

第3章 建築物等の被害形態

茨城県つくば市内の現地調査を通して、多数の建築物等の竜巻被害事例を収集した。本章では、木造、鉄骨造及び鉄筋コンクリート造の建築物のほか、建築物以外として工作物等、乗用車及び樹木について確認された被害形態をまとめる。

3.1 木造建築物の被害

北条地区、吉沼地区及び山木地区における木造建築物の主な被害事例を以下に示す。

(1) 基礎を伴う上部構造の転倒（1棟）

北条地区では、木造建築物の上部構造が基礎を伴って転倒した事例が確認された。2階部分の天地が逆転した状態で確認されたが、小屋組及び1階部分は確認されなかった（写真3.1-1）。また、べた基礎は反転していた（写真3.1-2, 3.1-3）。基礎底面には防湿シートが確認された（写真3.1-4）。基礎下の割栗石には引きずられた跡はほとんど確認されなかった（写真3.1-5, 3.1-6）。被災後の航空写真より、竜巻の進行方向に対し右側に部材が飛散しているのが確認できる（写真3.1-7, 3.1-8）。



写真 3.1-1 基礎から転倒した木造建築物



写真 3.1-2 写真 3.1-1 の 2 階床面



写真 3.1-3 写真 3.1-1 のべた基礎底面の露出



写真 3.1-4 写真 3.1-1 のべた基礎底面の防湿シート



写真 3.1-5 基礎下の割栗石の状況



写真 3.1-6 建築位置と転倒位置の関係



写真 3.1-7 写真 3.1-1 の被災前の航空写真



写真 3.1-8 写真 3.1-1 の被災後の航空写真

(2) 上部構造の飛散 (6 棟)

上部構造が建設地から飛散する事例が複数確認された。土台を含む上部構造が飛散し基礎のみ残存する事例（写真 3.1-9, 3.1-10）や、土台を含む 1 階床組のみ残存する事例（写真 3.1-13～写真 3.1-14）等が確認された。写真 3.1-15、3.1-16 の被災前後の航空写真より、被災した建築物の部材が飛散し、後方の鉄筋コンクリート造建築物に衝突していることが確認できる。

また県道沿いの木造建築物 7 棟のうち 6 棟が基礎のみを残し飛散しているのが確認された（写真 3.1-17～3.1-21）。

建築物の基礎は無筋コンクリート基礎（写真 3.1-19）、またはコンクリートブロック基礎で、土台と基礎を緊結するアンカーボルト等は確認されなかった。被災前後の航空写真より、飛散した部材が県道を挟んで移動しているのが確認できる（写真 3.1-20, 3.1-21）。

写真 3.1-21 に今回の竜巻による被害中心線を併せて示したが、この地区の被害は中心線から大きくそれていることから、竜巻がこの地域で曲線的な進路を通った可能性がある。



写真 3.1-9 飛散した木造建築物



写真 3.1-10 写真 3.1-9 の基礎（隅角部）



写真 3.1-11 写真 3.1-9 の飛散した部材



写真 3.1-12 写真 3.1-9 の残存する接合金物



写真 3.1-13 土台を残し飛散した木造建築物



写真 3.1-14 写真 3.1-13 の1階床仕様



国土地理院提供

写真 3.1-15 飛散した建築物の被災前の航空写真



国土地理院提供

写真 3.1-16 飛散した建築物の航空写真



写真 3.1-17 飛散した木造建築物群



写真 3.1-18 写真 3.1-17 の基礎外観



写真 3.1-19 写真 3.1-18 の無筋コンクリート基礎



写真 3.1-20 被災前の航空写真



写真 3.1-21 被災後の航空写真（部材が道路を越えて飛散）

(3) 上部構造の倒壊（多数）

倒壊した建築物が多数確認された。外壁や屋根等の形状を一部残す事例(写真 3.1-22～写真 3.1-25)や、建築物の形状を全く残さない事例(写真 3.1-26, 3.1-27)等が確認された。



