

第4章 木造建築物の被害原因の検討

4.1 建築物に作用する外力

一般に、竜巻によって建築物に作用する力としては、以下の3つが挙げられる^{例えば4.1)}。これらの3つの力のうち、ii)は竜巻特有の力であるが、i)とiii)は竜巻特有の力ではなく、台風等の強風でも建築物に作用する力である。図4.1-1はそれらの模式図である。

- i) 竜巻の旋回流によって生じる風力
- ii) 急激な気圧降下によって生じる力
- iii) 飛来物による衝撃力

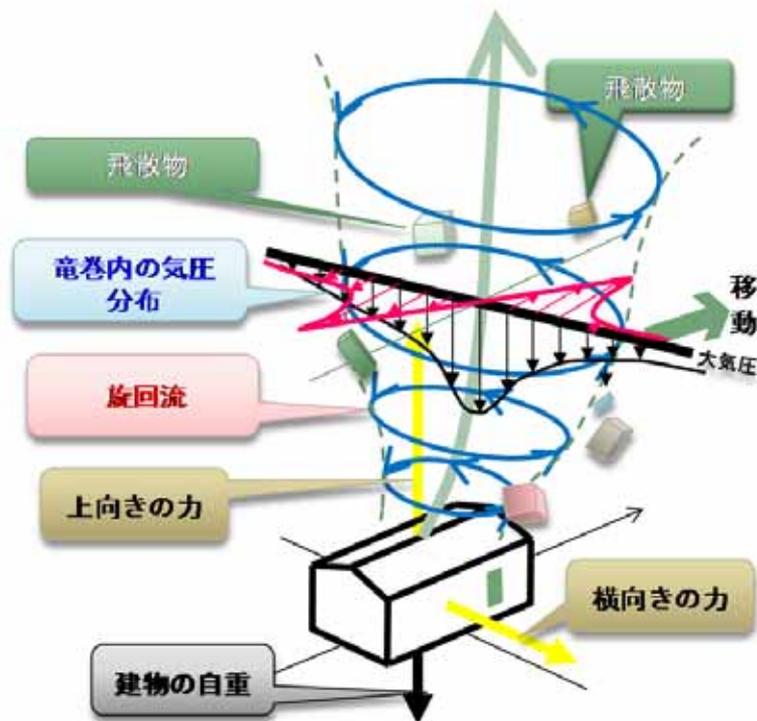


図4.1-1 建築物に作用する竜巻の外力

上記 i) の風力は、竜巻の旋回流が建築物に作用することで発生する。竜巻の旋回流には水平方向成分だけでなく鉛直方向成分もあるが、地表面付近では水平方向の速度成分が卓越すると考えられる。また、建築物全体を水平方向に押すだけでなく、屋根面には屋根を上向きに持ち上げる負圧も発生する。一方、竜巻の旋回流や iii) の飛来物によって開口部や外壁が破損した場合には、建築物内に風が入ることで建築物の内圧が上昇し、屋根全体を下から押し上げる力が作用する場合もある。

大きな渦である竜巻の中心付近では、気圧が数十 hPa (= 数 kN/m²) も周辺よりも低下するとされている。上記 ii) の力は、竜巻の中心付近が建築物を通過する場合など、竜巻渦内の低い気圧が急激に建築物に作用した時、建築物の室内等の大気圧との圧力差によって、屋根や建築物全体を上向きに引き上げる力が発生する。竜巻の気

圧分布はおおよそランキン渦の圧力分布にあてはまるとの報告^{4.2)}があり、竜巻の渦をランキン渦と仮定すると、藤田スケールと気圧降下量には表 4.1-1 の関係がある。

表 4.1-1 藤田スケールと気圧降下の関係

藤田スケール	風速 (m/s)	中心での気圧降下 (kN/m ²)	最大風速半径での気圧降下 (kN/m ²)
F0	- 32	- 1.2	- 0.6
F1	33 - 49	1.2 - 2.8	0.6 - 1.4
F2	50 - 69	3.0 - 5.6	1.5 - 2.8
F3	70 - 92	5.8 - 10.2	2.9 - 5.1
F4	93 - 116	10.4 - 16.2	5.2 - 8.1
F5	117 - 141	16.4 - 24.0	8.2 - 12.0

