

(19) 地下式原子力発電所の耐震性検討

電力中央研究所 正会員 駒田広也

Seismic Stability Estimation of Underground Nuclear Power Plant

Hiroya KOMADA, Central Research Institute of Electric Power Company

Abstract

Underground siting of nuclear power plant is one measures to meet the future siting which the electric utilities are currently studying. Underground caverns containing the reactor vessel are classified into tunnel type and cylindrical type by these configuration. The earthquake resistance and the safety of caverns for each type were studied during earthquake observations and numerical analyses, and following results were obtained.

- (1) From the results of earthquake observations on the existing underground hydraulic power plants, it was found that the input earthquake forces were reduced, input seismic wave spectrum were simplified and earthquake responses of reactor building were controlled at the underground siting plant.
- (2) It was obtained that the stability of underground large caverns located at castal slope in Japan were maintained.
- (3) It was analysed that the earthquake responses of reactor building, equipment and piping systemes contained undergruond caverns were less than these of the surface ground siting plant. It was consequently found that the underground siting was advantageous in terms of earthquake resistance.

1. はじめに

原子力発電所の新立地方式の1つとして、地下立地の検討が進められている。地下式原子力発電所では少なくとも原子炉格納容器は岩盤空洞に収納されることになる。これらの空洞は、水力地下発電所、山岳トンネル等の従来の岩盤空洞よりも高い耐震性が要求されることになる。原子炉格納容器を収納する空洞型式として、地形条件に応じて、水平方向に長いトンネルタイプの横型空洞と、鉛直方向に長いシリンダータイプの立型空洞が考えられる¹⁾ (図-1)。

ここでは、横型空洞ならびに立型半地下空洞での地震観測、数値解析による原子炉空洞の耐震性、および空洞内の主要機器・配管系の耐震性について考察する。

2. 地下発電所における地震観測

原子炉が設置される地下での地震動を把握する目的で、横型空洞では城山地下発電所²⁾ (幅20m、高さ40m、長さ110m)、立型

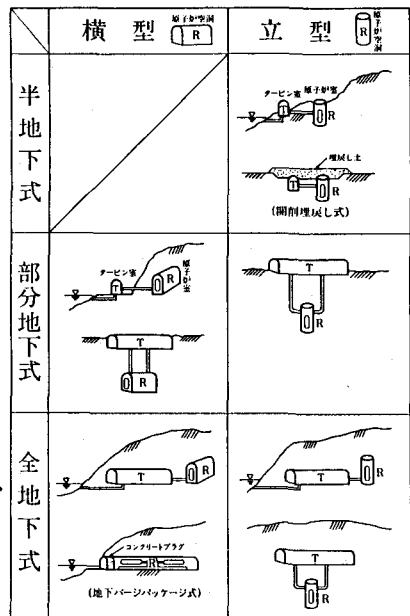


図-1 地下式原子力発電所の分類

半地下空洞では落合発電所³⁾(直径15m、深さ22m)において、それぞれ昭和51年7月、昭和59年5月より地震観測を実施している。これらの地震観測結果より地下空洞の耐震設計用地震入力特性を以下に考察する。

2. 1 横型空洞 (図-2、城山地下発電所、地表面下約200m)

(1) 地上部の最大加速度と地下約200mにある地下空洞の最大加速度との比はおおむね1/3~1の範囲であり、特に1/2前後に集中している(図-3)。すなわち、地下の地震加速度は地上の約1/2に減少している。この現象は、原子力発電所を地下空洞に収納する場合には、現在の地上立地と比較して、耐震設計用地震動はある程度軽減することが可能であることを示唆している。

(2) 地下空洞中高部側壁と地下空洞底部の最大加速度は、約2gal以上の観測値では、ほぼ同じであり地下空洞内での加速度増幅がほとんどないと考えられる(図-4)。一方、現在の地上式原子炉建屋の底部と頂部の間では5~15倍の増幅が観測されており、地下式原子力発電所において、原子炉建屋を地下空洞側壁と結合した場合には、地下空洞周辺岩盤の原子炉建屋・機器配管系に対する制震効果が十分に期待できると考えられる。

(3) 地上部の応答スペクトルは卓越周期が明確に表われるのに対して、地下空洞の応答スペクトルの形状はかなり平坦化している。さらに地下部の応答スペクトル値は、地上部に比べて震源距離が短い地震ほど減少している。この現象は、直下型地震のような震源距離が短い地震ほど被害が発生しやすい現状を考慮する

