

1. まえがき

兵庫県南部地震で MC ターミナルでは、地盤の液状化に伴い高圧ガス設備の配管系に被害があった。地盤が液状化すると、基礎は沈下したり、水平方向へ大きく移動して配管は設計の時点では考えられなかった大きな強制変位のために破損したり、フランジ継手から高圧ガスが漏洩することとなった。

サポートは、配管自重を支持したり、変位・変形を固定したり又は拘束したりするために設けられる。自重や地震時の慣性力に対しては、サポート間隔を短くして発生応力を小さくすることが行なわれる。熱変形や地震時の揺れによるサポート間の強制相対変形に対してはできるだけサポート間隔を長くして配管に可とう性を持たせて当該相対変位を安全に吸収することが行なわれる。従来両者のバランスを考慮してサポートの配置設計が最適に行なわれてきた。しかしながら、地盤変状による変位は、兵庫県南部地震では3メートルに及ぶこともあり、従来設計では対応できないケースがでることが明らかになった。

このような地盤の液状化に伴う過大な相対変位に対応する新しい概念の設計方法として、「解放サポート」が提案されている。

今回は、新しい概念としての解放サポートに関して設計の考え方、手順などを解説する。

2. 解放サポートとは

2.1. 解放サポートの定義

「解放サポート」とは支持力解放機能を有するサポートを言う。

ここで、支持力解放機能とは、地震動に対する加速度応答に関しては支持機能を有するが、地盤変状に対しては当該支持力を意図的に解放することにより地盤変状にたいする安全性を確保する機能をいう。これは、地震動の揺れに対しては有効に働らき支持機能を有するサポートが、地盤変状に対してはそのサポートの拘束力のために悪影響を及ぼす（漏洩が発生するような事態になる）場合、最大の揺れが経過後に遅れて地盤の液状化に伴う地盤変状が発生したときにはそのサポートの支持機能を解放し、配管に漏洩等が発生しないようにするものである。

通常、支持機能の解放はサポート部品を切断することによる。これは、非常にまれな現象であるが、一度発生すると重大な災害に至る可能性のあることを前提として提案されているものである。

2.2. 解放サポートの例

図 1 により解放サポートの例を説明する。平面 Z 型配管系 ABC がある。A, C は固定サポート、B は U ボルトである。この U ボルトを解放サポートとする場合について説明する。

今、X 方向の地震を考えると、B 配管支持点がないときスパン AC が長く慣性力に対して、配管発生応力が過大となり地震時損傷するため、B 点を配管支持点とする必要がある。図(a)に示すように U ボルトを設置し、次のようにして支持力解放機能を持たせる。

