

公開用

独立行政法人防災科学技術研究所
兵庫耐震工学研究センター見学
実物大橋脚の地震動による破壊実験実見

畑村創造工学研究所
畑村洋太郎

設備見学：2007年12月10日（月）

破壊実験実見：2007年12月13日（木）

記 録：2007年12月19日（水）工学院大学創造工学 I にて口述

見学場所：独立行政法人防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター

1. 加振装置の見学(2007年12月10日(月))

(a) 兵庫耐震工学研究センター概要

兵庫耐震工学研究センターは東海道新幹線新神戸駅から約7キロのトンネルを車で走り、約30分掛かる三木市の山の中にある(図1).

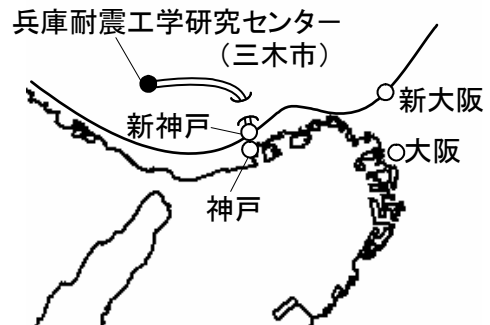


図1 兵庫耐震工学研究センターの位置

(b) 震動台上に組み上げられた実大橋脚実験体

写真1は1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震で壊れたJR鷹取駅の一本足の橋脚を模擬して、1970年代の建築基準法に準拠して作った実大橋脚を、E-ディフェンスと称する実規模構造物に三次元の揺れを与えて震動破壊させる世界最大の震動台の上に載せた状況である。中央にある柱が橋脚であり、橋脚の円柱部分は直径1.8m、高さが6mである。その柱の上に高さ1.5mの座があり、その上に橋桁が載っている。赤い部分が鉄板でできた橋桁、灰色のものが重りの鉄板で約300tonある。緑色の部分は全体のバランスを取るためのつかえ棒である。青い部分は全体が壊れてしまわないように制御するリミッターである。



写真1 震動台上に組上げられた実大橋脚実験体

E-ディフェンスの装置部分の建設および

設計に当たったのは主に三菱重工である。装置及び建物を含む施設全体の建設費は約 450 億円で、実験の費用は約 2 億円だそうだ。

(c) 加振機の仕組み

写真 2 は加振機の動力源の LNG 使用ガスエンジンである。大阪ガスが供給するガスを燃料とするディーゼルエンジンの大きなもので、これで斜板形レシプロポンプを駆動している。電気モータは容量が大きくなりすぎて作れないのでガスエンジンを使用している。油の吐出能力は約 30,000L/min で、使用圧力 20.6Mpa だそうだ。

写真 3 は油圧シリンダに一気に多量の油を送るためのアキュムレータ（蓄圧機、油の圧力エネルギーを窒素ガスの圧力エネルギーに変換して蓄えておくもの）である。ここに示した写真はメインの油圧系統を制御するサブの油圧系統用のものである。メインの油圧系統でもこれに似たアキュムレータが使用されている。油圧シリンダの大きさを見るとアキュムレータで動かす必要性がよくわかる。

写真 4 はアメリカの MTS 社製の大型パイロット式サーボ弁である。この装置の仕組みは、ノズルフラッパーで電気信号の変化を油の流量変化に変え、そこから出てきた圧油がメインバルブの左右に来てスプールを動かし、中を通る油が穴から噴き出す。建設機械であればコントロールバルブが一番大事であるが、この加振装置では装置を動かすためのこのサーボバルブが一番大事な箇所である。

