

# 発電所や変電所等の地震被害と地盤の関係及び損傷部位に関する研究

元前橋工科大学 フェロー会員 那須 誠

## 1. 目的

これまでに地震被害を受けた構造物と地盤の関係を調べ、各種構造物が地盤の不連続点で地盤の上下・水平方向の不同変位等で被害を受けることが多いことと、損傷を受けやすい構造部位は剛性変化点変化点等の不連続点であること等を明らかにして発表してきた。今回は、地震時や平常時に発電所や変電所等の設備が損傷することがあり、その地盤を調べるとともに損傷部位を調べた。その結果、地盤の不連続点で損傷が発生しやすいことと、損傷しやすい構造物部位が剛性変化点であることが分かったので、その結果を報告する。

## 2. 被害発生箇所の地盤と損傷部位

表-1 に示す発電所や変電所等で被害が発生した地盤の調査結果を次に述べる。

### (1) 白山変電所<sup>1)</sup>

1964年の新潟地震の際に地滑りが発生した新潟市にある白山変電所の地盤は、図-1の旧地形図(文献2)に新潟地震被害箇所を加筆)によると、信濃川内の砂洲と河川敷の境界部の埋立地の砂質埋立地盤である。この地盤において約7mの地滑りが発生した(図-2(a))。図-2(b)をみると埋立地盤の底面(埋没砂丘表面)は傾斜し、かつ途中深さにあつて標準貫入試験のN値が極めて小さい所や極小値を示すところには極軟弱な粘性土層が存在しており、この粘性土層が地震時に滑り面になって地滑りが生じたことが考えられる。すなわち、この地盤には傾斜と極軟弱粘性土層が存在しており、この上の構造物は地震被害を受けやすい地盤である。

### (2) 仙台変電所<sup>1)</sup>

1978年の宮城県沖地震の際に、仙台変電所で変圧器のブッシング折損や遮断器、壁雷器等に倒壊等の大きな被害と、超高圧設備などの大型碍管類に損壊などの被害が多く発生した。ブッシング全数が破損して特に被害の大きかった変圧器は盛土上にあつた。切土部では被害が軽微であり、碍子機器の被害もほとんどが盛土と地山であり、切土上にあるものは殆ど被害がなく、地盤と

表-1 調査対象の発電所や変電所名の一覧表

No.	発電所や変電所名
1	新潟市白山変電所(1964年新潟地震)
2	仙台変電所(1978年宮城県沖地震、2011年東日本大震災)
3	秋田火力発電所(1983年日本海中部地震)
4	柏崎刈羽原子力発電所(2007年新潟県中越沖地震)
5	新福島変電所(2011年東北地方太平洋沖地震)
6	浜岡原子力発電所(2009年駿河湾地震)
7	ノースアンナ原子力発電所(2011 North Anna Earthquake, 米国)

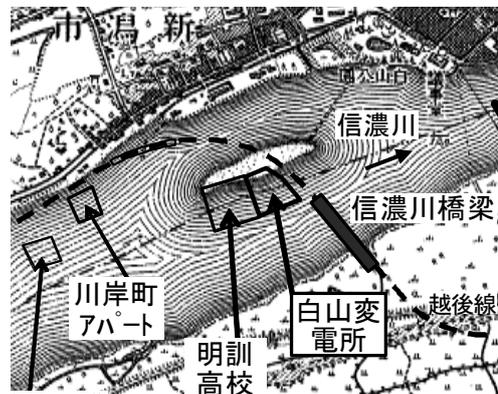


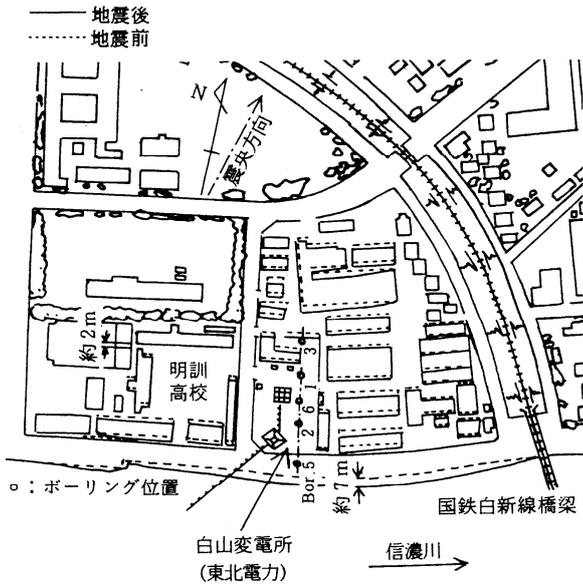
図-1 旧地形図(1911年地形図<sup>2)</sup>に加筆)

被害の間に相関性が認められる。

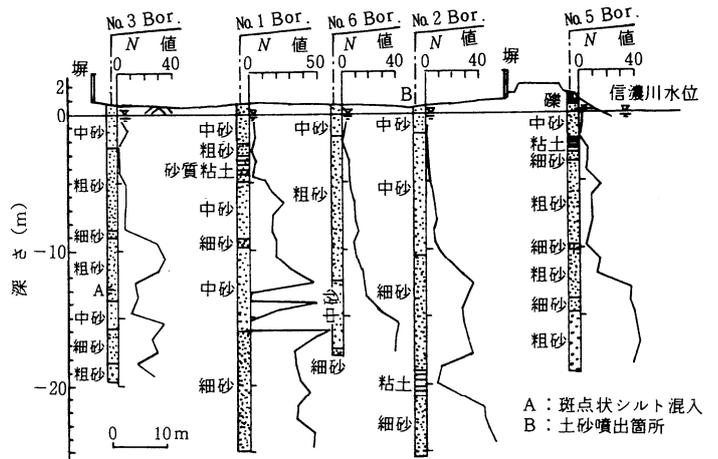
この地盤は図-3, 4に示すように旧地形の沢部に造成されており、詳しくみると盛土と地山の境界付近で、盛土が比較的薄くかつその底面が縦横断方向に傾斜したところで大きい被害が発生していることが分かる(図-5)。また、図-6に示すようにここは砂・礫層の下にN値が極小値を示す極軟弱な土層(粘性土層)がある互層地盤である。このようにこの変電所の大きい地震被害も、盛土や建物等の地震被害と同様に傾斜構造のある上下逆転型地盤で発生している。

