対的に大きく評価される傾向にある。
- 1) 年発生数の確率分布と最大風速の確率密度関数の設定、2) 発生頻度に係る数値の設定に関する合意形成等が今後の課題である。



最大風速 V_{max} の大きさに応じた設計法のイメージ



設計法の種類		V_{max} の目安	約20～50m/s	約50～70m/s	約70m/s～
検証法	(1) 竜巻の作用を直接考慮した突風荷重による計算		○	○	○
	(2) 建築基準法等に定める数値を割り増した荷重を準用した計算((1)の簡便法)		○	△	△
代替法	屋根や開口部等について、耐風性能の向上に配慮した構造方法の採用		○	△	—

「○」: 当該方法によることができる。「△」: 当該方法によることができるが、竜巻の中心付近での気圧降下の影響には慎重な判断を要する。「—」: 当該方法以外の方法による。 30

設計法の種類 — 検証法(1)



- これは、**竜巻の作用を直接考慮した突風荷重 W_t** を計算するものであり、竜巻の中心付近での**非定常な気流性状**や**急激な気圧降下**による影響を検証時に考慮することができる。
- 現時点でこの考え方が国内外の基規準に採用された例はないと思われ、竜巻発生装置を活用した実験や数値流体解析を通して、**風力係数の精緻化を図ることが今後の課題**。

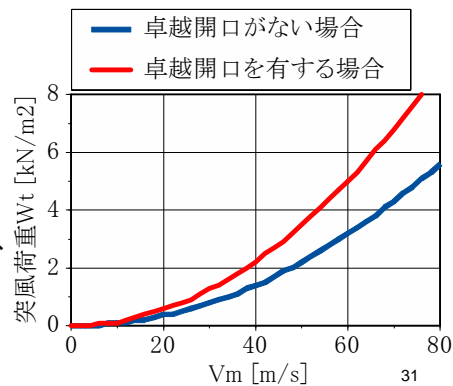
$$V_m = V_{\max} - V_t$$

$$W_t(x) = \frac{1}{2} \rho V_m^2 \cdot C_F(x) \cdot v(x)$$

ここで、

ρ : 空気密度、 V_m : 旋回流の最大接線風速、 V_{\max} : 竜巻の中心付近の最大風速、 V_t : 竜巻の移動速度、 x : 竜巻の中心に対する位置、 C_F : **竜巻の作用を直接考慮した風力係数**、 v : ばらつきを考慮した補正係数

(実験結果に基づく算定例)

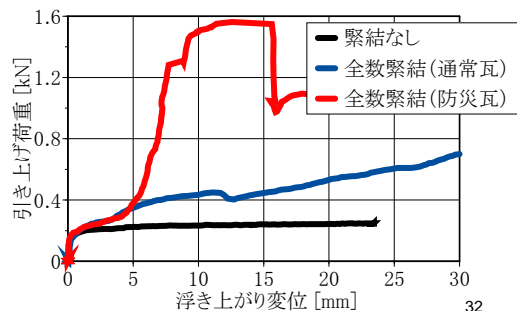
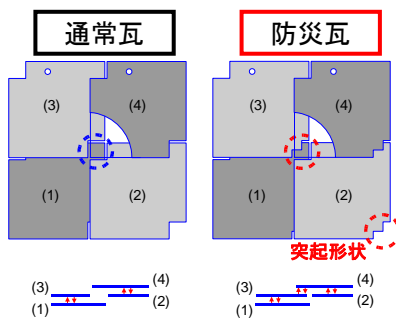


設計法の種類 — 代替法



- これは検証法(1)(2)の代替として、フジタスケールF2相当以下の風速を想定した設計法である。F2相当以下の風速に対して有すべき構造躯体の水平耐力は耐震・耐風設計で確保されることを前提にしている。
- 竜巻に対して**ぜい弱な部位(例えば屋根と開口部)**を対象に、通常の耐風対策の延長上で耐風性に優れた構造方法を採用することによって、計算による検証を要しないこととする。

「瓦屋根標準設計・施工ガイドライン(2001)」では、強風地域(基準風速が40m/sを超える地域等)に対して**防災瓦の全数緊結**仕様を推奨している。



その他の課題(飛来物に対する耐衝撃性能の検討)



- 竜巻等突風による飛来物を対象にした**耐衝撃性能に関する試験・評価法の整備**が課題。
- **耐衝撃性を有する構法や仕様**の事例を蓄積・整備することも設計上有用である。例えば板ガラスや鋼板製外壁では、過去の試験実績に基づいて耐衝撃性能に配慮した構法が提示されている。

普通フロートガラス



(京都大学防災研究所 提供)

合わせガラス



貫通しない

(日本金属屋根協会・日本鋼構造協会 提供)

外壁(1山重ねなし)



貫通しない

外壁(1山重ねあり)



33

まとめ



- 現地調査で得た建築物等の竜巻被害の実態をまとめるとともに、竜巻発生装置を活用した実験的研究の概要、対竜巻設計の方向性と課題について述べた。
- 対竜巻設計の考え方には、通常の耐風設計とは異なる発想が求められる。
- 今後も引き続き、以上で述べた課題等に取り組み、対竜巻設計の整備に資する技術的な知見を蓄積していく予定である。

建築研究所 竜巻

検索

木造建築物(上部構造の飛散)



一部の土台が残存しているものの、ほとんどの上部構造が飛散した事例(つくば市)



上部構造全体が飛散し、近隣の住家に衝突した事例(越谷市)



35