

1994年ノースリッジ地震による 電力設備の被害と復旧

朱牟田善治¹・大友敬三²・山崎文雄³・石田勝彦⁴

¹ 正会員 工修 (財)電力中央研究所 耐震部(〒270-11千葉県我孫子市我孫子1 6 4 6)

² 正会員 工修 (財)電力中央研究所 耐震部(〒270-11千葉県我孫子市我孫子1 6 4 6)

³ 正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所(〒106東京都港区六本木7-22-1)

⁴ 正会員 工博 (財)電力中央研究所 耐震部(〒270-11千葉県我孫子市我孫子1 6 4 6)

1994年1月17日、ロスアンジェルス北方のサンフェルナンドバレー一帯をマグニチュード6.8のノースリッジ(Northridge)地震が襲い、一般建築物やライフライン等に大きな被害が生じた。本文では、中でも被害の大きかった電力施設に焦点をあて、その被害と復旧について調査、考察した内容について報告する。特に、今回の電力設備の被害を1971年サンフェルナンド地震による設備被害と比較して、耐震設計基準の改定による効果を確認するとともに、日本の耐震設計基準で設計された電力施設が、今回の地震でもっとも被害を受けたシルマー交直変換所と同程度の地震力を受けた場合、米国の基準で設計された電力施設に比べ、被害が少ないという可能性があることを示した。

Key Words : Northridge earthquake, electric power facility, earthquake resistant design, functional loss, lifeline

1. はじめに

1971年にサンフェルナンドバレー地域を襲ったサンフェルナンド地震(マグニチュード6.4)では、電力設備に多大な被害が生じた¹⁾。この後、米国ではすぐに変電設備の耐震設計基準が見直され、より耐震性の高い設計基準が設定された。しかしながら、1994年1月17日に再びほぼ同じ地域で発生したノースリッジ地震(マグニチュード6.8)では、電力設備に多大な被害が生じた²⁾。

一方、日本においては、1965年の静岡地震や松代地震で変電設備が被害を受けたため、耐震設計基準改定の気運が高まり、1978年宮城県沖地震の電力設備被害の詳細な調査、検討³⁾を経て、1980年に変電設備に関する新しい耐震設計基準⁴⁾が確立した。ところが、既存設備をすべて新しい基準で建設し直すことがコスト面で困難なこと、地震という不確実な現象を対象としていることなどにより、1993年に発生した釧路沖地震⁵⁾や北海道南西沖地震⁶⁾では、やはり電力設備に被害が生じた。

今日、電力は、都市活動を維持するうえでもっとも根幹をなすエネルギー源として、地震時においても高い供給信頼性が求められている。ところが、上記のように「耐震設計法の改定」イコール「無被害」といかない現

状では、地震の度に問題点を解明し、耐震対策を進めることが、地震時の供給信頼性を高めてゆく最も効果的な方法といえよう。このような観点からノースリッジ地震が電力設備に与えた被害を構造的、機能的な面から詳しく調査し、サンフェルナンド地震による電力設備の被害や日本における電力設備の耐震対策の現状と比較して、日本における今後の耐震対策に活かすことを本論文の目的とする。

2. 電力設備の概要

ノースリッジ地震で最も被害を受けたロスアンジェルス郡には、ロスアンジェルス市の全域を主な供給エリアとする市水道電力局(DWP)と同市近郊の東北部と南カリフォルニアの広範囲を供給エリアに持つ南カリフォルニアエディソン社(SCE)という2つの電力会社が存在する。震源近傍で被害の集中したサンフェルナンドバレーは、主にDWPの管轄エリアであり、周辺地域であるロスアンジェルス郡、ヴェンチュラ(Ventura)郡、サンタバーバラ(Santa Barbara)郡などの地域がSCEの管轄エリアである。