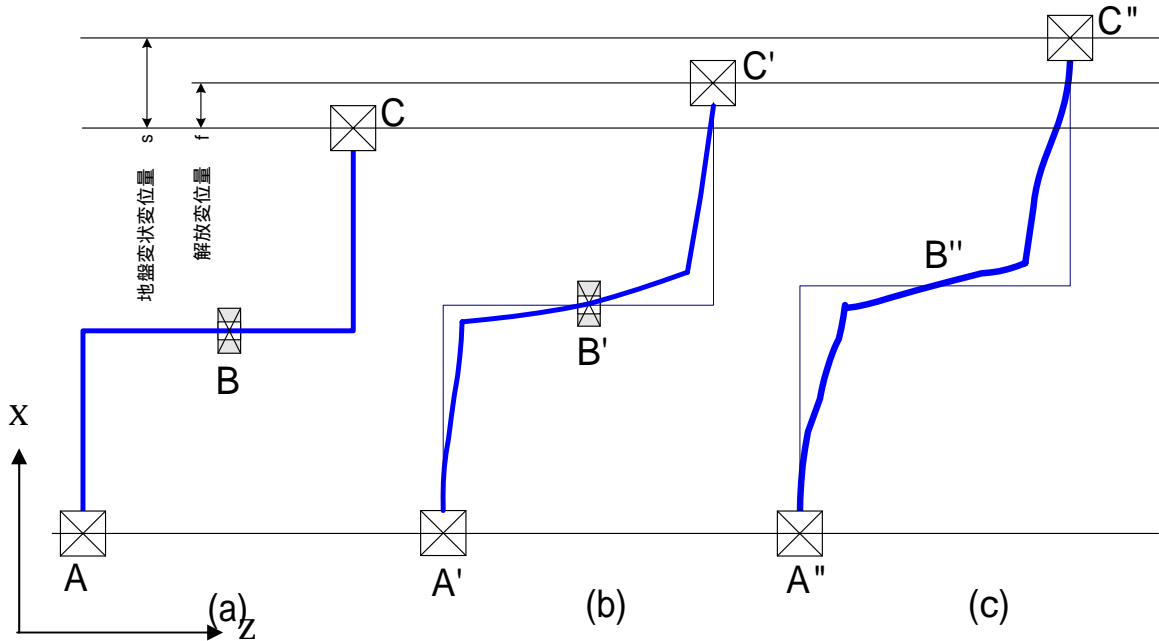


図 1 解放サポート

通常、慣性力が最大値となったあと、時間が経過後に地盤が液状化し沈下、側方流動が生じ C 点は C'' 点まで移動する。B 点の U ボルトの強度が確保されていると、大きな拘束とるため配管に発生する応力が過大となり配管損傷のおそれが生じる。

そこで、B 点の U ボルトの強度を弱めて(c)に示すように B 点が B' 点に達した時点で切断するように設計する。このとき、C 点は C' 点まで移動しているが、この時点における U ボルトの拘束力では配管に発生する応力は許容範囲にあり健全性を保持しているものとする。

さらに、(c)で示すように C 点は C'' 点まで移動するが、B 点の U ボルトは支持力が解放されているために配管に拘束力を与えず、健全な状態を保たせることができる。

3. 解放サポート

3.1. 解放荷重

支持機能解放サポートに係る評価では、降伏荷重、限界荷重及び解放荷重を考慮する。そのサポートに地震時および地盤変状時に負荷される荷重と、サポートの荷重・変形特性を考慮して定める降伏荷重、限界荷重及び解放荷重とを比較することにより行う。

降伏荷重、限界荷重及び解放荷重の定め方は図 2 のような荷重・変形特性において次の

ように定める。ここで、ハッチ部分はデータのばらつきを示す。

降伏荷重：図 2 の設計降伏荷重 F_{yd} 以下の値とする。

レベル 1 地震動に関してはこの値が許容荷重となる。

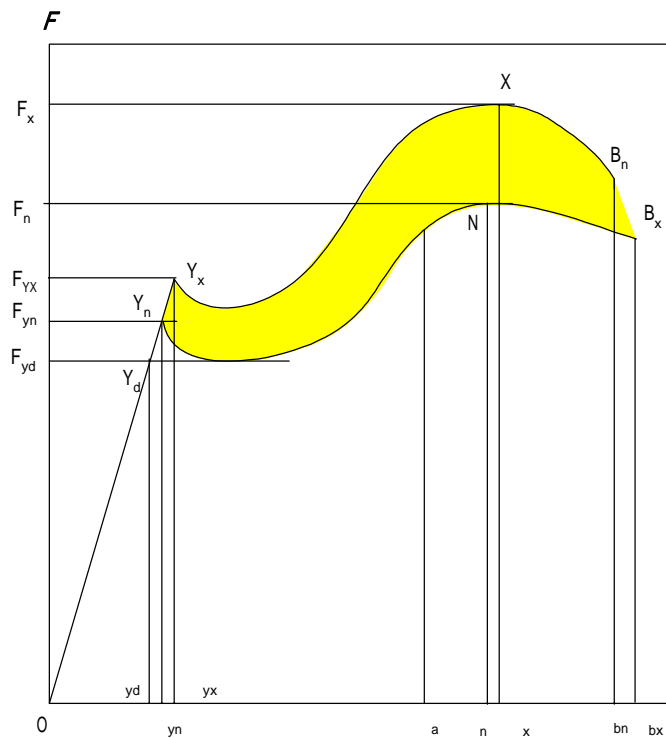
レベル 1 地震動で、この降伏荷重を超える荷重が作用した場合は、地震後にそのサポートは継続して使用できるが検査して、必要に応じて取り替え・修復する必要がある。

