

科学研究費補助金研究成果報告書

平成23年5月31日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360255

研究課題名（和文） 強風下における飛来物による外装材の破壊性状に関する研究

研究課題名（英文） Study on the failure of cladding by flying debris
under strong wind

研究代表者

河井 宏允（KAWAI HIROMASA）

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：60027282

研究成果の概要（和文）：強風下における飛来物を模擬できる試験装置を作成し、板ガラス、ベニヤ板、雨戸等の外装材を用いた耐衝撃試験を行い、ISO規格に準じた耐衝撃性能を評価した。また、既存の耐衝撃性能評価方法を日本の強風災害に適用する際の問題点を明らかにし、日本における強風災害の主な原因である屋根瓦による耐衝撃性能を検討した。最後に、日本国内用の規準やガイドラインの作成に資するための標準加撃体の試案を示した。

研究成果の概要（英文）：We manufactured an air-cannon, that is a missile-propulsion device, for the impact resistant test of cladding against windborne debris. A series of test was carried out to investigate the performance of impact resistant and the characteristics of failure. The performance of glasses, plywood and shutter was evaluated by the specification of ISO16932. Also we investigated into the existing specifications besides the ISO 16932 and discussed the applicability of these specifications to the strong wind damage in Japan. Especially, we focused on the performance of impact resistant of cladding against the roof tile which is the main cause of the damage by the strong wind in Japan. The device which can propel a roof tile was developed. The comparative test was done by the roof tile as missile and the compatibility with the specification of ISO16932 by the steal balls and the lumber as missile was examined. Finally a series of standard missiles for the impact resistant test of cladding in Japan was proposed for the use of a domestic standard or a guideline.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：強風、飛来物、外装材、破壊試験、破壊特性

1. 研究開始当初の背景

1990年以降、日本への台風の上陸件数が増加するとともに強風災害も増え続けてきた。特に、2004年には観測史上最大の10個の台風が上陸し、全国的に多くの強風災害が生じた。また、2006年には、9月に宮崎県延岡市で列車の転覆事故を含む竜巻が生じた他、12月には北海道佐呂間地区を竜巻が襲い、死者9名、負傷者26名という被害が発生した。このように近年の強風災害では、建物自体の耐風性能の向上によって全壊率は減少する傾向にあるものの、屋根や外壁材等の破壊や剥離と、それに伴う飛来物による2次被害には減少する傾向が見られない。これまで本研究グループは数多くの強風被害調査（例えば、近年では台風9119号、9807号、0314号、0418号、0613号および台風0613号に伴う竜巻等）を行い、飛来物による外壁材の被害状況に関する資料を多く蓄積してきた。それによると、飛来物による外壁材の破壊が強風被害全体に占める割合は極めて大きい上、壁や開口部のガラス等の破壊によって室内圧が上昇し、屋根が破壊する等建物の重大な被害に繋がる原因ともなっていることがわかってきた。また、人的被害に関してみると、その大多数はガラス片による怪我で、強風による飛来物によって割れた窓ガラスが原因となっている。一方、近年日本では、生活様式の変化やデザイン上の理由で雨戸を付けない建物が増えた結果、飛来物に対する開口部の窓ガラスの防備は低くなってきており、それが強風時のガラスの破壊によるガラス片を増大させ、人的被害を助長していると考えられる。さらに、体育館や公民館等の公共施設や病院、消防署等の窓ガラスの被害は、避難場所の確保や怪我人の治療、避難、救助、復旧活動等に支障をきたすので、それらの建物の飛来物に対する防御を強化することが急務である。

2. 研究の目的

日本において外装材の耐風性能は、これまで強風による耐風圧性能に関してのみ評価されてきた。建築基準法・同施行令や、建築物荷重指針・同解説（2004）でも、耐えるべき風圧力の算定方法のみが示されているだけで、飛来物による破壊に対する耐風性能の評価方法がない。一方、アメリカ合衆国では、2005年のハリケーン・カトリーナ等、近年の巨大台風による強風被害の増加を受けて、飛来物に対する耐衝撃性能という観点からみた外装材の衝撃破壊特性の性能評価方法が、これまでの研究成果をもとに提案されている。それらは、外装材の性能評価基準としてASCE 7-05¹⁾にまとめられるとともに、その性能標準試験方法がASTM E1886-04²⁾に、性能に関する標準仕様がASTM E1996-04³⁾

