

# 過去の地震被害から学ぶ配管系の耐震設計

(有)プラント地震防災アソシエイツ 稲葉 忠

# 過去の地震被害から学ぶ配管系の耐震設計

(有)プラント地震防災アソシエイツ 稲葉 忠

## 1 はじめに

プラントの耐震設計の目的が地震災害のリスクの低減にあることはいうまでもない。兵庫県南部地震の経験を教訓に、高圧ガス設備の耐震設計においても、漏洩がなければ塑性変形はあってもよいとして、発生確率の小さな破壊的地震まで想定するようになった。

配管系が地震によって受ける影響には、慣性力によるものと相対変位によるものとがある。相対変位には、支持構造物の応答変位によるものと、地盤の液状化が起きたときの基礎の移動（沈下、水平移動、傾斜）によるものとがある。

慣性力の影響を、支持構造物との共振を考慮に入れて厳密に評価しようとする、大変に難しいことになる。幸いに鋼製の配管は塑性変形によるエネルギー吸収能力に優れ、局所に構造的弱点があった場合および大きな揺れが波及した場合を除けば、過去の地震において慣性力によるとみられる漏洩事故はほとんど発生していない。構造的弱点を残さず、配管固有のエネルギー吸収能力を生かす設計を行い、また大きな揺れに注意すれば、破壊的地震に際しても漏洩事故の発生は避けられよう。

相対変位の影響についても、幸いにエルボに優れた塑性変形能力があって、これが適所に配置された配管系では、局所に構造的弱点があった場合を除き、漏洩事故はほとんど発生していない。構造的弱点を残さず、可撓性の確保にエルボの塑性変形能力を生かす設計を行えば、破壊的地震に際し、同様に漏洩事故の発生は避けられよう。

配管系の被害には、この他に隣接構造物との衝突による損傷がみられ、時に漏洩事故を招くこと

がある。配管の揺れが波及する場合に同じく、設計建設の時点でこれを予見することは容易でないが、過去の被害例を学び、また構造物の動的応答の特徴や地盤の液状化の影響を理解し、想像力を養えば可能となる。

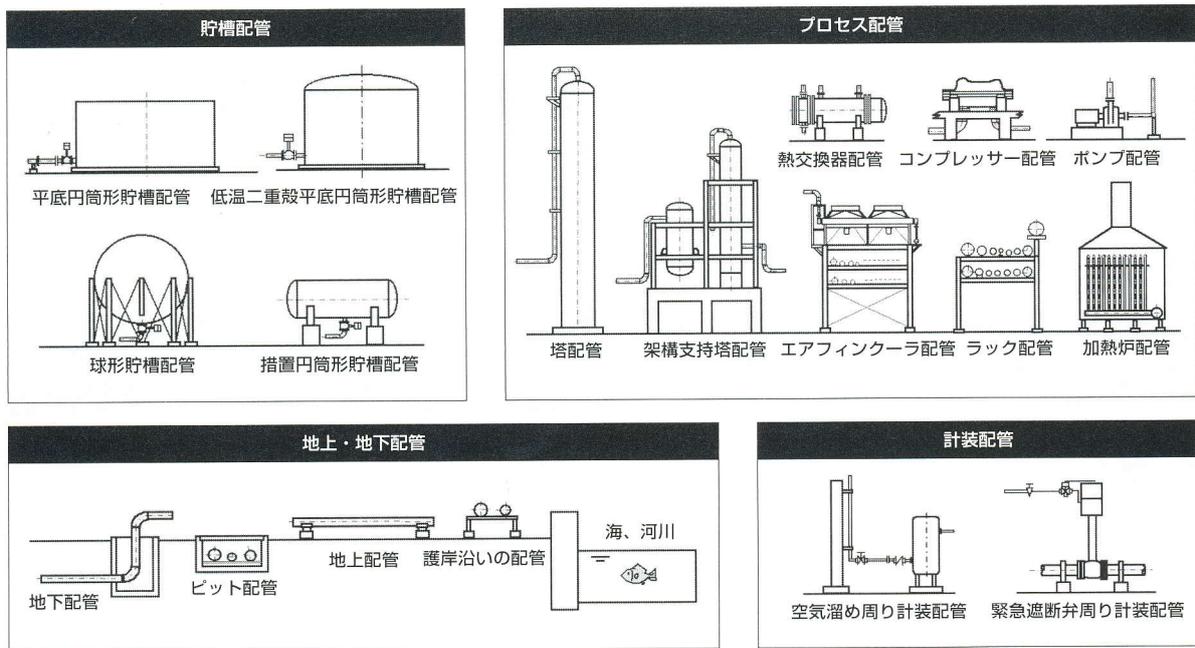
本稿では、まず初めに配管系の構造的長と地震による影響を一般論として述べ、次に配管のエネルギー吸収能力と変位吸収能力について基本的なことを説明し、次いで実際の地震被害の特徴と耐震設計における構造種別留意点を述べ、最後に地震による影響の軽減方法と軽減例について述べることにする。

## 2 配管系の構造的長と地震による影響

### 2-1 配管系の構造的長と地震による影響

石油精製・石油化学プラント（以下、プラントという）には様々な構造をした設備、構造物があり、それらに接続される配管も、それらの構造に応じて様々な形状を成している。配管を貯槽配管、プロセス配管、地上・地下配管、計装配管に分類して第1図に示す。

