

計測制御系設備の耐震設計

株式会社 プラント耐震設計システムズ
池 田 雅 俊

1. まえがき

現状、石油精製、石油化学装置は、保安設備、安全設備を設け災害発生時に装置を安全が確保されている。この場合、計装・制御系の操作により設備を安全に緊急停止または安全な状態に移行し維持するよう設計がなされている。計装・制御系がその機能を喪失することは許されない。阪神大震災のように予想を上回る地震においては、予想されない場所に予想以上の外力が加わり故障や異常が生じ、現在の設計ではカバー仕切れないところが見られた。

計測制御系の耐震設計は、規制等により一律に対応できるわけではなく、装置の種類、条件に応じてきめ細かく地震防災に機能する計測制御系の要求耐震性能を設定していく必要がある。計測制御系の設備・部品に一律に耐震性を要求するのではなく、次のような項目を組み合わせ、地震の強さに応じた FTA、ETA などによりシステムとして総合的に地震時の安全性を確保してゆくことが実際的である。

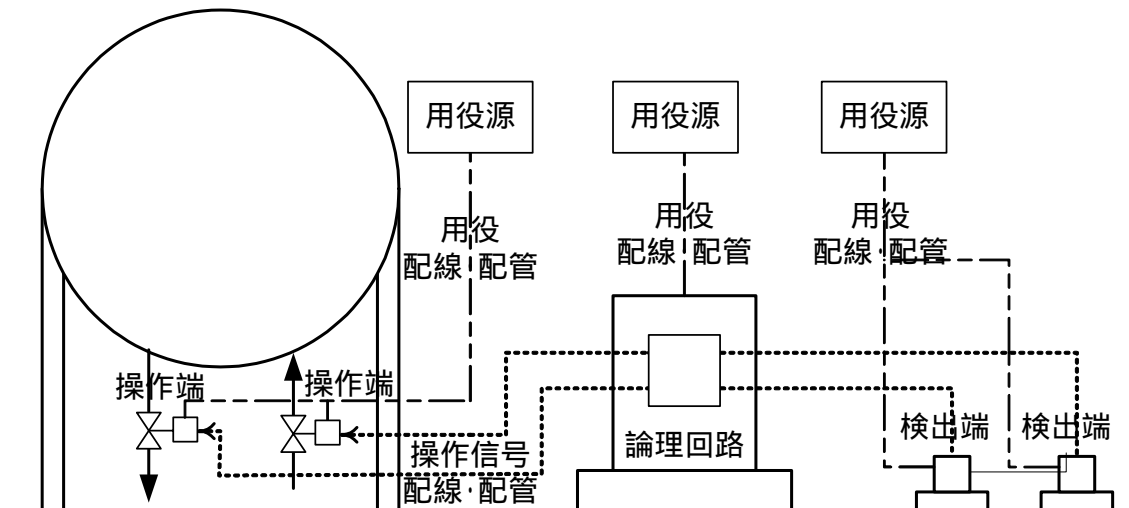
- (1) 設備要素・部品の耐震性能、すなわち、計測制御系及びその電源・空気源等のエネルギー供給・用役設備に関して個別の機器・部品ごとに地震動のレベルや許容条件などの耐震性能をきめ細かく付与する。
- (2) フェール・セーフ性能、すなわち、特定の部品が損傷して機能喪失しても設備として安全状態に移行できる性能を付与する。
- (3) 冗長性能、すなわち、信頼性を向上させるため重複機器や代替機器を設ける。
- (4) 地震動予見性能、すなわち、感震器や加速度計等により地震動を計測したりオンライン地震情報を入手して最大の揺れに達する前に要求動作を行う。

本稿では、(1) の設備要素・部品の耐震性能に関して、地震防災遮断弁（緊急遮断弁）を中心に、地震被害事例、耐震設計の現状及び耐震対策事例を紹介する。

2. 計測制御系及びその用役設備の地震被害

1.1. 計装・制御系統

計装・制御系統の概要について、地震防災遮断装置を例にとり説明する。



(1) 用役源系（操作源供給系統）

緊急遮断弁などの操作端は電動式や空気・油圧式駆動機構により動作する。操作端駆動用エネルギーの供給源は、それぞれ電源、圧縮機、ポンプ等である。操作端、エネルギー供給源およびこれらを結ぶ配管又はケーブルより構成される。

