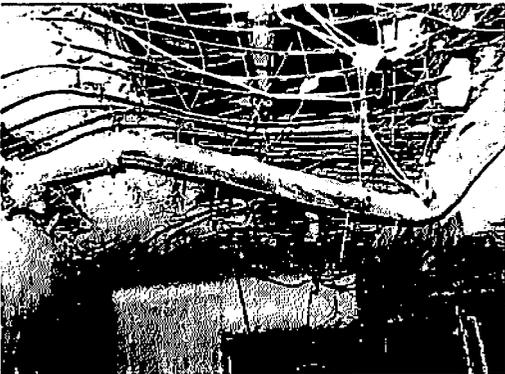


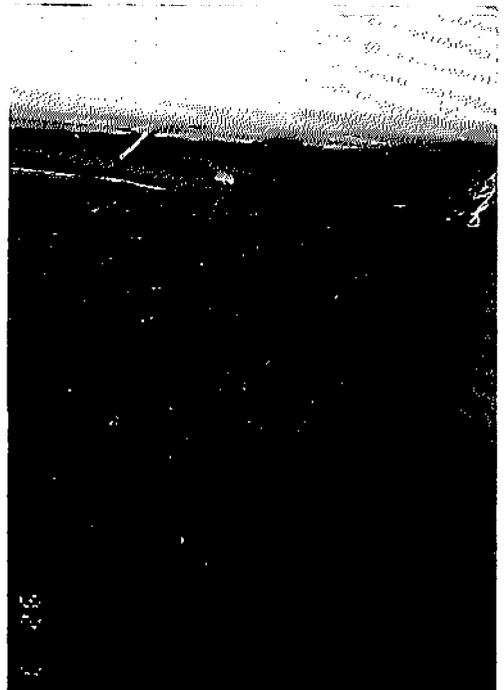
Fig. 1 Approximate speed of various accidents might fall upon structures



Phot. 1(a) Scabbing of concrete wall caused by gas explosion and the openings of wall from which the whole fittings have been blow away together with windowpanes by the explosion



Phot. 1(b) Fracture of upper reinforced concrete slabs made by the explosion



Phot. 1(c) Many cracks in quake-resistant wall deformed by the explosion

である(図1)。構造学として体系化するには、これらの何れにも対応し得ることが望まれるからである。

多くの困難をもつ設計方法であるが、その実用化の前途にはかなり明るさが感じられるようになった。周辺の関連分野、たとえば材料学(特に速度効果<sup>1) 2)</sup> 関係)、動弾塑性学<sup>3)</sup> などの研究が進んで来たからである。

ここでは、衝撃的外力の中で取扱いが比較的簡単なガス爆発の場合をまず、取り上げる。

## 2. ガス爆発に見られる特異な破壊

昨年1月、正月の松飾りもとれぬ8日の朝、11階建の鉄筋(下6階まで鉄骨鉄筋)コンクリート造マンシ

ックの伝播速度まで静的な場合から変化する<sup>3) 4)</sup> など、破壊理論(動的破壊理論)の知見まで必要になってくる。もうひとつ、研究の進展を困難にしたのは、構造物に作用する衝撃的外力の範囲が広く、静的な作用に近いものから宇宙速度に近い作用までを含むこと



Phot. 2 Example of fracture of windowpanes subjected to air blast of an explosive

この最上階の1住戸でガス爆発事故（死者1名、負傷者3名）が発生した。このガスは種別13Aの都市ガス（発熱量11,000Kcal/m<sup>3</sup>、メタン88.2%）であるが、爆発時の濃度は特定されていない。この事故で、二つの特異な破壊が見られた。ひとつは鉄筋コンクリート壁に発生した剥離（写真1(a)）であり、もうひとつは同じ写真に見られる周辺の枠材もろとも吹き飛ばされたアルミサッシュ引違戸（1.75m×1.8m、2ヵ所）である。もし、ガラスが先に破壊すればサッシュ、枠材などは残る筈である。実際、そのような破壊も爆発事故で数多く見られた（写真2）。

