解 説

米国の建築規制における耐風設計に係る規定の概要

Provisions Related to Wind-resistant Design in the U.S. Building Control

喜々津 仁密*

Hitomitsu KIKITSU

1. はじめに

米国の建築規制においては、建築主事等からなる団体がモデル建築基準を作成し、州政府や地方政府がそれを採択して執行する形態をとっており、これは建築基準法によるわが国の建築規制と大きく異なっている。しかしその一方で、耐風設計に係る基準の体系には、ハリケーンが常襲する地域での風荷重設定の考え方、屋根の耐風性や外装材の耐衝撃性に関する技術的基準、構造部材等の試験法に関する基準等が整備されており、その概要を知ることがわが国の耐風設計体系を充実する上でも有用であると思われる。

そこで本稿では、近年制定されたモデル建築基準と州政府が制定した基準のうちフロリダ建築基準を取り上げて、それらの耐風設計に係る規定の概要をまとめる。また、これらの基準の構造計算では対象外とされているトルネードに対する設計基準の概要についても併せて示した。

2. モデル建築基準と州制定建築基準との関係^{1), 2)}

米国における建築規制は、合衆国憲法で連邦政府にその権限が委譲されていないので、基本的には州の権限とされている。そして多くの州が、州法によって地方政府（市又は郡）に対して建築基準の採択の権限を与え、又はその採択を義務付けている。

各々の州や地方政府が採択できるモデル建築基準を作る動きが20世紀初頭から始まり、最近では地域

に応じて表1に示す3つのモデル基準作成機関によって順次発行されてきた。さらにこれらの機関は、共同で1994年に国際基準評議会（International Code Council, ICC）を設立し、2000年から全米共通のモデル建築基準である国際建築基準（International Building Code, 以下「IBC」という）³⁾が制定されている。また、1～2世帯用戸建住宅の設計を対象とした国際住宅基準（International Residential Code）⁴⁾も別途制定されている。

表1 米国におけるモデル建築基準

名称	発行機関	利用地域
BOCA 全国建築基準 BOCA National Building Code (BOCA NBC)	国際建築主事・基準行政官会議 Building Officials and Code Administrators International, Inc. (BOCA)	東部
統一建築基準 Uniform Building Code (UBC)	国際建築主事会議 International Conference of Building Officials (ICBO)	西部 中西部
標準建築基準 Standard Building Code (SBC)	南部国際建築基準会議 Southern Building Code Congress International, Inc. (SBCCI)	南部
国際建築基準 International Building Code (IBC)	国際基準評議会 International Code Council (ICC)	全域
国際住宅基準 International Residential Code (IRC)		

各々の州がこれらのモデル建築基準を採択する場合

* 建築研究所構造研究グループ 主任研究員
Building Research Institute, Department of Structural Engineering, Senior Research Engineer

合は、通常はそれぞれ独自の修正を加えるので、同じモデル建築基準を採択した州同士であっても、適用範囲や権限の程度が異なる場合がある。またモデル建築基準の特徴として、ASCE 7⁵⁾、ASTM 等の設計・標準試験等に係る各種の規準や規格を積極的に引用している点が挙げられる（図 1 参照）。モデル建築基準の規定内容は、州や地方政府によって採択されない限り法的な効力は持たないが、採択されていない地域で建設する場合であっても、設計者によって必要に応じて参照されているようである。なお、米国内の各々の州制定建築基準におけるモデル建築基準の採択状況については、参考文献 6)で定期的に情報が更新されている。

図 1 モデル建築基準、州制定建築基準及び各種規準等との関係

3. IBC における耐風設計に関連した規定の概要

本節では IBC における規定のうち、構造計算や風荷重に関する基準のほか、屋根及びガラス等の外装材に関する技術的基準、検査及び試験の方法についてそれぞれ概要をまとめる。

3.1 構造計算全般（第 16 章 1604 節）

以下に構造計算の方法と用途に関する区分の概要をまとめる。同様の内容が、ASCE7 の構造計算に関する章でも定められている。

3.1.1 構造計算の方法（第 1604.2，1604.3 項）

構造計算の方法としては、荷重耐力係数法（Load and resistance factor design, LRFD）や許容応力度法によることとされている。また使用性確保の観点から、各種の荷重に対する屋根や外壁等の変形限界値が定められている。

3.1.2 用途区分（第 1604.5 節）

表 2 に示すように、損傷・破壊時の人命への影響の度合いや用途の重要性に基づいて建築物の用途に関する区分（Occupancy Category）が規定されており、これに応じた重要度係数で荷重値を調整したり、特別な検査等が行われる。

風荷重を算定する際の重要度係数は IBC には規定されていないが、ASCE7 では用途区分に応じて表 3 の体裁で定められており、設計用速度圧に乘じられる。

表 2 用途区分

用途区分	対象用途
I	損傷した際に人命に与える危険性が少ない建築物 ・ 農業施設 ・ 仮設構造物 ・ 小規模な倉庫 等
II	用途区分 I，III 又は IV に掲げる建築物以外の建築物
III	損傷した際に人命に与える危険性が大きい建築物 ・ 小学校やケア施設（収容人数が 300 名を超える建築物） ・ 大学や研修施設（収容人数が 500 名を超える建築物） ・ 50 人以上の入院患者を収容する医療施設（救急医療体制を有するものを除く） ・ 刑務所・留置所 ・ 上記以外の収容人数が 5,000 名を超える建築物 ・ 用途区分 IV に該当するものを除く発電所等の公共施設 ・ 用途区分 IV に該当するものを除く危険物を収容する施設 等
IV	重要施設 ・ 救急医療施設 ・ 消防署や警察署 ・ 地震やハリケーン時の指定避難施設 ・ 緊急対応時に必要となる指定オペレーション施設 ・ 緊急時にバックアップ機能を有する発電所等の公共施設 ・ 危険物を収容する施設 ・ 航空管制塔 ・ 国家防衛施設 ・ 消火作業に必要な給水施設 等