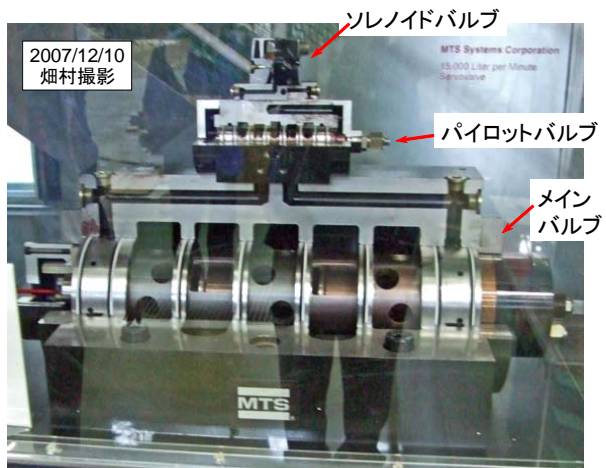
写真 5 の青い筒は水平方向加振機の水平動油圧シリンダである。実験棟の震動台の下は 20m くらいの深さの地下室になっており、X 方向の水平加振機が 5 本、Y 方向の水平加振機が 5 本、Z 方向の垂直加振機が 14 本設



2007/12/10 畑村撮影
写真2 動力源のLNG使用のガスエンジン(青いカバーの中にある)
(これで直接に斜板形レシプロポンプを駆動している)



2007/12/10 畑村撮影
写真3 制御用油圧系統に用いられているアキュムレータ(蓄圧器)
(N₂ガスポンプ(灰色)と油タンク(橙色))



2007/12/10 畑村撮影
写真4 パイロット式サーボ弁(アメリカMTS社製)

置されていた。油圧シリンダは外径 1.46m 内径 0.83m, ストローク±1.0m, 圧力 20.6Mpa で, 通路から油圧シリンダまでの高さは約 1.8m である。このような油圧シリンダを加工することができるのは日本では何カ所かしかないそうである。この油圧シリンダの一部は三菱重工業(株)三原工場で作られ, 総合的な製作は三菱重工下関造船所で行われた。

写真 6 は動く震動台と固定されている水平動油圧シリンダを繋ぐための三次元継ぎ手と称するコネクティングロッドである。直径は 1m ほどあるようだった。震動台は水平方向に±1m, 上下方向に±50cm ずつ動く。油圧シリンダの先と震動台とを繋ぐところには, 干渉防止のためコネクティングロッドが必要で, 球面継ぎ手が入っており油潤滑されている。

写真 7 は上から見た上下動の駆動部である。

(d) 実大供試体を運ぶ多輪トレーラー

写真 8 の手前にあるのは屋外で作った供試体を屋内に運ぶためのトレーラーである。その奥に見えるのが学校の建物を実物大で作った供試体である。これらはすでに試験が済んで屋外に置いてある。このトレーラーは中立位置高さ 1.65m で±0.3m 上下することができ, 建物の下に入り込み供試体を乗せて運ぶのである。トレーラーの車輪を見ると種子島の射場にあるロケットを運ぶものとはほぼ似たような構造であるが, こちらの方が乗せて運ぶものが重いので遙かに規模が大きい。

2. 実大橋脚加振による破壊実験の実見

(a) 実物大橋脚の地震動による破壊実験

図 2 に実大橋脚破壊実験装置の概略を示す



写真5 水平動油圧シリンダ(X,Y方向にそれぞれ5本, Z方向に14本)
(外径1.46m, 内径0.83m, 圧力20.6Mpa, ストローク±1m)



写真6 水平動油圧シリンダと震動台を繋ぐコネクティングロッド
(動く震動台と固定のシリンダとの干渉防止のため)