写真 3.1-22 倒壊した木造建築物



写真 3.1-23 倒壊した木造建築物



写真 3.1-24 倒壊した木造建築物



写真 3.1-25 倒壊した木造建築物



写真 3.1-26 倒壊した木造建築物



写真 3.1-27 倒壊した木造建築物

(4) 上部構造の傾斜（多数）

残留変形が生じた建築物が多数確認された（写真 3.1-28, 3.1-29）。



写真 3.1-28 傾斜した木造建築物



写真 3.1-29 傾斜した木造建築物

(5) 上部構造の移動（1棟）

北条地区では、上部構造が基礎から移動し、前面の道路まで移動した事例が確認された（写真 3.1-30, 3.1-31）。



写真 3.1-30 移動した木造建築物の外観



写真 3.1-31 移動した木造建築物の外観

(6) 小屋組の被害（約 70 棟）

小屋組の被害事例が多く確認された。比較的古い住家の切妻屋根（写真 3.1-32）、比較的新しい住家の切妻屋根（写真 3.1-33）、寄棟屋根（写真 3.1-34）、片流れ屋根（写真 3.1-35）等、屋根形状に関係なく被害が確認された。



写真 3.1-32 切妻屋根の被害



写真 3.1-33 切妻屋根の被害



写真 3.1-34 寄棟屋根の被害



写真 3.1-35 片流れ屋根の被害

3.2 鉄骨造建築物の被害

本節では、鉄骨造建築物 3 事例にみられた構造被害についてその被害形態をまとめる。なお、本節では構造体の被害に限定し、鉄骨造建築物の外装材や屋根ふき材の被害については 3.4 節で詳述する。

(1) 構造骨組の崩壊

写真 3.2-2 は 2 階建て鉄骨造建築物であり、構造骨組と基礎の移動、構造骨組の張間方向の崩壊、基礎の部分的破壊が認められた。本建築物は上部構造が崩壊後に基礎ごと移動したと考えられる。建築物は 1 階柱頭が張間(弱軸)方向に曲げ破壊し、ベースプレートでは柱脚ボルトの破断が確認された。基礎は部分的に破壊され、明確な形状は確認できなかった。



写真 3.2-1 鉄骨造建築物 A(点線)と調査建築物の被害中心線(矢印)との位置関係



写真 3.2-2 鉄骨造建築物 A



写真 3.2-3 部分的に破壊した基礎

(2) 構造骨組の残留変形

写真 3.2-5 は倉庫と思われる平屋の鉄骨造建築物であり、構造骨組の桁行方向に変形角約 $1/10$ (rad) 程度の残留変形が認められた。建築物桁行方向には胴縁だけで圧縮桁梁材は確認できなかった。桁行方向の引張ブレース端部のせん断ボルト(破断位置が上端か下端かはブレースにより異なる)が破断していた。



写真 3.2-4 鉄骨造建築物 B(点線)と調査建築物の被害中心線(矢印)との位置関係



写真 3.2-5 鉄骨造建築物 B



写真 3.2-6 引張ブレース端部のボルト破断

(3) 転倒

写真 3.2-8 は車庫として使われていた鉄骨造建築物 C であり、柱脚の引き抜けに伴う転倒が認められた。



写真 3.2-7 鉄骨造建築物 C(点線)と調査建築物の被害中心線(矢印)との位置関係



写真 3.2-8 鉄骨造建築物 C



写真 3.2-9 写真 3.2-8 の柱脚の引き抜け状況

3.3 鉄筋コンクリート造建築物の被害

写真 3.3-1～3.3-4 に鉄筋コンクリート造建築物の事例を示す。本調査の範囲では、鉄筋コンクリート造建築物の構造躯体に竜巻による突風により生じた被害は確認されなかった。なお、3.4 節で後述する鉄筋コンクリート造の集合住宅(雇用促進住宅北条宿舎)周辺では、木造建築物に上部構造の飛散等の甚大な構造被害が生じているものの、同集合住宅には開口部等の被害のみ確認され、他の鉄筋コンクリート造建築物と同様に構造躯体の被害は確認されていない。



写真 3.3-1 鉄筋コンクリート造建築物 A(線囲み)と調査建築物の被害中心線(矢印)との位置関係



写真 3.3-2 鉄筋コンクリート造建築物 A



写真 3.3-3 鉄骨造建築物 B(線囲み)と調査建築物の被害中心線(矢印)との位置関係



写真 3.3-4 鉄筋コンクリート造建築物 B

3.4 外装材等の被害

本節では、建築物の外装材等に見られた被害について、屋根ふき材、外壁材、開口部等に分類して各々の主な被害形態をまとめる。外装材は竜巻等突風に対して最も脆弱な部位であり、調査地域においても多数の被害が確認された。また、北部工業団地内の事業所施設では上記の外装材だけでなく、外装材の被害に伴って発生した内装材の被害、屋外に設置された設備系統の被害もみられ、これらの事例についてもここで掲げる。