(2) 用役源系（電源系統）

動力源として電源系と計装用電源、計算機等の電源などがある。

通常は買電が多いが、地震時には自家発電やバッテリー・バックアップが行われることが考慮されている。

(3) 検出端系

例えば、地震防災遮断装置において地震動を検出して遮断弁閉動作をおこなう場合には、検出端は感震器や加速度計等をいう。

(4) 制御系

制御系は盤、論理回路、計算機、DCS (Distributed Control System) 及び信号を伝達するケーブル等から構成される。

(5) 操作端系

操作端系は、地震防災遮断弁や調節弁及びこれらの操作を行うための駆動装置、エアホルダー、電磁弁等の現場機器類をいう。

(6) 配線系

用役源系の電源ケーブル及び制御系・検出系の信号ケーブルがある。

(7) 配管系

用役源系に関する配管系で、用役源供給装置と操作端を結ぶ配管系である。

1.2. 配管系の地震の影響

地震防災遮断弁の空気供給系配管に関して、地震時の影響を説明する。

計装・制御用配管系についても、プロセス配管系の地震被害事例と同様に、地震時には下記のような影響を受ける。

- (1) 地震動による配管の揺れに起因する慣性力の作用
- (2) 地震動による配管支持構造物の揺れに起因する強制変形
- (3) 地震動による母管・弁駆動部の揺れに起因する強制変形
- (4) 地盤変状による基礎の移動・傾斜に起因する強制変形
- (5) 地盤変状による基礎等の損傷
- (6) 支持構造物の転倒・倒壊
- (7) 周辺構造物の転倒・倒壊
- (8) 上方からの落下物・周辺構造物の滑動による干渉・衝突

一方で、計装・制御用配管系は、プロセス用配管系と比して配管口径が小さいため t/D が大きく、当該配管系そのものの慣性力に基づく揺れによる影響(1)は比較的に少ないといえる。

(2)から(8)の主としてサポート間の相対強制変位に起因する損傷・被害が発生している。

特に、地盤変状による地盤の沈下や水平移動量は大きく、兵庫県南部地震では次に例のように多くの被害が発生している。

(1) 側方流動に起因する配管損傷

地盤変状(地盤の液状化)による側方流動(水平移動)は大きく、1～2mに達することもある。

配管ラック上の導管が他の設備にわたる部分で液状化による地盤の側方流動による水平移動のために両構造物の間に大きな変位差が生じて導管破損に至ったものである。



図 1 配管ラックの移動による配管破損

(2) 液状化による沈下に起因する配管破損
図 2 の例では、くい基礎貯槽（液状化による沈下はない）の漏えい検知装置は、独立して据え付けられていたために沈下して、両者を渡る導管は大きく変形をうけ機能喪失となった。地盤変状による地盤の沈下は 30cm～70cm に達することもある。この例の場合、導管の支持間隔が短い。



図 2 漏えい検知器の沈下による導管損傷

(3) 周辺構造物に干渉して配管破損
通常状態では配管およびその周辺構造物とは干渉しないが、地震時には構造物の揺れや地盤変状に伴う沈下・水平移動により干渉し配管に過大な強制力が加わり切断した。管と弁との接続部や継ぎ手部などの剛性が急変するところで応力集中が生じ破損することが多い。



図 3 周辺構造物との干渉により配管破損

1.3. 配線ケーブルの地震被害

配線ケーブルの損傷は、操作信号伝送、検出信号伝送、用役源供給機能を持ち、制御機能の喪失に直接つながる。

配線ケーブルについても、配管系と同様の地震の影響を受ける。ここでは配線ケーブルの被害で特徴的な被害として、基礎の損傷や地割れにより側溝部配線ケーブルが断線したり、コンジットの接続部が外れて中のケーブルが損傷した事例を紹介する。

(1) 地盤変状の影響を受けた側溝中のケーブルの損傷

地上から側溝へ移行部のケーブルが損傷する例が見られる。

図 4 の例では、地盤変状により側溝は水平移動し上部構造との間に相対的な変位差が生じ移行部のケーブルが損傷した例である。



図 4 地盤変状の影響を受けた側溝中のケーブルの損傷

(2) コンジットの損傷

地盤変状による地盤の沈下・水平移動に伴い塔槽類・配管・弁やそのほかの構造物が被害をうけ、これらに支持・固定されるコンジットが大きな相対変位をうけて、コネクター部分が外れた結果、中のケーブルが損傷をうけた。図 5 の例では、地震防災遮断弁の接続するケーブルが、地盤変状の影響を受けて沈下した結果、損傷を受けたものである。