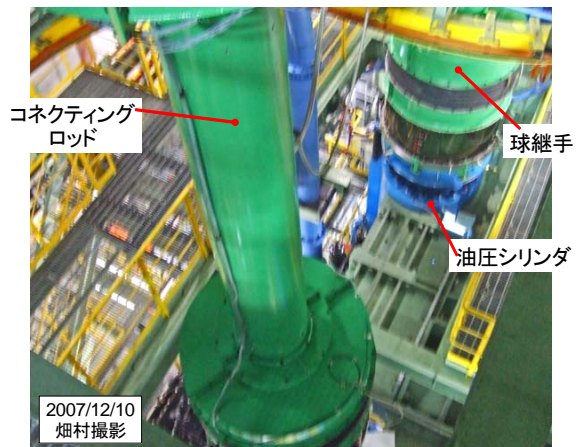


写真7 上から見た上下動駆動部



写真8 実大供試体を運ぶ多輪トレーラー

す。斜線部分が加振機の土台と反力台である。加振機の上には実物大の建物など、1200ton のものを載せることができる。x, y 方向の両振幅がそれぞれ 2m, 最大加速度は約 1G (1200ton 搭載の場合, 0.9G) である。上下動は両振幅が 1m で, 上下の最大加速度は約 2G(1200ton 搭載の場合, 1.5G) である。“セーノ・ドスン” とやったときに自重の 2 倍の圧縮応力がかかるというすごい機械である。

震動台は 20m×15m の長方形である。実験の際にはこの台が約 0.5m 上がり加振を開始する。

図中, 土台の上にあるものは油圧シリンダである。なお, 供試体と加振機が直結しているように図には描いてあるが, 実際はコネクティングロッドがありボールジョイントで繋がっている。

写真 9 は実験のセットアップが全部済んだ実大橋脚加振実験の全景である。この建物の床から天井までの高さは 42.8m である。

写真 10 は実大橋脚加振実験装置を近くでみたものである。写真 11 は実大橋脚加振実験場での筆者で, 筆者の隣りにあるのはこの実験を撮影するために持参したハイビジョンのカメラである。

(b) 加振実験の内容と結果

図 3 に加振実験の内容と結果を示す。震動台の橋軸の方向に 860gal, 橋軸直角方向に 605gal, 鉛直方向に 282gal という阪神の震災のときに JR 鷹取駅で実測されたものを元に加振している。橋脚の天端(てんば)に生じた加速度が速報値で橋軸方向に 1170gal, 橋軸の直角方向に 800gal で, 最終的な変形量は橋軸方向に 172mm, 橋軸の直角方向に 135mm, 最大の変形は斜めのところで 189mm であった。これは 2.5%のドリフト

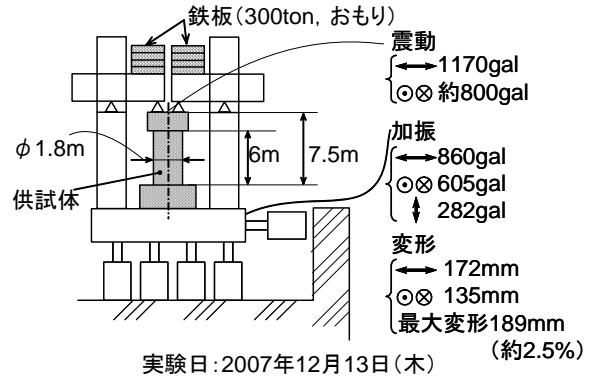


図2 実物大橋脚の地震動による破壊実験



写真9 実大橋脚加振実験の全景



| | |
|--------------|-------------|
| 円柱部 : 直径1.8m | 橋脚試験体: 310t |
| 高さ6m | 上部構造 : 300t |
| 橋脚高さ: 7.5m | 全重量 : 1000t |

写真10 震動台上に組上げられた実大橋脚供試体



写真11 実大橋脚加振実験場での筆者

である。今回の実験では橋脚は曲げで壊れたが、来年は鉛直方向のせん断破壊の実物実験をやる予定だそうである。

写真 12 により、加振後、橋脚の左手前の根元部分が壊れて左斜め前に傾いていることがわかる。ここ以外には目に見える壊れ方をしているところはなかった。実際に見ているとゆっくりと壊れていく。バキッと折れるのかと思ったがグズグズと崩れていく感じであった。

報道陣は橋脚の反対側で撮影していたが、そちら側はほとんど崩れなかったので、報道陣のカメラは何も撮れなかった。こちら側から撮っていたのは筆者のカメラとセンターのカメラだけであった。

(c) 実物台の学校建物の補強の効果

写真 13 は実物大の2つの校舎を模した建物で、2つの建物の損傷状況を比較すると補強の効果がわかる。写真左側の建物は補強が全くされておらず、一階部分の柱に致命的な損傷が見られる。

