

# 日本地震工学会誌

Japan Association for Earthquake Engineering

**No.1**

Jan.2005

**創刊号**

巻頭言:会長 入倉孝次郎挨拶

特集:機械系地震工学の現状



<http://www.jaee.gr.jp/>

**日本地震工学会**

〒108-0014東京都港区芝5-26-20建築会館  
Tel:03-5730-2831 Fax:03-5730-2830

# INDEX

## 巻頭言

---

- 阪神・淡路大震災から10年目を迎えて—／入倉孝次郎…………… 1  
印刷版会誌発行にあたって／藤田 聡…………… 2

## 特集：機械系地震工学の現状

---

- 機械系構造物の地震被害と耐震設計について——性能規定型設計法の立場から——／鈴木 浩平…………… 3  
原子力設備耐震試験の経緯と展開／安部 浩…………… 7  
原子力発電所に関する民間規格の動向について／遠藤 六郎…………… 11  
高圧ガス設備等耐震設計基準／池田 雅俊…………… 14  
石油精製・石油化学プラントの地震防災のマネジメント／稲葉 忠…………… 21  
コンテナクレーン用ヒンジ式免震装置  
／辻 直人、島田 貴弘、柏崎 昭宏、信太 雅人、近藤 晃司…………… 25  
中間層免震建物対応エレベータの耐震設計目標と地震時管制  
／重田 政之、関谷 裕二、宮田 弘市、上田 信雄…………… 30  
中間階免震建物用エレベーターの開発  
／渡辺 誠治、湯村 敬、府内 宣史、林 美克、嶺脇 重雄、木村 長仁…………… 36

## 短編：

---

- 緊急地震速報実利用化への課題／藤縄 幸雄…………… 38

## 学会ニュース：

---

- 2004PVP Conference・13WCEE 参加報告／古屋 治…………… 42

## 報告：

---

- 記念シンポジウム「日本の強震観測50年」—歴史と展望— 報告／芝 良昭…………… 44

## 年間カレンダー：

---

- 年間カレンダー…………… 48

## 編集後記

---



## 巻頭言：

### —阪神・淡路大震災から10年目を迎えて—

入倉孝次郎

●京都大学



阪神・淡路大震災から10年を迎えた2005年の1月に日本地震工学会の会誌を発刊することは、本学会の発足の目的に照らして大変意義深いことと思います。10年前の1月、私は神戸の瓦礫の街にいました。地震の研究者としてこれまで一体何をしてきたのかと自問したとき、それまで「地震災害とはどういうものか」がまったくわかってなかつ

たことを思い知らされたことを思い出します。

このことは、私一人ではなく建築工学、土木工学、地盤工学、地球科学、など地震災害に関連する問題を研究課題としている研究者の多くに共通した感慨だったのではないのでしょうか。

地震による災害を少なくするにはどうしたらよいか、という考えは地震国日本に住む我々にとっては代々受け継がれた課題です。被害地震を経験するたびに、地震に対して安全な場所はどこか、安心して住める家はどのように造ったらよいか、など人々の知恵が蓄積してきました。しかしながら、地震による災害の頻度は大変少ないため、1人の人間が生涯に2度の震災に遭うのは極めてまれなことです。また時代とともに都市は変貌しており、地震に験されていない多くの構造物が存在しております。これらのことは、経験主義的な被害軽減対策には限界があることを意味しています。

地震記録や被害調査など実測データに基づいて、震災軽減のための科学的研究が行われたのは日本では1923年関東地震の時が初めてと思います。このとき地震学、土木工学、建築工学のみならず社会科学の研究者をも巻き込む総合的研究が行われ、それらの成果が立派な本として残されています。この関東大震災の経験は地震学、地震工学のみならず関連分野の研究を飛躍的に進歩させ、その後の日本の地震防災の研究に大きな影響を与えました。

関東大震災以後も、1944年南海地震、1945年三河地震、1946年南海地震、さらに1948年福井地震など地震災害は続いて起こりましたが、福井地震以後は大規模な被害を引き起こす地震がしばらく途絶えていました。大都市を直撃する地震がなかったため、地震が起きても軽微な被害にとどまりました。そのため、日本の建物や橋は地震に対して十分強くなったという過信が少なからず蔓延していたように思います。その証拠にアメリカで1989年ロムブリエタ地震や1994年ノースリッジ地震で高速道路の高架橋が倒壊するなど大被害が起こっているにもかかわらず、日本において必ずしも危機意識は高まりませんでした。

1995年阪神・淡路大震災は研究者にとっても少なからぬ驚天動地の出来事だったといえます。この地震は日本における地震防災のあり方に大きな問題があることを露呈しました。この地震による災害の大きさは地球科学や建築・土木工学など

地震を研究対象としている研究者にとって衝撃的なもので、研究のあり方に反省を迫るものでした。どの分野の研究者もこの地震の前に災害軽減に対する方策を示すことはできませんでした。

1948年と1995年の2つの震災の間、観測計器やコンピューターの技術革新と相俟って、地震学、建築学、土木工学など研究はそれぞれ個別科学として大きく発展してきました。しかしながら、これらの個別科学の成果に基づいて、将来の大地震に対する揺れの予測とそれに基づく構造物耐震性向上のための理工学的研究や地震に強い都市作りのための社会システムの整備に関する社会科学的な研究などを連結した総合防災の研究はおろそかになっていたと思います。阪神・淡路大震災の被害の拡大の原因解明の研究から、地震災害の軽減には理学、工学、社会科学のインターディシプリナリーな研究の総合的発展が不可欠なことが次第に明らかになってきました。

日本地震工学会は地震災害軽減のための研究の必然的な方向として「地震工学に関連した学問や技術」の総合化を目的として2001年1月1日に設立されました。設立の趣旨として「地震防災に関する地震学、応用地質学、構造工学、地盤工学、構造物ならびにコンクリート工学、振動制御工学、ライフライン工学などの分野と、地域防災計画、クライスマネジメント、リスクマネージメントなどの社会システム分野をカバーする普遍的な学会として、『地震工学会』を設立する」と述べられております。

2003年の十勝沖地震の時の震源から150kmも離れた苫小牧での石油タンクの火災事故、2004年の新潟県中越地震のときの山間部での斜面崩壊・土砂災害や新幹線の脱線事故、さらにスマトラ沖地震の津波災害は新たな問題を我々に突きつけています。

21世紀の前半には必ずやってくるであろう南海トラフ地震は、2003年十勝沖地震と同様にプレート境界に発生する巨大地震で、その規模は十勝沖地震をはるかに上回ると予想されます。南海トラフ地震の震源域に近い近畿地方や中部地方に存在する高度に発達した大都市部は、未だ巨大地震の強震動を経験しておりません。南海トラフ地震による災害を最小限にするためにどのような社会的貢献ができるかは日本地震工学会に科せられた大きな課題と考えます。

もう1つ重要なこととして、日本地震工学会の目的の1つに「この学会は、我が国を代表して地震工学分野の国際交流、国際貢献を担う」と記されています。まだ記憶に新しいインド洋沿岸諸国に津波による大被害をもたらしたスマトラ地震はもちろんのこと、2004年のイラン・バム地震や2001年インド・グジャラト地震のように比較的規模の小さい地震でも発展途上国では大災害が繰り返し起こっています。防災の先進国を自認する日本が防災に関する知識がまだ普及していない国々に対して、地震災害軽減のための教育や技術移転などの援助活動を支援するのも日本地震工学会の役割と考えます。

# 印刷版会誌発行にあたって

藤田 聡

●日本地震工学会理事(会誌担当) / 東京電機大学

日本地震工学会誌はこれまでWEBによる電子会誌として発行していましたが、年4回の発行の内2回を通常の印刷物としてお届けすることになりました。電子情報化の進む時代ではありますが、会誌はやはり印刷物で読みたいという声も多く、今回の発行に至りました。評判が良いようでしたら、年4回全て印刷物として発行することも今後検討していきたいと思っております。

ところで、今年は阪神・淡路大震災10周年ということで、地震防災に関する意識を新たにする年になると思います。兵庫県三木市の防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター3次元震動台(E-Defense)も運用開始となりますが、今後、本施設を使用して我々がどれだけの成果が残せるかが問われることとなります。15年程前に亡くなった私の祖母は大正12年の関東地震を自宅のあった牛込加賀町で体験したのですが、私が幼少の頃、「とにかく大きな地震が来たら生け垣にしがみつきなさい。決して大谷石などの一見頑丈そうな壁の近くには行かないこと。」と教わりました。地震時には、とても立っていられる状況ではなく祖母は家の生け垣にしがみついたのですが、近所の人で大谷石の壁に寄り添った人は、壁が崩れて下敷きになったと聞きました。私個人としては、こうした経験を少しでも工学的に具現化する努力を忘れないようにしていきたいと思いを新たにしております。

最後に、JNES安部様からのスマトラ沖地震による産業施設の被害状況についての最新の情報をいただきましたので簡単にお伝えしたいと思います。なお、インド原発の状況については会誌4月号で報告いただくことになっております。

## インドネシア火力・水力発電所関係の関連情報

インドネシアなど震源近傍の国には原子力発電所は無いので、火力発電所や水力発電所の被害状況について海外電力調査会からの情報を得ることができた。(海外電力調査会、JAICAルートからの情報、12/30現在)

・スマトラの電力系統は、北スマトラ、西スマトラ、

南スマトラの3つの系統で構成されており、アチェ州および北スマトラ州は、北スマトラ系統でカバーされている。ただし、アチェ州に関しては、北スマトラ州のメダン方向から北東海岸沿いの幹線道路に沿ってロクスウマウエを経由してバンダアチェに至る送電線が通っているが、独立運動に伴う混乱から、北スマトラ州からの送電運用がなされておらず、各都市では依然ディーゼル発電による独立系統で運用されている模様。

- ・ローカルテレビの報道によるとバンダアチェをはじめとするアチェ州の各都市(町)では、地震の影響で通信設備とともに電力設備は運用ができない状況とのこと。アチェ州内の電力設備は壊滅的であると想定されるが、各都市(町)のディーゼル発電による小規模独立配電系統であり、その系統(北スマトラ系統)全体に与える影響は軽微であると想定される。
- ・北スマトラ系統の発電設備容量は、約1,300MWであり、メダンに位置するBelawan(ブラワン)火力発電所が、出力1,077.88MWで北スマトラ系統全体の80.1%を占める。メダンは、今回の地震で一部建物に被害がでたとの情報があるが、当該Belawan火力をはじめ北スマトラ系統の主要電源設備に関する大きな被害情報は確認されていない。北スマトラ州インド洋側のシボルガという町の近傍に最近建設されたシパンシハポラス水力発電所も地震の影響を受けず通常に運転されているとの情報を得ている。なお、シボルガは、北スマトラ州のインド洋側の港町であり、その沖合にあるニマス島では、100人以上の津波による死者が確認されているにも関わらず、シボルガ滞在の邦人によると、地震動は、全く感じず、津波もほとんど影響がなかったとのこと。西および南スマトラ系統の発電所についても、今のところ大きな被害は確認されていない。

以上



# 機械系構造物の地震被害と耐震設計について

## —性能規定型設計法の立場から—

鈴木 浩平  
●東京都立大学

日本地震工学会では、平成15年度から性能規定型耐震設計法の定着と普及を図ることを目的として「性能規定型耐震設計法に関する研究委員会」（川島一彦委員長）が設立され、現在も活発な活動を展開している。筆者も初期の段階で、機械工学分野の立場から参画させていただいたが、本稿は標記委員会で発表し、平成15年度の報告書に搭載されたものをもとにまとめてまとめたものである。

### 1) 機械系施設の震害の特徴

建築物や橋梁、港湾施設を始めとする土木構造物の地震被害と比較すると機械系の諸施設・構造物の地震被害には、以下のような顕著な特徴がある。

- a) 機械系の設備や機器は、大きさ、形状、剛性などの構造特性がきわめて多様であるため、固有周期（一般には固有振動数）、振動モード、非線形特性などが大幅に異なる。そのため、地震動入力特性により、被害のあらわれ方も多岐にわたる。
- b) 各施設、設備ごとに要求される性能の基準の差異が大きいため、一見構造的には被害が軽微であっても、性能的には修復不能なほど重大な損傷を受けていること、逆に、概観上の損傷・変形が甚大であっても、主要な性能は損われていないこと等も多く、一般に損傷度の評価が難しい。
- c) 一般に、機械系施設は単独に地表面や地面基礎上に設置されることは少なく、建屋や支持構造物系に設置されるため、地震時の構造被害も支持系の耐震強度および支持系との連結状況に大きく左右され、損傷の程度も強い影響を受ける。

実際に1995年の兵庫県南部地震によって発生した種々の機械系の構造物や設備の損傷状況を調べてみると以下のような例が多かった。

- a) 重量構造物、高重心構造物の転倒、倒壊
- b) 締結部位の破断による機械類の滑動、転倒
- c) 建屋などの倒壊、変形に伴う損傷、落下
- d) 支持系との連成共振等による振動破壊や落壊

- e) 地盤液状化や支持基礎の変形
- f) 内容液のスロッシングによる貯槽等の変形・座屈および液体のいつ流

このほかにも、電気系、制御系のラインの途絶や電力、ガスなどエネルギー供給系に関連する被害も多かった。特に注目されるのは、複数の施設や構造物を連結する装置や部位にきわめて多くの損傷があらわれていたことである。

表1は、上に述べた考察をもとにして、代表的な機械設備の地震被害の状況を

- a) 地震動の慣性力によるもの
  - b) 複数構造物（施設）間の相対的変形によるもの
  - c) 地盤液状化やその影響によるもの
  - d) 内容液のスロッシングによるもの
- を主要要因として整理したものである。

### 2) 高圧ガス設備の耐震設計基準の改訂

機械系の構造物、設備の中で、政令レベルで耐震設計基準が策定されているものは、経済産業省（旧・通産省）の告示として規定された「高圧ガス設備等耐震設計基準」のみであるので、この「基準」の改訂経緯を述べ、性能規定化の視点で解説してみる。

#### (1) 兵庫県南部地震による高圧ガス設備の被害

1995年1月17日の兵庫県南部地震においては、高圧ガス設備については、神戸市東灘区の液化石油ガスの貯槽施設から、LPガスが漏洩した事故が生じた。そのほかにも、いくつかの事業所において貯槽の傾斜や不同沈下、配管結合部からのガス漏洩、防液堤や障壁の破損等がみられたが、地震の規模からみて比較的損傷は少なかったといえる。

しかし、LPガスの漏洩事故は極めて大規模な震害であった。この事業所は人工地盤上にあったが、地震発生時に生じた地盤の液状化により、護岸が1～3mも海側に張り出し、また、敷地全体が水平方向に約30～75cm移動し、約50～75cmの沈下も生じたため、塔槽類、架構、配管ラック等が移動し、これらの間を結ぶ配管系に過大な力が作用したため、フランジ部から各所でガス漏洩が発生した。貯槽側に近い元弁部か

表1 代表的設備の震害要因

要 因 設 備	慣 性 力	相 対 変 形	液 状 化	スロッシング
機械の基礎及び支持部	・支持構造の移動	・脚部アンカーボルトの引抜き	・基礎の沈下・傾斜 ・冠水・浸水 ・支柱の浮き上がり	
ボイラ	・暖房用ボイラのドラム、バーナの移動	・火力発電用振れ止め装置の損傷、破断 ・冷却用スぺーサ管の破断 ・伸縮継手の破断	・支持構造物、架構の沈下及び変形	
クレーン	・ジブクレーン上部構造の落下・倒壊 ・同上、旋回フレームの落壊	・天井クレーンの落下 ・建設用ジブクレーンの壁つなぎ部の破断	・港湾用アンローダの倒壊 ・コンテナクレーンの脚部座屈及び車輪の脱レール	
エレベータ	・カウンタウェイトの脱レール・衝突 ・巻上げモータの飛び出し	・「かご」の変形・破損 ・ガイドシュー、ガイドレールの変形		
配 管	・架構の倒壊 ・配管付属ポンプ・計器類の破損	・フランジ部からのガス漏洩 ・配管支持具の破断 ・グレーチングとの衝突	・配管支持柱の座屈 ・緊急遮断弁、ハンガの圧損	
タンク	・積上げ酒タンクの倒壊 ・“象の足”座屈 ・ボンベ類の倒壊	・配管と接続フランジの破断 ・タンク間連結装置の破断・落下	・タンク及びタンク基礎の傾斜 ・防油堤の破断 ・支持杭の破損	・チョコレート溶液の溢流・散乱 ・水タンクのダイヤモンド座屈
工作機械	・立形、高重心機械の転倒、衝突 ・軸受部の損傷	・軸心の狂い ・コンベアの移動 ・連結ボルトの破損	・浸水による冠水	・アルミ溶液の溢流と飛散
ポンプ	・ケーシング割れ ・基礎ボルト破断	・ロータの変形・固着	・支持台の傾斜 ・冠水	

らの漏洩は特に顕著であった。

この事故の調査も踏まえ、以下の事項についての検討を行ない、耐震設計基準の見直しをするようにとの提言がなされた。<sup>(1)</sup>

- a) 従来、剛設計の概念で実施された塔槽類の耐震化とは別に、配管系の耐震化を行うことが必要であり、その際、配管系の可撓性を生かした柔設計の立場に立つべきである。
- b) 防液堤等の被害状況を踏まえ、適切な地盤液状化対策の必要がある。
- c) 地震後の非常運転時に備え、保安電力の確保、計測制御系や非常時対処法の設備が必要である。

これらの提言を受けて、通商産業省(当時)は、1981年10月告示515号として公布されていた従来の「高圧ガス設備等耐震設計基準」の見直しを行ない、1997年3月に告示143号として「基準」の改訂を行った。<sup>(2)</sup>

## (2) 「告示」改訂の概要

告示143号としてあらたに公布された、耐震設計基

準の要点は以下の3点に絞られる。

- a) 配管系の耐震基準の策定
- b) 高レベル地震動の導入による2段階耐震設計法の策定
- c) S I 単位系への移行

性能規定化の視点から重要と考えられる a) と b) について、やや詳しく述べることにする。

### (3) 配管系の耐震基準の策定

まず、配管系の耐震基準策定に当り考慮された配管の耐震設計の適用範囲、配管系としての対象部位、配管の耐震性能評価法について以下に述べる。

#### a) 配管の適用範囲

配管の適用範囲については、事業所における高圧ガス設備等に係る配管は膨大であるだけでなく、複雑なプロセス配管もあり、より効率的に、かつ、安全性が担保できる範囲でなくてはならない。このため、配管については小口径のものや少滞留量のもの全て告示の対象とするの

でなく、配管設計の観点から最低限、告示として耐震対策を講ずべき範囲を決めることとなった。このことと配管構造の耐震性の重要性を考慮して、配管の適用範囲は、改正告示において外径45mm以上であって塔槽類から地震防災遮断弁までの間の配管、または、地震防災遮断弁で区切られた間の内容積が3m<sup>3</sup>以上の配管のいずれかに該当しているものとした。

#### b) 配管系としての対象部位

改正後の告示では、配管系の耐震基準の対象部位として管、フランジ継手、伸縮継手、弁、塔槽類のノズル部を挙げている。これは配管系の耐震基準化の基本方針として、当該配管系が損傷しないよう設計するため、配管系を構成している部位ごとに耐震設計を行う必要があると判断したためである。

#### c) 配管の耐震性能評価法

改正後の告示では、2段階地震動による耐震性能評価を行うこととなり、このうちレベル1地震動に対する耐震性能評価としては、従来の耐震設計設備と同様に耐震上重要な部材に関し詳細計算を行ない確認する方法となるが、重要度IIまたはIIIの配管系に関しては簡易的に確認する方法（許容スパン法）が認められた。

これは、設計対象の配管が事業所内に相当数あること及び配管は塔槽類等の間を複雑に接続されていることから、重要度の低い配管にあっては、配管支持点間のスパン長が当該配管の外径に対応して規定された許容スパン長以内であれば、レベル1地震動に対する耐震性能を保有しているものとした。この場合塔槽類、架構等を渡る配管では当該構造物の地震時の揺れを考慮しなければならないとしている。

### (4) 2段階地震動による耐震設計（高レベル地震動の設定）

兵庫県南部地震の被害教訓及び改定された「防災基本計画」の趣旨に基づき2段階の地震動を設定するよう検討を行ない、レベル1地震動及びレベル2地震動による耐震性能をそれぞれ規定し、評価することとした。

#### a) レベル1耐震性能評価

レベル1地震動は改正前の告示において規定していた地震動であり、それに対応するレベル1耐震性能というのは、この地震動に対して高圧ガス設備等に有害な変形及び高圧ガスの漏洩がない性能を意味している。構造的には、対象

となる高圧ガス設備が、弾性応答範囲内でなければならないことが要求されている。

耐震性能の確認方法としては、従来の告示で規定されているとおり、耐震設計構造物に対して応答解析を行ない、当該構造物の耐震上重要な部材に生じる応力を算定し、当該部材の許容応力以内であることを実証することとなる。これらの「レベル1耐震性能」の評価については、新しく対象となった配管系について具体的な計算手法、適用範囲、評価例などを示した指針が策定されている。<sup>(3)</sup>

#### b) レベル2耐震性能評価

改正前の告示においては、通常発生すると考えられる地震動として最大300ガルを設定していたが、これをレベル1地震動と同等とした。従来は、発生確率が低いこれ以上高レベルの地震動は耐震設計の想定地震動としては想定していなかった。

改正後の告示で新たに定めたレベル2地震動の規模としては、これによる耐震性能評価においてもレベル1と同等の減衰定数の値を採用することを前提として、兵庫県南部地震動の推定レベル及び他の耐震設計基準で示されている地震動レベルを参考に600ガル程度とした。このため、レベル2地震動はレベル1地震動の2倍以上とし規定した。「以上」としている理由は、今後、地域によっては活断層の点在マップ等が公表され、当該活断層を考慮してさらに高い地震動レベルの設定もありうることを想定しているからである。

レベル2耐震性能を保つことは、このクラスの地震動に対しても高圧ガス設備からガス漏洩がなく、当該設備の気密性が保持されなければならないことである。このことは設備自体の耐圧部材、支持部材等が地震による多少の変形を生じたとしても、当該変形が許容した範囲内であることを確認するという、いわゆる弾塑性設計を前提としている。

これを受けて、地震による変形の許容範囲については、部材が地震によりその弾性域を超えて変形した変位量（「応答塑性変位量」）を降伏する際の変位量（「降伏変位量」）で除した値（「応答塑性率」）が、部材が変形しても構造上影響を生じず許容できる変位量（「許容塑性変位量」）を降伏変位量で除した値（「許容塑性率」）を超えないようにすることが規定されている。

### (5) 性能規定化へ向けて

兵庫県南部地震後に行われた高圧ガス設備等耐震設計基準の改訂では、レベル1耐震性能評価は従来の基準と同等であり、いわゆる“仕様基準”としての応力計



算式および許容応力は明確に規定されている。しかし、レベル2耐震性能評価に関しては“性能基準”として、「レベル2地震動に対して高圧ガスの気密性が保持されること」を要求しているが、明確な評価法は現時点では規定されていない。

レベル2耐震性能評価については3年間の経過措置が設けられ、実際の適用は2000年4月からとなったため、評価方法全般に関する計算手法については、現在、(社)高圧ガス保安協会において検討中である。当面は現状の技術レベルの指針としてまとめられる予定であるが、今後はさらに技術的な検討を継続させる必要がある。また、“性能基準”としての運用法も確立していく必要がある。

レベル2の耐震性能の評価に関しては、3年間の経過期間が設けられ、評価計算の方法などが(社)高圧ガス保安協会において検討がなされた。その結果を受けて2000年7月に、レベル2耐震性能評価指針についての評価事例とその解説が同協会から発刊された。<sup>(4),(5)</sup>

これらの指針では、耐震設計構造物の限界状態を扱うレベル2耐震性能評価に関しては技術的に発展途上にあることを考慮し、特定の手法に限定することなく、設計者が柔軟かつ適切に評価手法を選べるように、現状の知見や他の耐震基準の状況等を列挙したり、その適用範囲を示したりしている。

また、改正後の告示ではレベル2地震動について最低限のレベルを定めているが、特定の高圧ガス設備の近傍の活断層等の調査が進み、別途指定された場合は妥当性のある地震動を設定する必要がある、今後、活断層等の調査の動向を注視していかなければならない。

### 3) 今後の課題

機械系の施設等については、性能規定型耐震設計化へ向けた検討作業という点では、ここで述べたもの以外では建築物や土木系の構造物の動向に比べて遅れている、あるいは、ほとんど着手されていないといっても止むを得ない状況にある。1)で述べたような機械系構造物の多様性がその裏にあると考えられるが、「性能規定化」自体は「耐震設計基準」とは別な基準策定作業として進められている。

例えば、筆者も関わっている社団法人日本クレーン協会では、厚生労働省の指導の下で「クレーンに係る構造規格の性能規定化」を検討し、2003年2月に報告書を提出している。同様の動きはボイラ協会でも実施されている。これらの「構造規格」等の中には、「耐震設計」あるいは「地震荷重の算定」などという項目が含まれている訳であり、例えばクレーンにおいては、港

湾用のコンテナクレーンに免震装置を設けることにより、地震荷重を軽減できるというような改訂も考えられている。

また、通商産業省は1999年の11月に「特定設備検査規則の性能規定化について」という通達を出し、技術基準の性能規定化にあたり、「保安の確保上必要な機能や履行すべき手順等の大枠のみ規定する」として、性能規定化された技術基準の解釈、位置づけ、運用、改訂や追加などについて定めている。

