

目 次

配管系の耐震設計・耐震性改善と技術者の育成

(有)プラント地震防災アソシエーツ 稲葉 忠

1	はじめに
2	配管系の耐震設計・耐震性改善の重要性
3	配管系の耐震設計・耐震性改善の現状
4	配管系の耐震設計・耐震性改善の課題
5	配管系の耐震設計・耐震性改善の対策
6	配管系の耐震設計・耐震性改善の技術者の育成
7	おわりに

目 次

1	はじめに	56
2	配管系の耐震設計	56
2.1	配管系の構造	56
2.2	配管系の地震による影響	57
2.3	配管系の耐震設計	58
3	配管系の地震被害の要因と地震による影響の軽減	60
3.1	配管系の地震被害の要因	60
3.2	配管系の地震による影響の軽減	61
4	既設プラントの配管系の耐震性改善	62
4.1	配管系の耐震性改善の流れ	62
4.2	配管系の耐震診断の流れ	63
4.3	耐震診断のポイントと改造の留意点	65
5	耐震ウォークダウンと技術者の育成	65
5.1	耐震ウォークダウンに必要な知識・経験	65
5.2	技術者の育成	65
6	配管系の地震による影響の軽減例	66
6.1	慣性力、応答変位による影響の軽減例	66
6.2	地盤変状による影響の軽減例	67
7	おわりに	67

(本文中は章番号を省略)

配管系の耐震設計・耐震性改善と技術者の育成

(有)プラント地震防災アソシエイツ 稲葉 忠

◆はじめに

高圧ガス設備等耐震設計基準の平成9年の改正では、従来考えてきた一般的な地震動に加え、発生確率の低い高レベルの地震動も考慮することとされ、併せて配管系が適用対象に加えられた。高レベルの地震動に対しては、漏洩がなければ塑性変形はあってもよいとしている。

塔槽類、配管系などの構造物の耐震設計では、まずは起こりうる損傷モードを想定し、地震の影響を緩和、軽減、排除する構造を考える。これを構造計画という。そして、その損傷モードに対する配慮が十分かどうかを科学的客観性のある評価方法をもって確認する。耐震設計基準が定めているのは後段の評価方法であって、構造計画自体は、設計者、設計組織の裁量によって行われる。

損傷モードと評価は1対1に対応するものであり、損傷モードを考えずして構造を計画し、意味を理解せずして評価を行った結果は、耐震設計が適切に行われたことを意味するものではない。評価の方法を誤れば、弱点を残すことにもなる。配管系の場合には、構造と地震の影響の受け方が様々で、損傷モードも多様であって、構造計画における定性的な配慮が特に大切なこととなる。

配管系の耐震設計において構造計画を適切に

行うには、配管系の地震被害の要因と地震の影響の軽減方法についての体系的な知識を必要とする。このことは、既設プラントの配管系の耐震性を改善する場合においても同様である。

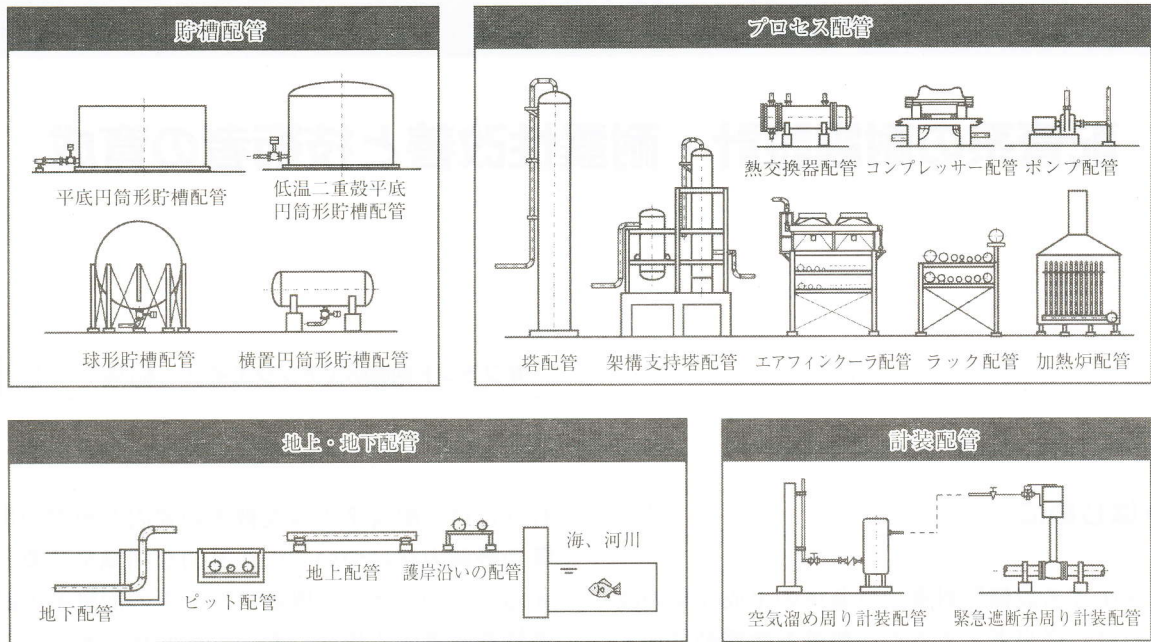
本稿では、はじめに配管系の耐震設計について述べ、次に配管系の地震被害の要因と地震による影響の軽減方法について述べ、次いで既設プラントの配管系の耐震性改善について述べ、そして当面の課題である耐震ウォークダウンと技術者の育成について述べ、最後に地震の影響の軽減例を示すこととしたい。

◆配管系の耐震設計

1. 配管系の構造

プラントの配管系は、塔槽類などの支持構造物の構造的長やプロセス上の要求に応じ、様々な構造を成している。それらのうちの主なものを、支持構造物との取り合いを含めて第1図に示す。

貯槽配管やプロセス配管は支持構造物の地震応答を介して地震の影響を受け、複数の設備、構造物間を渡る配管は、相対変位を含め、両者の影響を受ける。貯槽の受払配管などは、地盤変状の影響を特に受けやすい。地下に埋設された配管は地盤の振動や流動の影響を直接受け、護岸近くに敷設された配管は、護岸が移動したときに地盤の沈下、水平移動の影響を強く受ける。ね