### (3) 秋田火力発電所<sup>1)</sup>

1983年日本海中部地震の際に、秋田火力発電所でボイラー本体振止めサポートの一部の軽微な損傷の他、10号炉の付属装置にスロッシングに伴う浮き屋根の付属装置の接触破損、構内道路の一部舗装に亀裂発生、敷地に極め



(a) 平面図とボーリング位置



(b) 地盤断面図 (右図のBor. 3~5)

図-2 白山変電所付近の地滑りと地盤状態<sup>1)</sup>



図-3 旧地形図 (1946年修正地形図)<sup>3)</sup>に加筆



図-4 新地形図 (1977年第2回改測地形図)<sup>3)</sup>に加筆

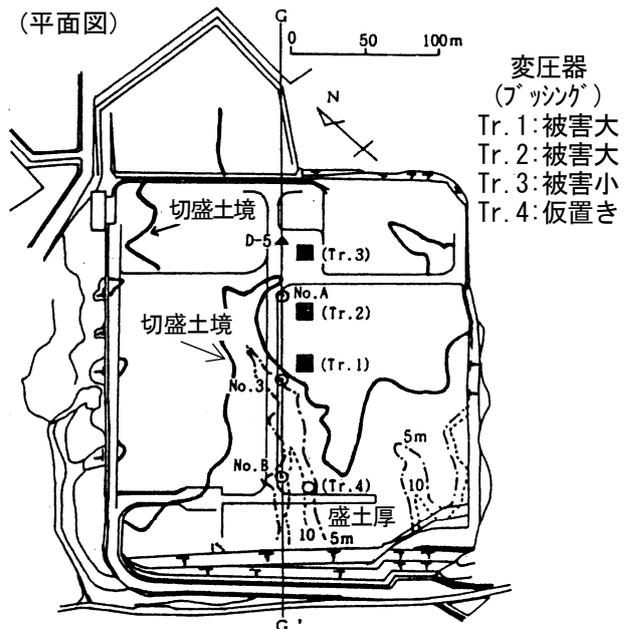


図-5 仙台変電所の原地形と変圧器位置とボーリング位置<sup>1)</sup>

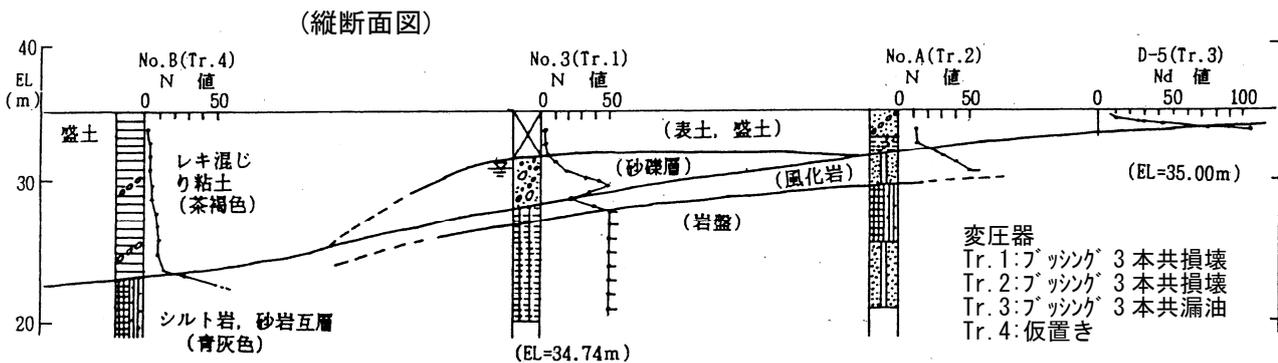


図-6 仙台変電所の地盤状態 (図-5のG-G' 断面)<sup>1)</sup>



図-7 秋田火力発電所付近の旧地形図<sup>1)</sup>

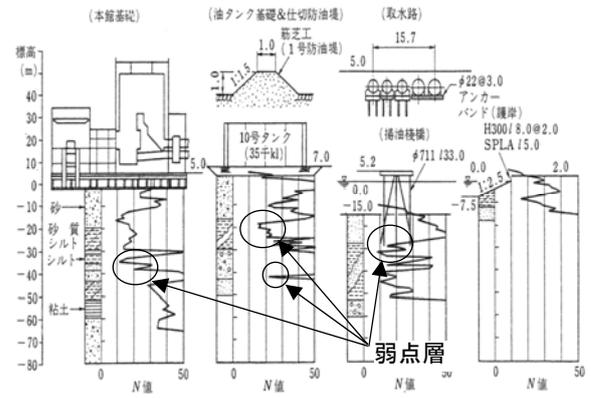
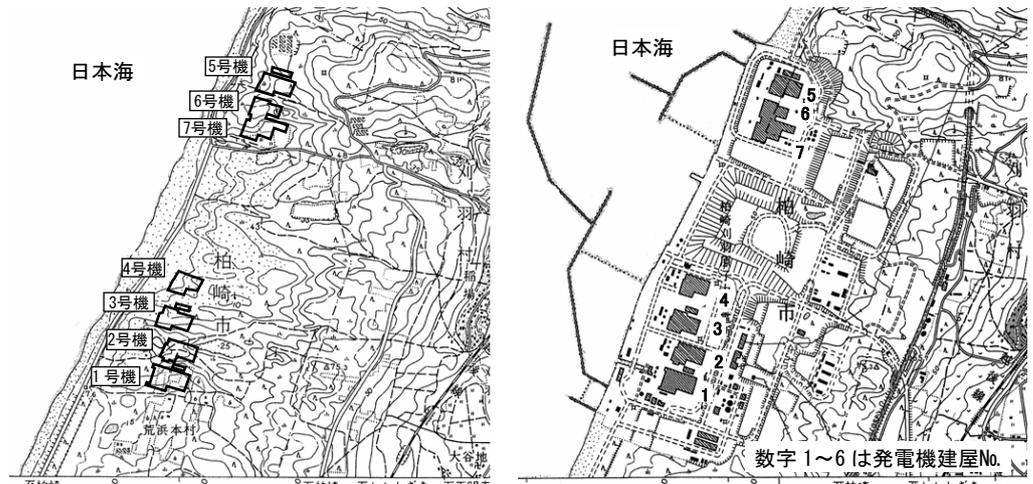


図-8 秋田火力発電所内地盤の土質柱状図<sup>1)</sup>

て局所的な陥没が発生した。地盤は図-7の地形図のほかに表層地質図等をみると複雑に入り組んだ土崎砂丘台地であるが、砂丘間低地にも跨って各施設がつくられていることから、切土・盛土されて敷地が造成されていることが分かる。また、この被害原因は燃焼炉等の液面振動等にあるとされて



(a) 1973年発行地形図(発電機建屋追加) (b) 2002年発行地形図(発電機建屋No.追加)

図-9 柏崎刈羽原子力発電所付近の地形図<sup>2)</sup>