機械系の施設や構造物は、系自体の中に動的要因、動力源を含むものが非常に多いために地震荷重以外の動荷重によって実際の構造設計は大きく支配されるものが多い。その一方で、貯槽やクレーン、エレベータ等地震による被害がその機能に重大な支障を与えるものもある訳であり、他分野の動向を学びながら、耐震基準等の性能規定化への要請に答えていかなくてはならないと考えられる。

### (文献)

- (1)高圧ガス保安協会、「兵庫県南部地震に伴うLPガス貯蔵設備ガス漏洩調査最終報告書」(1995-6)
- (2)通商産業省、告示143号「高圧ガス設備等の耐震設計基準」(1997-3)
- (3)高圧ガス保安協会、「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」(1997-11)
- (4)高圧ガス保安協会、「高圧ガス設備等耐震設計指針—レベル2耐震性能評価・解説編」(2000-7)
- (5)高圧ガス保安協会、「高圧ガス設備等耐震設計指針—レベル2耐震性能評価・評価例編」(2000-7)

# 原子力設備耐震試験の経緯と展開

安部 浩

●独立行政法人 原子力安全基盤機構

我が国は世界でも有数の地震国であり原子力発電所には厳しい耐震設計が要求されているが、近年は特に大入力での耐震安全裕度及び経年設備の耐震性について関心が高まっている。当機構では、これらを検証、評価するため、

1. 軽水炉重要設備の耐震試験
2. 〃 経年設備の耐震試験

を実施または計画中であり、ここに概要を紹介する。

## 1. 軽水炉重要設備の耐震試験

### (1) 試験の経緯

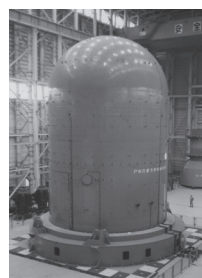
（財）原子力発電技術機構では、軽水炉重要設備の耐震性実証を目的とし、多度津工学試験所の大型振動台と実機スケールに近い試験体を用いて振動試験が実施されてきた。対象設備、実証項目、入力レベルを表1に示すが、試験の狙いは：

- ①原子炉容器など大型単体機器の耐震性実証
- ②原子炉停止時冷却系などシステムの 〃
- ③新技術（制振サポート）の実証
- ④コンクリート製格納容器、配管系などの機能限界強度の実証

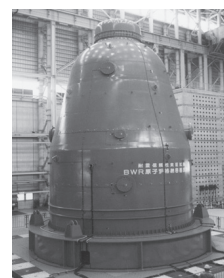
のように推移してきた。

表1 原子力施設耐震信頼性実証試験 概要

試験の狙い	試験対象	実証項目	最大入力
①機器単体の実証 (S55-H1)	原子炉容器 炉内構造物 一次冷却系 鋼製格納容器	耐震性 〃、制御棒挿入性 〃 〃、機密性	1.6～1.7×S2 1.5～1.7〃 1.1～2.0〃 1.4～1.5〃
②システム機能の実証 (H2-H5)	非常用D/G 電算機システム  原子炉停止時冷却系等	〃、システム機能 非免震、免震の 〃  耐震性、システム機能	1.3 〃 非免震4.6S1 免震 5.3S1 1.5×S2
③新技術の実証 (H6-H13)	主蒸気、給水系  制振サポート支持 重機器	〃、配管制振サポートの有効性 〃、機器制振サポートの有効性	2.5×S2 2.9 〃
④限界強度の実証 (H7-H15)	コンクリート製格納容器 配管系終局強度	〃、破壊強度 〃、破壊強度	5～9 〃 8.5×S2相当 (応変変位レベル換算)



PWR原子炉格納容器



BWR原子炉格納容器



原子炉停止時冷却系

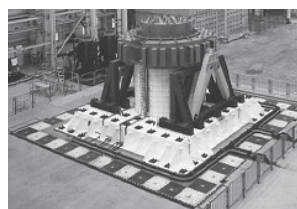


配管系終局強度

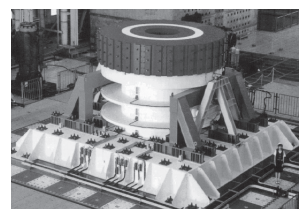
### (2) 試験データ、成果の例

#### a. コンクリート製格納容器

最新のPWRで採用されているプレストレストコンクリート製原子炉格納容器 (PCCV) 及びBWRで採用されている鉄筋コンクリート製原子炉格納容器 (RCCV) を対象に、S2の5～9倍の入力による破壊試験を行い構造強度及び漏洩防止機能に対する耐震裕度を評価した。また、図1に示すようにライナ剛性、 tendon軸力 (PCCV) も考慮したコンクリート製原子炉格納容器の復元力特性を新たに提案し、機械学会規格に反映された。



RCCV試験体



PCCV試験体

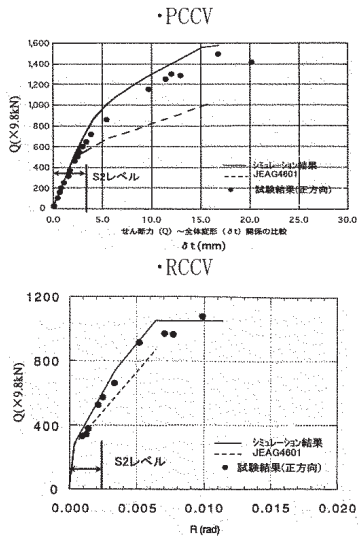


図1 コンクリート製原子炉格納容器の復元力特性

b.制振サポート支持重機器

改良型PWRで採用が見込まれる制振サポート（鉛ダンパ）で支持した蒸気発生器について図2に示す通り振動台限界の2.9S2まで加振し機能限界を把握するとともに従来より精度の高い鉛ダンパ抗力特性評価式及び許容吸収エネルギー（図3）を設定し、電気協会規格に反映される予定である。

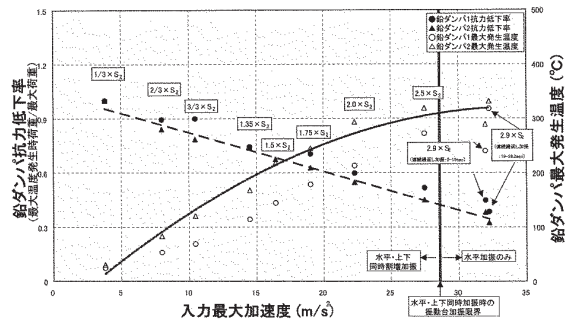


図2 試験データ例（鉛ダンパ内部温度と抗力低下率）

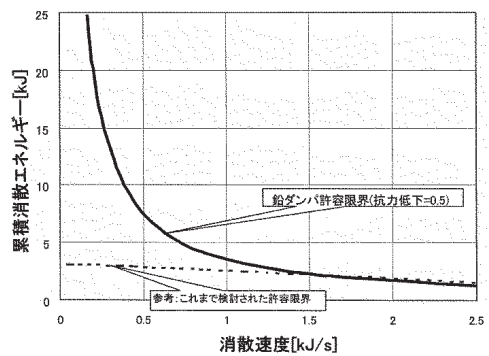
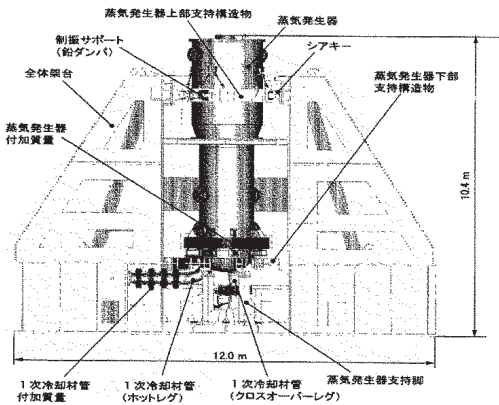
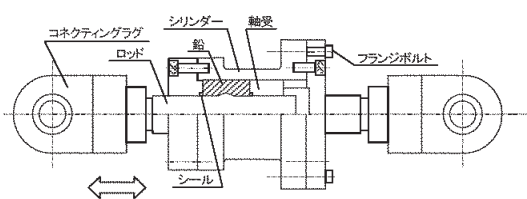


図3 許容吸収エネルギー量評価線図



制振サポート支持重機器試験体



鉛ダンパ

(3) 今後の展開

平成15年度以降は当機構が試験を引き継いでいるが、近年地震PSAが原子力発電所の耐震性評価に適用される動向にあるので、大入力時の機器の耐力（機能維持限界）を評価する機器耐力試験を次の通り展開中である。

a. 機器耐力試験の背景と試験内容

現状のPSA評価で用いている機器の耐力データは設計地震をやや上回る程度の実証試験データから推定する等、実際の機能維持限界が確認できていないものがある。このため炉心損傷頻度評価が実力より大きめになっている可能性があり、耐力データの信頼性の向上が望まれている。国内BWR,PWRモデルプラントを対象にした地震PSA試算の結果、炉心損傷頻度への影響が大きいものとして次の機器が抽出されたので、大入力で機能維持限界を把握する試験を順次実施中である。

- ・電気品、横形ポンプ—機器耐力その1 (H14-16)
  - ・制御棒挿入性関連機器— 〃 その2 (H15-17)
  - ・大型立形ポンプ— 〃 その3 (H15-17)
- いずれも実機に直接大入力を加えて地震応答及び



機能維持状況を把握する実機試験と、複数の部品を機能喪失に至るまで加振し機能限界とばらつきを把握する部分試験を実施し、対象機器の耐力値を評価するとともに類似機種まで展開できる耐力評価手法を検討する。

#### b. 機器耐力その1 (電気品、横形ポンプ)

試験に先立ち図4に示す通り多度津振動台に振幅増幅装置を設けて加振能力を最大6Gまで増強した。

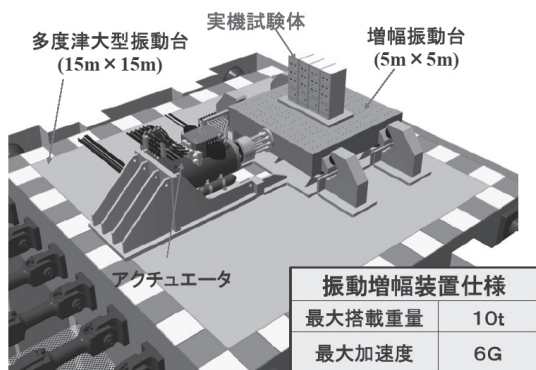


図4 振動増幅装置

・この上で、電気品についてはPWR,BWRの保護計器ラックなど代表的な計制御系盤5面とパワーセンタなど電源系盤3面について、通電・作動状態で前後・左右方向に2G(設計地震の2倍に相当)から順次加振レベルを上げる試験を行った(図5参照)。途中で機能喪失に至った盤については、状況を確認し当該部品固定などの処置を行った上で加振レベルを上げて、新たな機能喪失モードの把握に努めた。

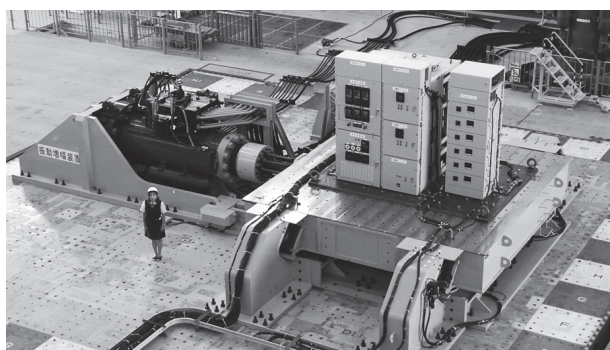


図5 電気品試験状況

・横形ポンプについては、BWR原子炉補機冷却水系ポンプ(単段型)を試験体に選定し、振動台上に水ループを組み100%流量及び停止時で軸方向及び軸直角方向の振動試験を図6の通り実施した。6Gまでの加振でポンプ機能の異常は認められなかった

が、ベアリングなどの部分試験の結果とあわせ耐力値を評価中である。PWR横形ポンプはインペラが多段のものが多く、部分試験と横軸回転系の振動解析により耐力値を評価中である。

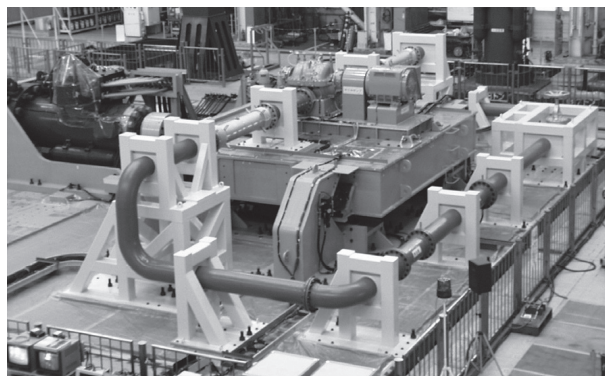
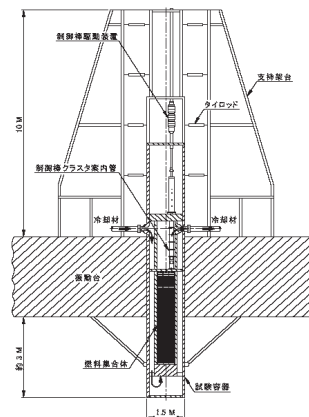


図6 横形ポンプ試験状況

#### c. 機器耐力その2 (制御棒挿入性関連機器)

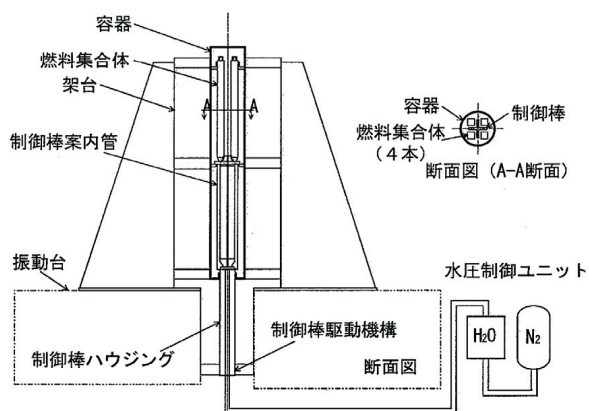
PWR、BWRは地震時の制御棒挿入時間について安全評価上の規定値がある。以前の多度津での炉内構造物耐震実証試験において、1.7S2程度までの加振により燃料集合体の変位などが挿入時間に影響することが把握されているが挿入時間規定値を超えるレベルのデータは無かった。今回はこの範囲のデータを得るべく、燃料集合体の変位が従来値の2倍以上となる試験を実施している。

・PWRについては、炉内軸流による燃料集合体の振動減衰効果も把握するため、振動台上に水ループを組み、実寸模擬燃料3体と制御棒及び駆動機構1セットを収納した容器に通水した状態と静水の状態で3S2を超える応答レベルの振動試験を実施し、挿入時間が規定値を超える領域のデータを採取した。なお、このレベルでも制御棒の挿入性は確保されることを検証できた。



PWR制御棒挿入性試験体

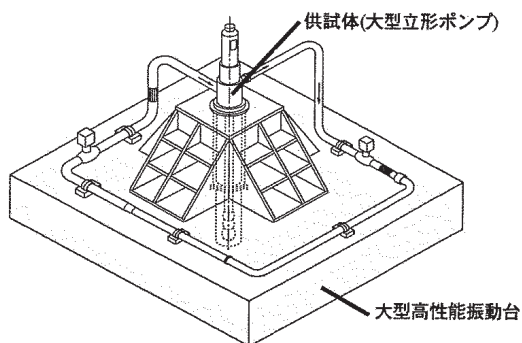
・BWRについては、実寸模擬燃料4体と制御棒及び駆動機構1セットを収納した試験体について4S2を超える応答レベルの振動試験を実施し、燃料変位が従来の2倍を越え挿入時間が規定値に近いレベルのデータを採取できた。



BWR制御棒挿入試験体

d. 機器耐力その3 (大型立形ポンプ)

ポンプ主轴、インペラを立形容器(ピットバレル)に収納した構造のBWR残留熱除去系ポンプ実機を試験体とし、通水作動中及び停止中に先行の類似試験の3倍程度までの入力で加振し機能限界の把握を狙った試験をH17年2月より開始すべく準備中である。



大型立形ポンプ試験体

e. 機器耐力その1～その3に引き続き、弁、タンクを対象に機器耐力その4をH17-19の期間で実施すべく計画である。

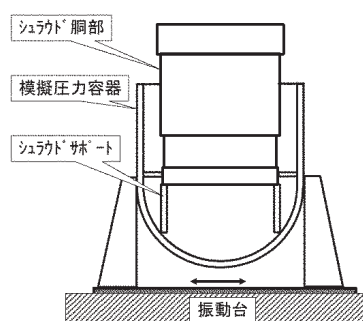
2. 軽水炉経年設備の振動試験

近年、経年変化した軽水炉設備の耐震性が注目されている。当機構では欠陥を有する炉内構造物(シュラウド)及び配管について、機械学会維持規格の拡充に

も貢献すべく、振動試験と耐震安全性評価手法の整備をH16-18の期間で実施している。

(1) 炉内構造物(シュラウド)

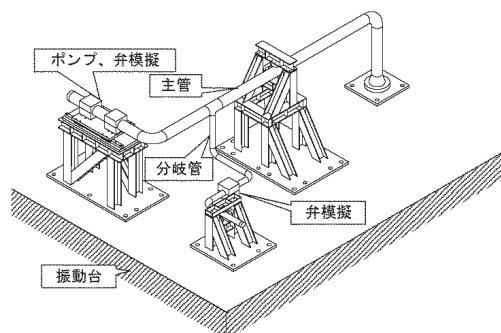
維持規格の最大許容欠陥を想定し、シュラウド胴部とサポート部の加振機による要素試験及び、両者を組合せ材料・溶接構造を模擬した1/2.5スケールの複合モデル振動台試験をH17-18年度に実施する。



シュラウド複合モデル試験体

(2) 配管

維持規格の最大許容欠陥を想定し、溶接構造を模擬したエルボ要素の加振機による要素試験と、振動台による複合モデル試験をH17-18年度に実施する。



配管複合モデル試験体

(3) 今後の展開

経年設備試験の今後の対象として、現在次の項目を検討中である。

- ・コンクリート—機器定着部
- ・コンクリート構造物
- ・PWR炉内構造物



# 原子力発電所に関する民間規格の動向について

遠藤 六郎

●日本原子力発電株式会社

## はじめに

最近、様々な分野で規制基準の性能規定化が言われている。例えば、隣室の音が聞こえないように仕切壁の厚さを具体的に規定するより、カラオケボックスのように、薄い壁でも同じ性能が有ればよく、必要な性能・機能を規制基準で規定すればよいとの考え方である。ここでは、このように必要な性能・性能を要求する規定を性能規定と呼ぶこととする。一方この規制基準に基づき、学会等が具体的設計手法等を規定して民間規格とすれば改廃が迅速かつ容易になり、設計者の技術的な創意、工夫が容易に実際の設計に適用されることになる。そうすれば、設計者のモチベーションも上がり、ひいては技術の進歩を促す効果があると言われている。また、技術の進歩を迅速に実設計に取り入れることが出来るとも言える。

本稿では、特に原子力発電所の耐震設計とそれに密接に係わる強度等に係わる規制基準と民間規格の最近の動向について話を進めることとしたい。

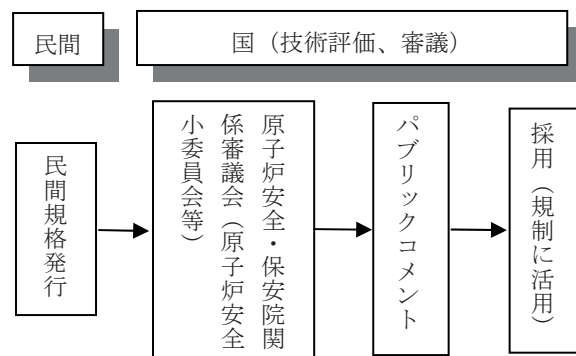
## 規制の動向

原子力発電所に対する安全規制を行っているのは、内閣府の原子力安全委員会及び経済産業省の原子力安全・保安院である。原子力の安全に係わる規制に関し依拠する法律は、主として前者は核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（略称：炉規法）、後者は電気事業法（略称：電事法）である。筆者が特に職務上関連し、また、現在具体的な動きが有るのがこの電事法に関するものである。

電事法の下には、発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令（略称：省令62号）がある。また、この省令に基づき、さらに、発電用原子力設備に関する技術基準（略称：告示501号）があり、材料・構造強度について規定している。

参考文献によれば、「告示501号等を例に、詳細かつ具体的な仕様が規定されていて、原則として、規定されている仕様だけが認められることとなっているため、技術基準の改訂が行われなない場合には、最新の知見の反映が遅れがちとなり、技術進歩への迅速かつ柔軟な対応が困難となるなどの問題がある。一方、安

全上必要な機能や性能のみを要求する規定が多い技術基準（省令62号）もあり、その判断基準の具体性が乏しいなどの問題がある。」としており、基準類がこの観点からは整合性を欠いていることを認めている。さらに、「このような状況を踏まえ、技術基準は要求される性能を中心とした規定とするとともに、学協会にその実現方法としての民間規定の策定を促し、その策定された民間規格を国が技術的妥当性を評価した上で規制に活用すること（図—1 規格・基準の制定プロセス参照）の基本方針を既に平成14年7月に示している。」



註）パブリックコメントでは、国の技術評価書に対して規制要件について公衆意見を募集

図—1 規格・基準の制定プロセス

また、「日本機械学会、日本原子力学会、日本電気協会等の学協会が公平なメンバー構成による公開された場での検討を前提として、公平・中立・公開（透明性）を重視した手続きで民間規格の策定を進めている。」とある。

また、「性能規定化については、規制の体系における規定の内容は、4つのレベル（レベル1：目標、レベル2：機能要求、レベル3：性能水準要求、レベル4：具体的な仕様・実施方法）に分類し、レベル4について民間規格が必要である。」としている。

以上のような背景から、国は自らの技術基準は性能規定化し、具体的な設計方法等の詳細は民間規格の策定を促しそれを活用しようとしている。

## 国の指針、基準類の現状

原子力発電所の耐震設計に係わる依拠基準は、内閣府・原子力安全委員会の「発電用原子炉施設の耐震設計審査指針（昭和56年7月20日原子力安全委員会決定、平成13年一部改正）（以下耐震審査指針と呼ぶ。）と発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令（昭和46年6月15日通商産業省令第62号、平成12年経済産業省令第24号改正）（以下省令62号と呼ぶ。）がある。省令62号では第5条で耐震性について要求している。

前者は、原子力安全委員会・原子力安全基準専門部会の下に耐震指針検討分科会を設置し、平成13年7月より改正作業を進めている。後者は、この耐震審査指針の改正結果を踏まえ改正される。

## 民間の動向

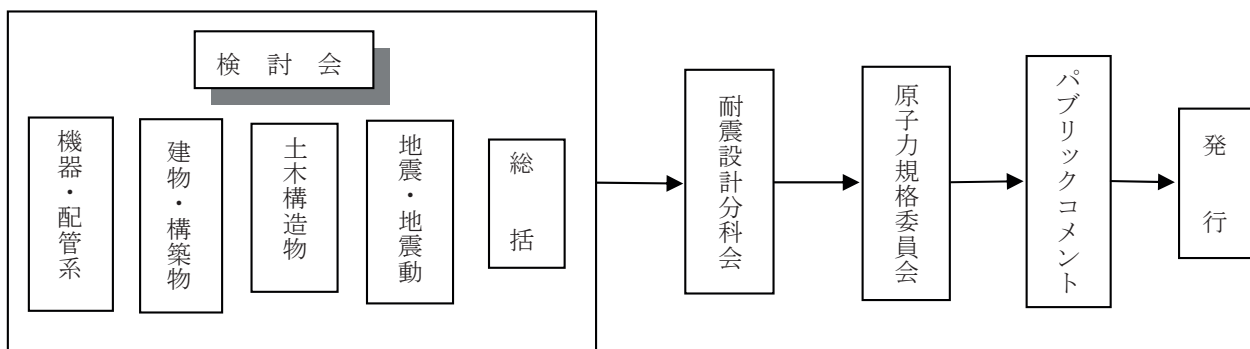
民間側では、上述の学協会が原子力発電所の安全性等に係わる規格を作成している。

この学協会のうち、社団法人・日本電気協会の原子力規格委員会（以下規格委員会）でも様々な規格（指針）を作成しているが、筆者が関与している「原子力発電所耐震設計技術指針」JEAG 4601（以下耐震技術指針と呼ぶ。）を中心として記載することとしたい。

規格委員会は、中立、公正及び透明性を保持するため、特定の個人、企業・業界の利益に偏らないよう、学識経験者、事業者（企業）、保険業界等からの委員で構成され、また審議は公開されている。例として、耐震技術指針が発行されるまでの委員会及び分科会等の審議の流れを図一2に示す。図に示される検討会及び分科会も全て公開である。