第1図 プラントの配管系の構造^{①)}

じ込み継手の計装配管は、相対変位の影響を受けやすい。プラントの配管系は、このように設備周りなどの構造の種類に応じて地震の影響の受け方が異なり^{①)}、後述する損傷モードに関係してくる。

2. 配管系の地震による影響

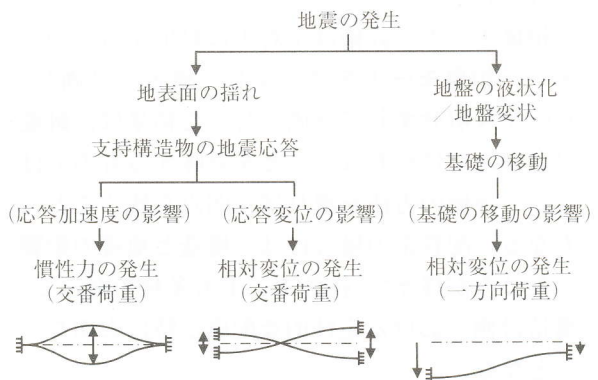
構造物に支持された配管系が地震によって受ける影響には、次のものがある^{②)}。

- 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（地盤の沈下・水平移動、地盤定数の低下）が起きたときの支持構造物の基礎の移動（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
- ⑤ 支持構造物の倒壊、崩壊、滑動による配管系への影響
- ⑥ 周辺構造物の倒壊、崩壊、滑動による配

管系への影響

- ⑦ 上方からの物の落下による配管系への影響

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。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。大口径配管の移動に伴って小口径配管が他の構造物に接触すれば、新たな支



第2図 構造物に支持された配管系の地震による影響^{②)}

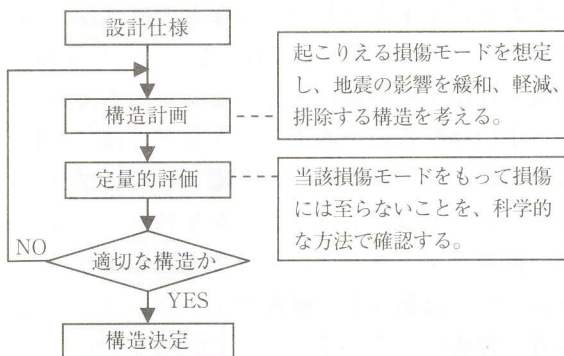
持点となる。ここで、②と③はいずれも相対変位による影響であるが、前者は交番（繰り返し）の荷重であるのに対し、後者は一方向の荷重であることに違いがある（第2図）。混同を避けるため、以後は②を応答変位による影響、③を地盤変状による影響と呼んで区別することとする。

3. 配管系の耐震設計

(1) 耐震設計の流れ

構造物が地震の影響を受け、どこがどのように壊れていくかを損傷モード（破壊モードともいう）という。耐震設計では、冒頭にも述べたように、まずは起こりうる損傷モードを頭に描き、そうした損傷モードで破壊に至ることのないよう、地震の影響を緩和、軽減、排除する構造（形状、寸法、板厚、材質）を考える。これを構造計画という。そして、そうしたモードで損傷する可能性が十分に小さいことを科学的な方法で確認する。その流れは、第3図に示すとおりとなる。同種のことは、自重、圧力脈動、熱膨張などに対する設計で行われてきている。配管系の耐震設計は、配管設計の一環として、これらの荷重に対する設計と併せて行われることになる。

構造計画の段階で、起こりうる損傷モードを見逃していれば、地震に対する弱点を残すことになる。したがって、信頼性の高い耐震設計を行うには、構造計画において構造の種別に応じた主要な損傷モードを的確に把握することが必要となる。



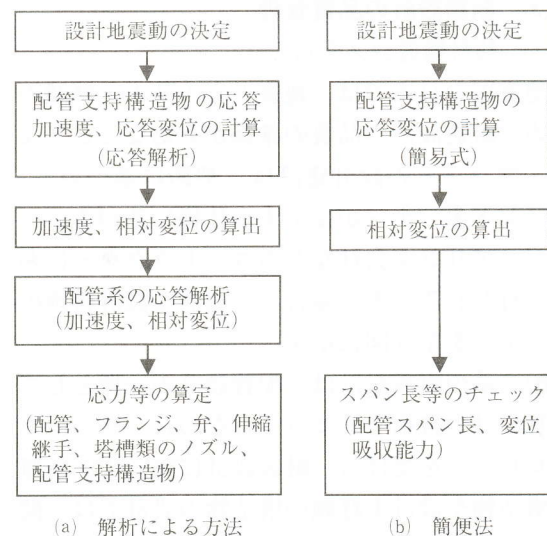
第3図 耐震設計の流れ

(2) 耐震設計基準と構造計画

① 高圧ガス設備等耐震設計基準の耐震性能評価の流れ

耐震設計における定量的評価の方法は、標準的な方法が国の基準や学会の規準などに定められる。高圧ガス設備等耐震設計基準が定める配管系の耐震性能評価の流れを、慣性力、応答変位に対するものについて第4図に示す。

プラントの配管系の構造的特徴は本章の第1節で述べた。配管系の動的な応答を厳密に評価しようとする、塔槽類などとの連成モデルを作成したり、あるいは塔槽類の時刻歴応答解析を行って配管支持点の応答スペクトルを作成したりするなど、大変な手間がかかる。配管系の数量が膨大であることを考えると現実的でないし、モデル化の誤差も重畳する。幸い、鋼製の配管はエネルギー吸収能力に優れ、適切に構造計画がされていれば、たとえ共振したとしても容易には損傷しない。高圧ガス設備等耐震設計基準も、応答変位に対してのみならず、加速度に対しても静的解析でよいとし⁽²⁾、重要度が低ければスパン長のチェックなどの簡便法でもよいとしている。



