

配管系に関する米国における耐震設計の状況

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

我が国では、配管系の耐震設計基準としては「高圧ガス設備等耐震設計基準」(通商産業省告示第 515 号、いわゆる「耐震告示」、平成 9 年 3 月改正)が法律として定められている。また、この告示を補完する事項について、たとえばレベル 2 地震動に関する塑性率評価法の詳細や地盤変状の評価法などの記載を含めて、より具体的な解説を付けた設計基準や設計指針が、神奈川県や高圧ガス保安協会から出されている。

一方、米国には、我が国の耐震告示のように、配管系の耐震設計に関してまとまって法的に評価法を定めた耐震設計基準はない。本稿では、米国特にカリフォルニア州における配管系の耐震設計の状況について概要を述べる。

2. 石油化学工場の耐震設計の概要

ASCE (American Society of Civil Engineers) では Task Committee on Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities を組織して、その分野に詳しい技術者を集め、石油化学工場における構造物や設備の耐震設計または耐震診断をする技術者に対する実用的な手引きとして、Guidelines of for Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities, ASCE 1997 を編纂・出版している。この Guidelines が石油化学工場における設備の耐震設計に広く利用されている。

一般に、石油化学工場における構造物や設備の設計においては、関連する多くの法令(Code) や基準(Standards)などが組み合わせて適用されている。たとえば、以下のようなものが主な例として挙げられるが、その適用分野は表 1 に示すとおりである。

- a. Uniform Building Code (USB)
- b. API Standard 650, Welded Steel Tanks for Oil Storage
- c. AISC Manual of Steel Construction, Allowable Stress Design
- d. AISC Manual of Steel Construction, Load and Resistance factor Design
- e. ACI 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete
- f. ACI 530, Building Code Requirements for Masonry Structures
- g. ASCE-7, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures
- h. ASME Boiler and Pressure Vessel Code
- i. ASME B31.3, Code for Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping

表 1 石油化学工場の設計に適用される法令、基準類の適用分野

設計対象構造物	UBC	ASCE-7	AISC	ACI318	ACI530	API650	ASME BPV	ASME B31.3
鋼構造								
コンクリート構造								
組積構造								
貯槽								
塔槽類と配管								

3. 石油化学工場における配管系の耐震設計

ASCE と FEMA の共同契約により組織されている American Lifelines Alliance では、官民協働事業として、専門のプロフェッショナル・エンジニアに委託して、配管系の耐震設計の解説書“Seismic Design and Retrofit of Piping Systems”を作成している。

http://www.americanlifelinesalliance.org/pdf/Seismic_Design_and_Retrofit_of_Piping_Systems.pdfからダウンロードできる。これまでに積み上げられた解析、試験、地震後に観察された配管の耐震性能実績などの知見と、設計や耐震補強の経験を十分に生かす形でまとめられている。また、Appendix Aには、“Proposed Standard for the Seismic Design and Retrofit of Piping Systems (Draft)”が添付されている。

ここでは、同 Draft の“S300 Design”の章を以下に簡単に紹介する。

「S300 設計」の概要

S301 設計地震動

- ・設計地震動は水平と鉛直の2方向、静的震度または応答スペクトルで与える
 - ・震度については、ASCE-7などの基準を適用するか、当該地特有のものを適用する
 - ・応答スペクトルを与える場合の配管の減衰定数は5%とする
- など

S302 設計法

- ・設計法は、表の適用区分に従ってよい
- ・地震動の大きさ、配管の重要度、配管のサイズによって異なる

表 耐震設計の適用範囲

設計地震動	通常配管			重要配管	
	管径 2"	2" < 管径 < 6"	6" 管径	管径 2"	2" < 管径
< 0.2g	- *1)	- *1)	- *1)	- *1)	- *1)
0.2g ~ 0.3g	- *1)	- *1)	- *1)	規定型設計*2)	規定型設計*2)
> 0.3g	- *1)	規定型設計*2)	規定型設計*2)	規定型設計*2)	解析型設計*3)