図 5 コンジットの損傷

1.4. 制御系設備に関する地震の影響

制御系は盤、論理回路、計算機、DCS（Distributed Control System）及び信号を伝達するケーブル等から構成される。

制御系設備に関する主たる地震の影響は次のようである。

- （１）ケーブルの断線、ケーブルコネクタの外れにより信号伝達機能を喪失し操作不能となる。
- （２）ハードディスクのように可動部分がある場合、その不具合による演算エラー等のためのオペレータも気づきにくい誤操作が発生することがあり、機能喪失より深刻なこともある。
- （３）計器類、盤、論理回路、計算機などはかなりの衝撃荷重にも耐えるが、床に固定されてない例や固定用アンカーボルトが脆弱な例では、転落したり大きく移動したりすることがある。

1.5. 電源系統に関する地震の影響

（１）配電盤

図 6の例のようにアンカーボルトの耐力不足から配電盤の転倒した例が多く見られた。



図 6 配電盤の転倒

（２）計装用電源

プラントの情報を把握し緊急操作を行う上で、防災上重要な電力は小容量でよい
ため、バッテリー・バックアップが多い。バックアップ・バッテリーでは次のよ
うな被害が見られた。

- ・ 電源盤の転倒
- ・ 電池接続配線の破損
- ・ 転倒による電解液の流出

- ・ 極盤の破損

(3) 買電系統

送電システムの損傷とはかぎらず、ある程度の大きな地震では、短絡出火防止のため送電停止されることがある。兵庫県南部地震では、送電が続き火災発生した地域もある。

また、損傷部の修復、安全確認、不要部の系統隔離などのために、地震被害を受けた貯槽から健全な貯槽間緊急輸送のための電力受け入れに時間が掛かった。

(4) 自家発電装置

自家発電装置で地震の影響で冷却水入口ホースが外れたために停止した例のように、地震ではメインとバックアップが同時に停止する確率は決して小さくない。また、バックアップへ切り替えに際しても、受電側の健全性が重要である。回転機が故障しているところに通電し、短絡等により発火することがあるので注意が必要である。

3. 計測制御設備の耐震設計の現状と耐震改善対策

表 1 (1) 計測制御設備の耐震設計の現状と耐震改善対策

項 目	耐震対策の概要	耐震改善対策
空気配管	<p>(1) 耐震設計評価計算（慣性力、地盤変状）は行っていない。</p> <p>(2) 溶接配管とねじ込み配管の2通りのやり方がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・計器へのつなぎ込みに対して計器の手前でチュービングをループに組んで可とう性を持たせている。 ・地震荷重が掛かると予想される部位については溶接継ぎ手とする。 	<p>(1) 重要度の高い計測制御系の空気配管は、地盤の液状化に対して配管サポート基礎間の相対変位を考慮し十分な可とう性を持たせた耐震設計を行うことが望ましい。</p> <p>(2) ねじ込みで接続部に軸力、曲げモーメントが集中する可能性のある場所では溶接継手の使用等の対策が必要である。</p> <p>(3) フェールセーフを考慮して計装空気源停止でもプラントを安全に停止できることを確保する。</p>
計装導圧配管	<p>(1) 耐震設計評価計算（慣性力、地盤変状）は行っていない。</p> <p>(2) 鋼管で溶接タイプと、チュービングでねじ込みタイプがある。鋼管の1/2BについてはSch80以上が採用されている場合が多い。</p> <p>(3) 計器の取付位置は地上マウントとラインマウントがある。メンテナンスを考慮して地上マウントが多い。</p>	<p>(1) 重要度の高い計測制御系の導管は、地盤の液状化に対してサポート基礎間の相対変位を考慮し十分な可とう性を持たせた耐震設計を行うことが望ましい。</p> <p>(2) 接続部が弱い場合は、十分な可とう性を持たせて接続部に力を掛けないようにする。</p> <p>(3) ねじ込み継手を溶接継手にする等の対策が必要である。</p> <p>(4) プロセス配管につなぐ場合はプロセス配管の地震時の揺れ及び地盤変状による変位量を考慮してサポート間隔をとる。</p> <p>(5) 振動の多いところは機器本体に直接取付のラインマウントを検討する。</p>

(注記) 可とう性とは、配管、ケーブル等のサポート間に強制相対変位が負荷されたときに当該配管等に損傷とが生じないことをいう。

表 1(2) 計測制御設備の耐震設計の現状と対策事例(その4)