第4図 配管系の耐震性能評価の流れ（高圧ガス設備等耐震設計基準）

② 耐震性能評価と構造計画

静的解析に基づく耐震性能評価では、慣性力の影響についてはエルボのフレキシビリティを考慮した3次元梁モデルに地震荷重を作用させ、応答変位の影響については同モデルに相対変位を与え、各部位に生じるモーメントを求めて応力等を算出し、配管系の各構成要素に対して個別の評価を行う。これによって、配管系に地震に対する強度的な弱点があれば浮き彫りにされる。

これに対し、簡便法では慣性力、応答変位それぞれについて、工学的判断のもとに有効なスパン長をもって耐震性能を評価する方法がとられ、各部位の個別の評価は行われない。配管系の数量が膨大であることに鑑み、構造計画が適切に行われることを前提に、評価の簡便化が計られたといえよう。設計者、設計組織は、構造計画の裁量、責任は自らにあることを、再認識する必要がある。構造に応じ、簡便法では信頼性が低いと判断されれば、解析などの方法で補えばよい。これも設計者、設計組織の裁量である。

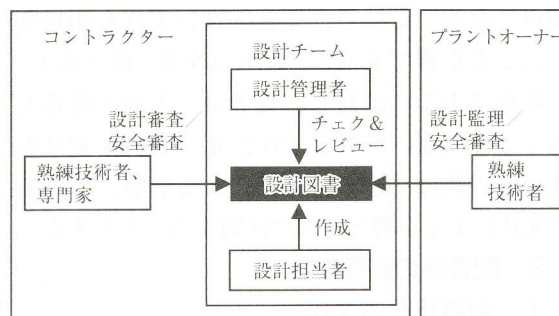
なお、解析による場合も簡便法による場合も、後述する他構造物との干渉などの影響は評価されない。これらは別に配慮、検討することが必要となる。

(3) 耐震設計の品質管理

① 設計管理システム

地震国の日本では、地震災害の防止・軽減のため、耐震設計の品質の確保が大切なこととなる。プラントの設計建設は、契約に基づいて、プラントオーナーが提示する仕様に基づき、エンジニアリング会社などのコントラクターにおいて行われる。その場合の一般的な設計管理のシステムを第5図に示す。

配管系の耐震設計は、配管設計の一環として配管設計の技術者によって行われ、チェック&レビューを受ける。耐震設計に限らず、複雑な構造物や設計未経験の構造物の設計では、関連の熟練技術者、専門家が参加し、設計審査が行われる。事故を起こした場合の影響度が大き



第5図 プラントの設計管理のシステム

い設備については、設計、製造、建設工事の各段階で、安全審査（安全性に着目した審査）が行われる。プラントオーナーはコントラクターによる設計作業を監理し、必要と判断された場合は安全審査を要求し、自らも参加する。

設計管理のシステムが機能するには、関係する技術者が、その役割を果たすに必要な能力を備えていることが必要となる。新しい要求が生まれれば、あるいは必要と判断されれば、これに応えるための教育・訓練と標準化が必要となる。破壊的地震を想定した配管系の耐震設計などは、その1つである。

② 建設工事後の耐震性の確認

耐震設計の品質管理において留意すべきことの1つに、自重、熱膨張などの通常荷重に対する設計とは違って、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点がある。地震に対する弱点を残してはいないか、隣接構造物との干渉の可能性はないか、設計で意図したとおりに工事が行われたかなどの確認は、ラインチェックの一環として行われることになる。保温・保冷工事の前に実施するのが基本であるが、小口径配管の干渉チェックなどは後にも行った方がよい。安全審査の一環として、プラントオーナーとコントラクターが単独あるいは共同で耐震ウォークダウンを行う方法もあり、これについては第5章（耐震ウォークダウンと技術者の育成）で述べる。

◆ 配管系の地震被害の要因と地震による影響の軽減

耐震設計では、損傷モードを想定した構造計画が大切であるということを前述した。配管系の損傷モードは過去の地震被害の経験から明らかにされ、都度報告されてきている⁽³⁾。筆者は自ら見聞したものを含め、主たる要因が配管要素及びサポートにある場合と配管系にある場合とに分け、実務的立場から整理し、配管固有のエネルギー吸収能力、変位吸収能力との関連付けも行い、地震の影響の軽減方法を一般論としてまとめている⁽¹⁾。ここでは、その要因別の損傷モードと地震による影響の軽減方法を表にまとめる。詳しくは文献(1)を参照されたい。

1. 配管系の地震被害の要因

配管系の地震被害の典型例を、配管要素及びサポートに要因があるもの、配管系に要因があるもの、支持構造物、隣接構造物等に要因があるものに分けて説明する。典型例の中には、漏洩には至らなかったものも含む。

(1) 配管要素及びサポートに要因がある地震被害

配管要素に要因がある地震被害とサポートに要因がある地震被害の典型例を第1表に示す。

配管要素に要因がある地震被害には、脆性材料であることによるものと、局所に相対的弱部

があるものとがある。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ているが、配管の局所に相対的な弱部があれば、当該エネルギー吸収能力が発揮される前に損傷する。配管材料に脆性材料が使用されていれば、塑性変形によるエネルギー吸収能力は期待できない。

サポートの構造に要因がある地震被害には、配管サポートの損傷によるものと、機器サポートの損傷によるものとがある。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

第2表 配管系に要因のある地震被害

慣性力に対するサポート不足による地震被害
① 大口径配管の揺れ、滑動に基づく相対変位による小口径分岐配管の損傷
② 配管のパイプラックからの落下と、これによる配管及び直下弱小構造物の損傷
③ パイプシューの脱落と、揺れ返し、熱収縮による配管の損傷
④ 配管の大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
⑤ 緊急遮断弁頭部の大揺れに基づく相対変位による計装配管の損傷
⑥ 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
⑦ 塔槽類頂部の大気放出弁の配管の損傷
応答変位に対する可撓性不足等による地震被害
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
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
③ 球形貯槽の球殻の揺れに基づく球殻と配管支持架台間の相対変位による配管の損傷
④ 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
地盤変状に対する可撓性不足等による地震被害
① 直接基礎の貯槽の沈下に基づく相対変位による配管の損傷
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
③ 独立基礎のポンプの沈下に基づく相対変位による鑄鉄製ポンプのノズル、ケーシングの割れ
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
⑤ 変位吸収限界を超える相対変位が加えられた可撓管の損傷
⑥ 可撓管の変位吸収限界を超える相対変位が加えられた配管系のフランジからの漏洩
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
⑧ 地盤の沈下、移動に基づく相対変位による埋設配管立ち上がり部の損傷