DWP⁷⁾は、約136万戸の需要家を持ち、1年で約2,000MWhの発電を行っている。発電エネルギーの内訳は、約45%

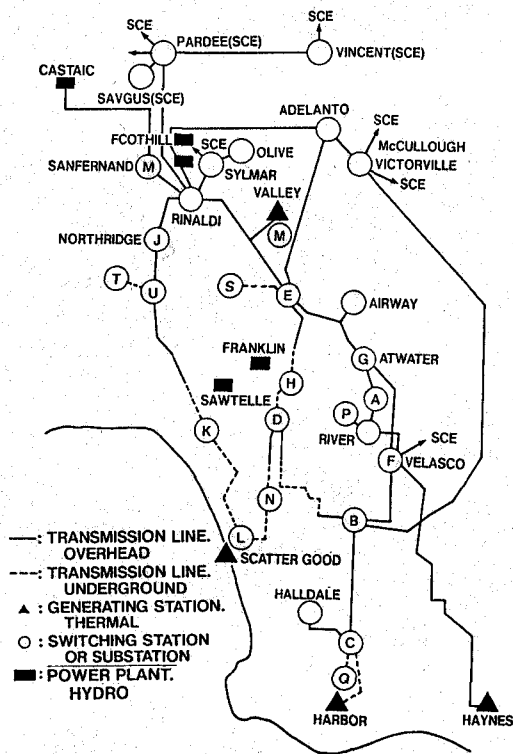


図-1 DWPの送電系統図

が石炭火力、約20%が天然ガスや石油による火力、約12%が水力、約9%が原子力であり、それ以外は、他の電力会社から電力を購入している。DWPの送電系統を図-1に示すが、その特徴は、138kV以上の基幹系統が環状に構成されており、管内にハーバー(Harbor)、バレー(Valley)、スカッターグット(Scattergood)、ヘインズ(Haynes)の4つの火力発電所が分散して配置されていることである。またSCEとは、F230kV変電所(DWP所有)-ラグナベル(Laguna Bell)500kV変電所(SCE所有)間、共同所有であるシルマー(Sylmar)交直変換所、ヴィクタービル(Victor-ville)500kV変電所(DWP)-ルゴ(Lugo)500kV変電所(SCE)間、マックロー(McCullough)500kV変電所(DWP)-エルドラド(Eldorado)500kV変電所(SCE)間などで電力の相互融通を行える体制が整えられている。このような系統設計は、地震などの非常時に系統が分断された場合でも、系統切り替え等により迅速に電力供給支障を解消できるように配慮されたものである。

なお、シルマー交直変換所は、長距離送電に有効な直流送電を行うために必要な交流/直流変換所であり、冬の間は、余剰の電力を北のオレゴン州へ直流送電し、電力の逼迫する夏の間は、逆にオレゴンから直流受電している。日本において直流送電は、北海道電力管轄系統と

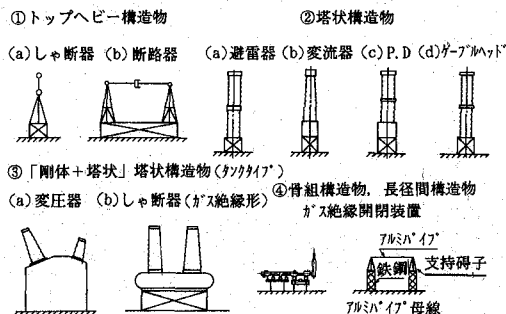


図-2 変電機器の構造タイプの分類

表-1 構造タイプごとの変電開閉機器の被害

構造タイプ	変電機器	被害モード
①	空気遮断器 断路器 高調波フィルタ 開閉器 リアクトル 交流フィルタ 方向短絡継電器 調相設備	碍管部の亀裂、傾斜、損傷 碍管部の亀裂、傾斜、損傷 支持碍管部の落下 支持碍管部の損傷 支持碍管部の損傷、落下 支持碍管部の損傷 基礎部からの落下 支持碍管部の損傷
②	避雷器	碍管部、支持碍管部の損傷
③	変圧器 ガス遮断器 コンデンサ	ブッシング部の落下、ブッシング 碍管部の損傷、基礎の不等沈下、傾斜、油漏れ ジョイント部の損傷 基礎部の変形、支持碍管部の損傷
④	ジャンパ-線 母線 ガス絶縁母線	接続端子の亀裂 支持碍子の損壊による母線 落下 ガス漏れ