限界荷重：図 2 の破断最小荷重（最小崩壊荷重） F_n 以下の値とする。

レベル 2 地震動に係る慣性力の評価では限界荷重がこの解放サポートの支持機能が有効とする条件での許容荷重となる。

解放荷重：図 2 の破断最大荷重（最大崩壊荷重） F_x 以上とする。

レベル 2 地震動に係る地盤変状時には、この解放荷重以下で破断することになる。したがって、この解放荷重に対する変位量（解放変位量）に対して、支持機能が有効とした条件で、配管に損傷等が発生することは許容されない。



- | | | |
|-----------------|-------------------------|-------------------|
| Y_x : 最大降伏点 | y_x : 最大降伏変位量 | F_{yx} : 最大降伏荷重 |
| Y_n : 最小降伏点 | y_n : 最小降伏変位量 | F_{yn} : 最小降伏荷重 |
| Y_d : 設計降伏点 | y_d : 設計降伏変位量 | F_{yd} : 設計降伏荷重 |
| X : 破断最大荷重点 | F_x : 破断最大荷重 (最大崩壊荷重) | |
| N : 破断最小荷重点 | F_n : 破断最小荷重 (最小崩壊荷重) | |
| B_x : 破断最大変位点 | b_x : 最大破断変位量 | |
| B_n : 破断最大変位点 | b_n : 最小破断変位量 | |

a : 許容変位置

図 2 配管支持構造の荷重・変形曲線

3.2. 解放サポートの例

解放サポートとし各種のタイプが考えられるが、図 3 の U ボルトタイプと図 4 のロッドタイプが代表的な例として挙げられる。これらのうち、U ボルトタイプのものは、市販のものについて高圧ガス保安協会において実験を行い、その性能は破断荷重を確認済みである。その他のものについては試験による確認は行われていないが、ボルト、ロッドの単純引張形式のものは断面積に最大引張強さを乗じることによって求められる。

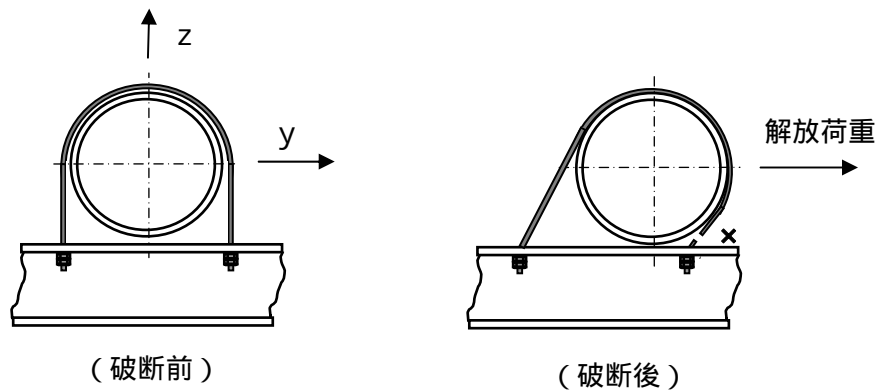


図 3 U ボルトタイプ解放サポート

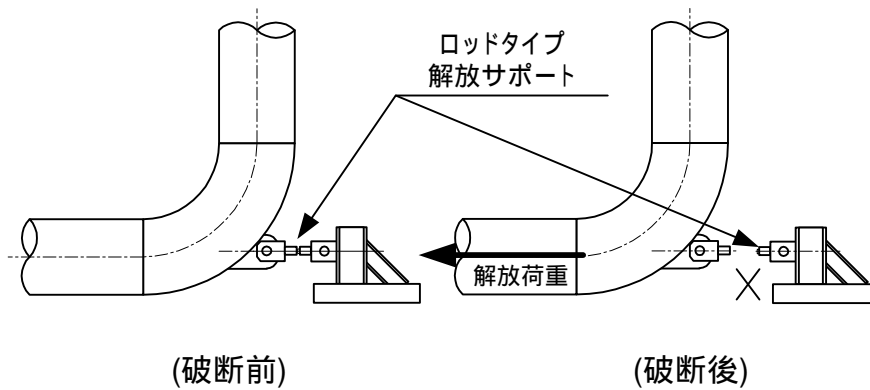


図 4 ロッドタイプ解放サポート

U ボルトタイプ及びロッドタイプの降伏荷重、限界荷重及び解放荷重の計算式を表 1 に示しておく。市販の U ボルトについて、材質を SS400 とした時の各荷重の計算結果を表 2 に示す。