いるが、図-8をみると標準貫入試験のN値が極小値を示す弱点層(軟弱粘性土層と思われる)が位置によって異なる深さに存在しており、施設の多くは異種支持地盤状態で、かつ軟弱粘性土層が中間深さに存在していたため被害が発生したことが推察される。

なお、ここでの地盤の亀裂や陥没等の変状と同様の地盤変状が次に述べる2007年新潟県中越沖地震の際に柏崎刈羽原発の敷地でも発生しており、両者で地盤構造(形状や土質構成等)の類似性が考えられる。

#### (4) 柏崎刈羽原子力発電所

2007年新潟県中越沖地震の際に、柏崎刈羽原子力発電所構内(図-9)<sup>4)</sup>において大きい地盤陥没(例えば、図-10<sup>5)</sup>)や火災等が発生した。支持台沈下の影響で発生した変圧器火災(同図の丸印内)は、図-11(文献に加筆)に示すように新期・古期砂丘堆積物の境界部で発生した<sup>6)</sup>。地盤陥没は建屋・地盤境界部等で多く発生しており、それらは過去の地盤陥没箇所と同様に不連続点で発生している(例えば、図-10では建物と地盤の境界部)。建物

と地盤の境界部等では地下水浸透が大きくなる場所であり、しかも普段の揚水(液状化防止用)が陥没を大きくさせたことが推定される<sup>4)</sup>。さらに、図-10示すように原子炉建屋等の東側壁(山側側壁)に沿って地盤が隆起し(盛上がり)、西側壁(海側側壁)に沿っては地盤と側壁が分離して隙間が発生しているのは、その剛な建屋が基礎岩盤に岩着して不動点となつて地盤変位抵抗型構造物となつていたところに、地震で東側(山側)から西側(海側)に動いた地盤が東側壁で止められたり、反対側の西側壁側で離れたためと推察される<sup>4)</sup>。即ち、図-12のような現象の発生が考えられる。

ここでは原子炉建屋基礎版上部(最下階)の地震加速度が表層土層の厚い所ほど(基礎岩盤面の深い所ほど)大きい加速度が記録されているが、これと類似の関係が2005年福岡県西方沖地震の際の福岡市内警固断層付近でも得られているし、南北方向よりも東西方向加速度成分が大きいのは原発建屋が東側(山側)から西側(海側)に海側に傾斜する堆積地層上に設置されていて、地

