

配管系の耐震診断概論

(有)プラント地震防災アソシエイツ

稲葉 忠

配管系の耐震診断概論

有限会社プラント地震防災アソシエイツ 稲葉 忠
(日本機械学会フェロー)

平成9年に高圧ガス設備等耐震設計基準が改正され、配管系が適用対象に加われました。これに伴い、既存配管系の耐震診断が課題となりました。平成25年度には高圧ガス保安協会に配管系の耐震診断の推進に関する委員会が発足しました。耐震診断マニュアルはできていましたが、導入部が不足しているように感じられたので、配管系の耐震診断の概論を作成し、説明しました。弊著論文から要点をピックアップしたものです。この概論は業界別のマニュアル説明会でも使用されました。配管系の耐震診断の概念的理解に役立つと思いますので、若干加筆し、ここに再録します。付録としてワークシートの例も加えました。読みやすいよう、「である調」は「です調」に変えています。

1 配管系の耐震設計

1.1 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、次のものがあります⁽¹⁾。

- 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

1.2 耐震設計と構造計画

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）といいます。耐震設計では、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）を考えます。これを構造計画といいます。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します。その流れは図1に示すとおりとなります⁽³⁾。

耐震設計基準が定めているのは後段の定量的評価の方法であって、構造計画自体は、設計者、設計組織の裁量によって行われます。また、基準が定めるのは、①、②、③、及び⑤の評価方法までであって、④、⑥、⑦の影響、つまり周辺構造物との干渉の影響の評価については、設計時点で行うことは難しく、規定はされていません。

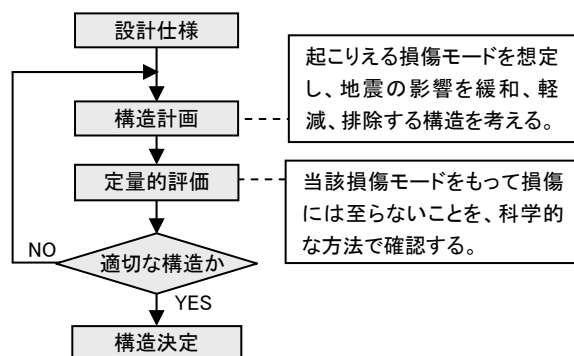


図1 耐震設計の流れ⁽³⁾

2 配管系の耐震診断

2.1 耐震診断の流れ

配管系の耐震診断の一般的な流れを図2に示します⁽³⁾。耐震診断は一般には耐震性評価までをいいますが、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きます。

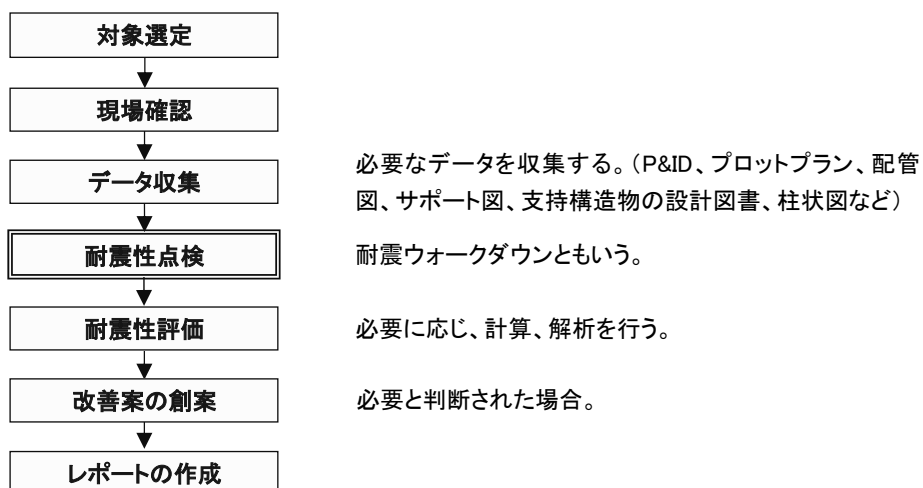


図2 配管系の耐震診断の流れ⁽³⁾

2.2 現場の耐震性点検

配管系の耐震性点検では、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)に記入します。気づいた点はメモし、必要に応じてスケッチし、写真撮影を行います。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す。