はじめに述べたコンクリートの剥離も爆発ではよく見られる現象であり、この場合も単に、破壊が動的に発生したことを示すに過ぎないが、第2のアルミサッシュ開口部建具の飛散は説明が容易ではない。しかし、こころみに以前のガス爆発事故の写真を検討するとこの現象はしばしば発生していることが明らかになった（写真3）。

この現象は次のように説明される。建築物に用いられる窓ガラスは台風程度では十分安全なように設計され、実験も行なわれている<sup>6)</sup>。ガラスの強度は経年変化、ロットの違い、周辺の支持条件、荷重の速さなどによって変化する<sup>7)</sup>。しかし、ロットも荷重も支持条



Phot. 3 Another example of gas explosion in building from which all fittings had been blow away together with windowpanes from the opening of reinforced concrete wall

件も一定とすると、ガラスの耐風圧強度は概ね、その厚さの2乗で表される<sup>6)</sup>。ただし、これはガラスの一面にだけ圧力が加わり、他の面には作用しないように囲って実験した場合である。つまり、ガラスの一面に、全面一様に作用する風圧をうける場合、その強度は、曲げ破壊を生ずる梁のように、その曲げ応力がある一定値に達する時点で破壊が始まることを示している。しかし、ねばりのないガラスはそのまま一気に破断してしまふと考えられる。このことから、静的な取扱いでは形が相似で厚さ一定のガラスはその面積が大きい程、小さな圧力で破壊することが導かれ（付録参照）、大きなガラスは不利になるが、動的応答解析を行なうと、必ずしも不利ではなく、破壊するまでにかなり時間がかかる（4参照）。ただし前述のように、ガラスの片側全面に同じ圧力が一様に作用することを前提としている。従って、事故の場合も上述のアルミサッシュ開口部に一様な圧力が加かったので、周辺の枠材もろとも吹きとばされるまでガラスが破壊しなかったものと考えることができる。しかし、このことは、よく知られているように、ガスは通常、爆ごうを生じず、発生した圧力だけが音速で室内のすみずみまで瞬時に

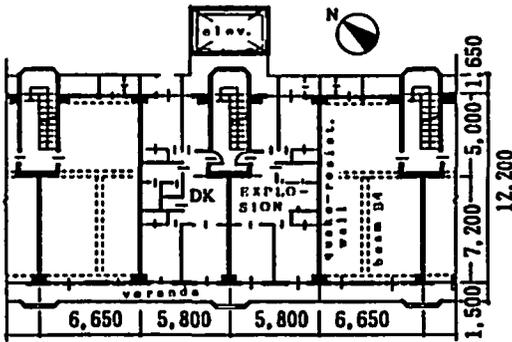


Fig. 2 Plan of rooms suffered from an accident of gas explosion

伝えられることを考えると、しごく当然のことと理解される。この開口部には76cm×80cm厚さ5mmの同形のガラス4枚が1ヶ所に用いられていた。ここに上述の圧力が作用すれば開口部建具はひとたまりもなく、全体が瞬間のうちに吹き飛ばされるのは目に見えている。従って、この現象は通常ガス爆発事故の破壊のひとつの特徴と考えることができる。

### 3. 事故による構造物の変形と破壊

事故は図2に示す平面の、面積約71㎡の最上階(11階)住戸のひとつで発生した。このマンションは1階が店舗、2階以上が共同住居となっており、2階以上は上述の単位住戸2戸が共同の階段室をはさんで配置され、それぞれの住戸は厚さ18cmの鉄筋コンクリート耐力壁で仕切られている。階段室も同じ厚さの鉄筋コンクリート壁で囲まれ、最上階から1階まで続いている。

事故による構造物の被害は、住戸の境となっている厚い耐力壁が幸いし、かなり狭い範囲に限られており、爆発のあった住戸とその両隣及び直下の住戸とその隣の階段室を共有する住戸だけであった(図3)。この