たとえば、中規模の竜巻の中心気圧は 950hPa 程度と言われている。大気圧を 1013hPa とするとその差は約 60hPa でこれは 6kN/m² に相当する。建築物の真上に竜巻が来たとして、屋根面に竜巻の中心気圧が作用し、室内もしくは基礎底面に大気圧が作用したとすると、屋根や建築物全体に数 kN/m² の力が鉛直方向上向きに作用することになる。

また、竜巻は建築物や工作物等の構造物やその部材、什器、樹木、自動車等を巻き上げる。これらは上記 iii) に掲げる飛来物として別の建築物等に衝突し、開口部、外壁、屋根ふき材等の外装材を破損させる(写真 4.1-1, 2)。外装材を貫通して建築物の室内に飛び込んでくることも多く、中には内壁に突き刺さる飛来物も見られる。また、飛来物は架線に引っ掛かることも多く、受圧面積の増大によって、電柱等を倒壊させることもある。



写真 4.1-1 つくば竜巻(2012)での飛散物の状況



写真 4.1-2 佐呂間竜巻(2006)での飛散物の状況

4.2 木造建築物の被害原因に関する考察

(1) 基礎を伴う上部構造の転倒 (写真 4.2-1)

上部構造が転倒するためには、竜巻による水平方向の風力が当該建築物のせん断耐力を上回らずに、風力によって生じた転倒モーメントが、基礎底部の風下側端部を回転中心とした当該建築物の重量による転倒抵抗モーメントを上回ることが条件となる。

また、上部構造の転倒に基礎を伴うためには、上部構造と基礎を接合する 1 階柱脚接合部、及び土台－基礎間のアンカーボルト等が、建築物の転倒モーメント以上の耐力を有することが条件となる。

さらに、2 階部分単独で転倒していないものと仮定すると、1 階の柱頭接合部、2 階の柱脚接合部の耐力が、2 階が単独で転倒する場合の転倒モーメントを超える耐力を有したものと推定される。

なお、基礎の滑動と建築物の転倒の時間的な前後関係については、現在のところ不明である。



写真 4.2-1 上部構造の転倒

(2) 上部構造の倒壊 (写真 4.2-2)

上部構造がせん断力によって倒壊するためには、以下の条件すべてが成り立つときと考えられる。

- ・ 竜巻による水平方向の風力が当該建築物のせん断耐力を上回る。
- ・ 竜巻による水平方向の風力によって生じる建築物全体の転倒モーメントより、基礎を含めた建築物全体の重量による抵抗モーメントが大きい。
- ・ 竜巻による水平方向の風力によって生じる建築物全体の転倒モーメントによって接合部に生じる引き抜き力より、上部構造と基礎を接合する 1 階柱脚接合部、及び土台－基礎間のアンカーボルト等の耐力が大きい。
- ・ 竜巻による鉛直上向きの力より、建築物の重量が大きく、かつ柱脚柱頭接合部とアンカーボルトの耐力が上回る。

また、小屋組が先行的に飛散していないとすると、竜巻の風力による鉛直上向きの力などに対して小屋組各部の接合耐力が上回っていたと推測される。



写真 4.2-2 上部構造の倒壊

(3) 上部構造の飛散 (写真 4.2-3, 4.2-4)

上部構造が飛散する場合は、以下の3通りのうちいずれかと考えられる。

- 1) 上部構造の形態を保ったまま、飛散する。
- 2) 上部構造が転倒した後、飛散する。
- 3) 上部構造が倒壊した後、部材等が飛散する。

1) が生じるためには、竜巻による鉛直上向きの風力が、当該建築物の上部構造の重量を上回り、かつ上部構造と基礎を接合する1階柱脚部、もしくはアンカーボルトの引き抜き耐力を上回ったものと考えられる。なお、鉛直上向きの風圧力には、開口部が先行的に破壊した後、小屋組や上階床組に風力が作用して鉛直上向きの力となること、及び1階床下換気口から吹き込んだことによる鉛直上向きの荷重を含むと考えられる。

2) が生じるためには、(1) とほぼ同様に竜巻による水平方向の風力が当該建築物のせん断耐力を上回らずに、風力によって生じた転倒モーメントが、上部構造の重量による抵抗モーメントを上回ることが条件となる。