第1表 配管要素、サポートに要因のある地震被害

(1) 配管要素に要因のある地震被害
① 溶接欠陥のある溶接継手部の亀裂、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、引抜
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 鑄鉄弁の割れ
⑦ 劣化（減肉、割れ、脆化）した部位の亀裂、割れ
(2) サポートに要因のある地震被害
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、モーメントの増大、小口径配管などへの波及
② 劣化（腐食など）したサポートの損傷とこれに伴う配管の揺れ、モーメントの増大、小口径配管などへの波及

機能しなかったことによる。機器サポートに要因のある損傷については(3)項で述べる。

(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の典型例を、慣性力に対するサポート不足によるもの、応答変位に対する可撓性不足等によるもの、地盤変状に対する可撓性不足等によるもの(接触によるものを含む)に分けて第2表に示す。

慣性力の影響による被害は、多くは母管の揺れや滑動による二次的被害(小口径分岐管の損傷を含む)であって、自らの慣性力で母管自体に亀裂が入った事例は少ない。

地盤変状による相対変位は一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、広範囲で被害を生じる。

(3) 支持構造物、隣接構造物等に要因がある地震被害

支持構造物、隣接構造物等に要因がある地震被害の典型例を第3表に示す。架構等に支持された機器(塔槽類、ボイラを含む)の揺れ止めサポートが損傷すると過大な揺れが配管側に影

第3表 支持構造物、隣接構造物等に要因がある地震被害

隣接構造物に要因のある配管系の地震被害
① 隣接する大口径配管の揺れ、滑動によって相対変位を加えられることによる小口径配管の損傷
② 地盤変状に伴って移動したサービスステージに衝突されることによる小口径配管の損傷
③ 地盤変状に伴って移動したサービスステージに衝突されることによる危険物タンク緊急遮断弁の計装ケーブル等の損傷
上方の構造物に要因のある配管系の地震被害
① 大口径配管の落下に伴う直下の小口径配管の損傷
② 貯槽間を渡る歩廊の落下による直下配管系の損傷
支持構造物に要因のある配管系の地震被害
① パイプラックの倒壊に伴うラック上の配管系の損傷
② 架構支持の塔の揺れ止めサポート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
③ 懸垂型ボイラ揺れ止めの損傷とこれに伴うボイラと架構間の相対変位の発生、これによる配管の損傷
④ 機器の固定用ボルトの損傷による機器の滑動、これに伴う相対変位による配管の損傷
周辺構造物に要因のある配管系の地震被害
① ボイラ煙突の倒壊に伴う直近の配管系の損傷

響を与える。

2. 配管系の地震による影響の軽減

配管系の地震被害をなくすには、配管要素及びサポートに弱点を残さず、配管系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軽減する工夫が必要となる。ここでは、地震による影響を軽減する基本的な考え方を、配管要素及びサポートの弱点の回避、慣性力・応答変位・地盤変状による影響の軽減、支持構造物、隣接構造物等の影響の軽減に分けて説明する。

(1) 配管要素及びサポートの弱点の回避

配管要素及びサポートの弱点を回避する方法を第4表に示す。配管要素の弱点を回避することは、破壊的地震に対し、配管系の塑性変形によるエネルギー吸収能力、変位吸収能力を確保するのに大切なこととなる。

第4表 配管要素及びサポートの弱点の回避

配管要素の弱点の回避
① 溶接管理(溶接欠陥の排除)
② 脆性材料の管理、使用制限(鑄鉄弁、塩ビ管に注意)
③ ねじ込み継手の管理、使用制限(モーメントの低減)
④ フランジ継手の管理(モーメントの低減)
⑤ 過剰板厚のエルボの不使用(楕円化効果の確保)
⑥ サポート反力受荷部の適切な構造(応力、歪の分散)
⑦ 断面縮小部の回避(応力、歪の分散)
⑧ 配管の保全(腐食などの劣化の防止)
サポートの機能維持
① サポートの溶接管理(隅肉溶接部)
② ボルトの保全(緩み防止、腐食防止)
③ サポートの保全(腐食防止)

(2) 慣性力・応答変位・地盤変状による影響の軽減

慣性力・応答変位・地盤変状による影響を軽減する基本的な考え方を第5表に示す。

配管の揺れを抑制するサポートには、アンカー、レスティング、ガイド、ストッパーなどが使用される。特殊なものとして、油圧式防振器、メカニカル防振器、ばね式防振器、エネルギー吸収サポートなどがある。これらについての詳しい説明は省略する。

第5表 慣性力・応答変位・基礎の移動による影響の軽減

慣性力による影響の軽減
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。
応答変位による影響の軽減
① 配管系に可撓性を付与して支持構造物間の相対変位を吸収する。 ② 支持構造物の応答変位の小さい位置、高さで配管を連絡する。 ③ 支持構造物の揺れを抑制する。
地盤変状による影響の軽減
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 液状化の防止対策、軽減策をとる。 ④ ①～③の組み合わせ

第6表 高温の配管系の耐震設計における注意事項

高温の配管系の耐震設計における注意事項
① 耐震設計用のサポートが、熱膨張による変位を吸収するための可撓性を阻害しない。 ② 熱膨張によって過大な配管反力が機器ノズルに作用するのを防ぐためのストッパー等が、地震で損傷しない。

高温（低温）ラインの配管系の耐震設計では、熱膨張（熱収縮）に対する可撓性を確保しつつ、慣性力による揺れを抑制することが必要となる。この場合の注意事項を第6表に示す。熱膨張による変位には追従し、慣性力には拘束点として働く支持装置として油圧式防振器などを使用する場合には、これらは応答変位に対しても拘束点として働くことに注意を必要とする。サポートと配管との間にガタ（間隙）を設けて熱膨張による変位の拘束を緩和しようとする場合には、ガタが大きくなると配管の揺れ幅も大きくなり、配管、サポート双方への衝撃力も増すことに注意を必要とする。

