

試作された耐衝撃性能試験用エアークャノンの性能

丸山 敬・河井宏允・西村宏昭*・加茂正人

* (財) 日本建築総合試験所

要 旨

日本における建築物外装材の耐衝撃性能の標準仕様や試験方法の策定に資するため、高速で飛来する飛散物を模擬する加撃体を射出し、外装材の耐衝撃試験を行うためのエアークャノンを作製した。エアークャノンの設計にあたっては、アメリカ合衆国やISO基準に準ずる耐衝撃性能試験を行えるようにした。本報告では、外装材の耐衝撃性能を評価する既存の試験・評価方法を概説するとともに、作製した装置の性能試験結果について述べる。

キーワード: エアークャノン, 飛散物, 耐衝撃性能試験, 外装材, 飛来物

1. はじめに

2006年には死者3名を出した延岡市の竜巻や、死者9名を出した北海道佐呂間町の竜巻など、各地で多数の竜巻が発生した。これを受けて、竜巻に伴う強風による建築物の被害が精力的に調べられた(田村,2007;日本風工学会,1007;田村,2008)。

それらによると、風で吹き飛ばされた瓦や屋根葺き材、破壊された建築物などの破片が他の建築物や構造物、電線などに高速で衝突することによる外装材等の被害が台風時と比較して顕著であった。その原因は、破壊された飛散物が衝突した先で新たな飛散物を生み出すという被害の連鎖が生じたことにあると考えられる。したがって、竜巻などの強風被害の防止・軽減のためには、飛散物からの建築物の防備が重要であり、飛散物からの攻撃を直接受ける外装材の飛散物に対する耐衝撃・破壊特性の解明と性能向上が必要である。

これに対して、我が国の風荷重関連の基規準には飛散物からの防備に対する規定はなく、外装材の飛散物に対する耐衝撃性能を考慮していないのが現状である。一方、アメリカ合衆国では、ハリケーンやトルネードなどの強風によって生じる飛散物による建築物の被害に対して、外装材の耐飛散物衝撃性能の標準仕様や試験方法が定められ、これらはISOによる開口部の板ガラスの耐衝撃性能試験規定でも参考にされている。

本研究では、日本における建築物外装材の耐衝撃

性能の標準仕様や試験方法の策定に資するため、高速で飛来する飛散物を模擬する加撃体を射出し、外装材の耐衝撃試験を行うためのエアークャノンを作製した。エアークャノンの設計にあたっては、アメリカ合衆国やISO基準に準ずる耐衝撃性能試験を行えるようにした。本報告では、外装材の耐衝撃性能を評価する既存の試験・評価方法を概説するとともに、作製した装置の性能試験結果について述べる。

2. 耐衝撃試験に関する既存の方法

2.1 外装材の性能評価基準: ASCE 7-05

アメリカ合衆国においてはASCE (American Society of Civil Engineers) 7-05で、ハリケーンを対象とした飛散物の衝突による外装材の性能基準を定めている。それによると、ハリケーン常襲地域(hurricane-prone regions)のうち基本風速(basic wind speed:地上10mにおける3秒ガスト風速)が110mph以上であって、沿岸から1 mile以内の地域とハワイ、および、基本風速が120mph以上の地域を飛散物地域(wind-borne debris regions)と指定している。さらに、建築物を用途に基づきIからIVの4つの用途カテゴリーに区分し、重要度の高い区分II, III, IVに該当する建築物は、飛散物地域内において下記ASTM (American Society for Testing and Materials)規格に定める性能標準試験方法と耐衝撃性能に関する標準仕様に従った耐衝撃性能をもつ外装材で防御されねばならない、と定めている。

Table 1 Missile's level in ASTM E1996-04

レベル	材質（重量，寸法）	衝撃速度
A	鋼球（2g±5%）	39.62m/s(130ft/s)
B	2×4 角材（910g±100g， 52.5cm±100mm）	15.25m/s (50ft/s)
C	2×4 角材（2050g±100g， 1.2m±100mm）	12.19m/s (40ft/s)
D	2×4 角材（4100g±100g， 2.4m±100mm）	15.25m/s (50ft/s)
E	2×4 角材（4100g±100g， 2.4m±100mm）	24.38m/s (80ft/s)