3.4.1 屋根ふき材

(1) 住宅等

屋根ふき材の被害形態として最も多く確認されたのは、木造建築物の屋根瓦の脱落であり、これは既往の竜巻による被害でも最も典型的な被害形態の1つである。写真3.4-1～3.4-4に被害事例を示す。写真3.4-4では屋根瓦の脱落だけでなく、野地板の被害も認められる。



写真 3.4-1 屋根瓦の脱落



写真 3.4-2 屋根瓦の脱落



写真 3.4-3 屋根瓦の脱落



写真 3.4-4 屋根瓦の脱落と野地板の被害

屋根ふき材の被害としては屋根瓦以外にも、複数の地点で飛散した長尺の鋼板製屋根材が電線等に引っ掛かっていたほか、周囲の住宅へ落下又は衝突していた（写真3.4-5～3.4-7）。また、写真3.4-8に示す飛散した屋根材の事例からは、タイトフレームと母屋との間の接合具の抜け及び木製母屋の破壊によって飛散した状況が確認できる。長尺の鋼板製屋根材は一般に自重が軽く、一枚当たりの面積が比較的大きい（すなわち、受風面積が大きい）ことから、接合部や支持部材の破壊後に飛散する状況となりやすい。



写真 3.4-5 電線等に引っ掛かった飛来物（鋼板製屋根材）



写真 3.4-6 飛来物（鋼板製屋根材）の衝突



写真 3.4-7 飛来物（小屋組）の衝突



写真 3.4-8 飛散した折板屋根の状況

(2) 事業所施設

北部工業団地での鉄骨造の事業所施設では、屋根ふき材の損傷が確認された（写真 3.4-9）。また、鋼板製屋根材のなかには、通りを挟んだ敷地まで数十メートル以上飛散したのものもあった（写真 3.4-10）。



写真 3.4-9 屋根ふき材の損傷



写真 3.4-10 飛散した鋼板製屋根材

3.4.2 外壁材

(1) 店舗及び住宅

写真 3.4-11～3.4-15 に北条地区の商店街に面していた店舗の外壁材の脱落事例を示す。写真 3.4-11～3.4-12 に示すように、外壁材の脱落はモルタル外壁に多くみられた。モルタル外壁の下地材が腐朽している例も確認された。また、写真 3.4-13～3.4-15 は鋼板製の外壁材であり、いずれも木製の下地材から脱落又ははく離している。

以上の店舗だけでなく、軽量鉄骨造の住宅でも外壁材の脱落被害がみられた（写真 3.4-16）。



写真 3.4-11 モルタル外壁の脱落



写真 3.4-12 モルタル外壁の脱落



写真 3.4-13 外壁材の脱落



写真 3.4-14 外壁材の脱落



写真 3.4-15 外壁材の脱落



写真 3.4-16 軽量鉄骨造住宅の外壁材の脱落

(2) 事業所施設及び医療施設

北部工業団地での鉄骨造の事業所施設では、外壁材、軒天井等の損傷が確認された（写真 3.4-17～3.4-19）。また、北条地区の医療施設でも渡り廊下底面の仕上げ材が脱落していた（写真 3.4-20）。



写真 3.4-17 外壁材とガラスの損傷



写真 3.4-18 軒天井の損傷



写真 3.4-19 渡り廊下底面の仕上げ材の脱落



写真 3.4-20 渡り廊下底面の仕上げ材の脱落

3.4.3 開口部等

(1) 店舗及び店舗併用住宅

写真 3.4-21～3.4-22 に店舗前面の窓ガラスの破損状況を示す。いずれも大部分の窓が竜巻の作用や飛来物の衝突により破損しており、中には明らかに飛来物によるものと思われる衝突痕も認められる（写真 3.4-22 中の矢印）。

写真 3.4-23～3.4-24 は店舗併用住宅の被害状況である。商店街の通りに面した開口の木製建具が脱落しているほか、突風が吹きこんだことによる屋内の被害も確認された。また、写真 3.4-23 に示す開口部と反対側の壁面での開口部も同様にほぼ全面的に破損していた（写真 3.4-25）。