(3) 支持構造物、隣接構造物等の影響の防止、軽減

隣接構造物等の干渉の影響を軽減する方法、考え方を第7表に示す。配管設計の一環として

第7表 隣接構造物との干渉等による影響の軽減

隣接構造物の揺れ、滑動の影響の防止
① ガイド、ストッパーによる隣接大口径配管の揺れ、滑動防止 ② 固定支持による隣接構造物の滑動防止 ③ 弱小構造物の防護
上方からの物の落下の防止
① 上方の大口径配管の落下防止 ② 固定等による上方の積載物、付属物の落下防止 ③ 構造物間を渡る歩廊等の相対変位に対する配慮（スライド機構）
支持構造物の影響の防止
① 支持構造物の重要度を配管系に合わせる。 ② 支持構造物のエネルギー吸収能力を高める。 ③ 架構等に支持される機器の揺れ止めサポートの強度を確保する。 ④ 機器の固定ボルトの強度を確保する。
周辺構造物の倒壊の影響の防止、軽減
① 脆弱な大型の構造物は重要度の高い配管から離す。 ② 周辺構造物のエネルギー吸収能力を高める。

対処できるもの、全体のレイアウトで考えなければならぬもの、当該構造物の耐震設計で考えなければならぬものなどがある。

◆既設プラントの配管系の耐震性改善

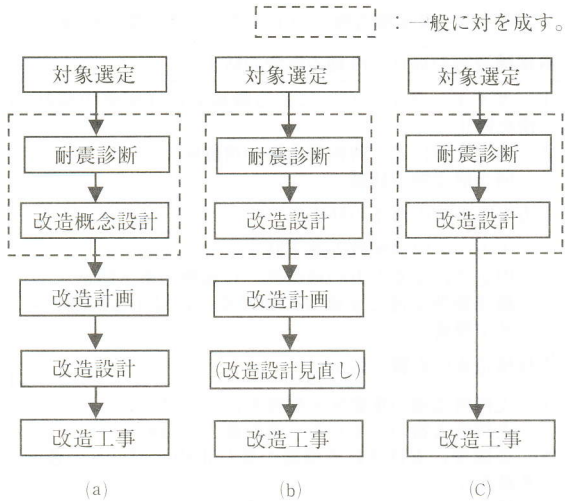
1. 配管系の耐震性改善の流れ

配管系の耐震性改善の流れを第6図に示す。流れは、

- ① 対象選定の後、耐震診断と改造概念設計を行い、その結果を基に改造計画を立て、順に改造設計、改造工事を行う方法
- ② 対象選定の後、耐震診断と改造設計を行い、その結果を基に改造計画を立て、必要に応じて改造設計の見直しを行い、順に改造工事を行う方法
- ③ 対象選定の後、耐震診断、改造設計、改造工事を一気に行う方法

など、いくつか考えられる。対象選定の前に、耐震性の実態把握のため、予備調査的な耐震診断を行うこともあろう。

対象の選定にあたっては、重要度が高いもの、その揺れ、滑動、落下が重要度の高いものに影響



第6図 配管系の耐震性改善の流れ

を及ぼす恐れのあるもの、などが優先されよう。重要度の高いものには、漏洩事故を起こした場合に予想される災害規模の大きいものの他に、保安・防災面で重要なものを含む。また、効率の面からエリア、セクションに分けて網羅的、同時並行的に行っていく方法もあろう。どのように進めるかは、プラントの規模、配管系の数量、定期修理の時期、リスク等に応じ、事業者の判断によるところとなる。

2. 配管系の耐震診断の流れ

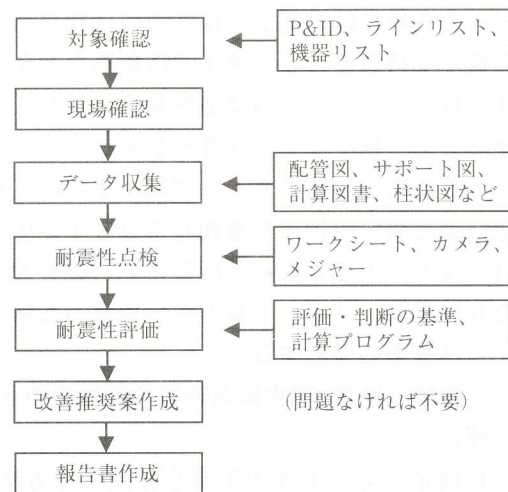
配管系の耐震診断の一般的な流れを第7図に示す。耐震診断は一般には耐震性評価までをいうが、必要と判断された場合には現場の状況に応じた改善案を併せて考えるので、改善推奨案の作成も流れの中に入れていく。以下、この流れに沿って説明する。

- ① 対象の確認：耐震診断の対象とするラインをP&ID上で確認する。
- ② 現場確認：現場でP&IDと実際の配管系とを照合する。また、耐震性点検（以下、点検という）のためのアクセスの方法など、点検を効率良く進めるための戦略を練る。現場の状況が分かっている、特別な準備は必要ないと判断されれば省略することができる。

③ データ収集：配管図、サポート図、配管支持構造物の耐震計算書、周辺地盤の柱状図（液状化の判定に用いる）など、診断に必要なデータを収集する。ライン上の計器、動機も併せて診断する場合、地震時（地震後を含む）に機能維持が必要かどうか明確にしておく。地盤の液状化が予想される場合の地盤、基礎の移動量や配管支持構造物の応答量などを事前に推測、評価しておけば、地震時の配管系の挙動を現場でイメージするのに役に立つ。概算でもよい。

④ 耐震性点検：現場を見てまわり、配管系に地震に対する弱点がないか目視で点検し、結果をワークシート（点検表）に記入する。気づいた点はメモし、必要に応じてスケッチし、写真撮影を行う。写真は点検の記録としての意味を持つほか、現場の状況を机上で思い起こすのに有用である。計器、動機の耐震診断も併せて実施する場合にあって、地震時に機能維持が必要とされるものがあれば、ケーブル、非常用電源など、系統の点検も別途行う。