3) が生じるためには、(2) と同様の条件が考えられる。

なお、2), 3) の場合は、転倒、もしくは層崩壊の後も大きな風力が継続的に作用して、部材等が飛散すると考えられる。

また、1階柱脚接合部の引き抜き耐力がアンカーボルトの引き抜き耐力より下回る場合は土台が残存し、上回る場合は土台も含めて飛散すると考えられる。



写真 4.2-3 上部構造の飛散



写真 4.2-4 上部構造の飛散

(4) 上部構造の(水平)移動

木造建築物の上部構造が水平に移動するためには、以下の3条件を満たすと考えられる。

- ・竜巻による水平方向の風力より、当該建物のせん断耐力が上回る。
- ・竜巻による水平方向の風力によって、転倒が生じない。（水平方向の風力が当該建物の基礎を含めた重量による転倒抵抗モーメントを超えず、転倒モーメントによって生じる柱脚接合部、及びアンカーボルトの引き抜き力が当該接合部、アンカーボルトの引き抜き耐力より下回った。）
- ・竜巻による水平方向の力が、当該建物の基礎と地盤の摩擦力には及ばず、基礎と上部構造を留め付けるアンカーボルト、または柱脚接合部のせん断耐力を上回った。

（５）小屋組の損壊・飛散

小屋組に作用する荷重条件としては、以下が考えられる。

- ・竜巻による鉛直上向きの力
- ・開口部等が損壊し、室内に吹き込んだ力が天井を介して小屋組に吹き上げ力として作用する。
- ・軒やけらばに対して作用した吹き上げ力が、垂木や母屋へ伝達され鉛直上向きの力として作用する。
- ・竜巻による水平力が小屋組に水平せん断力として作用する。

以上の荷重が複合的に作用し、小屋組各部の接合耐力を上回ったために小屋組が損壊、飛散したと考えられる。

（６）開口部の損壊

開口の大小によらず、竜巻による大きな面外荷重の作用又は飛来物の衝突によって、開口部が破損したと考えられる。

面外風力によって開口部が破損した場合は、概して当該外壁構面の開口部全てが損壊に至っている場合が多く、局所的な開口部の破壊は、飛来物による場合が多いと考えられる。

（７）屋根ふき材と外壁材の脱落・飛散等

屋根ふき材は、竜巻による鉛直上向きの力、もしくは、竜巻による水平方向の風が、屋根葺き材の重ね合わせ部分のわずかな隙間に吹き込むことによって、飛散したと考えられる。

一方、モルタル外壁は、構造躯体のせん断変形、もしくは面外力が生じない限り、脱落しないため、竜巻による水平方向の風力により、構造躯体がせん断変形していたか、竜巻によって外壁面に負圧が作用したと想像される。もしくは、建物が部分的に破壊し、室内側から屋外側へ向かって風力が作用した場合も考えられる。

なお、モルタル下地が生物劣化を引き起こしていた場合は、その外壁の面外保持力は著しく低下していると考えられる。

4.3 木造住宅の風力による崩壊メカニズムに関する考察

本節では、木造住宅が風力によって崩壊する場合の崩壊メカニズムを推定することを目的として、文献^{4.3)}で調査対象となっている2階建て木造住宅53棟を対象として、木造住宅が風力によって、水平耐力の喪失により崩壊する場合と、転倒によって崩壊する場合を想定した風速の計算を行った。分析対象の建物は、平面図、立面図、耐力壁配置図があり、文献において建物の各方向の水平耐力の最大値が計算されている。

(1) 水平耐力の喪失により崩壊する場合

住宅の水平耐力 Q は各壁の荷重-変形関係の加算を行い、最大耐力を水平耐力とする。ここでは、限界耐力計算の手引き^{4.4)}による荷重-変形関係から小壁等の耐力も考慮した水平耐力を用いた。崩壊の際の推定風速 V は下記のつり合い式(4.3.1)より算出した。

$$Q/A \text{ (N/m}^2\text{)} = 0.5 \rho C_f V^2 \quad (4.3.1)$$

ここで、 Q : 住宅の水平耐力 (N)

A : 見附面積 (1F 下半分を除外) (m^2)

ρ : 空気密度 1.2 kg/m^3

V : 推定風速 (m/s)

C_f : 風力係数 1.2

(2) 転倒によって崩壊する場合

建物の重量は、上部構造については各階の床面積あたり 2.0 kN/m^2 、基礎については1F床面積あたり 6.0 kN/m^2 (1F床重量を含む) と仮定し算出した。転倒で崩壊する際の推定風速 V は下記のモーメントのつり合い式より算出した。5.2節の風速の推定過程と同様にここでも、(a)竜巻による急激な気圧降下が建築物に作用する場合と、(b)竜巻の水平方向の旋回流のみが建築物に作用する場合の2通りについて風速の計算を行った。