一方、写真 13 の右の建物はVの字型の補強がしてある。同じ揺れを与えた場合補強された方はほとんど損傷しない結果との事であった。写真 14 は、建物の固有振動数の正弦波で加振して共振させて無理やり破壊させたものである。この写真を見ると、2階の補強は壊れてないが、力が集中する1階の補強は座屈していることが分かる。また、柱と壁との接合部分は壊れているが、柱は致命的には壊れていない。建物の真ん中側面だけに補強をするのか疑問に思っで尋ねてみると、理由は、建物の角部を補強すると角部の垂直の軸荷重が大きくなり過ぎて、その部分の基礎だけが壊れてしまうからだそうである。地震で建物が全く壊れないようにするのはなく、多少の損傷を受けても内部の人に致命

(図3)加振実験の内容と結果

- ・加振した入力モデル: 1995年兵庫県南部地震でJR鷹取駅(神戸市)で実測された地震動記録をもとにして加振
- ・震動台の入力振動
 - 橋軸方向: 860gal
 - 橋軸直角方向: 605gal
 - 鉛直方向: 282gal
- ・橋脚天端に生じた加速度
 - 橋軸方向: 1170gal
 - 橋軸直角方向: 約800gal
- ・橋脚天端での変形
 - 橋軸方向: 172mm
 - 橋軸直角方向: 135mm
 - 最大変形: 189mm(約2.5%のドリフト)
- ・結果: 橋脚基部に曲げ破壊が生じた。

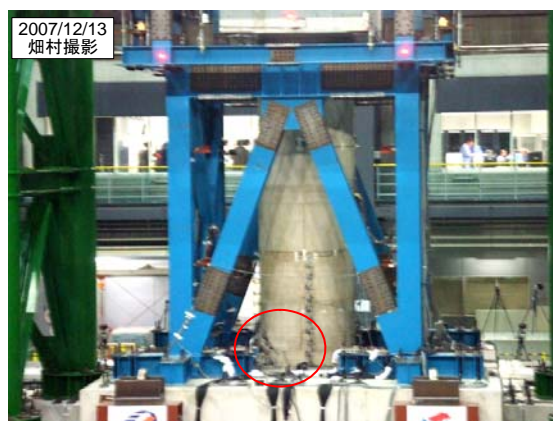


写真12 加振後の橋脚部(左手前の根元部分が壊れているのが見える)



(補強なしは1階の柱が致命的損傷を受けるが、補強ありは致命的損傷には至らない)

写真13 実物大の学校建物の補強の効果

的な損傷を与えることがないようにと考
えて補強すると、この場所に補強するの
が良いのだそうで、これは建築屋の常
識だそうだ。補強の形も X 型や逆 V
の字型にしたらどうなるのか尋ねた
ところ、適度に座屈が起ってエネルギー
を吸収するためにはこの形がいいと
のことであった。

(d) 装置の見学と実大実験の実見で
思ったこと (図 4)

実大実験は非常に費用がかかり、周
圍の理解を得ることが非常に難しい。
この橋脚の破壊実験でもおよそ 2 億
円がかかっている。

では、このような破壊実験はなぜ
わざわざやるのだろうか。

図 5 に示すように、通常の品質保証
のための確認実験では、破壊する所
まではやらない。ここまでは大丈夫
と保証しようと思うところまでを
やるだけである。たとえば、「4」ま
で保証しようと思うものについては
「4」程度のところの確認実験を行
う。ところが、たとえば「4」まで
保証するものを破壊実験まで行くと
「10」までもつとすると、この 4
から 10 までの間が余裕分になるの
である。大事なのは、破壊実験によ
って確認されたこの余裕分が安心を
与えるということである。

(e) 安全率 (裕度)