貯槽配管は貯槽と地表面間の相対変位の影響を受けやすく、プロセス配管は慣性力の影響の他に、設備、構造物間の相対変位の影響を受けやすい。地上・地下配管は地盤振動の影響を受けやすく、計装配管は緊急遮断弁を含めた設備、構造物間の相対変位の影響を受けやすい。地盤の液状化が起きた場合は全ての配管がその影響を受け、護岸に近いほど影響は大きくなる。



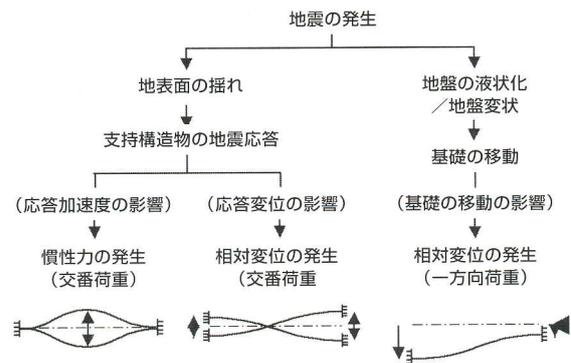
第1図 配管の種類

## 2-2 構造物に支持された配管系の地震による影響

塔槽類、架構等の設備や構造物（以下、支持構造物という）に支持された配管系が地震によって受ける影響には、次のものがある。

- ① 支持構造物の応答加速度に励振されることによる自らの慣性力による影響
- ② 支持構造物の応答変位に基づく支持点間の相対変位による影響
- ③ 地盤変状（地盤の移動、地盤定数の低下）が起きたときの支持構造物の基礎の沈下、水平移動、傾斜に基づく支持点間の相対変位による影響
- ④ 隣接する揺れの大きい構造物（大口径配管など）に衝突されたり、相対変位を加えられたりすることによる影響

配管の耐震設計では、④に留意しつつ、①、②、③の影響を軽減することを主体に考えることになる。ここで、②と③はいずれも相対変位による影響であるが、前者は交番（繰り返し）の荷重であるのに対し、後者は1方向の荷重であることに違いがある。大口径配管から小口径配管が分岐していれば、小口径配管にとって大口径配管は支持構造物に等しく、②、③の影響を考慮することが必要となる。こ



第2図 構造物に支持された配管系の地震による影響<sup>(1)</sup>

これらの影響の軽減方法については第5章で述べる。

地震の影響から配管を守るには、次の損傷モードを考えておくことも必要となる。

- ⑤ 支持構造物の倒壊、崩壊に伴う配管系の損壊
- ⑥ 周辺構造物の倒壊、崩壊による損壊
- ⑦ 上方からの物の落下による損壊

⑤を避けるには、支持構造物の重要度を配管の重要度に合わせたり、破壊に至るまでのエネルギー吸収能力を高めたりすることが考えられる。⑥を避けるには⑤に同じか、あるいはレイアウトにおいて配

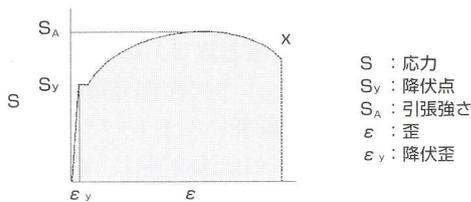
管から離すなどの対策が考えられる。⑦を避けるには、上方の積載物、付属物の落下防止策（耐震設計を含む）を考えておくこととなる。

### 3 配管のエネルギー吸収能力と変位吸収能力

構造物には固有のエネルギー吸収能力があり、繰り返し入ってくる地震のエネルギーの総量がエネルギー吸収能力よりも小さければ、破壊に至ることはない。このエネルギー吸収能力は弾性／弾性振動のエネルギー、減衰力によるエネルギー吸収量および塑性変形によるエネルギー吸収能力の和で表されるが、このうちで特に大きいのが塑性変形によるエネルギー吸収能力である。

#### 3-1 材料の靱性と延性

材料の特性は、降伏点、引張強さに代表される強度と、伸び、絞りに代表される延性によって表わされる。降伏点の引張強さに対する比は降伏比と呼ばれ、加工硬化の特性を表すものとなる。ここで、応力-歪曲線が作る面積（第3図のシェイディング部分）は、試験片が破断するまでに吸収される単位体積あたりのエネルギー量を意味し、靱性と呼ばれる。



第3図 応力-歪曲線

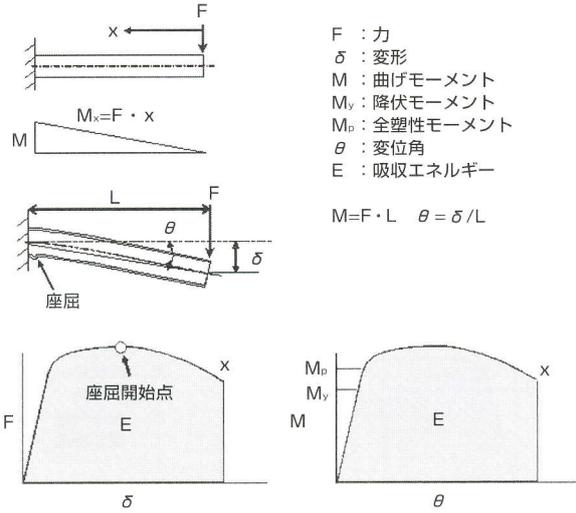
#### 3-2 配管のエネルギー吸収能力と変位吸収能力

配管系の形状は様々であるが、ここでは最も単純な一端固定一端自由の配管と、固定端側にエルボが付いた配管について説明する。銅管の変形特性は実験で確認され<sup>(2)</sup>、容器構造についてはエネルギー吸収能力に関する定式化も行われている<sup>(3)</sup>。