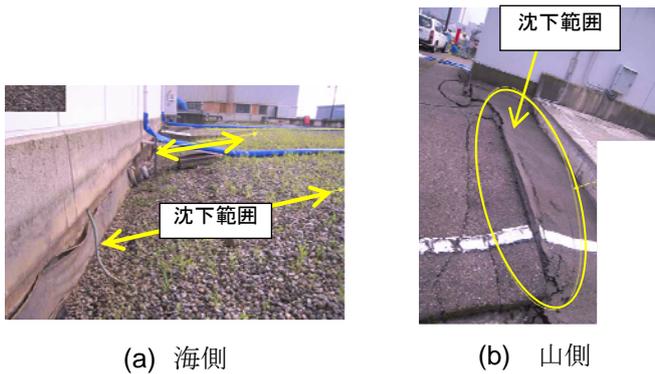


図-10 2号機熱交換建屋脇の地盤変状<sup>5)</sup>

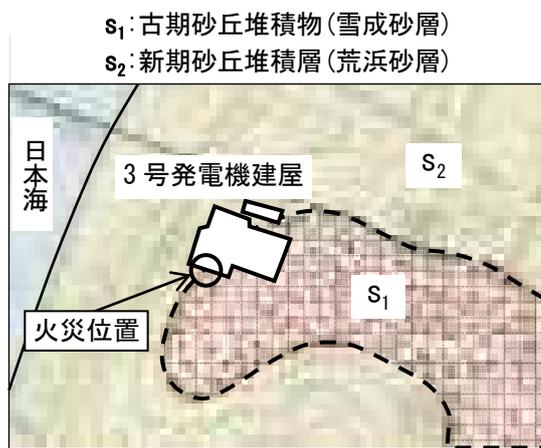


図-11 3号発電機建屋周辺の地質図<sup>6)</sup>

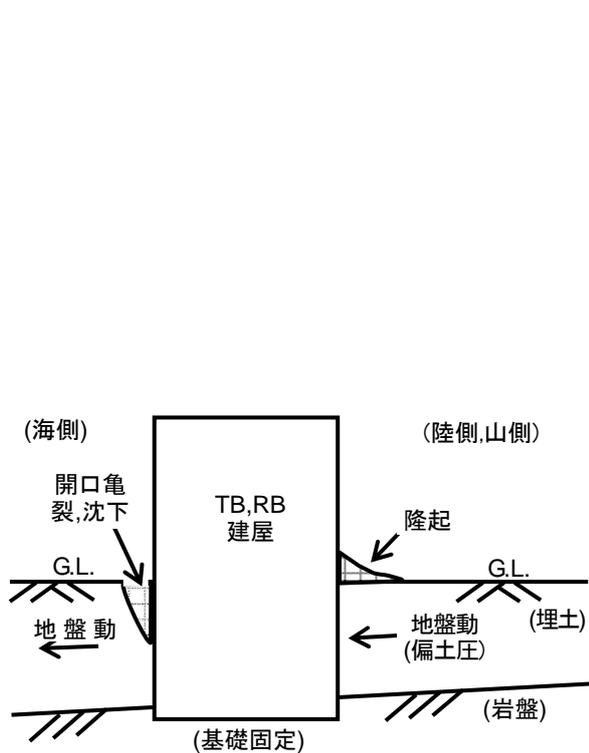


図-12 原子炉建屋周辺の地盤変状推定模式図<sup>4)</sup>

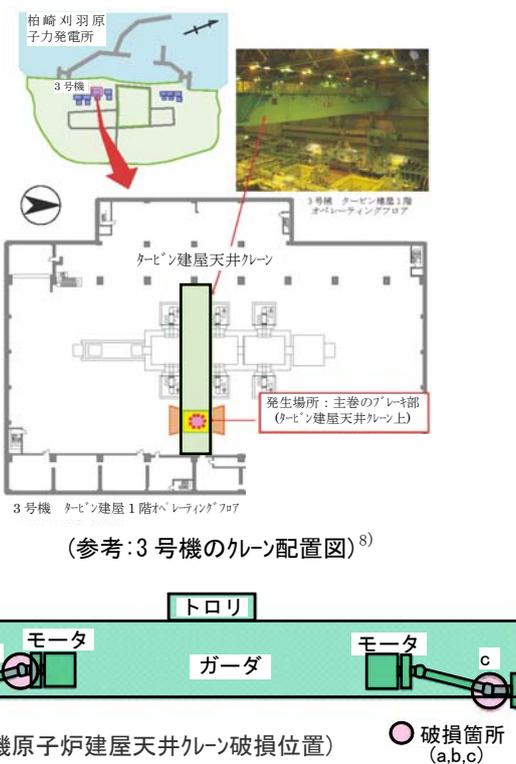


図-13 6号機原子炉建屋天井クレーン駆動軸継手の破損(新潟県中越沖地震)<sup>7)</sup>

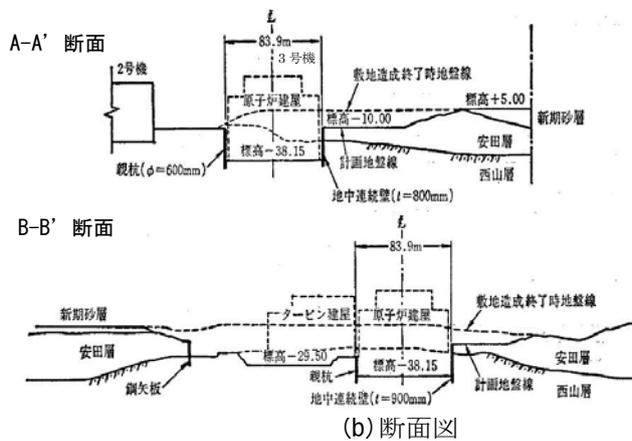
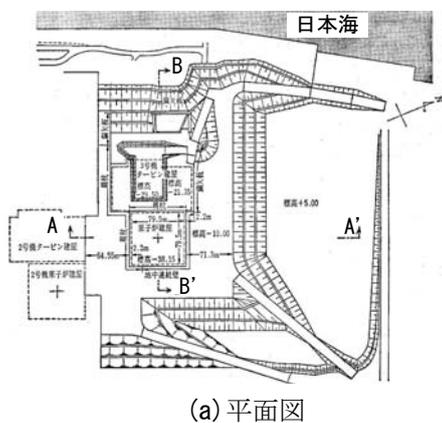


図-14 柏崎刈羽原子力発電所基礎掘削形状例(3号機)<sup>11)</sup>

震のときに地盤の傾斜方向に地盤が動きやすいため、東西方向の加速度が大きく出たことが考えられるし、盛り上がりなどが生じた地盤の方向と同じ東西方向である<sup>4)</sup>。