範囲内でも住には全く残留変形は認められなかった。爆発のあった住戸の上部スラブ(屋上スラブ。スラブの大きさによって厚さ12cmと15cmの部分があったが、鉄筋は屋上の温度変化を考慮して上下に配置され、ダブル配筋であった)はすべて大破し、残っている部分も一度吹き上げられた後、落下した状況を示していた(写真1(b))。それに対し、下方のスラブ(床スラブ。厚さは屋上スラブと同じであるが鉄筋はダブル配筋ではなかった)は大きく変形はしていたが破断はしなかった。このように、上部スラブより下部スラブの破壊が小さいのは、もともとスラブは上方からの荷重に抵抗するように設計されているからである。厚さ18cmの耐力壁は本来、地震を想定して設けられたものであるが爆発に対しても大きな抵抗力を示し、変形はしたが破断はしていない(写真1(c)、図4)。ただ、図5に示すように床スラブの曲げにとまらう端部回転が加わって変形が大きくなっている。爆発住戸の四周の構造部材の変形状況を図6に示した(変形は拡大されている)。変形した耐力壁から採取した鉄筋の静的引張り試験を行なった結果を図7に掲げた。予想されるように、クラックの部分から採取した鉄筋(No.1-1~No.1-3)の応力・歪曲線には、かつて、大きな塑性範囲の変形を経験したことが明瞭に読みとれるのに対し、クラックとクラックの中間部の鉄筋(No.2-1, 2-2)は処女状態であることがわかる。このことは以前、筆者の研究室で行なった鉄筋コンクリート円筒体の爆発実験<sup>9)</sup>と同じ傾向である。つまり、衝撃的载荷による鉄筋コンクリート構造物の中の補強鉄筋は一律な変形を生ずるのではなく、局所的に変形が進むので部材全体としての大きな韌性は期待し得ないことを意味しており、構造物の衝撃的外力を対象とする安全設計にとって重要な知見である。