と、地上構造物に比較して地下構造物が耐震設計上有利となる。

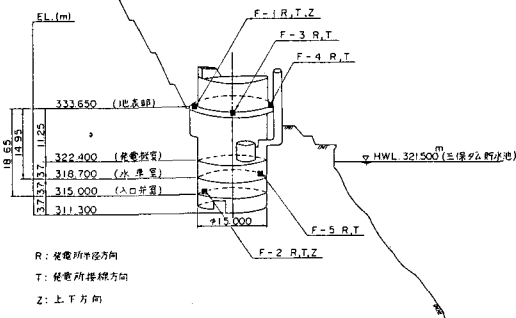


図-5 落合発電所の地震計設置位置

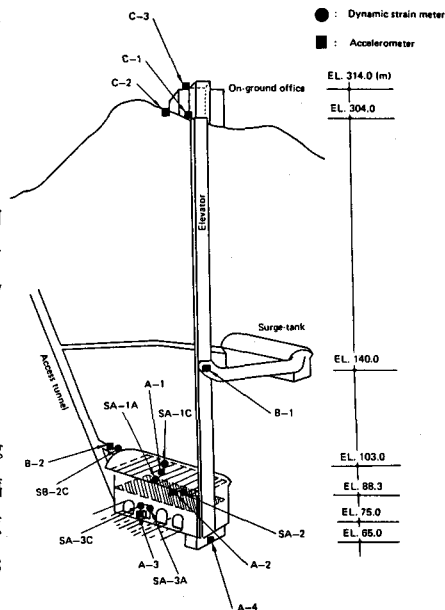


図-2 城山発電所の地震計設置位置

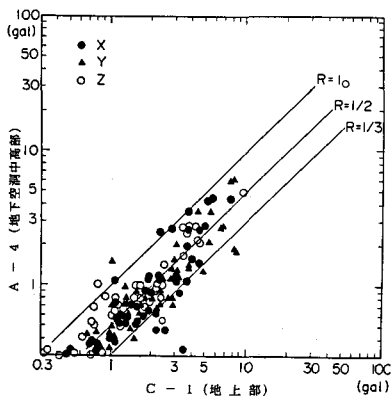


図-3 地上(C-1)と地下空洞底部(A-4)との最大加速度比

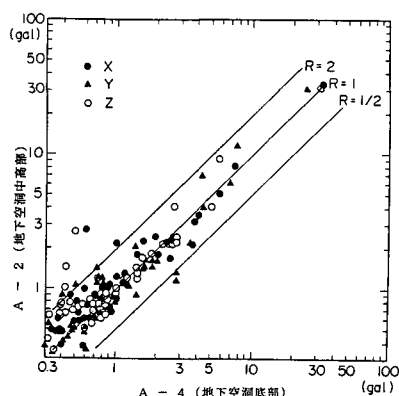


図-4 地下空洞底部(A-4)と地下空洞中高部側壁(A-2)との最大加速度比

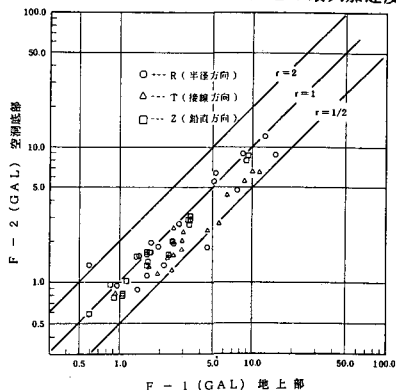


図-6 地上(F-1)と地下(F-2)との最大加速度比

2. 2 立型半地下空洞 (図-5、落合地下発電所、円筒ピット型)

(1) 観測点の地上と地下の標高差は19m程度にもかかわらず、各地震記録における地上部最大加速度に対する地下部最大加速度の比は1/2~1に集中し、地下では加速度の低減効果が現われている(図-6)。この現象は、地表から数10mの深さに基礎を置く地下構造物では、地上式に比較して構造物への地震入力が軽減する可能性があると考えられる。(2) 地上部に対する地下部のスペクトルの低減率は、比較的短周期成分が卓越する震央距離 100km以下の地震の方が比較的長周期成分が卓越する震央距離 100km以上の地震より全般的に大きい。このことは、直下型地震のような震央距離が短くて短周期成分が卓越する地震に対しては、地上構造物に比較して地下構造物が耐震設計上より有利となることを示している。

(3) 地下部の規準化応答スペクトルは地上部と同じ様に震央距離が増すにつれてスペクトルは長周期化するなど、地上部の特性に類似している。この現象は、半地下式構造物の設計スペクトル形状は従来の地上立地方式での設計スペクトル形状を用いることが可能であることを示唆している。

3. 地下空洞の地震時安定性

3. 1 静的解析法の適用

原子力発電所等の重要構造物を収納する大規模地下空洞の地震時安定性評価法としては、動的解析法によるものと静的解析法によるものが考えられる。動的解析法は地下空洞の実挙動により近い手法であり、地下空洞の耐震性評価には動的解析法によるのが望ましい。しかし、地震時における地下空洞形状の詳細検討ならびに地下空洞の補強効果の検討には、動的解析法では解析手順が煩雑であり、動的解析結果を合理的に模似できる静的解析法が必要である。ここでは、動的解析法と静的解析法による地下空洞の地震時応答を比較することにより、静的解析法の地下空洞地震時安定性評価解析への適用性を検討した。

静的解析法として、現状では①応答加速度分布に基づく等価震度法 ②応答せん断力分布に基づく等価震度法 ③応答変位法 が考えられる。これらの静的解析法で用いる解析遠方境界での加速度分布、せん断力分布、変位分布は空洞の存在に影響を受けないものとして、一次元成層地盤のせん断振動の応答分布を用いるものとしている。その分布については①最大値分布 (一次元成層地盤における時系列中の最大値分布)、②等時刻分布 (空洞の天端と底部の相対変位が最大となる時刻) が考えられる。以上の各種静的解析法と動的解析法を用いて、横型空洞について比較解析した例を図-7に示す。いずれの解析ケースでも、地下空洞周辺の最大せん断応力の大小関係は次のようになる。

動的解析 (最大値分布)
> 動的解析 (等時刻分布)
> 静的解析 (最大せん断力分布から求めた等価震度法)
> 静的解析 (等時刻加速度分布から求めた等価震度法)

しかも、最大せん断力分布から求めた等価震度による静的解析は動的解析の等

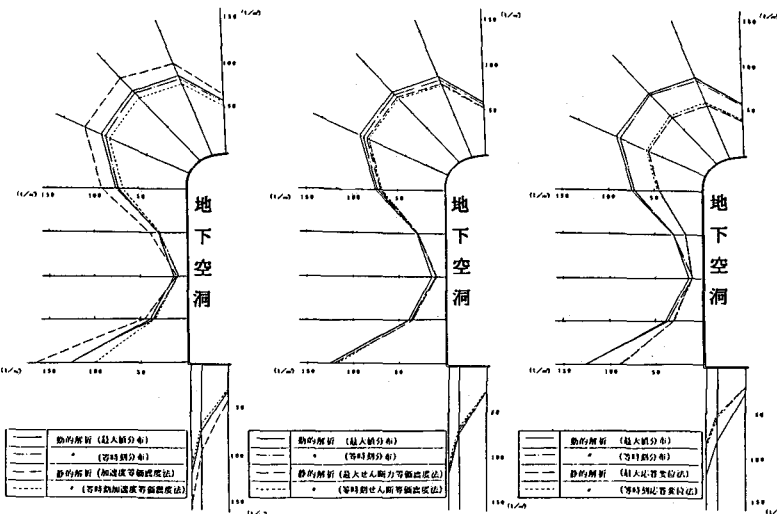


図-7 地下空洞周辺の最大せん断応力の比較例

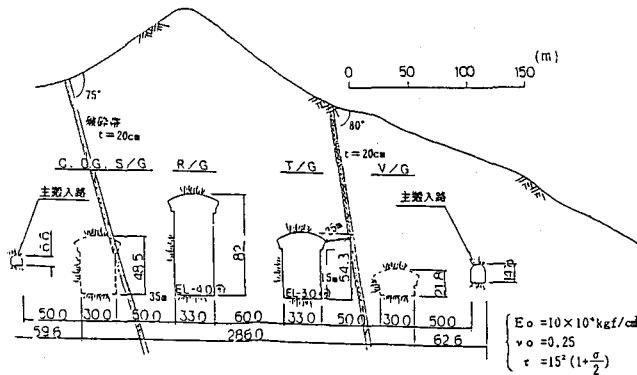


図-8 横型空洞方式の2次元解析モデル

時刻分布にほぼ一致した。この結果は立型半地下空洞の場合にも同様であった。したがって一次元成層地盤での動的応答解析結果の最大せん断力分布から求めた等価震度による静的解析が地下空洞地震時安定性評価解析として最も適用性が良いことが確認された。

3. 2 横型空洞の地震時安定性の例示

図-8に示す地下式原子力空洞群の地震時安定性を検討した。まず、地山形状の初期地圧を考慮した掘削時の応力分布ならびに空洞周辺のゆるみ域分布を解析し、さらに、前述の静的等価震度法による地震時安定性評価を行った。なお、入力地震動には標準用地震動No.6(高地震地帯S₂、M7.5、Δ24km)を用いた。

図-9に原子炉空洞ならびにタービン空洞周辺岩盤における掘削時、地震時の局所安全係数1.2の分布を示す。局所安全係数1.2以下の領域が掘削時には約12mに対して地震時には14~16mに拡大している。この程度の領域の広がりに対しては、ロックアンカー、ロックボルトおよび吹付工で十分に対処可能である。

3. 3 立型半地下空洞の地震時安定性の例示

図-10に示すように、地表面から掘削した立型半地下空洞の地震時安定性を検討した。すなわち、軸対称の初期地圧を考慮した掘削時の応力分布ならびに空洞周辺のゆるみ域分布を解析し、静的等価震度を非軸対称に作用させ、空洞周辺地山の地震時安定性評価を行った。

図-11に空洞周辺地盤の局所安全係数分布を掘削時と地震時について対比した。空洞底部付近の地盤において、地震時に局所安全係数がいくぶん低下する領域が見られる。しかし、安全係数が低下する箇所が底部であり、しかもその低下量が小さいことから、ここで検討した立型半地下空洞モデルでは、掘削時の安定性が確保されていれば、地震時の安定性も確保できると判断される。

4. 空洞内建屋・機器配管系の耐震性

地下空洞内に収納した建屋・機器配管系の耐震安定性を有限要素法等を用いて検討した⁴⁾(図-12)。

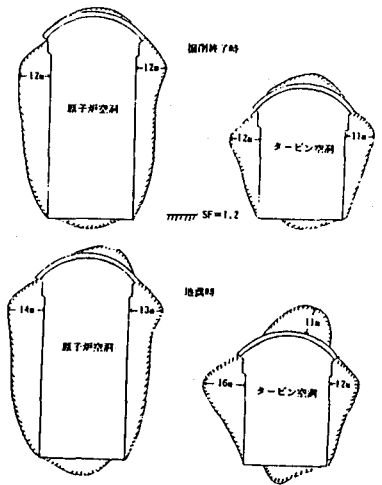


図-9 空洞周辺岩盤の局所安全係数分布

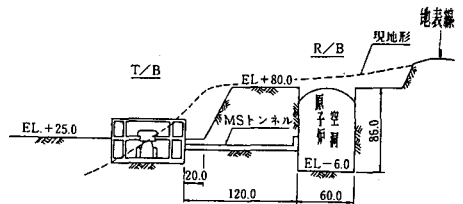


図-10 立型半地下空洞方式の断面

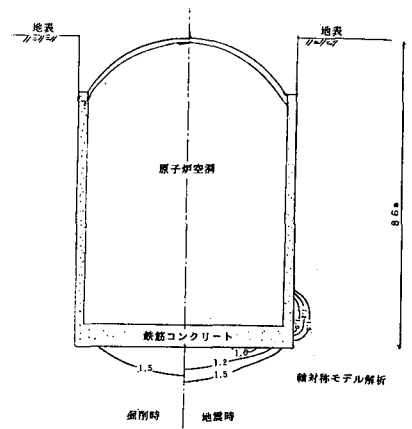


図-11 原子炉空洞周辺地盤の局所安全係数分布

すなわち、空洞周辺岩盤を横型空洞方式では二次元断面有限要素、立型半地下空洞方式では軸対称有限要素で、建屋・機器配管系をバネマス系で表現した。地下立地の方式として、立型半地下式、立型地下式、横型地下式を想定し、さらに比較のために地上式についても、地震時の応答解析を実施した(図-13)。入力地震波には標準用地震動No.5(高地震地帯S、M8.4、 $\Delta 90\text{km}$)を用いた。

PWR型炉について、建屋・機器配管系主要部の応答加速度、応答せん断応力等の相対比較した結果の一例を図-14に示す。地上式の応答値を基準円として、各種地下式の応答値を地上式の応答値との比率で示した。同図に示されるように建屋および機器の応答に関しては、地上式は半地下式、地下式(立型、横型)より全般的に大きい。また、横型地下式は立型半地下式および立型地下式より大きい傾向がみられる。一般に地下式(立型、横型、立型半地下式)の方が地上式に比べ建屋および機器の耐震設計の観点からは有利と考えられる。特に地下式では空洞壁面に取付けられるクレーン取付部の加速度は地上式の2~3割程度に減少していることがわかる。

5. まとめ

原子炉を収納する空洞の形状により、横型空洞と立型空洞に分類し、それぞれの耐震性を地震観測ならびに数値解析によって検討し、以下のことを示した。

- ① 水力地下発電所空洞での地震観測より、地上式に比較して、地下式は地震入力の軽減、地震波スペクトル形状の平坦化、空洞内建屋・機器への制震効果等が期待できる。
- ② 我が国の海岸山腹で比較的多く存在する岩盤条件においても地下空洞の安定が保持できる。
- ③ 空洞に収納された建屋・機器配管系の地震時応答は、地上式よりも減少し、地下式は耐震設計上有利である。

参考文献

- 1) 電力土木技術協会編：電力施設地下構造物の設計と施工、pp.955~1037、1986
- 2) 駒田広也：地下空洞における地震観測—横型地下空洞の地震時挙動—電中研報385043、1986
- 3) 駒田広也 他：地下空洞における地震観測—円筒ピット立型地下空洞の地震時挙動—電中研報告U86031、1988
- 4) 駒田広也 他：地下式原子力発電所における原子炉建屋および機器配管系の耐震性検討、；(その1)電中研報告383010、1983；(その2)電中研報告U86009、1986；(その3)電中研報告U86010、1986

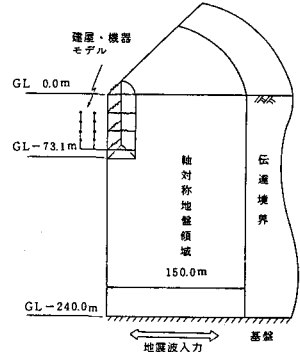


図-12 建屋・機器配管系の地震応答解析モデル(立型半地下空洞の場合)

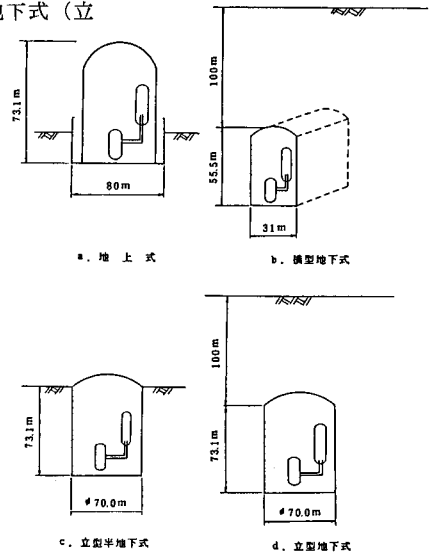


図-13 検討した立地方式の種類

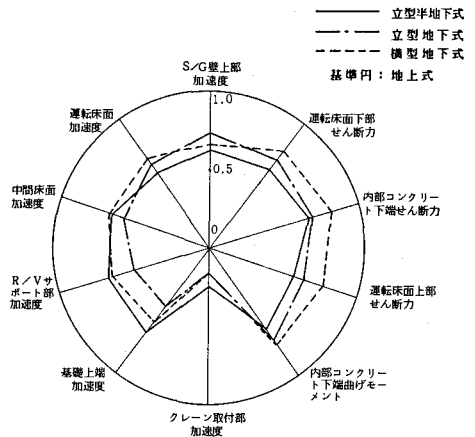


図-14 PWRの建屋・機器配管系主要部の応答比較