2.2 性能標準試験方法：ASTM E1886-04

上記ASCE 7-05により飛来物対策をとらねばならないと定められた建築物の外装材は，ASTM E1886-04に定める方法により試験を行い，下記ASTM E1996-04に定める標準仕様を満たさなければならない。ASTM E1886-04では，試験体を設置し，加撃体 (missile)による試験体への加撃を行い，その後，指定された手順に従って試験体に繰返し圧力载荷を加えた後の試験体のひび割れの状態などの観察，および結果の報告事項の詳細を定めている。

2.3 耐衝撃性能に関する標準仕様：ASTM E1996-04

ASTM E1996-04では，ハリケーン常襲地域に建つ建築物に使われる外装材に関して，上記ASTM E1886-04で定める試験を実行するために必要な情報を提供している。ここではTable 1に示すように，加撃体は材質，重量，寸法，耐衝撃速度によりAからEまでの5レベルに区分される。また，建築物はその重要度により，強化防御（enhanced protection），重要施設（essential facilities），基本防御（basic protection），非防御（unprotected）に分類され，強化防御，および基本防御に分類される建築物の外装材耐衝撃試験に用いる加撃体は，Table 2に示すように，外装材の高さと風速ゾーンによってレベルが決められている。

本仕様書は，ハリケーン時に破れない建築用外装材として用いることができるかどうかを判断する基準を与えている。これにより，建築物内部のハリケーンによる被害の影響を最小限にし，室内圧の上昇を小さくすることができる。また，本仕様書はハリケーンに対して作られたものであるが，竜巻など飛散物を生み出す強風にも使用できる。

2.4 開口部の板ガラスの耐衝撃性能試験

ISO (International Organization for Standardization)による開口部の板ガラスの耐衝撃性能試験ISO 16932では，ASTM E1886-04とASTM E1996-04に準じた破

壊的な強風に安全に耐えうる板ガラスの耐衝撃性能試験方法と性能基準を定めている。それによると，鋼球や木片を試験体に衝突させた後，指定された手順に従って試験体に繰返し圧力载荷を加え，試験体のひび割れの状態などを観察し測定すること，および結果，報告の詳細を定めている。加撃体の種類，速度の詳細は後述する。

2.5 JIS：落球試験，ショットバック試験

JIS（日本工業規格）では建築用ボード類，ガラスなどに対する耐衝撃試験法として，取付枠に試験体を水平に固定し，上方から鋼球を落下させる落球試験。取付枠に試験体を鉛直に固定し，鉛散弾を充填した皮革袋を振り子式に自由落下させ加撃させるショットバック試験が規定されている。耐衝撃性能の判定基準は試験体の種類により異なり，例えば，パルプセメント板，化粧サイディング，化粧石膏ボード，ガラス繊維強化ポリエステル波板では，亀裂，剥離，貫通，割れ，くぼみの直径を規定している。また，複合金属サイディングでは，心材の脱落およびジョイントのはずれがないことを規定している。ガラスでは破壊した場合の開口の大きさなどが規定されている。これらの試験は主に運搬時の耐衝撃や人体などの衝突を対象としたもので，竜巻などの突風時の飛来物のように，高速で衝突する物体を想定したものではない。

2.6 アメリカ合衆国における試験の実際

アメリカ合衆国で行われている高速飛来物体に対する耐衝撃試験を紹介する。上述したASTM E1886-04では，ゴム紐を用いた射出装置（バンジー試験装置）の一例が示されている。しかし，現在では耐衝撃試験方法として，圧縮空気を用いたエアークャノン，あるいはトルネードキャノンと呼ばれる装置が多く用いられている。この装置はPhoto 1に示すようにエアータンクに溜められた圧縮空気を細長い筒に導き，筒内部に装填された加撃体を高速で射出する装置であり，ISO 16932でも紹介されている。