表 1 Uボルト及びロッドの降伏荷重、限界荷重及び解放荷重の計算式

	降伏荷重	限界荷重	解放荷重
Uボルト	$F_{L1z} = \frac{\pi}{4} d_b^2 \sigma_{by}$ $F_{L1y} = 2 \frac{\pi}{4} d_b^2 \sigma_{by}$ <p> F_{L1z} : Uボルト管軸直角方向降伏荷重(N) F_{L1y} : Uボルト鉛直方向降伏荷重(N) d_b : Uボルト径(mm) σ_{by} : Uボルト降伏点(N/mm²) </p>	$F_{L2z} = 0.7 \frac{\pi}{4} d_b^2 \sigma_{bB}$ $F_{L2y} = 1.4 \frac{\pi}{4} d_b^2 \sigma_{bB}$ <p> F_{L2z} : Uボルト管軸直角方向限界荷重(N) F_{L2y} : Uボルト鉛直方向限界荷重(N) d_b : Uボルト径(mm) σ_{bB} : Uボルト破断応力(N/mm²) </p>	$F_{fz} = 1.5 F_{L2z}$ $F_{fy} = 1.5 F_{L2y}$ <p> F_{fz} : Uボルト管軸直角方向解放荷重(N) F_{fy} : Uボルト鉛直方向解放荷重(N) F_{L2z} : Uボルト管軸直角方向限界荷重(N) F_{L2y} : Uボルト鉛直方向限界荷重(N) </p>
ロッド	$F_{L1y} = \frac{\pi}{4} d_b^2 \sigma_{by}$ <p> F_{L1y} : 降伏荷重(N) d_b : ロッドの最小部の径 (mm) σ_{by} : ロッドの降伏点(N/mm²) </p>	$F_{L2n} = \frac{\pi}{4} d_b^2 \sigma_{bu}$ <p> F_{L2n} : 限界荷重(N) d_b : ロッドの最小部の径 (mm) σ_{bu} : 最大引張強さ (N/mm²) </p>	$F_f = 1.5 F_n$ <p> F_x : 解放荷重 (N) F_n : ロッドの限界荷重 (N) </p>

- 1) Uボルトの最大引張強さの上限値が明確な場合には、その値を最大引張り強さに代えて求めた限界荷重以上としてよい。
- 2) 最大引張り強さの上限値が明確な場合は、その値を最大引張り強さに代えて求めた限界荷重以上としてよい。

表 2 U ボルトタイプの解放サポートの降伏荷重、限界荷重及び解放荷重

公称管径	管外径	d _b	降伏荷重		限界荷重	
			FL1 _x	FL1 _y	FL2 _x	FL2 _y
B	mm	mm	kN	kN	kN	kN
1-1/2	48.6	10	19	38	22	44
2	60.5	10	19	38	22	44
2-1/2	76.3	10	19	38	22	44
3	89.1	12	28	55	32	63
3-1/2	101.6	12	28	55	32	63
4	114.3	12	28	55	32	63
5	139.8	16	49	99	56	113
6	165.2	16	49	99	56	113
7	190.7	16	49	99	56	113
8	216.3	20	74	148	88	176
9	241.8	20	74	148	88	176
10	267.4	20	74	148	88	176
12	318.5	24	106	213	127	253
14	355.6	24	106	213	127	253
16	406.4	24	106	213	127	253
18	457.2	24	106	213	127	253
20	508	24	106	213	127	253
22	558.8	24	106	213	127	253
24	609.6	24	106	213	127	253

4. 解放サポートのある配管系の地盤変状に関する耐震性能評価

解放サポートを有する配管系のレベル2耐震性能評価は、地盤変状による基礎の最大移動の影響に対する配管系の耐震性能の他に、解放サポートの解放時の最大反力に対する配管系の耐震性能の両者を保有することを確認する必要がある。解放サポートは意図した破壊モードで破壊し、支持力を解放することが必要であり、解放荷重に対し、破断する部位以外に発生する応力は原則として降伏応力以下とする。

