化学プラントの災害シミュレーション*

(累積被害を考慮した配管に及ぼす連続爆発の影響)

座古 勝^{*1}, 倉敷 哲生^{*2}

Disaster Simulation for Chemical Plant (Effect of Sequential Explosion on Pipe Considering the Cumulative Damage)

Masaru ZAKO and Tetsusei KURASHIKI

When an explosion occurs in chemical plants, the explosion pressure leads to collapse of pipes and equipment. Even if pipes are not destroyed immediately by the explosion pressure, the cumulative damage caused by the sequential explosion pressure will bring about collapse. Therefore, the disaster simulation program, which takes the cumulative damage into consideration, has been developed. In this program, three-dimensional explosion pressure applied to pipes can be calculated, and the equivalent stress acting on the connecting bolts of pipes can be analyzed. The cumulative damage is estimated by use of the obtained stress, Manson-Coffin's rule and Miner's rule. As an example, the cumulative damage over time for pipes in a model plant has been analyzed. As a result, it is shown that the proposed computer program is very useful for reliability evaluation and installation of pipes in chemical plants.

Key Words: Chemical Plant, Simulation, Explosion Pressure, Pipe, FEM, Cumulative Damage

1. 緒 言

日本における化学プラントは各種の石油化学誘導品を生産し、各地に拡大・発展を続けてきた。現在では34都道府県にわたり84地区が化学プラント等特別防災地域に指定されており⁽¹⁾、資源が少なく国土の狭い我が国にとって重要な存在となっている。しかし、タンクが密集したプラント内で不慮の事故が発生すると、災害拡大の恐れがある。特に、化学プラント内における配管は、他の機器に比べて支柱倒壊、あるいは破片飛散などミサイルによる破壊の恐れがあり、隣接構造物に対する二次災害へと発展する危険性を有している。そこで、爆発発生時のプラント内における配管の力学的挙動を解析し、その視覚化を行えば化学プラント内の配管設計および化学プラントの信頼性評価に有効な手法になるものと考えられる。

以前より著者らは、化学プラント内で発生した火災が放射するふく射熱または爆風圧により、災害が拡大する状況についてのシミュレーション法を開発した⁽²⁾⁽³⁾。その後、配管に及ぼす爆風圧の影響を考慮に入

れた配管崩壊挙動を解析できるシミュレーションシステムも構築した⁽⁴⁾。しかし、このシミュレーションでは、化学プラント内のあるタンクにおいて単一に発生した爆風圧による配管の瞬時破壊のみを対象としたものであった。すなわち、災害が延焼等により連鎖的に拡大し、プラント内の各タンクにおいて爆発が連続的に発生した場合には、瞬時破壊しない配管においても繰返し爆風圧が作用することにより破壊に至る累積被害の効果を考慮していない問題点があった。したがって、上述の解析手法による被害領域は実際の被害領域よりも過小評価する危険性がある。そこで本論文では、化学プラントの配管保全のためのシステム構築を研究目的に、連続的に爆発が発生した際の累積被害による効果を考慮した配管の崩壊挙動のシミュレーションプログラムを構築したのでその手法および例解析について報告する。

2. 爆発について

崩壊タンクより可燃性気体が流出した際、その可燃性気体は大気と拡散混合して急激な膨張を呈し、濃度が希釈される。混合ガスの濃度が内容物に依存する爆発濃度範囲内に達して着火した場合、破壊的な爆風圧を伴う爆発を引き起こす。

* 原稿受付 1995年1月19日。

^{*1} 正員、大阪大学工学部 (〒565 吹田市山田丘2-1)。

^{*2} 准員、大阪大学大学院。

爆風圧による災害想定に関しては以前の研究⁽²⁾⁽³⁾と同様に、高圧ガスおよび火薬類保安審議会の答申よりTNT(トリニトロトルエン)爆発について燃料重量と爆風圧、並びに爆発中心からの距離との実験結果を基に、TNT以外の各燃料をTNT量に換算し爆風圧を算出する方法⁽⁵⁾を用いた。すなわち、TNT爆発における爆風圧は、式(1)により得られた換算距離の値を図1に示す実験結果の横軸に照合することにより求める。