Table 2 Category of buildings and missile7s level in ASTM E1996-04

建物区分		基本防御		強化防御	
例		仮設や小規模構造物 を除く構造物		医療施設, 発電所, 警察 避難シェルター, 国防機関など	
外装材の高さ Z		Z ≤ 9.1m	9.1m < Z	Z ≤ 9.1m	9.1m < Z
風速ゾーン	1, 2	レベルC	レベルA	レベルD	レベルD
	3, 4	レベルD		レベルE	

ここで、風速ゾーンは以下のように与えられる。

- 1：基本風速が 110mph 以上 120mph 未満の地域とハワイ。
- 2：基本風速が 120mph 以上 130mph 未満。沿岸から 1 mile を超える地域。
- 3：基本風速が 130mph 以上 140mph 以下の地域。あるいは、基本風速が 120mph 以上 140mph 以下の地域で、沿岸から 1 mile 以内の地域。
- 4：基本風速が 140mph を超える地域。



a. Texas Tec.



b. Fulorida University

Photo 1 Examples of air-cannon

Photo 1aはテキサス工科大学風科学工学研究センター (Texas Tech University, Wind Science and Engineering Research Center) で用いられているエアークャノンである。同センターでは、1970年代から飛散物の衝突による外装材の耐衝撃性能試験に関して、試験方法や評価方法の研究・開発、合衆国における標準仕様や試験方法の策定に携わっており、現在でも研究や各種性能試験を行っている。Photo 1bはフロリダ大学土木海岸工学科(Florida University Civil & Coastal Engineering)で用いられている可搬式のエアークャノンで、実物建築物に加撃体を衝突させて、実際に被害にあった建築物の外装材の耐衝撃破壊試験を行える。

3. 作製したエアークャノンの概要

エアークャノンの作製に際しては、ASTMおよびISO基準に従った外装材の耐衝撃試験を行うことを念頭において設計した。完成したエアークャノンは、Fig. 1, Photo 2に示すように、コンプレッサー、リザーブタンク、開閉弁、調圧弁、エアータンク、取付枠、バタフライ弁、砲身、台座、光電センサー、レ

ーザポインターで構成される。コンプレッサーで加圧され、300 lの容量をもつリザーブタンクに貯められた圧縮空気は、開閉弁を開き調圧弁により所定の圧力で容量100 lのエアータンクに供給される。試験時にはPhoto 3のバタフライ弁を開いて砲身内を加圧し、装填された加撃体を射出する。開閉弁およびバタフライ弁は遠隔で操作され、モニターシステムで加撃体が通過する部分、および試験体付近に人が立ち入らない、などの安全確認を行った上で作動する仕組みになっている。加撃体の速度はPhoto 4のように砲身先端付近に取り付けられた光電センサーを用いて計測される。また、Photo 5の砲身下部に取り付けられたレーザーポインターにより示された光点 (Photo 6) を指標として、試験体への加撃位置を決める。開閉弁、調圧弁、エアータンク、バタフライ弁、および砲身は一体として台座に取り付けられている。試験体への加撃位置は台座を上下左右に移動することで調整する。