注：①トップヘビー構造物、②塔状構造物
③剛体+塔状の構造物、④骨組・長径間構造物

東北電力管轄系統間や東京電力管轄系統と中部電力管轄系統間などの一部で行われている。

3. 電力設備の被害

(1) 被害概要

SCEでは、パーディ(Pardee)、ヴィンセント(Vincent)、ソーガス(Saugas)などの変電所が被害を受け、被害総額は、約3,000万ドルに上る。

DWPでは、シルマー変換所、リナルディ(Rinaldi)変電所、その他図-1におけるJ、U、T、Sなど震源に近い変電所に多くの被害が生じ、被害総額は、約5,320万ドルに上る。中でもSCEと共同所有であるシルマー変換所の

被害は最も大きく、総額で約2,655万ドルに達し、リナルディ変電所の被害も総額で約1,000万ドルに達した。

(2) 発電設備

発電設備には、発電に支障がでるような被害はほとんど生じなかった。たとえば、震災に一番近いバレー火力発電所では、約0.4Gの水平最大加速度が生じ、スチール柱の亀裂、フランジ部の変形、碍子や碍管部の一部破損、建屋の外壁破損などの被害が生じたが、いずれも発電機能に支障がでるような被害とならなかった。

(3) 変電・開閉設備

一般に変電・開閉設備は、構造的に類似したものが多く図-2に示すように、4つに分類できる⁴⁾。すなわち、①碍管の上部に比較的重い部分のある遮断器・断路器のようなトップヘビー構造物、②高さ方向の質量分布が極端に変化しない避雷器・変流器・計器用変圧器等の塔状構造物、③変圧器等の剛体と考えられる本体上に塔状のブッシングが取り付けられている構造物(タンクタイプ)、④タンクとそのタンク間をパイプで結合するガス絶縁開閉装置のような骨組構造物やアルミパイプ母線などの長径間構造物、などである。このため、変電・開閉機器は、地震時に類似した損傷モードを生ずることが多い。表-1には、今回の地震で発生した損傷モードを変電開閉機器の構造タイプごとに分類している。以下には、主な変電所と開閉所の被害の状況を述べる。

a) シルマー変換所

シルマー変換所は、震央から北西約11kmに位置しており、地表面最大加速度は水平で0.83G、鉛直で0.42Gが記録された。被害は、図-2の①②の構造タイプの支持碍管部に集中した。たとえば、センタークランプ方式の碍管が中芯部分の応力集中により破損し支持材から落下、フランジ式の避雷器が地震により共振した事による碍管と支持部のジョイント部から上部の倒壊、高調波フィルターを支持する下部の碍管部の破損、などが発生した。この他、③のタンクタイプで屋外に設置されていた(500/230kV)変圧器のブッシング部分が落下するなどの被害が生じた。

b) リナルディ変電所

リナルディ変電所は、震央の北西約7kmに位置しており、地表面最大加速度は水平0.8G、鉛直1.4Gを記録した。水平加速度もさることながら、鉛直加速度の大きさは特筆に値し、沖積層と軟岩(鮮新世)の境界に位置するという地形条件が特殊な地震動を生起させたものと推定される。被害は、碍子系機器に集中した。たとえば、剛な母線を支持する碍子が損壊した事による母線の落下、500kV変圧器ブッシングの碍管部の損傷などである。また、一部に使用している230kVガス絶縁母線(ドイツ製)からは、ガス