に示されている。また、建物開口部におけるガラスの衝撃破壊性能評価方法がISO16932⁴⁾に提示されている。それらによると、鋼球および、サイズの異なる木片を高速で試験体に衝突させる衝撃試験を行った後、繰り返し圧力载荷により強風下の耐衝撃性能を評価することとしている。これらの試験で用いられる鋼球および木片による加撃体は、屋上の防水押さえとしてアメリカを中心に使用されさせている小石等が強風により飛ばされることによる飛来物と、ツーバイフォー工法の住宅が強風により破壊された際に生じる飛散木片を主なターゲットにしたものである。一方、日本では瓦やスレート葺きの住宅が多いことから、瓦やスレート片のような堅くて重い、ある程度の大きさをもった破片が飛んでくることが多く、上記の方法ではこれらの評価ができない。そこで本研究では、上記の点を改善し、日本における強風災害の特性が反映された状況下における飛来物を対象とした外装材の耐衝撃性能を評価するための試験方法および評価方法の確立を目指すものである。

3. 研究の方法

(1) 既存の耐衝撃性能評価方法とその問題点

飛来物による被害を防ぐためには飛来物のもつ衝撃力を評価し、それに耐える材料や工法を用いて建築物等を守る必要がある。しかし、飛来物の種類、飛散の仕方、起こりうる被害の種類は多く、その評価方法や防御方法も多岐にわたっている。対して、物体の衝突に関する研究も一部では進められているものの、材料特性の違いによる変化が大きく、未解決な部分が多いのが現状である。とはいうものの、飛来物に対する建築外装材の耐衝撃性能を試験・評価する方法は幾つか提案されており、実際に使われている。そこで、建築物の外装材の衝撃試験法および性能評価基準を中心に、現在使われている主な方法を調べ、以下でその特徴や問題点を考察する。詳細は雑誌論文①に発表済み。

我が国では、飛来物に対して建築物を防御するよう法律には明示されておらず、規準やガイドラインもないのが現状である。一方、台風と同様の強い熱帯性低気圧であるハリケーンやサイクロンの襲撃を受けるアメリカ合衆国やオーストラリアでは耐衝撃性能評価に関する規準やガイドラインの整備が進んでおり、一部では法律に組み込まれている。例えば合衆国では、ハリケーンを対象とした飛来物の衝突による外装材の性能基準がASCE (American Society of Civil Engineers) のASCE 7-05¹⁾により、耐衝撃性能に関する性能標準試験方法と性能標準仕様がASTM (American Society for Testing and Materials) のASTM E1886-04²⁾と

ASTM E1996-04³⁾により定められている。さらに、建物開口部におけるガラスの衝撃破壊性能評価方法を定めた ISO 16932⁴⁾ (以後 ISO 規格と記述) はこれらをもとに策定されており、試験方法や評価基準も ASCE や ASTM に基づいたものとなっている。これらの試験・評価方法において、耐衝撃性能は強風下における飛来物を模擬した加撃体を試験体に衝突させ、引き続き行われる繰り返し圧力载荷試験で評価され、基準以上の亀裂や開口が生じなかった場合に耐衝撃性能があるものとして合格となる。圧力载荷試験では試験体に加撃体の当る面を押す方向および引く方向の圧力を、大きさを変えて繰り返し载荷する。载荷圧力の最大値は風速ゾーンに対応して与えられる。衝撃試験に用いられる加撃体の種類は材料や質量、衝突速度の異なるものが規定され、建物の防御レベルおよび建物が建つ場所の風速ゾーンと外装材が設置される地面からの高さに応じて選択される。

さて、日本において、強風下における飛来物による建築物外装材の耐衝撃性能を評価する場合、現存の方法としては、ISO 規格に準じた性能評価方法を用いるのが適当であると考えられる。理由としては、ISO 規格は ASTM E1886-04 や ASTM E1996-04 を基に作られ、それらの方法論、手法等を反映していること。ISO 規格は多くの国が参加している国際規格であり日本もそれに参加し、規格の使用を推進する一員であること。等が挙げられる。一方、国内的な性能評価基準やガイドラインとして用いるためには、日本の強風災害の実情や耐風設計法の内容とそぐわない点が下記のように幾つかある。

