

## ガス爆発に対する鉄筋コンクリート構造物の破壊挙動予測モデル

東京ガス(株) 正会員 ○染谷 雄史  
 東京ガス(株) 龍崎 響  
 防衛大学校 正会員 大野 友則  
 産業技術総合研究所 正会員 緒方 雄二  
 産業技術総合研究所 椎名 拓海

### 1. はじめに

企業の社会的責任の重要性が増している近年、ガス爆発事故が発生した際、都市ガス会社には事故原因究明を行い適切な対策を立案・実施し、同様な事故を防止することが求められている。事故原因究明を行うにあたり、爆発による構造物の破壊挙動を予測する必要がある。事故毎に発生する被害の程度は事故の状況により異なるが、2007年に発生した渋谷温泉施設メタンガス爆発事故のように、鉄筋コンクリート(RC)構造物が破壊するような被害が発生する事もある。ガス爆発によるRC構造物の破壊挙動のモデル化に関する既往研究は存在する<sup>1)~4)</sup>が、実験による検証実績は乏しいのが現状である。そこで、本研究ではガス爆発によるRC構造物の破壊挙動を予測するためのモデル化および実験による検証を目的とする。

### 2. SDOF(Single Degree Of Freedom) モデル

既往の研究<sup>1)~4)</sup>によると、ガス爆発のように比較的長時間継続して载荷される衝撃荷重による構造物の応答予測にはSDOFモデルの適用が可能であると言われている。SDOFモデルは、対象とするRCスラブ等が主として一次振動を行うと仮定し、次のように等価質量 $M_e$ 、等価バネ定数 $k_e$ 、等価荷重 $F_e$ を用いて構造物の衝撃応答(変位 $y$ )を表現するものであり、以下の式で表される。

$$M_e \ddot{y} + k_e y = F_e$$

$$M_e = \iint m \phi^2 dx dy$$

$$F_e = \iint w \phi dx dy$$

$$k_e = k \frac{F_e}{wA}$$

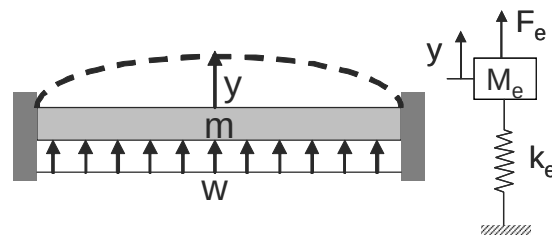


図1 一質点系バネモデル概念図

上式において、 $\phi(x,y)$ は一次基準振動形、 $m$ は単位面積あたり質量、 $w$ は単位面積あたり荷重、 $A$ は面積、 $k$ はバネ定数を表す。参考文献2)に計算手順や必要な係数の値が示されている。

なお、今回のモデル化にあたっては、次の仮定を行っている。①引張側コンクリートは、塑性ヒンジ発生箇所において、初期状態で亀裂が発生している。②有効バネ定数の概念<sup>2)</sup>を導入している。③各種材料物性値は一定値であり、歪速度依存性を考慮していない。

### 3. 実験

実験仕様は参考文献5)に詳細が示されているので、ここでは概要のみを説明する。爆発によるRC板の破壊挙動を調べるため、爆発ピット内に設置された爆発容器(RC板で上部を閉塞した鋼製容器)を用いた。鋼製容器の内寸は660×510×210 mmであり、70.7 Lの内容積を有する。

表1に、今回使用したRC板の仕様を示す。RC板は、厚さ、鉄筋径をパラメータとした3種類を用いた。鉄筋は鉄棒に溶接固定されている。RC板の寸法は全て鋼製容器の断面積と同じ660mm×510mmであり、抑え枠

表1 RC板仕様

| タイプ | 厚さ<br>[mm] | 鉄筋径<br>[mm] | 鉄筋間隔<br>[mm] | コンクリート強度<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|-----|------------|-------------|--------------|----------------------------------|
| D   | 40         | 3           | 50           | 31.4                             |
| E   | 40         | 6           |              |                                  |
| F   | 60         | 3           |              |                                  |

キーワード ガス爆発, 鉄筋コンクリート, SDOF

連絡先 〒230-0045 神奈川県横浜市鶴見区末広町1-7-7 東京ガス(株) 技術研究所 TEL045-500-8700

および 12 セットの締付けボルトにより鋼製容器に固定される。また気密性を向上させるため、RC 板と鋼製容器の間にはシリコン製パッキンを挟んで固定している。

実験には、メタン-空気混合気を用いた。鋼製容器内の濃度は、質量流量計により流量を制御する事により調整し、実験前に濃度計で確認した。混合気の着火は容器中央において、スパークプラグの火花によって行った。