耐震技術指針は、原子力発電所を設計するための地震及び地震動の決定法、発電所敷地周辺の活断層及び地質構造及び敷地の地盤調査法など並びに土木構造物、建物・構築物、機器設備及び電気設備などの設計法が示されている。したがって、地震学及び地震工学をはじめ、電気工学に至までの幅広い技術を基礎とし手いる。機器設備関係の設計に関しては、省令62号第9条（材料及び強度）に基づく発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（昭和55年通商産業省告示第501号、平成6年7月21日改正）がある。これに該当する民間規格としては発電用原子力設備規格 設計・建設規格が日本機械学会から発行されており、既に原子力安全・保安院より設置者が詳細設計段階で行う工事認可申請時に、その認可の規格として用いることが認められている。しかし、これらの基準及び規格には耐震設計に関して規定されていないので、上記設計建設規格では、耐震技術指針を引用する形になっている。（図一3 規制と民間規格の関係（耐震の設計・建設関係）について参照）

参考文献：原子炉安全小委員会 資料12-5-1 原子力発電設備の技術基準の性能規定化に関する具体的な検討について 平成16年6月 原子力安全保安院）



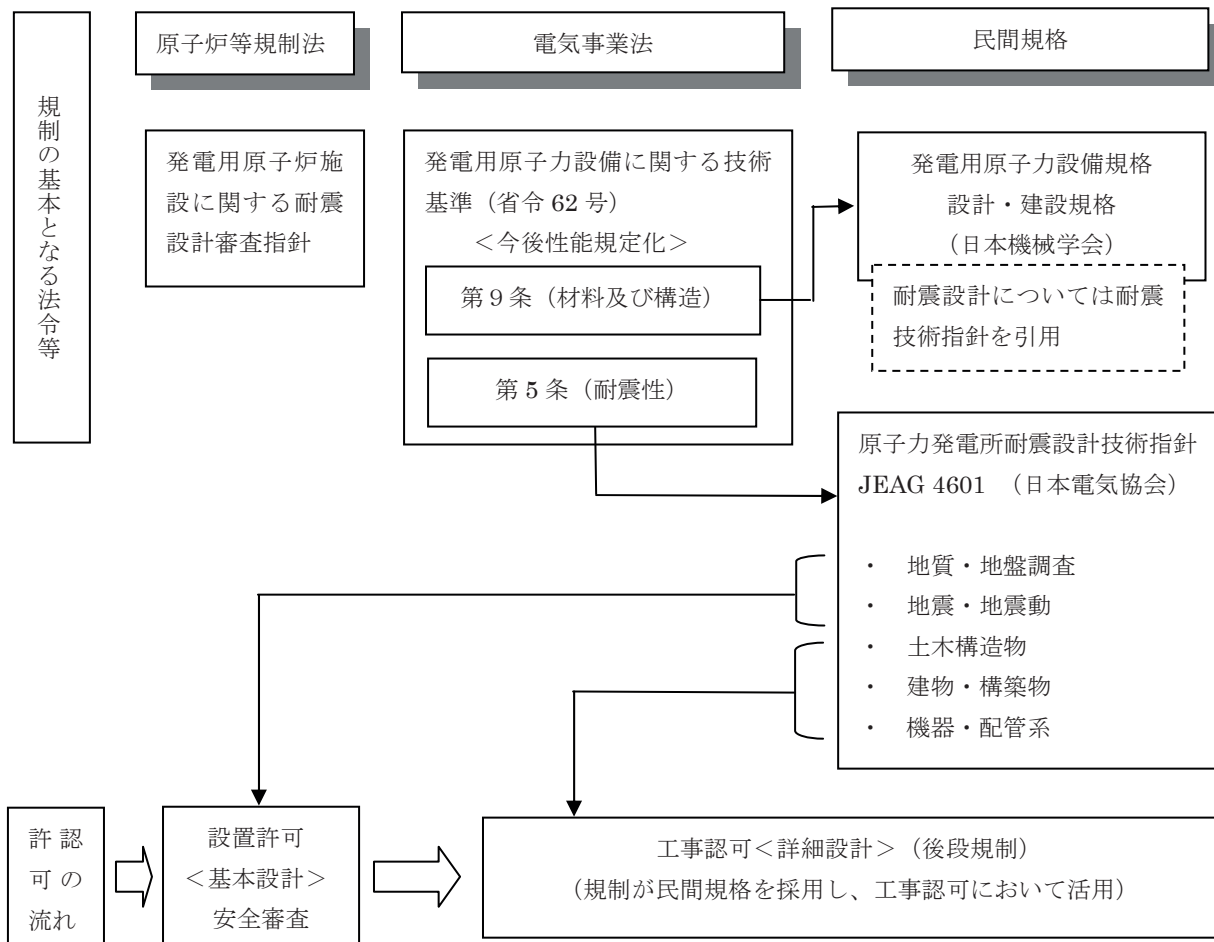
註1) 総括検討会は各専門分野の検討会の共通事項について必要に応じ調整を行う。

註2) 土木構造物検討会は、地質・地盤調査に関する内容も検討に含む。

註3) 機器・配管系検討会は電気設備に関する内容も検討に含む。

註4) パブリックコメントは必要に応じ規格（技術指針）に反映される。

図一2 原子力規格委員会等の審議の流れ



図—3 規制と民間規格の関係について (耐震設計関係)

# 高圧ガス設備等耐震設計基準

池田 雅俊

●高圧ガス保安協会

## 1. まえがき

高圧ガス設備等耐震設計基準(以下「耐震告示」という)は1982年から施行されてきたが、兵庫県南部地震で耐震告示の対象となる塔槽類に関しては被害は見られなかったものの、配管及び基礎で被害が見られた。このため、基準の見直しを行い、1997年3月通商産業省平成9年告示143号にて改訂された。

被害の見られた配管は改定前の耐震告示では耐震設計の対象外であったため対象として追加した。また、基礎に関しては地盤の液状化に伴う被害であり、液状化時の耐震性能の検討を追加した。

一方、塔槽類に関して改定前の耐震告示は設備の寿命期間中に発生する強さの地震動(以下「レベル1地震動」という)に対する基準であるが被害が見られなかった。しかしながら、兵庫県南部地震のように発生確率が低い強い地震(以下「レベル2地震動」という)に対して、耐震設計設備の耐震性能を明確に把握する必要があるためレベル2耐震性能の評価を義務づけた。

高圧ガス設備等耐震設計基準(耐震告示)に関する改訂の概要を以下に述べることにする。

## 2. 兵庫県南部地震以前の高圧ガス設備等の耐震対策

高圧ガス設備に係る耐震対策については、1960年代までは建築基準法による耐震設計が行われてきたが、1964年の新潟地震、1968年の十勝沖地震等を経験し、塔槽類等から構成される高圧ガス設備に適した耐震対策の開発に焦点を絞り、1971年から1972年にかけて高圧ガス保安協会において、通商産業省の委託を受け「コンビナート防災システム開発調査委員会」において検討が行われた。この調査において、高圧ガスの耐震対策は次のような方針で耐震設計がなされるべきだとした。

- 1) 耐震設計は周辺地域に被害を及ぼさないことを目的とする。
- 2) 高圧ガス設備等は重要度分類を行い、重要度に応じて設定した地震動に対して耐えるよう設計を行う。
- 3) 構造物の固有周期を考慮した動的耐震設計手法による。
- 4) 強度設計と共に地震時の2次災害を防止するよう

な防災システムの面からも配慮が必要である。

これらの検討成果は、1974年高圧ガス保安協会より「コンビナート保安・防災技術指針——化学工場における地震対策」3)として発刊された。

1974年7月の高圧ガス及び火薬審議会の答申において高圧ガス事業所の耐震設計指針の作成など具体的な対策を早急に進めることが必要である旨の指摘がなされた。この答申を受けて1975年から高圧ガス及び火薬類保安審議会のもとに地震対策分科会を設け高圧ガス設備の耐震設計基準作策定を行い、1980年8月「高圧ガス製造施設等耐震設計基準」として最終報告された。

当該地震対策分科会の報告を受けて通商産業省は、1981年10月通商産業省告示515号により「高圧ガス設備等耐震設計基準」を公布し、新設の高圧ガス設備に対して翌年4月1日より施行した。当該耐震設計基準の基本的な考え方は次の通りである。

- 1) 通常起こると考えられる最大級の地震相当の設計地震動により耐震設計をおこなう。関東・東海地区では地表加速度を300galと設定した。
- 2) 地震により設備が損傷した場合、事業所外の地域住民の生命や財産に損害を与えないよう、設備の潜在的な危険性を評価し設備の重要度を設定し、適切な耐震設計を実施することを要求する。
- 3) 対象設備として、ある程度以上の規模の塔類及び貯槽とした。
- 4) 地震動と構造物の共振状態を配慮する修正震度法を採用する。
- 5) 評価基準は、当該重要度に応じた地震の後も高圧ガスの設備は損傷することなく運転が継続できることを要求している。

当該耐震設計基準が施行される以前に設置された高圧ガス設備等(以下「既存設備」という)に関しては、新設高圧ガス設備と同様に耐震性の向上を図る必要があることから、耐震性点検要領及び耐震性向上対策指針を作成し、全国の既存高圧ガス設備のうち下記の設備に関して耐震性総点検を行った。

- 1) 球形貯槽及び横置円筒形貯槽  
(57立局180、1982)
- 2) 塔類及び縦置円筒形貯槽



(58立局204、1983)

### 3) 平底円筒形貯槽

(59立局575、1984)

なお、この耐震性点検及び耐震性向上対策指針の作成に当たっては、高圧ガス設備の弱点及び補強対策を検討するため、大掛かりな振動実験が実施され、その成果を反映させた。

#### 1) 塔類の振動実験 (科学技術庁防災科学研究所)

1981年から1982年

#### 2) 平底円筒形貯槽実験 (多度津工学試験所)

1982年から1983年

点検の結果、合格とならなかった設備部位に対してはより詳細な検討を行うか、または何らかの耐震性向上対策や防災体制の強化を図るなど、総合的に検討して対策を講じた。

神奈川県は、発生の切迫性の高い南関東地震に関する地震被害想定に示された地表面加速度に対して主として既存設備を対象として1990年4月「高圧ガス施設等耐震設計基準」を策定し、必要に応じて耐震対策を講じた。この基準において終局強度設計法を提案している。その後、耐震告示との整合性を確保するために2002年4月に改訂版を出している。<sup>4)</sup>

### 3. 兵庫県南部地震による高圧ガス設備等の被害

1995年1月17日に発生した「兵庫県南部地震」は、今までに経験したことのない加速度及び被害事象が見られ、高圧ガス関連の設備では、表1に示す被害に見られるように一部事業所において貯槽の不同沈下、ガス漏れ、防液堤、障壁破損等の被害があった。しかしながら、高圧ガス設備については、神戸市東灘区の液化石油ガスの貯蔵設備より液化石油ガスが漏洩した事故を除いて、地震の規模に比して事故は少なかったといえる。また、この地震による高圧ガス保安法関係の死傷者は皆無であった。塔槽類の被害は主として貯槽で傾斜、不等沈下などが見られたが、損傷等はない。配管は地盤の液状化等の影響を受け、変形が見られたが、一部に亀裂、破損等が見られ、高圧ガスが漏洩したが大きな被害に至るようなものではなかった。

液化石油ガスの貯蔵設備より液化石油ガスが漏洩事故は、液化石油ガス貯蔵設備の受け入れ払い出し配管の元弁の貯槽側フランジ付近から液状の液化石油ガスが漏洩し、付近住民に対し避難勧告が発せられた。このような状況に鑑み、通商産業省では「兵庫県南部地震に伴うLPガス貯蔵設備ガス漏洩調査委員会 (委員長 大島榮次 東京工業大学名誉教授)」を同年2月11日に設置し、漏洩の原因究明、耐震対策のあり方に

表1 高圧ガス設備における阪神・淡路大震災における被害状況

施設・設備等	調査対象事業所数	被災事業所数	
高圧ガス製造施設	大阪	94	
	兵庫	132	
被害の概略			
1. 被害のあった事業所 調査を実施した226事業所中、44事業所(兵庫県34事業所、大阪府10事業所)において、高圧ガス製造施設の被害があった。			
2. ガスの漏洩の状況 被害のあった44事業所中、13事業所(兵庫県12事業所、大阪府1事業所)においてガスの漏洩があった。エム・シー・ターミナル(株)神戸事業所においては、LPガス低温貯槽の元弁フランジからLPガスが漏洩し付近住民に対して避難勧告が発出された。2冷凍事業所では、アンモニアの漏洩があった。その他、10事業所でアンモニア、LPガス、水素ガス、酸素ガスなどの軽微な漏洩があった。			
	兵庫県	大阪府	計
アンモニア	8	0	8
LPガス	2	0	2
水素ガス	1	0	1
酸素ガス	1	1	2
計	12	1	13
なお、事業所単位で集計している。			
3. 製造施設の被害の状況 被害のあった44事業所においては、製造施設の傾斜、貯槽の沈下、配管の変形、防液堤の破損等があった。			
	兵庫県	大阪府	計
製造・消費設備(傾斜、沈下等)	12	1	13
貯槽(傾斜、沈下等)	17	5	22
配管(変形、折れ等)	13	3	16
冷凍設備(破損等)	9	0	9
防液堤・散水装置等(破損等)	16	4	20
なお、各項目毎に事業所単位で集計している。			

ついて検討がなされ、同年4月に中間報告書を、また、同年5月に最終報告書をまとめた。

地震時に敷地は、図1に示すとおり大規模な地盤の液状化が生じた。このために結果として、護岸が1~3m海側へ張り出し、また、敷地は水平方向へ約30cm~75cm移動、約50~75cm沈下したため、塔槽類、架構、配管ラック等が移動し、これらの間を結ぶ配管に無理な力が作用しフランジ部分から各所で漏洩した。

(図2~5)元弁部分からの漏洩は影響が大きく耐震

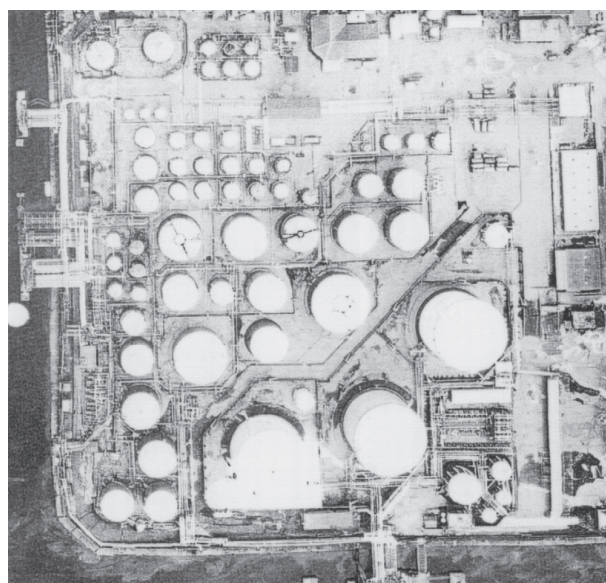


図1 輸入基地事業所の地盤液状化の様子



対策上重要である。また、貯槽防液堤は各所で、図6にみられるような亀裂、損傷が発生した。

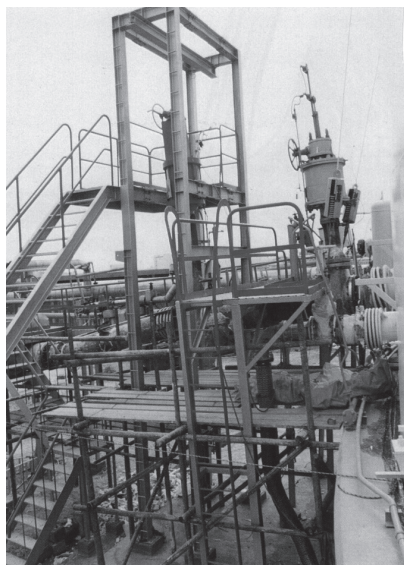


図2 液化ガス漏洩  
緊急遮断弁支持架台の沈下により平底円筒形貯槽のノズルに無理な力が働きフランジ部より液化ガスが漏洩した。

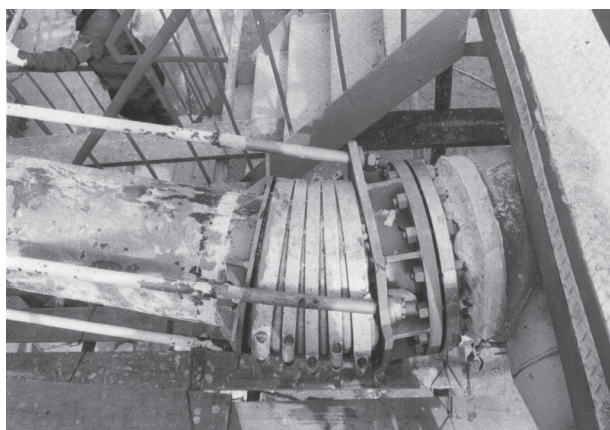


図3 側方流動による変位による伸縮継手の損傷

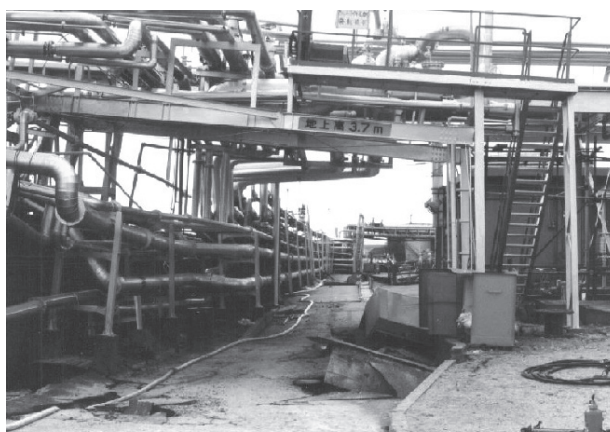


図4 地盤変状と配管の変形様子

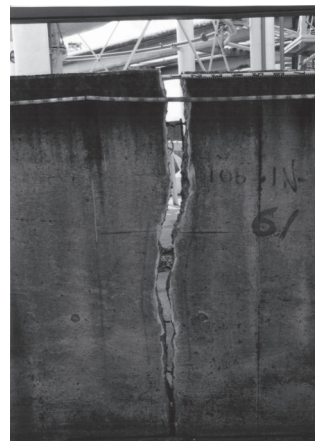


図5 地盤変状による防液堤の損傷



図6 地盤変状（沈下）による漏洩検知器導管の損傷

同調査委員会は、次のような通産省に対して事故の再発を防止するため以下の事項につき早急に取り組みを行うよう提言を行った。

1) 配管系の耐震化（「柔」の発想）

- ・従来、塔槽類は「剛」の思想に基づいた耐震基準としてきたが、配管系については当該配管の可とう性を生かし、地震時の変位を吸収するような設計が必要である。
- ・元弁上流部の塔槽類ノズル取付部の強度向上及び貯蔵設備と元弁の基礎を共通化し、地震時に同一な挙動を示す設計が必要である。

2) 液状化対策

- ・防液堤の被害状況を踏まえ、所要の液状化対策について検討が必要である。

3) 計装制御設備の耐震化等

- ・地震後の非定常運転に備え、保安電力の確保、計測制御系の耐震化等検討が必要である。
- ・地震時等非常事態における対処マニュアルの整備等ソフト面の対応が必要である。

この提言を受けて通商産業省は高圧ガス設備等耐震

設計基準の見直しを行い1997年3月通商産業省平成9年告示143号で当該耐震設計基準の改定を行なった。

#### 4. 改訂高圧ガス設備等耐震設計基準の概要

高圧ガス設備等耐震設計基準は以下のような2点が改正の要点となった。

- 1) 2段階地震動による耐震設計(高レベル地震動の設定)
- 2) 配管系の耐震基準化

改定高圧ガス設備等耐震設計基準の基本的な考え方を表2に示す。また、同基準による耐震設計の手順を図7に示しておく。

表2 高圧ガス設備等耐震設計基準

地震動	レベル1地震動	レベル2地震動
	供用期間中1、2度発生する確率を持つ一般的地震動	発生確率は低い直下型、海溝型の巨大地震に起因する更に高レベルの地震動
耐震設計基本目標	この地震動ないしそれ以下の地震動では、住民の避難などを惹き起こすような事態とはならないこと。	この地震動ないしそれ以下の地震動では住民の避難、プラント内の被災が仮に若干あったとしても、プラント外の周辺住民の障害および財産の損失をまねくような事態にならないこと。
塔槽類及びその支持構造と基礎	地震に際して漏洩・機能喪失の発生が無く、地震後においても、変位、変形、亀裂等が残留せず、修理、修復することなく運転を継続できる。	重要度Ia及びIの高圧ガス設備においては、漏洩発生がなく、地震後において変位、変形が残留したとしても、耐震構造物の倒壊、耐圧部に亀裂等の影響がない。
高圧ガス設備の配管及びその支持構造と基礎		
地震災害の発生・拡大を防止するため設けられた地震防災設備で、緊急停止、遮断装置、計測制御系、用役設備など	地震に際して漏洩・機能喪失の発生が無く、地震後においても、変位、変形、亀裂等が残留せず、修理、修復することなく運転を継続できる。	地震防災上の安全機能の喪失がない。
基礎及び地盤(液状化対策)	基礎は、ひび割れ、変形、沈下等が生じないものとする。また、基礎に係る地盤は、原則として液状化等の地盤の変状はないものとする。ただし、杭基礎については、液状化の可能性のある場合、基礎の安定性が確保できる。	高圧ガスの漏洩につながるような変形、移動等がないものとする。

高圧ガス設備等は下記による重要度分類に応じて、耐震設計を行う。  
 重要度Ia その損傷若しくは機能喪失が、事業所外の広範囲の公衆、公共財産、環境に壊滅的損害を与える恐れのあるもの。  
 重要度I その損傷若しくは機能喪失が、事業所外の公衆、公共財産、環境に多少の損害を与える恐れのあるもの。  
 重要度II その損傷若しくは機能喪失が、事業所内の人命を損なう恐れのあるもの。  
 重要度III その他、通常の耐震性を要するもの。

#### 4.1.2 2段階地震動による耐震設計 (高レベル地震動の設定)

兵庫県南部地震及び改定された「防災基本計画」の趣旨に基づき2段階の地震動を設定するよう検討を行い、レベル1地震動及びレベル2地震動による耐震性能をそれぞれ規定し、評価することとした。

##### (1) レベル1耐震性能評価

レベル1耐震性能は、レベル1地震動(従来告示において規定していた地震動であって、関東大震災クラスの地震を想定したもの)が発生したとしても、高圧ガス設備等においては、設備の有害な変形及び高圧ガスの漏洩がないことを条件としている。つまり、当該高圧ガス設備は、弾性設計範囲内でなければならない

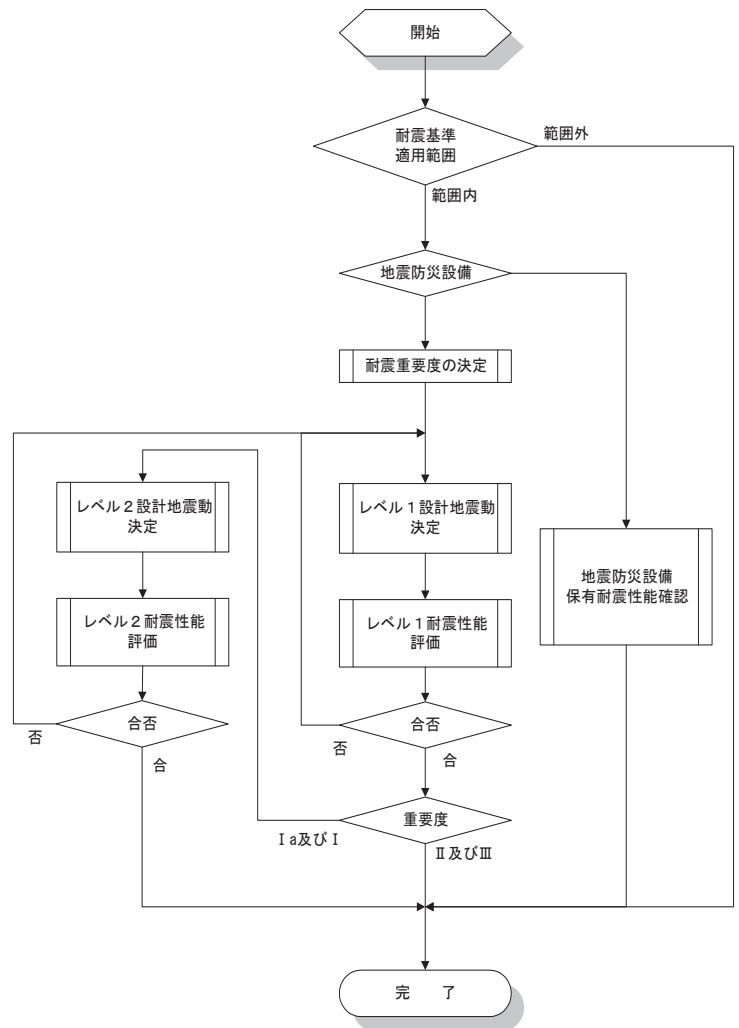


図7 高圧ガス設備等耐震設計基準による耐震設計手順

ことを要求しているものである。

耐震性能の確認方法としては、改正前の耐震告示で規定されているとおり、耐震設計構造物に係る応答解析を行い、当該応答解析に基づき当該構造物の耐震上重要な部材に生じる応力を算定し、当該部材の許容応力以内であることとしている。

##### (2) レベル2耐震性能評価

##### ① レベル2地震動の設定

改正前の耐震告示においては、通常発生すると考えられる地震動として最大300ガル(重要度Iaの耐震設計設備、地域区分特A、第4種地盤種)を設定していたが、これをレベル1地震動と同等とした。これ以上の発生する確率の低い高レベルの地震動(レベル2地