配管をガイドで支持している場合などにおいて、基礎が沈下した場合に配管がガイドから離れ、浮き上がりを生じて拘束機能がなくなると考えられるので、当該ガイドは解放サポートとしての機能を有しているといえる。

4.1. 解放サポートのある配管系の耐震性能評価手順

解放サポートのある配管系の耐震性能評価手順を図 5 に示しておく。

解放サポートの解放時の反力に対する耐震性能評価

- a) 解放サポートの解放時の最大反力（以下「解放反力」という。）を算定する。
- b) 解放反力が生じるときの基礎の移動量（以下「解放変位量」という。）を算出する。
- c) 基礎の解放変位量に対して配管系の耐震性能評価を行う。この場合の評価はレベル2地震動に関する慣性力に係る耐震性能評価と同じようにする。
- d) この耐震性能が確保できない場合には設計変更を行う。解放サポートの設計変更（最大反力の低減）のみ行う場合は耐震性能評価の最初に戻る必要はないが、慣性力に係る配管反力に対する耐震性能評価は別に行っておく必要がある。

地盤変状による基礎の移動の影響に対する配管系の耐震性能を確認

- a) 地盤変状による基礎の移動の影響に係る応答解析においては、配管に解放サポートからの浮き上がり・脱落がある場合があるので、当該解放サポートの支持機能が喪失しているとした状態で、配管自重と地盤変状に伴う支持点の相対変位荷重を組み合わせる解析を行う。
- b) 地盤変状に係る耐震性能評価は、共通基礎上の配管に関しては固定サポートの耐震性能評価だけでよいが、配管に解放サポートからの浮き上がり・脱落等に関して不具合が生じないことを確認しておくことが望ましい。
- c) 共通基礎上でない場合は、耐震性能の評価は配管及び配管支持構造物に係る耐震性能評価を行うこと。この場合、地盤変状による変位荷重の他に自重を含めた荷重条件に対して評価を行う。
- d) 耐震性能が確保できない場合には設計変更を行う。部分的な設計変更（強度の増大）のみ行う場合は耐震性能評価手順の最初に戻る。