*1) 配管が関係する ASME B31 の条文に従っていれば、耐震設計を省略できる。

*2) 規定型設計で S303 による。

*3) 解析型設計で S304 または S305 による。

S303 規定型設計

- ・耐震拘束を以下の支持間隔以内で設置することで耐震性能が確保される。

$$L_{\max} = \min\{1.94L_T / a^{0.25} ; 0.0175L_T(S_Y / a)^{0.5}\}$$

L_T : 標準支持間隔 (ft) で表 2による。

表 2 配管系の標準支持間隔 (ft)

ASME-B31.1 Table 121.5による。

公称管径 (B)	Water (ft)	Gas (ft)
1	7	9
2	10	13
3	12	15
4	14	17
6	17	21
8	19	24
12	23	30
16	27	35
20	30	39
24	32	42

ここで、曲げ応力 = 2300 psi、撓み = 0.1"として標準支持間隔を定めている。

L_{\max} : 耐震支持点間隔, ft

a : 最大地震加速度, g

S_Y : 材料の降伏強度, psi

耐震支持点間隔は、スパン中央での撓みが 2" 及び最大曲げモーメントが 0.5 S_Y とした支持間隔である。そこで、 $S_Y = 35,000$ psi として、1B~24B、 $a=0.1g \sim 3g$ まで計算すると、表 3のようになる。

表 3 耐震支持間隔 $L_{\max}(ft)$

公称管径 (B)	L_T	0.1g	1.0g	2.0g	3.0g
1	7	24	13	11	9
2	10	34	19	16	13
3	12	41	23	19	15
4	14	48	27	22	18
6	17	58	32	27	22
8	19	65	36	30	25
12	23	79	44	37	30
16	27	93	52	44	35

20	30	103	58	48	39
24	32	110	62	52	42

S304 解析型設計 (1)

- ・静的または動的の弾性解析により、設計地震動に対する軸方向応力が以下の条件を満たす

$$i(M_i^2 + M_a^2)^{0.5} / Z \leq S_s$$

- i : 応力集中係数 (ASME B31 規格)
- M_i : 慣性力による曲げモーメント, in-lb
- M_a : 支持点の相対変位による曲げモーメント, in-lb
- Z : 管の断面係数, in³
- S_s : 材料の許容応力 普通鋼の場合, 16 ksi

S305 解析型設計 (2)

- ・S304 の照査が不調の時、塑性設計または終局強度設計によって設計してよい

S306 機械継手 (略)

S307 耐震拘束

- ・耐震拘束点への地震力の計算は、静的または動的計算によって算出する
- ・耐震拘束の適否は、MSS-SP-69 (標準品) AISC or AISI (鋼部材) ACI (コンクリートアンカーボルト) 等の規定に従う

S308 要素部品

- ・ノズルに対する作用地震力は、配管系の耐震設計の一部として行う

以上のように、米国における ASCE による配管系の耐震設計基準(案)は、ASME B31 規格を基本とし、その上に配管系の耐震設計基準 (案) を提案している。

4. 配管系の耐震設計 “ SEISMIC ASSESSMENTS ” に関する規制

米国では、1996 年 6 月に連邦環境保護庁(以下、USEPA)により連邦規制基準、40CFR, Part 68: Chemical Accident Prevention Provisions (<http://www.gpoaccess.gov/cfr/retrieve.html>) が発行され、リスクマネジメントプログラムが実施されている。カリフォルニア州では、州政府機関である Governor's Office of Emergency Services (以下、OES) が州独自の要求事項をこれに追加した Final CalARP Program Regulations, California Code of Regulations (CCR) Title 19, Division 2, Chapter 4.5 (<http://www.oes.ca.gov/Operational/OESHome.nsf/a0f8bd0ee918bc3588256bd400532608/c1786c100be4078588256b95005a8258?OpenDocument&Highlight=0,CalARP>) に基づいて California Accidental Release