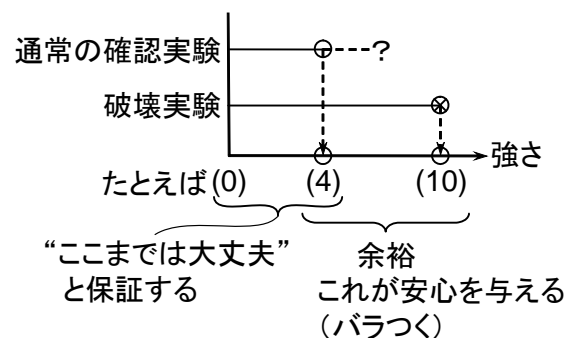
今から 45 年程前に東大機械科に進
級した時 (1962 年) に、材料力学で
始めて“安全率”ということばを習
った (図 6)。理由は分からなくても、
計算した値の 3 倍の応力までもつよ
うに設計することが、機械設計では
常識だと教わった。理屈もなしに何
故そのように考えなければならないの
かと胡散臭い変なものだとずっと思
っていた。ところが、50 年近く、色
々な機械を作ったり事故を見たりと
いう経験を積んでみると、筆者は人



写真 14 地震動の力で座屈した筋交い
(筋交いが突っ張るので建物が致命的な破壊に至らない)

(図 4) 装置の見学と実大実験の実見で 思ったこと

- ☆ 実大実験の大切さ
 - ・ それまで考えていなかったことが起こる。
 - ・ 新しいことを知る。
 - ・ 逆演算の難しさを知り、新しい考え方を学ぶ。
- ☆ 実大破壊実験の意味
 - ・ “ここまで大丈夫”を保証せよ →そこまでしか調べない①
 - ・ どこで壊れるか → 実物ははるかに大きな負荷に耐え得る②
 - ・ ①と②の差(余裕)が安全・安心を担保する
→これが世の中では意識されず、実行されない
→これを国民は求めている
- ☆ 実大実験の大変さ
 - ・ 費用が掛かる
 - ・ 周りの理解が得にくい
 - ・ 真の理解はこれから始まる



* 破壊実験は通常の保証用実験では行わない

図 5 破壊実験の意味

(図 6) 安全率とは？

- ・ 安全率のうさんくささ
それでも安全率をかける
- ・ 安全率は人間の知恵の固まり
自分の気づかぬ危険をカバーしてくれている
マニュアルと同じ

が想定できるものは限られていて、想定できないようなことが起こり得るということがわかってくると共に、その分安全率をかけて設計することは非常に大事であると思うようになった。

今では私は安全率は人間の知恵の塊で、過去に起こったすべてのこと、さらに自分達が想定できないかもしれない危険をカバーしてくれている大事な考えであるとさえ思うようになっていく。色々な経験を経て、人類は謙虚になり、安全率というものを発明したのではないだろうか。