- ・ 建築物の防御レベルは飛来物の脅威に応じて幾つか定義されるが、運用上、建築物の重要度によって決定すべきものであると考えられる。
- ・ 風速ゾーンも建築物が建つ場所の風速の強さに応じて幾つか定義され、それらは規制当局あるいは試験依頼者が指定することとなっているが、ISO 規格で用いられる風速ゾーンの定義は ASTM E1996-04 の基本風速に基づき、その値はガスト風速である。従って、日本での運用に際しては建築基準法との整合性も考え、10 分間平均風速への換算を行う必要がある。
- ・ ISO 規格では ASTM に基づき飛来物を模擬した加撃体として鋼球および木片を用いている。しかし、それらは小石や木片を模擬したものであり、瓦等日本における強風時の飛来物を代表するものではない。従って、瓦等の飛来物に対する耐衝撃性能を明らかにし、評価基準を作る必要がある。
- ・ ISO 規格では試験用基準圧力の値を基準

風速だけで決定している。しかし、建築物外装材の設計用圧力は基準風速だけでは決まらず、地表面粗度区分、建築物の形状、外装材が設置される建築物表面の位置や高さ、建築物の重要度等の多くのパラメータが関係する。その値は設計者が決定すべきであり、建設省告示第 1458 号等によって合理的な設計荷重を決定することが可能である。従って、試験の設定圧力は設計者に委ねるか、もしくは少なくとも基準風速ではなく圧力を基準にして表すべきである。

- ・ 飛来物の衝撃力を評価する場合に、想定される強風は台風か突風(竜巻やダウンバースト等)かによってその継続時間が異なる。また、ISO 規格が基にしている ASTM E1996-04 の圧力载荷順序は一般建材を対象としており、数多い繰り返し载荷は主に金属材料の疲労を考慮したものであると考えられる。一方、材料によっては想定される強風の継続時間内の疲労の影響が小さいものもあるので、想定される強風や試験体の種類によって圧力繰り返し载荷の回数や大きさを調整することも考えられる。特に、ISO 規格が対象とするガラスでは疲労の影響は少ないと考えられるので、簡略化した圧力载荷順序でも良いと考えられる。

従って、これらの点を改善し、かつ、ISO 規格と整合性のとれた規準やガイドラインを作成することが望まれる。

以上の考察をもとに、本研究では ISO 規格に準じた衝撃試験法および性能評価方法を用いて、強風下における飛来物による外装材の破壊性状を明らかにすることとし、日本における強風災害の現状を反映した衝撃試験の方法および性能評価方法を検討するための基礎資料を得ることを目標とした。

(2) 試験装置の作成と性能評価

強風下の飛来物を模擬し、衝撃破壊試験が行える装置を ISO 規格で求められている性能も満たすように作成し、ISO 規格で要求される速度で加撃範囲内に衝突させることができることを確認した。なお、試験装置の詳細は学会発表⁸⁾、雑誌論文²⁾、³⁾に発表済み。

(3) 試験手順

試験は ISO 規格の手順に準じて行った。ISO 規格において、耐衝撃性能試験は衝撃試験と圧力载荷試験の 2 つの試験手順からなる。衝撃試験においては飛来物を模擬した加撃体を指定された速度・位置に衝突させ、加撃後、加撃体の衝突による損傷がない場合は合格。加撃体が貫通するか、一定以上の亀裂や開口 (125mm 以上の亀裂、76mm の固い球

が通る開口)が生じた場合は不合格となる。一方、亀裂や開口が一定以下の大きさの場合には、試験体に加撃体の当る面を押す方向(正)および引く方向の圧力(負)を指定された回数ごとに大きさを変えて繰り返し載荷した後、亀裂や開口が一定以下の大きさの場合に合格となる。なお、試験手順の詳細は雑誌論文④に発表済み。

4. 研究成果

(1) 破壊性状

建物の外壁部分では開口部、特にガラスの耐衝撃性能が最も弱いと考えられるので、本研究では試験体として窓ガラスを中心に、現在用いられている種々の板ガラス(合わせガラス、フィルム貼りガラス、普通フロートガラス、強化ガラス、網入りガラス、)を選んだ。また、開口部を覆う部材として一時的に使用するものとしてベニヤ板を、恒久的に設置して用いるものとして雨戸を選び、ISO規格に従った試験を行って、耐衝撃性能を評価した。