##### 3-2-1 一端固定一端自由配管の力-変形曲線

(1) 一端固定一端自由配管の力-変形曲線

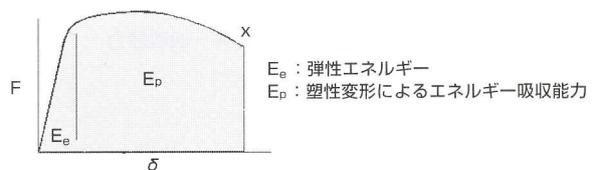
一端固定、一端自由の配管の力-変形曲線（復元力特性ともいう）およびこれを曲げモーメントと角変位の関係で表した曲線を第4図に示す。自由端に



第4図 一端固定一端自由配管の力-変形曲線

力を加えていくと、力に比例して変位が大きくなっていく。やがて固定端の最外縁が降伏し始める。このときのモーメントを降伏モーメントという。さらに力を加えていくと全断面が降伏する。このときのモーメントを全塑性モーメントという。固定端が降伏して材料の加工硬化が始まると、曲げモーメントが小さい隣接部位も降伏し始め、力と変形の関係が非線形となり、変形量が増大し始める。そのまま力を加え続けると、固定点に近い部位で座屈が始まり、暫くして当該部位に亀裂が発生する。

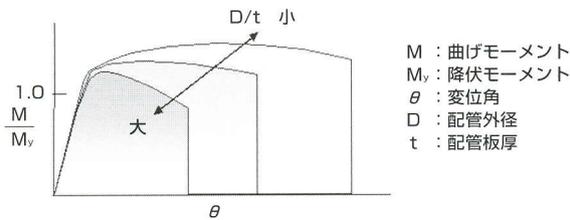
力と距離の積はエネルギーであり、配管は亀裂を生じるまでに第4図のシェイディング部分の面積分のエネルギーを吸収したことになる。線形部分、非線形部分のエネルギーは、それぞれ弾性エネルギー、塑性変形によるエネルギー吸収能力を意味する（第5図）。配管は、このエネルギー吸収能力が大きければ大きいほど大きな慣性力に耐えられ、変形量が大きければ大きいほど大きな相対変位（累積）を吸収できる。



第5図 弾性エネルギーと塑性変形によるエネルギー吸収能力

(2) 直径-板厚比がエネルギー吸収能力に及ぼす影響

座屈の発生は、直径-板厚比が大きい配管ほど早く始まり、これが小さいものほど遅くなる(第6図)。小口径配管におけるように直径-板厚比が小さくなると座屈は発生しなくなり、固定端の応力が引張強さに達するまで変形が進行する。

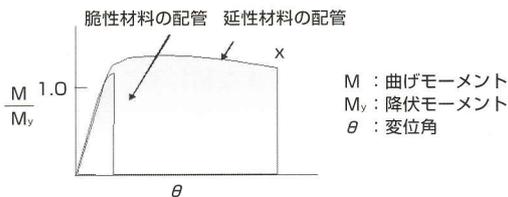


第6図 直径-板厚比とカー変形曲線

(3) 材料特性がエネルギー吸収能力に及ぼす影響

固定端の材料が塑性化して加工硬化がはじまると、曲げモーメントの増大とともに隣接部位の材料も塑性化し始め、降伏比が小さいほど塑性化の領域は拡大する。したがって、配管のエネルギー吸収能力、変位吸収能力は、それぞれ材料の靱性、延性の他に、降伏比にも依存する。

脆性材料(靱性に乏しい)を用いた配管は、構造物としても脆性的特徴を示す(第7図)。降伏比が1.0に近い材料を用いた場合にも、塑性化する領域が広がらず、構造によっては脆性的特長を示すようになる。特殊なプロセス条件下にあって材料の脆化が進む場合にも、エネルギー吸収能力に影響することに注意を必要とする。

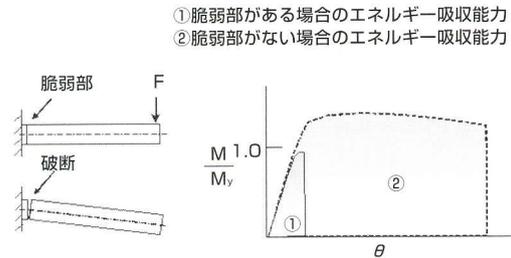


第7図 材料特性とエネルギー吸収能力

(4) 脆弱部がエネルギー吸収能力に及ぼす影響

固定端近傍に、配管の全塑性モーメントよりも小さい曲げモーメントで破断したりしてしまうような

部位、配管要素があると、配管本来のエネルギー吸収能力が発揮されず、構造物としては脆性的特徴を示すようになる(第8図)。そのような部位、配管要素としては、溶接効率の低い溶接継手、ねじ込み継手、フランジ継手、铸铁弁などが挙げられる。