3 耐震診断のポイント

3.1 耐震診断のチェックポイント

過去の地震被害の経験に基づいた配管系の耐震診断のチェックポイントを表1に示します⁽³⁾。埋設配管は対象外としています。耐震性点検では、現場を見ながら、こうした視点で点検を行います。

設計では見ることができなかった周辺構造物との干渉も点検できます。

配管系の主たる損傷モードは配管系が接続される設備(配管支持構造物)の種類によって変わってきます。個別の診断では、想定される損傷モードに応じ、つまり接続される設備の種類に応じ、重点となるチェックポイントは変わってきます。

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します。定量的評価の方法には、①類似事例の実績に基づく判断、②簡易図表を用いた判断、③詳細解析による評価などがあります。どの方法によるかは、重要度、配管サイズ、構造、経験(実績)などによることとなります⁽⁴⁾。

表1 耐震診断のチェックポイントと視点⁽³⁾

チェックポイント			視 点
配管要素、サポート	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、小口径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	支持構造物が倒壊、崩壊する恐れはないか。
			機器の揺れ止めサポートが損傷し、大きな相対変位を加えられることはないか。
			基礎ボルトが破断、伸張して機器が傾斜、転倒、滑動し、相対変位を加えられることはないか
周辺構造物	倒壊、崩壊	周辺に脆弱な構造物があって、倒壊、崩壊の影響を受けることはないか。	
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。	

3.2 配管の種類と点検の難易度

配管系の耐震設計では、慣性力、相対変位、地盤変状の影響のほか、熱膨張（熱収縮）との調和、ノズル反力の制限、地震防災遮断弁の機能維持などの要素を併せて考慮する必要があります。このことは耐震診断でも同じであって、設計の難易度に応じて診断の難易度も高くなります。表2に大凡の傾向を示しますが、厳密なものではありません。

膨大な量の配管系について耐震診断を効率よく行うには、接続される設備の種類に応じ、的を絞って点検することが大切です。

表2 配管系の種類と耐震設計で考慮、配慮すべき要素

配管の種類		地震			熱膨張 又は 熱収縮	ノズル 反力の 制限	地震防災 遮断弁	設計の 難易度
大区分	支持構造物	慣性力	相対変位	地盤変状				
貯槽配管 (オフサイト)	平底(LPG)	○	(○)	○	○	(○)	○	高高
	平底(危険物)	○		○			○	高
	球形	○	○	○			○	高
	横置	○		○			○	中
プロセス配管 (オンサイト)	加熱炉・分解炉	○	(○)		○	(○)		中
	塔	○	○		(○)			低
	架構	○	(○)	(○)				低
	架構支持リアクター	○	○		(○)			中
	横置ベッセル	○		(○)				低
	縦置ベッセル	○		(○)				低
	熱交換器	○		(○)	(○)			低
	リボイラー	○	(○)		○			中
	エアフィンクーラー	○			○			中
	コンプレッサー	○			(○)	(○)		中
ポンプ	○		○				中	
入出荷設備配 管	栈橋	○		○				中
	タンクローリー積場	○						低
	タンク車積場	○						低
地上・地下配管	スリーパー配管	○		○				中
	架台上配管	○		○	(○)			中
	ピット配管	○		○				中
	埋設配管		(○)	○				中

3.3 改造の留意点

耐震性改善案を考える場合の注意事項を次に示します⁽⁴⁾。

(1) 通常荷重に対する設計との調和

配管の耐震設計では、温度の高い(低い)ラインでは熱膨張（熱収縮）との調和を、大きな反力を嫌う機器ノズルは反力の制限を、地震時に機能維持を必要とされる緊急遮断弁（地震防災遮断弁）の機能維持などの要素を併せて考えますが、これらのことは耐震診断でも同じです。このような配管の場合には、現場の状況から、当初の設計者の意図、思想を把握することが必要となります。