表 3 用途区分に応じた重要度係数（ASCE7）

用途区分	非ハリケーン常襲地域 又はハリケーン常襲地域のうち基本風速が 85 ～100mph の地域	ハリケーン常襲地域の うち基本風速が 100mph を超える地域
I	0.87	0.77
II	1.00	
III	1.15	
IV	1.15	

注）ハリケーン常襲地域と基本風速については、3.2.1，3.2.2 節参照

3.1.3 構造計算時の留意事項（第 1604.9 項）

構造部材や非構造部材等は、地震や強風によって生ずる転倒や浮き上がり（引き上げ）等の力を考慮して構造計算をしなければならない。そして、これらの力が基礎まで円滑に伝達（Continuous load paths）するように留意しなければならない。

3.2 風荷重（第 16 章第 1609 節）

風荷重については第 16 章第 1609 節に規定されており、全ての建築物に作用する風荷重は ASCE7 の規定にしたがって算定することとされている（第 1609.1.1 項）。ここでは、用語の定義、基本風速、地表面粗度区分等の地域性に関する内容のみ規定されており、風荷重の算定式や風力係数の数値と図版は掲げられていない。また、開口部の耐衝撃性や屋根の耐風安全性の確認方法について規定している点も本節の特徴の 1 つである。以下に規定の内容をまとめる。

3.2.1 地域に関する用語（第 1609.2 項）

以下の 2 つの地域に関する用語について定義がされている。これらの定義は、ASCE7 での規定と同義である。

1) ハリケーン常襲地域（Hurricane-prone Regions）

以下のいずれかに該当する地域（表 4 参照）

- 基本風速が 90mph を超える大西洋岸又はメキシコ湾岸の地域
- ハワイ、プエルトリコ、グアム、バージン諸島又はサモア

2) 飛来物影響地域（Wind-borne Debris Regions）

ハリケーン常襲地域のうち以下のいずれかに該当する地域又はハワイ

- 海岸線から 1mile 以内であって基本風速が 110mph 以上の地域
- 基本風速が 120mph 以上の地域

表 4 ハリケーン常襲地域

対象地域	基本風速 [mph (m/s)]		
ハワイ	105 (47)		
プエルトリコ	145 (65)		
グアム	170 (76)		
バージン諸島	145 (65)		
サモア	125 (56)		
メキシコ湾岸 又は大西洋岸 の地域	90 (40)～	110 (49)～	120 (54)～
		※	

備考) □：飛来物影響地域，※：海岸線から 1 マイル以内の地域

3.2.2 基本風速（第 1609.3 項）

基本風速は地表区分 C における地上 10m の 3 秒ガスト風速（50 年再現期待値に相当）であり、ASCE7 と同様に全米各地の風速がマップの体裁で与えられている。また、地形の影響評価については、各々の行政の判断に拠ることとされている。

3.2.3 地表面粗度区分及び地表区分（第 1609.4 項）

当該建築物を中心とした 45 度の扇形を考慮する風向に対して左右それぞれ考え、各々の扇形の地域内での地表面粗度区分（Surface Roughness Categories）と地表区分（Exposure Categories）を表 5、6 に基づいて把握し、当該区分に基づいて算定した風荷重の大きい方を当該設計風向に対する風荷重にすることとなる。

表 5 地表面粗度区分

地表面粗度区分	対象地域
B	都市とその近郊区域、樹木や戸建住宅等の地物が密集した地域
C	高さが 30ft（約 9m）以下の地物が点在する開けた地域（ハリケーン常襲地域内の平坦地、草原及び湖沼を含む。）
D	ハリケーン常襲地域外の平坦で地物が無い地域

表 6 地表区分

地表区分	対象地域
B	地表面粗度区分 B に該当する地表面の状態で、2,600ft（792m）又は当該建築物高さの 20 倍のいずれか大きいほうの半径をもつ扇形内を占める地域
C	地表区分 B、D に該当しない地域
D	地表面粗度区分 D に該当する地表面の状態で、5,000ft（1,524m）又は当該建築物高さの 20 倍のいずれか大きいほうの半径をもつ扇形内を占める地域

3.2.4 開口部の保護（第 1609.1.2 項）

飛来物影響地域の建築物に取付けるガラスは、いくつかの例外を除き、以下の取付け高さに応じた ASTM E1996 や ASTM E1886 の基準を満たした耐衝撃性をもつ仕様ものを採用するか耐衝撃性のある雨戸等を併用しなければならないとされている。

- 地上 30ft（9.1m）以下の高さ ASTM E1996 に定める L サイズ衝撃試験の基準
- 地上 30ft（9.1m）を超える高さ ASTM E1996 に定める S サイズ衝撃試験の基準

3.2.5 屋根の耐風安全性（第 1609.5 項）

屋根を構成する屋根版と屋根ふき材は、ASCE7 にしたがって算出された風荷重に対して安全に設計するよう規定されている。

なお、アスファルトシングルを屋根ふき材に用いる場合については、接着面の引き上げに対する抵抗力を ASTM D 6381 に定める試験によって確かめることとされている。また、コンクリート瓦又は粘土瓦については、次式にしたがって瓦に作用する引上げ方向のモーメントを算出して耐風安全性を検討しなければならない（第 1609.5.2 項）。

$$M_a = q_h C_L b L L_a (1.0 - G C_p) \quad (1)$$

ここで、 M_a ：瓦先端を上方へ引上げようとするモーメント、 q_h ：ASCE7 に定める設計用速度圧、 C_L ：揚力係数（0.2 又は別途試験で得た数値）、 b ：瓦の見付幅、 $G C_p$ ：ASCE7 によって求めた瓦に作用する風圧係数、 L ：瓦の長さ、 L_a ：モーメント長さである。

