

RC 板に対するガス爆発衝撃応答実験による SDOF モデルの検証

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		久保田 士郎

1. 目的

ガス爆発事故原因究明を行うにあたり、ガス爆発による構造物の衝撃応答を予測する必要がある。ガス爆発による RC 構造物衝撃応答のモデル化に関する既往研究は存在する^{(1)~(2)} が、実験による検証実績は乏しいのが現状である。筆者らは衝撃応答モデルとして SDOF モデルに着目し、実験との比較によりその精度を検証した⁽³⁾。検証結果、モデルによる予測値は実験値と乖離が見られるケースもあり、モデル改良の余地がある事が分かった。そこで、本研究では SDOF モデルに改良を行い、再度実験結果と比較する。更に、実験結果との乖離が見られる場合は、FEM 解析によりその原因を究明する。

2. SDOF(Single Degree Of Freedom) モデルの改良

筆者らの既往研究⁽³⁾では、RC 板の SDOF モデル化にあたり Biggs⁽¹⁾の手順を参考にしていた。当該参考文献は、質量、バネ定数、荷重の各等価値算出方法を 1957 年に発行された米国陸軍のマニュアル⁽⁴⁾から引用している。その後の調査により、当該マニュアルは陸海空軍の共同マニュアル TM5-1300⁽²⁾として更新されている事が判明した。TM5-1300 ではより厳密な等価値算出方法に基づいたチャートや式が記載されており、本研究では TM5-1300 の手順に準じた SDOF モデル化を行った。また、Biggs には、モーメント容量の算出方法が明記されていなかった為、Hibbeler⁽⁵⁾記載の手順に則ったが、本研究では TM5-1300 記載の手順に則った。更に、コンクリートの圧壊状態や長辺沿いの降伏線で鉄筋が破断した状態の抵抗も考慮した。

筆者らの既往研究で指摘された見直すべき仮定は 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、有効バネ定数の概念を導入している、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、である。本研究では、仮定 については TM5-1300 でも同様の仮定を置いている事から特に変更を行っていない。仮定 については、厳密に 4 つの塑性ヒンジを考慮する事で改良した。仮定 については、鉄筋の高速引張試験結果に基づいた鉄筋の応力ひずみ曲線を用いると共に、コンクリート強度のひずみ速度依存性は TM5-1300 に記載された DIF(Dynamic Increase Factor)を用いる事により考慮した。

3. 実験

実験仕様は参考文献^{(3),(6)}に詳細が示されている。実験には、内寸は 660×510×210 mm であり、70.7 L の内容積を有する爆発容器(RC 板で上部を閉塞した鋼製容器)を用いた。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ーとした 3 種類を用いた。メタン-空気混合気を容器内に充填し、スパークプラグの火花着火により混合気を爆発させた。測定項目は容器内圧力と RC 板の高速映像である。高速映像から、RC 板の変位履歴を算出した。

表 1 RC 板仕様

タイプ	厚さ [mm]	鉄筋径 [mm]	鉄筋間隔 [mm]	コンクリート強度 [N/mm ²]
D	40	3	50	31.4
E	60	3		

4. SDOF モデルによる予測結果と実験結果の比較

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。強度が弱い D タイプ RC 板は破壊したが、E タイプ RC 板は板中央を中心とした亀裂が生じたのみであった。

キーワード ガス爆発, 鉄筋コンクリート, SDOF, TM5-1300

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 TEL 045-500-8700

SDOF モデルによる解析には、表 3 に示された材料物性値を用いた。鉄筋の降伏応力は引張試験から得られた。鉄筋のヤング率は、破壊ひずみまでの歪エネルギーが引張試験結果と一致する様調整した。