加撃体の速度は、エアータンクに蓄えられる空気圧で調整する。また、加撃体として木製の角材を用いるときには、Photo 7のようにサボと呼ばれるポリ

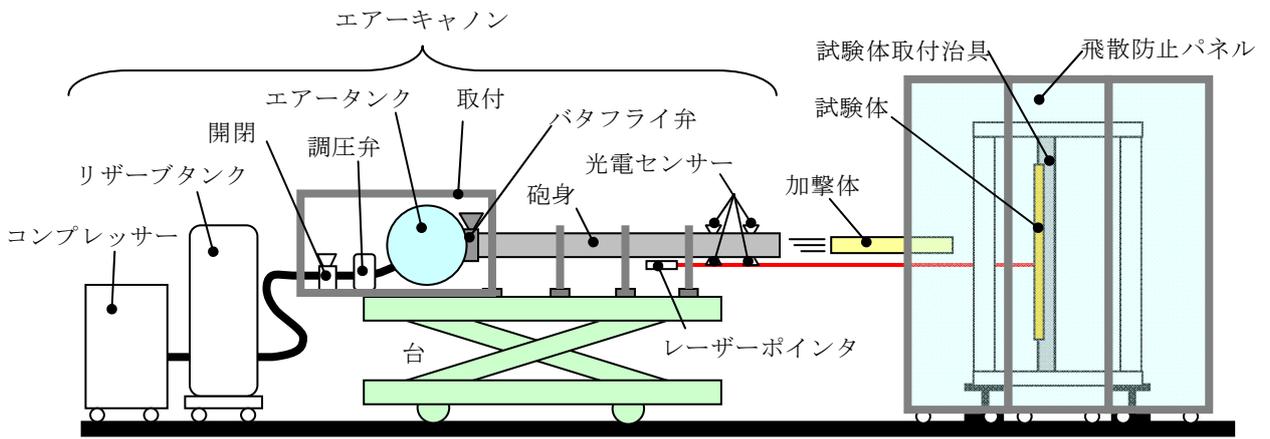


Fig. 1 Overview of air-cannon



a. Back view



b. Front view

Photo 2 Air-cannon



Photo 3 Butterfly bulb

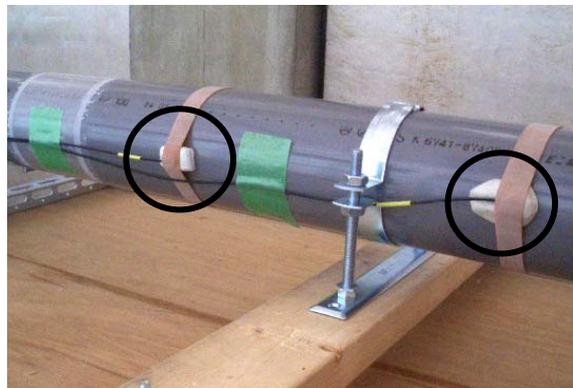


Photo 4 Photo sensor



Photo 5 Laser pointer

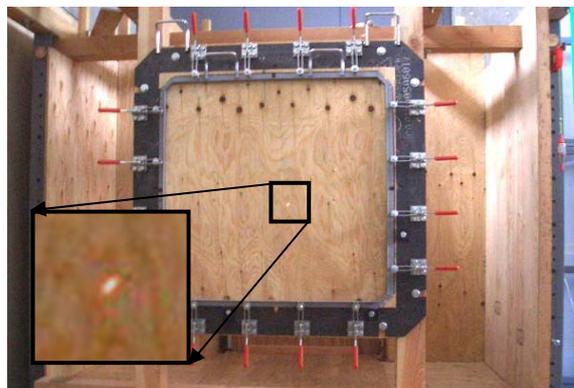


Photo 6 Specimens on the holder

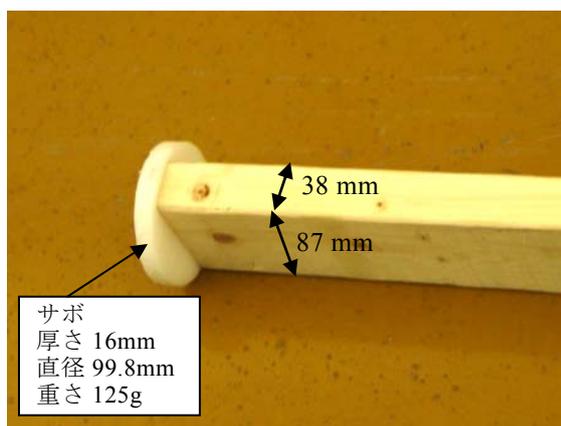


Photo 7 Configuration of missile (lumber)