この事故で犠牲者一名が発生したが、それは爆発を生じた住戸からではなく、階段室をはさんで隣り合う

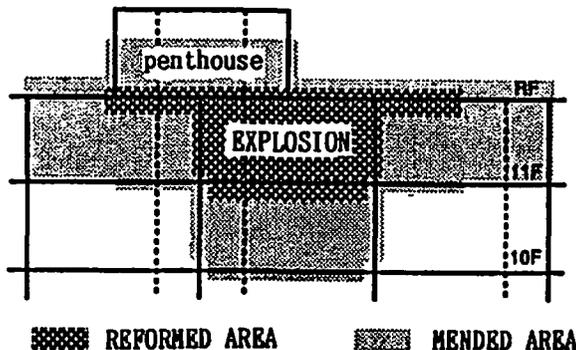


Fig. 3 The part of building suffered from gas explosion

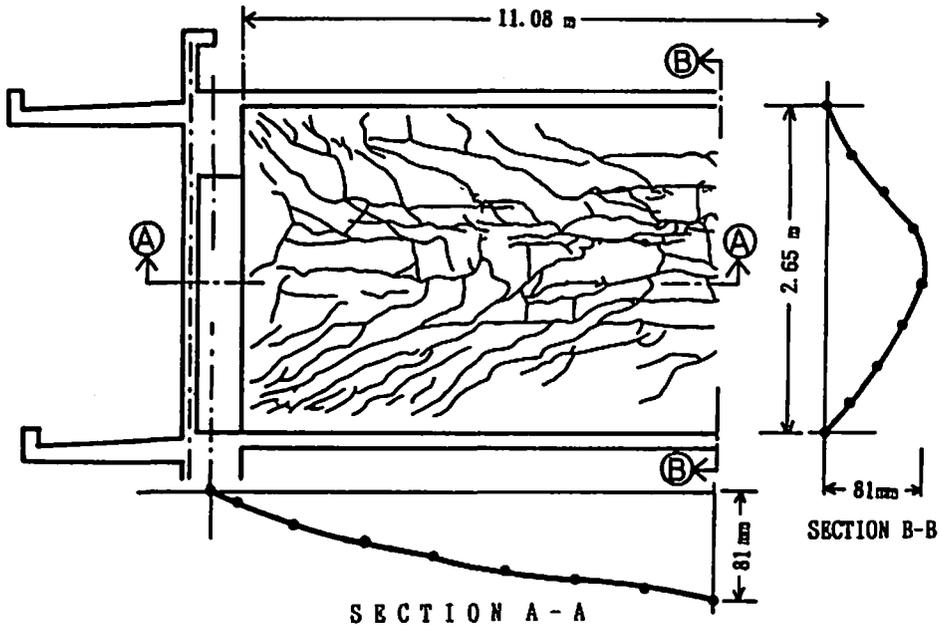


Fig. 4 Deformation of quake-resistant wall subjected to gas explosion

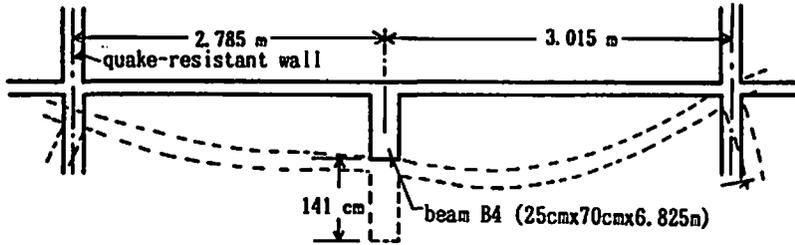


Fig. 5 Deformation of slabs supported by a beam B4

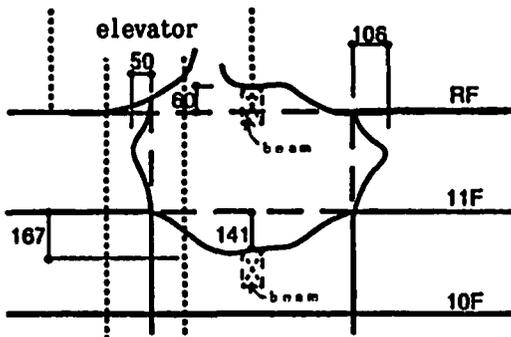


Fig. 6 Deformation of structural members subjected to gas explosion (exaggerated)

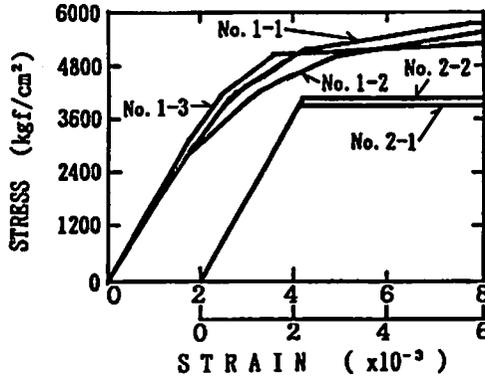
住戸からであった。変形した出入口スチールドアから階段室を通り相対するドアを変形させて侵入した爆風で吹きとばされ、死亡した。室内と階段室の温度

差はおおむね6℃であったと推定されるので、概算すると階段室に吹き出た爆風の風速は約110m/sとなる。防災上のひとつの問題であろう。

この事故でコンクリート、ガラスなどの破片が多数、距離60mまで飛散した。中でも、ベランダの鋼製手摺が約45m、使用中の掛け布団が室内から約40m離れた建物の屋上（標高差約14m）に飛散するなどかなり激しい爆発であったと推測される。これら飛散物の飛散を開始するときの速度は20~25m/sと考えられる。飛散の問題は別に報告する。

#### 4. 構造物の応答解析

前項の構造物の変形、破壊がどのような機構で発生したかを知ることは安全設計を行なううえで極めて重要である。事故が発生した住戸には和洋四室と台所などがある（図2）が、それらはふすままたは木製建具で仕切られていて、気密性に乏しい。従って、住戸内



No.1-1 ~ 1-3 : Specimens in near part of apparent cracks.  
 No.2-1, 2-2 : Specimens in part between cracks.

Fig. 7 Stress-strain curves of reinforcements used in quake-resistant walls subjected to gas explosion

でガス爆発が発生すれば、前述のように、爆燃で上昇した圧力は瞬時に住戸内の全域に伝わり、周囲のすべての構造部材は殆ど同時に同じ大きさの一律の圧力をうけたと考えられる。ところで、以前報告した<sup>8)</sup>ように、衝撃的外力を受ける構造物には二種の異なる応答（変形あるいは破壊）が起きる。ひとつは局部的応答（第一次応答）、もうひとつは全体的応答（第二次応答）であるが、上述のような一律な外力に対しては局部的な第一次応答は発生しない。従って、第二次応答についてだけ解析を行なえばよいが、これには従来の弾塑性解析<sup>9)</sup>を準用することができる。