この構内で構造物や工作物にも地震被害が発生した。例えば、**図-13**<sup>7)</sup>に示すように6号機原子炉建屋天井クレーンの駆動軸継手が破損しているが、クレーンは東西方向に配置されているので、それには**図-10**、**12**のよ

うな地盤の東西方向変位とそれに伴う土圧(受働土圧)の作用の影響が考えられる。そのような地震時の受働土圧の作用は1995年兵庫県南部地震の際に地下鉄トンネルボックスを变形させた、池跡埋土からのボックス底部への受働土圧の作用<sup>9)</sup>や、神戸市役所2号館で層崩壊を発生させた、周辺地盤からの基礎や地下室等への受働土圧の作用<sup>10)</sup>などと似ており、いずれの場合も構造物の上部が変形している。

なお、**図-14**<sup>11)</sup>に基礎の掘削状況と建物の配置と地盤状態が示されている。この図から安田層と西山層からなる地盤の内、上記のような地盤の動き発生したとすれば、上層の安田層が地震で動いたことが推察されるが、今後もさらなる検討が必要である。

(5) 新福島変電所

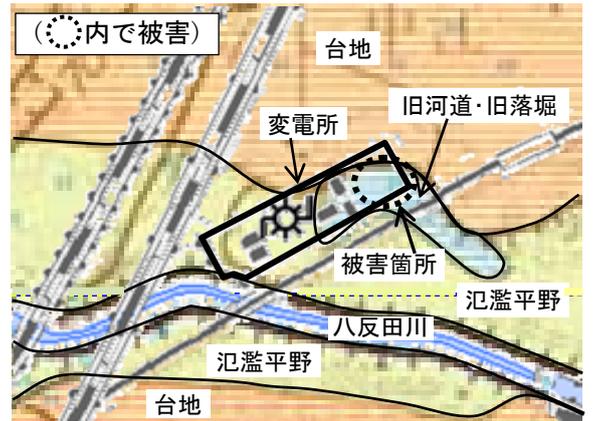
2011年の東日本大震災のときに東北新幹線新福島変電所において、変圧器のブッシング損傷等の比較的大きな被害が発生した(**図-15(a)**)<sup>12)</sup>。この地盤は**図-15(c)**(文献13)に追加に示すように、変電所敷地の北東端部は氾濫平野(旧河道)と台地の境界部である。その北東端部にあるブッシングが西側に曲がり、その内北端のもの、即ち地層境界部に最も近くにあるものが最も



(a) 変形状態<sup>12)</sup>

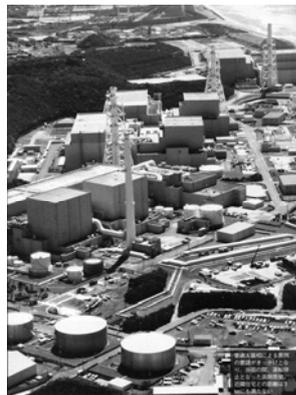


(b) 空中写真<sup>14)</sup>(位置はc図参照)



(c) 地盤状態(文献13)に地形図より追加

**図-15** 新福島変電所周辺の地盤と被害状況



(a) 全体写真



(b) 地盤変状

**図-16** 浜岡原子力発電所内の地盤変状(2009年駿河湾地震)<sup>16)</sup>

大きく屈曲しており、地盤との関係が認められる。旧河道部には極軟弱な土層(粘性土層等)堆積していることが多い。この変電所の大きい地震被害も、盛土や建物等の地震被害と同様に地盤の不連続点でかつ上下逆転型地盤で発生したことが推察される<sup>14)</sup>。

(6) 浜岡原子力発電所(2009年駿河湾地震)

2009年8月11日に静岡県御前崎沖の駿河湾で発生した地震(M6.5)で、**図-16**に示すように浜岡原子力発電所内の地盤で沈下や隆起が発生している<sup>16)</sup>。文献26)や地形図等を比較すると、ここの原子炉建屋等のいくつかは浜岡砂丘(未固結砂質堆積物)と丘陵地(半固結相良層群泥層)の境界部、浜岡砂丘とすべり指定地の境界部に存在することが分かる。また、柏崎・刈羽原子力発電所と同様に地盤を掘削して建屋等が設置されているため、地震時に発生した比較的大きな地盤の変位(不同

変位等)によって、後者と  
同様な地盤変状が生じた  
ことが考えられる。しかし、  
今後地盤変状の発生位置  
等を明らかにして、地盤状  
態や施工状況と地盤変状  
の関係の詳細な調査が必要  
である。

(7) ノースナ原子力発電所  
(2011 North Anna  
Earthquake)

2011年8月発生のノースナ  
地震(Mw5.8, 米国)でノースナ  
原子力発電所(図-17)にお  
いて、構造物や工作物等に  
各種の被害が発生した<sup>17),18)</sup>。

図-18<sup>18)</sup>は原子炉格納容  
器室壁の亀裂、屋外放射性廃  
棄物貯留タンクの移動、循環  
水漏水、タービン建屋内廊下  
のブロック壁面亀裂、復水脱  
塩装置タンク柱脚基礎コンクリ  
ート損傷等を示す。原子炉格  
納容器 Unit 1 と 2 の構造

と地盤の関係は図-17 に示  
されており、格納容器建屋側  
面と掘削壁面の間はエキス  
パンションジョイントファイ  
アが挿入されるとともに  
コンクリートで埋め戻され、  
上方は締め固めた埋戻し土  
となっていて、同建屋は側  
方も地盤にしっかりと固定  
されているように見える。  
その外の検査結果もみると  
地盤にしっかりと固定され  
ている工作物は地震で被害  
がないようにみられるが、  
壁面等に亀裂等の損傷が  
出ているので地盤の影響も  
考えられるので、今後も調  
査が必要である。