(a) 竜巻による急激な気圧降下が建築物に作用する場合

$$\text{転倒モーメント} \quad M_w = W \times (D/2) \times 1000 \text{ (Nm)} \quad (4.3.2)$$

$$\text{水平方向風圧力モーメント} \quad M_h = 0.5 \times (0.5 \cdot V^2 \times C_{ft}) \times BH^2 \quad (4.3.3)$$

$$\text{鉛直方向風圧力モーメント} \quad M_v = 0.5 \times (0.5 \cdot V^2 \times C_{pe}) \times BD^2 \quad (4.3.4)$$

$M_w = M_h + M_v$ として V を算出

ここで、 W : 建物重量 (kN)

D : 建物奥行 (m) B : 建物幅 (m)

$C_{ft} = 2.0$ (最大の場合を仮定)、 $C_{pe} = 1.8$ として計算

(b) 竜巻の水平方向の旋回流のみが建築物に作用する場合

$$\text{転倒モーメント} \quad M_w = W \times (D/2) \times 1000 \text{ (Nm)} \quad (4.3.5)$$

$$\text{水平方向風圧力モーメント} \quad M_h = 0.5 \times (0.5 \cdot V^2 \times C_f) \times BH^2 \quad (4.3.6)$$

$$\begin{aligned} \text{鉛直方向風圧力モーメント} \quad M_v = & -0.5 \times (0.5 \cdot V^2 \times C_{pe2}) \times BD^2 \\ & -0.5 \times (0.5 \cdot V^2 \times (C_{pe1} - C_{pe2})) \times B(D^2 - D'^2) \end{aligned} \quad (4.3.7)$$

$M_w = M_h + M_v$ として V を算出

ここで、 W : 建物重量 (kN)

D : 建物奥行 (m) B : 建物幅 (m)

$C_f = 1.2$, $C_{pe1} = -0.5$, $C_{pe2} = -1.0$ として計算

図 4.3-1 に水平耐力の喪失で崩壊する場合の耐力と風速の関係、図 4.3-2 に竜巻状気流発生装置を用いた既往の風圧実験結果^{4,5)}に基づいて算出した風速（以下、仮定(a)と称する）と転倒モーメントの関係を、図 4.3-3 に通常の風力算定時の風力係数を用いて算出した風速（以下、仮定(b)と称する）と転倒モーメントの関係を示した。

水平耐力の喪失で崩壊する場合は 60m/s 程度以上の風速であり、転倒によって崩壊する風速は、仮定(a)では 50m/s 程度、仮定(b)では 80m/s 程度以上の計算結果となった。仮定(a)の場合は、水平耐力により決まる風速が、転倒によって決まる風速よりも大きい場合が多く、図 4.3-4 に両者を比較して示したが、多くが水平耐力で崩壊が生じるより先に、転倒による崩壊が生じる計算結果となった。反対に仮定(b)の場合は、図 4.3-5 に示したとおり、転倒によって決まる風速が、水平耐力の喪失で決まる風速よりも概ね大きくなる結果となった。竜巻による水平流のみを風力として考えた場合（仮定(b)）には、2階建ての木造住宅の転倒が起こる可能性が低いが、気圧差による鉛直上向き方向の風力を考慮すると（仮定(a)）、転倒が起こる可能性が高くなることが示唆された。

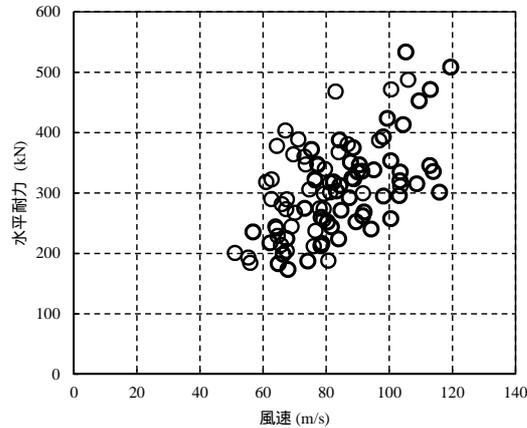


図 4.3-1 水平耐力の喪失で崩壊する場合の耐力と風速の関係 ($C_f = 1.2$)