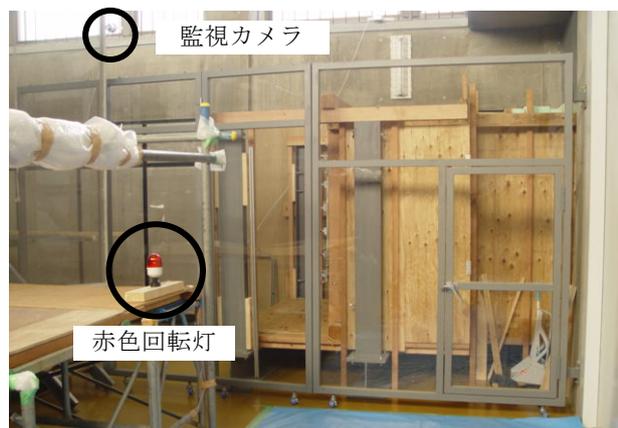


Photo 8 Screen

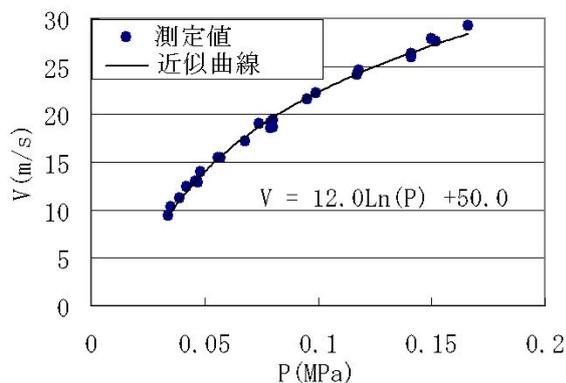


Fig.2 Relation between pressure P in the air tank and speed of missile V

Table 3 Missile type and speed in ISO 16932

タイプ	重量 (材質)	衝撃速度 (許容誤差)
A	2g±0.1g (小鋼球)	39.7m/s (±1%以内)
B	2.05±0.1kg (小木片)	12.2m/s (±2%以内)
C	4.1±0.1kg (中木片)	15.3m/s (±2%以内)
D	4.1±0.1kg (中木片)	24.4m/s (±1%以内)
E	6.8±0.1kg (大木片)	22.4m/s (±2%以内)

エチレン製の円盤（厚さ16mm,直径99.8mm,重さ125g）を角材の後部に取り付け、硬質塩化ビニル管（VP100：呼び径100mm,肉厚6.6mm）製の砲身との隙間をできるだけなくすことで高速で射出することができる。加撃体の最大射出速度は4mの砲身を用いた場合、900kPaの圧力、サボを含む重さ3kgの角材（2×4材、断面；38mm×87mm）で75m/sを確認した。

試験に際しては

- ・試験時に人が危険地域、すなわち、エアーキャノンと試験体の間に立ち入らないようにすること。
- ・安全確保を確認できなければ試験体の発射ができないような操作システムとすること。

によって安全を確保した。試験時に人が危険地域に立ち入らないようにするために、危険地域を監視する監視カメラをPhoto 8のように試験体取付治具の上方および側方に取り付け、試験時に人が危険地域に入っていないことを確認するようにした。また、試験装置操作中には飛散防止用スクリーンを試験体取付治具の外側に展開し、試験体と観察者の間を仕切り、観察者が試験体に近づけなくし、かつ、試験体の破片が観察者の方に飛んで来ないようにした。さらに、赤色回転灯を発光して危険を知らせるようにした。

4. 装置の性能検定

4.1 射出速度と空気圧の関係

前述のサボを取り付けた木製の角材を加撃体として射出した場合に、エアータンク内の空気圧 P (MPa)と光電センサーで計測された加撃体の速度 V (m/s)の関係を求めた。4mの砲身を用いて4.1kg, 1.83mの2×4角材を射出した場合、光電センサーを用いて測定された加撃体の射出速度と圧力の関係はFig. 2のようになり、次式で近似できた。

$$V = 12.0 \ln P + 50.0 \quad (1)$$

4.2 再現性

ISO 16932ではTable 3に示すように、加撃体は重量、材質、衝突速度によりAからEまでの5タイプに区分されている。衝突速度の許容誤差は、23m/s以下の場合には±2%以内、23m/sより大きい場合には±1%以内と決められている。以下ではISO基準に従い、加撃体の射出速度の再現性を確かめた結果を示す。加撃体のタイプに応じて、必要となるエアータンクの空気圧を求め、その空気圧で加撃体を幾つか射出し、速度