震動)は耐震設計の対象として想定していなかった。

レベル2地震動の規模としては、レベル2耐震性能評価でもレベル1と同等の、減衰定数の値とすることを前提として、兵庫県南部地震動のレベルから推定及び他の耐震設計基準で示されている地震動レベルを参考に600gal程度とした。この値は、レベル1地震動の2倍に相当する。このため、レベル2地震動はレベル1地震動の2倍以上とし規定した。「以上」としている理由は、今後、地域によっては活断層の点在マップ等が公表され、当該活断層を考慮してさらに高い地震動レベルも必要という観点から規定しているものである。

レベル2地震動に関して、平成12年鳥取西部地震のように未知の断層が起震源となることが、全国どこでも起こりうることを想定して、地域係数を0.7で裾切りした。

なお、告示で設計された(レベル1耐震性能を有する)塔槽類は、神奈川基準による保有水平耐力評価により照査・検討を行った結果、レベル1地震動の2倍程度以上の地震動に対してレベル2耐震性能を有していること確認した。これは、兵庫県南部地震で塔槽類に損傷がなかったことと対応する。

## ②耐震性能の評価方法

レベル2耐震性能とは、レベル2地震動クラスの地震が発生したとしても、高圧ガス設備等から高圧ガスが漏洩することなく、当該設備の気密性を保持しなければならないことである。つまり、設備自体の耐圧部材、支持部材等が地震による多少の変形を生じたとしても、当該変形が許容した範囲内であることを確認すればよい、いわゆる弾塑性設計を認めたものである。

地震による変形の許容範囲については、部材が地震により当該部材の弾性域を超えて変形した変位量(以下「応答塑性変位量」という)を当該部材が降伏する際の変位量(以下「降伏変位量」という)で除した値(以下「応答塑性率」という)が、当該部材が変形しても構造上影響を生じず許容できる変位量(以下「許容塑性変位量」という)を降伏変位量で除した値(以下「許容塑性率」という)を超えない旨規定されている。

つまり、部材の塑性変形しても耐震設計構造物から高圧ガスが漏洩しない範囲であれば許容することとしている。

## 4.2. 配管系の耐震基準化について

一般の改正で配管系の耐震基準化の基本方針としては、地震による影響で次のようなことが起きないように考慮した。

- 1) 配管の損傷
- 2) 継手からの漏洩
- 3) 配管反力による接続機器、弁の損傷又は機能喪失  
また、地震による配管への影響としては、
  - 1) 配管系の動的応答に基づく慣性力
  - 2) 支持構造物の動的応答に基づく支持点間の相対変位
  - 3) 地盤の変状に基づく支持点間の相対変位
  - 4) 周辺構造物との干渉

が考えられ、これらを踏まえた基準とすべく検討が行われてきた。

これらの検討経過のうち、配管の耐震設計を行う範囲、配管系としての対象部位、配管の耐震性能評価法について以下に述べる。

### (1) 配管の適用範囲

配管の適用範囲については、事業所における高圧ガス設備等に係る配管は膨大であるだけでなく、複雑なプロセス配管もあり、より効率的に、かつ、安全性が担保できる範囲でなくてはならない。

そのため、配管については小口径のものや少滞留量のもの全て告示の対象とするのではなく、配管設計の観点から最低限、告示として耐震対策を講ずべき範囲を決めることとなったものである。

また、配管の耐震設計を行う場合、ガスの重量は設計上重要な因子ではあるが、実態的には配管構造によって耐震性の優劣が定まると考えられることから、配管の外径及び内容積に加え構造的な部分を考慮する必要があった。

したがって、配管の適用範囲は、改正告示第1条の2において外径45mm以上であって、次の1)又は2)のいずれかに該当しているものとなった。

- 1) 塔槽類から地震防災遮断弁までの間の配管
- 2) 地震防災遮断弁で区切られた間の内容積が3m<sup>3</sup>以上の配管

### (2) 配管系としての対象部位

改正告示では、配管系の耐震基準の対象部位として管、フランジ継手、伸縮継手、弁、塔槽類のノズル部が挙げられている。

これは配管系の耐震基準化にあたっての基本方針にしたがって、当該配管系が損傷しないよう設計するため、当該配管系を構成している部位ごとに耐震設計を行う必要があると判断したためである。

したがって、管、フランジ継手及び弁といった構成の配管系は、それぞれについて耐震設計を行い、個々に告示による耐震基準が満足しているか否か判定することになり、1つの部位の耐震設計が告示を満足して

いない状態であれば設計はやり直すことになる。

なお、配管の支持構造物についても耐震設計を行うことになるが、支持構造物が塔槽類のような場合は当該塔槽類の耐震性能評価をもって判断することになり、パイラックのように配管のみが搭載されている場合は当該パイラックの耐震性能評価が必要となる。

### (3) 配管の耐震性能評価法

#### ①. レベル1耐震性能評価

改正告示では、2段階地震動による耐震性能評価(次項参照)を行うこととなり、このうちレベル1地震動に対する耐震性能評価としては、従来の耐震設計設備と同様に耐震上重要な部材に関し詳細計算を行い確認する方法となるが、重要度Ⅱ又はⅢの配管系に関しては簡易的に確認する方法(許容スパン法)が認められた。

これは、告示対象の配管が事業所内に相当数あること及び配管は塔槽類等の間を複雑に接続されていることから、重要度の低い配管にあつては、配管支持点間のスパン長が当該配管の外径に対応して規定された許容スパン長以内であれば、レベル1地震動に対する耐震性能を保有しているものとした。この場合塔槽類、架構等を渡る配管では当該構造物の地震時の揺れを考慮しなければならないとしている。

#### ②. レベル2耐震性能評価

改訂された耐震告示では、レベル1耐震性能評価は従来の基準と同等であり、いわゆる仕様基準として応力計算式及び許容応力は明確に規定されている。しかし、レベル2耐震性能評価に関しては性能基準として、「レベル2地震動に対して高圧ガスの気密性が保持されること」を要求しているが、明確な評価法は規定されていない。

配管のレベル2耐震性能の評価方法は、高圧ガス保安協会が「高圧ガス設備等耐震設計指針」(以下、単に「耐震指針」という)において示されている。

この耐震指針の作成に当たっては、各種検討・試験を行ない、配管のレベル2耐震性能評価方法の提案を行なった。

- ・ 曲がり管の塑性変形挙動試験7)
- ・ フランジの動的付加荷重による漏洩試験8)
- ・ 地盤変状に対する配管系総合試験6) ,10)

耐震指針における配管のレベル2耐震性能表方の概要は次のとおり。

#### ・ 応答解析法

応答解析は配管の塑性変形を考慮した非線形応答解析を行なう方法として等価線形解析法を提案し、線形解析により簡易に塑性変形挙動を算定できるよう考慮している。

#### ・ 許容限界

慣性力及び応答変位(交番荷重)に対しては許容限界が内圧ラチェットの制限及び塑性歪片振幅2%、基礎の移動(一方向荷重)に対しては塑性歪片振幅5%としている。等価線形解析法による場合は、塑性歪に代えて曲がり管(エルボ)の変形角度で評価することとし、対応する許容角度が示されている。

#### ・ フランジ継手の漏洩評価基準

フランジ継手については漏洩がなければよいとし、レベル2地震動に係る漏洩の判定式が与えられている。

## 5. あとがき

「高圧ガス設備の耐震設計基準」(耐震告示)は、1982より施行され20年以上の実績があり、塔槽類については兵庫県南部地震をはじめ多くの地震で被害は見られなかった。塔槽類に関しては、安定した技術的と見なされている。

兵庫県南部地震の後、レベル2地震動及び配管系の耐震設計が付け加えられ、耐震告示及び「高圧ガス設備等耐震設計指針」(耐震指針)により運用されている。今後、適用実績を蓄積すると共に、さらに技術的な検討を継続させることが望まれる。

地震動に関してレベル2地震動は最低限のレベルを定めているが、特定の高圧ガス設備の近傍の活断層等の調査が進み、別途指定された場合は妥当性のある地震動を設定する必要がある。今後、活断層等の調査の動向を注視していかなければならない。

耐震告示及び耐震指針は新設設備に対する設計基準である。既存設備の耐震性の確保に関して、耐震性能維持のための耐震性能維持基準、耐震性能点検要領及び設備耐震診断基準及び要領等は今後の課題と考えられる。

#### [参考文献]

- 1) 高圧ガス保安協会:兵庫県南部地震に伴うLPガス貯蔵設備ガス漏洩調査最終報告書 (1995.6.30)
- 2) 高圧ガス保安協会:高圧ガス設備等耐震設計指針 (レベル1耐震性能評価編:1997.11、レベル2耐震性能評価編:2000.9)
- 3) 高圧ガス保安協会:コンビナート保安・防災技術指針—化学工場における地震対策— (1974)
- 4) 神奈川県環境部工業保安課:高圧ガス施設等耐震設計基準 (2002.4)
- 5) Shibata, H., Suzuki, K., Ikeda, M., 2002, "Developments of Seismic Design Code for High-Pressure Gas Facilities in Japan", ASME, PVP-Vol. 445-1, Seismic Engineering, pp. 17-23
- 6) Inaba, M., Ikeda, M., Shimizu, N., Tetsuya, W., "A New Seismic Design Criteria of Piping Systems in High Pressure Gas Facilities", ASME, PVP-Vol. 445-1, Seismic Engineering, pp. 25-34
- 7) Ando, F., Sawa, T., Ikeda, M. 2002, "A New Design Method for Piping Components Against Leakage and Damage Subjected to High Level Earthquake Load", ASME, PVP-Vol. 445-1, Seismic Engineering, pp. 113-118
- 8) Mukaimachi, N., Ando, F., Ikeda, M. 2002, "An Advanced Computational Method for Nonlinear Behavior of Piping Systems Subjected to Earthquake Load", ASME, PVP-Vol. 445-1, Seismic Engineering, pp. 119-126
- 9) Shibata, H., Suzuki, K., Ikeda, M., 2004, "Developments of Seismic Design Code for High-Pressure Gas Facilities in Japan", Trans. ASME, 126, pp. 2-8.
- 10) Inaba, M., Ikeda, M., Shimizu, N., 2004, "New Seismic Design Criteria of Piping Systems in High-Pressure Gas Facilities," Trans. ASME, 126, pp. 9-17



# 石油精製・石油化学プラントの地震防災のマネジメント

稲葉 忠

●元 東洋エンジニアリング(株)

## 1. はじめに

石油精製プラントは、発電プラント、LNGプラント、浄水場などとともに、都市機能や市民生活の維持に必要なエネルギー、ユーティリティを供給する役割を担っています。また石油化学プラントは、多くの製造業に合成樹脂、合成ゴム、合成繊維などを供給し、市民の豊かな生活を陰で支えています。

石油精製・石油化学プラント(以下、プラントという)は、こうした社会的役割を果たしていますが、一方では、大量のエネルギーを保有し、各種の化学物質を扱っているため、地震で事故を起こしたり、災害を招いたりする可能性を秘めています。このため、産官学を挙げて、地震災害のリスクを軽減するための努力が払われてきています。

ここでは、プラントを構成する設備、構造物について説明した後、プラントの地震災害のリスクマネジメントと保安・防災システムについて概説し、次に耐震設計と耐震性の維持・向上について述べ、最後に兵庫県南部地震の経験を踏まえた地盤変状(液状化による地盤の移動、土質定数の低下)に対する配管系の新しい設計概念を紹介したいと思います。

## 2. プラントを構成する設備、構造物

プラントは、塔類、貯槽類、熱交換器、加熱炉・ボイラー、回転機、配管、電気設備、計装設備、支持構造物(架構、基礎)、コントロールルーム、そして各種の防災設備などより構成されています。それらの設備、

構造物のうちの代表的なものを、主配管との取り合いを含め、図1に示します。

これらの設備等は、共通基礎上に建てられる場合もありますが、多くは独立基礎の上に建てられています。石油タンクなどは、盛土基礎の上に直接設置されたりもしています。配管は機器から機器へと3次元空間を縦横無尽に走りまわっていますが、プラント間を結ぶ導管の中には地下に埋設されているものもあります。

## 3. 地震災害のリスクマネジメントと保安・防災システム

### 3.1 地震災害のリスクの軽減

プラントの地震災害のリスクは、起こりうる地震災害の影響度(人的・物的被害、環境汚染など)に、そのような地震災害が発生する確率を乗じたものとして表わされます。プラントには事故災害の発生を防止するための保安・防災システムが具備されていますので、地震災害の発生確率は、同システムが保安・防災機能を果たせなくなるレベルの地震の発生確率と考えることができます。

地震災害のリスクを軽減するには地震災害の影響度を小さくすることと、地震災害の発生確率を小さくすることを考える必要がありますが、地震災害の影響度を小さくするための手段としては、保有量を抑えたり、代替プロセスを採用したり、人口密集地・文化財から離れた場所に立地したりすることなどが考えられます。地震災害の発生確率を小さくするには、立地に

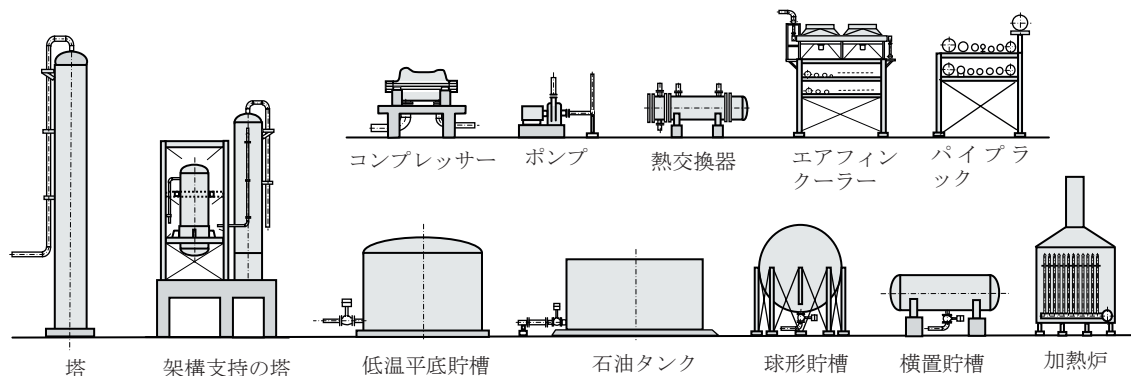


図1 プラントを構成する主な設備等

において活断層を避けるとともに、保安・防災システムの耐震信頼性を高めることが基本になります。立地条件によっては、地盤の液状化対策や津波対策も併せて考えることになります。

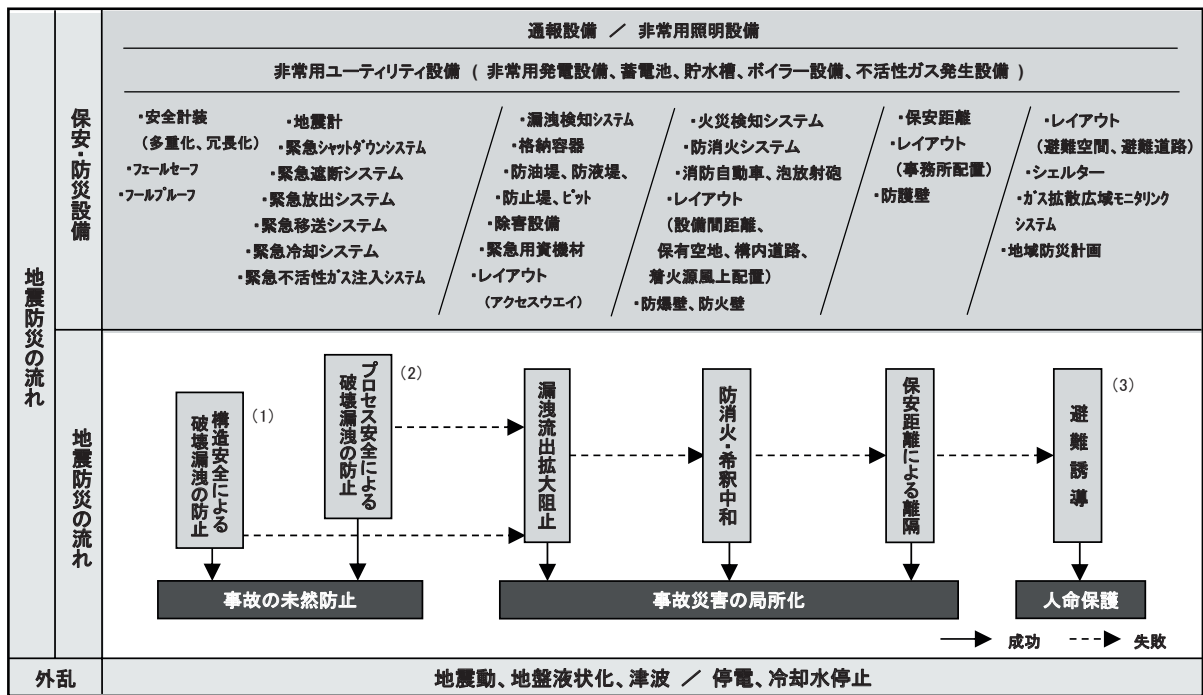
### 3.2 プラントの保安・防災システム

図2に、プラントが地震に襲われた場合の保安・防災の概略の流れを示します。まずは漏洩事故の未然防止を図り、漏洩事故を防止できなかった場合は事故災害の局所化を図り、危険が人命に及ぶと判断されたら避難誘導に移ります。

保安・防災の流れにはいくつかの局面があって、それらの局面がサブシステムを成し、全体として1つの大きな保安・防災システムを構築しています。保安・防災システムの耐震信頼性は、それらのサブシステム

の耐震信頼性に依存し、そのサブシステムの耐震信頼性は、そのまたサブシステム、あるいはシステム構成要素としての機器、配管系、建築構造物、土木構造物、電気設備、計装設備など（これらもサブシステムとしていくつかの構成要素より成る）の耐震信頼性、及び人による防災活動の信頼性に依存してきます。破壊的地震時にあって事故災害の局所化に限界がある場合には、事故の未然防止の段階で高い耐震信頼性が求められることになります。

保安・防災の流れ自体は地震による事故の場合も平時の事故の場合も大きくは変わりませんが、根本的に異なるのは、地震による事故の場合は保安・防災に係る全ての設備、システムが同時に地震の影響を受けており、そうした影響下において一連の保安・防災活動を進めていかなければならない点にあります。



- (1): 構造物が地震によって破壊されることなく、内容物の漏洩がない。
- (2): 地震時及び地震後にあって、構造物の破壊に至るような温度、圧力の上昇がなく、かつ、適切な処置がされないままに内容物が外部に放出されてしまうようなことがない。
- (3): 従業員の避難誘導と地域住民の避難誘導の2局面がある。

図2 地震時の外乱と保安・防災システム

### 3.3 プラントの生涯と地震災害のリスクマネジメント

保安・防災システムの設計は防災計画を立てる中で行われ、その耐震信頼性はシステム、サブシステムを構成する設備等の耐震設計と防災訓練によって確保されます。しかし、運転中に材料の劣化(減肉、割れ、脆化)が進んだり、周辺の都市化が進んだりすれば、地震災

害のリスクは増大してきます。一方、新たな地震被害経験や研究によって新しい事実が判明したり、地震防災に関する技術が進歩したりすれば、リスクを効果的に軽減できるようになります。

地震災害のリスクマネジメントは、図3に示すように、プラントの生涯にわたり、永続的に実施されるものとなります。

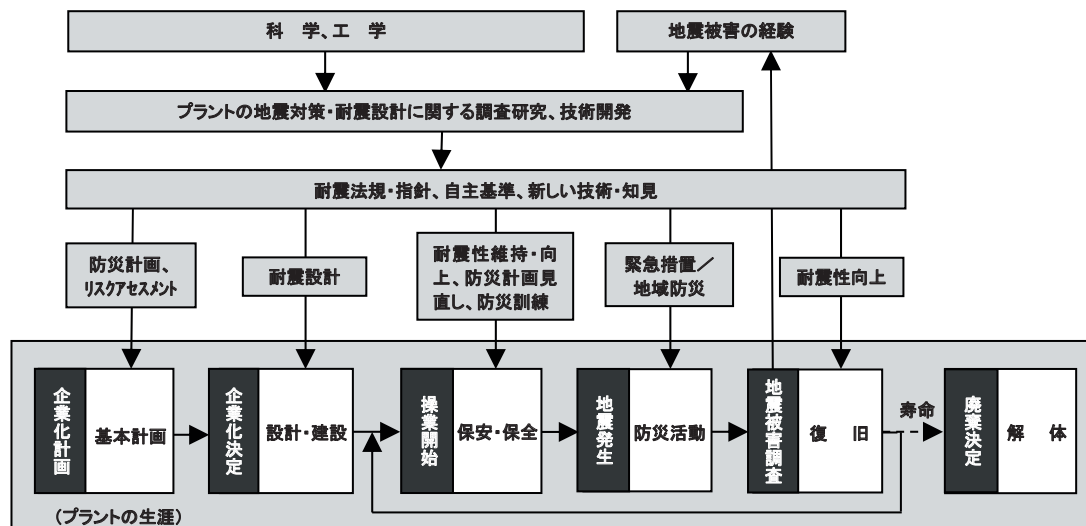


図3 プラントの生涯と地震災害のリスクマネジメント

#### 4. 耐震設計と耐震性の維持・向上

##### 4.1 プラントの耐震性の確保

プラントオーナーによる地震災害のリスクマネジメントは、安全・健康・環境マネジメント（地域住民の生命の安全と健康の確保及び環境保全を目的とする）の一環として、労働安全衛生マネジメント（従業員の生命の安全と健康の確保を目的とする。安全・健康・環境マネジメントに含めることもある）の一環として、また、経営のリスクマネジメントの一環として、プラントの生涯にわたって進められます。

設計建設段階では、請負契約により、主たる作業はエンジニアリング会社において行われるのが一般的であり、機器などの製造はメーカーによって行われ、建設工事は建設工事会社によって行われます。エンジニアリング会社、メーカー、建設工事会社による耐震安全性確保のマネジメントは、品質マネジメントの一環として、また、経営のリスクマネジメントの一環として行われ、その手段は信頼性の高い耐震設計、製造、建設工事によるところとなります。

プラントに具備される耐震性、耐震安全性は、プラントオーナーが提示する耐震設計に係る仕様（要求事項）と、エンジニアリング会社、メーカー、建設工事会社の耐震設計、製造、建設工事の能力、そしてプラントオーナー自らの設計審査、安全審査の能力に依存するところが大きいといえます。

##### 4.2 耐震設計の信頼性

構造物の耐震性を高めるには、自立式構造物の場合はエネルギー吸収能力を高めるための構造的配慮が、また、配管系の場合は自らの慣性力、揺れの影響の他、

支持構造物、周辺構造物の揺れや地盤の液状化に基づく相対変位の影響を緩和、軽減する構造的配慮が大切なこととなります。耐震設計の信頼性はそうした構造的配慮がどれだけされているかによって決まってくるので、設計担当者には相応の知識・経験が、設計組織には相応の設計管理能力が求められます。

圧力や温度に対する設計と違い、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ませんから、エンジニアリング会社には慎重な設計管理、工事管理が、プラントオーナーには要所を押さえた設計審査、安全審査が求められることになります。

##### 4.3 耐震性の維持・向上

建設を終えたプラントは、耐震性を含め、保全によって設備の健全性が維持されます。

耐震設計基準が制定される前に建設されたプラントなどは、地震に対する弱点を残している可能性があります。そうしたプラントも、最新の知見に基づいて耐震診断を行い、耐震性を向上することにより、地震災害のリスクを軽減することができます。

耐震診断では、まずは現場を調査し、眼に見えない部分は設計図書、保全記録、検査などで確認し、現状の耐震性を経験に基づく判断あるいは計算・解析により評価します。着眼点は設計の場合と同じですが、評価において劣化の影響を考慮する必要があること、現場の状況に合わせて改造案を考える必要のあることなどが、新設の場合との違いになります。弱点を補強することによって新たな弱点を生むようなことがあってはならず、相応の知識・経験が求められることには変わりはありません。

## 5. 地盤変状に対する配管系の新しい設計概念

### 5.1 兵庫県南部地震の経験と基準の改正

兵庫県南部地震の後、防災基本計画の改訂に従い、通産省告示515号“高圧ガス設備等耐震設計基準”もレベル1地震動とレベル2地震動の2段階の地震動を考慮することとし、設備が保有すべき耐震性能（レベル1耐震性能、レベル2耐震性能）も明確にされて、平成9年に改正されました。埋立地で大規模な地盤変状があって、貯槽の基礎杭の損壊や、配管フランジからの液化ガス漏出事故が見られたことを教訓として、地盤変状に対する機密性の保持もレベル2耐震性能に加えられました。

平成12年には高圧ガス保安協会より高圧ガス設備等耐震設計指針（レベル2耐震性能評価編）が発行され、液化化に伴う地盤の沈下量、水平移動量の推算を含めて、塑性変形を許容したレベル2耐震性能評価の具体的方法が示されました。

### 5.2 地盤変状に対する配管系の新しい設計概念

地盤変状に伴う基礎の沈下、傾斜、水平移動は支持点間の相対変位となって配管系に影響を及ぼします。兵庫県南部地震で経験した地盤変状は、それまでの設計で考えたことのない大きさのものでした。兵庫県南部地震の経験により、不明確であった地震災害リスクの要因の1つが明らかにされたといえます。