(2) 実現可能な最適な改善案

既設の配管系の耐震性改善は、サポートの取り外しなどは比較的容易ですが、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りますと、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ります。支持条件が変われば力の流れも変わります。耐震性改善のためのサポート、架台は地震荷重を受けとめるに十分な強度を確保することが必要です。

(3) エネルギー吸収能力を低下させない。

改造工事を行う場合には、架台などを含め、新たな弱点を作ったりしないよう、エネルギー吸収能力が低下しないように注意が必要です。

4 耐震診断に必要な知識・経験

4.1 耐震ウォークダウンの概念

耐震診断の要は現場での耐震性点検にあります。

配管系の耐震性点検におけるチェックポイントは表1に示した通りですが、実際に行うには相応の知識・経験を必要とします。

配管系の耐震性点検では、過去の地震被害の経験や耐震設計・解析の経験などを基に、地震が来た時にどのように揺れ、どのように変位を加えられ、あるいは周辺構造物とどのように干渉し合うのか、頭の中で想像しながら点検を行います。その概念図を図3に示します^{(3),(4)}。現場で歩きながら点検していくことから、ウォークダウン、あるいは耐震ウォークダウンともいいます。耐震診断の信頼性、成果の大きさは、実施する人、チームの知識・経験の深さに依存します。診断を実施する技術者は、体系的な知識を得るほか、実地の訓練を必要とします。

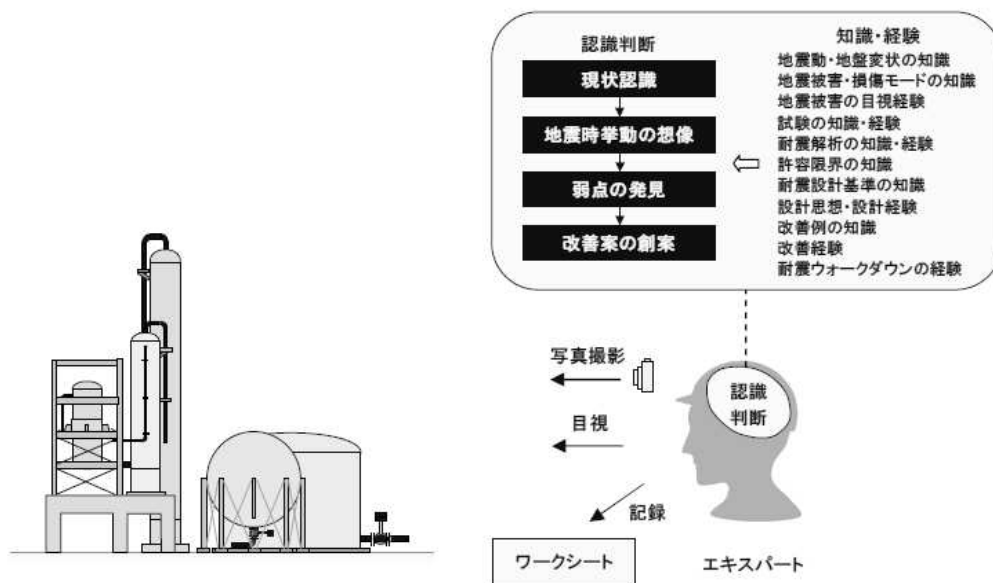


図3 耐震ウォークダウンの概念図^{(3),(4)}

4.2 ワークシート

耐震診断のワークシート（チェックシート）には、チェックポイントを記しておくことで点検の漏れを防ぐことができます。

ワークシートのフォームには、標準フォーム、診断者の熟練の度合いに応じたフォーム、配管が接続される設備の種類に応じたフォームなどがあります。

5 おわりに

以上、配管系の耐震診断について概論を述べました。詳しくは引用元の文献をご参照ください。

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、横置円筒型貯槽、球形貯槽、平底円筒型貯槽)の耐震性点検・耐震性向上対策指針が発行され、耐震性の総点検が行われました。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ます。

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ます。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 (以下、RE という)を含む点検チーム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ます。REに特別な資格試験はありませんが、耐震設計の経験を積んだ構造系の PE(Professional Engineer)であることが求められています。