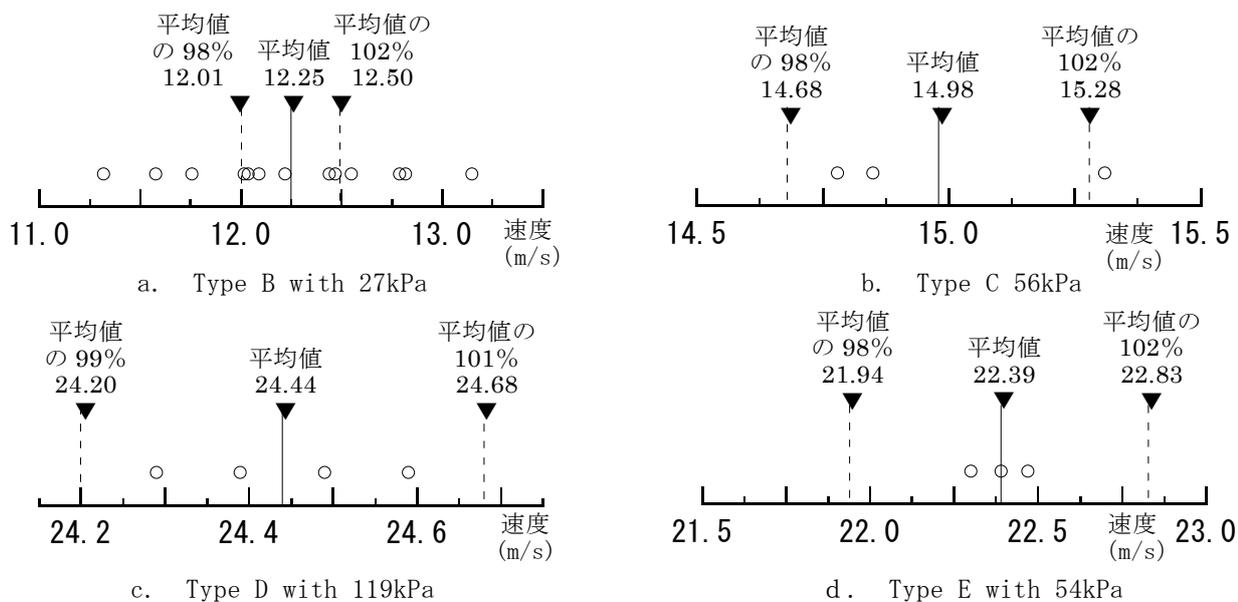


Fig. 3 Speed of missiles ; ○ : measured data, with 4m barrel

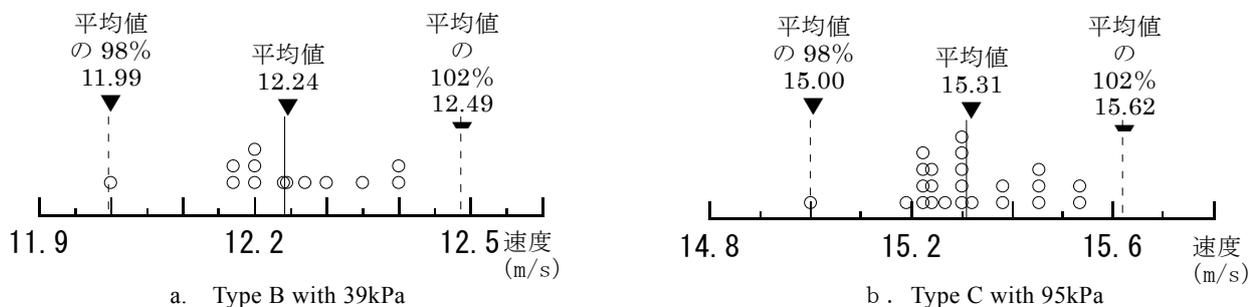


Fig.4 Speed of missiles ; ○ : measured data, with 2m barrel

を光電センサーで読み取ったところ、結果はFig. 3のようになった。Table 3中、タイプBおよびCの結果は速度のばらつきが大きく、ISOの許容誤差の範囲を超える結果となった。一方、タイプDおよびEの場合はISOの基準内に収まっていた。エアータンク内の空気圧の設定は調圧弁により行っているが、圧力が低い場合には、Fig. 2に示したように、圧力のわずかな差によって加撃体の速度が大きく変化するため、規定速度での射出に必要な空気圧に対して、エアータンク内の設定空気圧の調整誤差が相対的に大きくなり、それがスピードのばらつきを増加させる原因になっていると考えられる。そこで砲身を短く2mとし、射出に必要な空気圧を高くして検定を行った結果、タイプB,CについてもFig.4のように、ISOの許容誤差内に収まる結果となった。