最後に、大規模な地盤変状に対する配管系の新しい設計概念を具体例をもって紹介したいと思います。

#### (1) 共通基礎による地盤変状の影響の遮断

基準の改正により、貯槽に繋がる配管は原則として緊急遮断弁（基準では地震防災遮断弁と呼んでいる）を挟み込んで共通基礎上に完全固定の条件で支持することとされました。周辺で大規模な液化化が起きても固定点を境に重要部位（ノズルから緊急遮断弁まで）に影響が及ばないようにするという考え方であっ

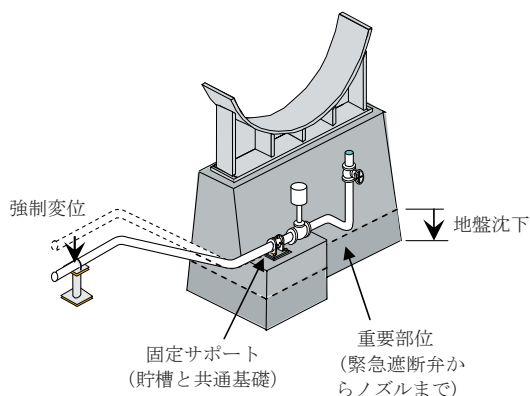


図4 共通基礎による地盤変状の影響の遮断

て、図4に横置貯槽の払出配管についての例を示します。こうした設計ができない場合は、十分な可撓性を有していることを確認することとされています。

#### (2) 地盤変状に基づく相対変位の吸収

エルボ（曲がり管）は優れた塑性変形能力を有していますので（比較的小さな塑性歪で大きな変位角が得られる）、相対変位に直角な方向の直管を2つのエルボで挟み込むことにより、大きな相対変位を吸収することができます。図5に道路横断面を利用して水平方向の相対変位を吸収した例を示します。地上部分の配管の途中に強制変位の方向（護岸の方向）の移動を拘束するサポートがあれば、強制変位に対して壊れるなどし、拘束機能を喪失するような設計をしておけばよく、そうした設計も認められています。

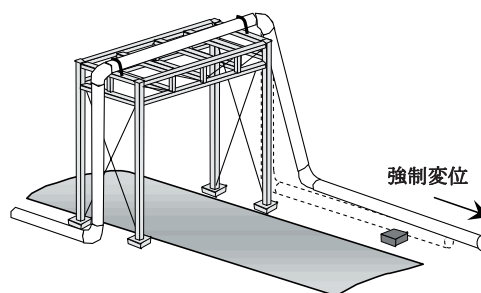


図5 水平方向の相対変位の吸収

## 6. おわりに

プラントは生産機能と保安・防災機能を併せ持つ1つの巨大なシステムです。そして、そのどちらの機能を喪失しても社会に大きな影響を与えます。

プラントの地震災害のリスクは保安・防災システムの耐震信頼性に依存し、その耐震信頼性はプラントオーナーの生涯にわたる安全・健康・環境マネジメント（労働安全衛生マネジメントを含む）と、設計建設時のエンジニアリング会社、メーカー、建設工事会社の品質マネジメントに依存します。そして、各マネジメントを支援するのが地震防災のための法規・指針であり、行政、学会の役割であるといえます。

安全・健康・環境マネジメント、品質マネジメントのシステムも大きなシステムであって、その信頼性は、当該マネジメントシステムを構成するいくつかのサブシステムの信頼性に依存し、最終的にはシステム、サブシステムを構成する人の信頼性に依存することになります。人の信頼性を高めるに必要なものは、文化であり、信頼性の高い教育・訓練のシステムであるといえます。



# コンテナクレーン用ヒンジ式免震装置

辻 直人、島田 貴弘、柏崎 昭宏、信太 雅人、近藤 晃司

●石川島播磨重工業株式会社

## 1. 緒言

兵庫県南部地震（平成7年）では、神戸港のコンテナターミナルが壊滅的な被害を受けた。中でもコンテナクレーンは、脚部の変形・脱輪・走行装置の破損等によりほぼ全数が使用不能となり、復旧に向けた物流ライフラインの拠点となるべきコンテナターミナルは、その機能を失う事態となった。

その後の調査<sup>(1)(2)</sup>や解析<sup>(3)</sup>により、コンテナクレーンの被害の原因は、第1図に示すような、①ケーソンの移動に伴うレールスパンの広がりによる強制変位、②海脚または陸脚が浮き上がることによって生じる片脚への偏荷重・着地時の衝撃による走行装置の破損、が主であることが推定され、運輸省（現国土交通省）により耐震強化岸壁の整備が開始された。

これを受けて港湾荷役機械化協会が主体となり、耐震強化岸壁に設置するコンテナクレーンについて、「コンテナクレーン耐震設計のための手引き」（平成10年）が作成された。この手引きの基礎となっているのは、大地震後の損傷を局所的な塑性変形に抑え、コンテナクレーン全体として終局的な損傷を生じさせない

「耐震設計」である。

しかし、耐震設計のみでは浮き上がり・脱輪を防ぐことはできず、コンテナクレーンの全体構造を維持できても走行機能は失ってしまうため、被災後速やかにコンテナターミナルとしての機能を回復することは難しい。

よって、被災後の機能回復を考慮すれば、大地震においても耐震岸壁上で浮き上がりや脱輪を起こさず、レールスパンが広がった場合でも走行機能を維持できるような免震機能を有したコンテナクレーンが必要となる。そこで、原子力設備等で実績のある当社の免震技術を応用して、上記機能を有する独自の免震コンテナクレーンを開発した。

## 2. 免震コンテナクレーンの概要

### 2.1 免震装置の目標性能

図1に示す兵庫県南部地震の被害調査結果により、免震装置の目標性能は以下のとおり設定した。具体的には耐震岸壁上のオーバーパナマックス対応型コンテナクレーンを想定し、詳細な検討を行った。

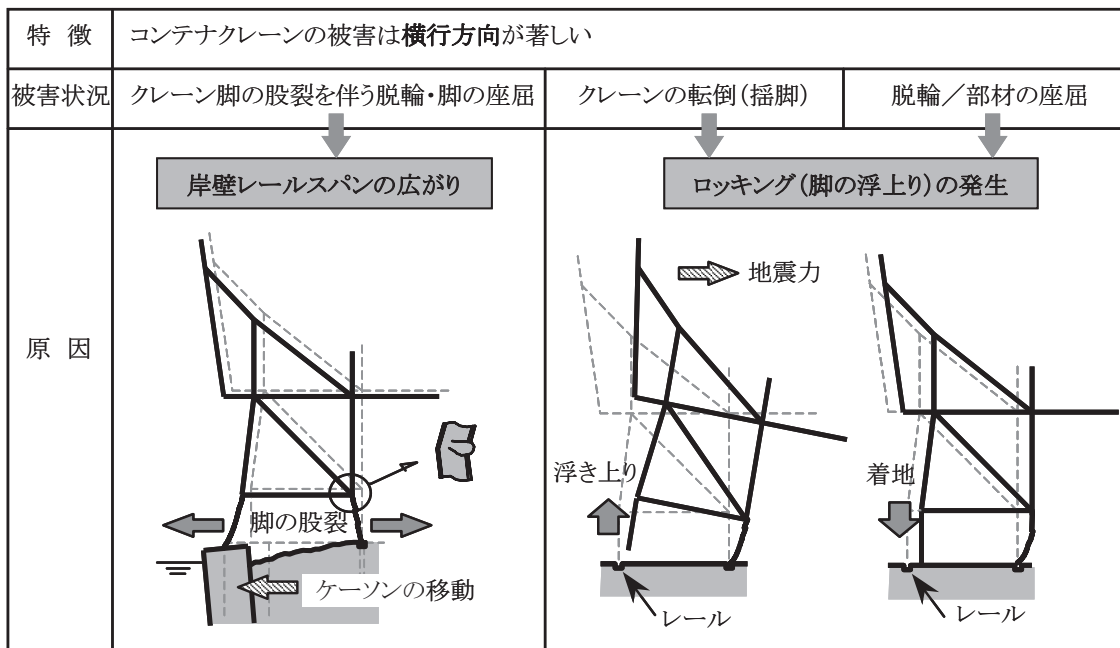


図1. 兵庫県南部地震でのクレーン被害

- ①クレーンの応答を浮き上がりが発生しないレベルに低減し脱輪を発生させない。
- ②岸壁崩壊に伴うレールスパン変動(0.5m)による強制変形を吸収し、脱輪を発生させない。
- ③クレーンの応答加速度を岸壁の設計震度レベルである $2.45\text{m/s}^2(0.25\text{G})$ 以下(横行方向)に低減し、岸壁設計と整合性をもたせる。
- ④地震に対する構造補強が不要となり、軽量なクレーンの設計を可能とする。

## 2.2 免震装置の機構

一般的に免震装置には以下のような機能が必要となる。

- ①加速度低減・復元機能：地震による揺れを長周期化する等によって応答加速度を減ずるとともに、地震の荷重による変位を元の位置に戻そうとする機能
- ②トリガ機能：所定の荷重以下では免震装置を動作させない機能
- ③減衰機能：地震によって生ずる変位を抑制する機能
- ④変位許容機能：地震時の大きな変位を許容する機能

これらの機能を有する機構として、図2に示すような皿ばねを用いた免震装置を考案した。以下に各機能についての説明を示す。

### ①加速度低減・復元機能

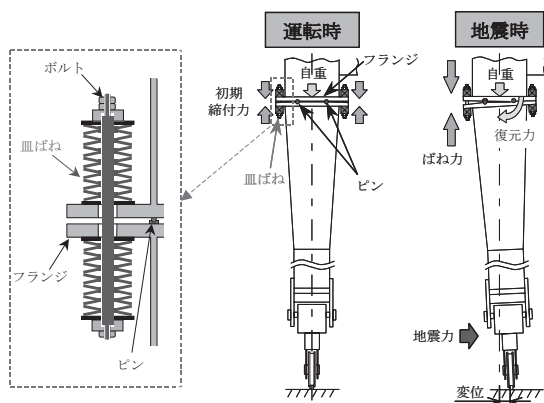


図2 免震装置の構造

フランジを皿ばねによって接合することで、自重及び皿ばねによって得られる圧縮力(フランジ面を開かない方向に働く力)を利用して、地震による揺れを長周期化し、復元モーメントを発生させる。

### ②トリガ機能

本免震機構では、上下のフランジ接触線の間に一定の幅を持たせている。これにより、自重及びばねによってフランジ面にかかる予圧縮力に打ち勝つためのモーメントが作用するまで免震機構は変形を起こさない。すなわち復元力特性は図3のようになり、復元機構がトリガ機構を内包した特性となる。

### ③減衰機能

皿ばねが弾性変形する際の摩擦減衰を利用する。

### ④変位許容機能

皿ばねの収縮によるフランジの離間で変位を得る。

本免震装置の特徴としては、①脚部地上付近に大きな免震装置を付ける必要がなくコンパクトであること、②部品点数が少ないシンプルな構造で信頼性が高いこと、③地震後のシアピン交換作業などの装置復旧作業が不要であること、などが挙げられる。

## 2.3 免震装置の基本仕様

本免震装置の基本仕様は復元力特性によって規定さ

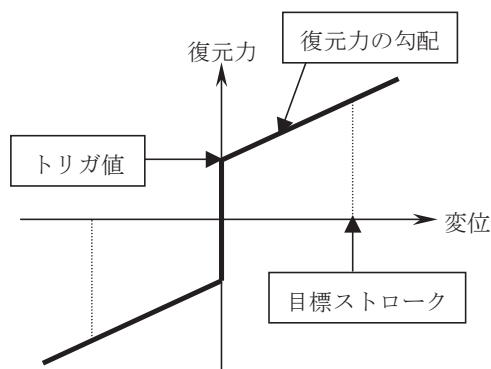


図3 復元力特性

れ、この復元力特性とはトリガ値及びそれを超えた後の勾配という2つの特性によって決定される。各特性の決定方法および本検討における具体例を以下に示す。

### (1)トリガ値の決定

免震装置のトリガ値は、通常荷役時に装置が作動しないように設定する。一般的にコンテナクレーンでは地震荷重より風荷重の影響が支配的であるため、通常荷役時の風荷重を考慮してトリガ値を決定する。

今回想定したクレーンの場合、作業時(16m/s)の風荷重による水平力は、加速度換算で $0.196\text{m/s}^2(0.02\text{G})$ と小さいが、突風時(35m/s)の場合は $0.981\text{m/s}^2(0.1\text{G})$ 弱となるため、トリガ値は $0.981\text{m/s}^2(0.1\text{G})$ 以上にする必要がある。

### (2)復元力勾配の決定

復元力勾配は、トリガの設定値と応答加速度の目標

値との関係によって設定する。具体的には、所定の地震波による過渡応答解析を行い、トリガ値と応答加速度が条件を満たすように勾配の値を決定する。

今回想定したクレーンの場合について、解析で求めた復元力特性を図4に示す。

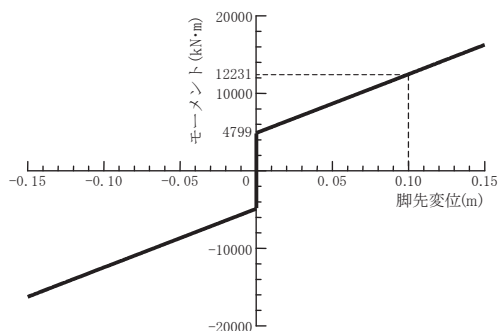


図4 実機の復元力特性

## 2.4 免震機構の性能確認試験(模型試験)

今回考案した免震装置について具体的な性能を確認するために、図5に示すような1/15スケールのコンテナクレーン模型を製作し、振動台試験を行った。

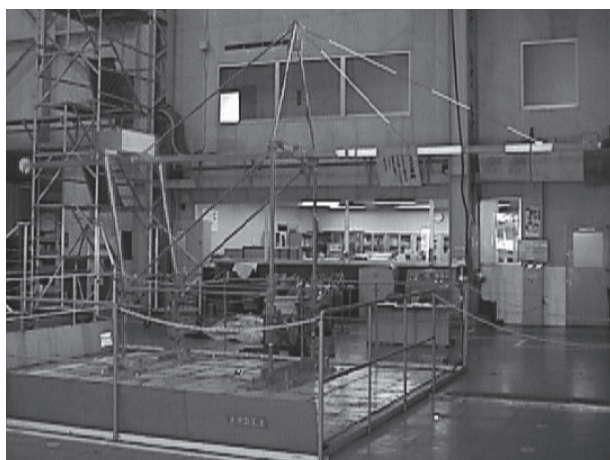


図5 模型加振試験(1/15スケールモデル)

### (1) 模型の相似則

本試験に用いた模型は、オーバーパナマックス級コンテナクレーン(青海バース既設クレーン:アウトリーチ45[m])を対象とし、相似則に則って1/15スケールの模型を設計・製作した。相似則は、重力加速度が不可避であることから、加速度を1:1に合わせた相似則を適用した。表1に主な変数の相似則を示す。機械室、トロリ及び吊り荷、シーブ、走行装置などは、相似則に合うように適切な位置におもりを取り付けた。

表1 試験体の相似則

	N = 実機/模型	N = 15
長さ	×N	×15
加速度	×1	×1
時間	×1/√N	×1/√15
質量	×N <sup>3</sup>	×3375
力	×N <sup>3</sup>	×3375
モーメント	×N <sup>4</sup>	×50625

### (2) 加振試験内容

加振試験は、ポートアイランドNS、八戸NS、大船渡NSの各基盤波、及びポートアイランドNS、八戸NS表面波を入力地震波として行った。

各地震波について横行方向の加振を行い、免震装置作動/非作動の場合について比較を行った。

### (3) 加振試験結果

代表的な試験結果としてポートアイランドNS基盤波の試験結果を図6に示す。図中、着色範囲は目標値である±2.5m/s<sup>2</sup>を示している。

非免震の場合、4脚とも激しく浮き上がり・脱輪を生じ、その衝撃で20m/s<sup>2</sup>を超える応答加速度が発生した。

それに対し、免震機構を作動させた場合は、脚の浮き上がり・脱輪を起こさず、応答加速度の目標値である±2.5m/s<sup>2</sup>以内にほぼおさまる結果となった。

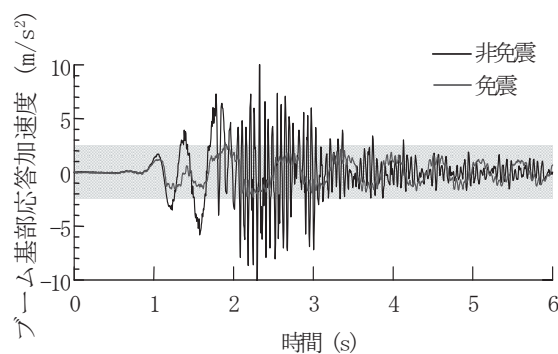


図6 模型の加振試験結果

## 2.5 模型モデルの数値シミュレーション

前項1/15スケール模型による試験結果を評価するため、有限要素法を用いたシミュレーションを行った。

### (1) 解析モデル

免震装置部はGAP要素(点接触要素)及び非線形ばねを用いてモデル化した。モデル化した免震装置部の概念図を図7に示す。

フランジ面の接触部(支点ピン)部分の接触を、点接触要素であるGAP要素でモデル化し、さらにそのGAPを、予圧縮を加えたばねによって挟み込むこと

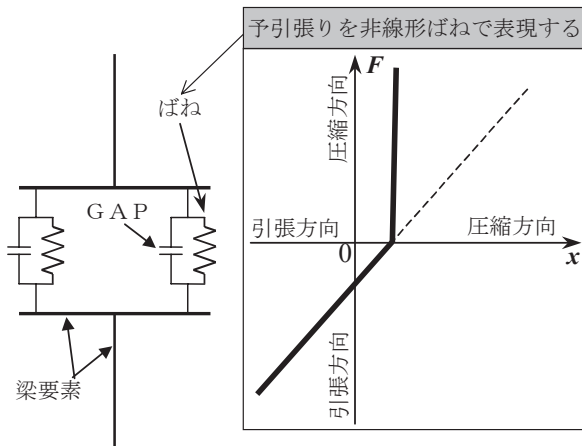


図7 免震装置部のモデル化

によってモデル化される。支点ピンは滑りを起こさないため上下でかみあっているの、モデル化するGAP要素の滑り摩擦係数は $\mu = 10.0$ とした。幅を持たせてGAP要素を用いることで、自重によるモーメントは自動的にモデル内に組み込まれる。

また、レール／車輪間はGAP要素を用いた点接触でモデル化し、浮き上がり／脱輪を許容した。接触条件には、車輪のフランジの高さが考慮され、フランジ高さ2 mm (1/15スケール) 以上に脚が浮き上がったときのみ横行方向の変位(脱輪)が許されるモデル化がなされている。

#### (2)解析方法

解析にはABAQUS / Standard ver.5.7を用い、地震波の入力にはラージマス法を用いた。時間刻みは0.001～0.01秒(非線形性の強さによって調整)とし、解析時間は6秒(1/15スケールのポートアイランド波の主要動と認められる時間幅)とした。

#### (3)解析結果

代表的な解析結果としてポートアイランド NS基盤波の解析結果を図8に示す。

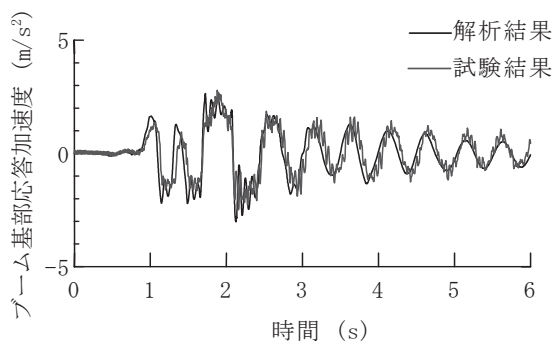


図8 振動台試験模型に対する解析結果

応答加速度は、試験・解析結果ともに最大加速度が目標値2.5m/s<sup>2</sup>以内にほぼ収まっており、且つ両者の波形はよく一致している。

また、フランジの開き量の解析結果も試験結果と一致しており、免震装置を適用した免震クレーンの挙動が解析によって予測できることが確認できた。

## 2.6 実機モデルの数値シミュレーション

1/15スケール模型における実験結果と数値シミュレーションによる解析結果はよく一致しており、このことから本解析手法は妥当である事が分かった。よって実機モデルに対しても同様の手法を用いて免震の効果を確認した。

#### (1)解析モデル

免震装置部は、模型モデル解析モデルと同様にモデル化した。ただし、復元力特性は実験によって得た復元力特性を、相似則に従って実機の数値とした。

また、レール／車輪間のモデル化の手法についても、模型モデルの解析と同様である。ただし、実機のスケールに合わせてフランジ高さは2.5cmとした。

#### (2)解析内容

解析には、模型モデルと同様に、ABAQUS / Standard ver.5.7、ラージマス法を用いた。時間刻みは模型モデル同様0.001～0.01秒としたが、解析時間は実機のスケールに合わせて20秒とした。

#### (3)解析結果

実機モデルの解析結果を図9に示す。最大応答加速度は、非免震の場合は5.12m/s<sup>2</sup>、免震の場合2.32m/s<sup>2</sup>となり、免震装置により約1/2に低減される。また、非免震の場合にはすべての脚が脱輪するが、免震クレーンではすべての脚が脱輪しないという解析結果を得られた。

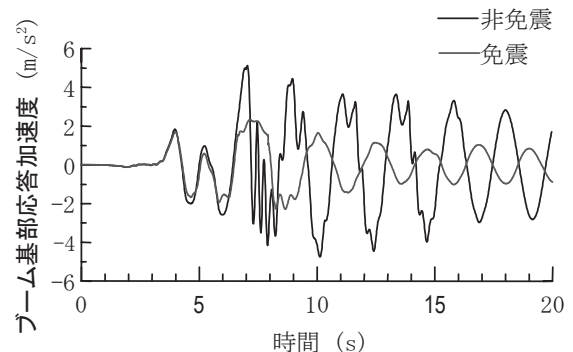


図9 実機に対する応答解析結果



### 3. 結 言

地震後でも直ちに荷役可能であることを目指して、シンプルな構造でメンテナンスが容易な当社独自のコンテナクレーン用免震装置を考案した。その免震装置について模型試験を行い、数値シミュレーションによりその有効性を確認するとともに、解析による設計手法を確立することができた。

本装置はコンテナクレーンだけでなく、バラ物用アンローダ(連続アンローダ)等にも応用可能である。

### 参 考 文 献

- (1) 港湾荷役機械設備耐震設計調査研究委員会：兵庫県南部地震における神戸港コンテナクレーンの被害  
港湾荷役 第40巻第2号 1995年 pp.203-208
- (2) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 機械設備の被害 1995年  
pp.228-231
- (3) 金山維史、柏崎昭宏：大地震によるコンテナクレーンの脚の浮き上がり挙動評価 日本機械学会論文集(C編) 64巻618号 1998年2月 pp.480-486

# 中間層免震建物対応エレベーターの耐震設計目標と地震時管制 Seismic Design Intention and Aseismic-Control of Elevators Compatible with Middle-Floor Seismic Isolation Buildings

重田 政之、関谷 裕二／宮田 弘市、上田 信雄

●日立水戸エンジニアリング

●日立製作所

## 1. はじめに

免震建物は1982年にはじめて国内に建設されて以来、多くの努力のもとに都市の防災構造に欠くことのできない建築構法として広く認知されるに及び、昨今、都市防災インフラ施設、居住環境の地震時の安全性、オフィスビル情報設備のリスク管理の観点から免震建物が数多く建築されている。

また、建築物構造の合理性から建築物の中間層に免震装置を設ける中間層免震建物が建築されており、その高さは100mを超えるに至っている。

この中間層免震建物のエレベーターの昇降路には、免震側の上部建築物から非免震側の下部建築物まで吊下げる構造と免震層にて上部昇降路と下部昇降路に分割される構造とがある。この後者の昇降路分割型のエレベーターを中間層免震建物対応として1995年の兵庫県南部地震の阪神淡路大震災以降に都市防災の観点から開発<sup>1)~5)</sup>を進めてきた。

地震時の免震層の応答変位（以下、免震変位と記述）でエレベーターのガイドレールは免震変位制御下のS字状の強制曲げ変位を受ける。このようなエレベーターの耐震性能を補完することを狙いとして、レール変形状態でエレベーターが走行したときの二次被害を少なくするために、主要動のS波でレールの曲げが大きく成長する前に、初期微動のP波感知でエレベーターが安全な速度以下に減速し、停止する地震時管制運転を取り入れている。

本報告は、中間層免震建物用エレベーターの耐震設計目標とその目標を補完する地震時管制について述べる。地震管制の成立性を直下型の観測地震波を用いて考察した。なお、観測地震波は、神戸気象台観測波と阪神淡路大震災以降に整備されたK-NET強震観測網のデータを使用した。

## 2. 免震建物とエレベーター

免震建물에設置されるエレベーターについて説明する。免震建物は、建築物の免震装置の設置位置によって、図1に示す2つに分類される。

1つは、建築物の基礎上に免震装置がある基礎免震建物と、他の1つは、免震装置を建築物の中間層に設

置する中間層免震建物である。

ここで、中間層免震建物へのエレベーターの設置構造には、次の2つの型式がある。

### (1) 昇降路吊下げ型のエレベーター

昇降路を上部建築物より下部建築物の中に吊下げる型式で、エレベーターと下部建築物の出入口間には橋渡しのエキスパンションを必要とするが、それ以外は一般のエレベーターと同じである。