⑤ 耐震性評価：点検結果を基に配管系の耐震性を総合的に評価する。データが不足していれば収集して補い、必要に応じて計算、



第7図 耐震診断の流れ

解析による定量的評価を行う。

- ⑥ 改善推奨案の作成：改善が必要と判断された場合、現場の状況に応じた改善推奨案を作成する。リスク低減の観点から、重要度が高い配管は裕度を大きくし、信頼性の高い推奨案とする。効果の度合い、難易度、経済性などから複数の案が考えられれば、その複数案を作成する。遮断弁の追加案な

ども含む。改造の概念設計といてよい。

- ⑦ 報告書の作成：耐震診断の結果を報告書にまとめる。ワークシート、計算書、改善推奨案、等が添付図書となる。P&IDに現場との不一致があれば、当該箇所の修正を含む。改造設計を含めた報告書にするのであれば、⑥の段階で設計図書を作成し、併せて材料集計を行う。

第8表 耐震診断のチェックポイントと視点

チェックポイント		視 点		
配管要素	配管要素	材料、劣化	脆性材料（鋳鉄弁、塩ビ管）を使用していないか。 配管に著しい劣化（減肉、割れ、脆化）はないか。	
		継手	溶接継手に溶接欠陥はないか。	
			曲げモーメントが大きいところにフランジ継手が使われていないか。 相対変位が生じるところにねじ込み継手が使われていないか。	
	局部構造	サポート反力受荷部は適切な構造か。		
		過剰板厚のエルボを使用していないか。 局部的な断面縮小部はないか。		
	サポート	劣化、強度	サポートは劣化していないか。 強度は十分か。	
		定着部	溶接強度は十分か。	
			ボルトは腐食していないか、緩みはないか。	
	配管系	慣性力	曲げモーメント等	配管に高応力、高歪が発生しないか。 機器ノズルに過大な反力が作用しないか。
			揺れの影響	過大な揺れにより、分岐管に相対変位を与えることはないか。 過大な揺れにより、隣接弱小構造物に衝突するようなことはないか。 過大な揺れにより、スプリングハンガーを損傷させ、自ら落下する恐れはないか。
滑動の影響				ラック上を滑動し、分岐管に相対変位を与えるようなことはないか。 ラック上を滑動し、隣接弱小構造物に衝突するようなことはないか。 ラック上を滑動し、落下する恐れはないか。
相対変位		曲げモーメント等	配管に高応力、高歪が発生しないか。 機器ノズルに過大な反力が作用しないか。 フランジ継手に大きな曲げモーメントが作用しないか。 ねじ込み継手に相対変位が作用しないか。	
		地盤変状	曲げモーメント等	配管に高応力、高歪が発生しないか。 機器ノズルに大きな反力が作用しないか。 フランジ継手に大きな曲げモーメントが作用しないか。 ねじ込み継手に相対変位が加わらないか。
			移動	母管が水平移動したときに小口径管が他構造物に衝突しないか。
限界吸収能力		可撓管の変位吸収限界を超える相対変位に対して配管系に可撓性はあるか。		
構造物		隣接構造物	揺れ	大口径配管等の隣接構造物が大きく揺れたり、滑動したりし、衝突されたり相対変位を加えられたりすることはないか。 地盤変状に伴ってサービスステージ等がぶつかってこないか。
			支持構造物	倒壊、崩壊
		周辺構造物		倒壊、崩壊
	上方重量物	落下	上方から重量物が落ちてくる可能性はないか。	

3. 耐震診断のポイントと改造の留意点

(1) 耐震診断のポイント

前章で配管系の地震被害の要因と地震による影響の軽減方法を述べた。これを問いの形にまとめなおしたのが第8表である。これはエキスパートが耐震診断を行うときの視点に他ならない。個別の診断では、想定される損傷モードに応じ、つまり構造の種類(第1図)に応じ、重点となるチェックポイントは変わってくる。

保温・保冷配管の腐食などによる劣化の点検についてはできるだけ保全の記録を活用する。応力、歪のチェックはサポートスパンのチェックなどの簡便法でよく、グレーゾーンにあって改造する場合の経済的影響が大きい場合などは解析による検討を加える。

ワークシートには、耐震診断のチェックポイントを記しておく点検の漏れを防ぐことができる。受動的なチェックシート方式(チェックシートに記載された一般的な視点に答えていく方式)と能動的なキーワード方式(キーワードから状況に応じた視点を発想する方式)があり、初心者には前者が、エキスパートには後者が適している。

(2) 改造の留意点

既設の配管系の改造は、サポートの取り外しなどは比較的容易であるが、架空配管のサポートの追加、さらには配管形状の変更になると、新設の場合とは違ってスペースなどに制約があり、困難を伴うことが多くなる。また、改造する場合には、新たな弱点を作ったりしないよう、パイプラックなどの支持構造物への影響も含めて考えることが必要となる。経済的影響が大きい場合には、リスクを考えての判断となる。抜本的改造の困難さを考えれば、建設時における耐震設計の品質確保の重要性が認識されよう。

◆ 耐震ウォークダウンと技術者の育成

1. 耐震ウォークダウンに必要な知識・経験 耐震診断、耐震性改善の要は現場での耐震性

点検にある。米国では、この現場での耐震性点検を耐震ウォークダウン(Seismic Walk-down)と呼んでいる⁽⁸⁾。ラインにそって現場を歩きながら点検するという意が伝わってくるので、ここではこの用語を用いることにする。