4.3 高速度カメラによる速度検定

前節では光電センサーで測定した加撃体の速度を示したが、光電センサーは砲身の先端から200mmと500mmの少し根本側に入った位置に設置してある。そのため、加撃体は光電センサーで計測後も砲身か

ら出るまでに加速されると考えられ、光電センサーによる測定速度は試験体への射出時の速度と異なっている可能性がある。また、射出後の空気抵抗により減速することも考えられる。そこで、射出後の加撃体の速度を高速度ビデオカメラにより計測した。加撃体には重さ4.1kg、長さ1.83mの木製の角材を用い、砲身の先端からの距離が加撃体の長さの約1倍と2倍、1.8mと3.6mの位置で計測を行った。

Photo 9に示すように、高速度ビデオカメラにより得られた画像から、加撃体の移動距離と時間を読み取って速度を求めた結果をTable 4に示す。測定結果は、加撃体が光電センサーで計測後、砲身から出るまでに加速されていることを示している。また、射出後の速度は砲身の先端から1.8mと3.6mの間では、ほとんど変化がなく、そのばらつきは5回の試行に対して0.7%以下であった。また、光電センサーによる速度と高速度ビデオカメラによる速度の比も同様に、ほとんど変化しない。以上のことから、砲身の先端から3.6m以内に試験体を設置して加撃体を衝突させる場合には、砲身に取り付けた光電センサーによって測定された速度を補正することによって、加撃体



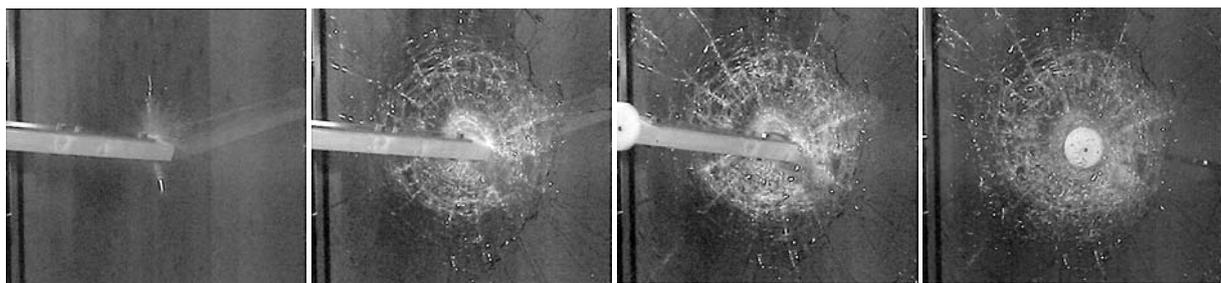
0 コマ目 226 コマ目 420 コマ目 550 コマ目 598 コマ目

Photo 9 Series of pictures of missile captured by high speed video camera (1/10000sec)

Table 4 Difference of missile speed with measuring devices and positions

光電センサーによる速度 (m/s)	高速度ビデオカメラによる速度(m/s)	速度比 ^{注)}	砲身の先から測定位置までの距離(m)
24.3	32.9	1.35	1.8
24.6	33.2	1.35	
24.5	33.2	1.36	
24.4	33	1.35	
24.3	32.9	1.35	
24.5	33.2	1.36	3.6
24.3	33	1.36	
24.5	33.1	1.35	
24.6	33.2	1.35	
24.5	33.2	1.36	

注) 速度比：高速度ビデオカメラによる速度／光電センサーによる速度
(重さ 4.1kg, 長さ 1.83m の木製の角材を 119kPa で射出した場合)



0 コマ目 40 コマ目 340 コマ目 1070 コマ目

Photo 10 Series of pictures of impact test on laminated glass by high speed video camera (1/10000sec)