### (2) 昇降路分割型のエレベーター

昇降路分割型は昇降路が免震階で分割される型式で、

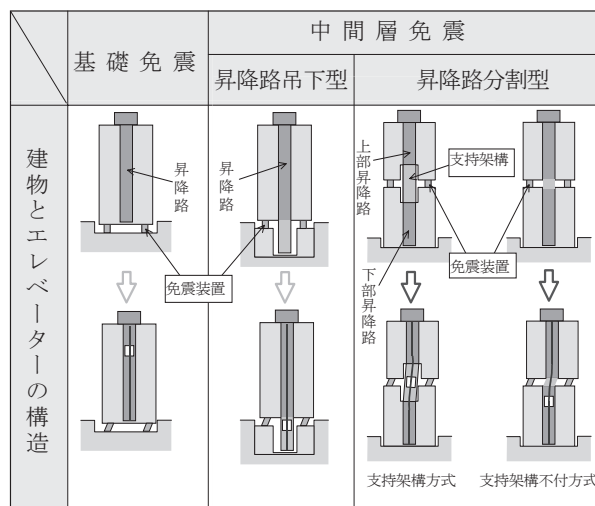


図1 免震建物とエレベーター

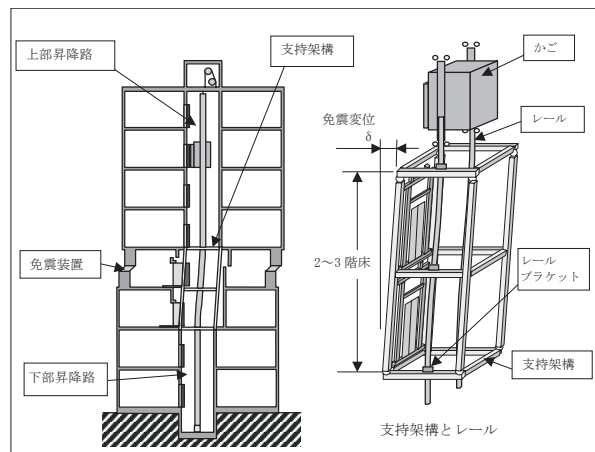


図2 支持架構方式構造

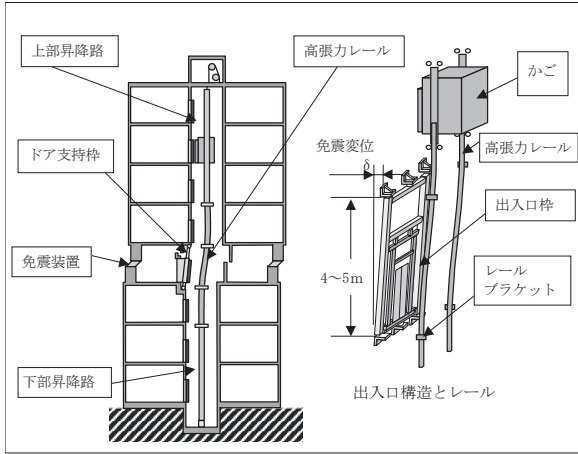


図3 支持架構不付方式構造

本報告が対象とするエレベーターである。

上下建築物間の免震変位で、レールはS字状の強制曲げ変形（以下、“レール免震曲げ”と記述）を受ける。

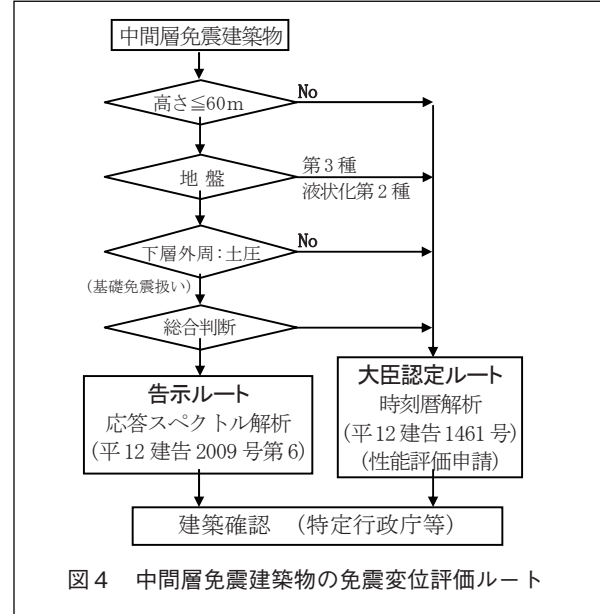
昇降路分割型のエレベーターには、レール免震曲げの応力を緩和するために、免震変位の程度に応じて昇降路の2～3階床部分に図2に示すトラス構造またはラーメン構造の支持架構でレールを支持する構造方式と、免震層部に必要に応じて高張力素材のレールを適用し、昇降路の拡幅を少なくする図3の支持架構不付方式がある。

### 3. 中間層エレベーターの耐震設計目標

表1に示す昇降路分割型のエレベーターの耐震設計目標を示す。この目標の考え方は、中間層免震建物の免震変位（免震層の応答変位）の評価に依存し、建築物の耐震設計目標である設計地震動レベル1とレベル2のカテゴリーの中にある。

表1 免震層部のエレベーターの耐震設計目標

中間層免震変位	地震動	レベル1 (稀に発生する地震)	レベル2 (極めて稀に発生する地震)	エレベーター クリアランス	
	時刻暦ベース	$\Delta_1$ (告示第1461号)	$\Delta_2$		$\Delta_2 \times 1.2$
	応答スペクトルベース	$(\Delta_1 = \Delta_2 / 2)$	$\Delta_2 = \delta_r$ (告示第2009号) (第6の五ハ)		
支持とガイド	弾性応力範囲	ガイドレール 残留変位：5mm以下	乗客の安全空間確保		
安全性	地震後運転可能	地震後救出運転可能	乗客の安全確保		
地震後の対応事項	昇降路内の異常有無の確認	レール支持部 確認&調整	状況に応じた 改修作業		



一方、この免震変位の評価ルート<sup>9)</sup>は、平成12年建告第2009号<sup>7)</sup>で定められ、その流れを図4に示す。

基本区分として、告示ルートの建築物高さ60m以下は同告示に示される応答スペクトル解析評価、高さ60m超えは大臣認定ルートとなり、平成12年建告第1461号<sup>8)</sup>で定められる時刻暦解析評価に分かれる。

告示ルートは上部免震建築物と免震装置を1自由度系にモデル化して、設計地震動レベル2相当の応答スペクトル解析より免震層の応答変位 $\delta_r$  ( $\delta_r$ ：告示記述の記号で、本報告では免震変位 $\Delta_2$ と記述)が算定される。

なお、告示は図4の個々の大臣認定ルートへの判定チェックで設計者の設計方針に基づく判断を求めていることを付記する。

表1で設計地震動レベル1での支持架構やレールに発生する応力度は弾性範囲としている。そこで、告示ルートでのレベル1の免震変位 $\Delta_1$ は $\delta_r/2$ としている。

大臣認定ルートでの時刻暦解析に使う設計地震動は、評価方案書に定められる観測地震動と、模擬地震動（通称告示波と呼ばれる）を適用して、レベル1、2の免震変位 ( $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ ) が算定される。

### 4. 地震時の管制運転

表1の耐震設計目標を補完する初期微動継続時間を利用した図5の地震・強風時管制運転を取り入れることで、乗客の安全確保を図っている。

エレベーターの耐震設計・施工の技術指針<sup>6)</sup>では、地震時の二次被害を少なくすることを狙って、地震の加速度の感知でエレベーターを制御する地震時管制運

転方式を取り入れることを推奨している。

この地震時加速度管制運転方式に加え、変位感知器で免震変位の大きさを二段階に感知し、エレベーターの運転を制御する変位管制も取り入れて、利用者の立場での不安感排除を図っている。

地震動に対しては、初期微動を感知するP波感知器と主要動を感知するS波感知器を設置して、レール免震曲げの状態ではエレベーターが走行したときの二次被害を少なくするために、P波とS波の到達時間差を利用し、レベル1越えのレール免震曲げが成長する前に、エレベーターが安全な速度以下に減速し、停止する地震時管制運転を採用している。

P波とS波の加速度到達時間差の一例を図6の兵庫県南部地震での神戸気象台観測波で示すと、その時間差は約3秒である。S波が到達し、レベル1相当の免震変位が成長するまでにエレベーターが安全な速度まで減速するには十分な時間差である。

また、強風時の変位管制に対しては、免震変位を二段階 ( $1/2\Delta_s$ と $\Delta_s$ ) に感知し、この感知レベルの目安をエレベーターの定格速度を下げ、エレベーターの横揺れが許容できる変位内とし、かご内の「強風時管制中」の表示とともに強風時の免震変位による乗客の不安を軽減している。

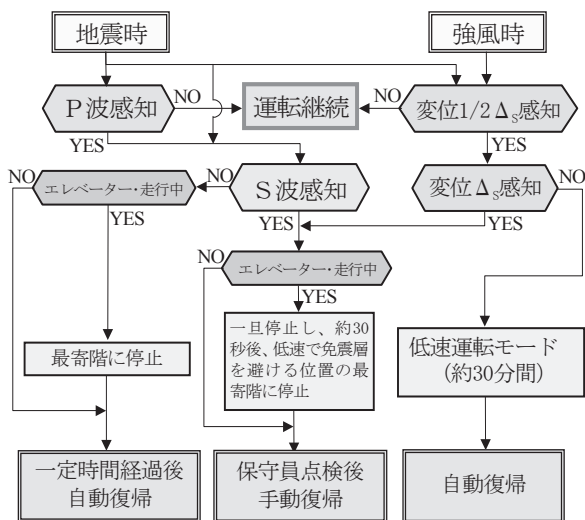


図5 地震・強風時管制運転フロー

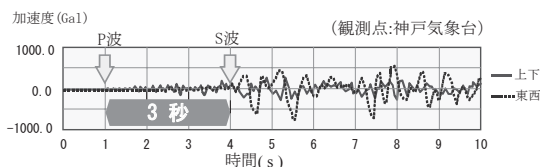


図6 1995年兵庫県南部震地の神戸波

表2 免震変位成長時間評価の観測地震波

発生日時刻	地震名	震源深さ km	M	観測点 (K-NETコード) (属性)
19950117 05:46	兵庫県南部	16	7.3	神戸気象台 震央距離16.5km 震度7
20001006 13:30	鳥根県西部	9	7.3	江府 (TTR007) 震央距離13km 計測震度5.8
20030926 04:50	十勝沖	42	8.0	広尾 (HKD100) 震央距離84km 計測震度6.0
20041023 17:56	新潟県中越	20	6.8	小千谷 (NIG019) 震央距離1km 計測震度6.8

### 5. P波感知方式の観測波での効果の確認

免震建築物の構造計算で、免震変位 (免震層の応答変位) の解析は応答変位の大きさの評価が主体で、上下動と水平動との時間差を考慮した応答変位時間特性は評価の対象外である。

そこで、図5の地震時管制機能の成立性を神戸気象台の観測波と1996年以降に整備された防災研究所のK-NET強震観測網の観測波を用いて検証する。

検証に用いる地震は直下型を中心に選択し、その地震を表2に示す。なお、2003年十勝沖地震震源は海洋を震源とし、直下型ではないが、やや長周期の成分で石油タンク火災を招いた地震として加えた。

検証は次の点に留意し、行った。

- 1) 免震系を上層建築物と免震装置で構成する1自由度系でモデル化し、周期と減衰比率はそれぞれ代表値の4秒と0.2とした。
- 2) P波感知後に免震変位が150mm (概ねレベル1相当) の免震変位に達するまでの時間を評価する。

各地震波での免震変位応答を図6, 7, 8, 9に示す。図の時間軸の原点はP波を感知した時点として図示している。

表3 P波感知後の免震変位量と応答時間

地震名	免震変位量までの応答時間 (s)				
	25mm	50mm	75mm	100mm	150mm
1995兵庫県南部地震	1.6	3.3	3.4	3.5	3.6
2000鳥取県西部地震	3.4	4.9	5.0	5.1	5.6
2003十勝沖地震	9.8	15.3	17.2	17.8	22.4
2004新潟県中越地震	1.6	2.2	2.5	3.6	4.2



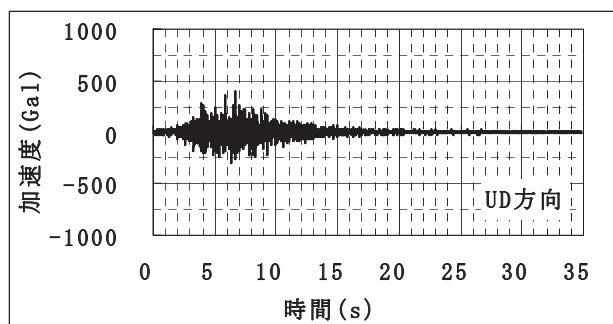
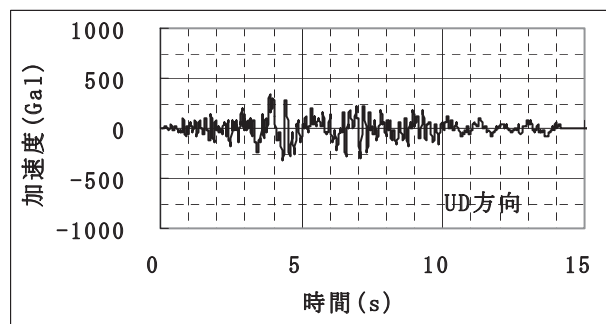
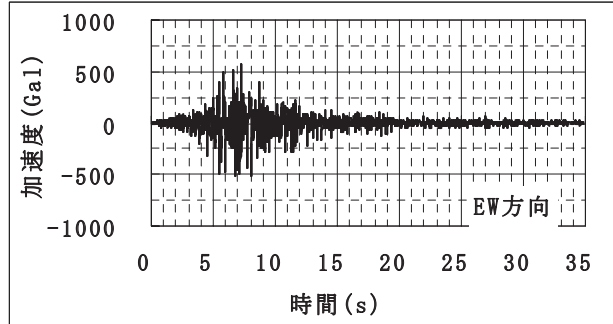
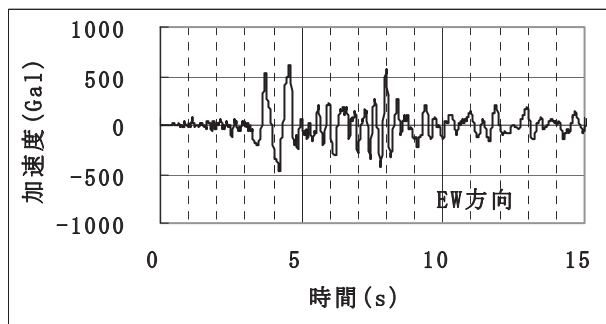
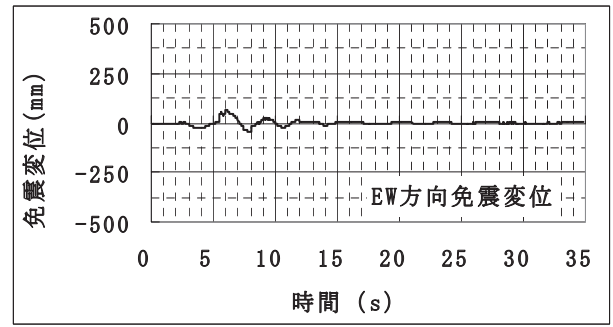
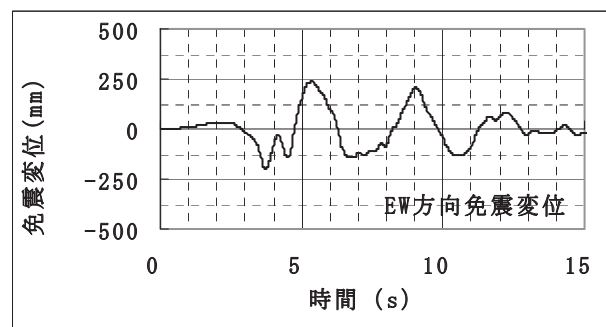
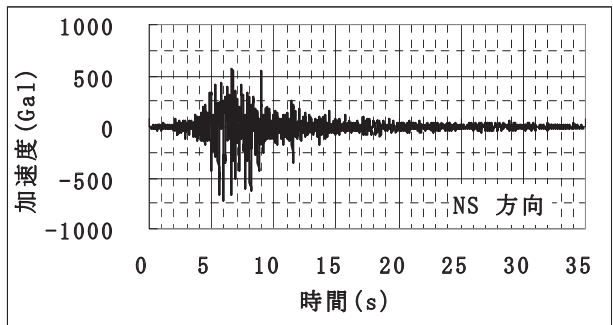
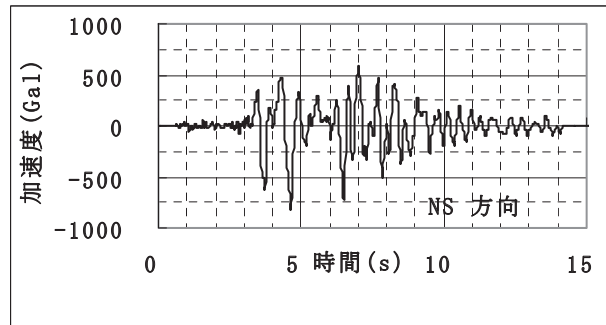
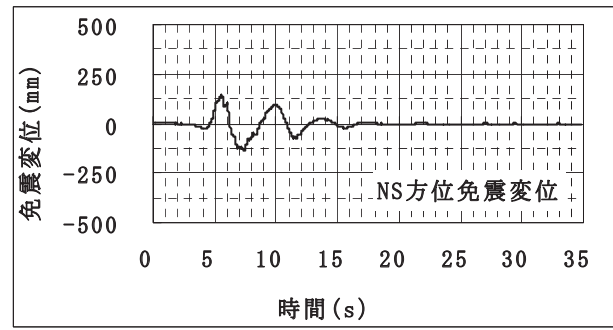
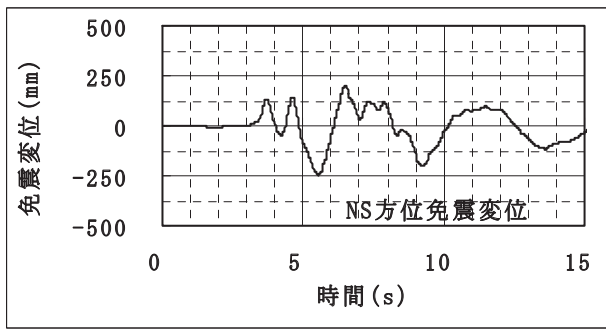


図7 兵庫県南部地震神戸波での免震変位応答

図8 鳥取県西部地震江府波での免震変位応答

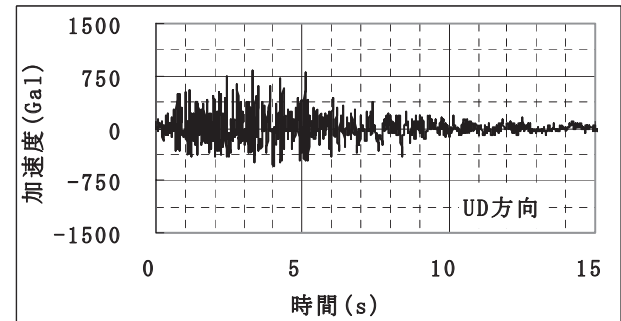
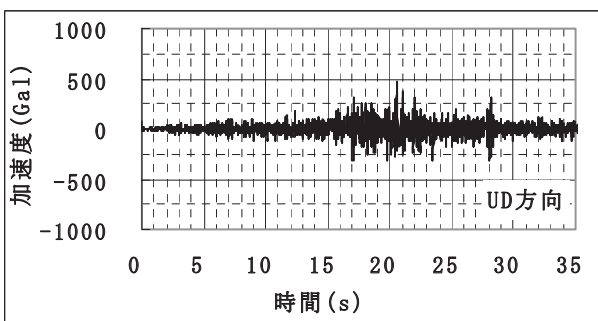
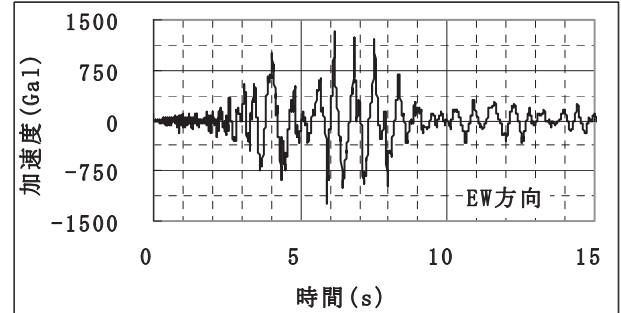
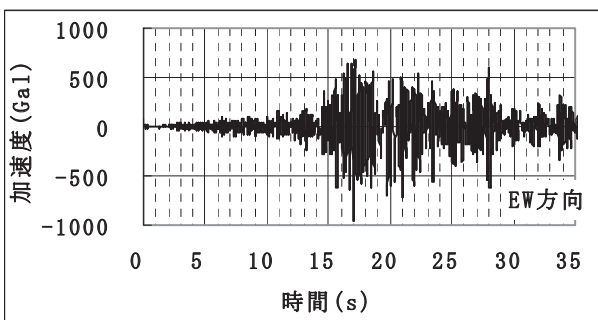
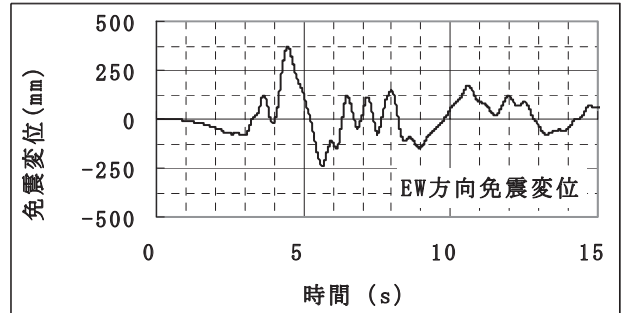
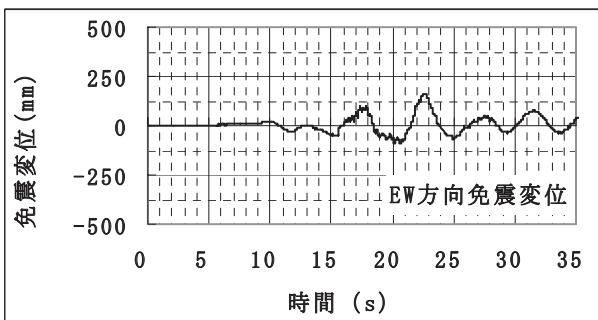
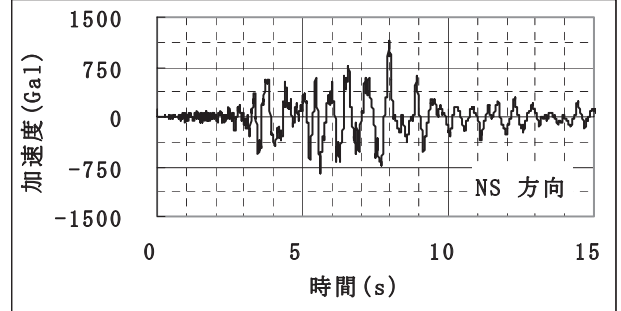
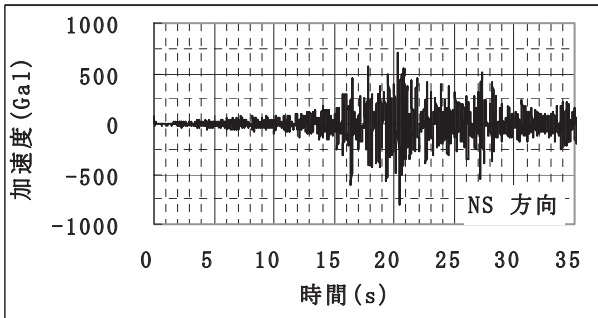
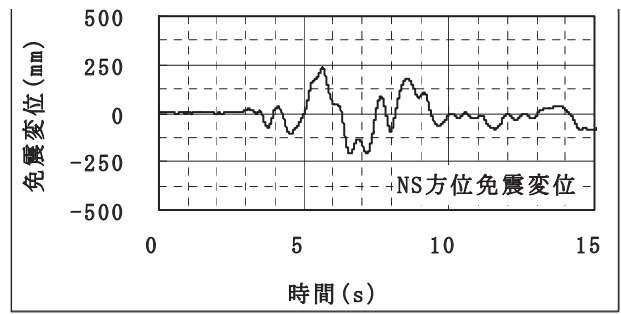
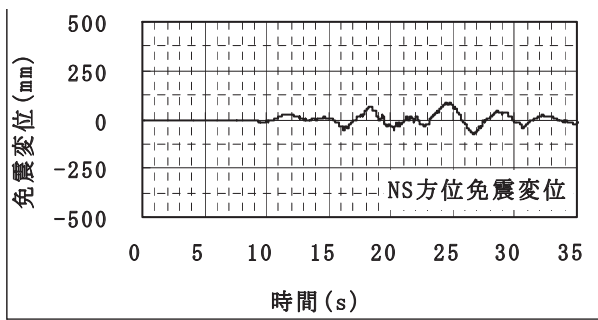


図9 十勝沖地震広尾波での免震変位応答

図10 新潟県中越地震小千谷波での免震変位応答

ここで、各地震波のNSEW方向の免震変位応答をベクトル合成し、合成した免震変位がP波感知後に25, 50, 75, 100, 150mmに達するまでの時間を表3-3に示す。