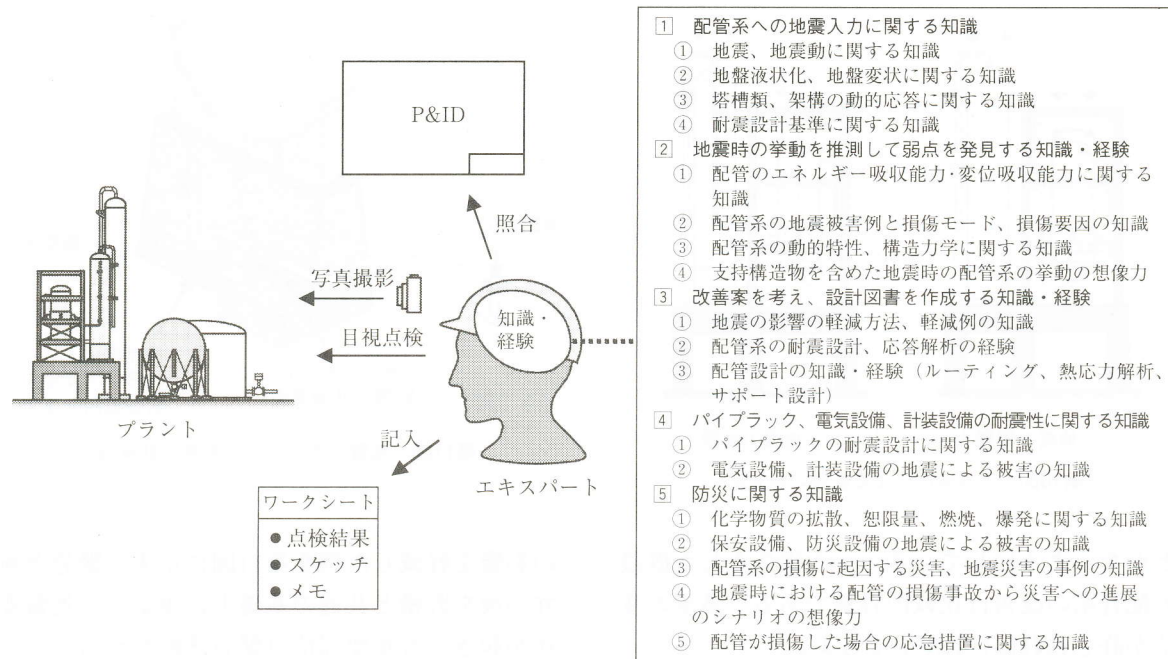
前章で、配管系の耐震性点検における主なチェックポイントを表(第8表)にまとめた。概念的には理解できようが、実際に行うには相應の知識・経験を必要とする。配管系の耐震ウォークダウンとエキスパートの知識・経験を構図にして表わすと、第8図のようになる。配管系だけであれば③まで、ライン上の計器、動機及びパイプラックを含めるのであれば④まで、配管が損傷した場合の防災体制まで含めるのであれば⑤までの知識・経験が必要となる。

これらの知識・経験は1人で有している必要はなく、チームとして有していればよい。例えば、①、②の知識・経験を有する機械系の耐震設計の専門家と、②、③の知識・経験を有する配管設計の熟練技術者との組み合わせなどである。地盤変状やパイプラックとの関連が強い場合には、土木・建築系(地盤、基礎、架構関係)の耐震設計の専門家が加わればよい。⑤を含める場合にあって、耐震設計の専門家に災害想定に関する十分な知識・経験がない場合には、安全性解析の専門家が加わればよい。

2. 技術者の育成

耐震ウォークダウンは、設計を終えている配管系に改善すべき点がないかどうかを第3者が見て判断するのであるから、設計段階における設計審査、安全審査と同じような要素・側面がある。また、腐食などの劣化の状況については、全体の耐震性にどのような影響を及ぼしているかを考えることが必要となる。耐震ウォークダウンの成果の大きさは、実施する人、チームの知識・経験の深さに依存するといえよう。

他構造物との干渉の回避などは、設計段階で完全を期すことは容易でない。配管系の耐震ウォークダウンの経験は、既設プラントの配管系



第8図 配管系の耐震ワークダウンとエキスパートの知識・経験

の耐震性の維持・改善のみならず、新設プラントにおける設計、設計審査、設計監理、安全審査などにも生かされよう。配管工事を終了後に耐震ワークダウンを実施すれば、配管系の耐震設計の総合的な品質検査の手段となる。

耐震ワークダウンの対象は、機器、配管系、支持構造物に限定することなく、安全設備、防災設備、非常用ユーティリティ設備、さらには防災体制にまで拡張することができる。ベテランと若手でチームを編成すれば、技術の伝承の手段ともなる。

既設プラントの膨大な数量の配管系の耐震性改善と、新設プラントの配管系の耐震設計の品質確保のために、耐震ワークダウンを効果的、効率的に実施できる専門家、技術者を育成することが望まれる。

◆ 配管系の地震による影響の軽減例

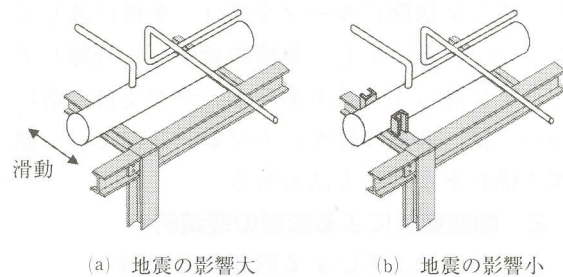
配管系の耐震設計は構造計画が大切であることを再三述べた。次に示す事例⁽⁴⁾⁽⁵⁾から、その

ことが理解されよう。他の事例については、他の文献(2)、(6)、(7)を参照されたい。地震の影響を軽減する方法は状況に応じて数多く考えられ、設計者、設計組織は、自らの設計思想をもつことが大切である。

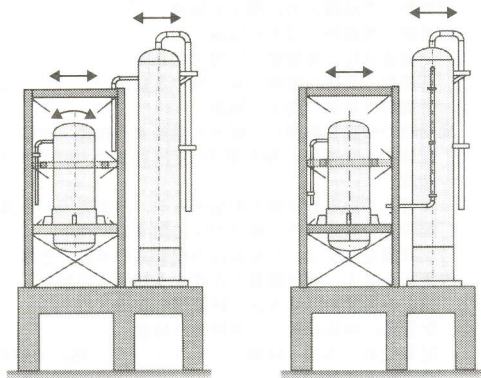
1. 慣性力、応答変位による影響の軽減例

(1) 慣性力による影響の軽減例

慣性力の影響の軽減例を第9図(b)に示す。パイラック上の大口径の配管にガイドを設けて滑動を防止し、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（小口径配管など）に衝突したり、架構から落下したりするこ