写真 3.4-21 店舗の窓ガラスの被害状況



写真 3.4-22 店舗の窓ガラスの被害状況



写真 3.4-23 店舗併用住宅の開口部の被害状況



写真 3.4-24 店舗併用住宅の屋内の被害状況



写真 3.4-25 店舗併用住宅の開口部の被害状況

(2) 集合住宅

写真 3.4-26～3.4-32 に雇用促進住宅北条宿舎（昭和 59 年 10 月竣工）での開口部等の被害状況を示す。本住宅は鉄筋コンクリート造 5 階建てであり、写真 3.4-26 に示すように南面の開口部等が全ての階にわたって著しく損壊していた。低層階の被害状況をみると、2 階のベランダには多くの飛来物が堆積していること、1 階の桁行中央

にある鉄筋コンクリート造の手すりにひび割れが認められたことから、多数の飛来物の衝突を被ったことが想定される（写真3.4-27～3.4-28）。一方、4～5階のベランダには低層階よりも比較的堆積物は少ないが、写真3.4-30に示すように4階の桁行中央付近にある手すりが屋外方向に引き抜けていた。この状況から、上層階の特に桁行中央付近では、極めて大きな負圧が作用したことが竜巻接近時の可能性の1つとして想定される。一方、北面でのアルミサッシも南面と同様に破損しており、可動式の小窓のアルミサッシも複数脱落していた。また、屋内の物品（寝具類等）が屋外方向に出た状況も確認できる（写真3.4-31～3.4-32）。

図3.4-1に、各階でのベランダの目隠しパネルとアルミ手すりの被害分布状況を示す。同図(a)に示す南面でのベランダの被害は外観からの調査によるものであり、目隠しパネルについては全面破壊して残存していないものを黒色、アルミ手すりについては両端又は片端が支柱から離脱しているものを赤線、著しい変形が認められるものを黄色でそれぞれ表示した。また、同図(b), (c)に示す各階でのアルミサッシの被害分布状況は、応急措置と復旧に際しての継続使用の可否の観点で住宅管理会社が調査したものである。当該サッシにガラスを入れることが不可能で、サッシ自体の継続使用も不可能であると判断されたものが最も被害の程度が著しいと判断でき、ここではこれを赤色で表示した。