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{\alpha}{W_{\text{TNT}}}} \cdot R \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 α は換算係数(=9.806 65 m/s²)、 W_{TNT} はTNTの重量[N]、 R は爆発中心からの距離[m]、 λ は換算距離[(m⁴/N・s²)^{1/3}]である。また、TNT以外の燃料のTNT重量への換算は次式により求める。

$$W_{\text{TNT}} = \frac{W_0 \cdot \varphi \cdot e \cdot Q_0 \cdot \gamma}{Q_{\text{TNT}}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 W_0 は燃料の漏えい量[N]、 φ は爆発係数、 e は気化率、 Q_0 は漏えい燃料の単位量当たりの燃焼熱量[J/N]、 Q_{TNT} はTNTの単位量当たりの燃焼熱量[J/N]、 γ はTNT収率である。本研究では爆風圧が半球体状に広がるものと考え、上記の手法を三次元的に拡張し爆風圧を算出する。

3. 解析手法

3・1 シミュレーションのフローチャート 図2に本研究で作成したシミュレーションのフローチャートを示す。

まず、タンクおよび配管の配置、形状、材質等のデータを入力し、タンクは容器として配管はビーム要素として要素データを作成する。次に爆発を呈するタンクを検索し、爆発が発生した場合、式(1)に基づき配

Fig. 1 Relation between explosion pressure and λ value

管節点に作用する荷重値を算出し、有限要素法(FEM)による応力解析を行う。解析結果より配管および支持ボルトに作用する力を求め、配管破壊判定を行う。瞬時破壊しない配管に関しては、連続爆発による繰返し爆風圧が作用することによる累積被害を考慮した破壊判定を行う。さらに、配管の崩壊状況をCRT上に表示する。この一連の処理を爆発発生回数分繰返す。以下、システム中の各処理について記述する。

3・2 配管および支持部のモデル化 化学プラントでは、原油からガソリンその他の化学燃料の精製が行われるため、配管では水、蒸気のほか、特殊な流体を取扱っている。温度も高温から超低温まで、また圧力も超高压に至る場合もあるため、使用する管材料は炭素鋼鋼管だけでなく、合金鋼鋼管やステンレス鋼管が用いられている。しかし、各材料の強度データが明確ではないので、本研究では強度データが明確である構造用鋼材SS 400配管を解析対象とした。

配管支持方法には大別して、配管をある位置で固定する固定点方式と、一つあるいはそれ以上の方向にすべりやねじりが可能な可動支持方式がある。いずれの方式においても、機械および装置への配管の接続点における力が、その支持構造物の耐力以内であるか否かが問題となる。そこで本研究では、図3に示すU字配管支持⁽⁶⁾を想定し、接合部における応力状況を評価する。

Fig. 2 Flow chart of pipe collapse simulation

爆風圧による配管の挙動解析には以下の手法を提案する。解析モデルは図4(a)に示すように配管および支柱をそれぞれ1本のビームとみなし、図4(b)のビーム要素としてモデル化を行った。境界条件は、支柱接地部に相当する節点を完全拘束し、支柱上端部に相当する節点を回転拘束した。さらに、爆風圧によるパイプ部の分布荷重を等価節点力に置き換え、集中荷重としてパイプ部の各節点に負荷し、FEM解析を行う。解析結果より、管の接続点に作用する節点反力、モーメントを基に、支柱上端および接地部の接続ボルトに作用する応力を算出し、破壊判定を行う。

3.3 破壊判定 破壊判定として配管支持ボルトの破断による配管倒壊を考慮した。配管自身の破損も考慮する必要があるが、接続ボルトが強度的に最も低いと想定されるため、配管破断よりもボルト破断が最初に発生すると考えてシミュレーションを行った。なお、破断形態として次の二点を考慮した。