3.3 屋根（第 15 章）

屋根の設計に係る全般的な用語の定義、使用材料、要求性能（耐候性、安全性、耐火性）及び各種の仕様が第 15 章に規定されている。

3.3.1 性能に関する要求事項（第 1504 節）

屋根版と屋根ふき材は、第 16 章と本節の基準に基づき風荷重に対して安全に設計しなければならないとされており、屋根ふき材等については、その構法の種類に応じて以下の事項が定められている。

1) アスファルトシングル（第 1504.1.1 項）

基本風速 110mph 以上の地域で用いる場合、ASTM D3161 に定める Class F の試験を実施しなければならない（第 1609.5.2 項に定める方法によることも可能）。

2) 粘土瓦又はコンクリート瓦（第 1504.2 項）

第 16 章の規定にしたがって設計された屋根版に取付けなければならない。

3) 金属屋根（第 1504.3.2 項）

ASTM E1592 等の規定にしたがって固定部等の試験を実施しなければならない。

4) 小石等を敷き詰めた屋根（勾配 2/12 未満）（第 1504.4、1504.8 項）

米国内では写真 1 に示すような小石等を敷き詰め

た屋根が多くみられる。そして、以下の条件に該当する建築物では、このような小石や砂利を屋根に敷き詰めてはならないとされている。この規定は、ハリケーン等の強風時に小石等が飛来物となり得ることを想定したものと考えられる。

- ・ ハリケーン常襲地域
- ・ ハリケーン常襲地域外の地域で、当該建築物の屋根平均高さが表 7 に示す高さを超える場合

写真 1 小石を敷き詰めた屋根の例

表 7 小石等を敷き詰めることのできる屋根平均高さの最大値（単位：ft）

基本風速 [mph (m/s)]	地表区分		
	B	C	D
90 (40)	110	35	15
100 (45)	55	15	敷き詰め不可
110 (49)	30	敷き詰め不可	
120 (54)	15		

5) 物理的特性（第 1504.6 項）

勾配が 2/12 未満の屋根の屋根ふき材について、供用期間中の気象条件下において耐候性を有すること、ASTM G152 等の方法によって確かめなければならない。また、厚さが薄いふき材は風圧力の繰り返しの作用によって張力や破断耐力の著しい低下が生じてはならないとされている。

6) 耐衝撃性（第 1504.7 項）

勾配が 2/12 未満の屋根の屋根ふき材については、ASTM D3746 等の試験結果に基づいて耐衝撃性の確認を行わなければならない。

3.3.2 屋根ふき材の仕様規定（第 1507 節）

第 1507 節では、各種の屋根ふき材について品質や留め付け方法等の安全性に係る仕様が定められている。以下では、アスファルトシングルと粘土瓦等に関する主な仕様を示す。

1) アスファルトシングル（第 1507.2 項）

アスファルトシングルの品質は ASTM D225 又は 3462 に適合するものとされている。また製品の梱包材には、ASTM D3461 の基準又は適切な試験に合格した旨の表示をしなければならない。

留め付けはシングル 1 枚当たり 2 箇所以上とし、屋根勾配が 20/12 を超える場合は材料供給業者の定める方法によらなければならない。また、下地材の留め付けについては、基本風速が 110mph を超える地域ではさび止め措置を施した留め付け用部品を用いることとされている。

2) 粘土瓦又はコンクリート瓦（第 1507.3 項）

粘土瓦は ASTM C1167、コンクリート瓦は ASTM C1492 に定める品質に適合するものとされている。

瓦の留め付け用部品は、屋根版に 0.75inch (19mm) 貫通するか又は屋根版の裏側まで貫通する長さを確保しなければならない。また、瓦の留め付けについては、基本風速、屋根平均高さ及び屋根勾配に応じた方法が表 8 の通り定められている。基本風速が 110mph 以上又は屋根平均高さが 60ft を超える場合は、風荷重を算定した上で適切な留め付け方法を選定することとなる。

表 8 瓦の留め付け方法

基本 風速 [mph]	屋根平 均高さ [ft]	屋根勾配	
		3/12 未満	3/12 以上
85 (38)	0～60	1 枚当たり 1 箇所（上 下の重なりがない平 瓦は、2 箇所）留め付 けること。	1 枚当たり 2 箇所留め 付けること。
100 (45)	0～40		
100 (45)	40～60	全ての瓦の頂部は釘で留め付けること。軒先 の全ての瓦の先端は認証済みのクリップで固 定すること。全ての棟瓦の先端はしっかりと 固めること。	
110 (49)	0～60	第 1609.5.2 項に掲げる風荷重に対して安全な 留め付け方法を採用すること（式(1)参照）。	
120 (54)	0～60		
130 (58)	0～60		
全て	60～		

3.3.3 屋根ふき材の改修（第 1510 節）

第 1510 節では、屋根の改修工法について規定されており、屋根の構造部材は改修時に想定される新旧の屋根ふき材の固定荷重や機器等の積載荷重を支持しなければならないとされている（第 1510.2 項）。また、以下の条件に該当する場合は、既存の屋根ふき材を残したまま新規のふき材を取り付けてはならない（第 1510.3 項）。ただし、新規のふき材の固定荷重が屋根の構造部材に直接伝達される構工法の場合は、既存の屋根ふき材は撤去しなくてもよいとされている。