3. 発電所における損傷部位

一般的に各種構造物の損傷  
部位は地震時、常時に関係  
なく不連続点(剛性変化点等)  
で多くみられるが<sup>1),2)</sup>、  
以下に発電所における損傷  
部位としていくつかの事例  
を示す。但し、(1)は地震  
時の損傷例、(2)以下は常  
時の損傷事例である。

(1) 変圧器のブッシング

変圧器のブッシングでは、  
例えば図-15(a)等に述べた  
ようにジョイント部等の剛性  
変化点で損傷が多く認めら  
れる。

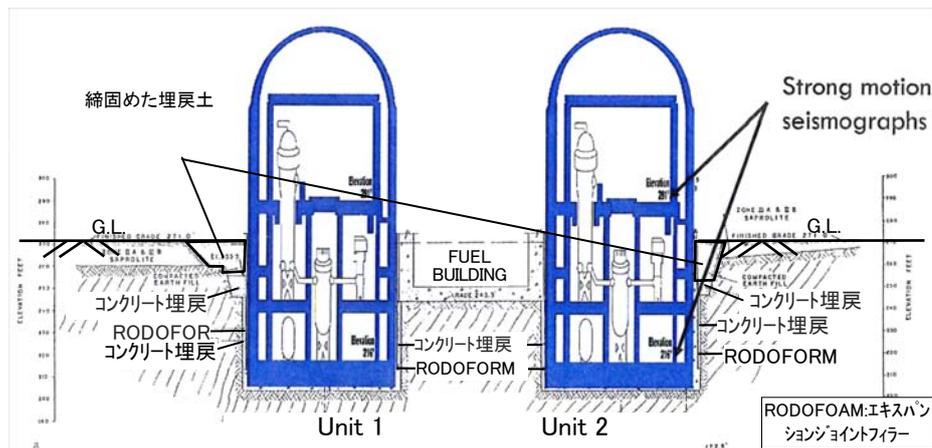


図-17 原子炉格納容器 Units 1 & 2 の構造と地盤<sup>17)</sup>

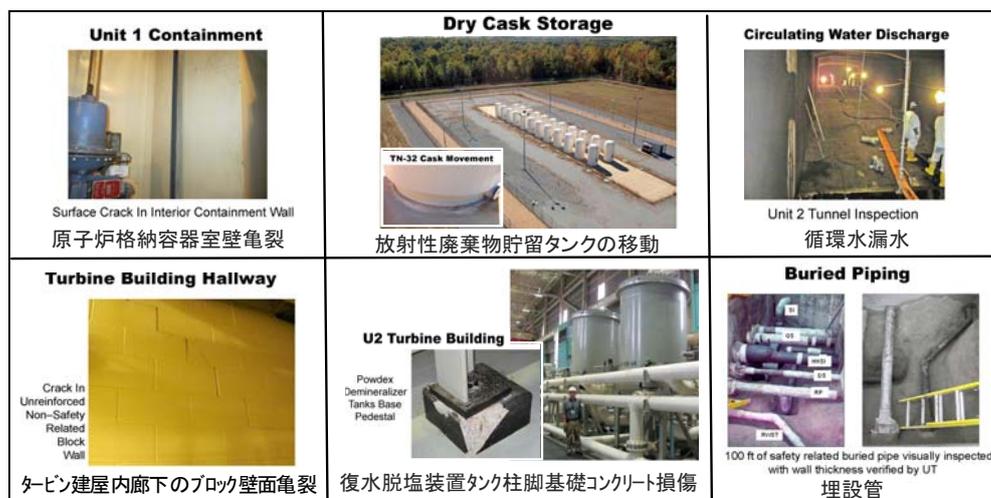


図-18 ノースナ原子力発電所での各種被害状況<sup>18)</sup>

(2) 温度計

高速増殖炉もんじゅの2次二次冷却系配管のトリウム温度計鞘管の損傷は「常陽」でなく「もんじゅ」で発生したが、もんじゅでは鞘管太さの急変化部で発生している(図-19(a), (b))<sup>1)</sup>。即ち、そこは剛性変化度の大きい部位(不連続点)であって、地盤の不連続点で地震被害が多いのと類似であると共に、一般的に損傷しやすい部位に当たる。暫らく経ってからもんじゅの温度計鞘管は図-19(c)に示すように折れにくく改造されているが<sup>19),27)</sup>、それをみると鞘管太さの変化部が緩やかに変化しており、剛性変化度が低下したことに相当している。これはこれまでに問題が発生していない図-19(a)の常陽の温度計鞘管の形状に近く、しかも電気コードとプラグの接続部の構造が図-20の(a)から(b)のように改良されてからコード損傷が少なくなったこと等と似ている<sup>1)</sup>。

(3) 配管

1972年6月に蒸気発生器細管漏洩事故<sup>20)</sup>をおこした美浜原子力発電所では、1991年に復水配管の減肉部で破

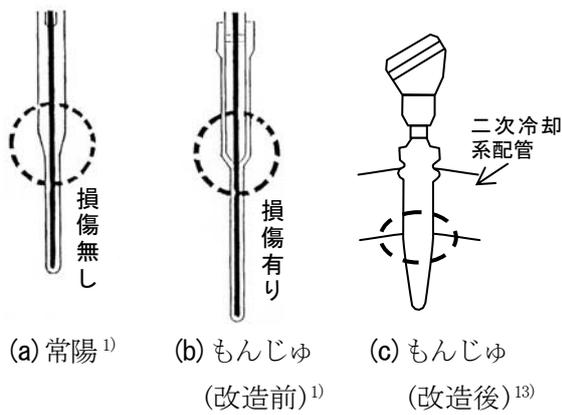


図-19 温度計鞘管の形状(破線○内が太さ変化部)

