

地震時にせん断荷重を受ける機器据付ボルトの 耐震裕度に関する一考察

Consideration on the Earthquake-resistant Margin of Equipment Base-bolts Receiving
the Shearing Load during Seismic Movements

坂口 忍 立花 郁也 越野 克彦 白水 秀知
白井 更知 今本 信雄 富田 恒夫 飛田 祐夫
山中 淳至 小林 大輔 岸 義之 磯部 洋康
根本 政博 石崎 一真 田中 等 妹尾 重男

Shinobu SAKAGUCHI, Ikuya TACHIBANA, Katsuhiko KOSHINO, Hidetomo SHIROUZU
Nobutoshi SHIRAI, Nobuo IMAMOTO, Tsuneo TOMITA, Hiroo TOBITA
Atsushi YAMANAKA, Daisuke KOBAYASHI, Yoshiyuki KISHI, Hiroyasu ISOBE
Masahiro NEMOTO, Kazuma ISHIZAKI, Hitoshi TANAKA and Shigeo SENOO

東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所
再処理技術開発センター

Tokai Reprocessing Technology Development Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center

March 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

地震時にせん断荷重を受ける機器据付ボルトの耐震裕度に関する一考察

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター

核燃料サイクル工学研究所 再処理技術開発センター

坂口 忍⁺¹、立花 郁也⁺¹、越野 克彦⁺¹、白水 秀知⁺¹、白井 更知⁺¹、今本 信雄⁺¹、
富田 恒夫⁺¹、飛田 祐夫⁺¹、山中 淳至⁺²、小林 大輔⁺²、岸 義之⁺²、磯部 洋康⁺²、
根本 政博⁺²、石崎 一真⁺²、田中 等⁺²、妹尾 重男⁺²

(2011 年 2 月 9 日 受理)

2007 年に発生した新潟県中越沖地震において、柏崎刈羽原子力発電所では設計基準を超える地震動が観測されたが、「止める、冷やす、閉じ込める」ための耐震重要度の高い施設、設備については、耐震設計時において発生する荷重や耐震許容に相当な耐震裕度が見込まれていたため、被害はなかった。そこで、耐震裕度とは実際にどの程度あるものなのかがわかれば、施設、設備の安全性が明確になる。このため、定量的な耐震裕度の把握を目的として、東海再処理施設の代表的な機器を一例に、一般的に地震が発生した際に地震荷重が集中しやすい据付ボルトについて、実機を模擬した供試体を用いて耐力試験を実施した。本報告では、耐力試験から得られた耐力値が、耐震許容に対してどの程度裕度があるのかについてまとめたものである。

Consideration on the Earthquake-resistant Margin of Equipment Base-bolts Receiving the Shearing Load during Seismic Movements

Shinobu SAKAGUCHI⁺¹, Ikuya TACHIBANA⁺¹, Katsuhiko KOSHINO⁺¹,
Hidetomo SHIROUZU⁺¹, Nobutoshi SHIRAI⁺¹, Nobuo IMAMOTO⁺¹,
Tsuneo TOMITA⁺¹, Hiroo TOBITA⁺¹, Atsushi YAMANAKA⁺², Daisuke KOBAYASHI⁺²,
Yoshiyuki KISHI⁺², Hiroyasu ISOBE⁺², Masahiro NEMOTO⁺², Kazuma ISHIZAKI⁺²,
Hitoshi TANAKA⁺² and Shigeo SENOO⁺²

Tokai Reprocessing Technology Development Center,
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, Tokai Research and Development Center,
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 9, 2011)

Seismic movements exceeding earthquake-resistance standards were recorded at the Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station during the scene of the Niigataken Chuestu-Oki Earthquake in 2007. No damages were reported for the safety-significant equipments and facilities representing functions of “shut-down”, “cooling” and “containment” because they were constructed with a large margin for seismic permissible values. Wherein, it is possible to clarify their safety by investigating how much a seismic margin is actually expected. In order to quantitatively evaluate the margin, we conducted a series of shearing tests using real specimens of equipment base-bolts on which a seismic load tends to concentrate, as an example of typical equipments at the Tokai Reprocessing Plant. This report summarized how much the shearing strength values of the specimens gave actual margins in comparison to the seismic permissible values.

Keywords: Earthquake, Earthquake-resistant Margin, Bolt, Shearing Test,
Tokai Reprocessing Plant, Shearing Strength, Permissible Value

+1 Reprocessing Plant Construction Office

+2 Reprocessing Operation Department

目 次

1. はじめに	1
2. 耐震設計における裕度の確認方法	2
3. 試験対象	3
3.1 代表選定	3
3.2 貯槽の据付ボルト	3
3.3 据付ボルトに作用する荷重	3
4. せん断試験	4
4.1 適用規格	4
4.2 試験条件	4
4.2.1 試験供試体ボルト	4
4.2.2 ラグ模擬体の製作	4
4.2.3 荷重条件	6
4.2.4 ボルト締付トルク	6
4.2.5 温度条件	6
4.3 試験方法	6
4.4 試験結果	7
5. 考察	8
5.1 耐力値と規格上の許容値との比較	8
5.2 設計規準値が持つ耐震裕度	9
6. おわりに	10
謝辞	11
参考文献	11
付録	22

Contents

1. Introduction	1
2. Confirmation method of margin in seismic design	2
3. Test items	3
3.1 Selection of specimens	3
3.2 Base bolts of vessels	3
3.3 Load on the base bolts	3
4. Shearing test	4
4.1 Applicable standard	4
4.2 Test conditions	4
4.2.1 Bolt	4
4.2.2 Lag	4
4.2.3 Loading conditions	6
4.2.4 Torque	6
4.2.5 Temperature	6
4.3 Test method	6
4.4 Test results	7
5. Considerations	8
5.1 Comparison with shearing strength and the permissible values	8
5.2 Earthquake-resistant margin of the design permissible values	9
6. Conclusion	10
Acknowledgments	11
References	11
Appendix Seismic analysis of base bolts	22

表リスト

表 3.1	評価対象とする据付ボルトの仕様	12
表 3.2	据付ボルトA、Bに発生する力（解析結果）	12
表 4.1	供試体ボルトAのせん断試験による耐力値 (T_L)	13
表 4.2	供試体ボルトB－1のせん断試験による耐力値 (T_L)	13
表 4.3	供試体ボルトB－2のせん断試験による耐力値 (T_L)	13

図リスト

図 2.1	耐震設計において見込まれている耐震裕度の関係	14
図 3.1	評価対象とする据付ボルトの据付状態	14
図 4.1	試験供試体ボルトA (SUS316L M30×3 本)	15
図 4.2	試験供試体ボルトB (SUS316 M48×6 本)	15
図 4.3	製作したラグ模擬体A	15
図 4.4	製作したラグ模擬体B	15
図 4.5	ラグ模擬体Aによるせん断試験方法	16
図 4.6	ラグ模擬体Bによるせん断試験方法	17
図 4.7	油圧式一軸試験機の外観	18
図 4.8	試験装置の概要	18
図 4.9	供試体ボルトA (SUS316L(M30)ボルト) の荷重－変位曲線	19
図 4.10	供試体ボルトB－1 (SUS316 (M48)ボルト) の荷重－変位曲線	19
図 4.11	供試体ボルトB－2 (SUS316 (M48)ボルト) の荷重－変位曲線	19
図 4.12	供試体ボルトAの破断写真	20
図 4.13	供試体ボルトB－1の破断写真	20
図 4.14	供試体ボルトB－2の破断写真	20
図 5.1	試験によるせん断耐力値と設計規準上の許容値の比較（供試体ボルトA）	21
図 5.2	試験によるせん断耐力値と設計規準上の許容値の比較（供試体ボルトB－1）	21
図 5.3	試験によるせん断耐力値と設計規準上の許容値の比較（供試体ボルトB－2）	21

This is a blank page.

1. はじめに

2007年に発生した新潟県中越沖地震において、柏崎刈羽原子力発電所では設計基準を超える地震動が観測されたが、「止める、冷やす、閉じ込める」ための耐震重要度の高い施設、設備については、耐震設計時において発生する荷重や耐震許容に相当な耐震裕度が見込まれていたことから被害はなかったと原子力安全委員会で報告されている¹⁾。

そこで、耐震裕度とは実際にどの程度あるものなのかがわかれば施設、設備の安全性が明確になる。

このため、定量的な耐震裕度の把握を目的として、東海再処理施設（以下「再処理施設」という）の代表的な機器を一例に、一般的に地震が発生した際に地震荷重が集中しやすい据付ボルトについて、実機を模擬した供試体を用いて耐力試験を実施した。

本報告では、耐力試験から得られた耐力値が、耐震許容に対してどの程度裕度があるのかについてまとめたものである。

2. 耐震設計における裕度の確認方法

2007 年 7 月 16 日に起こった新潟県中越沖地震では、柏崎刈羽原子力発電所において設計基準の想定を超える地震動が観測された。柏崎刈羽原子力発電所では、所内変圧器や消火系配管、クレーン等の周辺設備に被害が見られたが、原子炉の安全上重要な設備には被害はなかった²⁾。設計上の想定を超えたにもかかわらず、安全上重要な設備に被害がなかったのは、設計段階に十分な耐震裕度を見込んでいるからであると言われている。耐震裕度は、解析上の裕度、評価上の裕度、許容値がもつ裕度などからなるとされている³⁾ (図 2.1)。