図 2 に、実験結果と解析結果の比較を示す。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。解析結果も変位履歴が 2 つのフェーズに分かれているが、モデルは後者のフェーズに移るタイミングを遅く算出し、その後に RC 板が変形する速度を大きめに算出する。TM5-1300 の手順に従うと、回転角度 2° に相当する変位においてコンクリートが圧壊し、その後の抵抗は圧縮膜力によるものとなる。SDOF モデル解析結果によると、後者のフェーズは長辺沿い降伏線上コンクリート圧壊のタイミングで開始している。コンクリート圧壊タイミング算出方法の妥当性を検討する必要があると考えられる。

5. FEM 解析

SDOF モデルによる解析結果と実験結果の差異原因を調べる為、試験 No.1 を対象に FEM 解析を実施した。使用したソフトウェアは ANSYS/LS-DYNA PC12.0 (ls971d R2)である。用いた有限要素はコンクリートが SOLID164、鉄筋が BEAM161 であり、寸法は概ね 5mm である。鉄筋の材料特性には引張試験結果を区分線形近似で与え、コンクリートの材料モデルとして MATERIAL MODEL 159(CSCM)を用いた。CSCM に必要な密度と圧縮強度は表 1 および表 3 に示された測定値を用い、骨材最大寸法は 19mm とした。コンクリートと鉄棒の間はイロード接触面、事前に想定した yield 線はタイブレーク接触面とした。タイブレーク接触面でのコンクリート引張強度は圧縮強度の 8%とした。

図 2 には FEM 解析結果の変位履歴が示されているが、実験結果と良く一致している。FEM 解析結果では長辺沿い降伏線上コンクリート圧壊は 140msec 程度に発生しており、SDOF モデルによる予測結果である 130msec と概ね一致する。変位の急激な上昇はコンクリート圧壊が原因ではない事が分かった。

6. まとめ

TM5-1300 に示された手順に従い、また、引張試験結果から得られた鉄筋の応力ひずみ曲線を適用し、RC 板 SDOF モデルを改良した。その精度を実験により検証した結果、SDOF モデルは変位が急激に上昇するタイミングを遅く算出し、その後の変形を過大に評価した。SDOF モデルによると、変位の急激な上昇はコンクリート圧壊に起因するが、FEM 解析の結果、コンクリート圧壊が原因ではない事が分かった。

参考文献

- (1) Biggs J.M., Introduction to Structural Dynamics, McGraw-Hill Inc., 1964
- (2) Technical Manual (TM5-1300), To resist the effect of accidental explosions, Department of the Army, Navy and the Air force, 1990
- (3) 染谷 他 ガス爆発に対する鉄筋コンクリート構造物の衝撃応答モデル 日本土木学会第 64 回年次学術講演会 2009 年 9 月
- (4) U.S.Army Corps of Engineers Manual(EM 1110-345-415), Design of Structures to Resist the Effects of Atomic Weapons, 1957
- (5) Hibbeler R.C., Mechanics of Materials, Prentice-Hall Inc., 1994
- (6) 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

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

表 3 材料物性値

材料	ρ [kg/m ³]	E [N/mm ²]	σ_y [N/mm ²]
鉄筋	7,850	4.80×10^4	700
コンクリート	2,093	2.50×10^4	-

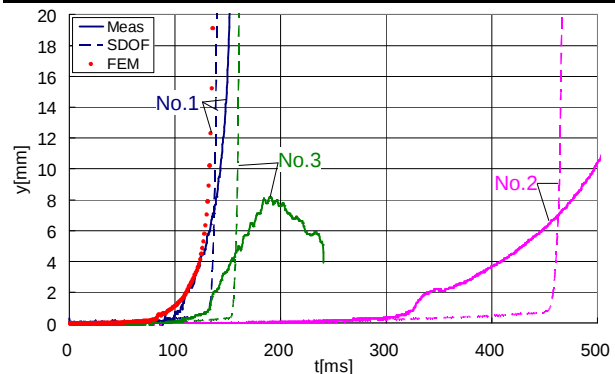


図 2 RC 板変位測定結果と予測結果の比較
(実線:測定値、破線:SDOF、点:FEM)