項 目	耐震対策の概要	耐震改善対策
計装ケーブル 電力ケーブル	<p>(1) 洞道、ケーブルトレンチ、管路など設備の種類に応じた事業者標準による耐震設計がなされている。</p> <p>(2) コンジットの破断を防ぐため計器への接続はフレキシブル・チューブを使い可とう性を持たせる。</p> <p>(3) ケーブルダクトの固定は、パイブラックからサポートをとり、ダクトの両側にガイドストッパーをつけている。</p>	<p>(1) コンジットなどの剛構造の配線で、サポート両端に支持構造物の揺れや基礎の地盤変状による相対変位が予測される場合は、変位を吸収できる措置をとる。</p> <p>(2) 操作器・検出器等への接続部分に大きな荷重を掛けないために、十分な可とう性を確保しておく。</p> <p>(3) 架構から配管、架構から地盤など異なる構造物との移行部分は、可とう性を十分確保する。</p>
調節弁・地震防災遮断弁等の操作系機器	<p>操作信号や空気供給源が途絶する場合、安全側に作動するようになっている。緊急遮断弁は、フェールセーフで駆動源断でスプリング駆動や空気だめを置き空気圧が切断しても開閉できるようにしておく。</p>	<p>(1) 調節弁、地震防災遮断弁の駆動部分の耐震性を確認する。</p> <p>(2) エアーホルダの耐震性を確認する。</p> <p>(3) 現場機器類について盤類の耐震設計と同様に耐震性を考慮する。</p> <p>(4) 地震時の地盤変状に対して沈下、水平移動、傾斜などを考慮して周辺構造物との干渉・衝突などが無いよう考慮する。</p>
検出器	<p>信頼性向上のため、検出器を冗長化する。たとえば、検出器を3基もうけ、2基以上から同じ信号(two of three signal)が出た場合に、正しい信号として採用する。</p>	<p>(1) 盤類と同様の耐震性を考慮する。</p> <p>(2) 配管・取り付け台との共振によるセンサーの誤作動を防止する措置をとる。</p> <p>(3) 感震器、地震計は確実に地震動を検出できる地盤に設置する。</p>
計器室	<p>(1) 盤類はフリーアクセスを切り抜いてコンクリート床面よりアンカーボルト固定する。</p> <p>(2) 床貫通部、建屋入口等に対して延焼防止策をする。</p>	<p>(1) 免震構造のフリーアクセスの検討をする。</p> <p>(2) 周辺機器の転倒が操作盤や計器類に損傷を与えないよう機器の適正配置を行う。</p> <p>(3) 書架、ロッカー等転倒防止策を行う。</p>

表 1(3) 計測制御設備の耐震設計の現状と対策事例(その2)

項目	耐震対策の現状			耐震改善対策
制御盤関係	(1) 耐震設計 設備の種類に応じて耐震仕様を事業者が指定しメーカーが盤を製作している。			(1) 盤の転倒、滑動を防止するために、盤据え付けアンカーボルトに十分な強度を持たせるとともに強固に埋め込む。 (2) 地震衝撃に対するプリント基板の破損、コネクタの接触不良、ハードディスクとヘッドの接触、ケーブルの断線などを防止する措置をとる。 (3) 耐震構造上は、防振ゴムによる制御盤据え付けは避けることが望ましい。止む得ず機械振動吸収などの目的で使用する場合は、盤の転倒、滑動を防止する措置をとる。 (4) フリーアクセス・フロアーを採用する場合は、支柱補強、床板固定、支柱転倒等を防ぎ、盤等固定用チャンネルベースの耐震設計を行う。
	分野	耐震設計技術指針		
	原子力	原子力発電所耐震設計技術指針	JEAG 4601	
	電力関係	火力発電所耐震設計技術指針	JEAG 3605	
	石油精製	法規制の耐震基準による	---	
	石油化学	配電盤・制御盤の耐震設計指針 変電所等における電気設備の耐震対策指針、下水道設備地震対策指針と解説	JEMA TR 144 JEAG 5003 ----	
	(2) オペレータの転倒防止のために手すりや支え棒を取り付けている例も一部ある。			

表 1(4) 計測制御設備の耐震設計の現状と対策事例(その2)