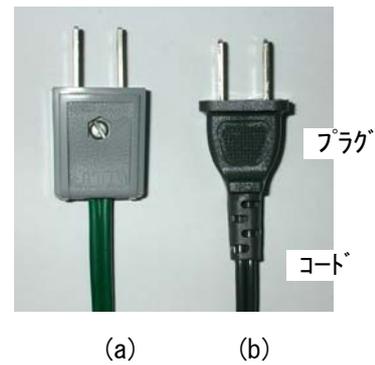


図-20 プラグとコードの接続部<sup>1)</sup>

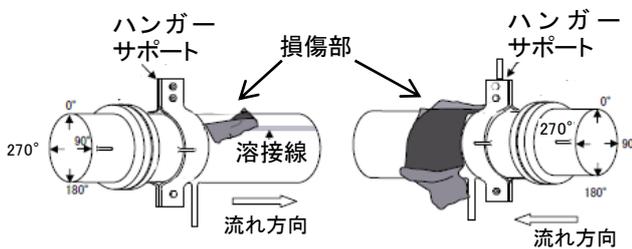


図-21 A-1 配管破損状況<sup>21)</sup>

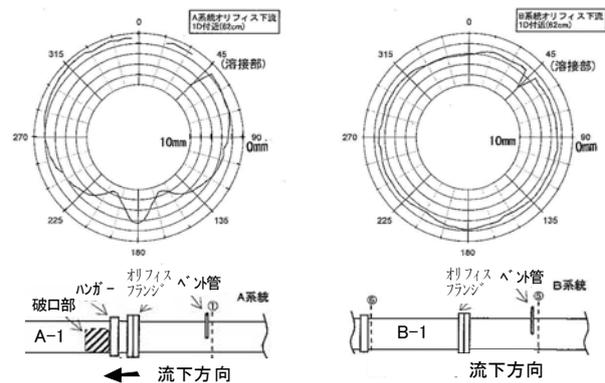


図-22 A-1, B-1 配管オリフィス下流部の減肉状況<sup>21)</sup>

断が発生しているが、その破断箇所は単に減肉で薄くなったところではなくハンガーサポート部を始点として発生しており(図-21)<sup>21)</sup>、剛性の急変化点(不連続点)と考えられる位置である<sup>1)</sup>。配管にはA系統とB系統の2本あり、両者の配管減肉状況(材料肉厚約10mm)を図-22<sup>21)</sup>に示す。その図をみるとB系統の配管減肉は溶接線部を除くと全周に渡ってほぼ一様に発生している。しかし、A系統配管では両図をみると、240°付近から左回り方向に殆ど減肉が少ない溶接線部(45°付近)にかけて肉厚の非常に薄い部分があり、そこがハンガーサポート部を始点として破損していることが分かる。その破損はあたかも風船全体がかなり薄くても一様な厚さなら破損しないが局部的に薄いところがあるとそこから破損するのと似ている。

その外に、上述のナース原子力発電所で1987年に1次冷却水と2次冷却水との熱を交換する蒸気発生器において伝熱管が完全に破断する事故が起きている<sup>22)</sup>。2012



図-23 水抜き配管損傷<sup>16)</sup>

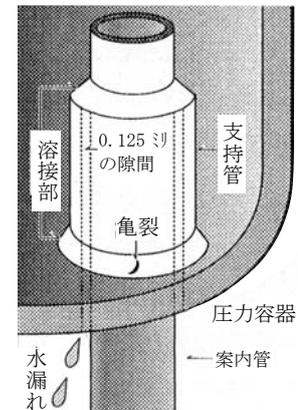


図-24 原子炉压力容器損傷例<sup>14)</sup>

年にはナール原子力発電所で蒸気発生器の配管が破損して水が漏れている<sup>23)</sup>。浜岡原子力発電所では2001年11月に蒸気配管の破断が生じ、2002年5月には母管との接続部の点検用水抜き配管の溶接部で水漏れ事故が発生しており(図-23)<sup>16)</sup>、<sup>24)</sup>、ここは剛性変化点である。島根原子力発電所では2006年11月に定期検査中の肉厚測定で、1号機の復水フィルタ出口ヘッダー配管に必要最小肉厚未滿が確認されているが<sup>28)</sup>、ここは継ぎ手部であ

り剛性変化点に相当する。

以上のように、給水・復水系、抽気系等の配管で従来から減肉が生じやすいことが知られているし<sup>28)</sup>、その他にも配管類の損傷がいくつかみられるが、剛性変化点で特に多いようである。

#### (4) 原子炉圧力容器

原子力発電施設の原子炉圧力容器等の亀裂が溶接部等で多い。例えば、図-24<sup>14)</sup>は圧力容器と支持管の溶接接続部に亀裂が入って水漏れが生じたことを示す。

#### (5) その他

浜岡原子力発電所では2006年6月にはタービン羽の破損(動翼が車軸への取付部が折れて脱落)が発生しているが<sup>16), 25)</sup>、この取り付け部は剛性変化点変化点である。

上記したように工作物の損傷には不連続点(剛性変化点)での損傷が多くみられ、発電所や変電所等が地盤の不連続点で被害を受けやすいのと類似であり、一般的に損傷しやすい部位に当たる<sup>14), 15)</sup>。