- ・ 既存のふき材が水分を吸収する材料であるか、既存の屋根部材やふき材が新規のふき材の固定荷重を支持することが困難な程度にまで劣化している場合
- ・ 既存のふき材が木板、スレート瓦、粘土瓦又はセメント瓦の場合
- ・ 既存のふき材が 2 種類以上使われている場合

3.4 ガラス（第 24 章）

3.4.1 窓枠の変形制限（第 2403.3 項）

ガラスが窓枠に剛にはめ込まれている場合、ガラスを支持する窓枠は、設計荷重に対してそれぞれガラスの辺の長さの 1/175 に相当する長さ又は 0.75inch (19mm) の小さいほうの数値以下の変形に抑えなければならない。

3.4.2 ガラスの耐風安全性（第 2404.1 項）

帳壁その他の外装材にはめ込まれたガラスは第 1609 節に定める風荷重に対して安全であるよう設計することとされており、具体的には以下の式によって耐風安全性が検討される。

$$F_{gw} \leq F_{ga} \quad (2)$$

ここで、 F_{gw} ：第 1609 節に定める風荷重、 F_{ga} ：ASTM E1300 の規定にしたがって決まる当該ガラスの短時間荷重（Short duration load）である。

3.5 検査及び試験（第 17 章）

3.5.1 検査（第 1705、1706、1709 節）

1) 耐風性に係る特別検査（第 1705.4 項）

地表区分 B 内の基本風速が 120mph 以上の地域又は

地表区分 C、D 内の基本風速が 110mph 以上の地域に建設する建築物では、建築構造を専門とする登録検査員が以下に掲げる主要耐風構造システム（Main wind force-resisting system）や耐風建築部品（Wind-resisting component）の耐風性について特別検査を実施しなければならない。ただし、IBC が要求する耐風性や耐衝撃性を満足している旨が表示されたプレハブ部材等の既製品を用いる場合は、この限りでない。

- ・ 屋根ふき材と屋根の構成部材との接合部
- ・ 壁と屋根又は床の構成部材との接合部
- ・ 屋根又は床の構成部材
- ・ 筋交い、曲げやせん断力を負担する部材を含む鉛直構面
- ・ 基礎と緊結された構造部材
- ・ 第 1609.1.2 項に規定する耐衝撃性への適合（3.2.4 節参照）を要求されている外装材等

2) 請負者の責任（第 1706 節）

建築施工の請負者は、耐風性に関連する構造部材や外装材の施工に先立ち、あらかじめ建築許可機関と施主に以下の内容を明記した書面を提出しなければならない。

- ・ 特別検査の内容に関する承諾
- ・ 検査の際に必要な応じて施工図面への適合のため改善指示がされることの承諾
- ・ 請負者が行う管理内容、報告する方法と頻度、報告書の提出方法
- ・ 品質管理等に携わる責任者

3) 構造に関する外観検査（第 1709 節）

基本風速が 110mph 以上の地域で以下の条件に該当する建築物については、登録検査員が構造に関する外観検査（Structural observation）を実施しなければならない。

- ・ 用途区分（表 2 参照）がⅢ又はⅣに該当する場合
- ・ 高さが 75ft（22.9m）を超える場合
- ・ 設計者が外観検査の実施を指定した場合
- ・ 建築許可機関が特別に外観検査の実施を必要とした場合

3.5.2 試験（第 1714、1715 節）

構造計算によって構造安全性を評価できない場合や引用規格に適合する品質の材料を使用しない場合については、本節に定める各種試験の基準にしたがっ

て当該部材等が使用できることをあらかじめ確かめなければならないとされている（第 1714.1 項）。以下に、主な試験に関する規定をまとめる。

1) 構造部材及び接合部（引用規格に試験方法が定められていない場合）（第 1714.3 項）

構造部材と接合部の耐力や変形能は、以下の手順にしたがって決定しなければならない。

- ① 試験体に設計用荷重の最低 2 倍に相当する荷重の載荷を 24 時間行い、除荷後 24 時間以内に最大変形量に対して少なくとも 75%まで変形が回復すれば、試験が要求する基準を満たしたとみなす。
- ② 再び試験体に、試験体が破壊するか、第 1604 節に規定する変形限界に対応する荷重の 2.5 倍又は設計用荷重の 2.5 倍に荷重が達するまで載荷を続ける。

上記①は修復性確認のための基準であると考えられる。そして②の安全性に関する試験結果に基づき、当該構造部材等に対する許容設計荷重としては、以下の最小値を採用することとされている。なお、試験体数については特に規定されていない。

- ・ 変形限界に対応する荷重の数値
- ・ 破壊荷重を 2.5 で除した数値
- ・ 載荷した荷重の最大値を 2.5 で除した数値

2) 窓ガラス及びドア（第 1714.5 項）

窓ガラスやドアは ASTM E330 に定める方法にしたがって試験を行い、第 2403 節に定める変形制限等の基準を満足しなければならない。なお、各々の試験体には設計用風圧力の 1.5 倍に相当する圧力を 10 秒間加圧しなければならない。

3) 構造部材等の試験体（第 1714.6 項）

試験体は通常採用される材料、施工方法及びディテール等の実況を反映したものとしなければならない。また、試験は認証を受けた機関にて実施されなければならない。

4) コンクリート瓦及び粘土瓦（第 1715.2 項）

コンクリート瓦と粘土瓦は、第 15 章に規定する試験方法等にしたがって、先端の浮き上がりに対する抵抗力を検討しなければならない。また、当該瓦が第 16 章に定める条件を満たさない場合は、風洞試験によって別途その風力特性を確認しなければならない。