の衝突速度を求めることができると考えられる。

4.4 ガラスの破壊性状

最後に、合わせガラスを試験体に用いた場合の破壊性状を、高速度ビデオカメラによって記録した。試験体は、厚さ0.76mmのプラスチックシートの両側を厚さ5mmのガラスで挟んだ合わせガラスを用い、

加撃体には4.1kgの木製の角材を使用し15.0m/sで衝突させた。Photo 10に示すように、加撃体がガラスに衝突した後、ガラスにひびが入ると同時に、加撃体により押されてたわむ様子が撮影されている。その後、加撃体はガラスを突き破り、ガラスのたわみが戻り、加撃体がガラスを突き抜けていく様子が記録された。

5. まとめ

飛散物による外装材の耐衝撃試験を行うためのエアークャノンを作製し、その性能を検定した。得られた結果を以下にまとめる。

- ・作製したエアークャノンは、圧縮空気により加撃体を所定の速度で試験体の所定の位置に衝突させるもので、加撃体の射出速度と駆動用の圧縮空気圧の関係を実験的に明らかにした。
- ・加撃体に重さ3kg、2×4角材（木製の角材、断面38×89mm; 2in×4in）を用いた場合、最大速度75m/sで射出が可能である。
- ・木製の角材を加撃体として用いる場合の射出速度の再現性は、開口部の板ガラスの耐衝撃性能試験を定めたISO 16932の基準を満たす。
- ・砲身の先端から3.6m以内に試験体を設置して加撃体を衝突させる場合に、あらかじめ高速度カメラ等により速度の検定を行えば、砲身に取付けた光電センサーによって、加撃体の衝突速度を求めることができる。
- ・2×4角材を加撃体として用いる場合、加撃体の速度は、射出後3.6mの範囲でほとんど変化しない。

謝 辞

本装置の作製は平成19年度科学技術振興調整費・重要政策課題への機動的対応の推進「竜巻等の実態および発生予測と対策」の補助をうけて行われた。また、ガラス試験体は板硝子協会から提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 研究代表者 田村幸雄（2007）：北海道佐呂間町で発生した竜巻による甚大な災害に関する調査研究，H18年度科学研究費補助金（特別研究促進費）研究成果報告書。
- 研究代表者 田村幸雄（2008）：竜巻の実態および発生予測と対策，平成19年度科学技術振興調整費補助金（重要政策課題への機動的対応の推進）研究成果報告書。
- 日本風工学会風災害研究会（2007）：2006年台風13号および同年11月7日に北海道佐呂間氏町で発生した竜巻による強風被害に関する調査報告書。
- ASCE 7-05（2005）：Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE（American Society of Civil Engineers）Standard.
- ASTM E1886-04（2004）：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.
- ASTM E1996-04（2004）：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.
- ISO 16932（2007）：Glass in building — Destructive-windstorm-resistant security glazing — Test and classification, ISO（International Organization for Standardization）
- JIS：落球試験，ショットバック試験：たとえば、建築用ボード類の曲げおよび耐衝撃試験方法に関してはJIS A 1408（1995）に、強化ガラスに関してはJIS R 3206（2003）に、落球試験およびショットバック試験の方法が規定されている。

Performance of an Experimental Air-cannon for Impact Resistant Test of Cladding

Takashi MARUYAMA, Hiromasa KAWAI, Hiroaki NISHIMURA* and Masato KAMO

* General Building Research Corporation of Japan, Japan

Synopsis

We manufactured an air-cannon, that is a missile-propulsion device, for the impact resistant test of cladding against windborne debris. The air-cannon consists of a compressed-air supply, pressure control and release valves, a barrel, a support frame and a speed-measuring system. Sets of photoelectric sensors mounted on the barrel are used for measuring the speed of the missile. The cannon is capable of propelling a missile at a specified speed and orientation towards a specified impact location. We calibrated the speed measuring system by a high-speed video camera. The fastest speed was 75m/s for a 3kg lumber. Tolerances for the measured impact speed were satisfied the specification of ISO16932.

Keywords: Air-cannon, Missile, Impact resistant test, Cladding, Windborne debris