項目	耐震対策の現状	耐震改善対策
<p>分散型計装制御システム Distributed Control System (DCS)</p>	<p>(1) 石油精製、石油化学装置はメーカー標準による耐振動設計にしたがっている場合が多い。事業者が設備の種類に応じた耐震仕様によるDCSとしている場合もある。</p> <p>(2) メーカー標準はJEIDAA29,1990 工業用計算機設置基準のCLASS B(連続振動 0.2G以下、短周期振動 0.5G 以下)、または、JEMIS 022 日本電気計測工業界規格等をベースとしている。</p> <p>(3) 原子力発電所向けは、JEAG 3601原子力発電所耐震設計技術指針、火力発電所向けは、JEAG 3605火力発電所耐震設計技術指針を適用している場合が多い。</p> <p>(4) 地震の衝撃に対するCPU、ハードディスクの可動部の耐震設計は現状では考慮されていない。</p> <p>(5) 停電に対しては、CPUの自動停止機能を持っている。停電に対してコントロール部ではバッテリー・バックアップを持ち(例えば、72時間)、マンマシーンシンターフェース部分は電源断の場合、3分以内(メーカーにより異なる。)に、データをハードディスクにバックアップする。</p> <p>(6) キャビネット内のCPU、ハードディスク、I/Oカードの固定は、はめ込み、又はネジ止めで行っている。また、CPUと各コンポーネント類へのケーブルは余裕を持たせて、インシュロック等により配線途中で固定している。</p> <p>(7) 盤の固定は、メーカーの設置標準に従っている。一般的には、アンカーボルトによる固定としている。</p>	<p>(1) CPU、ハードディスク等に地震時の衝撃に弱いものは、機器の選定、設置階、据え付け方法など個別に耐震性を確保する措置をとることが望ましい。</p> <p>(2) DCS機能に依存していることが多いが、配管や制御ケーブルの外れ、破断や電源系統及びDCSの機能喪失などによる制御系機能喪失の場合の対策を検討しておくことが望ましい。</p> <p>(3) CPUと各コンポーネント類へのケーブルは余裕を持たせ、コネクタ等へ過大な力が作用しないよう考慮する。</p> <p>(4) 周辺機器、コンソールデスク、盤は転倒しないように適切な地震動に対してアンカーボルトの耐震設計を行う。</p> <p>(5) 盤据え付け位置は、他の物体の移動、衝突、落下、冠水、浸水、漏水のないよう考慮する。</p>

表 1(5) 計測制御設備の耐震設計の現状と対策事例(その1)

項目	耐震対策の概要	耐震改善対策
電子計算機	<p>(1) 耐震設計 装置の計測、制御システムを構成する汎用電子計算機、工業用電子計算機がありメーカー標準による耐振動設計がなされている。</p> <p>(2) 工業用電子計算機に関しても、DCSと同列に考えている事業所が多い。汎用電子計算機の場合、地震で仮にダウンしてもデータを保持していればよいとしている。</p> <p>(3) 停電対策としては無停電電源を使用している。無停電電源は装置に対する最小限のものに対して実施している。停電検知の場合、自動停止して自動的にハードディスクにバックアップしている。バックアップ時間は負荷により異なる。</p> <p>(4) キャビネット内のCPU、ハードディスク、I/Oカードの固定は、はめ込み、又はネジ止めで行っている。また、CPUと各デバイス間のケーブルは余裕を持たせている。</p> <p>(5) 盤の固定はメーカー設置基準書に従っている。一般的にアンカーボルトにより固定している。</p>	DCSにたいする耐震対策と同様

表 1(6) 計測制御設備の耐震設計の現状と対策事例(その5)

項目	現状	対策事例
設備の緊急停止	<p>(1) 地震計をつけている設備が多い。</p> <p>(2) 地震計、ガス検知器と緊急遮断弁との連動に関して、事業者の考え方は統一的ではない。</p>	<p>(1) 地震による影響を踏まえて緊急停止の判断及びその措置が的確に行えるようにしておく。</p> <p>(2) 緊急停止措置は地震時自動的に行えることが望ましい。</p> <p>(3) オペレータの判断による緊急停止措置をとるシステムの場合は、緊急停止基準や状況に応じた作業基準を検討して置くこと。できるだけ単純な操作手順となるよう考慮するとともに、地震時の安全性を考慮した教育・訓練等を実施する。</p> <p>(4) 異常事対応支援システムの構築ほとんどの場合予定通りの展開にはならない。臨機応変の対応力の養成訓練が重要である。そのために計算機シミュレータ等による訓練も検討することが望ましい。</p> <p>(5) 地震緊急時には、多発事故が生じる。システムはできるだけ冗長化しやり繰りできるように余裕のあるシステムを構築する。</p>
電源断、空気源断、信号断によるプラントシャットダウン	<p>フェールセーフにしている場合が多い。</p> <p>ただし、電源断でも自動的にプラントを止めずオペレータの判断で止める場合もある。</p>	<p>(1) 電源、用役源、空気源、計測制御システムの機能喪失を前提と下システムを構築する。</p> <p>(2) 常に安全側に作動させるフェールセーフ・システムとする。</p>
防災資機材		<p>高圧ガスが漏洩或いは着火に至った場合、初期の対応ための防災資機材を常備しておくとともに確実に調達できる体制を確立しておく。</p>