(a) 引張曲げによる支持ボルト破断

FEM解析より、管の接続点に作用する反力、モーメントは各々図5に示す成分が得られる。これらよりボルトの軸方向(Z方向)に作用する荷重は、

$$f_T = f_{T1} + f_{T2} \quad (3)$$

となる。ここで、 f_{T1} は接続点に作用する反力から計算

したボルト1本あたりに負荷する荷重であり次式となる。

$$f_{T1} = \frac{F_z}{n} \quad (4)$$

n はボルト本数である。また、 f_{T2} はモーメントによる曲げ応力を荷重に換算したものであり、以下の手法により定式化する。すなわち、図6に示すはりの曲げを考慮した場合、図中O点回りのモーメントの釣合いは式(5)となる。

$$F \cdot L = f_{T2} \cdot d + (-f_{T2}) \cdot (-d) \quad (5)$$

左辺は解析結果として求められる。また、 d は中立軸からボルトまでの距離である。したがって、ボルトに作用する荷重は式(6)となる。

$$f_{T2} = \frac{M}{2 \cdot d} \quad (6)$$

式(6)はボルト総本数が2本の場合であるが、総本数に対応させると次式となる。

$$f_{T2} = \frac{M}{2 \cdot d \cdot (n/2)} \quad (7)$$

すなわち、支柱に曲げが生じた場合、接続ボルトの半数は圧縮荷重を呈し、もう半数は引張荷重を呈するものと考え、引張破断に寄与するボルト数は全体の半数とみなした。したがって、式(3)中の f_{T2} は式(8)となる。

$$f_{T2} = \frac{M_x}{2 \cdot d \cdot (n/2)} + \frac{M_y}{2 \cdot d \cdot (n/2)} \quad (8)$$

式(3)をボルトの断面積で除することにより、ボルト

Fig. 3 Schematic diagram of pipe and pipe support

(a) Unit pipe model (b) Beam model
Fig. 4 Analytical model for pipe and pipe support

Fig. 5 Components of reaction and moment

Fig. 6 Bending model of beam

トに作用する引張応力を求める。この応力がボルトの引張強度以上である場合、ボルト破断に至ると考える。なお、実際にはボルトの締付けによる力も初期応力として考慮する必要があるが、今回の解析では考慮していない。

(b) セン断応力による支持ボルト破断

支柱接続に使用されるボルトには、軸方向力以外に次式のせん断力が作用する。

$$f_s = f_{s1} + f_{s2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

f_{s1} は接続点での反力から計算したボルトに負荷するせん断方向荷重、 f_{s2} はモーメントによる曲げ応力をせん断方向荷重に換算したものであり次式となる。

$$f_{s1} = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{n} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$f_{s2} = \frac{M_z}{2 \cdot d \cdot n} \quad \dots\dots\dots (11)$$

なお、本来 f_{s1} および f_{s2} は方向が異なるが、本研究では最危険側として同一方向を有する場合を想定し、式(9)のごとく加算した。したがって、本手法では安全側の評価を与えるものとする。

式(9)をボルトの断面積で除し、ボルトに作用するせん断応力を求める。この応力がボルトのせん断強度以上である場合、ボルト破断に至る。

3.4 防液堤およびタンクによる爆風圧の遮断効果
実際のプラントでは他のタンクに遮られ爆風圧を受けない領域が存在する。そこで、二次元的にその位置関係を求める。タンクによる影響は、爆心から配管の各節点に直線を引き、各直線式および介在タンクの座標とタンクの形状式(円の式)との判別式により求める。

また、爆心と配管との間に介在するタンクおよび防液堤の高さによっては、爆風圧を遮断する領域が存在する。そこで、爆風圧に及ぼすタンクおよび防液堤の高さによる影響を三次元的に求める。前述の計算手法と同様に、爆心から配管の各節点に直線を引き、各々の直線式および介在タンクの座標と形状式(タンクの場合は円の式・防液堤の場合は直線の式)の判別式より求める。

3.5 火災のふく射熱による影響 プラント内で火災が発生した場合、その熱的影響により配管およびボルトの温度は上昇し強度は変化する。そこで、火災による熱影響を以下の手法より評価する。火災中心から任意の位置にある配管が受けるふく射強度 E [W/m²] は、

$$E = \phi \cdot R_D \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる⁽⁵⁾。 ϕ は火災と受熱面の形状および位置関係に