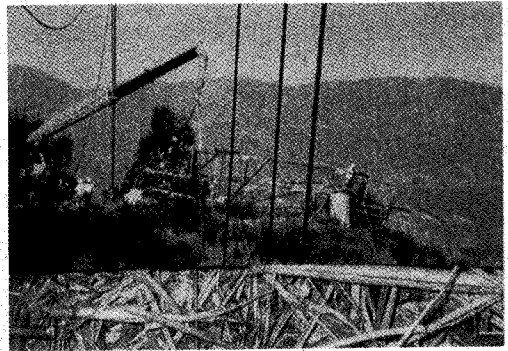


写真-1 230kV送電鉄塔の倒壊

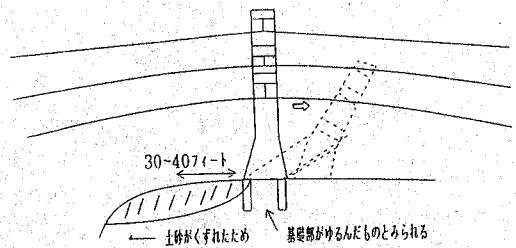


図-3 230kV送電鉄塔の倒壊(文献11からの引用)

漏れが発生した。

なお、リナルディ変電所は、その近くに設置されている配水管が地震で破損したため地震直後に浸水し、変電所の機能回復に時間を要した。

c) パーディ開閉所

パーディ開閉所は、震央から北に約28kmの地点に位置し、地表面最大加速度は水平0.57G、鉛直0.35Gを記録した。被害は、220kV遮断器でトップヘビータイプのものは、碍管部に亀裂が入り破損したものが多かったが、③のタンクタイプには被害がなかった。また、方向短絡継電器(DS)が基礎部から落下するなど、全設備のうち約5割が破損した。さらに、開閉所内のジャンパー線が地震力により激しく震動したため、接続端子にアーク損傷による亀裂が発生した。

なお、パーディ開閉所では、地盤に液状化が発生し、直接基礎を有する変圧器の不等沈下や鉄塔の傾斜などの被害原因となった。この敷地の地下水位は約2mと浅く、表層地盤はシルト質砂で構成されている。液状化予測は事前に行われており、液状化発生の可能性が有りだと判定されていたが、それに対する対策は講じられていなかった。

d) ヴィンセント 500/200kV変電所

ヴィンセント変電所は、震央から北西へ約49kmほど離

れており、記録された地表面最大加速度も水平0.15g、鉛直0.13gとほかの被害を受けた変電所に比べて小さかった。被害は、パーディ開閉所と同様に、500kV遮断器のうち①のトップヘビータイプには碍管部の損傷が多く見られ、③のタンクタイプには被害がなかった。ただし、後者の遮断器の一部に、機器間リード線の震動によるジョイント部の損傷が見られた。その他、500kV変圧器ブッシングから漏油し、避雷器・調相設備・継電器等の支持碍管部が地震力により損傷した。

e) ソーガス 220/66kV変電所

ソーガス変電所は、震央から北に約20kmほどの地点に位置する。1920～1930年代に建設された断路器等の碍子系機器が地震力により、変形・傾斜した。また、変圧器が地震力により傾倒した。

(4) 送電設備

写真-1には、DWPのカスタック(Castaic)水力発電所-リナルディ変電所間の230kV送電鉄塔が1基倒壊した様子を示す。写真-1の倒壊は、図-3に示すように、地震力により鮮新世から成る地山に地滑りが生じ、4点支持の独立基礎からなる基礎部の土砂がくずれ、フーチングが浮き上がったために発生した。

SCEの管内においても送電鉄塔が倒壊あるいは傾斜した。220kV鉄塔では、倒壊が1基、傾斜が9基であった。また66kV鉄塔では、16基が倒壊した。これらの損傷の主な原因は、地滑りによる基礎の崩壊によるものであるが、66kV鉄塔で倒壊した16基のうち、5基は電線破断が原因である。

なお、地中送電線には、被害は生じなかった。

(5) 配電および通信設備

配電設備については、柱上変圧器の電柱への取り付け部が地震力によりはずれたり、電柱が傾斜するなどして5～10基程度に被害が生じた。また、地下孔設置の変圧器にも横ずれしたなどの被害が報告されている。しかし、変電設備と比べ、全体的に被害は軽微であった。

また通信設備には、通信機能の低下を伴うような被害はほとんどなかった。

4. 変電設備被害と耐震設計に関する考察

電力設備で地震時にもっとも被害を受けるのは、変電・開閉設備である。ノースリッジ地震でも変電設備にもっとも被害が生じている。そこで、以下には、変電設備被害とその耐震設計について考察する。