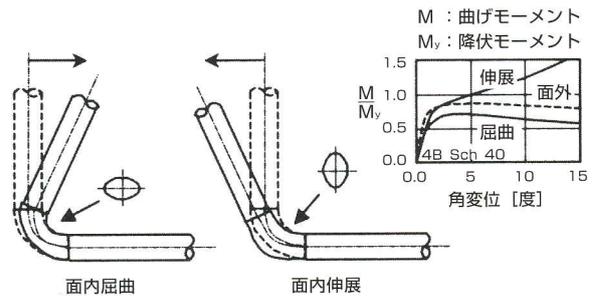


第8図 脆弱部がエネルギー吸収能力に及ぼす影響

3-2-2 エルボ付き一端固定一端自由配管のカー変形曲線

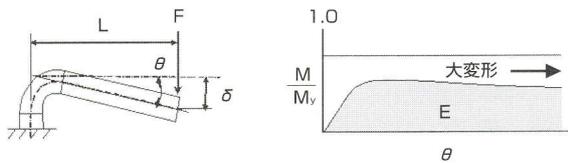
(1) エルボの塑性変形能力

エルボに曲げモーメントが加わるとエルボの断面が楕円化し、この効果によって、梁として計算したときに比べて大きな角変位が得られる(この比をフレキシビリティファクターと呼んでいる)。エルボの局部が塑性化し始めるとこの効果は一段と顕著になり、角変位を加え続けると直管の降伏モーメントよりも小さな曲げモーメントで塑性変形が進行し、発生する歪も容易には亀裂に至るレベルに達しない。この曲げモーメントの低減効果は、直径-板厚比が大きいエルボほど大きくなる。エルボの変形特性の例を、直径-板厚比が比較的小さい4B、Sch.40の配管の場合について第9図に示す。角変位に抵抗する曲げモーメントの大きさは角変位の方向で異なり、面内伸展が一番大きく、面内屈曲が一番小さい。



第9図 エルボの変形特性<sup>(1)</sup>

(2) エルボ付き一端固定一端自由配管の力-変形曲線  
固定端側にエルボが付いた配管の自由端に力を加えていくと、エルボの効果により、降伏モーメントよりも小さな曲げモーメントで塑性変形が進行するようになる(第10図)。過去の地震で溶接部が亀裂、破断した事例が少なく、溶接欠陥があったとみられる場合などに限定されるのは、溶接強度が確保されていることに加えて、この効果もあったものとみられる。可撓性のない配管に大規模な地盤変状の影響が及んだ場合などを除けば、配管固定点の座屈やフランジからの漏洩(微小漏洩を除く)の事例が少ないのも、同様の理由と考えられる。



第10図 エルボ付き一端固定一端自由配管の力-変形曲線

なお、相対変位に対する可撓性の確保は、熱膨張による相対変位の場合と基本的に同じであり、相対変位に直角な方向の直管とこれを挟む2つのエルボの組み合わせ、あるいはその複数の組み合わせによる。これについては地震の影響の軽減例の中で示す。

#### (3) エルボの効果期待できない配管

エルボの効果はエルボの構造(形状、寸法、材質)と直管部との相対的強度で決まり、次に示す配管については期待できない。

- ① 直径-板厚比の小さい突合せ溶接の配管(例えば、2B、sch.80)
- ② エルボが過剰板厚の配管(例えば、直管部の1.5倍)
- ③ 差込み溶接の配管
- ④ ねじ込み継手の配管
- ⑤ 塩化ビニル配管

小口径の溶接継手の配管はエルボによる曲げモーメント低減効果が期待できないが、幸いに座屈することがないので、溶接部に母材と同等の強度を確保すれば、直管部の塑性変形をもって相応の相対変位を吸収することができる。ねじ込み継手、塩化ビニル配管には本質的な弱点があり、これについては後述する。

## 4 配管系の地震被害と構造種別留意点

### 4-1 配管系の地震被害

配管系の地震被害は、これまでに新潟地震、十勝沖地震、宮城県沖地震、千葉県東方沖地震、兵庫県南部地震、2004年十勝沖地震などで経験し、損傷モードを含めて報告されてきている<sup>(4)~(12)</sup>。これまでに経験した地震被害を、主たる要因が配管要素にある場合と配管系にある場合とに分けて次にまとめる。

#### 4-1-1 配管要素に要因がある地震被害

##### (1) 配管要素に要因がある地震被害

配管要素あるいは局所の構造に要因があるものとしては、以下の事例が報告されている。

- ① 突合せ溶接部の亀裂、破断
- ② フランジ継手の開口
- ③ 計装配管ねじ込み部の亀裂、破断、引き抜け
- ④ 配管サポート直付け溶接部管壁の亀裂
- ⑤ 硬質塩化ビニル配管の割れ
- ⑥ 鋳鉄弁の割れ

①は、溶接欠陥があって、溶接部の強度が母管に比べて低く、且つエルボによる曲げモーメント低減効果が期待できない場合に起こりうる。板厚方向に割れ、溶け込み不良などの面状欠陥があって、低温の気候条件が重なれば、低温脆性による破断も起こりうる。