4. フロリダ建築基準における耐風設計に関連した規定の概要

以下では、モデル建築基準に基づいて州が独自に制定する建築基準の例として、フロリダ建築基準（Florida Building Code、以下「FBC」という）⁷⁾を取りあげてその概要を示す。

4.1 FBC の制定の経緯^{2), 8)}

フロリダ州では1992年のハリケーンアンドリューによって甚大な建築物の被害を被った。この被害を契機として州政府がそれまでの州内の建築規制の現状を調査した結果、既往の建築基準における技術的基準が不備な点や地域によって規制の程度にばらつきがある点等が明らかになった。そしてこのような課題を踏まえて、州内の建築規制を統一的に実施することに重点を置いたFBCが2002年に施行されている。

もともとフロリダ州の南部では、Miami-Dade, Broward 郡内の建築物を対象に、南フロリダ建築基準（South Florida Building Code）が制定されており、これはハリケーンが常襲する地域の建築物にとって高い耐風性能を要求する基準であると一般に考えられていた。しかし、それでもハリケーンアンドリューによる甚大な被害によって改正の必要性があることが明らかになり、その後改正された。そして、この改正内容もFBCへの統一の際に反映されており、南フロリダ建築基準が対象としていた2つの郡はFBCではHigh Velocity Hurricane Zone（ハリケーン強風地帯）として新たに位置づけられている。

FBCの章立てではIBCのそれを踏まえたものであるが、各章内の項目がIBCの内容から適宜追加又は修正されている。以下にFBCの耐風設計に係る基準の概要をまとめる。

4.2 風荷重（第16章第1609節、1612節）

風荷重については第1609節に定められており、IBCと同様に、設計用風荷重を具体的に設定する際はASCE 7に拠ることとされている。

4.2.1 地域に関する用語（第1609.2項ほか）

フロリダ州の全域が、基本風速90mph以上であるためIBCに規定するハリケーン常襲地域に該当する。その上でFBCでは、地域に関する用語として以下の用語が規定されている。

1) ハリケーン強風地帯（High Velocity Hurricane Zone）

Miami-Dade 郡又は Broward 郡内の地域。これらは従前の南フロリダ建築基準による規制が行われた地域であり、工学的な観点（基本風速の大小等）よりむしろ、従前からの建築規制との連続性を考慮した行政的な観点から定められた地域であると言える⁸⁾。

2) 飛来物影響地域（Wind-Borne Debris Region）

基本風速が120mphを超える地域又は海岸線から1マイル以内であって、基本風速が110mph以上の地域。この基本風速や海岸線からの距離と対応した定義はIBCと同義である。

4.2.2 開口部の保護（第1609.1.2項）

飛来物影響地域の建築物の開口部保護に関しては、IBCと同様にASTMその他の試験法に基づく基準が定められているほか、耐衝撃性のある雨戸等（Impact resistant coverings）は設計用風圧力の1.5倍に相当する荷重によって試験すること等が別途定められている。マイアミ市で撮影した開口部の格子等の例を写真2に示す。

(a) 開口部の格子

(b) 雨戸兼用の鋼製の日よけ

写真2 フロリダ州マイアミ市内の住宅

4.2.3 屋根等の耐風安全性（第 1609.5, 1609.6 項）

屋根を構成する屋根版と屋根ふき材の耐風安全性に関する規定の内容は IBC のそれと同様である。そして、ガレージ扉及び巻上げ式扉に関する規定が追加されており、そこでは基本風速、影響面積、屋根勾配に応じて考慮すべき風荷重の数値が定められている。

4.2.4 ハリケーン強風地帯における風荷重等（第 1612 節, 1620 節, 1626 節）

第 1612 節以降では、Miami-Dade 郡等のハリケーン強風地帯での建築物を対象とした設計用荷重に関する規定が別途定められている。ここに定められた内容は、同地域を対象とした従前の南フロリダ建築基準の内容が反映されたものと考えられる。

風荷重に関しては、Miami-Dade 郡では一律 146mph、Broward 郡では一律 140mph の基本風速がそれぞれ規定されている。また、地表面粗度区分を一律区分 C であるとして、風荷重を設定することとされている。そして第 1626 節では、屋外に面する帳壁や屋根ふき材等の飛来物に対する耐衝撃性を評価するための基準が詳細に規定されている点も、本節の特徴の 1 つである。ここでは衝撃試験の方法が定められているほか、耐衝撃性を満足するとみなされる 5 つの構法の仕様（最小厚さ 20cm のコンクリート組積造による壁等）が示されている。

4.3 屋根（第 15 章）

第 15 章では IBC と同様に、屋根に用いる使用材料、要求性能、屋根ふき材の種類に応じた仕様等が規定されている。耐風安全性に関しては、試験規格に別途定める場合を除き、全ての屋根構法共通の安全率として、試験結果に対して 2 を考慮することとされている（第 1504.9 項）。

また、本章では上述の設計用荷重に係る規定と同様に、ハリケーン強風地帯での建築物を対象とした屋根に係る規定が第 1512 節以降で別途追加されており、耐風、耐雹、耐浸水その他の各種性能は試験による確認を前提としている点に特徴がある。さらに本章の規定と対応して、ハリケーン強風地帯での屋根を対象とした試験に関する方法書（Test Protocol）⁹⁾が別冊で整備されている。各々の試験の実施に当たっては、同方法書を構成する屋根の適用に係る基準（Roof