第9図 慣性力による影響の軽減例⁽⁴⁾



(a) 地震の影響大 (b) 地震の影響小
第10図 応答変位による影響の軽減例⁽⁴⁾

とがないようにしている。(a)の構造をした既設の配管系の改善は比較的容易である。多少の変位が許されればUボルトでもよい。

(2) 応答変位による影響の軽減例

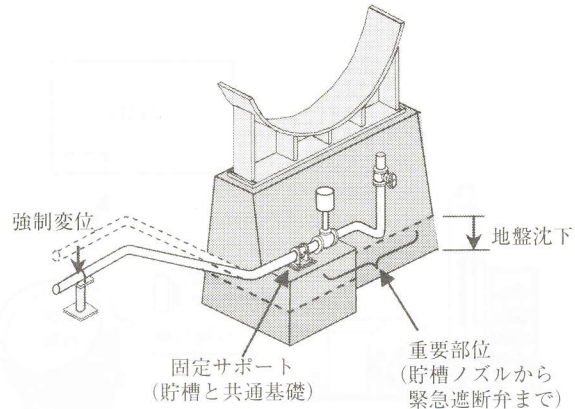
応答変位による影響の軽減例を第10図(b)に示す。塔から架構に渡る配管が相対変位の影響を受けないよう、応答変位の小さい位置まで降ろしてから架構側に渡している。また、ラグ支持の塔の頭部に振れ止めを設けてロッキングを抑制するとともに（重心から離れた位置で梁に定着されたラグ支持の塔は、振れ止めがないと梁を回転ばねとして揺れる）、振れ止めの間隙分の相対変位を吸収できるようにしている。ラグ支持の位置を重心近くにしてロッキング振動を起こりにくくしてもよい。

(a)の構造をした既設の配管系を改善しようとする場合には、塔から架構に渡る配管については少し振ってから塔に沿わして降ろしてもよいし、塔と架構間にループを設けて架構に渡してもよい。状況に応じ、架構の梁から十分離してから下に降ろす方法もあろう。ラグ支持の塔については、四方の柱からのブレースによって頭部の揺れを止める方法もある。

2. 地盤変状による影響の軽減例

(1) 基礎の沈下による影響の軽減例

横置円筒形貯槽の払出配管について地盤変状



第11図 地盤の沈下による影響の軽減例⁽⁵⁾

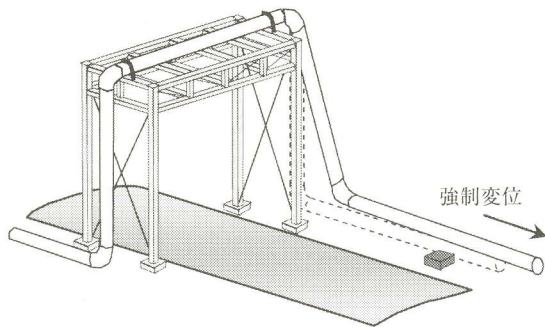
の影響を軽減した例を第11図に示す。緊急遮断弁の後を貯槽と共通の基礎上に固定し、地盤変状が起きても重要部位（緊急遮断弁からノズルまで）に影響が及ばないようにしている。固定サポートの後の配管については、エルボと直管で可撓性を確保し、配管反力を小さくして固定サポートの設計を楽にしている。既設配管系の耐震性を改善する場合にも、改造案の1つとして考えられよう。

(2) 基礎の移動による影響の軽減例

護岸近くで大規模な地盤の液状化が起きると、護岸が海側にせり出し、受払配管がその影響を受けたりする。道路横断部を利用して護岸方向の相対変位を一旦吸収し、設備周りに及ぶ影響を軽減した例を第12図に示す。既設の配管系で類似のものがあれば、こうした効果が期待できよう。配管の移動に伴ってドレン弁などが障害物に衝突しないよう配慮することは別に必要である。

◆おわりに

昭和56年に高圧ガス設備等耐震設計基準が制定された後、既存設備（スカート支持の塔、横置円筒形貯槽、球形貯槽、平底円筒形貯槽）の耐震性点検・耐震性向上対策指針が発行され、



第12図 地盤の水平移動による影響の軽減例⁵⁾

耐震性の総点検が行われた。平成9年の基準の改正によって配管系が適用対象に加わったことに伴い、配管系についても同種の点検（耐震診断）が行われる見込みとなっている。

米国では、プラント災害の防止のため、事業者はリスクマネジメントプランを作成することとされている。地震の多いカリフォルニア（加州）では、その一環として、建設を終えたプラントに対してResponsible Engineer（RE）が定期的に耐震ウォークダウンを行い、事業者はその結果とフォロー状況を行政機関に報告することとしている。REに特別な資格試験はないが、耐震設計の経験のある土木、建築、機械系のPE（Professional Engineer）であることが求められ、コンサル会社が多数生まれている。

日本には米国加州におけるような仕組みはなく、REに相当する専門家が育成されているとは言い難い。配管系に潜在している弱点に気づき、現場の状況に応じた改善案を考えるには、相応の知識・経験を必要とする。関係組織は、その立場に応じて、技術者の教育から始めることになろう。

配管系の耐震診断の機会をとおして、配管系の耐震設計を担う配管設計の技術者、耐震性の維持・改善を担う設備保全の技術者、そして設備全体の耐震性の調和を担う耐震設計の専門家が育成されることが、期待される。

<参考文献>

- (1) 稲葉：“過去の地震被害から学ぶ配管系の耐震設計”、配管技術、増刊号650、Vol.47、No.11（2005.9）
- (2) 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）
- (3) たとえば、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）
- (4) 稲葉：“配管系の耐震設計と地震防災”、石油学会誌PETROTECH、Vol.29、No.07（JUL.2006）
- (5) 稲葉：“石油精製・石油化学プラントの地震防災のマネジメント”、日本地震工学会誌JAE、1、(1)、21（2005）
- (6) 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 付属資料（1998.3）
- (7) 配管系の耐震構造計画、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、高圧ガス保安協会（1997.11）
- (8) CalARP PROGRAM SEISMIC GUIDANCE COMMITTEE, GUIDANCE FOR CALIFORNIA ACCIDENTAL RELEASE PREVENTION (CalARP) PROGRAM SEISMIC ASSESSMENTS, Jan（2004）

【筆者紹介】

稲葉 忠

(有)プラント地震防災アソシエイツ 代表

〒260-0024 千葉市中央区中央港1-13-1

千葉県ガス石油会館2F

TEL：043-244-7818

E-mail：inaba@pedpa.co.jp