②は、フランジの漏洩モーメント(漏洩し始めるモーメント)が鋼管の降伏モーメントよりも小さく、かつエルボによる曲げモーメント低減効果が期待できない場合に起こりうる。

③は、ねじ谷部の配管断面積が小さいため、当該部位だけで塑性変形が進行することによる。

④は、加熱炉、ボイラーのヘッダー配管や長大な大口径薄肉液配管などにおいて、熱膨張上の理由から配管軸方向の移動を1点で拘束している場合において、管壁に比べて相対的に剛強なサポートが管壁局部に溶接されている場合に起こりうる。

⑤は、硬質塩化ビニルは鋼材に比べて延性に乏しく、エルボの塑性変形も期待できないことによる。高速の歪速度下では延性がほとんどなくなり、衝撃にも弱い。

⑥は脆性材料であることによる。

これらの多くは、相対的強度が弱いことなどから配管固有のエネルギー吸収能力、変位吸収能力が生

かされなかったことによる損傷である。

(2) サポートの構造に要因がある地震被害

サポートの構造に要因がある地震被害としては、漏洩事故には至らなかったものを含めると、以下の事例が報告されている。

- ① 強度不足によるサポートの損傷とこれに伴う配管の揺れ、小口径配管などへの波及
- ② 劣化によるサポート機能の喪失とこれに伴う配管の揺れ、小口径配管などへの波及
- ③ 懸垂型ボイラー揺れ止めの損傷とこれに伴うボイラーと架構間の相対変位の発生、これによる配管の損傷
- ④ 架構支持の塔の揺れ止めの損傷とこれに伴う塔と架構間の相対変位の発生、これによる配管の損傷

①、②は配管用のサポート、③、④は機器用のサポートの機能喪失による。いずれも、揺れ止めの配慮はされていたものの、意図通りには機能しなかったことによる損傷である。隅肉溶接部の破断によるものを含む。

なお、地震に襲われたプラントの現場では、揺れ止めのサポートが曲がったりしているのを見かけることがある。これは地震のエネルギーを吸収して配管への入力を軽減したことに相当する。この効果を利用しようとするのがエネルギー吸収型サポートである。また、地盤変状による大きな相対変位に対し、サポートが大きく変形したりして配管への影響が軽減された例を見かけることがある。この効果を取り入れようとするのが解放サポート（5-3-1項参照）である。

4-1-2 配管系に要因がある地震被害

配管系に要因があったと見られる地震被害を、慣性力、相対変位（応答変位に基づくもの）によるものと地盤変状によるものに分けて説明する。

(1) 慣性力・相対変位による地震被害

慣性力・相対変位による損傷には、次のものが報告されている。配管の揺れや移動に基づく二次的なものを含めれば、多くは相対変位によるもので、配管要素に構造的弱点を残した場合を除き、高応力、高歪で母管自体に亀裂が入った事例はほとんどない。

- ① 塔とこれに隣接する架構間の相対変位による配管の損傷（支持構造物の応答変位）
- ② ラグ支持の塔の揺れ（ロッキング）に基づく

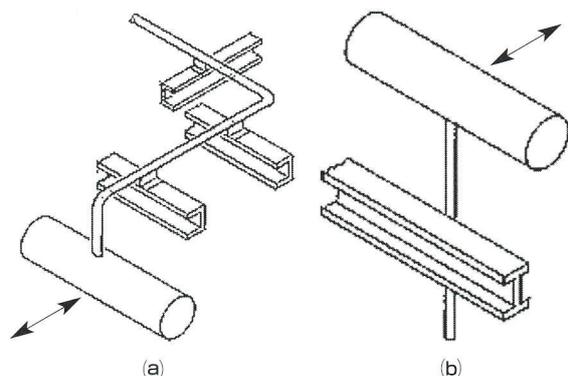
塔と架構間の相対変位による配管の損傷（支持構造物の応答変位）

- ③ 大口径配管の揺れに基づく相対変位による小口径配管の損傷（配管の応答変位）
- ④ 配管のパイラックからの落下（配管の滑動）
- ⑤ パイプシューの脱落（配管の滑動）
- ⑥ 緊急遮断弁駆動部の大揺れに基づく相対変位による計装配管の損傷（弁の応答変位）
- ⑦ 防振架上の発電機の移動に基づく相対変位による接続配管の損傷と発電機能停止（支持構造物の滑り）

実際例は見聞していないが、次のものも可能性として考えられる。

- ⑧ 配管の揺れによる吊り下げ式ハンガーのジョイント部の損傷とこれに伴う配管の落下（配管の応答変位）
- ⑨ 過大なノズル反力による回転機ケーシングの変形とこれに伴うブレードとケーシングの衝突（配管反力）
- ⑩ 平底タンクのアップリフトに基づく相対変位による配管の損傷

③についてはいくつかのパターンが考えられ、例えば第11図のような配管があったとする。大口径管が大きく揺れたらどのようなことが起きるか、想像に難くない。高圧ガスの配管が破断すれば、圧縮されたガスが音速で噴出するので、2B、1Bの配管といえども疎かにはできない。④は配管自体に損傷はなくても落下方向の弱小構造物を損傷させる原因となりうる。⑤はプラントのシャットダウンに伴って配管が冷え、反対方向に収縮したときに損傷の原因となる。脱落の原因が支持構造物の揺れであれば、