より定まる形態係数、 R_D はふく射発散度 [W/m²] であり燃焼する内容物により定数化された値を用いた⁽⁴⁾。このふく射強度を基に配管受熱面に吸収される熱量 [W] は、

$$q = \nu \cdot S \cdot E \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。ここで、 ν はふく射を受ける面の射出率、 S は受熱面の垂直断面積 [m²] である。したがって、経過時間 h [s] での配管表面の温度 T_p [K] は次式となる⁽²⁾。

$$T_p = \frac{q \cdot h}{A \cdot t \cdot \rho \cdot C} + T_M \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 A は配管壁の表面積 [m²]、 t は平均肉厚 [m]、 ρ は密度 [kg/m³]、 C は比熱 [J/kg・K]、 T_M は気温 [K] である。また、内容物により ρ 、 C を変化させる必要があるが、本解析では解析条件を簡易化するため、内容物効果を無視し、円筒鋼管として $\rho = 7830$ [kg・m³]、 $C = 5.547 \times 10^{-4}$ [J/kg・K] を用いた。

一般に構造用鋼材 SS 400 の引張強度は高温になるほど低下するが、時効硬化により 600 K 付近において強度のピークが現れる⁽⁷⁾。そこで本研究では、引張強度 σ [MPa] の温度変化を次式により直線近似した。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= 598.0 - 0.5148 \cdot T_p \quad (293 \leq T_p \leq 373) \\ \sigma &= 291.8 + 0.3060 \cdot T_p \quad (373 < T_p \leq 623) \\ \sigma &= 1171 - 1.106 \cdot T_p \quad (623 \leq T_p \leq 873) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (15)$$

3.6 疲労による累積被害 プラント災害は連鎖するため、爆発が連続的に生じる危険性がある。その際、配管には爆風圧による過大な外力を繰返し受けたことによる破壊、すなわち低サイクル疲労による破壊が問題となる。そこで、以下の手法により疲労破壊を評価した。まず、FEM 解析よりボルトに作用する相当応力を算出する。この応力を応力振幅 $\Delta\sigma$ とみなし等側ひずみ振幅 $\Delta\epsilon$ に変換する。変換の際、塑性域での応力・ひずみ関係は式(16)の Swift の式⁽⁸⁾を用いた。

$$\Delta\sigma = c(a + \Delta\epsilon)^b \quad \dots\dots\dots (16)$$

a 、 b 、 c は材料定数であり、SS 400 鋼の引張試験結果より求められた値を使用した⁽⁹⁾。この $\Delta\epsilon$ を用いて応力振幅時の破壊寿命を推定する。ここで、多くの金属材料の低サイクル疲労試験では、塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon$ と疲労寿命 N_f との間に次式の Manson-Coffin 則⁽¹⁰⁾が成立する。

$$\Delta\epsilon \cdot N_f^{k_p} = C_p \quad \dots\dots\dots (17)$$

C_p は疲労延性係数、 k_p は疲労延性指数と呼ばれる材料定数であり、SS 400 鋼の低サイクル疲労試験結果のひずみ-寿命線図より求められた係数を適用した⁽¹⁰⁾。このとき Miner 則⁽¹¹⁾より累積被害 D 値は次式となる。

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{1}{N_{fi}} \dots\dots\dots (18)$$

m は爆発発生回数, N_{fi} は各回での破壊寿命である。
この D 値が 1 以上である場合, ボルト破断と判定する。

Table 1 Data of exploded tank

Number of broken tank	Broken time (min.)	Max. volume (kl)	Rate of storage (%)	Radius (m)
1	-	5000	60	12
2	52	5000	30	12
3	55	5000	30	12
4	61	5000	30	12
5	62	5000	30	12
6	77	2000	60	8
7	78	2000	60	8

Table 2 Data of pipe and pipe support

Distance between each supports (m)	30
Outer diameter of pipe (m)	0.50
Internal diameter of pipe (m)	0.45
Height of pipeline (m)	3.0
Diameter of bolt (mm)	20
Number of bolts for each supported parts	4

Fig. 7 Chemical plant model with pipeline

Fig. 8 Damage state for pipe supported parts after 52 min.