### 3. あとがき

以上に述べた発電所や変電所などの地震被害は一様地盤でなく地盤の土質や地形等の不連続点で受けていて地盤の影響が大きいこと、また工作物の損傷部位も地震、常時に関わらず一般的に損傷しやすい部位<sup>6), 15)</sup>の剛性変化点(不連続点)で多いことが分かった。また、国が異なっても発電所で同様な被害が発生していることも分かった。なお、以上のような地盤では構造物全体を地盤変位追従型の基礎構造(摩擦基礎や浮基礎)にするか、岩着基礎の場合は表層地盤と建屋側壁の間にドライエリアをつくると地盤から力を受けず、地震対策工法として有効と考えられる。工作物の損傷は剛性変化点の変化度を低下することも有効と考えられる。おわりに、以上の調査でお世話になった文献の著者他の多くの方々に厚く御礼を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 那須誠: 発電設備の地震被害等と地盤の関係, 安全工学シンポジウム2012, GS5-3, 2012. 7.
- 2) 2.5万分1地形図, 新潟南部, 1911年測図, 同年4月発行.
- 3) 2.5万分1地形図, 仙台東北部, 昭和21年修正, 昭和52年第2回改測, 地図で見る仙台の変遷より.
- 4) 那須誠: 新潟県中越沖地震による発電所構内の地盤陥没被害等の考察, 第43回地盤工学研究発表会講演集, CD-ROM, No. 785, pp. 2008. 7.
- 5) 柏崎刈羽原子力発電所視察報告, 報告者: 国生, 2007年新潟県中越沖地震災害調査報告会資料集, 土木学会, 地盤工学会, 日本地震工学会他, 2007. 8.
- 6) 那須誠: 各種構造物に問題が発生しやすい部位に関

- する研究, 安全工学シンポジウム2009, pp. 126-129, 2009. 7.
- 7) 新潟県中越沖地震での発電所状況, 6号機原子炉建屋天井クレーンを駆動させる軸の継手の破損, <http://aoisora.org/genpatu/2011/tepcodata/20110409151130/jisho09-j.html>
- 8) 柏崎刈羽原子力発電所3号機タービン建屋天井クレーン主巻上げ装置ブレーキ部における火災発生の原因および対策について, 参考資料2-1, 東京電力株式会社 H. P., 2009. 12.
- 9) 那須誠: 地盤不連続点と地震時と常時のトンネル等の被害の関係, 第56回地盤工学シンポジウム論文集, No. 8, pp. 45-52, 2011. 11.
- 10) 那須誠: 各種構造物の地震被害機構と地盤不連続点の関係, 第31回土木学会地震工学研究発表会講演論文集, No.2-129, 2011. 11.
- 11) 黒田輝夫, 寺田賢二, 植木一浩: 柏崎刈羽原子力発電所基礎掘削工事における山留工の設計と挙動解析結果, 土と基礎, Vol. 37, No. 8, 1989. 8.
- 12) 東日本大震災による地上設備の被害と復旧状況について, JR 東日本 H. P., 2011. 4. 1.
- 13) 国土地理院編: 2,5000分の1, 治水地形分類図, 福島北部, 技術資料番号: D・1-No. 441, 調査年1977年.
- 14) 那須誠: 地震による被害構造物と無被害構造物の地盤の違い, 土木建設技術シンポジウム2003講演論文集, pp. 299-306, 2003. 7.
- 15) 那須誠: 各種構造物の問題発生への不連続点の影響, 土木建設技術シンポジウム2004論文集, IV-3, pp. 225-232, 2004. 7.
- 16) 週刊現代, 2011年5月28日.
- 17) Russell Green: 地盤工学会関東支部主催国際講演会「米国での原子力発電所の設計地震動設定のための液状化痕跡調査」配布資料, Paleoliquefaction Investigations for Determining the Design Ground Motions for Nuclear Power Plants in the Central and Eastern US, 地盤工学会, 2012. 6. 14.
- 18) North Anna Earthquake Information, <http://dom.com/about/stations/nuclear/north-anna/update.jsp>, 2012. 6. 17.
- 19) もんじゅ 事故から10年, 朝日新聞, 2005. 12. 5.
- 20) 小野周: 関西電力美浜原子力発電所の蒸気発生器の事故, 科学, 44-9, 574-575, 1974. 9.
- 21) 関西電力美浜発電所3号機二次系配管破損事故に関する中間とりまとめ(案), 原子力安全・保安院 H. P., 2004. 9. 27.
- 22) ナアツ原子力発電所, WIKIPEDIA, 2013. 6. 26.
- 23) 米カリフォルニア州南部のサンオフ原発, 蒸気発生器の配管破損で停止中; 原発水漏れ, NRC 配管破損の原因指摘, 朝日新聞, 2012. 6. 22.
- 24) 浜岡2号機点検用水抜き配管からの水漏れの原因と対策, 中部電力 H. P., 2002.
- 25) 失敗事例> 浜岡原発タービンの損傷, <http://www.sozogaku.com/fkd/cf/CZ0200703.html>, 2013. 6. 30.
- 26) 5万分の1都道府県土地分類基本調査(掛川・御前崎), 表層地質図, 地形分類図, 昭和48年調査, 静岡県.
- 27) 那須誠: 各種構造物に問題が発生しやすい部位に関する研究(その2), 安全工学シンポジウム2013, GS4, 2013. 7.
- 28) 島根原子力発電所1号機, 復水フィルタ出口ヘッダー配管における減肉について, 中国電力株式会社, 2006. 12.