第11図 弱点が潜在している小口径管の例<sup>8)</sup>

第11図(a)と同様な事態となる。被害の多くは、揺れ止めなどの構造的配慮がしてあれば避けられたことであり、大きな揺れには注意が必要である。

#### (2) 地盤変状による損傷

地盤変状による損傷には、次のものが報告されている。地盤の液状化が原因で発生する相対変位は一方方向荷重であって疲労の心配はないが、兵庫県南部地震におけるように規模が大きいと深刻な被害を与える。

- ① 直接基礎のポンプ・貯槽の沈下に基づく相対変位による配管の損傷（基礎の沈下）
- ② 杭基礎の貯槽周りの地盤沈下、水平移動に基づく相対変位による配管の損傷（地盤の沈下、移動）
- ③ 独立基礎のポンプの沈下に基づく相対変位による鋳鉄製ポンプのノズル、ケーシングの割れ、芯狂い（基礎の沈下）
- ④ 地盤変状に基づく母管の移動時の小口径分岐管の隣接構造物への衝突による損傷（配管の移動）
- ⑤ 設計を超える相対変位が加わった場合の可撓管の損傷（基礎／地盤の沈下、移動）
- ⑥ 可撓管の変位吸収限界を超える相対変位が加わった場合の配管系の可撓性不足によるフランジからの漏洩（基礎／地盤の沈下、移動）
- ⑦ 独立基礎の空気溜めの沈下、移動に基づく相対変位による計装配管の損傷（基礎／地盤の沈下、移動）

⑤、⑥について、可撓管の変位吸収限界を超える相対変位に備えるには、バックアップとして配管系にも可撓性を付与しておくことが好ましいこととなる。⑦については、空気溜めと緊急遮断弁の間で引き抜いたりすることのないよう、共通基礎にするなどの配慮が必要となる。

### 4-2 配管系の耐震設計における構造種別留意点

設備・構造物はそれぞれの構造的長長に応じた動的特性を有し、地震時にはその構造的長長に応じた挙動を示す。これらに支持された配管系の損傷モードも、地盤の液状化の影響を含め、それら支持構造物の構造的長長に応じたものとなる。過去の地震被害の経験も、このことを表している。

石油精製・石油化学プラントに見られる配管系の種類は2-1節で説明した。

膨大な量の配管系について信頼性の高い耐震設

計、耐震診断を効率よく行うには、それぞれの配管系の構造種別に応じ、的を絞ることが大切である。配管系の構造種別に応じた耐震設計上の留意点を第1表に示す。

第1表 配管系の耐震設計における構造種別留意点

配管系の種別		耐震設計の留意点 <sup>(注)</sup>
貯槽配管	低温平底貯槽周り	ノズル熱収縮対策との調和、地盤沈下
	危険物タンク周り	タンク沈下、地盤沈下
	球形貯槽周り	球殻の揺れ、地盤沈下
	横置貯槽周り	地盤沈下
プロセス配管	塔周り	塔頂の大きな揺れ
	架構支持塔周り	塔と架構間の相対変位
	加熱炉・ボイラー配管	熱膨張対策との調和
	コンプレッサー周り	配管反力緩和
	ポンプ周り	基礎の沈下
	熱交換器周り	
地上・地下配管	エアフィンクーラ周り	熱膨張対策との調和
	パイラック上	配管の滑動、落下
	地下配管(特に立ち上り部)	地盤の沈下、移動
	ビット配管	ビットの浮上り
計装配管	護岸近傍の配管	護岸のせり出し
	大口径導管	軸方向の滑動抑制
	緊急遮断弁周り	相対変位(頭部の揺れ、独立基礎移動)
	空気溜め周り	相対変位(独立基礎移動)

(注) 地盤の液状化が起きるところでは、種別に関係なく地盤変状に対する配慮が必要。

## 5 地震による影響の軽減方法と軽減例

前節において、配管系の地震被害をその主たる原因が配管要素にある場合と配管系にある場合とについて説明した。配管系の地震被害をなくすには、配管要素に弱点を残さず、配管のエネルギー吸収能力、変位吸収能力を高めるとともに、入ってくる地震のエネルギーを小さくする工夫が必要である。

ここでは初めに配管要素の弱点の回避について述べ、続いて構造物に支持された配管系について、慣性力および応答変位による影響の軽減方法と軽減例および基礎の移動による影響の軽減方法と軽減例を説明する。

## 5-1 配管要素の弱点の回避

### 5-1-1 配管要素の弱点の回避

配管要素の弱点を回避するには以下のことに注意が必要である。

- ① 溶接管理：溶接欠陥を残さない。寒冷地にあつては低温脆性にも注意する。
- ② 脆性材料の使用制限：地震時にあつて破断を避けたいラインには鋳鉄弁、硬質塩化ビニル配管の使用を控える。
- ③ ねじ込み継手の養生：地震時にあつて破断を避けたい場合は溶接継手にする。ねじ込み継手にする場合は、相対変位が作用しないよう配慮する。
- ④ フランジ継手の管理：過大な曲げモーメントが発生する領域では使用を控えるか、過大な曲げモーメントが発生しないよう配慮する。
- ⑤ 過剰板厚のエルボの不使用：高スケジュールのものの転用を避ける（エルボが直管部に比べて過剰に厚いと曲げモーメント低減効果がなくなる）。
- ⑥ サポート反力受荷部の適切な構造：サポート反力が大きい場合には、受荷部の構造はサポート反力が管壁の広い範囲に分散される構造とする。
- ⑦ 配管腐食の管理：溝状腐食など、狭い領域の減肉に特に注意。耐震性維持の観点からの保全の1つ。
- ⑧ 断面縮小部の回避：局所的に断面縮小部ができることを避ける（例えば、不必要に厚い配管を使い、開先をウェルディングネック式フランジのネックに合わせると、狭いネック部が断面縮小部となる）。