写真3.4-26 5階建て集合住宅南面の被害状況



写真 3.4-27 2階ベランダの堆積物



写真 3.4-28 RC造手すりの被害状況



写真 3.4-29 4～5階の被害状況の例



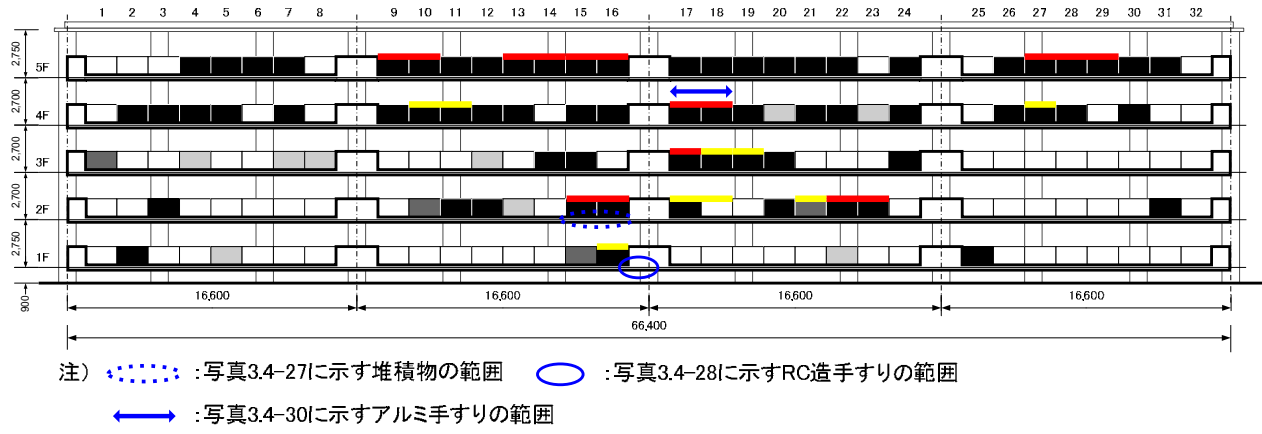
写真 3.4-30 屋外方向に引き抜かれたアルミ手すり



写真 3.4-31 北面の被害状況

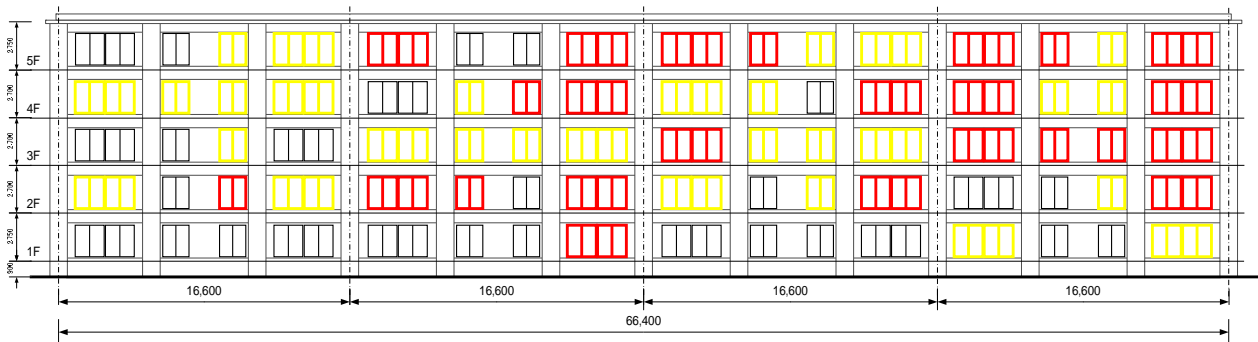


写真 3.4-32 北面の被害状況

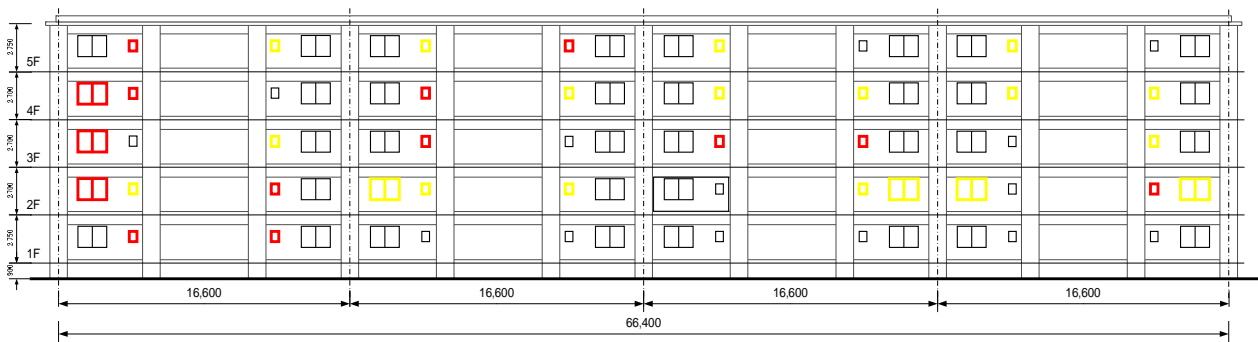


部位	色	被害の状況
目隠し パネル	淡灰	軽微な衝突痕又は亀裂が認められる
	濃灰	著しい衝突痕が認められる
	黒	全面的に破壊し、残存していない
アルミ 手すり	黄	著しい変形が認められる
	赤	手すりの両端又は片端が離脱している（残存していないものを含む）

(a) ベランダの目隠しパネルとアルミ手すり（南面）



(b) アルミサッシ（南面）



(c) アルミサッシ（北面）

図 3.4-1 各階における開口部等の被害分布状況

色	被害の状況	復旧時の対応
黒	当該サッシにガラスを入れることが可能で、サッシ自体の継続使用も可能であると判断される	サッシは継続使用する
黄	当該サッシにガラスを入れることが可能であるが、サッシ自体の継続使用は不可能であると判断される (例 サッシ下部が破損、サッシに歪みや凹みがあり開閉不能である等)	サッシを交換する(応急措置として、ガラスを入れて養生している)
赤	当該サッシにガラスを入れることが不可能で、サッシ自体の継続使用も不可能であると判断される(脱落・飛散したものを含む)	サッシを交換する

図 3.4-1 各階における開口部等の被害分布状況(続き)