この場合、図4からも明らかなように、構造部材の変形が通常、1次振動モードに近い形をもっていることを足がかりとして等価1質点系に変換すると計算が容易になる。詳細は既に参考文献<sup>8)</sup>に説明しているため、ここでは概要の説明にとどめ、それによって解析した結果を報告する。等価1質点系への変換による等価質量、等価復元力及び等価外力をそれぞれ、 $M_e$ 、 $R_e$ 、 $F_e$ とする。中央点の変位を $y$ として、この構造部材の運動方程式は次のように得られる。ただし、爆発、衝撃の場合は、対象時間が短いのでエネルギー減衰項は省いている。 $t$ は時間、復元力 $R_e$ は $y$ の関数であるから $R_e(y)$ としている。

$$M_e \ddot{y} + R_e(y) = F_e(t)$$

この変換には変形モードが使われるが、これは当然、構造部材が弾性変形を行なっている場合（Suffix  $e$  がついているもとのままで表わす）と一部分が塑性化したとき（Suffixは $ep$ をつけて表わす）、部材全部が塑性化したとき（Suffixは $p$ ）で異なるから、上式の

$(M_e, R_e, F_e)$ は状態に応じて $(M_{ep}, R_{ep}, F_{ep})$ または $(M_p, R_p, F_p)$ に変わる。これらの変換を容易に行なう一方法が参考文献15)に示されている。計算ではこの方法を使い、鉄筋(SD30)の動的引張強度を速度効果を考慮して3600kgf/cm<sup>2</sup>（静的強度は3000kgf/cm<sup>2</sup>）とし、数値積分を行なった。

ガス爆発が発生する空間がかなり複雑な場合でも、その圧力上昇は巨視的には1次燃焼理論で近似できることが知られている<sup>10)</sup>。この理論によると燃焼中の圧力 $p(t)$  ( $t$ は時間)と初期圧力 $p_0$ の比（圧力比）は次式で表わされる<sup>8)</sup>。

$$\frac{p(t)}{p_0} = \frac{\chi}{\chi - (\chi - 1)^t}, \chi = \frac{C_{p1}}{C_{p2}} \left( 1 + \frac{Q}{C_{p1} T_1} \right), t = \frac{t}{t_m}$$

式の $C_{p1}$ 、 $C_{p2}$ はそれぞれ反応前後の定圧比熱、 $T_1$ は反応前のガスの温度、 $Q$ はガス単位量の発熱量、 $t_m$ は燃焼が終るまでの時間（燃焼時間）である。 $\chi$ は燃焼が終了したときの圧力比（最大圧力比）を表わす。しかし、爆発事故ではその途中で構造物が破壊し、未燃ガスとともに破片飛散が始まるので、最大圧力まで到達することは殆どないと考えられる。なぜならば、構造物は通常、(kgf/cm<sup>2</sup>)単位で表わされる荷重で設計され、その大きさも圧力の単位に直せば0.1kgf/cm<sup>2</sup>以下だからである。この事故の場合も、上述の式の圧力が作用したとして爆発を生じた住戸(12.2m×5.8mの部分)の構造部材の応答計算を行なった。その結果を図8に、部材の寸法、配筋を表-1に示した。燃焼速度は容器の大きさに影響されるという報告<sup>11)</sup>もあるが、ここでは燃焼時間 $t_m$ を1secとし、最大圧力比 $\chi$ を6とした場合の、部材中央の変位の時間的变化を図に示している。ただし、RS1(上方の、屋根ス