4. 地震防災遮断弁の駆動用空気配管の耐震対策事例

図 7(1)で示すように地震防災遮断弁の空気源機能喪失（外部電源喪失、非常用電源起動不良、ケーブル破断などによる。）に対するフェースセーフ対策として、エアリザーバを設け、空気圧が切断しても一回以上地震防災遮断弁を開閉できるようにした場合の例を紹介する。配管ラックとエアリザーバ及び地震防災遮断弁はそれぞれ異なる基礎であるとする。エアリザーバの機能を維持するためには、エアリザーバタンク入口チェック弁から地震防災遮断弁までに漏えいが生じてはならない。

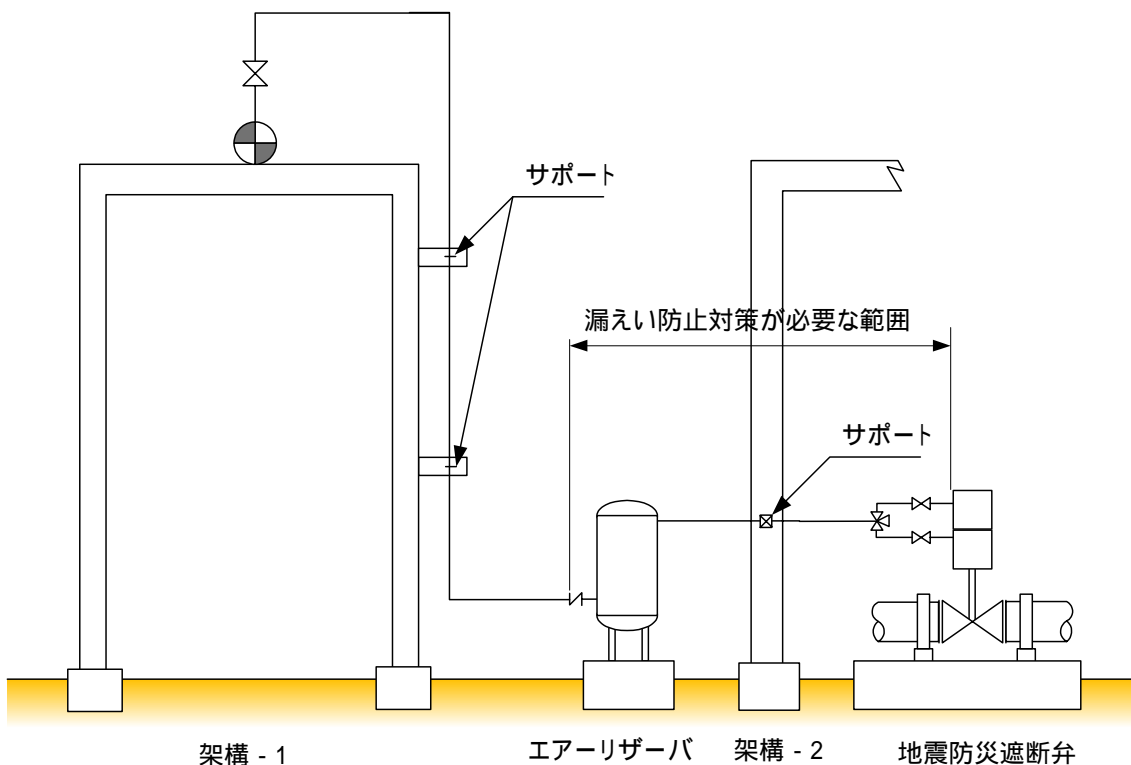
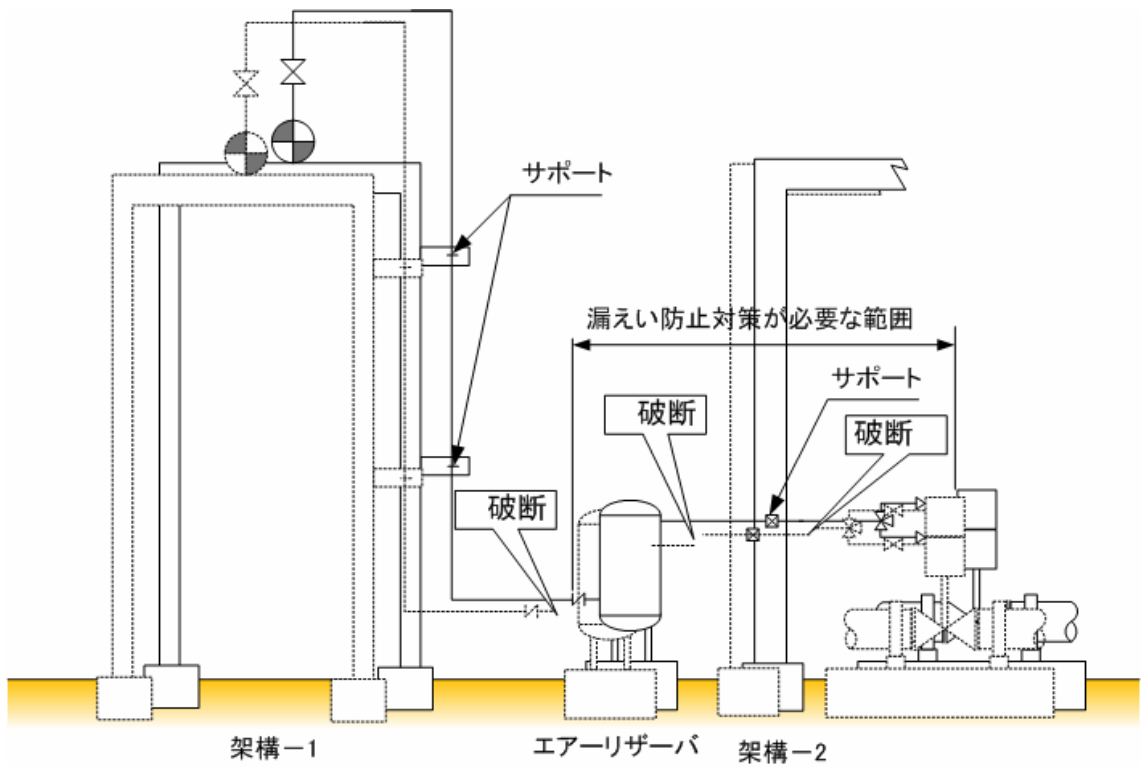