Application Standard, RAS）と屋根の種類に応じた試験・評価方法に係る基準（Test Application Standard, TAS）にしたがうこととなる。

以下では、ハリケーン強風地帯での屋根の試験方法と屋根施工者の責任に係る規定の概要をまとめる。

4.3.1 適用の範囲（第 1512.2 項）

全ての屋根構法は、本章の規定のほか、上述の試験方法書の規定も満足することが必要である。そして屋根を構成する製品は、現行の製品認証（Product approval）を受けていることが求められている。なお、新たに開発された製品等については、本章に定める仕様以外の場合であっても、性能試験の結果に基づけば製品認証を受けることができるとされている。また屋根の施工は、ハリケーン強風地帯にて施工できる旨が認められた有資格者によって行うことが求められている。

4.3.2 試験条件等（第 1523.1～1523.5 項）

試験・評価の対象の全製品は製品認証を受けた旨が表示されたものとし、試験はあらかじめ認証を受けた試験機関にて実施することとされている。そして、現場での載荷試験等の結果に対する安全率 1.45 のほか、耐風安全性に関する試験結果に対する安全率 2（次項も参照）が定められている。

4.3.3 屋根構法の種類に応じた試験（第 1523.6 項）

第 1523.6 項では、屋根構法の種類に応じてその性能を確認するための試験方法が規定されている。そしてその具体的な内容については、試験方法書の RAS 又は TAS の対応する章番号が引用されている。以下では、瓦屋根、金属屋根等を例にして、それらの試験内容についてまとめる。

1) 長尺のふき材を使用した屋根（第 1523.6.2 項、TAS114 章ほか）

瓦やシングル以外の長尺のふき材を使用した屋根（Continuous roofing system）については、TAS110 章又は 114 章の方法に基づいて接合部等の耐風性能を確かめることとなり、圧力箱を用いた耐風圧性試験や静的載荷試験の方法が示されている。

金具の留め付け強度や最大留め付け間隔は耐風圧性試験によって評価する。具体的には図 2 に示すように、振幅が 15psf (718Pa) から最大 135psf (6437Pa)

まで9ステップ（15psf 間隔）の加圧を試験体が破壊するまで実施する。そして、留め付け強度は、最大加圧の数値を安全率 2 で除したうえで留め付け本数を考慮して得ることとされている。また、静的載荷試験では 30psf から 150psf まで 9 ステップ（30psf 間隔）の載荷を行い、最低 90psf（4309Pa）の風圧力に相当する載荷重に抵抗できることが求められている。

図 2 耐風圧性試験の加圧段階

また、TAS114 章では、耐風性能に関連して耐雹性（はち）を確かめる試験についても定められている。これは、試験体に対して鋼球を落下させるというものであり、表 9 に示す 2 通りの降雹の強さ（SH, MH クラス）を想定した試験方法が規定されている。SH クラスの MH クラスに対する衝突エネルギーは約 1.75 倍である。1 つの試験体に対して 10 箇所鋼球を落下させ、衝突箇所において亀裂や割れが生じないことを確かめることとされている。

表 9 降雹の強さに応じた試験方法

	SH クラス Severe Hail Damage Resistant	MH クラス Moderate Hail Damage Resistant
鋼球の直径 [mm]	45	51
鋼球の重さ [g]	358	737
落下高さ [m]	5.4	1.5

2) 瓦屋根等（第 1523.6.5.2.3 項，TAS102 章）

釘で留め付けられた瓦等を採用した屋根については、TAS102 章で定める引き上げ試験によることとされている。試験体数は 14 体とし、引き上げに対する耐力の代表値は以下の手順にしたがって評価する。

- ① 14 の試験結果のうち、最大と最小の数値を除いた 12 の結果から最大耐力の平均値と標本標準偏差を求める。
- ② 最大耐力の平均値と標本標準偏差を用いて変動係数を計算し、20%未満であれば③に進む。20%以上であれば無効であるとみなし、再度試験をやり直す。
- ③ 次式により、引き上げに対する耐力の代表値を決定する。ここで、 F' ：耐力の代表値、 $\bar{F}$ ：最大耐力の平均値、 MS ：安全率（2, Margin of Safety）、 W ：自重の平均値である。

$$F' = \frac{\bar{F} - W}{MS} \quad (3)$$

3) 金属屋根（第 1523.6.5.2.4 項，TAS125 章ほか）

金属屋根は、TAS125 章等に定める試験によってその耐風安全性を確かめることとされている。TAS125 章に定める試験は圧力箱を用いて 3 体以上の金属屋根の試験体に加圧させるものであり、ASTM E1592 にしたがって実施する。試験体が破壊するまで加圧を行い、正負の最大圧力値の平均値を安全率 2 で除した数値を許容値として、当該製品に明記することとされている。

4.3.4 使用者に対する説明責任（第 1524 節）

屋根施工の請負者は、建設した建築物の使用者や管理者等に対して本章の規定の趣旨（屋根に要求される性能の最低水準等）を説明する責任を有している。そして、いくつかの留意事項については、施工者と使用者等との間で合意した旨を双方の署名入りの書面に残すことが求められている。

5. トルネードに対する設計規準の概要

ASCE 7 では、第 2.5 節とその解説でトルネードその他の発生確率の低い外乱に対する構造安全性も必要に応じて検討することとされているものの、風荷重規定では第 6.5.4.3 項でトルネードによる突風は対象範囲外とされている。したがって、ASCE 7 の風荷重規定を引用しているモデル建築基準や州制定建築基準での構造計算においても、規模の大きいトルネードに対する構造安全性は基本的に担保されないと考え