免震変位が100mm程度までに成長するには3秒以上の時間ある。

P波感知後にレベル1相当の免震変位 $\Delta_1$ に達するまでにエレベーターを減速させるための設計目標時間を3秒としているが、この目標時間は表3より達成可能である。

一方、エレベーターを安全な速度まで減速させるに要する時間はエレベーターの定格速度により異なる。この3秒間の間に免震層部分を走行可能な速度以下までに減速するように定格速度を選定することになる。

## 6. まとめ

防災都市構築の一環として、インフラ施設を中心に免震建築物への期待が大きい。

この要望に応じ、阪神淡路大震災以降、免震建築物の棟数は増加し、また、既設建築物の耐震改修においても免震構造が取り入れられるに至っている。

平成12年以前は、免震建築物は高さに関係なく公的機関での性能評価に基づいた大臣認定建築物であったが、多くの建築実績に基づく免震構法技術の浸透と、平成12年の建築基準法の性能規定への改正で構造設計の簡素化が図られるに及んでいる。

すなわち、高さ60m以下の建築物は地盤等の一部の制約を除き告示が規定する技術基準ベース<sup>7, 9)</sup>で、設計者の設計方針の判断に基づいて、建築確認ができる道が開かれた。

このような要望や趨勢の基に、建築物の中間層に免震装置が設置される中間層免震建物対応のエレベーター設備の製品化にこぎつけているが、阪神淡路大震災以降、構築されたK-NET強震観測網で観測された地震波の内、直下型地震動に注目し、中間層免震建物用エレベーターの耐震設計目標のもとに掲げている地震時管制の成立性について考察した。

この結果、初期微動のP波感知で、主要動のS波でレールが大きく曲がる前にエレベーターが安全な速度以下に減速し停止する地震時管制の方式は、レール変形状態でのレベル1越えの状態でのエレベーター走行の二次被害が防止でき、乗客の安全確保の観点から有効であることが確認できた。

今後とも、所期の目標に向かって各界の指導を仰ぎ、免震建築物対応のエレベーターの改良や提案を図っていく考えである。

## 《参考文献》

- (1) 重田,中里,森,酒井,他2:免震建物対応エレベーター,日立評論,79,9,27~30,1997.9
- (2) 重田,中里,森,酒井,他2:中間階免震建物対応エレベーターの開発,日本機械学会No.97-761技術講演会講演論文集,1997.12
- (3) 重田,関谷,黒田:免震建物とエレベーター,(社)日本免震構造協会誌MENSHEIN No.27,30-36,2000.2
- (4) 関谷,重田,上田,宮田:中間層免震建物対応エレベーター,日本機械学会No.03-53技術講演会講演論文集,2004.1
- (5) K.Miyata, Y.Sekiya, M.Shigeta: Elevators Compatible to Intermediate-Floors Base Seismic Isolation Building, ASME PVP-Vol. 486-2, Seismic Engineering - 2004
- (6) (財)日本建築センター編:昇降機耐震設計・施工指針(1998年度版)
- (7) 建設省告示第2009号(平成12年):免震建築物の構造方法に関する安全に必要な技術的基準を定める等の件
- (8) 建設省告示第1461号(平成12年):超高層建築物の構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件
- (9) 独立法人建築研究所,他編:免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説(工学院図書,2001-5)

# 中間階免震建物用エレベーターの開発

渡辺 誠治、湯村 敬、府内 宣史、林 美克／嶺脇 重雄、木村 長仁

●三菱電機

●竹中工務店

## 1 はじめに

建物の耐震強度向上および機能確保を目的とした免震建築は、1995年の阪神・淡路大震災を契機として、飛躍的に増加している。従来の免震建物では、免震装置を建物の基礎部分に設置する基礎免震建物が通例であった。しかしながら最近では、建物の中間層に免震装置を設置する中間階免震方式が検討されている。

一般に中間階免震建物では、地震時に免震層で通常の階に比べて極めて大きな水平変位が生じるため、普通のエレベーターでは、かご・釣合おもりのガイドレールに許容値を超える曲げ応力が発生してしまう。

そこで、新しい中間階免震建物用エレベーターとして、免震層でガイドレールの支持間隔を通常よりも長く取り、ガイドレールが層間変位に応じて滑らかに変形可能なエレベーターを開発した。この方式は、免震層にガイドレール以外の昇降機器が存在しないため、他の方式に比べて、昇降路スペースを小さく抑えることができる。また、免震層におけるエレベーターの耐震対策は、ほぼ全てをエレベーター側で対応するため、建築サイドとの取り合いが少ない構成となっている。

以下では、本エレベーターの基本構造について説明するとともに、地震時にガイドレールに生じる大きな動的変動を評価する有限要素モデルを用いた地震応答解析結果について示す。また、解析結果の妥当性を試験機を用いた測定により検証した結果もあわせて示す。

導出した解析モデルに基づいてレール構造の最適設計を実施することにより、強度の高いエレベーターを実現することができた。

## 2 エレベーターの基本構造

中間階免震建物にエレベーターを設置する場合、免震層で大きな水平変位が発生する(図1)。そのため、かごと釣合おもりのガイドレールに許容値以上の大きな曲げ応力が作用し、通常のエレベーターを用いることができない。

そこで、図2に示すように、免震層においてガイドレールを支持しているブラケットの間隔を通常よりも長く取ることにより、地震時の水平変位で生じるレール曲げ応力を低減するレール変形方式を開発した。こ

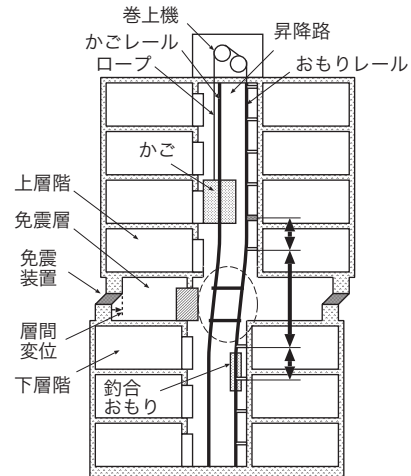


図1 中間階免震建物

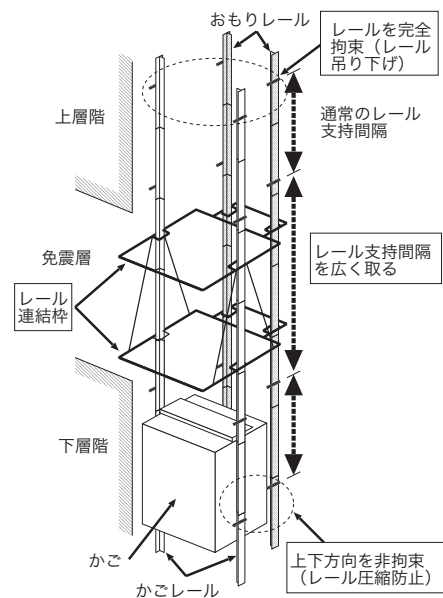


図2 エレベーターの構成

の方式は、昇降路スペースを大幅に増大することなくエレベーターの設置が可能である。

一方、新構造のエレベーターは、免震層でガイドレールの支持間隔を広げているため、地震時のかご振動でガイドレールに作用するかごの横方向加振力に対し、ガイドレールの強度不足と、かごガイド部の脱レ



ルを引き起こす可能性がある。そこで、左右のガイドレールをつなぐレール連結棒を免震層に設けることで、かご加振力を各ガイドレールに分散し、また左右のガイドレール間隔を一定に保つようにしている。

さらに、免震層において非常止めが動作して、ガイドレールに座屈が生じるのを防ぐため、免震層以下のガイドレールは吊り下げ構造とし、非常止め動作時のガイドレールの圧縮荷重を、免震層より下部で引張荷重に置き換えている。

### 3 強度試験と解析モデル検証

中間階免震建物用エレベーターに対し、地震時における動挙動を正確に評価するため、免震層部分を模擬した有限要素モデルを導出した(図3)。本解析モデルは、ガイドレールの大変形や、ガイド部の接触状態の変化に応じた不連続かご加振などが評価可能である。

また、導出した解析モデルの妥当性を検証するために、実機サイズのかご試験装置を用い、地震時応答評価試験を実施した。試験装置は、高さ約9mの試験枠を上下2分割とし、試験枠の上層部分は変位を拘束し、下層部分は加振テーブルに固定した。

試験結果の一例として、加振テーブルに地震波形を模擬した正弦波を与え、下側のかごガイド装置近傍における左右ガイドレールの曲げ応力を測定した結果(丸点、三角点)を図4に示す。また、図3の解析モデルを用いて計算した結果(実線、破線)もあわせて示している。これより、かご加振力が設計通りに各ガイドレールに分配されており、解析は高い精度で計算できていることを確認できた。

### 4 地震時のエレベーター強度検討

実機に対応した有限要素モデルにより、建物の地震応答を入力とするエレベーターの動挙動を解析評価した結果を以下に示す。地震波形として、エルセントロ地震(南北方向波形)を与えた。免震層上下のレール支持点に対する、レール曲げ応力の時間応答を図5に示す。レール曲げ応力は、層間変位が最大となる3.9secで生じているが、最大応力はガイドレールの降伏応力  $265\text{N/mm}^2$  以内に収まっており、強度上問題ないことを確認できた。また、ガイド部分の変位挙動から、ガイドがレールから外れないこともあわせて確認した。

### 5 おわりに

新たに開発した中間階免震建物用エレベーターに対し、ガイドの接触変化やガイドレールの大変形など、

本エレベーターに特有な地震時動挙動を評価する解析モデルを導出した。本解析モデルの有効性を検証するために、実機サイズの加振試験を行った結果、解析と良好に一致する結果を得ることができた。

エレベーターに必要な強度を確保するための設計寸法最適化を実施し、実際の地震波形を入力とするエレベーターの地震時応答解析を行った結果、脱レールやガイドレールの塑性変形などの生じない、強度の高いエレベーターを実現できた。

なお、本内容の詳細については、日本機械学会論文集に投稿予定である。

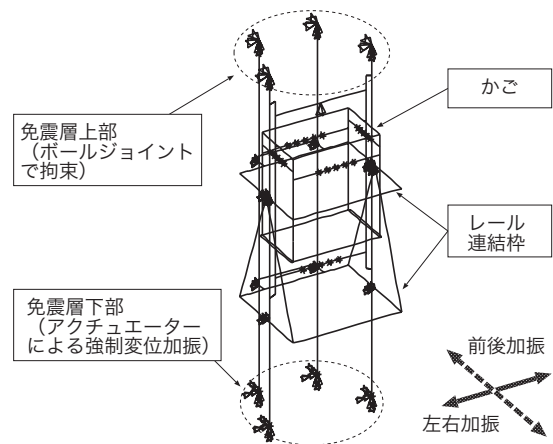


図3 免震層部分の解析モデル

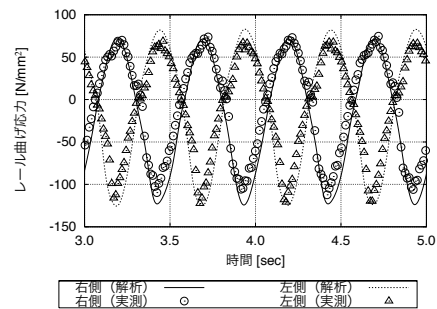


図4 かごガイド部におけるレール曲げ応力

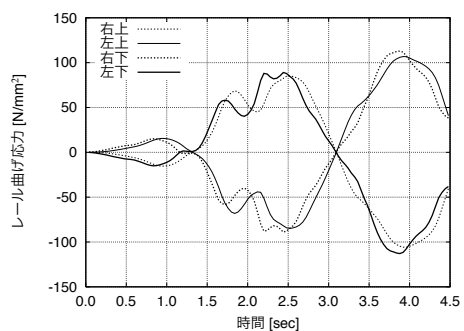


図5 レール支持点におけるレール曲げ応力

# 緊急地震速報実利用化への課題

藤縄 幸雄

●リアルタイム地震情報利用協議会

## 1. まえがき

阪神淡路大震災の10周年を前にした2004年の10月23日に、新潟県中越地震が発生し、大きな被害となった。日本ではマグニチュード7クラス以上の地震が平均10年に一度の頻度で起きることを再認識すると共に、地震防災力の強化の道は、まだまだ未完成であることを知らされた思いがする。

全国レベルの地震観測網が阪神淡路大震災のあと整備された。その観測網が主として調査・研究という観点から整備されたにもかかわらず、リアルタイム性などの高い性能の故に、直接的な防災対応にも活用できる。大震災の後ほぼ5年からリアルタイムによる利活用の研究開発が大きく進展し、実用化が日程に上がり始めている。本稿では、数十年前から構想・試行されていた緊急地震速報と称される主要動到達前の情報につき、その概要と実用化にあたっての課題につき述べる。

## 2. 観測網

### 1) 利用可能観測データ

地震観測の中で、国民レベルの活用に使われるのは、気象庁によって整備されるものと、地震調査推進本部によるもの、および大学の学術目的のものがある。気象庁では、地震・津波防災に役に立つ情報の提供を行う行政的な検知から地震観測網が運用している。その一環としてのデジタル強震波形観測網があり、全国に約600箇所の観測点がある。このほか、180点の観測点からなる津波地震早期検知網がある。一方、地震調査推進本部・独立行政法人防災科学技術研究所が整備・運営している基盤的観測網として、高感度地震観測網(H i - n e t)があり、地震の発生を理解すること、地震防災に役立つ情報が得ることを目的としている。その外に、広帯域地震観測網(F - n e t)、強震観測(K i K - n e t、K - N E T)がある。

このような多くの種類の地震観測網の内、緊急地震速報には、気象庁の津波地震早期検知網での多機能型地震計、リアルタイム伝送がされている高感度地震観測(H i - n e t)データおよび大学による高感度型地震計が使われているのみである。緊急地震情報の精度・内容は、使う地震計の設置密度、伝送遅延、デー

タの質、安定性に依存する。現在使用の対象となっていない既存の地震計観測網データも、新たに生まれた利活用にも併用出来るよう改良することが望まれる。早急に望みたいのは、K i K - n e tのリアルタイム伝送化である。そのためには、観測網がばらばらな仕様を極力標準化して、混合活用を容易する必要がある。

### 2) 地震網の充実

次には、緊急地震速報の実運用にそって、観測網の保守・運用体制を見直すべきである。余裕時間の大きさ、震源パラメーター決定精度が、地震の発生する場所と観測網との関係に大きく依存することから、観測点配置、密度を拡充すべきである。例えば、高感度地震観測網でも観測密度のまばらな地域が所々に見られるが、このような場所を補間して埋めてゆくことで、差別のないサービスが国民に行き渡るようにできる。

この面で最も重要なのは、現在散発的にしか整備されていない海底地震計観測網を沿岸海域に展開することである。平均的に見て日本の被害地震の70%強が海底で発生していることから、海底地震計網の整備は急務である。海底地震計観測網には、津波計の併設する。これらの追加整備による効果には、余裕時間・津波対策上からみて、大きなものがある。たとえば現状のH i - n e tの配置では、東南海・南海地震の場合に、徳島県・和歌山県の沿岸都市では、余裕時間が殆どない地域もある。生命保全という利用から必要な5～10秒の余裕時間を確保するという目標にたつて配置計画を立ててみると、震源位置にもよるが沖合に100点ぐらいの地震計があれば、ほぼ全地域この程度の余裕時間を確保出来ることがわかっている。

現在の地震観測網が、研究開発用に整備されていることから、実運用に供するに当たっては、段階的に、その用途に必要な観測体系の検討・整備に取り組む必要がある。気象庁強震波形観測網はデジタル強震波形観測がなされ震度計は、一部を除いて専用線で中樞局装置と結ばれている。保守としては、毎日の動作確認と定期的なメンテナンスを行うことにより、震度計の基本性能を維持されている。このように気象庁での観測網は、監視などの行政目的に使われていることから、かなり程度の高い保守体制となっているとい

える。他の地震観測網にたいしても、このような運用体制への以降が検討される必要がある。

さらに、解析システムの信頼度の向上が、必須である。システム自体の二重化と共に、気象庁本庁にのみ設置されているセンターの地域二重化を行い、安定したデータ配信システムの整備を行うべきである。2次・多次配信によってエンドユーザーに配信されると想定しているが、各配信サーバが少なくとも上流程度の信頼度を確保することが望まれる。

### 3. 緊急地震速報の現況

緊急地震速報すなわちP波検知のあと速やかに決定される震源情報は、防災科学技術研究所や気象庁で研究・開発がされている。阪神淡路大震災のあと直ぐに、気象庁と鉄道総合研究所は、「ナウキャスト情報」の開発を開始し、一方防災科学技術研究所は、整備した地震間観測網の利活用研究の一環として、「リアルタイム地震情報の伝達・利用」に付いての研究開発を平成13年度からはじめた。平成14年度には、藤沢市での実証実験をはじめると、情報に算出およびその精度において飛躍的に向上が達成された。

その結果、平成14年度秋頃には、かなりの分野で実用になるのではないかと認識となった。これまで個々に行われていた研究開発から、一日でも早く実用化出来るようにすることを目的とした協力体制樹立の機運が盛り上がり、平成15年度から実施されている。その過程でナウキャスト情報、リアルタイム地震情報と言っていた情報が、「緊急地震速報」と統一呼称されるようになった。

#### 1) 算定法

防災科学技術研究所の新しい震源決定システムでは、最初の2観測点に地震波が検知されるとほぼ同時に、かなりの精度で震源パラメータの決定がなされるようになってきている。このアルゴリズムでは、観測点の間隔がほぼ20kmと密であることを最大限に生かし、到達した地震データとともに、周辺の測点に未だ到着していないという情報をも積極的に、しかも定量的に使うという新しいアイデア(着未着法)に基づいている。震源パラメータは、通常震源決定のように残差を最小にするアルゴリズムによっており、観測データが増える毎に震源を再計算する。解が安定した時点でフィナル報が出される。

気象庁では、1観測点のP波エンベロープ形状を用いて震源を推定する。さらに震源の位置を絞り込むために、着未着に関する観測事実を使う。1観測点あるいは2観測点にのみ地震波が到達している場合は、この2

つの方法の組み合わせがなされる。地震波が到着した観測点が3点になると、水平位置については、経度・緯度については0.1度毎にグリッドサーチで震源を探索する。また、深さ方向については経験的に推定している。この操作を到達観測点が5点になるまで続ける。

このように二つの算定方法があったが、平成16年度末を目前に、統合化を行うべく、気象庁・防災科学技術研究所は共同開発を行っている。

#### 2) 性能・精度

旧リアルタイム方式を例に挙げると、最初の観測点で地震波が検知されてから、2—3秒ぐらいから震源が決まりはじめる。時間の経過と共に、地震波が届く観測点が増え、そのたびに震源が決め直され、より精度の高い結果が得られる。図1はその例で、2003年5月26日に発生した宮城県沖で発生した地震(M7.0)の即時的決定の様子である。最初の観測点にデータが到達した時刻を時間の原点にとっている。この例では、約2.5秒から震源が決定され始めている。

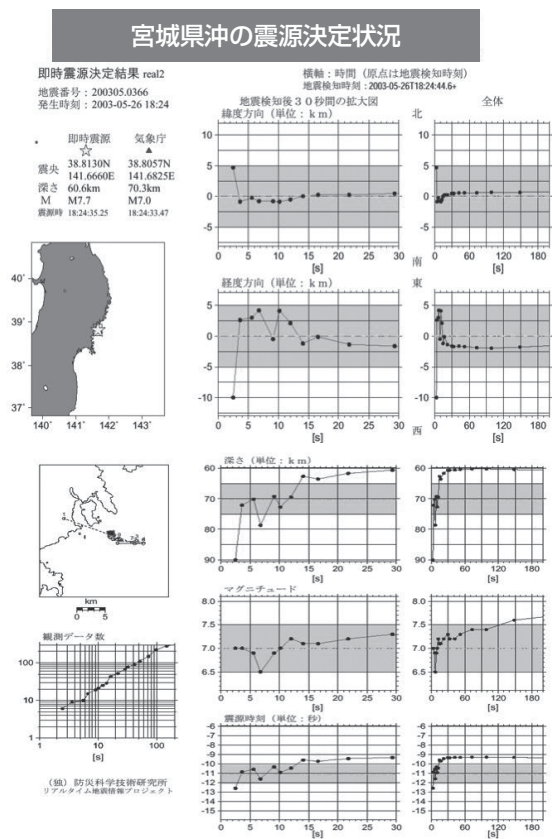


図1 新しいアルゴリズムによる、即時震源決定の例。2003年5月26日の宮城県沖の地震の場合。決定パラメータの一部である震央位置を示す。最初の観測点に地震波が到達した時点がグラフの横軸の原点としており、2.5秒後に最初の解が求まっている。グラフでは、気象庁の発表値との差を縦軸に示しており、ほぼ、暫定的に設定した許容範囲に入っている。震源の深さ、マグニチュード、震源時も、類似の傾向を示すが、震央のずれより、一般に大きい。



統計的にその精度を調べてみる。期間は2002年7月から2003年2月までに気象庁で有感地震とされたものにつき、一応もっともらしい結果が得られる割合は、97%となっている。使い方によっては十分役に立つレベルにある。その精度を向上させる研究が引き続きされており、5年以内に非決定率1%をめざしている。しかし、当然100%には持っていけない。それでは、使えないかといえば、決してそうはならない。精度・信頼度の絶対的な基準があるのではなく、利用目的によって要求水準が異なるからである。信頼度を勘案したリスク評価の基づきそれぞれの利活用分野で採否が決定されるはずである。

リスクマネジメントでは、震源情報に対する信頼度評価が重要である。旧リアルタイム地震情報の結果につき、震源の位置の許容範囲を $\pm 5$  kmとした場合、第一報で約60%、第2報以降では、80%、85%の信頼度である。マグニチュードでは、 $\pm 0.5$ を許容範囲とすると、第1報から順次、65%、70%、75%となっている。必要なのは、評価点での地震危険度（強度、余裕時間）である。協議会では、2004年2月25日から配信されている2種類の速報を用いて、その評価を行っている。

#### 4. 即時地震情報の意義

危機管理の上で言えば、緊急地震速報の活用によって、リスクマネジメントとクライシスマネジメントの境界を、10数秒前にシフト出来ることが可能になった。絶対的な時間が小さいといえその意味は潜在的に大きなものがある。大げさに言えば、この時間が人類が初めて制御できることになったわけである。人命を救う、2次災害を少なくするなどに対して活用が考えられているが、効果・影響はそれに止まるものではないであろう。

情報のバックアップ、経済混乱の回避など、社会の多くの領域で防災上の影響をもつはずである。主要動到達前の時間を如何に使うか、想像力の及ぶところから手を付けて未知の領域へフロンティアを開拓して行くべきである。その効果は余裕時間の大きさ、利活用方法に開発に左右される。緊急地震速報の先には、地震予知情報が見えるのは、言うまでもない。協議会会員の勧誘をして実感したことは、地震予知に対する期待が実質的に大きなものがあり、緊急地震速報で活用できる10秒内外ではなく数時間・数日前に「予知情報」が欲しいという声が圧倒的であったことである。地震コミュニティはこの期待に真剣に答える努力を重ねる必要がある。

東海地震の場合は、地震の予知が可能ということで東海地域の地震防災計画が建てられている。このことが本当に可能なら素晴らしいことであるが、100%それが出来ると思っている人はいないであろう。そのことは別として、仮に警戒宣言、注意情報が出されたとする。そのときには、我々は手順に従って地震の到来をじっと黙って待っているのでしょうか？ 多分、このシナリオは現実的でない。それは、朝のご来光を頂上で待ったり、空襲警報が発令されて爆撃機が去るのを防空壕でじっとまったりするようになるほど、確度の高い予知情報が出せるとは思えないからである。地震予知研究にも情熱を燃やしている筆者としては、分かりやすい「図」によってかなりの確率で数日内に地震が起きそうになっていることが一般の人にも分かるようにできるとは信じているが、確実な日時予測は、難しいであろう。

地震予知情報の出された後は、地震が来るかも知れないとしっかり心構えをして、緊急地震速報を頼りにして一定の日常生活を続行するのが妥当ではないか。すなわち、地震予知情報と緊急地震速報を組み合わせて使うのである。このような観点からして東海地震対策を、到達前情報を取り入れた形に早急に見直すことが必要と考える。もっとも地震予知情報のない場所では、緊急地震速報に頼るしか方法がないことになる。

#### 5. 情報の内容と質、精度

リアルタイム地震情報のうち当面発信されるものは、緊急地震速報である。そのおもな内容は、震源位置、震源時、地震の規模である。速報は、防災科学技術研究所・気象庁が協力して研究・開発されている。協議会としては、幅広い種々の利活用の立場から緊急度の高いもの、大きなニーズのあるものを、順序づけて、その具体的な内容につき、運営委員会などで要望をしている。

リアルタイム地震情報としては緊急地震速報のほかに、被害の推定や津波推定に有効な断層モデル、それに余震情報など発災後数日までの期間の復旧活動に必要な情報も発信してもらいたいと考えている。このうち断層モデル、破壊進行方向の情報は、緊急地震速報の次に取りかかって欲しいと言う要望について多くの会員からだされている。

いふならば、発信される情報は、社会のニーズに答えることを基本にするものであり、行政サイドは、その要請を的確に吸い上げ、迅速にその実現をはかる方針ですすめるべきと思っている。