変電設備耐震設計基準について、1971年と1994年のSCEとDWPのものと、1994年の日本のものとを表-2に比較する。米国では、1971年サンフェルナンド地震を契機とし

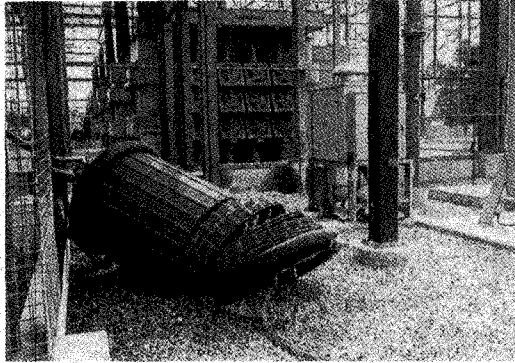
表-2 変電機器の耐震設計基準の日米比較

	DWP ^{1,2)} (1994年現在)	SCE ^{1,2)} (1994年現在)	日本 J E A G ⁴⁾ 5003	DWP (1971年当時)
設計水平加速度 (単位: g ⁵⁾)	0.5	送電用変電所 0.5 配電用変電所 (220kV以下) 0.2	170kV 超過の 変電所 0.3	0.2
設計上下加速度	水平加速度の 4/5	水平加速度の 2/3	水平加速度の 1/2	なし
動的設計の適用 範囲	固有振動数30Hz以下の 機器に対して動的設計 を行う	固有振動数33Hz 以下の機器に對 して動的設計を行 う	固有振動数0.5 ～10Hzの範囲の 機器に對して動的 設計を行う	なし
設計地震波およ び解析法	解析しないしは実験、または 両者を併用して検討する 〔解析法〕 (1) Modal Spectrum Analysis (Jennings の Spectra) (2) 時刻解析 〔実験法〕 0.1～0.2g 振動振幅による 定常実験により共振点 を見出し、その共振振 動数にて(1)15波連続加、 (2)sine beat被加振のい れかを行う	Modal Spectrum Analysis (Fugro の Spectra)	共振正致3被法 検討手法につい ての指定はない	(1) 静的法 (2) 併用法

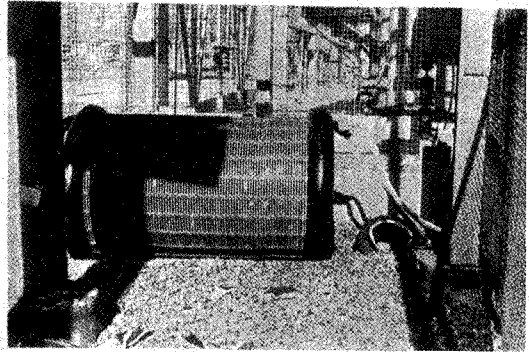
(注) g: 重力加速度

て、静的のみに行われていた変電機器の耐震設計に、動的設計が採用されるようになった。また、1994年現在の日本の基準と比べて米国の基準の特徴は、①地表面における設計用の最大水平加速度が0.5gであること、②地表面における設計用の最大上下加速度が大きいこと、③動的設計の解析法として応答スペクトル法が採用されていること、などである。さらに、1971年のサンフェルナンド地震やその他の地震による変電機器の被害が、トップヘビーな構造を有する空気型遮断器に集中していたことから、DWPをはじめカリフォルニア州の電力各社は、1971年以降、遮断器をトップヘビーな構造を有する空気遮断器からタンクタイプのガス遮断器に替えつつある。タンクタイプの構造物がトップヘビーな構造物に比べ耐震性に優れていることは、1989年ロムプリエタ地震⁸⁾などの過去の被害事例⁹⁾からすでに実証されている。ちなみに、日本の場合には、耐震性の他にコンパクト化もねらって、遮断器、断路器、変成器、避雷器等の機器要素を備えた骨組構造タイプのガス絶縁開閉装置(GIS)が現在、広く用いられるようになっている。