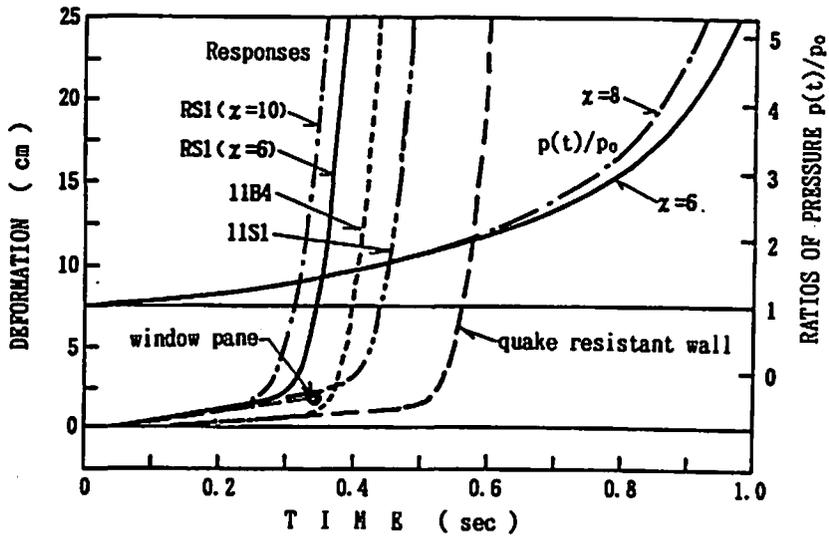


Fig. 8 Responses of structural members and widowpane analysed

Table 1 Sizes and placing of reinforcements of structural members analysed

	depth (cm)	width (cm)	length (cm)	placing of reinforcement	
				end part	middle part
upper slab RS1	15	452	492	up. D13-20cm ctc	D13-40cm ctc
				dn. D10-40cm ctc	D13-40cm ctc, D10-40cm ctc
floor slab 11S1	15	452	492	up. D13-20cm ctc	
				dn. D10-40cm ctc	D13-40cm ctc, D10-40cm ctc
quake-re- sist. wall	18	258	1135	horizontal	D10-20cm ctc
				vertical	D10-20cm ctc
beam B4	70	25	692	up. 2-D-22	2-D-22
				dn. 2-D-22	4-D-22

Note : Placing of reinforcements is shown only of middle half part

ラブ) については $\chi$ を6, 10の二つの場合を示しているが、見られるとおり、応答曲線には大差はない。

図中の応答曲線がすべて実際に起きるわけではない。計算によると $\chi=6$  (最大圧力6 atm)の場合、ベランダ側アルミサッシのガラスは爆発後0.342秒(過圧0.39kgf/cm<sup>2</sup>)で破壊すると推測される(付録参照)から、その以前の時点で枠材、サッシもろとも吹きとばさ

れたと考えられる。丁度その直前、爆源(住戸の中央付近と仮定している)をはさんで反対側の天井スラブRS1が降伏(0.27秒, 図8)し、その後は加速度的に変形が増大して大破すると推測される。その後、圧力は下降に移ると考えられるが、その過程および隅角部またはふきだまりのガスの燃焼で発生した圧力増加<sup>10)</sup>などによって住戸周囲の構造部材、小梁(RB4)

に支えられた屋上スラブ（下方からの圧力に対しては小梁との連成効果があるが厚さ12cmでRS1より薄いので、やや早い時点で）、耐力壁、小梁（11B4）に支えられる床スラブなどの変形が進んだと考えられる。このような変形、破壊の防止が安全設計にとって重要であるが、今後の研究について行かなければならない。

## 5. 結 論

- (1) 鉄筋コンクリート構造物の仕切られた区画内でガス爆発が発生すると、通常の場合、区画内部の圧力は殆ど一様に増大する。従って周囲の構造部材、窓等も同じ圧力をうけ、弱い部分が破壊し、生成ガス等の散逸で圧力が低下する。
- (2) このような圧力による構造部材の動的応答は筆者が以前報告した方法<sup>6)</sup>によって解析することができる。この解析によると対象とした事故では爆発後、約0.27秒で屋根スラブが降伏しその後加速度的に変形が増大して大破したと推測される。
- (3) 開口部建具のガラスは静的計算では大きいほど小さい圧力で破壊するが、前項の動的解析によると破壊までの時間がかかり長くなる。そのため、ガラスが破壊する以前に、枠材、サッシュと一体のまま飛散する現象がガス爆発事故でしばしば見られる。
- (4) 通常の構造物の設計荷重は圧力の単位に直せば通常0.1kgf/cm<sup>2</sup>以下であり、ガス爆発の極く初期の、圧力の小さな段階で破壊し、ガスが散逸して大きな圧力に到達しないまま終ることが多い。
- (5) しかし、破壊孔などから吹き出た爆風は強力であり、ここで研究対象とした事故でも、爆風による死者が発生した。防災上のひとつの問題と考えられる。