図 7(1) 地震防災遮断装置 空気供給配管系

地震時及び地震後の地盤の液状化で架構-1、架構-2、エアリザーバ及び地震防災遮断弁は、図 7(2)で破線のようにそれぞれ動きが異なる。それぞれを結ぶ配管には強制変位が負荷されるため、配管は図 7(2)のように架構-1 とエアリザーバ、エアリザーバと架構-2、架構-2 と地震防災遮断弁の間の配管は強制変形が作用するために破断する可能性がある。



(鎖線は地盤変状による沈下・水平移動した状態を表す。)

図 7(2) 地震防災遮断装置 空気供給配管系

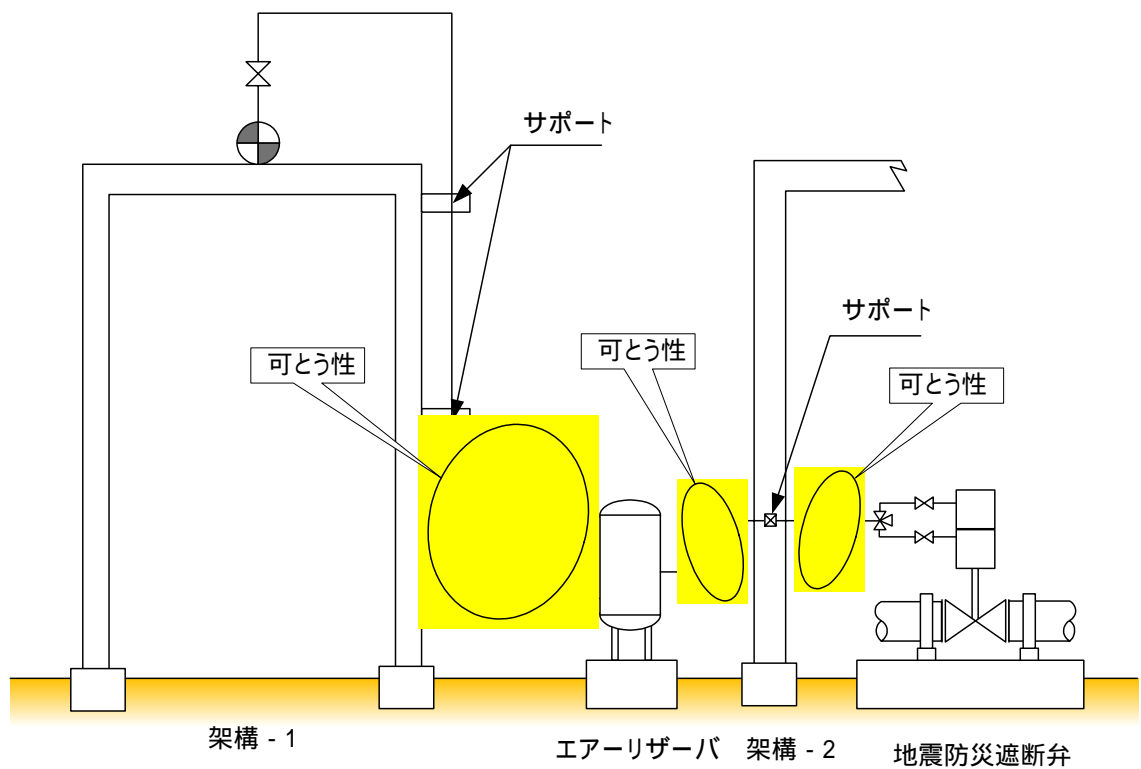


図 7(3) 地震防災遮断装置 空気供給配管系

そこで、図 7(1)で示す配管範囲について漏えい防止対策として、基礎を共通にすることが考えられるが一般的には現実的ではない。通常は、図 7(3)に示すように、架構-1 とエアリーザーバ、エアリーザーバと架構-2、架構-2 と地震防災遮断弁の間の配管に変位吸収能力（可とう性）を付与させる、

可とう性を付与する方法としては、次の方法により変位吸収能力をもたせることが考えられる。

- (3) 曲がり管を組み合わせて配管を引き回す。
- (4) チューピングによるループを作る。
- (5) 伸縮継ぎ手又はフレキシブルホースを使用する。

この場合、地震動による架構-1、エアリーザーバ、架構-2、地震防災遮断弁の揺れ変位量、地盤変状による地盤の沈下量、側方流動による水平移動量を評価して必要な変位吸収能力を付与する設計を行うことが重要である。能力以上の強制変位が発生するとより危険な状態に発展する可能性があるので注意が必要である。

なお、サポート間に強制変位が予測されない配管スパンの支持間隔は、溶接配管では $1.0\sqrt{D_o}$ (m)、ねじ込み管では $0.77\sqrt{D_o}$ (m) 程度以下として、配管の地震動に対する揺れ(発生応力)を抑え耐震安定性を確保することが望ましい。ここで、 D_o は、配管実外径(mm)を表す。

本節で例示した耐震対策は、導管、動力ケーブル及び計装用ケーブル等に関しても同様の考え方で耐震設計を行うことができる。

5. さいごに

計装制御系の耐震設計でプロセス系の耐震設計基準をそのまま適用するのは現実的ではない。計装制御系の検出系、論理回路及び操作系すべてについて、地震後も機能するよう強度的に耐震設計することは過剰設計と考えられる。制御対象設備の危険度に応じた地震動の強さに対してその機能維持を目的とすることが重要である。

フェールセーフ、冗長性、地震動検知等の機能を組み合わせきめ細かく計装制御系要素の耐震性要求機能を設定して、総合的に安全性を確保するように考慮されなければならない。

一方で、計測制御系は設備の地震時の安全性確保の最後の要であり、安全性を阻害するような損傷がないよう慎重に耐震設計がなされなければならない。

本稿では、兵庫県南部地震の被害事例の教訓として、地盤の液化化による地盤変状に対して、地震防災遮断設備を例にとり解説を行った。

いつ来るかわからないが、やがて来るといわれている大地震に対して、現在の技術知見で最大限の対応ができる体制の構築が望まれる。