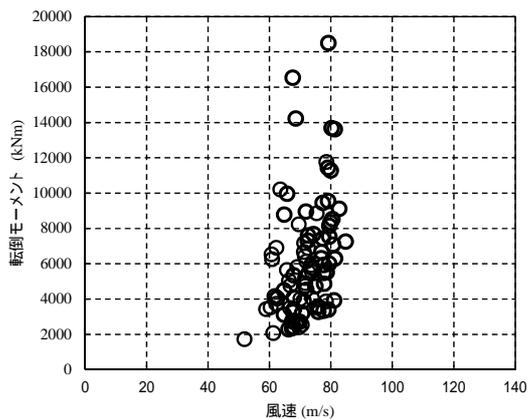


図 4.3-2 転倒で崩壊する場合の転倒モーメントと風速の関係 (仮定(a))

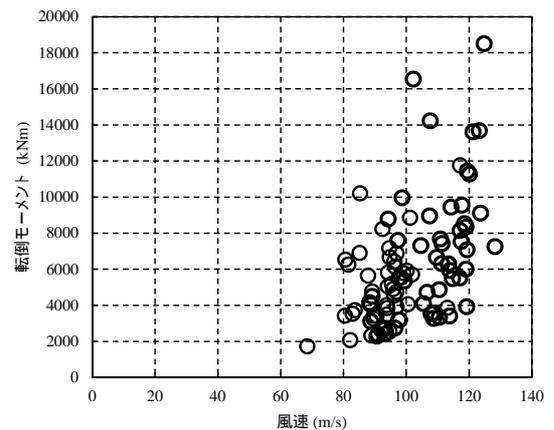


図 4.3-3 転倒で崩壊する場合の転倒モーメントと風速の関係 (仮定(b))

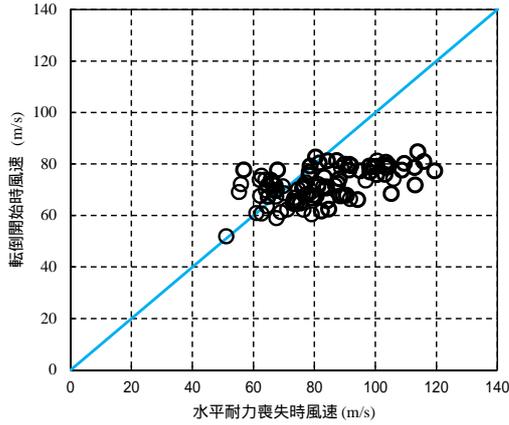


図 4.3-4 水平耐力の喪失で崩壊する場合の風速と転倒により崩壊する場合の風速の関係（仮定(a)）

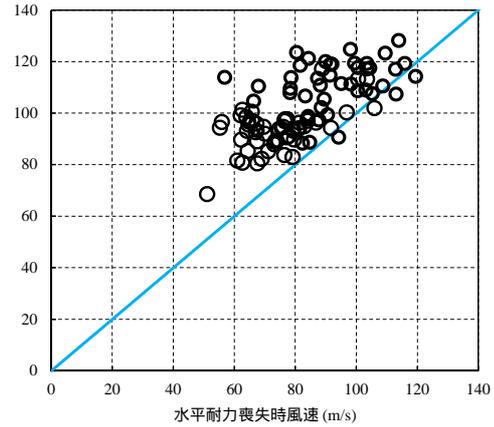


図 4.3-5 水平耐力の喪失で崩壊する場合の風速と転倒により崩壊する場合の風速の関係（仮定(b)）

参考文献

- 4.1) 室田達郎, 山口修由, 鈴木 恒, 新野 宏, 藤谷徳之助: 1990 年の千葉県茂原市の竜巻による建築物の被害調査報告, 建築研究資料, No. 78, 1992. 3
- 4.2) J. Lee, T. Samaras and C. Young: Pressure Measurement at the Ground in an F-4Tornado, 22nd Conference on Severe Local Storms, 2004
- 4.3) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 建築研究所: 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震被害調査報告, 建築研究資料, No. 136, 2012. 3
- 4.4) (財) 日本住宅・木材技術センター: 木造軸組工法住宅の限界耐力計算による設計の手引き, 2009. 3
- 4.5) 喜々津仁密, パーサー サーカー, フレッド ハーン: 竜巻状気流発生装置を活用した低層建築物に作用する風力特性に関する基礎的研究, 第 21 回風工学シンポジウム論文集, Vol. 21, pp. 149-154, 2010