耐震裕度の確認には、実機相当のものを加振した実験などが行われている。例えば原子力安全基盤機構で実施した実規模配管系モデルに係る実験では、実験結果を耐震試験の評価で用いたシミュレーション解析手法を適用して安全裕度の評価を行った結果、現行耐震設計手法は 10 倍以上の安全裕度を有していると報告されている⁴⁾。

再処理施設では、原子炉の耐震設計の規格・基準を参照した設計を行っており、設計において耐震裕度を含ませていることも原子炉施設と同様である⁵⁾。再処理施設の機器においても、設計の各段階において耐震裕度を考慮した設計を行っており、減衰定数などのように正確な把握が難しいものもあって、実際の裕度がどれだけあるか、数値を積み上げて説明するのは難しい。

耐震裕度を具体的な数値で測定する方法には、実験により実際にそのものがもつ耐力を把握する方法があり、直接的で信頼性も高い。しかしながら、実験には期間、コスト等の面で負担が多く、実プラントに適用されるさまざまな形状の機器・配管類の耐震裕度を網羅的に確認することは、現実問題として実施できない。そこで、代表的な機器、代表的な部位について実験を行い、耐震上の裕度とその安全性について確認することとした。

3. 試験対象

3.1 代表選定

耐震裕度を確認する方法として実機を模擬して耐力試験を行うことは、直接的かつ精度の高い方法である。しかし、再処理施設の多種多様な機器について試験を行うことは現実的でない。そこで代表的な機器、部位を選定し試験を行うこととした。

再処理施設は、使用済燃料からウランやプルトニウムを抽出し、放射性廃棄物（核分裂生成物）と分離する施設である。多くの機器はウランやプルトニウムが臨界とならないよう小型で、閉じ込め機能として微負圧の槽類である。このように小型で内圧も小さい機器が多いなか、ウランやプルトニウムが取り除かれた後の廃液だけを取り扱う設備の中には比較的大型の機器がある。地震荷重は機器重量が大きいほど大きいため、耐震裕度を確認するための耐力試験の対象とする代表的な機器として、廃液を取り扱う設備の貯槽A、貯槽Bの2基を選定した。

地震発生時には建物からボルトを介して機器に地震力が伝わることになる。地震荷重は機器重量が大きいほど据付ボルトにも大きな荷重がかかるため、代表的な部位として、重量の大きな貯槽A、貯槽Bの据付ボルトを選定した。

3.2 貯槽の据付ボルト

貯槽A及びBは4つのラグがあり、このラグ1つあたり4本の据付ボルトによって図3.1のように建物に据え付けられている。各々の据付ボルトの仕様は表3.1に示すとおりである。

3.3 据付ボルトに作用する荷重

地震動により据付ボルトに作用する荷重の方向を調べるために、検討用地震波を作成し、貯槽A、Bについて汎用非線形構造解析システム FINAS Ver. 18 を使用した有限要素法（FEM）による時刻歴応答解析を行った。解析の結果は表3.2のとおりせん断力が支配的である。

耐震裕度を確認する耐力試験では、試験対象とする据付ボルトのせん断方向に荷重を作用させることとした。

4. せん断試験

4.1 適用規格

ボルトのせん断試験を行うにあたり、供試体数や荷重条件等の試験条件は、原子力施設の設計で使用され、原子力発電所耐震設計技術規程等でも参照されている日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格「JSME S NC1-2008 SSB-3200」を用いた。

また、この規格にない条件については、材料の引張試験で一般的な「JIS Z2241 金属材料引張試験方法」を適用した。

4.2 試験条件

4.2.1 試験供試体ボルト

日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格「JSME S NC1-2008 SSB-3200」では供試体の条件を同一寸法で同一規格材を使用し、同一の製造法で製造され、同一の品質管理規準に合格したものであることと規定している。これに合致する供試体として供試体A（M30、SUS316L 図 4.1）、供試体B（M48、SUS316 図 4.2）を製作した。

供試体の同一寸法については、実機の施工記録をもとに、同一の径、ねじ部長さとなるように製作した。

同一規格材の使用については、実機と同じ材質となるよう供試体Aは SUS316L、供試体Bは SUS316 で製作し、その素材には鋼材検査証明書（ミルシート）付きの鋼材を使用した。

同一の製造法については、実機の施工記録をもとに、実機と同様にねじ部がメートル並目ねじ（JIS B 0205）の規格となるように製作した。

同一の品質管理基準としては、実機施工時に実施した検査内容と同じく、材料確認、ボルト締付力、ボルト据付位置の確認の検査を実施した。

これを日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格「JSME S NC1-2008 SSB-3200」の荷重試験における供試体の個数の規定に従い、試験 1 ケースにつき同じ供試体を 3 本ずつ準備した。

4.2.2 ラグ模擬体の製作

日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格「JSME S NC1-2008 SSB-3200」では、荷重試験はそれが使用される荷重状態に合致させた方法で行わなければならないと要求している。これと合致するラグ模擬体として、実機の貯槽A、Bのラグ部を模したラグ模擬体A（図 4.3）、ラグ模擬体B（図 4.4）を製作した。

(1) ラグ模擬体A

貯槽Aのラグにはボルト穴として丸穴が施されており、ラグ模擬体は図 4.5 に示すものを製作した。また、貯槽Aはナットがボルト頂部にあり、ボルトのねじ部に丸穴部がかかっていることも考えられることから、供試体Aとラグ模擬体を組み合わせた試験では、径が細く強度上弱い部分であるボルトのねじ部にせん断力を加える配置としてせん断試験を行った。

(2) ラグ模擬体B（図 4.6 参照）

貯槽Bのラグにはボルト穴として長穴加工が施されており、ボルトの接触状態により2ケースのせん断方向が考えられる。そのため、各々のせん断方向に対するラグ模擬体B-1（ボルト1点接触：長穴直角方向）とラグ模擬体B-2（ボルト周接触：長穴方向）を製作した。

ラグ模擬体B-1と組み合わせた供試体Bを供試体B-1、ラグ模擬体B-2と組み合わせた供試体Bを供試体B-2とし、それぞれを1ケースとしてせん断試験を行った。

4.2.3 荷重条件

JIS G 4303 ステンレス鋼棒では、引張強さの測定については、試験片平行部のひずみ増加率が、40～80 %/min になるような引張速度を用いるとしている。せん断強さの測定についても引張速度の値を準用し、荷重速度をひずみ増加率が 40～80 %/min の中央値である 60 %/min となるように設定した。

4.2.4 ボルト締付トルク

日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格「JSME S NC1-2008 SSB-3200」で、供試体条件は実機と同一の品質管理規準であることと規定している。このうちボルト締付トルクを品質管理規準としていることから、ボルト締付トルクは実機施工時と同じトルク値とした。供試体ボルトAの締付トルクは 337 [N・m]、供試体ボルトBの締付トルクは 1419 [N・m]である。

4.2.5 温度条件

日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格「JSME S NC1-2008 SSB-3200」では、最高使用温度における材料規格値と試験温度における材料規格値の温度補正を考慮しており、試験条件としては室温とした。

4.3 試験方法

せん断試験は油圧式一軸試験機（図 4.7）を用いて実施した。

油圧式一軸試験機本体は、任意の高さに固定できるクロスヘッドとテーブルの間に試験体（試験装置）を設置し、テーブルを上昇させることで荷重をかける機構となっており、荷重の制御は油圧式一軸試験機の隣にある操作部により行う。

試験装置の概要を次に示す（図 4.8）。

油圧式一軸試験機のテーブル上に試験装置の台座を設置し、これに供試体ボルトを通してナットで固定することで据付ボルトが躯体に埋め込まれた状態を模擬する。

さらに台座に通した供試体ボルトにラグ模擬体を通してナットで固定することで機器が据付ボルトで固定された状態を模擬する。

せん断試験は供試体ボルトに取り付けたラグ模擬体の上部に油圧式一軸試験機のクロスヘッドを設置し、テーブルを上昇させることにより台座部を上昇させて供試体ボルトにせん断力を与える。

ボルトが破断するまでの変位は、油圧式一軸試験機のクロスヘッドとテーブル間に取り付けたリニアゲージにより測定した。載荷した荷重データは、試験機に内蔵する荷重計で記録した。

以上の試験方法により、供試体ボルトが破断するまでのデータを取得した。

4.4 試験結果

(1) 荷重-変位曲線

供試体ボルトA、B-1、B-2の各せん断試験で得られた荷重-変位曲線を図4.9～図4.11に示す。各供試体ボルトの試験は、1種類の供試体について3回行ったが、3回ともほぼ同じ結果となった。

(2) せん断耐力値

供試体ボルトの各せん断試験の結果から、各供試体ボルトの耐力値を求めた。耐力値の求め方は日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格「JSME S NC1-2008 SSB-3200」に従い、1種類の供試体における3回の試験のうち最小値を耐力値とした。

その結果、耐力値は供試体Aは247[kN]、供試体B-1は785[kN]、供試体B-2は805[kN]となった（表4.1～表4.3）。

(3) 破断面の観察

せん断試験による各供試体ボルトの破断面の状態を図4.12～図4.14に示す。

供試体ボルトAではねじ切り加工部で破断し、その前後のねじ切り加工部において大きく曲げ変形が生じた。供試体ボルトAにせん断力が加わる際、ラグ模擬体Aのボルト穴にある切り欠き（直径70mm、深さ24mm）（図4.5）内において曲げ変形が生じ、この部分にかかるねじ切り加工部で破断した。曲げ変形したことが図4.9の荷重-変形曲線で履歴がほぼ線形に増加していることから読み取れる。