4. 解析例

実存プラントでは多数の貯蔵タンクが配置され、タンク群と各装置は網目状のパイプラインで構成されているが、解析の簡易化のため図7に示すプラントモデルを想定した。ここで、図7中のNo.1の球形ヘキサタンクの初崩壊によりプール火災が発生した場合、その熱的影響により表1に示す時間経過に伴い、No.2~7の球形エチレンタンクの爆発が生じることが以前の解析手法⁽²⁾⁽³⁾により得られている。本報では、その結果を基に高さ3.0 mに設置された配管に爆風圧が作用した際の解析について記述する。なお、配管には表2のデータを用い、防液堤高さは1.0 mとした。

図8~10に火災発生後52, 61, 78分後の配管接続ボルトにおける被害状況を示す。図中○印の記号で示された点は支柱の上端および下端ボルトの位置に相当する。○印以外の記号は配管接続ボルトの破断状態を示す。図8~10より時刻経過に伴う配管破壊範囲の時間変化を把握することが可能となる。

Fig. 9 Damage state for pipe supported parts after 61 min.

Fig. 10 Damage state for pipe supported parts after 78 min.

Fig. 11 Changes of cumulative damage and equivalent stress with time

また、図 10 に示すボルト位置(A)において、累積被害 D 値の時間変化並びに爆風圧の影響によりボルトに作用する相当応力を図 11 に示す。図より、各配管位置での被害の累算を時刻的に把握することが可能である。

上述の解析の比較として、累積被害を考慮せず単独で図 7 の No. 7 タンクに爆発が発生した際の解析結果を図 12 に示す。図 12 は配管高さ 3.0 m での爆風圧分布および配管接続ボルトの被害状況である。我が国の設計基準である高压ガス保安協会の答申⁽⁵⁾では、爆発事故が発生した際に人的被害を与えず軽微な物的被害しか与えない値として、爆風圧 12.26 kPa を保安距離の基準としている。しかし、爆風圧による配管の損害域は、配管位置や防液堤高さ、ボルト設定条件等に左右されるものと考えられる。また、この答申では単一に爆発が生じた際の危険領域を保安基準に定めているが、プラント災害は連鎖的に発生する危険性を有するため、図 10 との比較から明らかなようにこの手法では実際の災害被害よりも過小評価する恐れがある。そこで、まず災害の進展状況を計算し、提案手法を用いて累積被害を考慮した配管の危険領域判定を行う必要があると考える。

5. 結 言

化学プラントにおいて、連続的に爆発が発生した際

Fig. 12 Damage state for pipe supported parts without considering cumulative damage

の累積被害を考慮した配管の挙動を解析するシミュレーションプログラムを構築し、例解析およびシステムの有用性を示した。したがって、配管の安全設計に寄与するシステムが実現できたものと考えられる。今後、詳細な実配管データを基に解析を行いたいと考えている。また、本解析手法は配管の設計、建設費用を含めたリスク解析に展開できるものと考えられる。

文 献

- (1) 消防庁, 消防白書 (1993), 大蔵省印刷局.
- (2) 座古勝, 材料, **39** (1990), 8-13.
- (3) 座古勝・ほか 2 名, 材料, **42** (1993), 1381-1386.
- (4) 座古勝・ほか 1 名, 化学プラントの災害シミュレーション (配管に及ぼす爆風圧の影響), 材料, **44** (1995), 512-516.
- (5) コンビナート保安・技術指針, KHK E 007 (1974), 高压ガス保安協会.
- (6) Schwaigerer, S., 配管工学ハンドブック II, (1976), 565, 森北出版.
- (7) 日本鉄鋼協会編, 鉄鋼便覧 IV, (1981), 45, 丸善.
- (8) 後藤学, 塑性学, (1987), 16, コロナ社.
- (9) 藤本盛久・ほか 2 名, 日本建築学会論文報告集, **253**, 17 (1977).
- (10) 日本機械学会編, 疲労強度の設計資料 IV (1983).
- (11) 市川昌久, 信頼性工学, (1993), 154, 裳華堂.