ノースリッジ地震による変電設備被害をサンフェルナンド地震における変電設備被害と比較すると、まず被害モードが類似していることが確認できる。写真-2～4には2つの地震で被害を受けたシルマー交直変換所の変電機器を対比して示すが、いずれもほとんど同じような壊れ方をしている。写真-2では、電波フィルターリアクトル(Radio Influence Filter Reactor)の碍管部が、地震力により損傷し、ヘッド部分が落下している。写真-3では、直流平滑リアクトル(DC Smoothing Reactor)の一部が、付近の碍子系塔状構造物の落下により損傷を受けている。また、写真-4では、コンデンサを支持する碍管



1994ノースリッジ地震

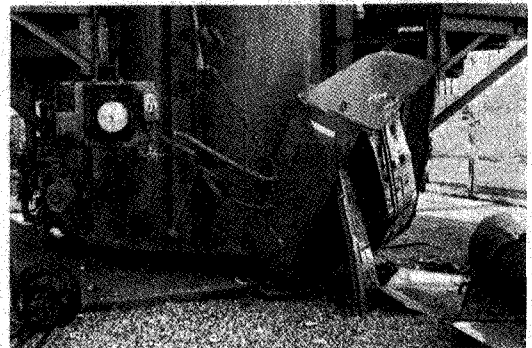


1971年サンフェルナンド地震（文献1からの引用）

写真-2 電波フィルターリアクトルの被害比較(シルマー交直変換所)

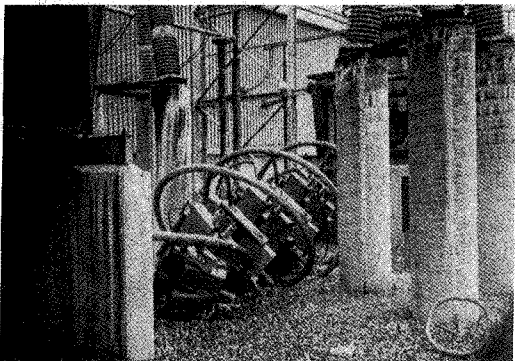


1994ノースリッジ地震

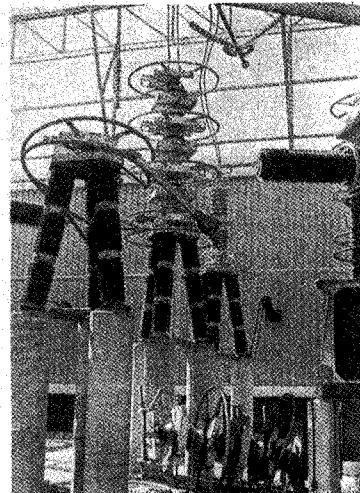


1971年サンフェルナンド地震（文献1からの引用）

写真-3 直流平滑リアクトルの被害比較(シルマー交直変換所)



1994ノースリッジ地震



1971年サンフェルナンド地震（文献1からの引用）

写真-4 コンデンサーの被害比較(シルマー交直変換所)

——	岩盤	建設省土木研究所 平均応答
---	洪積層	スペクトル
----	沖積層	
—	敷設原子力、最大加速度応答スペクトル	
*	Digitized Strong-Motion Earthquakes Accelerograms in Japan 1972	
○	港湾技研資料第80号~236号	
▽	建設省土建資料 Vol.128	

注*: 使用地震波形数 ○ 使用地震波形数: 211
 ○ 共振正弦2波入力に対する
 応答値を越えた地震波形数: 15

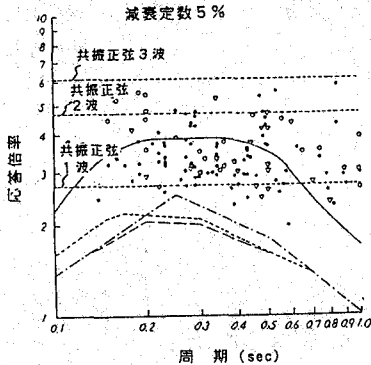


図-4 共振正弦n波入力に対する応答値と地震波形入力に対する応答値との比較 (文献4からの引用)