供試体ボルトB-1、B-2ではねじ切り加工を施していない箇所破断し、曲げ変形は供試体ボルトAの場合より比較的小さい。ラグ模擬体B-1、B-2ではラグ模擬体Aのようにボルト穴に切り欠きがないため（図4.6）、曲げ変形が小さい結果となった。

各供試体ボルト3本の破断面の比較では、各3本ともほぼ同一箇所、同一形状の破断面となった。

5. 考察

耐震裕度を直接測定するため、再処理施設の代表的な機器、部位として大型貯槽の据付ボルトを選定し、せん断耐力を実験により求めた。

耐震裕度が含まれている要因のうち、設計規準は規格により具体的な値で明示されているため、試験で求めた耐力値と設計規準値の差は定量化することができる。

そこで耐震裕度の定量化として、耐力値と設計規準値を比較する。

5.1 耐力値と規格上の許容値との比較

せん断試験で実際に求めた供試体A、B－1、B－2の耐力値は、それぞれ247[kN]、785[kN]、805[kN]であった。

耐震設計の設計規準としては、日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格「JSME S NC1-2008」の規定がある。このうち、許容値を規定するものは、「SSB-3100 許容応力」と「SSB-3200 許容荷重」の2つがある。耐震設計上の発生値は2つの規定のうちどちらかを適合させればよいものとされている。許容値を導く簡便さの面から、多くは「SSB-3100 許容応力」の規定が採用されているが、「SSB-3200 許容荷重」では荷重試験により求めた値を用いることで「SSB-3100 許容応力」の材料の許容応力の規定に代えることができるとしている。

(a) 耐力値と「SSB-3200 許容荷重」に基づく許容値との比較

「SSB-3200 許容荷重」に基づく許容値 (A_L) は以下のように規定される。

$$A_L = \frac{0.6T_L S_{yd}}{S_{yt}}$$

A_L : 許容荷重[N]

T_L : 荷重試験で求めた値 (耐力値) [N]

S_{yd} : 最高使用温度における設計降伏点の値⁶⁾

S_{yt} : 試験温度における設計降伏点の値⁶⁾

これより、各供試体ボルトの許容荷重値 (A_L) を求めると、供試体A (SUS316L) は148[MPa]、供試体B－1、B－2 (SUS316) は471[MPa]、483[MPa]となる。

比較のためせん断試験で求めた耐力値を1とする相対比で示すと、「SSB-3200 許容荷重」に基づく許容値 (A_L) は規定のとおり60%の値となり、残り40%は耐震裕度となる (図5.1～図5.3)。

(b) 耐力値と「SSB-3100 許容応力」に基づく許容値との比較

「SSB-3100 許容応力」に基づく許容応力 ($1.5f_s^*$) は以下のように規定されている。

$$1.5f_s^* = 1.5 \times \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

$1.5f_s^*$: 供用状態 D⁷⁾ における許容せん断応力

F : 許容応力を決定する場合の基準値⁸⁾で、日本機械学会 発電用原子力設備規格 材料規格で規定する材料の設計降伏点及び設計引張強さによって決まる値

これより各供試体ボルトの許容応力値を求めると、供試体 A (SUS316L) は 121[MPa]、供試体 B-1、B-2 (SUS316) は 142[MPa]である。これらに各供試体の断面積を乗じて荷重値に換算すると、供試体 A (SUS316L) は 85[kN]、供試体 B-1、B-2 (SUS316) は 256[kN]となる。

せん断試験で求めた耐力値を 1 とする相対比で示すと、「SSB-3100 許容応力」に基づく許容応力 ($1.5f_s^*$) は約 1/3 で 32～34%の値にとどまり、残り約 2/3 (66～68%) は許容値がもつ耐震裕度ということになる (図 5.1～図 5.3)。

また、「SSB-3200 許容荷重」に基づく許容値 (A_f) との対比では各許容値間で約 2 倍の開きがあり、「SSB-3100 許容応力」に基づく許容応力 ($1.5f_s^*$) にはさらに十分な耐震裕度が含まれている結果となった。

5.2 設計規準値が持つ耐震裕度

以上の結果から、今回の供試体ボルトの場合の耐力値は設計規準の許容値との比較で約 3 倍の耐震裕度があるということになる。今回の耐力試験で得た耐震裕度は、地震荷重が最も大きくかかると予想される代表的な機器の具体例として求めたものである。このため、その他の機器の耐震裕度も約 3 倍となるわけではないが概ね同程度あることが推測される。

また、せん断耐力値は、試験によらず設計規準による計算により日本機械学会 発電用原子力設備規格 材料規格の設計引張強さ S_u 値から求めることもできる。「SSB-3100 許容応力」によれば、せん断ひずみエネルギー説によれば単純引張による破壊限度に対し、せん断のみによる破壊限度は $1/\sqrt{3}$ 低下する⁹⁾。これをもとに、設計規準による設計引張強さ S_u 値から計算で求めた各供試体ボルトのせん断耐力値は、供試体 A (SUS316L) は 196[kN]、供試体 B-1、B-2 (SUS316) は 543[kN]となる。ここでも耐力値は設計規準による値より大きく、設計規準に耐震裕度が含まれているといえる。

6. おわりに

再処理施設の機器がもつ耐震裕度を把握するため、再処理施設内の大型貯槽の据付ボルトを模擬した供試体を用いて耐力試験を実施した。

この結果、試験での耐力値は規格で定める許容値よりも、約3倍の耐震裕度があることがわかった。今回の試験で得た耐震裕度は代表的な機器の具体例であり、その他の機器でも同じ数値となるわけではないが、その耐震裕度は概ね同程度あることが推測される。今回の試験は代表的な機器の据付ボルトに限った耐力値を求める試験であるが、ボルトの機械的特性や許容値の設定方法は多くの規格で共通しており、他機器についても同様に耐震裕度は大きいとみて良いといえる。

以上のことから、実際に耐力試験を行って耐震裕度の度合いを具体的数値で示すことで、設備の耐震安全性には裕度があり、規格で定める許容値には十分な耐震裕度が含まれていることが確認できた。

謝 辞

今回の耐力試験を実施するにあたり助言をいただいた大洗研究開発センター 次世代原子力システム研究開発部門 FBR規格・基準ユニットの方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 原子力安全委員会“東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所7号機の施設健全性評価に関する見解について(20安委決第25号)”，(平成20年10月31日)。
- 2) 野本敏治：“機械・電気設備への影響評価「中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会」の検討から” 原子力総合シンポジウム2010.
- 3) “柏崎刈羽発電所の安全機能がなぜ維持されたのか—中越沖地震による影響と今後について、学会が特別セッション”，日本原子力学会誌，Vol. 49, No. 10(2007)。
- 4) 独立行政法人 原子力安全基盤機構 “4.4.24 原子力発電施設耐震信頼性実証等 1)配管系終局強度試験”，事業活動年報 平成15年度の事業活動，p. 98-99(2003)。
- 5) 原子力安全委員会，再処理施設安全審査指針，指針13. 地震に対する考慮 2項.
- 6) 日本機械学会，発電用原子力設備規格 材料規格「JSME S NJ1-2008」 Part3 第1章 表6
- 7) 社団法人日本電気協会 原子力規格委員会，原子力発電所耐震設計技術規程 「GNR-2110」
- 8) 日本建築学会，鋼構造設計規準—許容応力度設計法—，p. 2。
- 9) 日本機械学会，発電用原子力設備規格 設計・建設規格「JSME S NC1-2008」第I編 解説 第8章 SSB 解説 SSB-3121.1， p. I -解説 8-10.

表 3.1 評価対象とする据付ボルトの仕様

	据付ボルト A	据付ボルト B
サイズ	M30	M48
材質	SUS316L	SUS316
環境（温度）	セル内（室温）	セル内（室温）
機器の概要	〔貯槽 A〕 重量：145ton ※内蔵液重量含む 容量：90 m ³ 内蔵液： 高レベル放射性廃液	〔貯槽 B〕 重量：207ton ※内蔵液重量含む 容量：120 m ³ 内蔵液： 高レベル放射性廃液

表 3.2 据付ボルト A、B に発生する力（解析結果）

		据付ボルト A (M30、SUS316L)	据付ボルト B (M48、SUS316)
組み合わせ応力 (水平地震力、 鉛直地震力、 自重)	せん断	182MPa (129kN)	102MPa (185kN)
	引張	33MPa (24kN)	21MPa (37kN)

※（下段）に荷重換算値〔kN〕を示す。

表 4.1 供試体ボルト A のせん断試験による耐力値 (T_L)

試験回数	耐力値 (T_L)
1 回目	247 kN
2 回目	247 kN
3 回目	257 kN

表 4.2 供試体ボルト B - 1 のせん断試験による耐力値 (T_L)

試験回数	耐力値 (T_L)
1 回目	791 kN
2 回目	785 kN
3 回目	798 kN

表 4.3 供試体ボルト B - 2 のせん断試験による耐力値 (T_L)

試験回数	耐力値 (T_L)
1 回目	805 kN
2 回目	812 kN
3 回目	815 kN

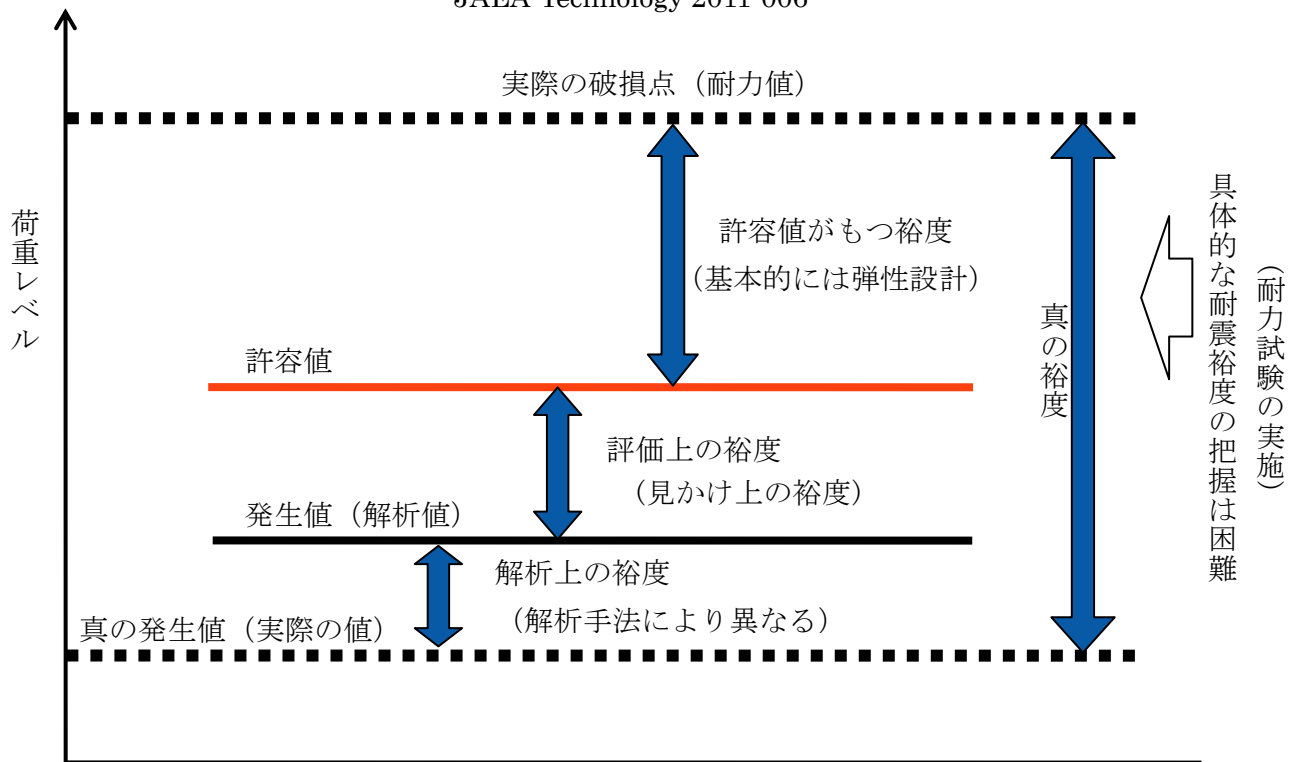


図 2.1 耐震設計において見込まれている耐震裕度の関係

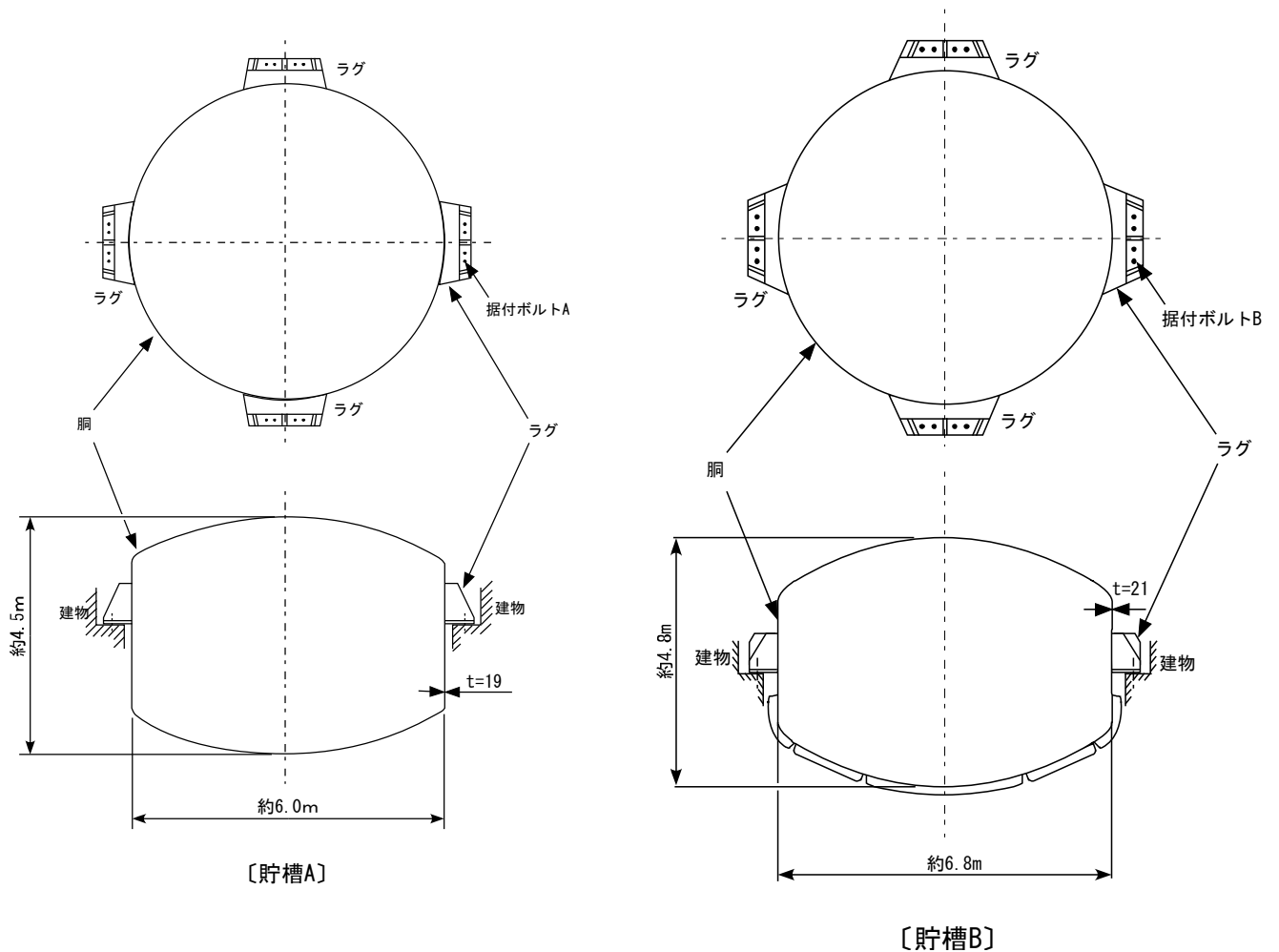
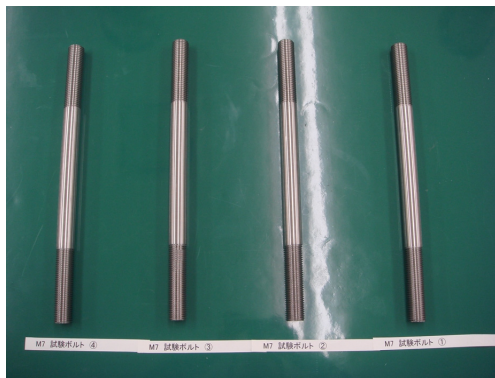
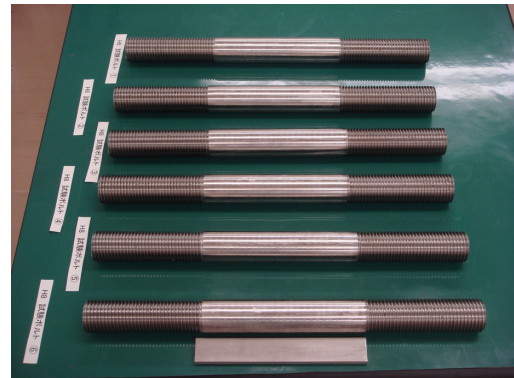


図 3.1 評価対象とする据付ボルトの据付状態



(SUS316L M30×3 本) 1 本予備

図 4.1 試験供試体ボルト A



(SUS316 M48×6 本)

図 4.2 試験供試体ボルト B

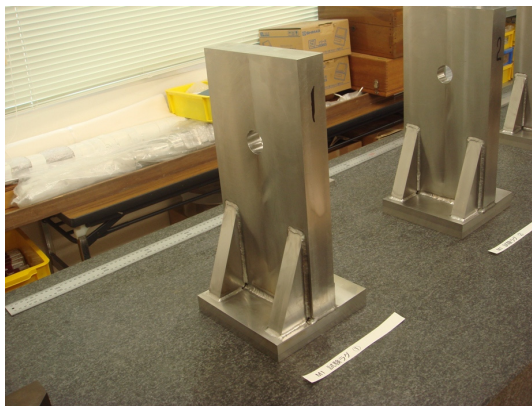
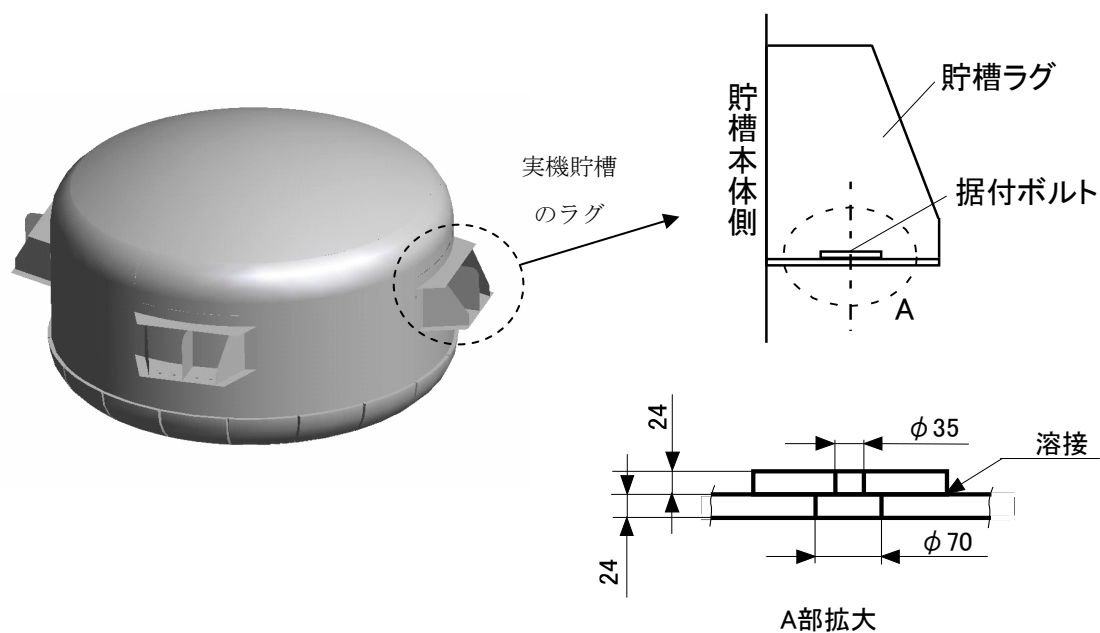


図 4.3 製作したラグ模擬体 A



図 4.4 製作したラグ模擬体 B



実機貯槽ラグの模擬体を製作。
せん断試験は実機の据付状態を模擬して実施。

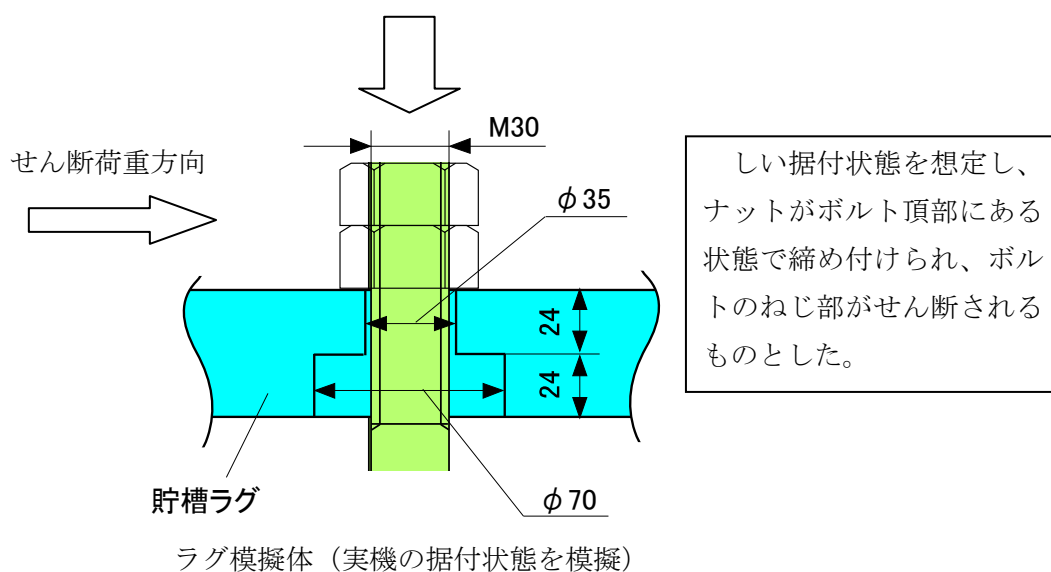
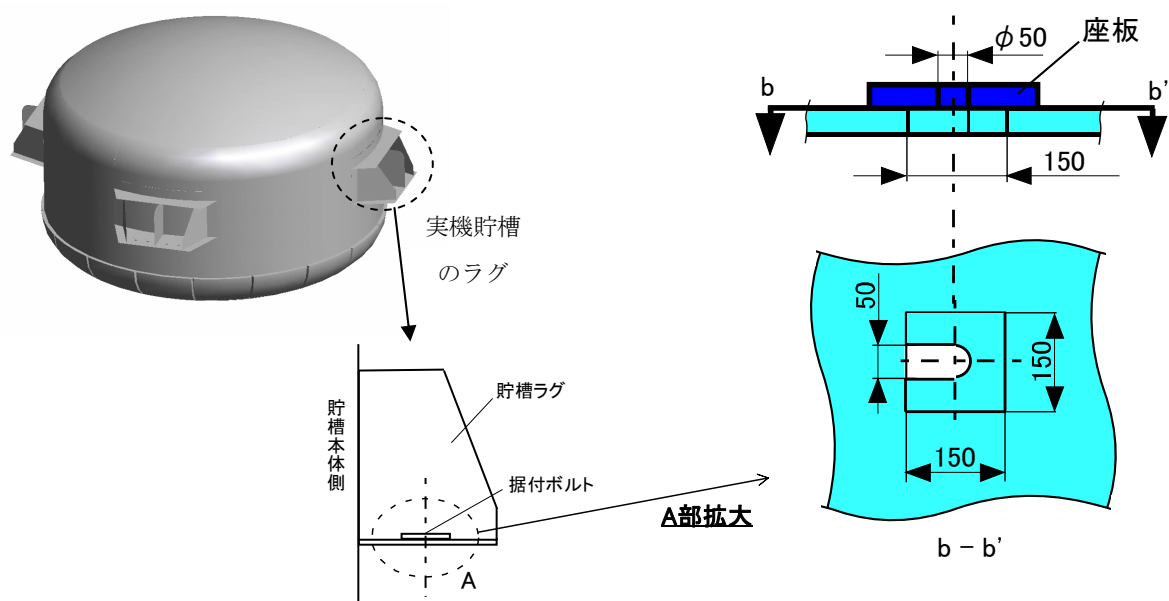


図 4.5 ラグ模擬体Aによるせん断試験方法



据付ボルトと貯槽ラグの接触状態により、下記 2 ケースのせん断試験を模擬。

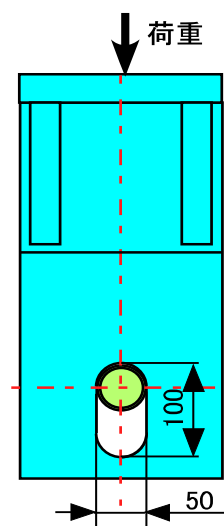
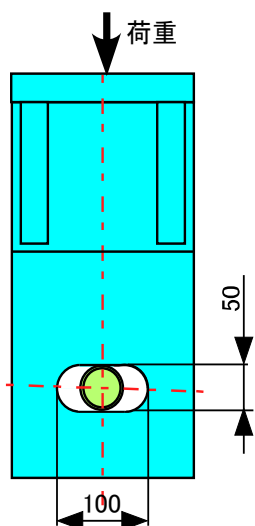
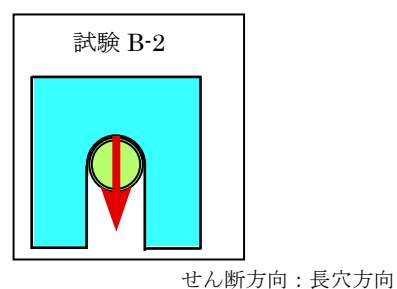
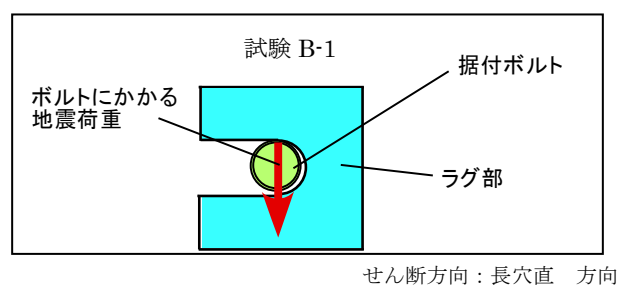


図 4.6 ラグ模擬体Bによるせん断試験方法

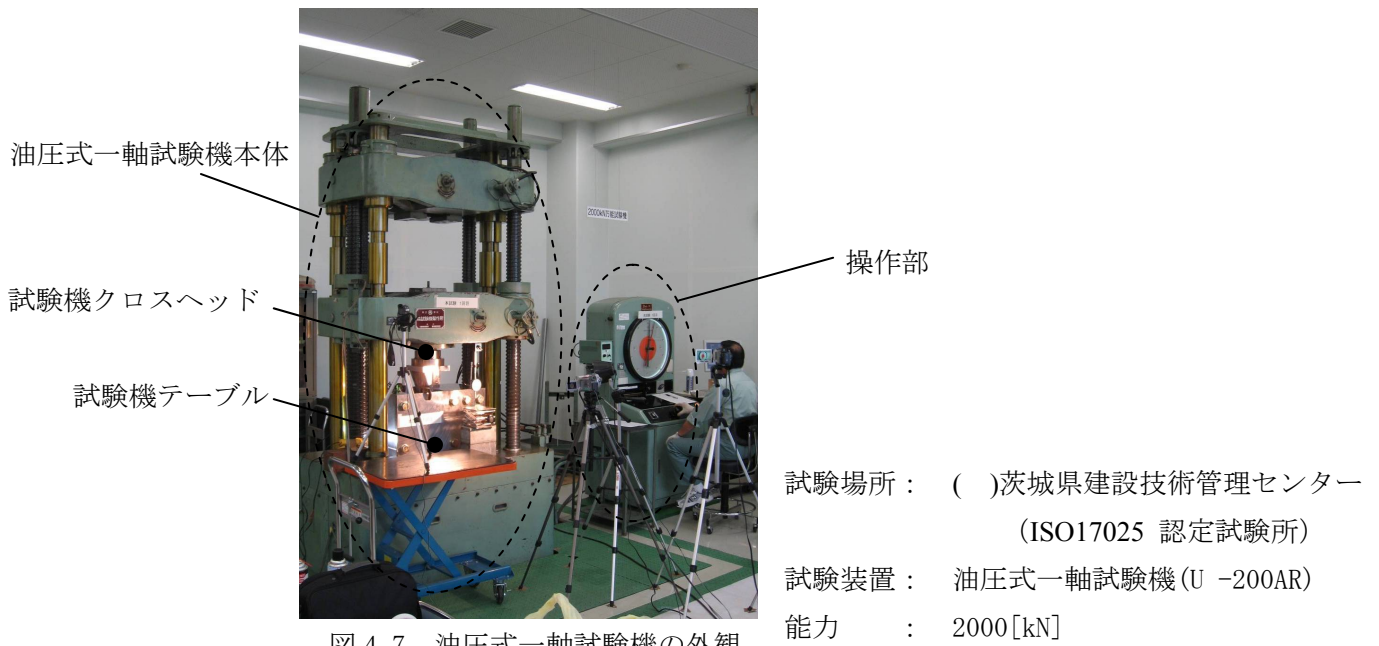
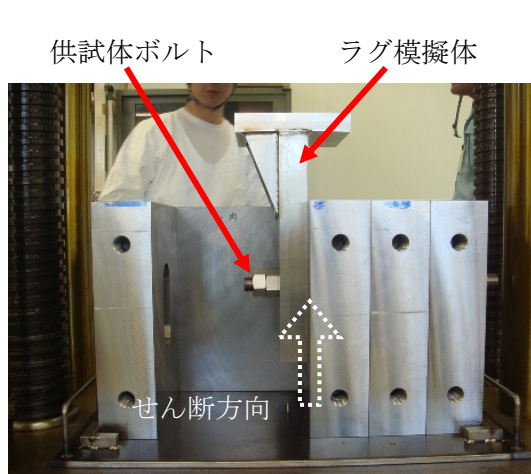
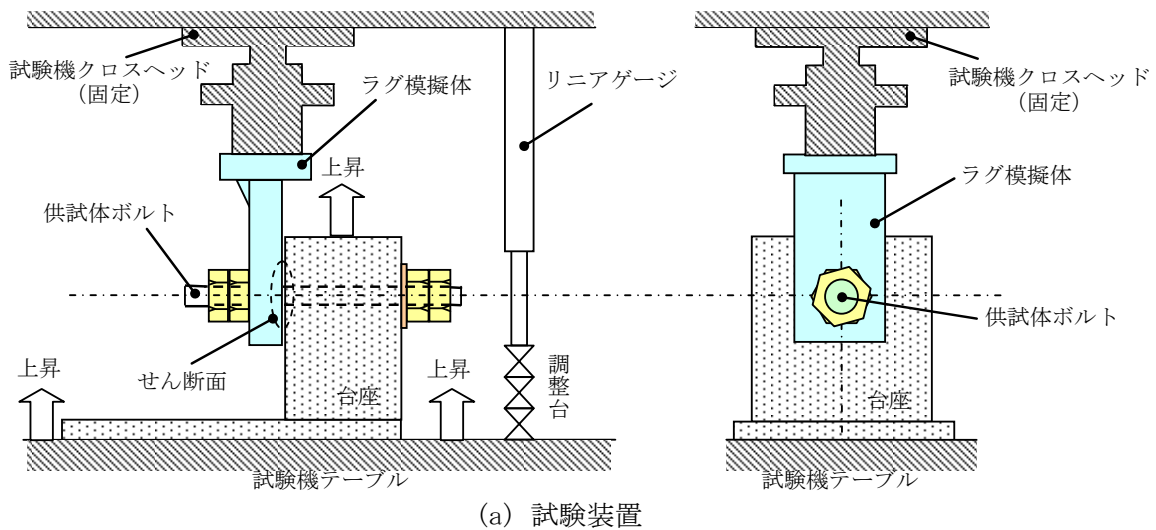
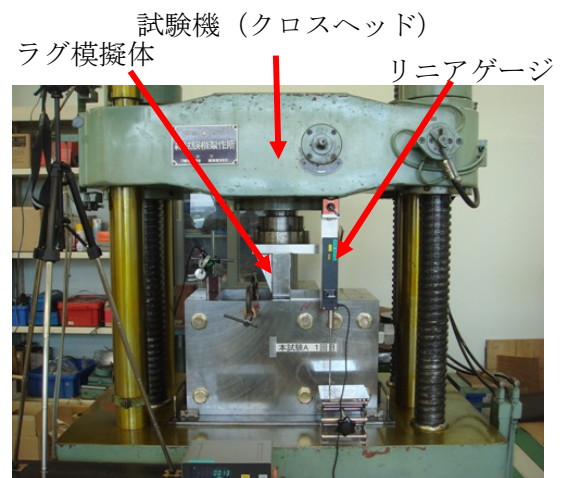


図 4.7 油圧式一軸試験機の外観



(b) 試験装置 (サイドプレートを取り除いた様子)



(c) 試験装置 (外観)

図 4.8 試験装置の概要

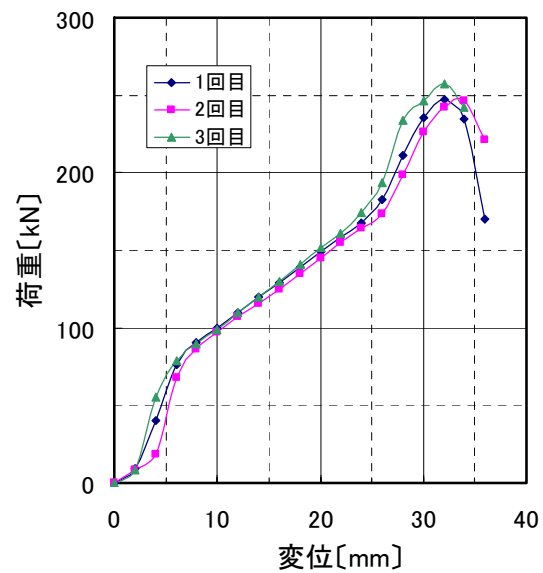


図 4.9 供試体ボルト A (SUS316L (M30) ボルト) の荷重－変位曲線

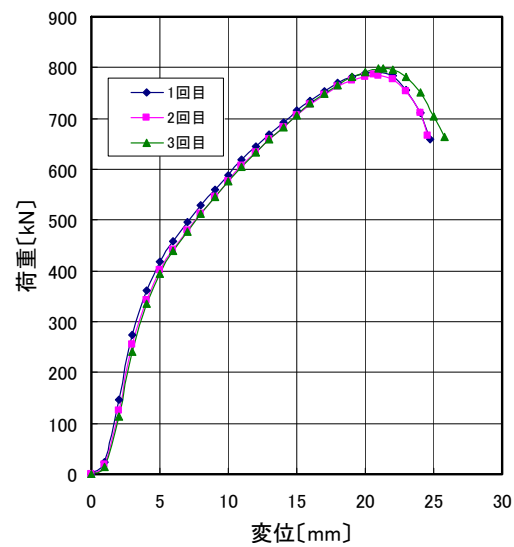


図 4.10 供試体ボルト B－1 (SUS316 (M48) ボルト) の荷重－変位曲線

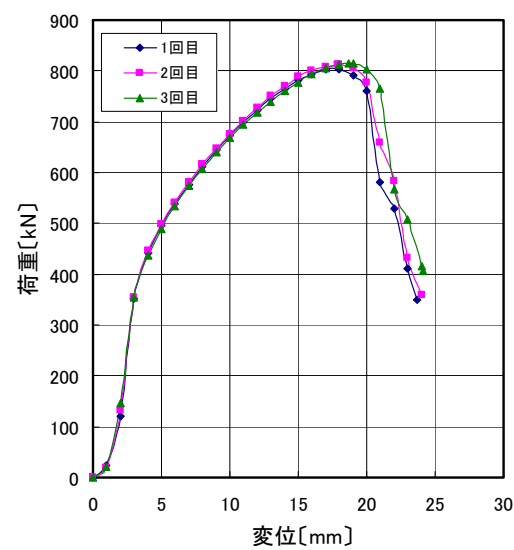


図 4.11 供試体ボルト B－2 (SUS316 (M48) ボルト) の荷重－変位曲線

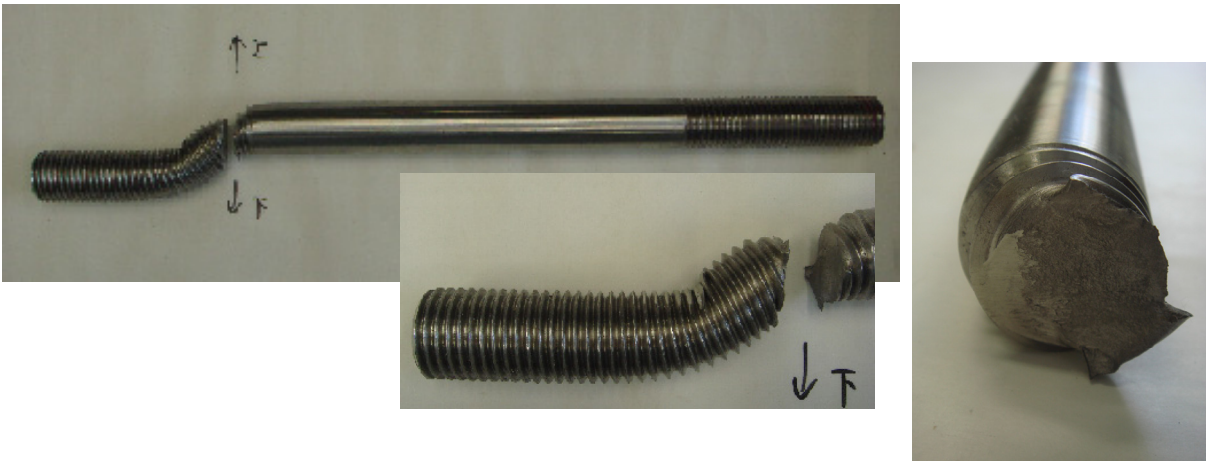


図 4.12 供試体ボルト A の破断写真

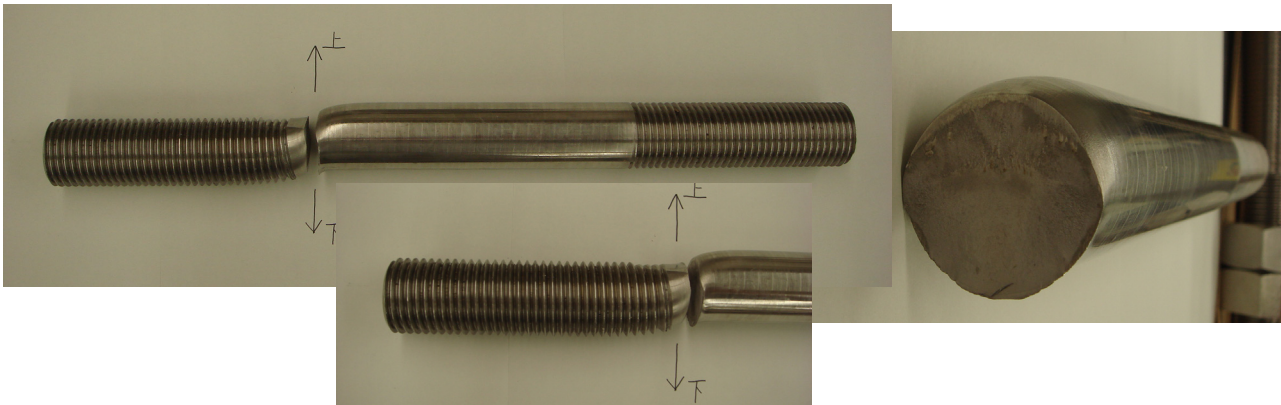


図 4.13 供試体ボルト B - 1 の破断写真

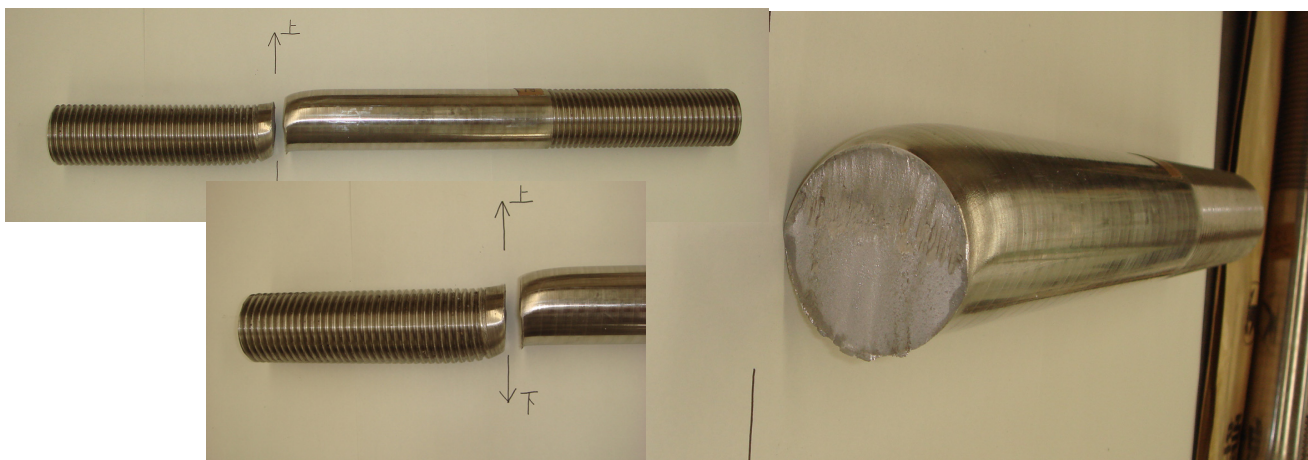


図 4.14 供試体ボルト B - 2 の破断写真

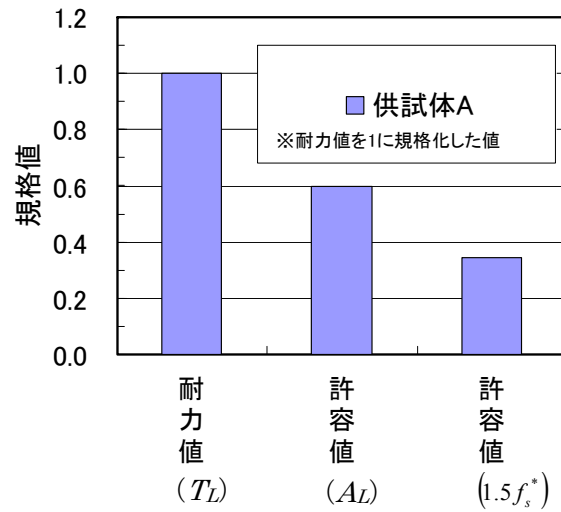


図 5.1 試験によるせん断耐力値と設計規準上の許容値の比較（供試体ボルト A）

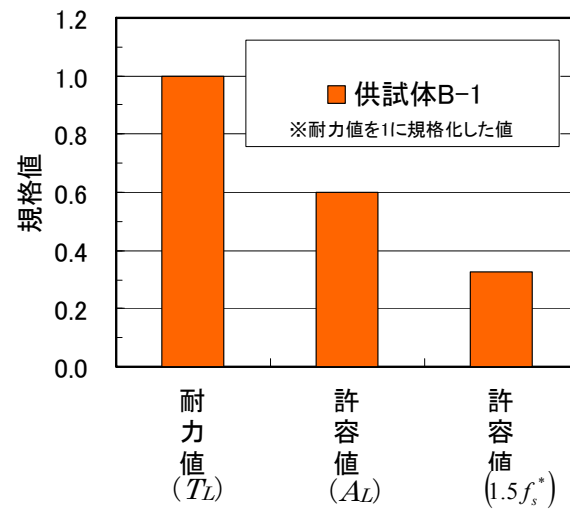


図 5.2 試験によるせん断耐力値と設計規準上の許容値の比較（供試体ボルト B - 1）

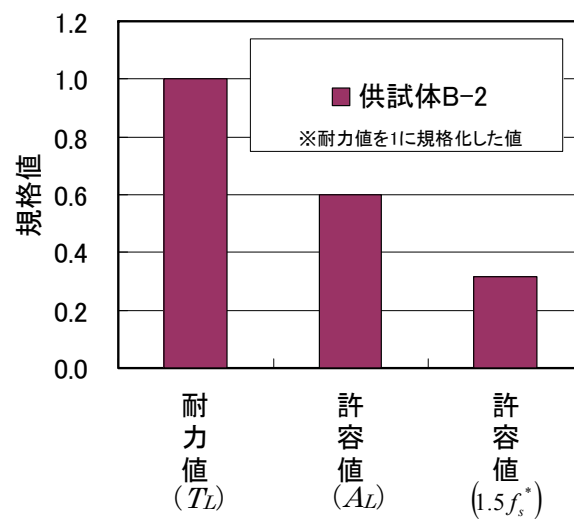


図 5.3 試験によるせん断耐力値と設計規準上の許容値の比較（供試体ボルト B - 2）

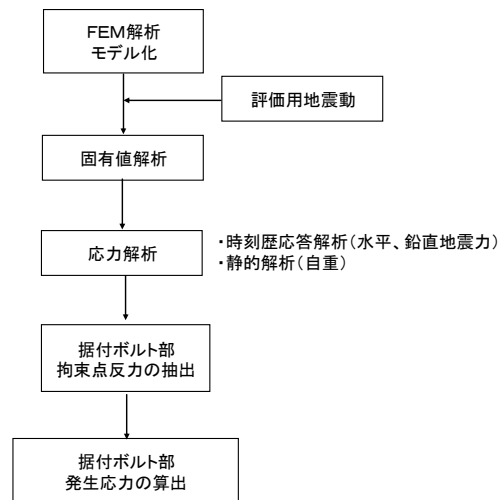
付録 据付ボルトA、Bの耐震解析

3章3.3 で べた貯槽A、Bの有限要素法（FEM）による時刻歴応答解析について示す。

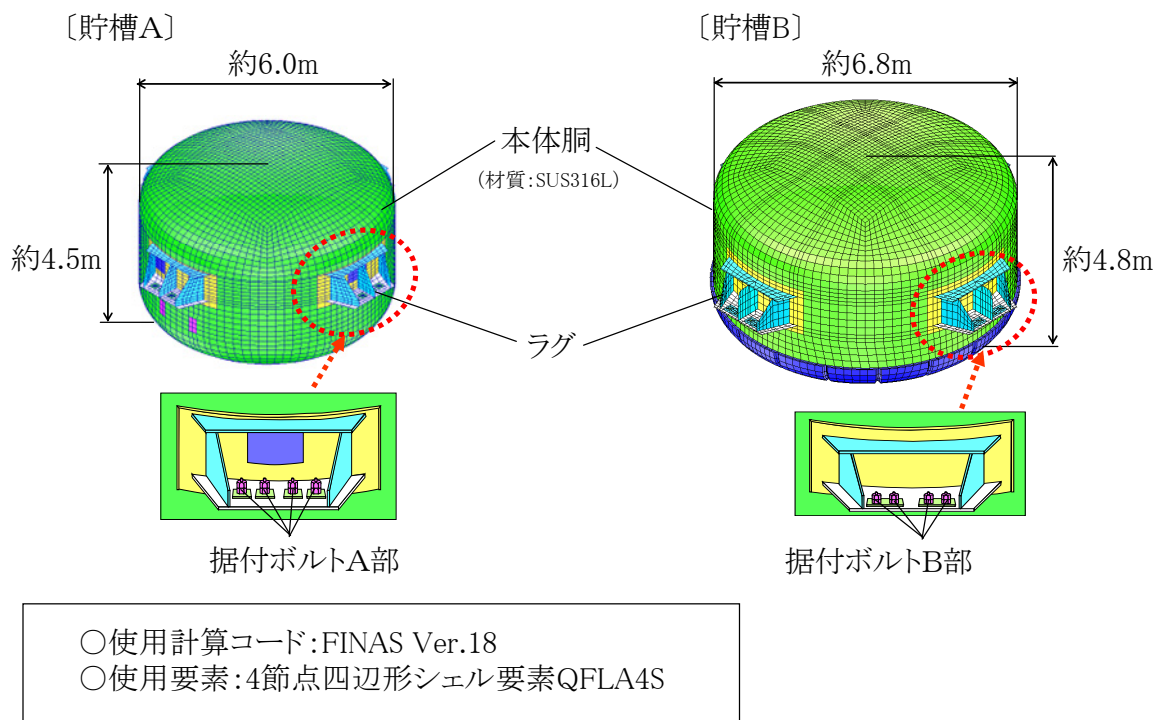
解析、評価手法は、「原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC4601-2008）社団法人日本電気協会 原子力規格委員会」に準 した。

評価用地震動は、貯槽A、Bが設置されている建 の振動を模擬する検討用地震波を作成し、これによる貯槽A、Bの据付部の床応答加速度を使用した。

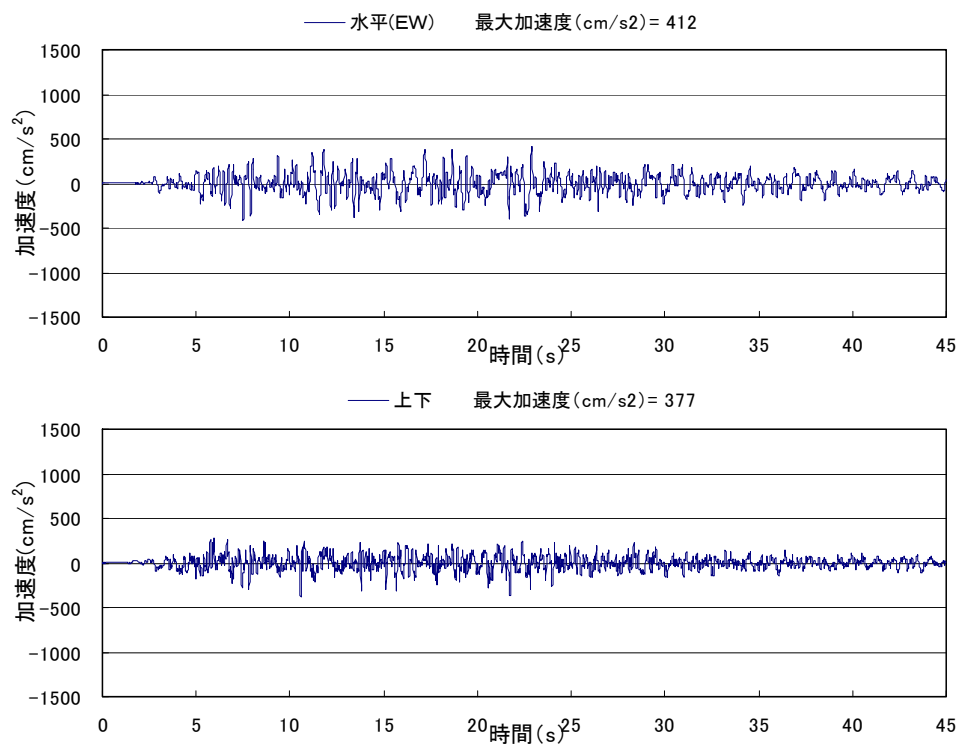
据付ボルトA、Bの耐震解析、評価フローを図A－1に、解析モデルを図A－2に、評価用地震動を図A－3、図A－4に、固有値解析結果を表A－1に示す。



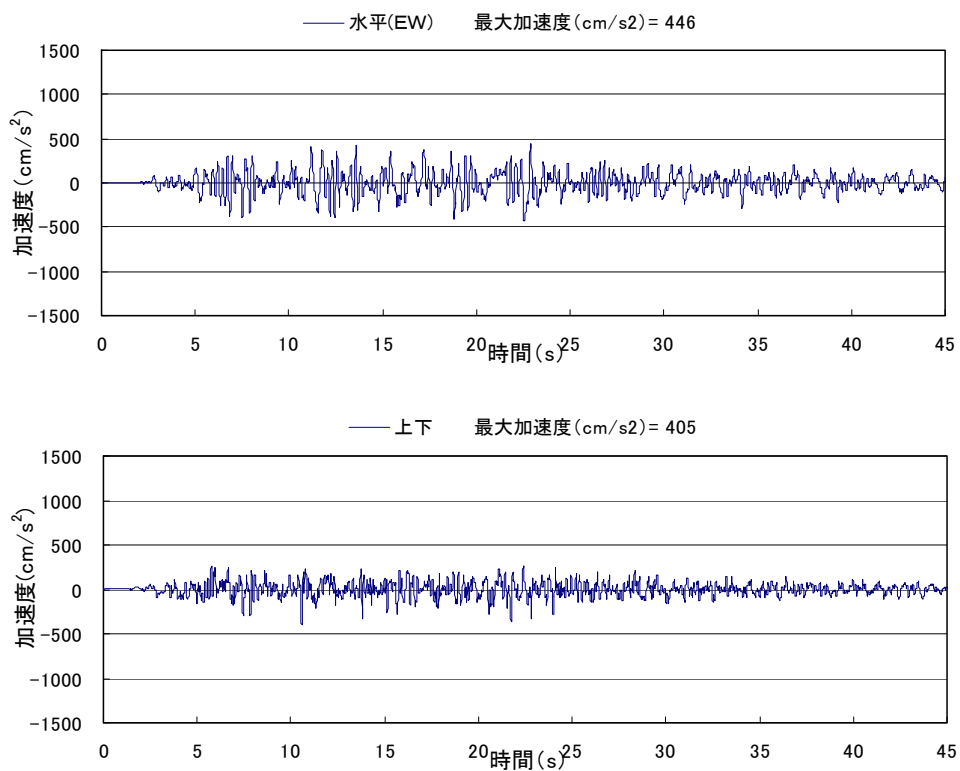
図A－1 据付ボルトA、Bの耐震解析、評価フロー



図A－2 据付ボルトA、Bの耐震解析モデル



図A－3 据付ボルトA（貯槽A）検討用地震動



図A－4 据付ボルトB（貯槽B）検討用地震動

表 A－1 固有値解析結果

	据付ボルト A（貯槽 A） 解析モデル	据付ボルト B（貯槽 B） 解析モデル
固有振動数（一次）	14.1	19.8

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質モル	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速さ, 速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光強度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
吸収線量, ビエエネルギー分与, カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報を付たえるために使われる。実際には、使用する時には記号 rad 及び sr が用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号 sr を単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で "radioactivity" と記される。

(g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X 線及びγ 線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ³ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SI に属さないが、SI と併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表 7. SI に属さないが、SI と併用される単位で、SI 単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SI に属さないが、SI と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI 単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトル	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3 元系の CGS 単位系と SI では直接比較できないため、等号「 ≐ 」は対応関係を示すものである。

表 10. SI に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー) 4.184 J (「熱化学」カロリー)
ミクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