合わせガラス、フィルム貼りガラス、普通フロートガラス、強化ガラス、網入りガラスの試験結果の詳細は学会発表⑦、⑤、②、③、④に発表した。

(2) 瓦を用いた加撃試験

3章で指摘したように、ここで用いたISO規格に準じた試験方法では、日本における強風時の建物被害の原因の多くを占める瓦等の加撃体には対応していない。そこで、瓦を加撃体として用いることができるように試験装置を改良し、それを用いて瓦の衝撃力の評価を行った。本研究では、合わせガラスを標準試験体として、瓦の衝撃力の評価を行い、ISO規格で用いられる加撃体の持つ衝撃力と瓦の衝撃力を比較した。その結果を用いて、ISO規格では規定されていない日本国内用の規準やガイドラインの作成に資するための標準加撃体の検討を行った。瓦を用いた衝撃試験に関しては、学会発表①で発表した。

(3) 耐衝撃性能評価用標準加撃体の提案

本節では日本国内用の規準やガイドラインの作成に資するための標準加撃体の試案を示す。

第3章(1)節で示したように、ISO規格では、1:建築物の防御レベルを設定し、設計に受け入れられること。2:強風ゾーンにおける風速を10分間平均風速で規定すること。3:瓦などの飛来物に対する耐衝撃性能の評価に対応すること。4:載荷圧力に建築物の設計風圧を適用すること。5:簡略化した圧力載荷順序も考えられること。等の改良点があることを示した。このうち、3の瓦などの飛来物に対する耐衝撃性能の評価につ

いて、既存の耐衝撃性能評価方法と整合性のとれた試験方法を、今回明らかにした開口部の窓ガラスの耐衝撃性能の結果をふまえて新たに提案する。

提案する耐衝撃性能評価試験方法は基本的にISO規格(ISO 16932)と同様なものとする。ただし、建築物の防御レベル、強風ゾーン、載荷圧力の設定、圧力載荷順序に関しては前述のように改良が必要であるがここでは付言しない。用いる加撃体に関しては、以下の考察により、ISO規格による加撃体Bと加撃体Cの間に瓦の衝撃力を評価するための加撃体を新設する。すなわち、第4章(3)節の結果から、速度20.5m/sの瓦がもつ衝撃力は、質量2.05kgのツーバイフォー木材と、3kgの質量をもつツーバイフォー木材で速度16.3m/sと、質量4.1kgのツーバイフォー木材(ISO規格による加撃体C)で速度14.4m/sと等価な衝撃力をもつことがわかっている。これは、速度20.5m/sの瓦がもつ衝撃力がISO規格による加撃体B(速度12.2m/s)のもつ衝撃力よりも大きく、加撃体C(速度15.3m/s)のもつ衝撃力よりも小さいことを示しており、3kgの質量をもつツーバイフォー木材を加撃体として用いた場合には速度16.3m/sのもつ衝撃力と等価であることを示している。また、瓦の衝撃力を評価するために用いた合わせガラス5mm+60mil+5mmは、一般に最もよく使われるグレードの1つであるため、瓦に対する耐衝撃防御を保証することができる。さらに、ISO規格の基となったASTM E1996-04では、加撃体Bよりも衝撃力の小さな加撃体(質量0.91kg,速度15.2m/s)を規定しており、同様な衝撃力を評価することにより、より細かな防御性能を規定できるようにする。

以上の考察から、耐衝撃性能評価用標準加撃体を日本での運用に適するように表1のように提案する。ここで、新しく提案する加撃体の種類の作成に際して、ISO規格(ISO 16932)と整合性のとれたものとする、および、数値は小数点以下をつけず、衝撃力の大きなものほど数値が大きくなるように配慮した。

表1 新しく提案する衝撃試験用の加撃体の種類

種類	相当する ISO 規格の加撃体	加撃体の質量と速度
1	加撃体A (2g×10, 39.7m/s) に相当	2g 小鋼球 10 個, 40m/s
2	加撃体Aと加撃体Bの間【新設】	2×4 木片 1kg, 12m/s
3	加撃体B (2.05kg, 12.2m/s) に相当	2×4 木片 2kg, 12m/s
4	加撃体AとBの間 【新設：瓦に対する耐衝撃防御性能を保证する】	2×4 木片 3kg, 16m/s
5	加撃体C (4.10kg, 15.3m/s) に相当	2×4 木片 4kg, 16m/s
6	加撃体D (4.10kg, 24.4m/s) に相当	2×4 木片 4kg, 25m/s
7	加撃体E (6.80kg, 22.4m/s) に相当	2×4 木片 7kg, 22m/s