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十分に育成されているとは言いがたいように思われます。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・経験を必要とします。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るでしょう。

配管系の耐震診断の機会をとおり、配管系の耐震設計を担う配管設計の技術者、設備の耐震性維持を担う設備保全の技術者、そして設備全体の耐震設計・耐震性改善の調整・調和を担う耐震設計の専門家の教育、育成が図られることが、期待されます。

引用文献

- (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) 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
- (3) 稲葉、配管系の耐震設計・耐震性改善と技術者の育成、検査技術、Vol. 13、2008. 10
- (4) (一社)日本高圧力技術協会 圧力設備診断技術者 レベル2 講習テキスト (改訂4版) 10章 配管系の耐震診断、2013 (10章 稲葉)

付録 — ワークシートの例

ワークシートのフォームには、本文中でも述べましたが、標準フォーム、診断者の熟練の度合いに応じたフォーム、配管が接続される設備の種類に応じたフォーム、さらにはプラントの種類別のフォームなどがあります。

このようにワークシートの形式は様々で、どんなフォームが使いやすいかは、使う人の熟練度、立場によって変わってきます。次に示すのは標準フォームの一例で、本文中の表1をベースに作成したものです。その他の例示はここでは省略します。

耐震ウォークダウン ワークシート (配管系)

ライン番号:	図面番号:	実施日:	実施者:
--------	-------	------	------

点検区分		点検項目		点検結果(1)			注 記	
大区分	小区分	点検項目	説 明	○	△	×		
配管	健全性	脆性 劣化・腐食 溶接欠陥	脆性材料が使用されていないか。					
			配管に著しい劣化、腐食はないか。					
			溶接継手に溶接欠陥はないか。					
		構造不連続	サポート溶接部は適切な構造か。					
			局部に断面縮小部はないか。					
			過剰板厚のエルボは使用されていないか。					
	慣性力	サポートス パン	サポート不足で配管が高応力を生じたり大きく揺れたりすることはないか。					
			配管が梁、架台から落下することはないか。					
		分岐部	地震荷重が分基部に集中して作用するようなことはないか。					
		弁(偏心重 量大)	駆動部が大きく揺れ、変形したり計装品を損傷させたりしないか。					
		継手	フランジ継手、ねじ込み継手に過大な軸力、曲げモーメントが作用し、漏洩することはないか。					
		機器ノズル	機器ノズルに過大な配管反力が作用し、弊害を生じることはないか。					
	相対変位	可撓性	配管系の可撓性は十分か。					
		可撓管	可撓管の変位吸収能力は十分か。					
		小口径配管	母管の揺れ、滑動で小口径配管が相対変位を加えられたり衝突したりすることはないか。					
		継手	フランジ継手、ねじ込み継手に過大な軸力、曲げモーメントが作用し、漏洩することはないか。					
		機器ノズル	機器ノズルに過大な配管反力が作用し、弊害を生じることはないか。					
	地盤変状	可撓性	配管系の可撓性は十分か。					
		可撓管	可撓管の変位吸収能力は十分か。					
		枝管	母管の移動に伴って小口径枝管が梁などに衝突することはないか。					
		継手	フランジ継手、ねじ込み継手に過大な軸力、曲げモーメントが作用し、漏洩することはないか。					
機器ノズル		機器ノズルに過大な配管反力が作用し、弊害を生じることはないか。						
サポート	腐食	サポートが腐食し、減肉していないか。						
	施工	ボルトの緩み、腐食、欠損などはないか。						
	強度	地震荷重に耐えられるか。						
干 渉	隣接構造物	大口径配管等の隣接構造物が揺れたり滑動したりし、衝突されることはないか。						
	支持構造物	支持構造物が倒壊、崩壊することはないか。						
		支持構造物のサポートが損傷し、揺れが増大して相対変位を加えられることはないか。						
	周辺構造物	周辺に倒壊の恐れのある脆弱な構造物はないか。						
上方構造物	上方から物が落下してくる恐れはないか。							

(1); 該当箇所に✓を入れる。(○:問題なし △:要検討 ×:要改善)

その他 コメント