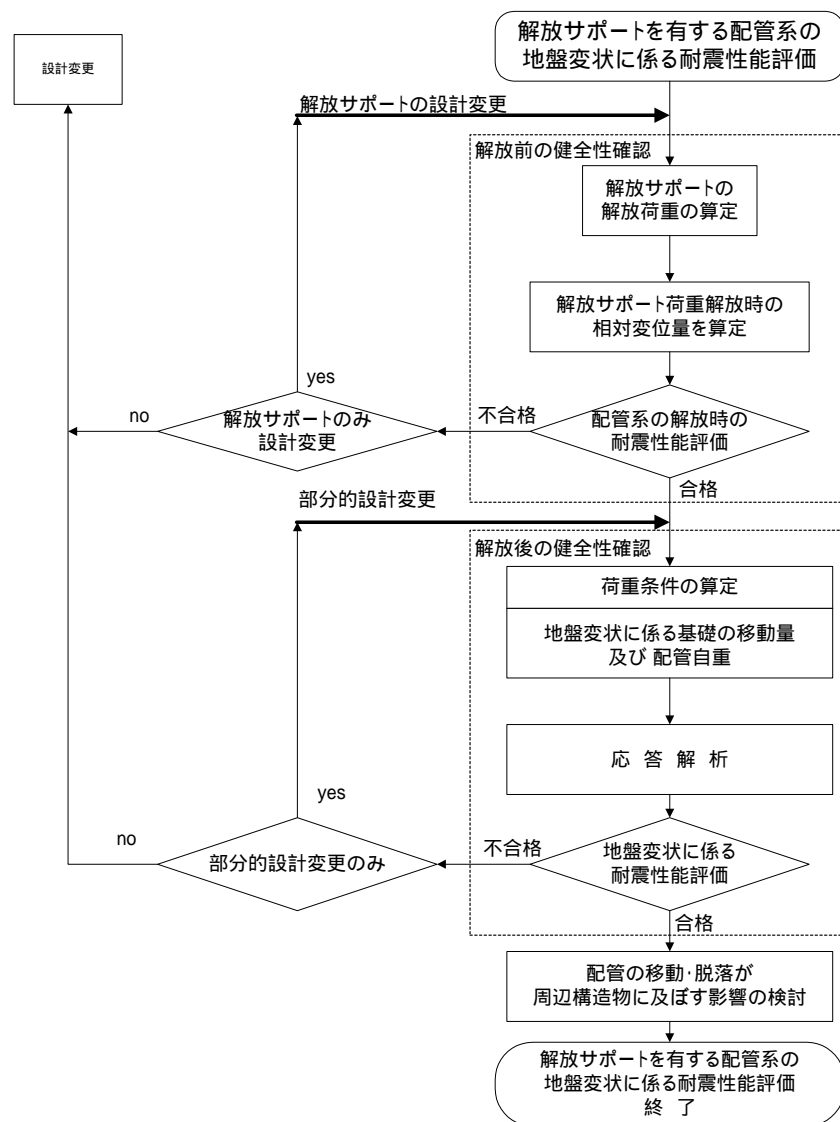


図 5 解放サポート有する配管系の地盤変状に係る耐震性能評価

4.2. 解放サポートのある配管系の耐震性能評価

解放サポートのある配管の耐震性能評価は、表 3 による。

表 3 解放サポートのある配管系の耐震性能評価

番号	荷重条件	解放サポート 有無	配管系の耐震性能評価	
			算定応答量	許容応答量
1	L1 慣性力+自重 + 圧力	有	長手方向応力	S
2	L1 慣性力 + 相対変位	有	繰返し応力範囲	$2 \times S_y$
3	L2 慣性力+自重 + 圧力	有	応答塑性率(曲がり管) 長手方向応力 (その他)	塑性ひずみ方振幅 2 % $2 \times S$
4	L2 慣性力 + 相対変位	有	応答塑性率 (曲がり管) 繰返し応力範囲(その他)	塑性ひずみ方振幅 2 % $4 \times S_y$
5	解放変位 + 自重	有	応答塑性率 (曲がり管) 長手方向応力 (その他)	塑性ひずみ方振幅 2 % $2 \times S$
6	L2 地盤変状 + 自重	無	応答塑性率	塑性ひずみ方振幅 5 %

なお、表中 S 及び S_y の値は、下記とする。

S : 耐震設計用許容応力

S_y : 降伏応力

5. 解放サポート設計上の注意事項

解放サポートの設計・製作に関して考えられる注意事項をのべる。変位量が大いことや破断するように設計することなど従来の設計感覚を生かせない面があるので注意が必要である。

- (1) 地盤変状（液状化に伴う地盤の沈下及び水平移動）による配管基礎の移動がある場合、配管系は大きく移動するため、隣接する小口径配管（配管に付属するものを含む）等の他の周辺構造物との位置関係において、それらを損傷させたりすることがある。
- (2) 意図した損傷モードで、意図した部材が破断するように、他の部材は十分な強度を持たせる。
- (3) 破断荷重が正しく算出できるように、破断部材の破断機構・データが明確な設計とする。
- (4) 破断荷重が正しく算出できるように、配管系（配管、サポート配置、支持構造物、支持金具など）が単純な構造とする。たとえば、サポートの数は少ないこと、サポートとの間に摩擦力、“がた”などができるだけ少ない構造とすることなど
- (5) 慣性力に対する支持機能の信頼性が高いこと

6. あとがき

今回は解放サポートの耐震設計に関して解説した。兵庫県南部地震で見られた配管系の被害事例で明らかにされたように、地盤が液状化することにより発生する強制変位は従来設計では考えられない過大な変形量である。被災確率が小さな事象であることから、このような大きな強制変位に対しては、サポートを切断してその支持機能を解放し、配管を守るようなフューズ機能をもつ解放サポートが提案された。

まだ、解放サポートの実用実績などはほとんどないが、今回は、今までに高圧ガス保安

協会「耐震化対策推進委員会」において議論・実験され、「高圧ガス設備等耐震設計指針」で規定された内容をまとめて報告した。