られる。

しかし、重要度の高い建築物の設計に対しては、必要に応じてトルネードに対する構造安全性についても検討する必要があると思われる。そのような観点からの米国内のトルネードに対する設計規準としては、原子力発電施設を対象として米国原子力協会 (American Nuclear Society, ANS) が制定した Standard for Estimating Tornado and Extreme Wind Characteristics at Nuclear Power Sites (ANSI/ANS-2.3-1983, 以下「ANS 規準」という)¹⁰⁾ が挙げられる。また、トルネードの突風による人的被害を防ぐため第一義的には安全なシェルターの確保が必要である。そして、そのようなシェルターの耐風設計に資する規準の1つとして、国際基準評議会 (ICC) が国立暴風シェルター協会 (National Storm Shelter Association, NSSA) と共同で制定を進めていた ICC/NSSA Standard for the Design and Construction of Storm Shelters (ICC-500-2008, 以下「ICC/NSSA 規準」という)¹¹⁾ が 2008 年に発行されたところである。以下では、これらの規準の概要についてそれぞれ簡単にまとめる。

5.1 ANS 規準の概要

ANS 規準では、想定するトルネードの風速、渦のコア半径等を考慮した工学モデル、飛来物による衝撃といった突風ハザードに関する内容が定められている。ただし、本規準では荷重設定に必要な風力係数、トルネードによる突風に対する耐風性や耐衝撃性を有する構造部材等の仕様及び構造計算の方法については定められていない。

また、本規準は 1980 年代初頭に制定後は改定されておらず、今日では米国規格協会によるメンテナンスが行われていないため、今日の構造設計現場での実効性は不明である。しかし ASCE 7 の風荷重に関する解説では、トルネードによる風速を考慮する際に参考にできる規準として引用されている。以下に ANS 規準の主な概要をまとめる。

5.1.1 風速 (第 3.2 節)

トルネードの風速は、地上 10m の高さでの各速度成分を合成した数値として与えられており、全米各地の風速が年超過確率 10^{-7} 、 10^{-6} 、 10^{-5} にそれぞれ対応付けて、マップの体裁で定められている。

一般にトルネードの通り道 (Tornado Alley) と呼ば

れる内陸部の州 (テキサス、オクラホマ、カンザス、アーカンソー、ミズーリー、アイオワ州等) で大きな数値が定められており、ハリケーンを対象とした ASCE7 の基本風速マップで大西洋岸やメキシコ湾岸の数値が大きい点と対照的である。例えば、年超過確率 10^{-5} に対応する風速は、中西部や南部の多くの州で 200mph であるのに対して、その他の地域では 100、150mph となっている (図 3 参照)。

図 3 風速マップ (年超過確率 10^{-5} の場合)

5.1.2 トルネードの工学モデル (第 3.3 節)

トルネードの工学モデルとしてはランキン渦を仮定している。そして、考慮するパラメータとして、前述の風速 V_m の大きさに応じて移動速度 T 、コア半径 R_0 、最大気圧降下 ΔP が表 10 に示す数値でそれぞれ定められている。

表 10 最大風速に応じた各種パラメータ

最大風速 V_m [mph(m/s)]	移動速度 T [mph(m/s)]	コア半径 R_0 [m]	最大気圧降下 ΔP [mb]
320 (143)	70 (31)	165	135
250 (112)	55 (24)	133	93
200 (89)	45 (20)	108	58
180 (80)	40 (18)	98	48
140 (63)	32 (14)	77	28
100 (45)	25 (11)	56	14

5.1.3 飛来物 (第 3.4 節)

近隣からの飛来物の衝撃危険度を評価するものとして、以下の 2 つの方法が提示されている。

- 1) 飛来物の標準的な軌跡に基づく方法
 - 2) 確率論に基づく方法
- 2)の方法については具体的な評価手順が示されてい

ないが、1)の方法による場合は、表 11 に示す数値と図 4 を用いて飛来物として自動車と梁部材を想定した評価ができるとされている。ここで、自動車は 1.8t、梁部材は 338kg の重量をそれぞれ想定している。

表 11 飛来物の標準的な軌跡に関する数値

		最大風速 V [mph(m/s)]		
		320 (143)	250 (112)	180 (80)
自動車	最大水平速度 [mph]	115	95	65
	最大飛散高さ [ft]	45	30	15
	最大飛散距離 [ft]	1,100	800	450
梁部材	最大水平速度 [mph]	100	70	45
	最大飛散高さ [ft]	30	20	10
	最大飛散距離 [ft]	700	400	180

図 4 飛来物の標準的な軌跡

5.2 ICC/NSSA 規準の概要^{8), 11)}

ICC/NSSA 規準はハリケーン、トルネード双方を対象としたシェルターのための設計規準であり、2003 年に国際基準評議会が国立暴風シェルター協会と共同で制定作業に着手し、2006 年に原案に対するパブリックコメントが実施された。そして、米国規格協会から正式に国家規格として承認を受けるとともに 2008 年に発行された。また、ICC/NSSA 規準の内容は国際基準評議会が発行する IBC の次期改正時に引用される見込みであり、引用されれば州や地方政府による建築規制の現場においても規定内容の実効性が高まるものと思われる。

制定に当たっては、シェルター設計のために FEMA、フロリダ州政府、米国赤十字等が定めた既往のガイドラインを調査しており、それらの技術的な知見も考慮されたものとなっている。同規準における風荷重等の概要を以下にまとめる。