## 謝 辞

この研究では、被害、その他の調査に東急建設株式会社関係部所の方々の絶大な御協力をいただいた。また、同社の調査資料も使用させていただいた。ここに心から御礼申し上げる。また解析、資料整理等に熊本工大、高本助教授、谷川助手の御協力をいただいた。厚く御礼申し上げます。

## 付 録

### 【ガラスの強度と破壊の解析】

建築物の開口部に用いられるガラスは、通常、一方の面だけから圧力をうける。ここではそのような場合の強度について述べる。

ガラスの耐風圧強度は経年変化、ロットの違い、周辺的支持条件、圧力増加速度などを一定とすると、おおよそ、その厚さの2乗の式で表わすことができる

<sup>6)</sup>。このことは、ガラスの曲げ応力が一定値（許容曲げ応力 $f_b$ ）になったとき破壊すると仮定できることを意味している。そこでガラスを弾性板として計算する。

ガラスの短辺を $a$ 、長辺を $b$ 、厚さを $h$ とする。参考文献12)から許容曲げ応力 $f_b$ は次式で表わすことができる。ただし、 $D$ は剛性、 $E$ はヤング係数、 $\nu$ はポアソン比、 $p$ は圧力である。

$$f_b = \frac{(M_x)_{\max} h}{D/E} \cdot 2, \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (M_x)_{\max} = \beta pa^2 \quad (1)$$

ここで、 $(M_x)_{\max}$ は板中央短辺方向の最大曲げモーメント、 $\beta$ は $(b/a)$ の大きさと支持条件で決まる係数である。 $(pab)$ は板に作用する圧力の合計（耐荷力 $W$ ）であり、

$$W = \left[ \frac{f_b(b/a)}{6(1-\nu^2)\beta} \right] h^2 \quad (2)$$

となるが、[ ]内はいま考えているガラスについては一定であるから、耐荷力 $W$ はガラスの厚さ $h$ だけで決まることになる。つまり、 $(b/a)$ と厚さが同じであればガラスの大きさに無関係に $W$ は一定となるから、大きなガラス程、小さな圧力で破壊することになる。このことは耐風実験でも認められている<sup>6)</sup>。

しかし、ガス爆発など衝撃的外力に対してはガラスも振動系として応答するから、その応答を計算しなければならない。文献12)から中央の最大たわみ $w_{\max}$ は $(b/a)$ および支持条件で定まる係数 $\alpha$ を使って、

$$w_{\max} = \frac{\alpha p a^4}{D} \quad (3)$$

で与えられ、これを許容し得る弾性最大たわみ $(y_d)$ で表わす)として計算することができる。しかし、この変形は動的に行なわれるので、強度及びヤング係数には速度効果を考慮する必要がある。ガラスの動的な許容曲げ応力 $(f_{db})$ 、ヤング係数 $(E_d)$ は参考文献13)、14)から、 $f_{db} = f_b \times 2$ 、 $E_d = E \times 1.6$ （参考文献7)）とすると

$$y_d = \left[ \frac{2\alpha f_{db}}{E_d \beta h} \right] a^2 = \left[ \frac{4\alpha f_b}{1.6 \times \beta E h} \right] a^2 \quad (4)$$

となる。ペランダに面するアルミサッシュ引違戸に用いられていたガラスは $a=76\text{cm}$ 、 $b=80\text{cm}$ 、 $h=5\text{mm}$ であり、 $\alpha$ 、 $\beta$ は周辺固定と支持の中間として $\alpha=0.0029$ 、 $\beta=0.0521$ とし<sup>1,2)</sup>、 $f_b$ を $W=900\text{kgf}$ として求め<sup>6)</sup>、また $E=7.5 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ とする<sup>7)</sup>と $y_d=2.09\text{cm}$ となる。中央のたわみがこの値に達すると直ちに破壊すると仮定して文献8)の方法で解析すると中央たわみが $y_d$ に達するのは爆発後0.342秒（過圧0.39kgf/cm<sup>2</sup>、ただし $\chi=6$ として）であった。解析結果は図8中に書き入れた。このように、ガラスの破壊までの時間が長くなるのは、その最大変形量 $(y_d)$ が(4)式のように辺長の2