参考文献

- 1) ASCE 7-05 : Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE (American Society of Civil Engineers) Standard.
- 2) ASTM 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, ASTM (American Society for Testing and Materials) Standard.
- 3) ASTM E1996-04 : Standard Specification for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors, and Impact Protective Systems Impacted by Windborne Debris in Hurricanes, ASTM (American Society for Testing and Materials) Standard.
- 4) ISO 16932 : Glass in building - Destructive-windstorm-resistant security glazing - Test and classification, ISO (International Organization for Standardization)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 丸山 敬 : 飛散物に対する外装材の耐衝撃性能の評価方法について、日本風工学会誌, Vol.35, No.1 (No.122), 2010.1, pp.33-40, 査読有.
- ② 丸山 敬, 河井宏允, 西村宏昭, 加茂正人:外装材耐衝撃性能試験用エアークャノン, 日本風工学会論文集, Vol.34, No.2 (No.119), 2009.4, pp.31-38, 査読有.
- ③ 丸山 敬・河井宏允・西村宏昭・加茂正人 : 試作された耐衝撃性能試験用エアークャノンの性能, 京都大学防災研究所年

報,2009.4, 第 52 号 B, pp.481-489, 査読無.

- ④ 丸山 敬・河井宏允・西村宏昭・加茂正人・前田 豊 : ISO 16932 に準じた合わせガラスの耐衝撃試験, 日本風工学会誌, Vol.34, No.2 (No.119), 2009.4, pp.149-150, 査読無.

[学会発表] (計 10 件)

- ① 加茂正人・丸山 敬・河井宏允・西村宏昭 : 加撃体として瓦を用いた衝撃試験装置の開発, 日本風工学会誌, Vol.36, No.2 (No.117), 2011 年 5 月 24 日, pp.117-118, 大坂.
- ② 加茂正人・丸山 敬・河井宏允・前田 豊・西村宏昭 : ガラスの飛散物耐衝撃試験 その 1 フロートガラス他, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, 2010 年 9 月 10 日, pp. 123-124, 富山.
- ③ 丸山 敬・加茂正人・河井宏允・前田 豊・西村宏昭 : ガラスの飛散物耐衝撃試験 その 2 合わせガラス, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, 2010 年 9 月 10 日, pp. 125-126, 富山.
- ④ 前田 豊・西村宏昭・丸山 敬・加茂正人・河井宏允 : ガラスの飛散物耐衝撃試験 その 3 フィルム貼りガラス, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, 2010 年 9 月 10 日, pp. 127-128, 富山.
- ⑤ 加茂正人・丸山 敬・河井宏允・前田 豊・西村宏昭 : 合わせガラスの耐飛散物衝撃試験 その 1 衝撃試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, 2009 年 8 月 27 日, pp. 127-128, 仙台.
- ⑥ 前田 豊・加茂正人・丸山 敬・河井宏允・西村宏昭 : 合わせガラスの耐飛散物衝撃試験 その 2 圧力試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, 2009 年 8 月 27 日, pp. 129-130, 仙台.
- ⑦ 丸山 敬 : エアークャノンによるガラスの耐衝撃性能試験, 第 55 回風に関するシンポジウム, 2009 年 3 月 19 日, 口頭発表, 東京.

⑧丸山 敬・河井宏允・西村宏昭：外装材の耐衝撃性能試験用エアークャノンの試作,日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1,2008年9月19日,pp. 283-284, 広島.

〔図書〕(計2件)

- ①西村宏昭：日本建築学会編、社団法人 日本建築学会、構造物の耐衝撃設計ガイドラインに関するシンポジウム、2010, pp. 49-58.
②日本建築防災協会編、財団法人 日本建築防災協会、安全・安心ガラス設計施工指針、2011, pp. 255-257.

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河井 宏允 (KAWAI HIROMASA)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号：60027282

(2) 研究分担者

丸山 敬 (MARUYAMA TAKASHI)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号：00190570

西村 宏昭 (NISHIMURA HIROAKI)
日本建築総合試験所・試験研究センター・
建築物理部 部長
研究者番号：60420725
(H21→H22：連携研究者)

(3) 研究協力者

加茂正人 (KAMO MASATO)
京都大学・防災研究所・技官

前田 豊 (MAEDA YUTAKA)
日本建築総合試験所・試験研究センター・
主査