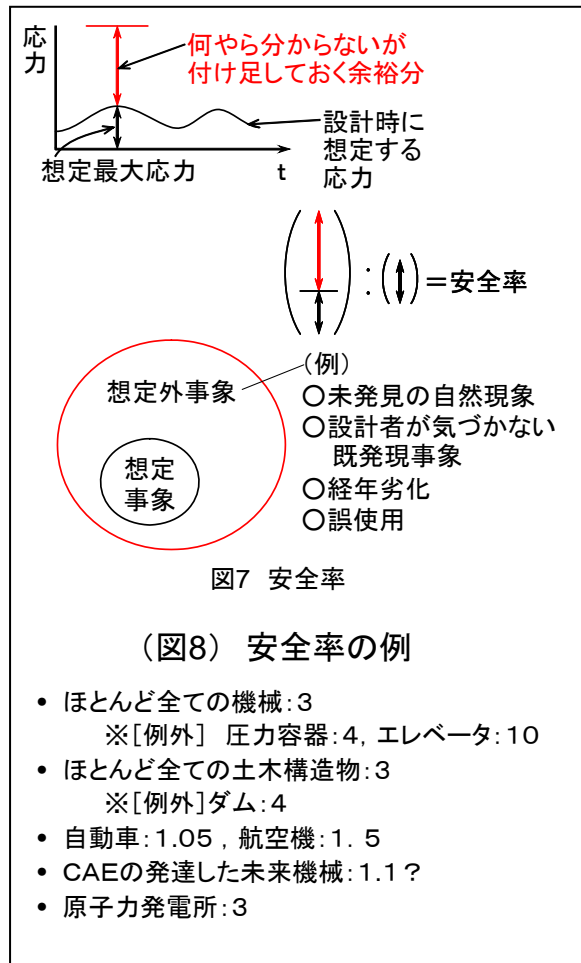
○ 安全率

安全率とはどのようなものかを示すのが図7である。設計時に想定する想定最大応力を黒で、なにやら分からないけど付け足しておく余裕の応力分を赤で示した。黒+赤を黒で割ったもの、これが安全率である。力で表してもよいし、応力で表してもよいが、物が壊れるとか壊れないとか言うときには、材料の応力で考えるから、応力で表した方が分かりやすいかもしれない。

別の図(図7下)で示すと、想定される事象の外側に想定外事象が存在すると考えると、何が起こるかは分からないがなんだか不安に思うようなとき、この想定外事象があっても問題ないようにしておくために安全率をかけておくという考えが出てくる。想定外事象のさらに外側にあるようなことが起こったら、もうお手上げで、壊れても仕方がない。

想定外事象とはどのようなものだろうか。

- ・未発現の自然現象： 柏崎刈羽原発ではあれほど大きなほぼ直下型の地震が起こることは、想定外事象だった。
- ・設計者が気付かない既にどこかで発生した事象： 自分の所では起こっていない



が他所では起こった事象、もしくは類似の事象で、設計者にとっては全く未知の考え及ばない事象である。

- ・経年劣化・経年変化： 設計したときはこの程度で十分と思っていたが、時間の経過と共に材料などにだんだん力がなくなって壊れてしまう。
- ・設計者から見たときの誤使用： 設計では想定していない誤った方法で使用されることがある。誤った使い方によって事故が発生しても、設計者はそこまで責任取れないと言うが、使用者側から見れば正しい使用方法が分からないまま間違った使い方をしてしまうことがある。

○ 安全率の例 (図8)

ほとんど全ての機械は安全率を 3 に取っている。ところが、機械でもいくつかだけは

安全率を4にしているものがある。それが圧力容器である。過去に3でやっていたのでは事故やそれによる人的被害が多かったためだと考えられる。

建設・土木分野でも多くの場合は3で考えるが、ダムは安全率4にしているようだ。人間が作った土木構造物で最大の物がダムである。ダムが崩壊して何千人もの死傷者が出る事故が過去に世界中のあちこちで起こっている。その結果、ダムの安全率は4にせざるを得なくなったのだと思われる。このように致命的な損傷が起り得るもの、または事故によって非常に大きな被害が予想されるもの場合は安全率を4にしている。

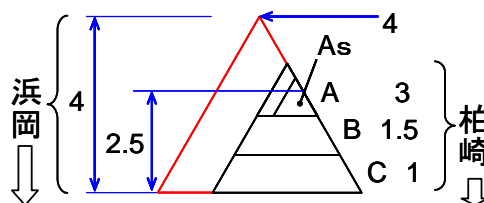
一方、自らが移動する機械は3にしていたらゴツくなって動けるものにならないため、安全率を飛行機は1.5、自動車は1.05~1.1程度にするのだそうだ。飛行機の場合は、運航ごとに様々な検査をする、定期的に目視検査をするなどして、1.5でも安全を確保している。自動車の場合は、車検によって安全を担保している。

最近ではCAE（Computer Aided Engineering）の普及で、ほとんどの機械の

設計はCAEで行うようになってきている。ほとんどの場合、どこにどのような力がかかり、どのように変形するか、などがコンピュータで計算できるようになった。すると、安全率を3に取ることが無駄だと考えられ、安全率を低くする方向に進むことが考えられる。それは技術の方向として一見いいように見えるが、ここで述べたような想定外事象が起こったときに決定的にまずいことが起こることが予想される。これは非常に怖いことである。