## 6. データ伝送

緊急防災対応システムのプロトタイプが情報家電対応・LPG対応・エレベータ対応・発電所対応などについて実際に開発・実証実験行われ、地震災害軽減に抜本的なブレークスルーが図られることが明確になっている。一方で、現状では数十万から数千万にのぼると考えられる多種多様なユーザーに緊急地震情報の加工・伝送・配信および家電の制御を保証できる利活用インフラが整備されていない状況がある。潜在的に大きな防災効果を有する情報が活かされない恐れが大きい。其れを解決するため、原情報を情報家電など個別利活用に適した情報として流通・活用する基本的なプラットフォーム(安心・安全情報利活用プラットフォーム:以下「プラットフォーム」と略称する)の構築が必要と考えている。

プラットフォームは、データ所有者(DP)、情報所有者(IP)、ネットワーク・放送運用者(C.C.)、情報配信者(ASP)、情報家電を含む各種防災対応システム管理者が、それぞれの立場で利用出来るものとする。キャリアーとしては、有線、無線、衛星通信、放送の一部あるいは全部を取り入れ、各種防災対応システムとしては、各種情報家電およびLPG、携帯電話などを扱う。

緊急地震速報を用いる安心・安全情報利活用プラットフォーム方式は以下の性能を有することを想定している、

- (1) 低遅延: 1秒程度であること、
- (2) 数十万以上の家庭などへの同報あるいはマルチキャストが可能、
- (3) 必要な情報を移動中を含め必要な時に受信可能、
- (4) 確実な伝達が達成できること、
- (5) セキュリティが守られること、
- (6) 安価(運用時で1000円以内)
- (7) 複合利用(緊急地震情報のみでなく、安否確認など事後の防災対応に活用出来る)

このような条件をもつ安心・安全ネットワークによって、必要なユーザーに等しく配信できるのである。

## 7. 終わりに

以上様々な問題点を挙げたが、まず全体の設計図、マイルストーンを明確化して、早急に緊急地震情報という人類が初めて手にするツールを使ったシステムの実用化をはかるべく、関係者・機関が心を力合わせて行きたい。

以上

# 2004 PVP Conference・13WCEE参加報告

古屋 治

●東京都立工業高等専門学校

## 1. はじめに

ここでは、平成16年7月25日から29日まで日米の機械学会が共催した2004 ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Division Conference (PVP Conference)、および平成16年8月1日から6日まで開催された第13回世界地震工学会議 (WCEE) の参加報告を行います。

## 2. PVP Conference

PVP Conferenceは、7月から8月初旬にかけて米国機械学会が毎年開催している国際会議で、数年に一度日本機械学会が共催する形式をとっています。今年度は、サンディエゴのHyatt Regency La Jolla (写真1)で開催されました。



写真1 2004 PVP Conference 会場

### 2.1 会議概要

本会議は、1966年に米国機械学会に設立されたPVP Divisionが毎年開催している国際会議であり、毎年100を超えるセッションと500編以上の論文からなる大規模な学会の一つです。今年度は、日本機械学会が共催したこともあり、多くの日本人研究者、技術者が参加しました。また、今年度は、広島大学の澤俊行先生がConference Co-Chairを、東京電機大学の藤田聡先生がTechnical Program Co-Chairをなされ、会議開催・運営の重責を担われました(写真2)。なお、本年度は、35カ国からの参加者があり、開催期間を通して200セッション、700編の論文報告と盛況な会議となりました。

### 2.2 会議の内容

本会議は、次の八つのトピックスから構成されていま



写真2 日本人開催運営委員(左端:澤先生、右端:藤田先生)

す。(1) Codes & Standards、(2) Computer Technology、(3) Design & Analysis、(4) Fluid-Structure Interaction、(5) High Pressure Technology、(6) Materials & Fabrication、(7) Operations, Applications, & Components、(8) Seismic Engineering。開催期間中は、16会場に分かれ活発なTechnical Sessionが行われました。会議初日のPlenary Sessionでは、昨年度まで日本人とし初めてSeismic Engineering Technical CommitteeのCommittee Chairを2年間なされ今年度ASME Fellowになられた東京都立大学の鈴木浩平先生を含む3名の方の講演が行われました(写真3)。



写真3 Plenary Session講演を行う都立大鈴木先生

また、大阪府立大学の伊藤智博先生等がOutstanding Technical Paper Awardsを、Student Paper Competitionでは、山梨大学の前崎渉氏、横浜国立大学の三上晃氏、東京電機大学の皆川佳祐氏の3名が受賞しました(写真4)。



写真4 Student Paper Competition日本人学生受賞者  
(左から：三上氏、前橋氏、皆川氏)

### 3. 世界地震工学会議

世界地震工学会議は、4年に一度開催されている国際会議で、地震に関連する内容を総合的に扱う非常に多岐にわたる内容を含む大規模な会議です。今回は、前述の期間でカナダのVancouver Convention & Exhibition Centreで開催されました(写真5)。



写真5 13WCEE会場

#### 3.1 会議概要

本会議は、第1回を1956年にバークレーで開催してから、日本、ニュージーランド、チリ、イタリア、インド、トルコ、アメリカ、日本、スペイン、メキシコ、ニュージーランドと開催され、バンクーバーで13回目を迎えます。ここ数回の会議は、2000人以上の報告者が集まる非常に大規模な国際会議となっております。今年も、防災科学技術研究所の片山先生、千葉大学の小谷先生を含むKeynote speaker、そして、Oral session、Poster sessionで2440人の報告者が集まる会議となりました。

#### 3.2 会議の内容

会議開催中、午前中の第1セッションは、11人のKeynote speakerの方々のKeynote presentationが1階大ホールで開催され、その後は、8~9室に分かれOral sessionが行われました。Oral sessionは、10個のMajor Topic、そして、12個のSpecial Themeの内容を

含むもので、各セッションとも、一人15分の講演が6つ行われる形式です。

さらに、Keynote presentationが行われていた会場の隣の二つの会場を連結して、Poster sessionが開催されました。Poster sessionも、Oral session同様全22トピックスの内容に分かれ、毎日332から343の発表が行われました。当該会場は、コーヒープレイクと昼食会場となっていたことから、多くの方々が集まり、熱心な議論が各所で行われていました(写真6、7)。また、同会場では、53の展示ブースが出展され、こちらも連日盛況となっていました。



写真6 Poster Session会場

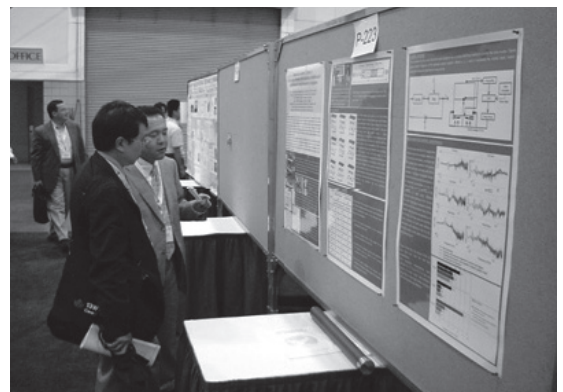


写真7 Poster Sessionの様子

### 4. おわりに

ここでは、2004 ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Division Conference (PVP Conference)、および第13回世界地震工学会議(WCEE)の参加報告を行いました。いずれも、耐震工学や地震工学に関連する多くの研究者、技術者が参加する大きな国際会議です。次回は、PVPがコロラド州デンバーにて2005年7月17日~21日の日程で、世界地震工学会議は、2008年に北京で開催される予定です。なお、地震工学会議では、次期IAEE会長に防災科学技術研究所理事長の片山先生が選出されました。



# 記念シンポジウム「日本の強震観測50年」

## —歴史と展望— 報告

芝 良昭

●(財)電力中央研究所

平成16年11月9日、10日の二日間にわたり、防災科学技術研究所・和達記念ホールにおいて、“記念シンポジウム「日本の強震観測50年」—歴史と展望—”と題したシンポジウムが、防災科学技術研究所強震観測事業推進連絡会議の主催、東大地震研究所・日本地震工学会の共催により開催された。このシンポジウムは、国産強震計(SMAC型)の開発と観測開始から半世紀が経過したことを機に、観測の歴史を振り返るとともに、1995年兵庫県南部地震以降の強震観測体制を通観し、今後の観測体制のあり方、データの流通・共有の方向性や活用法を探ることを目的としたものである。「強震動データの共有化及び活用法に関する研究委員会」は、強震観測事業推進連絡会議幹事会とともにシンポジウム実行委員会を構成し、プログラムの作成、講演者の人選、当日の司会や運営に携わるなど、実質的な主催を担った。シンポジウムでは合計で195名の参加者を得ることができ、活発な議論が行われた。なお、シンポジウムの開催直前に2004年新潟県中越地震が発生したため、同地震の被害調査報告や、強震観測記録、暫定解析等に関する話題提供が急遽プログラムに挿入されることとなった。

初日の午前には、まず開催にあたり来賓として文部科学省研究開発局の西尾地震・防災研究課長からの挨拶があり、続いて主催者側から片山防災科学技術研究所理事長、太田強震観測事業推進連絡会議会長からの挨拶、ならびに工藤シンポジウム実行委員長からの主旨説明があった。その後、強震観測事業推進連絡会議の元幹事長である田中貞二先生の招待講演があり、1947年福井地震での強震記録の不在がSMAC開発の契機の一つとなったことや、米国の模倣ではなく、日本の国情に合った強震計開発を目指したことなど、開発当時のエピソードを交えつつ、その後のSMAC設置台数の変遷や、K-NET全国配置の基本思想にもなった強震計全国配置基本計画がすでに70年代には提示されていたことなどが示された。

シンポジウム第1部では、前半のセッション1で、兵庫県南部地震以前から強震観測網を設置・運営していた様々な研究機関による、観測の歴史と現況が紹介された。発表されたのは、主に強震観測事業推進連絡会

議に所属している機関であり、国や自治体の研究機関、または独立行政法人(大学を含む)による発表が8件、電力・鉄道・ガス・通信などライフラインに関わる民間企業の関連機関による発表が4件であった。いずれの機関も、それぞれの目的に応じた独自性のある観測網を構築し、鉄道総研のユレダス、東京ガスのSIGNAL、SUPREMEなど防災への適用も進みつつあることが明らかになった。また、多くの機関で強震データの公開へ向けた動きが加速していることも感じられた。なお、セッション1の最後には、強震観測事業推進連絡会議の事務局から、同会議が強震観測データ公開のためのクリアリングハウス(情報交換所)的な役割を果たすべく活動していることが紹介された。

後半のセッション2では、兵庫県南部地震以降、全国一律に配置された観測網として気象庁の震度観測網と防災科技研のK-NET、KiK-netの紹介、ならびに3件の地方自治体(横浜市、宮城県、広島県)による強震・震度観測網の利用事例が示された。質疑においては、市町村合併による震度計観測点数の減少を食い止めて欲しいといった要望や、震度計の設置地点における地震動がその地域の震度を代表してしまう問題点などが指摘された。なお、後者の問題について、現在気象庁では設置環境や観測実績の調査が行われつつあるということであった。また、自治体の震度計を波形が記録・蓄積できる仕様に統一してほしいというコメントがなされた。この他に、同セッションでは観測記録のデータベース作成(SK-net、日本大ダム会議、震災予防協会)、鉛直アレイ観測(電力共通研究、KASSEM)、協議会形式による観測網の構築(関西地震観測研究協議会)などのトピックが紹介された。なお、これら第1部の講演内容については発表時間が短かった関係もあり、別途ポスターを会場の廊下に展示し、内容の補足が行われた。

第2部では、海外からの招待講演として、カリフォルニア工科大のIwan先生と台湾国立中央大学のWen先生により、それぞれ米国と台湾における強震観測網の現況に関する講演が行われた。Iwan先生の講演では、黎明期の強震計による観測で1933年Long Beach地震の記録を皮切りに、El Centro、Taftなどの現在でも



重要な強震記録が得られたこと、これら初期の観測記録から設計用応答スペクトルによる耐震設計の概念が確立されたこと、強震記録により永久変位の発生やパルス波の卓越など新しい現象が次々に明らかになったことなどが示された。また、現状の米国における複数のデータ流通コンソーシアムやリアルタイム地震モニタリングシステムが紹介されるとともに、強震観測の進化は、科学的・社会的要請、周到な計画、被害地震の発生、テクノロジーの進歩によりなされるものであり、ステークホルダーの意思決定に必要な情報を的確かつ迅速に与えることが将来の強震観測にとって重要であるという見解が示された。質疑においては加速度以外の被害指標の重要性や、建物の観測記録が入手困難であるという課題が指摘された。

Wen先生の講演では、台湾に展開された様々な強震観測アレイ（中央山系のCMSMA、円形稠密アレイと広域アレイのSMART-1、2、鉛直アレイと構造物の観測を含むLSST、LSST2、リアルタイムモニタリングの機能を持ったTSMIPなど）について紹介されるとともに、1999年台湾集集地震では発生後2分以内に震央位置、マグニチュードなどの情報が得られたことや、その後の強震記録の解析により断層近傍における永久変位の観測や、台中・台北の盆地で地震波の増幅が見られたことなどが示された。

なお、初日の最後には筑波大の境氏より、2004年新潟県中越地震の震度計測点周辺における被害調査の報告がなされた。

2日目午前の第3部では、ユーザ側の立場から、土木・建築・地盤工学分野における強震データ利用の現状についての講演とともに、近代以前の強震・震度データの活用、震源解析における強震記録の利用、強震計のメカニズムに関する話題提供があった。

午前中の最後には再び新潟県中越地震関連の話題提供が、気象庁の石垣氏、防災科技研の青井氏、港湾空港研の野津氏によりそれぞれ行われた。

2日目午後からは東工大・大町達夫氏と地域地盤環境研究所・香川敬生氏の司会によるパネル討論が行われた。パネリストは防災科技研・藤原広行氏、東大地震研・壁谷澤寿海氏、纈纈一起氏、京大防災研・岩田知孝氏、澤田純男氏、東工大・翠川三郎氏、名古屋大・福和伸夫氏、気象庁・西出則武氏、神戸大・河村廣氏の9名である。パネリストの話題提供は前半と後半に分けられ、それぞれについて討論を行うという形式がとられた。ここでは紙数の都合上、主に討論の内容について紹介する。前半の討論では主として強震観測の目的、建物観測の充実策、観測の質向上といった話

題が議論された。福和氏（名古屋大）からは、K-NETやKiK-netの財源が不安定であるという問題に対して、機器の設置やメンテナンスを地方の大学等に任せることにより費用を減額し、同時に観測のノウハウを移植できるのではないかと、との指摘があった。これに対し藤原氏（防災科技研）から、今やK-NET、KiK-netは基礎研究目的から国や自治体の危機管理用の設備として位置づけられつつあり、その責任上、品質や確実性を維持するために中央集中でコストをかけることが必要であるとの意見があった。一方、建物強震観測の推進については、補強工事と強震計の設置を一体化するようなシステム（東大地震研：壁谷澤氏）や最小限の建物については国が責任を持って強震計を設置し、データを公開すべき（弘前大：片岡氏）といった意見が出た。さらに民間の建物について、性能設計の検証や地震保険料率の面から強震計設置のインセンティブを引き出せないかという武村氏（鹿島）の提案に対し、壁谷澤氏からは性能設計から性能保証に踏み出す必要性が指摘された。また、この他にも安価な強震計の開発や建物オーナーの危機管理意識の醸成、アクティブ制震への適用をはじめとした付加価値の創出などの意見が出た。また、観測の質向上の話題として、常時接続を前提とした強震モニタリング、海溝型地震の解析に必要な海底地震計の開発と設置（東大地震研：纈纈氏）などが挙げられた。

後半の討議では、耐震設計への利用促進や、自由競争を確保するためにも、データ公開における商用目的への制限を撤廃してほしいという意見が武村氏よりあった。これに対し、データ公開が主目的でない自治体等の観測に対しては、時として非営利の利用がデータ提供の条件になったが現状は営利も含めて公開可の方向になりつつあるとの指摘が鷹野氏（東大地震研）よりあった。さらに強震計やネットワークの標準化の重要性（鷹野氏）や、リカレント建築構造の提案（神戸大：河村氏）などが話題となった。岩田氏（京大防災研）からは、理想的には工学的に重要な短周期帯の波動伝播が把握できる高密度観測網が、都市部の地表と建物において同時に展開されることが望ましい、との意見があった。

最後にシンポジウムのResolution案が東大地震研の工藤氏により紹介され、若干の修正意見を容れた後、報告書に収録することが承認された。報告書は防災科学技術研究所研究資料として今年度中に発刊される予定である。

シンポジウムプログラム (講演者敬称略)

11月9日 (火)

司会：山水史生 (防災科学技術研究所)

来賓挨拶

文部科学省研究開発局地震・防災研究課長 西尾典真

主催者挨拶

防災科学技術研究所理事長 片山恒雄

強震観測事業推進連絡会議会長 太田 裕

シンポジウム実行委員長 工藤一嘉

招待講演

わが国の強震観測事始を振り返って 田中貞二

第1部 各機関、ネットワークにおける強震・震度観測の歴史と現況

セッション1

司会：鹿嶋俊英 (建築研究所)・安中 正 (東電設計)

・K-NET完成までの強震観測事業について  
防災科学技術研究所 大谷圭一

・東京大学地震研究所における強震観測の現状  
東京大学地震研究所 坂上 実

・港湾地域強震観測の概要  
港湾空港技術研究所 野津 厚

・建築研究所の強震観測  
建築研究所 鹿嶋俊英

・国総研における強震観測  
国土交通省国土技術政策総合研究所 上原浩明

・農業用ダムにおける地震観測  
農業工学研究所 古谷 保

・北海道開発局の強震観測  
北海道開発土木研究所 石川博之

・電力中央研究所における強震観測  
電力中央研究所 芝 良昭

・東京都における橋梁・河川構造物を対象とした強震観測  
東京都土木技術研究所 岡田佳久

・鉄道における地震警報システムと強震観測  
鉄道総合技術研究所 芦谷公稔

・N T T通信用建物等の強震観測  
N T T建築総合研究所 赤木久真

・都市ガス供給網における超高密度地震防災システム  
東京ガス 中山 渉

・強震観測事業推進連絡会議の現況  
防災科学技術研究所 山水史生

セッション2

司会：芝良昭 (電力中央研究所)・境有紀 (筑波大学)

・防災科研による強震観測網—K-NET・KiK-net—  
防災科学技術研究所 青井 真

・全国の震度観測網  
気象庁 石垣祐三

・横浜市における高密度強震計の活用について  
—高密度強震計システムから地震マップの作成へ—

横浜市 島 悟司

・広島県における地震観測について  
広島県 佐渡 忠典

・宮城県北部連続地震と震度情報ネットワークシステムについて  
宮城県 千葉宇京

・関西地震観測研究協議会による強震観測  
地域地盤環境研究所 香川敬生

・首都圏強震動総合ネットワークSK-net  
東京大学地震研究所 鷹野 澄

・既設ダムにおける地震観測とその活用  
電源開発 有賀義明

・岩盤における鉛直アレー強震観測  
鹿島建設 高橋克也・東京電力 野田静男

・熊谷組地震観測網KASSEMの20年  
熊谷組 磯貝光章

・震災予防協会強震動アレー観測記録データベース  
岐阜大学 杉戸真太

第2部 招待講演

司会：瀬尾和大 (東京工業大学)

・Accomplishments and Opportunities in Strong-Motion Observation  
カリフォルニア工科大学 (米国) Iwan, W. D.

・Strong Motion Observations in Taiwan and Ground Motion Characteristics of the 1999 Chi-Chi Taiwan Earthquake  
国立中央大学 (台湾) Wen, Kuo-Liang (温 國梁)

追加講演

・2004年新潟県中越地震で発生した地震動と観測点周辺の被害

筑波大学 境 有紀

11月10日(水)

第3部 日本の大地震と記録の使われ方

司会：野津 厚（港湾空港技術研究所）・大野 晋（東北大学）

- ・近代的強震観測開始以前からある強震データとその活用—変位型強震計記録,震度観測値,被害データ—  
鹿島建設 武村雅之
- ・強震記録から得られる震源過程  
京都大学原子炉実験所 釜江克宏
- ・建築分野における強震観測記録の利用と発展  
慶應義塾大学 北川良和
- ・土木構造分野における強震記録の利用と発展  
東京工業大学 川島一彦
- ・日本の大地震と記録の使われ方—地盤工学分野での利用と発展—  
京都大学防災研究所 井合 進
- ・強震観測用地震計の現状  
横浜市立大学 木下繁夫

追加セッション

- ・新潟県中越地震に関する話題提供と質疑  
話題提供者： 気象庁 石垣祐三  
防災科学技術研究所 青井 真  
港湾空港技術研究所 野津 厚

第4部 パネル討論—現状の分析と今後の強震観測のあるべき姿に向かって—

司会：大町達夫（東京工業大学）・香川敬生（地域地盤環境研究所）

話題提供とディスカッション

- ・強震観測の現状と課題  
防災科学技術研究所 藤原広行
- ・高密度共同強震観測  
京都大学防災研究所 岩田知孝
- ・建築構造物における地震観測の実用化  
東京大学地震研究所 壁谷澤寿海
- ・地震防災のための地域の地震観測  
京都大学防災研究所 澤田純男
- ・強震データ流通の現状と将来  
東京工業大学 翠川三郎
- ・遠方長周期地震動問題と多国間強震観測  
東京大学地震研究所 額額一起
- ・地域における多機関の強震観測網のネットワーク化と地域防災への活用  
名古屋大学 福和伸夫

・震度計の今後と緊急地震速報

気象庁 西出則武

・ユビキタス強震観測

神戸大学 河村 廣

強震観測の現状と将来への提言

—Symposium Resolutionとして—

司会：工藤一嘉（東京大学地震研究所）・香川敬生（地域地盤環境研究所）

閉会の挨拶

強震観測事業推進連絡会議会長

太田 裕



写真1 太田会長による挨拶

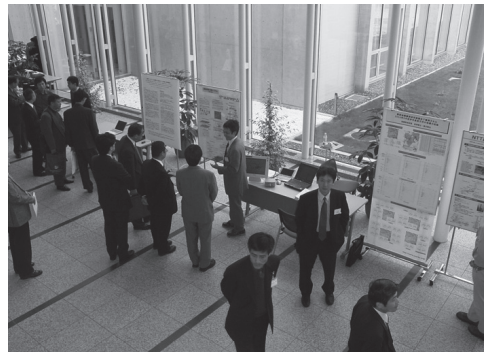


写真2 ポスターセッション



写真3 休憩中のディスカッション

## 年間カレンダー

### 日本地震工学会 主催・共催・関連団体行事予定一覧

2004年12月現在

2005年 2月3日	震災予防協会第23回講演会 「富士山の生い立ちと火山防災」	パシフィコ横浜 アネックスホール
2月4日	震災予防協会第23回講演会 「地震防災これからの10年－ユビキタス、地震予知、そして・・・」	パシフィコ横浜 アネックスホール
3月7日～8日	第2回都市地震工学に関する国際シンポジウム	東京工業大学 大岡山キャンパス
3月11日～13日	The 2005 Annual Conference of the New Zealand Society for Earthquake Engineering	ニュージーランド
5月30日～6月1日	Fifth International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures	ギリシャ
6月13日～16日	第9回世界免震・制振セミナー	ポートピアホテル (神戸市)
7月17日～21日	2005 ASME(American Society of Mechanical Engineers) Pressure Vessels and Piping Division Conference	アメリカ
7月19日～21日	第1回構造実験工学の高度化に関する国際会議 (AESE 2005)	名古屋
8月7日～12日	18th International Conference on STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY	北京
9月4日～7日	EURODYN 2005 (Sixth European Conference on Structural Dynamics)	パリ
9月10日	地震地盤工学に関する最近の発展に関する国際会議	大阪市立大学 文化交流センター
9月14日～16日	IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering) Symposium on Structures and Extreme Events - 250 years later, in memory of the 1755 Lisbon earthquake -	リスボン
10月26日～28日	EVACES2005 (Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures)	フランス
2006年 3月10日～11日	ACEE2006 (Asia Conference on Earthquake Engineering)	フィリピン
2006年 8月14日～17日	STESSA2006 (Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas)	東京





## 編集後記：

今年で阪神・淡路大震災から10年を迎えました。学協会では、震災10年の節目として、地震防災対策に関するイベントを開催しており、防災対策、耐震対策の重要性を再認識させてくれます。平成16年12月2日に高圧ガス保安協会が主催する自主保安セミナー「兵庫県南部地震を経験して10年がたち、地震防災対策の発展をかえりみて」に参加させていただきました。当セミナーは東京と大阪の会場で開催され、東京では約300名の参加者があり、非常に内容の濃いセミナーでした。来年（2006年）11月には4年に一度開催されます第12回日本地震工学シンポジウムが予定されております。たくさんの方々にご参加いただけることを願っております。防災、耐震の研究分野の更なる発展を祈念しております。

創刊号は主として機械系の耐震・免震で纏められており、第2号以降は他のトピックスで纏められることとなります。第2号以降もご期待ください。

埼玉大学 渡邊鉄也

## 編集委員

委員長	藤田 聡	東京電機大学
委員	藤本 滋	湘南工科大学
委員	渡邊 鉄也	埼玉大学
委員	五十田 博	信州大学
委員	山田 哲	東京工業大学
委員	大保 直人	鹿島建設(株)
委員	中瀬 仁	東電設計(株)

## 日本地震工学会誌

2005年1月31日発行

編集・発行 日本地震工学会  
〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館  
TEL 03-5730-2831 FAX 03-5730-2830