容器内圧力は Kistler 製 6052C31 を用いて測定した。圧力センサーは長辺および短辺にそれぞれ一箇所ずつ設置し、合計二箇所の圧力データを収集した。高速度映像は、(株)Photron 製高速度カメラ FASTCAM SA3 および(株)ナックイメージテクノロジー製 MEMRECAM fxK4 を用いて、斜めおよび横の 2 つの角度から撮影した。RC 板の変位履歴は、高速度映像から、(株)Photoron 製動画画像解析ソフトウェア TEMA を用いて解析した。

#### 4. モデルによる結果の検証と考察

表 2 に、今回行ったガス爆発実験条件および RC 板の破壊形態を示す。最も強度が弱い D タイプ RC 板のみ破壊し、残りは板中央を中心とした亀裂が生じたのみであった。

表 3 に示された材料物性値を用いて、RC 板中央部変位を SDOF モデルにより予測した。図 2 に、実験結果と予測結果の比較を示す。実験結果から、RC 板の変位挙動は緩やかに上昇した後、急激に上昇する 2 つのフェーズに分かれている事が分かる。前者は弾性変形であり、後者は塑性変形であると考えられる。予測結果も、定性的にはこの傾向を示している。また、定量的にも、試験 No5 を除いて、モデルは塑性変形が開始するタイミングを概ね良好に予測している。一方で、塑性変形後の挙動には、測定結果と予測結果に大きな相違が見られるケースが多い。

モデルを向上するためには、今回仮定している諸条件を見直す必要がある。

#### 5. まとめ

ガス爆発事故の原因究明技術向上のため、ガス爆発による RC 板破壊実験を行い SDOF モデルの検証を行った。簡単な SDOF モデルによる予測結果は概ね実験結果と一致したが、改良すべき点がある事が明らかとなった。今後は、これらを考慮しモデルを改良する必要がある。また、異なる仕様の RC 板を対象に実験を行い、更なる検証を行う予定である。

表 2 実験条件・破壊形態

| 試験No. | RC板 | 混合気     | 濃度[%] | 破壊形態 |
|-------|-----|---------|-------|------|
| 1     | D   | CH4/air | 9.8   | 完全破壊 |
| 2     | D   |         | 6.8   | 完全破壊 |
| 3     | E   |         | 9.8   | 亀裂発生 |
| 5     | F   |         | 9.7   | 亀裂発生 |

表 3 材料物性値

| 材料         | 密度[kg/m <sup>3</sup> ] | E[N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ] |
|------------|------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 鉄筋 (SS400) | 8,000                  | $2.12 \times 10^5$    | 240                             |
| コンクリート     | 2,380                  | $3.00 \times 10^4$    | -                               |

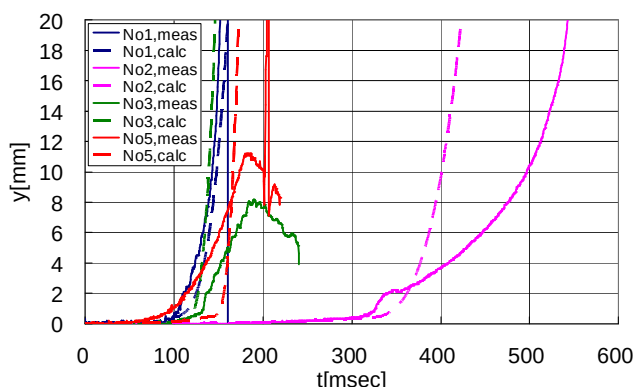


図 2 RC 板中央部変位測定結果と SDOF モデルによる予測結果の比較

#### 参考文献

- 1) 竹田、川村 爆発による鉄筋コンクリート構造物の変形、破壊の定量予測 工業火薬協会誌 1985 年
- 2) Biggs J.M., Introduction to Structural Dynamics, McGraw-Hill Inc., 1964
- 3) Baker W.E. et. al., Explosion hazards and evaluation, Elsevier Scientific Publishing Co., 1983
- 4) Ellis B.R. and Tsui F., Testing and analysis of reinforced concrete panels subject to explosive and static loading, Proc. Inst Civ. Engrs Structs & Bldgs, Vol122, 1997
- 5) 染谷 他 ガス爆発および爆薬爆発による鉄筋コンクリート板破壊実験 火薬学会 2009 年度春季研究発表会 2009 年 5 月
- 6) Hibbeler R.C., Mechanics of Materials, Prentice-Hall Inc., 1994