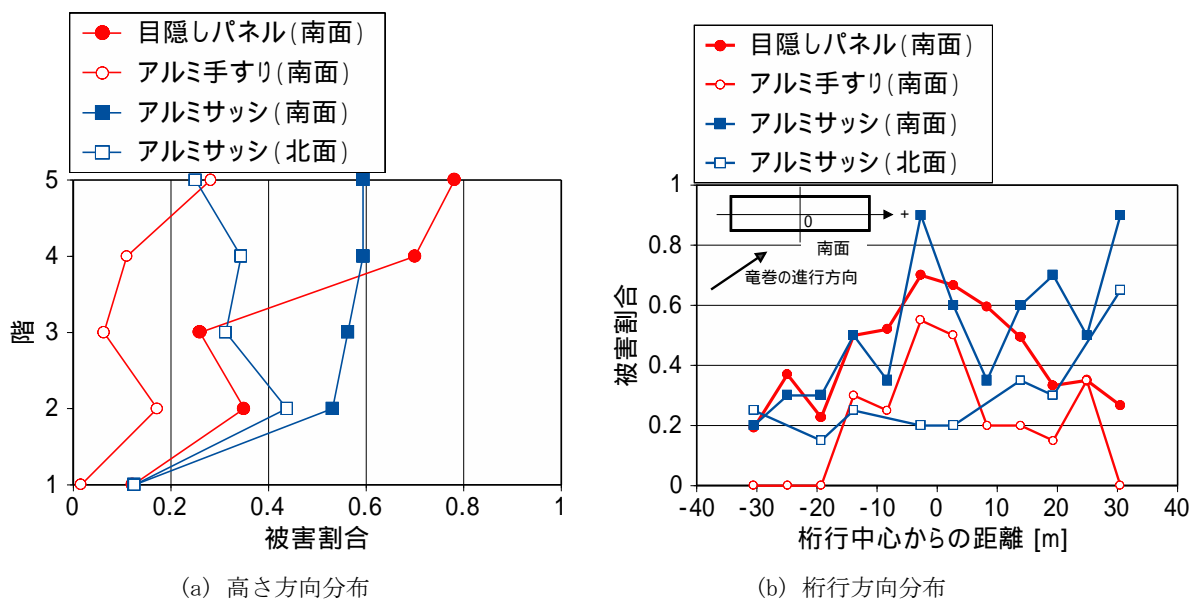


図 3.4-2 ベランダの目隠しパネル、アルミ手すり及びアルミサッシの被害割合

図 3.4-1 に示した開口部等の被害分布状況に基づき、高さ方向及び桁行方向の被害割合の傾向を図 3.4-2 にまとめる。以下では、各々の被害割合 R は式(3.4.1)で算出した。ここで、 N_a : 目隠しパネルの黒色、手すりの赤色、アルミサッシの赤色に該当する被害箇所の総数、 N_b : 目隠しパネルの濃灰色、アルミ手すりの黄色、アルミサッシの黄色に該当する被害箇所の総数、 N_c : 目隠しパネルの淡灰色に該当する被害箇所の総数、 N_{all} : 対象範囲での目隠しパネル、アルミ手すり又はアルミサッシの総数であり、被害の程度に応じた係数を 1.0、0.5、0.2 と仮定した。

$$R = \frac{1}{N_{all}}(N_a + 0.5N_b + 0.2N_c) \quad (3.4.1)$$

図 3.4-2(a)をみると、いずれも 1 階の被害割合が他の階よりも極めて小さい。また、南面でのベランダの目隠しパネル、アルミ手すり及びアルミサッシはいずれも上階になるにつれて甚大な被害範囲が大きくなる傾向が認められる。ただし、目隠しパネルとアルミ手すりは 2 階の被害割合が 3 階よりも大きく、これは飛来物による衝突の多寡が影響している可能性がある。一方、北面での 2~5 階のアルミサッシは南面での結果と逆の傾向である。

次に同図(b)をみると、南面でのベランダの目隠しパネル、アルミ手すり及びアルミサッシはいずれも桁行き中心付近の被害率が高い結果となっている。この範囲は、第 2 章の図 2.3-13 で想定した被害中心線の位置と整合し

ており、実際に写真 3.4-30, 図 3.4-1(a)中の⇄印に示すようにアルミ手すりが屋外方向に著しく引き抜かれる状況もみられた。またアルミサッシは南北面いずれも、竜巻の接近する側から見て桁行方向右側のほうが左側よりも被害率が相対的に高い傾向にある。

ここで対象にした目隠しパネル、アルミ手すり及びアルミサッシは、供用期間中に部分的に更新されていないと仮定すると、各々の耐力の程度は高さ方向及び桁行き方向についてほぼ同様であるとみなすことができる。したがって以上の結果から、南面において地盤面からの高さが高いほど竜巻による強風域の範囲が広く、また被害中心線に相当する範囲では竜巻による力（又は瞬間風速）が大きい傾向であったと考えられる。