乗に比例して大きくなり、また、ガラスの質量が構造部材の質量に比べて著しく小さいことを反映して、ガラスが構造部材と全く異なる応答をするためと考えられる。

#### 文 献

- 1) J. Takeda, H. Tachikawa: Deformation and Fracture of Concretes Subjected to Dynamic Load, 1st Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, Kyoto, Vol. N, 267~277 (1972)
- 2) J. Takeda, H. Tachikawa, K. Fujimoto: Influences of Straining Rate and Propagating Stress Waves on Deformation and Fracture of Concrete, 2nd. Int. Conf. on M. B. M., Boston, 1468~1472 (1976)
- 3) J. Takeda: Strain Rate Effect on Concrete and Reinforcements and Their Contribution of Structures, MRS-Sympo. on Strain Rate Effects of Cement-Based Composites, Boston, Vol. 64, 15~20 (1985)
- 4) J. Takeda, H. Komoto: Rate Effects on Crack Propagation in Concrete and Brittle Fracture of Concrete Structures, 6th Int. Conf. on MBM, Kyoto, WS 2 e 3, 407~412 (1991)
- 5) N. Cristescu: Dynamic Plasticity, North-holl and Pub. Comp. (1967)
- 6) 三好俊二: ガラスの耐風圧試験, 日本建築学会論文報告集, 第100号, 13~18 (1964)
- 7) 竹田, 立川, 藤本, 工藤: 爆発による窓ガラスの破壊, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 昭50-10, 249~250 (1975)
- 8) 竹田仁一, 河村隆: 爆発による鉄筋コンクリート構造物の変形, 破壊の定量的予測, 工業火災, Vol. 46, No. 4 (1985)
- 9) 竹田仁一, 高本秀幸, 谷川達彦: 鉄筋コンクリート構造物の大歪を対象とするボンド応力とその耐爆耐衝撃性に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, 9-2, 417~422 (1987)
- 10) 林光一, 藤原俊隆: 隔壁をもつ容積一定燃焼器内の火災伝播実験と計算, 日本航空宇宙学会第14回年会講演集, 1C2 (1983)
- 11) W. Bartknecht: Exproptions, Springer-Verlog, 10 (1981)
- 12) S. Timoshenko, S. Woinowaky-Krieger: Theory of Plates and Shells, McGrew-Hill Book Comp., 120, 202 (1959)
- 13) H. N. Ritland: The Effect of Speed of Testing on Glass: 48th Annual Meeting of ASTM, 19~28 (1955)
- 14) E. B. Shand: Experimental Study of the Fracture of Glass, I. The Fracture Process: J. Am. Ceramic Soe, Vol. 37, 52~60 (1954)
- 15) J. M. Biggs: Introduction to Structural Dynamics, 199~, McGraw-Hill Book Comp. (1964)

# Deformation and fracture of reinforced concrete structures subjected to gas explosion

Response analysis of structures subjected to blast shock or impact:Part 1

by Jin-ichi TAKEDA\*

This paper deals with a part of studies on design method of impact resistant and blast shock resistant structures which have been carried out continuously in the author's laboratory. In the design, two kind of responses of structures subject to these impulsive loadings which are brought about as the interaction between loads and structures should be obtained numerically, at first. In case of gas explosion, however, the calculation of the responses of structures is simple extremely, because detonation scarcely occurs in general and accordingly a kind of two responses is able to be neglected.

The accident of gas explosion in a reinforced concrete apartment house which occurred in January last year and made heavily damages on several dwelling units of 11th story (top story), has been studied on the mechanism of deformation progress and fracture of structure considering the results of response analysis which have been done with the method already reported by the author<sup>8)</sup>.

(\*Director of TK Research Institute of Impact and Blast Shock Engineering, 4  
—18— 1, Oh - machi, Kamakura, 248, Professor Emeritus of the National  
Defence Academy, Dr. Eng.)

---