1) 風荷重（第 304 節）

設計風速は IBC での基本風速と同じ 3 秒ガスト風速として定義されている。トルネードに対する全米各

地の設計風速は 130, 160, 200, 250mph の数値がマップの体裁で定められており、その風速分布の傾向は ANS 規準のマップと同様である。また、地表面粗度区分は原則として区分 C とすることとされている。その他、正圧を受ける壁に取り付け最も大きなドアや窓は「開口」とであるとみなして荷重設定をすること、閉鎖型シェルターの場合はトルネードの移動にともなう気圧変化を考慮した内圧係数の設定をすることが定められている。

2) 飛来物による危険度（第 305 節）

トルネードによる突風下を想定した衝撃試験では 6.8kg の 2×4 材を用いることとし、設計風速の大きさに応じた 2×4 材の飛散速度が定められている。

3) 衝撃試験と耐風圧性試験の方法（第 8 章）

衝撃試験の方法は ASTM E1886 に基づくこととされ、構法や部位に応じた衝撃箇所が定められている。また、耐風圧性試験は ASTM E330 又は E1886 に基づき、静的加圧の場合は設計用風圧力の 1.5 倍まで加圧し、飛来物衝撃後の状態に対しては設計用風圧力まで繰り返し加圧することとされている。

6. まとめ

本稿では、米国内の耐風設計に関連した建築規制の概要を把握することを目的に、国際建築基準（IBC）とフロリダ建築基準（FBC）の概要を整理した。また、これらの基準の構造計算では対象外とされているトルネードに対する設計規準についてもその概要と制定の動向をまとめた。

IBC では、屋根の耐風安全性の基準として構法の種類に応じた仕様や性能の確認方法等が定められており、それらはわが国の建築基準法令での規定より詳細な内容となっている。また、FBC は制定に当たり IBC を基本としているものの、それ以外に耐風性能その他の各種性能を評価する手段として試験方法を別途詳細に規定している点が大きな特徴である。屋根に関する規定については、上述の規定と同様の趣旨で、わが国でも例えば「瓦屋根標準設計・施工ガイドライン」¹²⁾で基準風速に応じた仕様（瓦の種類と留め付け方法）及び引き上げ試験の方法、「鋼板製屋根構法標準 SSR2007」¹³⁾で折板屋根の接合部を対象とした載荷試験及び耐風圧性試験の方法等がそれぞれ定められている。今後、このような建築基準法令の仕様規定や構

造計算を補完する設計規準の充実に当たって、米国での耐風設計に係る規定の趣旨やその背景を知ることには有用であると思われる。その際の手がかりとして、本稿が役に立てば幸いである。

謝辞

本稿は、筆者が建築研究所 長期派遣研究制度で米国滞在中（2007 年 10 月～2008 年 9 月）に実施した耐風設計に関する基規準調査の内容をまとめたものです。調査に当たっては、アイオワ州立大学の Partha P. Sarkar 教授にご協力を頂きました。また、Institute for Business & Home Safety の Timothy A. Reinhold 博士のもとを訪問し、フロリダ建築基準と ICC/NSSA 規準の特徴や制定の経緯に関して有益なご意見を頂きました。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) 春原浩樹：アメリカの建築規制，財団法人日本建築センター，1996
- 2) D.S.Mileti: Disasters by Design, Joseph Henry Press, 1999
- 3) International Code Council: International Building Code, 2006
- 4) International Code Council: International Residential Code, 2006
- 5) American Society of Civil Engineers: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures – ASCE/SEI7-05, 2006
- 6) http://www.disastersafety.org/building_codes/map.asp
- 7) Florida Building Commission: Florida Building Code, 2007
- 8) T. Reinhold, personal communication, 2008
- 9) Florida Building Commission: Florida Building Code – Test Protocols for High-Velocity Hurricane Zones, 2007
- 10) American Nuclear Society: Standard for Estimating Tornado and Extreme Wind Characteristics at Nuclear Power Sites – ANSI/ANS-2.3-1983, 1983
- 11) International Code Council & National Storm Shelter Association: ICC/NSSA Standard for the Design and Construction of Storm Shelters – ICC 500-2008, 2008
- 12) (社) 全日本瓦工事業連盟ほか：瓦屋根標準設計・

施工ガイドライン，2001

- 13) 鋼板製屋根構法標準改定委員会：鋼板製屋根構法標準 SSR2007，2008

本稿で引用した ASTM 規格の名称は以下のとおりである。

- C1167-96: Standard Specification for Clay Roof Tiles
C1492-03: Standard Specification for Concrete Roof Tile
D225-03: Standard Specification for Asphalt Shingles (Organic Felt) Surfaced With Mineral Granules
D3161-03b: Standard Test Method for Wind-Resistance of Asphalt Shingles (Fan-Induced Method)
D3462-03a: Standard Specification for Asphalt Shingles Made from Glass Felt and Surfaced with Mineral Granules
D3746-85(Reapproved 2002): Standard Test Method for Impact Resistance of Bituminous Roofing Systems
D6381-03b: Standard Test Method for Measurement of Asphalt Shingle Mechanical Uplift Resistance
E330-02: Standard Test Method for Structural Performance of Exterior Windows, Doors, Skylights and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference
E1233-00: Standard Test Method for Structural Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors by Cyclic Air Pressure Differential
E1300-04: Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings
E1592-01: Standard Test Method for Structural Performance of Sheet Metal Roof and Siding Systems by Uniform Static Air Pressure Difference
E1886-04: Standard Test Method for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors, and Impact Protective Systems Impacted by Missile(s) and Exposed to Cyclic Pressure Differentials
E1996-04: Standard Specification for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors and Impact Protective Systems Impacted by Windborne Debris in Hurricanes
G152-04: Practice for Operating Open Flame Carbon Arc Light Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials