

柏崎刈羽原子力発電所7号機 原子炉建屋の耐震設計上の 安全余裕について

平成20年5月

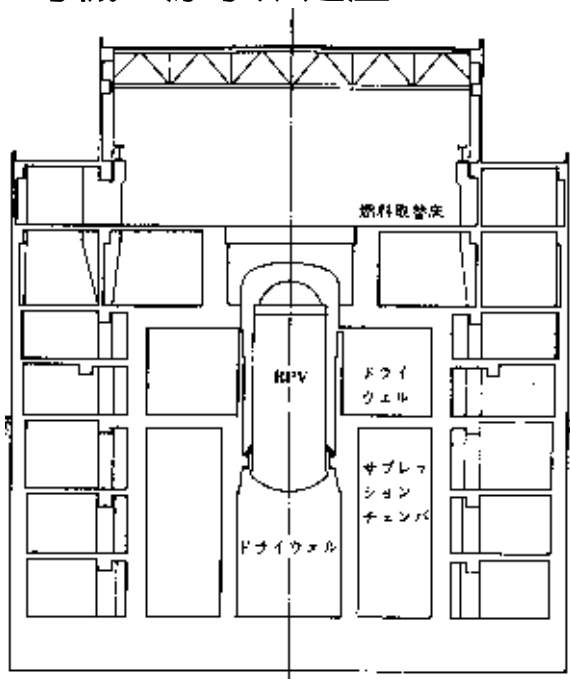
東京電力株式会社

はじめに

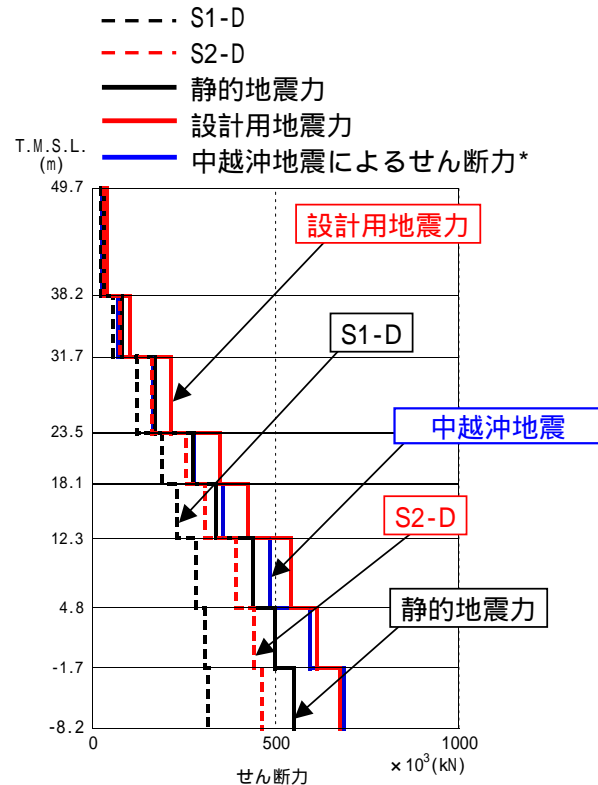
- 7号機の原子炉建屋については、今回の中間報告書において健全であるとの総合評価を行った。
- 一方で、中越沖地震による地震動は、原子炉建屋の基礎マット上の観測記録で、基準地震動 S_2 -Dの応答加速度を上回る大きなものであった。
- それにも関わらず、原子炉建屋が健全であったのはどのような要因が大きかったのかについて、主に設計との対比によって考察することとした。

中越沖地震による原子炉建屋のせん断力

7号機 原子炉建屋



中越沖地震による原子炉建屋のせん断力は、地上部では設計用地震力を下回り、地下部ではほぼ同程度のレベルであった。



* 中越沖地震によるせん断力は、耐震壁及び補助壁を耐震要素として考慮した解析に基づき算定。

比較図の解説(7号機の場合)

■ S_1 -Dによるせん断力

基準地震動 S_1 -D(300Gal)の動的解析結果で、埋め込み効果を適切に評価しており、結果的に設計用地震力の0.5倍程度

■ S_2 -Dによるせん断力

基準地震動 S_2 -D(450Gal)の動的解析結果で、埋め込み効果を適切に評価しており、結果的に設計用地震力の0.7～0.8倍程度

■ 静的地震力

地表面レベル(T.M.S.L.12.0m)を基準にして静的地震力を算定(1階部分の層せん断力係数は、0.48)。なお、地下部分については地下震度式により算定。

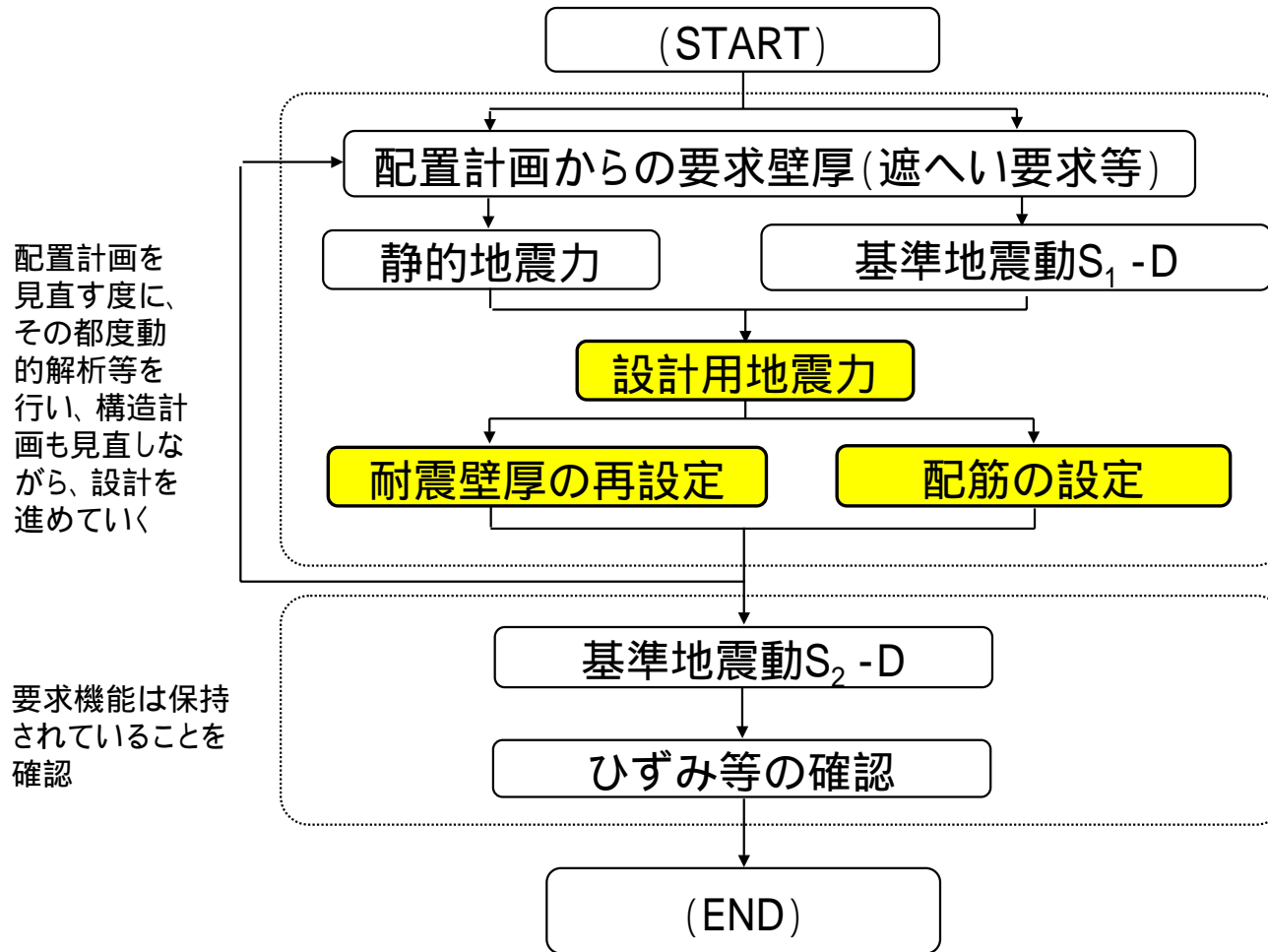
■ 設計用地震力

S_1 -Dや静的地震力に対して、さらに設計上の余裕を持たせるために工学的判断を加えて設定したもの。背景には、各種の検討結果が含まれているが、結果的には静的地震力の算定基準レベルを基礎版レベル(T.M.S.L.-8.2m)に下げたケースによって決定している。

考察(7号機の原子炉建屋)

- 7号機の原子炉建屋においては、中越沖地震で作用したと考えられる最大せん断力は、地上部では設計用地震力を下回り、地下部ではほぼ同程度のレベル。
- 設計用地震力に対しては、短期許容応力度以下になるように設計を行っているために、このレベルの荷重であれば弾性範囲となる。
- 当時の基準地震動 S_2 -D(450Gal)の応答結果は、設計用地震力よりも小さい。これは地中に埋め込まれている効果を適切に評価した結果である。
- 結果的に、基準地震動 S_2 -Dを超えた地震動が作用したと考えられるものの、静的地震力等の効果により健全性は確保されたと考えられる。

鉄筋コンクリート耐震壁の設計フローについて



耐震壁の構造設計の考え方(1)

耐震壁のコンクリート厚さの設定について

耐震壁は遮へい要求を満足した上で、設計用地震力に対して、耐震壁のせん断応力度(単位面積当たりのせん断力)が $0.51 \times F_c$ を超えないように壁厚を設定する。つまり不足する場合は、壁の厚さを増やして設計を見直すこととする。

$$d \leq 0.51 \times F_c$$

(d : 設計用地震力に対するせん断応力度(N/mm²)、 F_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²))

(解説)

上記の式は、過去にいくつかの変遷(SI単位系による係数変換等)を経て現在社内設計上の運用としているもの。

$F_c = 33 \text{ N/mm}^2$ の場合には 2.9 N/mm^2 程度となり、これはコンクリートの引張強度である $0.1F_c$ よりもやや小さいレベルとなる。つまり、設計上この程度の応力レベルに抑えておけば、鉄筋コンクリートのひび割れ発生はある程度抑制できるだろうという設計上の配慮。

耐震壁の構造設計の考え方(2)

耐震壁の鉄筋量の算定について

耐震壁は、コンクリートのみでもある程度応力負担ができるようなせん断応力度以下になるような壁厚に設定した上で、その時の発生応力に対してはコンクリートには負担させず全て鉄筋で負担させる考えで必要鉄筋量を算定する。この時の設計許容限界は、短期許容応力度以下を目標としている。

(解説)

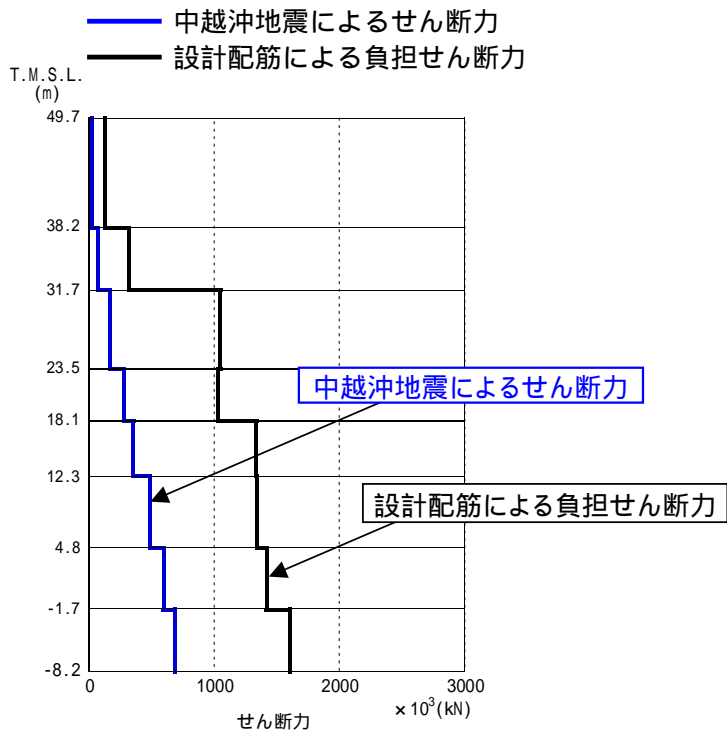
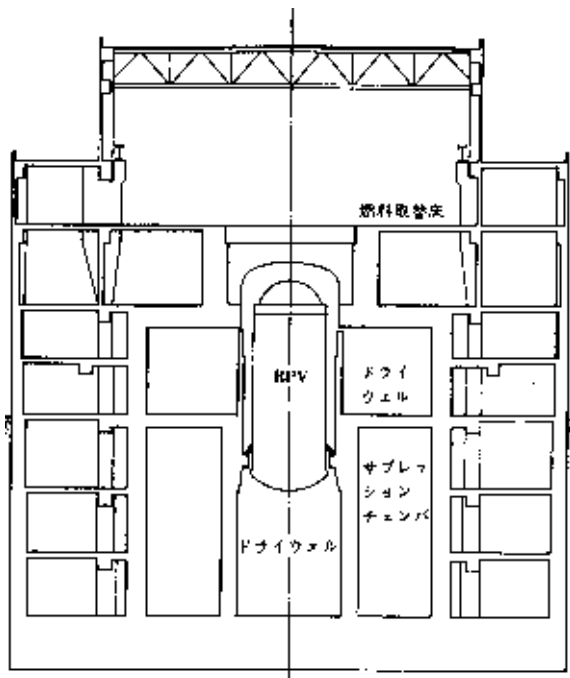
コンクリートは圧縮には強いが引張には弱いので、せん断力に対して全て鉄筋で負担させるという考え方は、鉄筋コンクリート構造の設計においては一般的なもの。

計算上は必要鉄筋量だけあれば良いが、上下階との配筋の連続性なども考慮するため、最終的な設計鉄筋量は必要鉄筋量に対して余裕を持っている。

また、RCCVについては想定事故時の荷重に対する設計も行うために、その分の鉄筋量が結果的に余裕を持つことになる場合もある。

中越沖地震と設計時との比較

7号機 原子炉建屋



中越沖地震による原子炉建屋のせん断力は、設計配筋による負担せん断力に対して十分な余裕がある。

設計配筋による負担せん断力は、以下の式により算定

$$Q_{st} = P_w \times y \times A_s$$

P_w : 壁のせん断補強筋比
 y : 鉄筋の短期許容応力度
 A_s : 壁のせん断面積

弾塑性解析の試算について

弾塑性解析の試算について

7号機については、中越沖地震による応答結果として短期許容応力度設計で想定していた荷重程度であったと考えられる。

そのため、シミュレーション解析において弾性解析を行ったことと整合は取れていると考えられるが、弾塑性解析を行った場合にどのような結果になるのかを試算した。

復元力特性の設定

JEAG4601に示されている標準的手法により、復元力特性を設定した。ただし、以下の点については補正を行った。

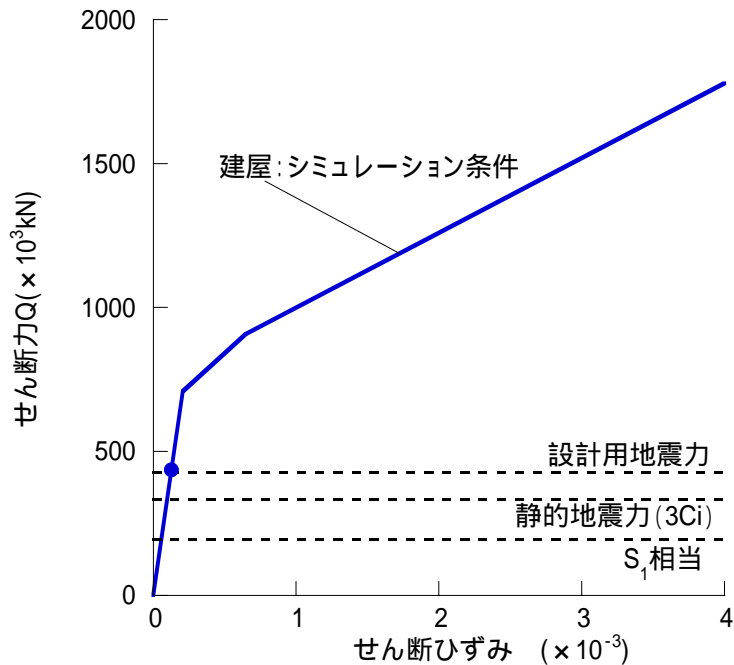
- ・コンクリート強度は、実強度を採用
- ・補助壁分も含める

設計時の荷重について

設計時の動的解析は全て弾性解析の結果であるので、せん断力の数値により図中に書き込むこととした。

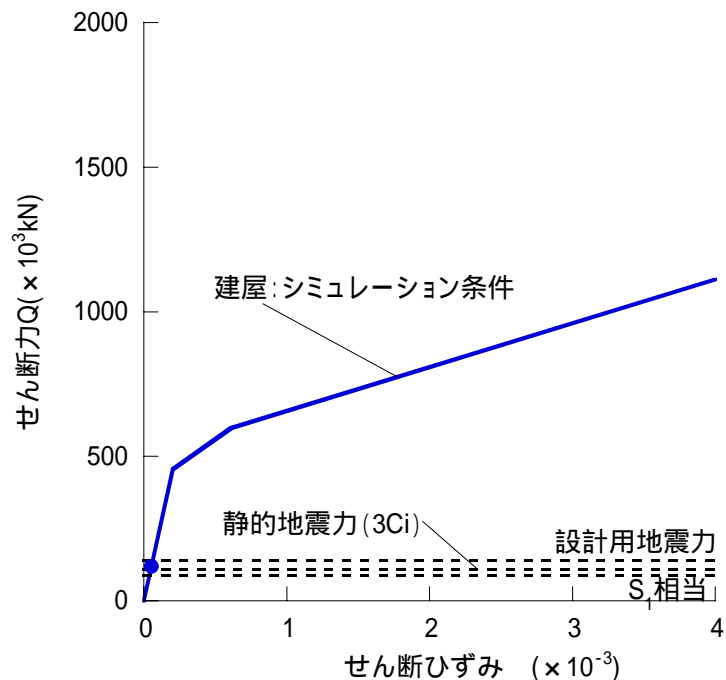
中越沖地震と設計時との比較 (スケルトン上プロット; 7号機)

● シミュレーション解析結果



基礎版上 (B3F)

● シミュレーション解析結果



中間階 (3F)

参考：1号機の原子炉建屋について

- 7号機の原子炉建屋については、基準地震動 S_2 -Dの応答加速度を上回る大きなものであったものの、設計用地震力とほぼ同等程度であったと考えられる。
- 一方で、7号機は1号機に比べて地震動が小さかったことが判っており、1号機の場合にはどの程度の状況になるかを参考として示すこととした。
- 1号機は設計した年代が古いことから、7号機に比べて以下の点が異なっている。

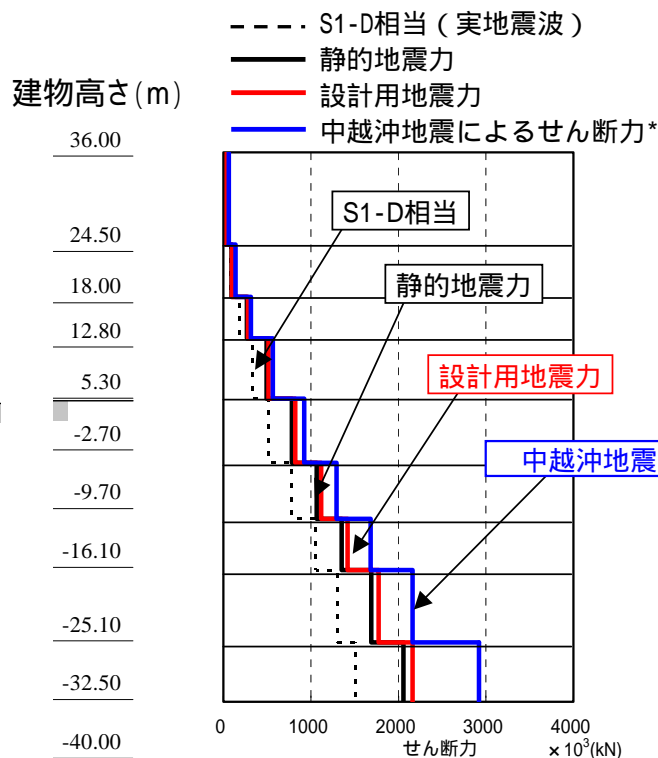
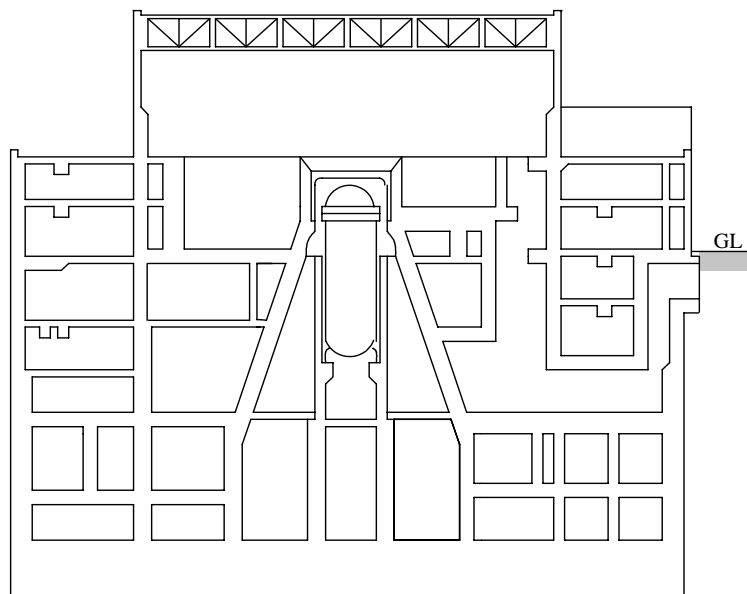
基準地震動 S_1 -Dや基準地震動 S_2 -Dの制定前であり、エルセントロ波などの実地震波を基準化して用いている。

現在の静的地震力(3Ci)とは異なり、 $3C_H$ により求めた静的地震力を用いており、またその算定に当たっては基準階を基礎マット上にするなど保守的な設定としている。

1号機的设计時の動的解析モデルは、格子型モデルを用いている。

参考：中越沖地震による原子炉建屋のせん断力

1号機 原子炉建屋

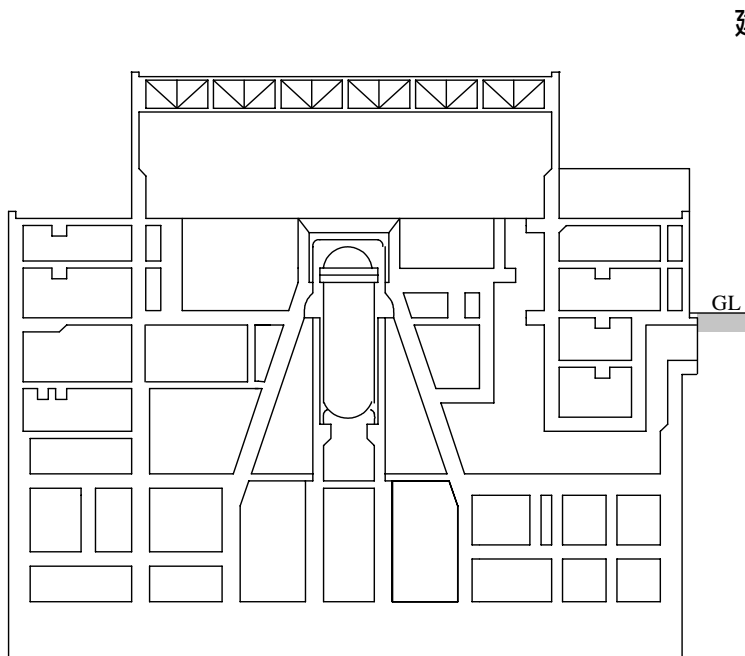


中越沖地震による原子炉建屋のせん断力は、地上部は設計用地震力と同程度、地下部は設計用地震力をやや上回るレベルであった。

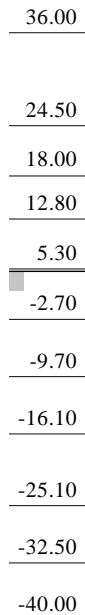
* 中越沖地震によるせん断力は、耐震壁及び補助壁を耐震要素として考慮した解析に基づき算定。

参考：中越沖地震と設計時との比較

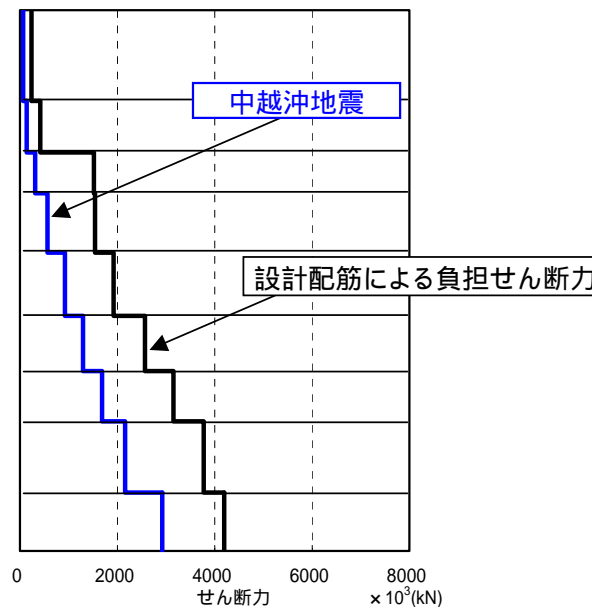
1号機 原子炉建屋



建物高さ (m)



— 中越沖地震によるせん断力
— 設計配筋による負担せん断力



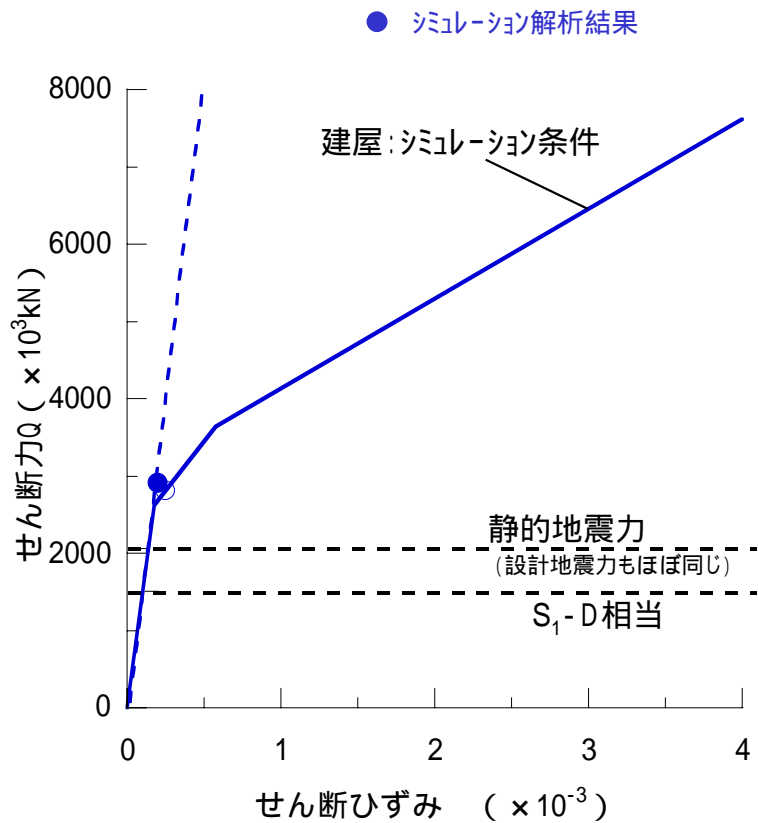
中越沖地震による原子炉建屋のせん断力は、7号機ほどではないが設計配筋による負担せん断力に対して余裕がある。

設計配筋による負担せん断力は、以下の式により算定

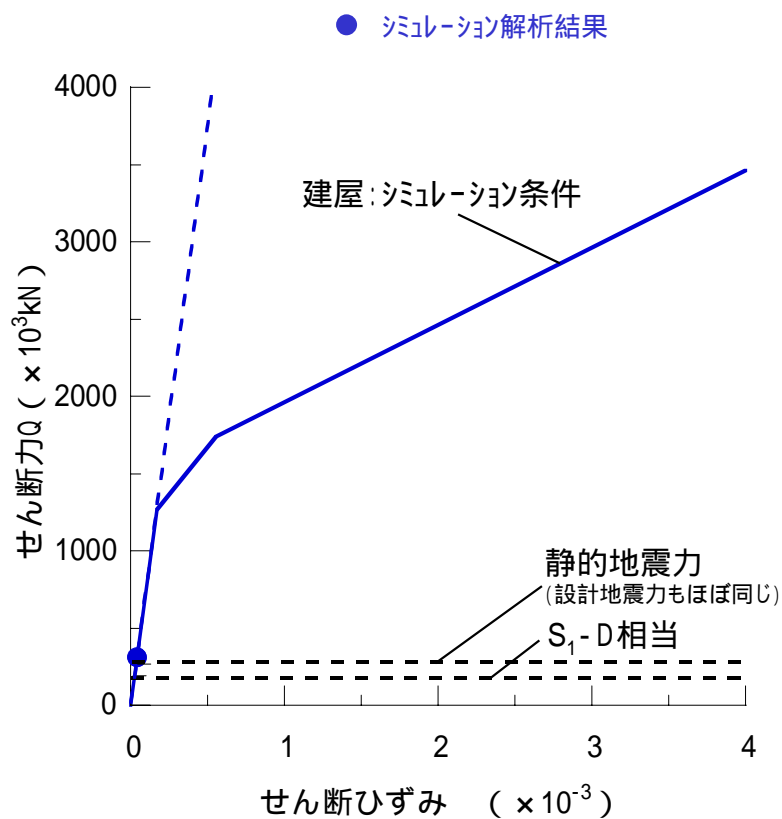
$$Q_{st} = P_w \times y \times A_s$$

P_w : 壁のせん断補強筋比
 y : 鉄筋の短期許容応力度
 A_s : 壁のせん断面積

参考：中越沖地震と設計時との比較 (スケルトン上プロット; 1号機)



基礎版上 (B5F)



中間階 (2F)

参考：考察(1号機の原子炉建屋)

- 1号機の原子炉建屋においては、中越沖地震で作用したと考えられる最大せん断力は地上部では設計用地震力とほぼ同程度のレベルであるものの、地下部においては設計用地震力を上回っている結果となっている。
- 1号機の設計用地震力は、当時の静的地震力($3C_H$)とほぼ同程度のもの。
- 地下部においては設計用地震力を上回っているものの、設計配筋量による余裕によりカバーされているものと考えられる。
- 弾塑性解析による試算では、基礎マット階などの一部の階では第一折点をやや超えているものの、おおむね弾性範囲と考えられる。

まとめ

- 7号機の原子炉建屋の場合、中越沖地震による地震動は、基礎マット上の応答結果として S_2 -Dの応答結果を上回るものであったが、耐震壁の鉄筋は短期許容応力度レベルに対して余裕があり弾性範囲内であったと考えられる。
- その大きな要因としては、一般建築物の3倍の静的地震力に工学的判断により余裕を加えた設計用地震力に比べて、中越沖地震による地震力は同等程度であったことが考えられる。
- 1号機は7号機よりも大きな地震動であったと推定されるが、ここでも設計配筋による余裕まで含めて考えるとおおむね健全となる見通し（詳細評価結果は今後提出予定）。
- 損傷がないことに対するさらなる分析として、エネルギー的評価などの多面的な検討を現在実施中であり、今後の構造WGで報告の予定。