上記で得られた被害分布の傾向と竜巻の鉛直方向の気流分布や地表面粗度との関係については、建築研究所が所有する竜巻状気流発生装置¹を活用した実験によって今後検証する予定である。

(3) 商業施設

写真 3.4-33～3.4-36 に北条地区での商業施設の被害状況を示す。エントランスでの建具が脱落しているほか、ガラス等への飛来物の衝突痕が多数みられた。



写真 3.4-33 建具の脱落



写真 3.4-34 エントランスでの飛来物の衝突痕



写真 3.4-35 ガラスへの飛来物の衝突痕



写真 3.4-36 ガラスへの飛来物の衝突痕

(4) その他の施設

写真 3.4-37 に消防団施設のシャッター被害の状況を示す。スラットがガイドレールから外れ、屋外方向に引き抜かれた状態になっている。

¹ 旋回流と上昇流を発生させることにより、竜巻が通過する際の突風性状を工学的に再現することができる装置。



写真 3.4-37 消防団施設のシャッターの被害状況

3.4.4 内装材

北部工業団地内の事業所施設では外装材の破損によって、天井材その他の内装材に被害が及んだ事例も確認された（写真 3.4-38～3.4-39）。机やイス等の家具等の転倒も見られた。なお、これらの建築物について、構造躯体の被害は確認されなかった。



写真 3.4-38 内装材の被害



写真 3.4-39 天井材の被害

3.4.5 屋外設備

北部工業団地内の事業所施設や北条地区の集合住宅では、屋外に設置される設備の被害も確認された（写真3.4-40）。



(a) 事業所施設



(b) 集合住宅

写真 3.4-40 屋外に設置される設備の被害

3.5 その他の被害

調査対象地域では建築物以外にも、工作物等、乗用車、樹木の被害も多数みられた。本節ではこれらの被害形態についてまとめる。

3.5.1 工作物等

写真3.5-1～3.5-2はガソリンスタンド及び駐輪場での鋼板製屋根の被害で、駐輪場での屋根材は波打った状態であった。写真3.5-3～3.5-4は石塀、写真3.5-5は石灯籠の倒壊事例である。道路標識及び電柱の被害については、写真3.5-6が道路標識の折損状況、写真3.5-7が複数の電柱が連続して折損又は傾斜している状況、写真3.5-8が折損した電柱が隣接する住家に倒れ掛かっている状況である。また、パイプハウスの骨組やフェンスが著しく変形している状況もみられた（写真3.5-9～3.5-10）。



写真 3.5-1 ガソリンスタンドの折板屋根の脱落



写真 3.5-2 駐輪場の折板屋根の著しい変形



写真 3.5-3 石塀の倒壊



写真 3.5-4 石塀の倒壊



写真 3.5-5 石灯籠の倒壊



写真 3.5-6 道路標識の折損



写真 3.5-7 電柱の折損・傾斜



写真 3.5-8 電柱の折損・傾斜



写真 3.5-9 パイプハウスの被害状況



写真 3.5-10 フェンスの被害状況

3.5.2 乗用車

調査対象地域では多数の乗用車の横転や転倒の被害が発生している（写真 3.5-11～3.5-12）。また、写真 3.5-13～3.5-14 に示すように、軽乗用車以外の比較的重量のある乗用車やトラックが横転する事例もみられた。



写真 3.5-11 乗用車の横転等



写真 3.5-12 軽乗用車の転倒



写真 3.5-13 乗用車の横転



写真 3.5-14 トラックの横転

3.5.3 樹木

写真 3.5-15～3.5-18 に樹木の折損事例を示す。写真 3.5-16 に示す事例では、折損した樹木の衝突によって石造の鳥居が一部倒壊している。また、写真 3.5-19～3.5-20 をみると、樹木が竜巻の進行に沿った方向だけでなく、進行に対してほぼ直交する方向にも折損している状況が把握できる。



写真 3.5-15 樹木の折損



写真 3.5-16 樹木の折損と鳥居の被害



写真 3.5-17 樹木の倒木



写真 3.5-18 倒木による社の倒壊



写真 3.5-19 樹木の折損状況（上空からの写真）



写真 3.5-20 樹木の折損状況（上空からの写真）