○ 原発の安全率

柏崎刈羽原子力発電所が2007年7月16日に起こった中越沖地震によって被害を受けた。柏崎刈羽原発では273ガルの揺れを想定し、3倍の裕度（余裕分）をみて設計したが、実際にこの地震では680ガルの揺れ、すなわち想定の2.5倍の揺れが観測されたのである。なぜ裕度を3にしたのかは分からないが、3にしたために原子炉が暴走するというような致命的な事故を免れた。現実起こった地震が破壊実験をやってしまったという位置づけで見ると、色々なことが分かる。



- ・ 阪神淡路大震災を徹底的に学んでいる。
 - ・ 直下型地震などの経験と知見を基に、独自の判断で裕度の向上や耐震を考え、実行している。
 - ・ 中越沖地震から学ぶことはまだ表には現れていない。
- ・ 柏崎刈羽原発は安全率のお蔭で助かった。

| | | |
|----------------------|------------------------|--------|
| As | : 原子炉圧力容器, 原子炉冷却系, 制御棒 | |
| A | : 非常用炉心冷却系, | 原子炉建屋 |
| B | : タービン設備, | タービン建屋 |
| C | : 発電機, 変圧器, 清水タンク | |
| (建築基準法で一般建物に考慮する地震力) | | |

図9 地震への備え — 浜岡原発と柏崎刈羽原発との比較 —

原発を設計するときの安全率（裕度）の基準を図 9 に示す。“C”は一般的な工場を作るときの基準と同等の強度で 1 倍，“B”は 1.5 倍，“A”は原子炉に関わる最も大事な部分で 3 倍の安全率を取る。“As”というのは、炉心の燃料棒、制御棒、原子炉圧力容器などの反応に直接関わる部分に適用され、安全率は 3 倍だが、非常に注意深く設計される。このようにして原子力では安全を担保している。

それでも皆が原子力をなんだか怖いもの、自分の住まいの近隣にはあって欲しくないものと思うのは何故だろう。想定外の事象まで考えて 3 倍にしておいてよかったというが、仮に中越沖地震が 3.5 倍の加速度を出していたら、柏崎刈羽原発はメルトダウン（炉心溶融）が起こったかもしれない。どこまでの危険を想定して建設したか、どのような場合は危険であるかを明らかにしなければ、周辺住民や世の中の合意が得られないのではないかと思う。

压力容器やダムでも安全率が 4 であることを考えれば、原発の安全率を見直すことも考えるべきではないかと思う。原発ではひとたび事故が起これば、ダムや压力容器の事故より、広範囲にわたって深刻な被害が生じることが考えられるからである。そのためには、おそらく今までにない“制震”という考えが必要になる。原子炉を収容している工場全体を地球の岩盤から完全に縁を切って、地震が起こっても建物には全く振動が伝わらないようにする必要があるのではないか。

(f) まとめ

一連の実見で思ったこと一（図 10）

柏崎刈羽原子力発電所の中越沖地震の被害や浜岡原子力発電所の耐震補強を実見し、さらに兵庫耐震工学研究センターでの実大

(図10) まとめ ——一連の実見で思ったこと一

- 想定の難しさ
- 想定を実行に移す難しさ
- 逆演算の難しさ
- 仮想演習のすばらしさ
- 実大実物実験の大切さ

橋脚破壊実験を見学したが、一連の見学を通じて思ったのは、想定や逆演算がいかに難しいか、またその通り実行に移すのはもっと難しい、ということである。また、仮想演習をきちんと行うことは非常に難しいが、それをきちんと行えば素晴らしい。

おわりに

今回の兵庫耐震工学研究センターの施設および実験の計 2 回の見学では、大きな実験を控えて多忙な中、手配して下さった方々を始め、案内して下さった方々に大変お世話になり、心より感謝している。そのお陰で、原子力発電所の見学を手始めに一連の見学を終えて、自分なりに考えをまとめることができたように思う。改めて、御礼申し上げたい。