Prevention (CalARP) Program が実施されている。

1998 年から CalARP において地震の影響を評価することが義務付けられている。新規設備あるいは改造等によって新たに該当することになった設備については、稼動前に耐震性評価 “ Seismic Assessments ” (“ walkdown ” と呼ばれる現場点検と必要に応じて行われる耐震評価計算)を行い、プログラムレベル 2 あるいは 3 の事業所は RMP(Risk Management Plan) を州政府機関 (OES) に提出しなければならない。また、5 年毎に耐震性評価が実施し同様に RMP を提出する。全 2,500 事業所の内、85 ~ 90%の事業所がプログラムレベル 2 あるいは 3 に該当し、耐震性評価を義務付けられている。

耐震性評価及びその審査を実施するためのマニュアルやガイダンス類も整備されているが、マニュアル類や実際に使用されるチェックリスト等のほとんどが定性的で耐震性評価は十分な経験を有する専門技術者により行われることを前提としている。

耐震性評価に関する指針である“ Guidance for CalARP Program Seismic Assessments ”も、ロスアンゼルス周辺地域 (Region 1) の地域耐震委員会 (AA、事業所代表、コンサルタントで構成) が作成したもので、各立場からの知見が集約されている。その運用においても、規制側の厳しい視点、事業者側の flexibility を確保したい意向及びコンサルタントによる客観的評価をバランスさせながら進められている。

提出された耐震性評価報告書を審査するのは、Administering Agency (以下、審査機関) と呼ばれる地域毎に認定された行政機関である。審査機関には、カリフォルニア州環境保護局 (Cal/EPA) によって認定される Certified Unified Program Agency (以下、CUPA) と、その CUPA によって指名される Participating Agency (以下 PA) がある。

特に耐震性評価におけるコンサルタントの役割が重要である。CalARP の基準では責任技術者に特定の資格を定めていないが、多くの AA が Professional Engineer(日本でいう技術士。州政府に登録) の資格を事実上要求しており、専門コンサルタントが中心的役割を果たしている。近年は、石油化学の各事業所とも社内に耐震技術者を抱えるところはほとんどなく、専門コンサルタントに耐震性評価を依頼するのが普通になっているようである。

“ Guidance for CalARP Program Seismic Assessments ” は、<http://www.calcupa.net/programs/calarp/calarp12804pgb.pdf> からダウンロードできる。表 4 にその目次および Appendix 一覧を示す。

表 4 CalARP Seismic Guidance の目次および Appendix 一覧

1.0	Introduction
2.0	Determination of Seismic Hazards
3.0	Walkdown Considerations
4.0	Analytical Evaluation Methodology
5.0	Analytical Assessment of Equipment and Nonstructural Elements
6.0	Evaluation of Tanks at Grade
7.0	Evaluation of Piping Systems
8.0	Strengthening Criteria

9.0	Recommended Report Contents
10.0	References
Table 1	Ductility-based Reduction Factors (Q) for Existing Structures and Systems
Figure 1	Former Standard Ductile Moment Connection Detail
Attachment A	Recommended Geotechnical Report Contents

5. あとがき

米国、とくにカリフォルニア州における石油化学工場における配管系の耐震設計の実情に関して概説した。日本における実施状況と大きく異なり耐震技術コンサルタントが大きな役割を持っている。このことからくる、基準や解説書の性格、審査側の体制、事業者の考え方が相当に我が国とは相違している。3者がバランスをとりフレキシブルに耐震安全性の確保が進められている。

配管系についての耐震性の評価は、配管系の建設・変更・維持の状況を踏まえて、設計の時点よりむしろ現場点検（耐震診断）を重要視しており、その結果に応じて耐震計算する箇所を絞り込み安全性を確認し、必要に応じて対策を講ずるなどの措置を行っている。さらに5年ごとに現場点検（耐震診断）を義務づけ設備環境（改造・増設など）の変化、経年変化にも対処できる体制になっている。大いに参考になると考える。