### 5-1-2 サポートの構造上の欠陥の回避

サポートについては以下の点に注意を必要とする。

- ① サポートの溶接管理：架構などに揺れ止めを隅肉溶接で取り付ける場合は、溶接部で破断することがないように、設計、施工で注意する。
- ② サポート劣化の管理：保全の一環として、設計の意図通りに支持機能が維持されるよう管理する。

## 5-2 慣性力・応答変位による影響の軽減

### 5-2-1 慣性力・応答変位による影響の

#### 軽減方法

慣性力による影響を軽減する基本的な考え方は以

下のとおりである。

- ① 適切な位置にサポートを設けて配管の揺れを抑制し、過大な曲げモーメント、軸力の発生を防止する。
- ② 適切な位置にサポートを設けて配管の過大な揺れや滑動を抑制し、小口径管への影響、他の構造物との衝突、サポートからの落下、ハンガーの損傷などを防止する。

また、応答変位による影響を軽減する基本的な考え方は以下のとおりである。

- ① 可撓性を付与して相対変位を吸収する。
- ② 応答変位の小さい位置、高さで連絡する。
- ③ 支持構造物の揺れを抑制する。

### 5-2-2 耐震設計用サポート

配管の揺れや滑動を抑制するサポートには、アンカー（固定）、レストイング（自重支持）、ガイド（軸直角方向の変位拘束）、ストッパー（軸方向の変位拘束）などが一般に用いられる。特殊なものとして、油圧式防振器、ばね式防振器、エネルギー吸収サポートなどがある（詳しい説明は省略する）。

熱膨張のある配管においては、サポートが配管の移動を拘束し、高応力を発生させるようなことがあってはならない。ガイド、ストッパーは、目的が達成されるのであれば、多少のガタ（配管とサポートの間隙）は許容されよう。

### 5-2-3 慣性力・応答変位による影響の軽減例

慣性力、応答変位の影響の軽減例を第12図に示す。

例1では、大口径の配管が架構上を滑動して付属の小口径配管に相対変位を与えたり、隣接する弱小構造物に衝突したり、さらには架構から落下することのないよう、ガイドを設けている。

例2では、コンプレッサーのノズルに大きな地震荷重が作用しないよう、コンスタントハンガーで吊られた配管の配管軸方向の揺れをロッドで抑制している。

例3では、スカート支持の塔から架構に渡る配管が相対変位の影響を受けないよう、応答変位の小さい位置まで降ろしてから架構側に渡している。また、ラグ支持の塔の頭部に揺れ止めを設けてロッキングを抑制するとともに（重心から離れた位置で梁に定着されたラグ支持の塔は、揺れ止めがないと梁を回転ばねとして揺れる）、揺れ止めの間隙分の相対変位を吸収できるようにしている。

No.	影響大	影響の軽減
例1	ラック上の配管 滑動	
例2	コンプレッサ周り配管 ノズル 揺れ	ロッド
例3	架構支持塔周り配管	

第12図 慣性力・応答変位による影響の軽減例<sup>1)</sup>

### 5-3 基礎の移動による影響の軽減

#### 5-3-1 基礎の移動による影響の軽減方法

地盤変状に基づく基礎の移動による影響を軽減する基本的な考え方を次に示す。地盤変状が起きないようにするのが本質的な解決策であるが、これについては触れない。

- ① 共通基礎にして基礎の移動の影響をなくすか軽減する。
- ② 可撓性を確保して相対変位を吸収する。
- ③ ①と②の組み合わせ

大規模な地盤変状が発生したときの基礎の移動に基づく支持点間の相対変位は、水平、鉛直方向とも

に数10cmを越えることがある。このように大きな相対変位の吸収も、エルボの塑性変形能力を利用し、さらには解放サポートを採用することによって可能となる。ここで解放サポートとは、配管反力に対して配管が損傷する前に壊れるように設計したサポートのことを言う。

#### 5-3-2 基礎の移動による影響の軽減例

基礎の移動による影響の軽減例を第13図に示す。

例1では、直接基礎のポンプの沈下に対し、基礎を共通にしてノズルへの影響を軽減している。

例	地盤変状前	地盤変状後
例1	ポンプ配管 共通基礎	基礎沈下
例2	構内地上配管 ガイドサポート	地盤沈下
例3	横置貯槽周り配管系 固定サポート	地盤沈下 ローカル基礎沈下
例4	低温平底貯槽 ノズルの変位 (熱収縮等) を吸収 解放サポート	地盤沈下 ローカル基礎沈下 強制変位 解放サポート 破断
例5	地上配管道路横断面	強制変位

第13図 地盤変状による影響の軽減例<sup>1)</sup>

例2では、杭基礎の支持構造物間を渡る配管のローカルサポートをガイドまたレスティングにして地盤の沈下による影響を軽減している。

例3では、横置円筒形貯槽の払出配管について、緊急遮断弁の後も貯槽と共通の基礎上に固定し、地盤変状が起きても重要部位（緊急遮断弁からノズルまで）に影響が及ばないようにしている。固定サポートの後の配管については、エルボと直管で可撓性を確保し、配管反力を小さくして固定サポートの設計を楽にしている。

例4では、低温平底貯槽の受払配管について、上下、水平方向の大きな相対変位を吸収するための可撓性をエルボと直管および解放サポートによって確保した上で、ノズルの変位（液化ガス受入時にノズルの収縮、倒れを生じる）を吸収するための配管ループに共通基礎上でつなぎ、重要部位への影響を軽減している。

例5では、道路横断部を利用して水平方向の相対変位を吸収している。地盤の水平移動が大きい場合、移動量の大きい護岸近くで相対変位を一旦吸収しておけば、設備周りに及ぶ影響を軽減できる。

最後に、地盤変状に基づく大きな相対変位を吸収した実例を写真1に示す。兵庫県南部地震の直後に護岸近くで撮影されたもので、エルボの塑性変形能力を示す貴重な写真である。



写真1 大きな水平方向相対変位を吸収した配管系  
(兵庫県南部地震 田上氏写)

## 6 おわりに

温度、圧力、管内流動に対する設計の場合とは違い、耐震設計が適切に行われたかどうかは、試運転では確認できない。弱点を残してはいないか、設計で意図したとおりに工事が行われたかどうかを確かめるには、保温・保冷工事の前に現場で確認するのが確実な方法である。

設計時点で弱点のない構造を考え、あるいは現場を見て潜在的な弱点に気づくには、配管のエネルギー吸収能力、変位吸収能力に関する基本的知識を持ち、実際の地震被害例を知り、どんなところに弱点を残しやすいかを知っていることが必要である。さらには、各種設備、構造物の地震応答の特徴を知り、地盤変状の影響を含めて、設備、構造物の地震時の挙動およびその影響を受ける配管の挙動を頭の中で描くことのできる能力が求められる。

プラントの配管系の耐震設計は、このようなエキスパートレベルの知識・経験を必要とする。配管設計者自身がエキスパートになれば、感覚的、定性的に信頼性の高い耐震設計ができるようになり、詳細な耐震計算を必要とするケースも少なくなるであろう。

エキスパートの知識を持った配管設計者が、設計建設の後に現場を見て歩き、必要に応じて手直しを行えば、耐震設計の信頼性は一層高められることになる。また、工務・保全の担当者がエキスパートの知識を持てば、既設プラントの配管系の耐震診断を自ら実施できるようになり、耐震性を維持、向上していくことができるようになる。

本稿が、配管系の設計、保全を担当される方、エキスパートを目指そうとされる方の参考になれば幸いです。

### <参考文献>

- (1) 稲葉：“石油精製・石油化学プラントの配管系の耐震技術”、高圧ガス、Vol.41、2004.6.
- (2) 原・竹内・緒方・他：“鋼管の塑性変形能を利用した導管設計”、日本鋼管技法、No.86、1980.
- (3) 日本建築学会：“容器構造設計指針・同解説”、1996.10.
- (4) 機械耐震設計グループ：“新潟地震における工場施設の被害について”、生産研究、16巻10号、1964.10.
- (5) 佐藤壽芳：“機械・配管関係の震害について”、生産研究—十勝沖地震・震害小特集—、20巻12号、1968.12.
- (6) 柴田碧：“産業施設の地震被害”、日本機械学会誌、75巻643号、1972.8.

- (7) 柴田碧：“配管系の地震被害について”、日本機械学会講演論文集、No.840-11、1984.10.
- (8) 柴田碧編著：“化学プラントの耐震設計”
- (9) 東京通商産業局：“千葉県東方沖地震影響調査報告書”、昭63.12、高圧ガス保安協会
- (10) 日本機械学会：“阪神・淡路大震災での機械設備の被害調査写真集”、1996.
- (11) 通商産業省：“兵庫県南部地震に伴うLPガス貯蔵設備ガス漏洩調査中間報告書”、平7.5、高圧ガス保安協会
- (12) 通商産業省：“兵庫県南部地震に伴うLPガス貯蔵設備ガス漏洩調査最終報告書”、平7.6、高圧ガス保安協会
- (13) 稲葉：“耐震性を考慮した配管の構造設計”、千葉県高圧ガス事業所地震対策指針Ⅱ、1998.3.
- (14) 高圧ガス保安協会：“高圧ガス設備等耐震設計指針レベル1耐震性能評価（配管系）編 付録Ⅱ配管系の耐震構造計画”、1997.11.
- (15) 高圧ガス保安協会：“高圧ガス設備等耐震設計指針レベル2耐震性能評価 解説編”、2000.9.

### 筆者紹介

**稲葉 忠 (いなばまこと)**

(有)プラント地震防災アソシエーツ 代表

〒260-0024 千葉県千葉市中央区中央港 1-13-1

E-mail : inaba@pedpa.co.jp