部が、折損し落下している。このように時代の異なる2つの地震でも、耐震上の弱い碍子や碍管部の被害モードは、ほとんど変化がない。

一方、注目に値する事実として、ノースリッジ地震では、発電所・変電所および開閉所におけるガス遮断器のうち、タンクタイプのもは、軽微なガス漏れなどを除けば被害は全く受けなかった。特に、被災地域の発電設備がほとんど機能的な被害を受けていないのは、タンクタイプのガス遮断器をはじめとする開閉施設を用いたためと考えられる。

次に、被害額という点から2つの地震による被害を比較してみよう。シルマー変換所は、サンフェルナンド地震とノースリッジ地震で、ともに大きな被害を受けた。1971年にはシルマー変換所で0.52Gの最大水平加速度が、1994年には同変換所で0.83Gの最大水平加速度がそれぞれ記録されており、地震動は今回の方がはるかに大きい。一方、シルマー変換所の被害総額を比較すると、サンフェルナンド地震によるものが約2,000万ドルであり、ノースリッジ地震によるものが約2,650万ドルであるが、現在の物価が当時の約3倍であることを考慮すると被害は当時の約3~4割程度と推定される。被害を受けた設備機器の総数が減少していること、および地震動の大きさを考えると、設計基準の改定により変電機器の被害が減少しているといえよう。また、ソーガス変電所も同様に被害を受けているが、その物価を考慮した被害額は、

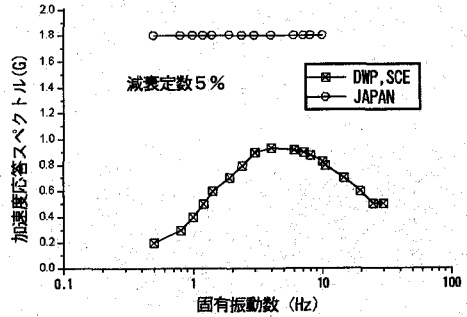


図-5 日米の変電機器の耐震設計条件の比較

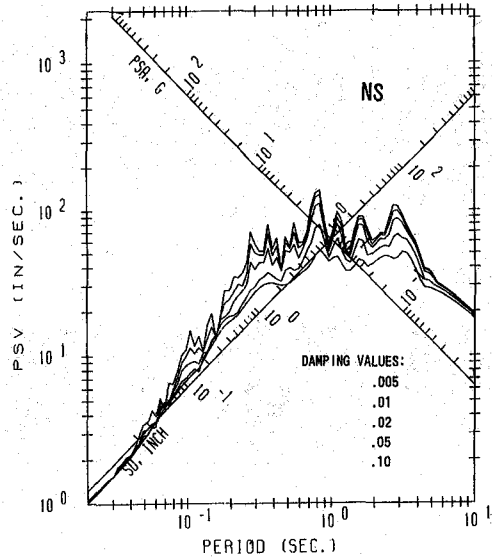


図-6 シルマー変換所で記録された水平加速度応答スペクトル(DWPから提供)

約1/6程度に減少している。

さらに、日米の耐震設計の違いから我が国の変電機器の耐震性について考察してみる。日本の変電機器の耐震設計は、0.5~10Hz程度の固有振動数を有する標準的な変電機器に対しては、0.3G共振正弦3波法が導入されている。共振正弦3波法で設計した場合には、図-4に示すように、減衰定数5%とした場合には、入力値に対して変電機器の応答倍率が約6倍となる。また、安全率(=許容応力/発生(計算)応力)は、この0.3G共振正弦3波に対して1.0~2.0がとられている。よって、安全率を1.0として0.3Gの入力地震動に応答倍率の6倍を掛けると、0.5~10Hzの固有振動数をもつ変電機器は、この振動数範囲内に卓越振動数を持つ地震動に対して少なくとも約1.8G(=1.0×0.3×6)程度の最大水平加速度までは耐えられるように設計されていることになる。この日本の変電

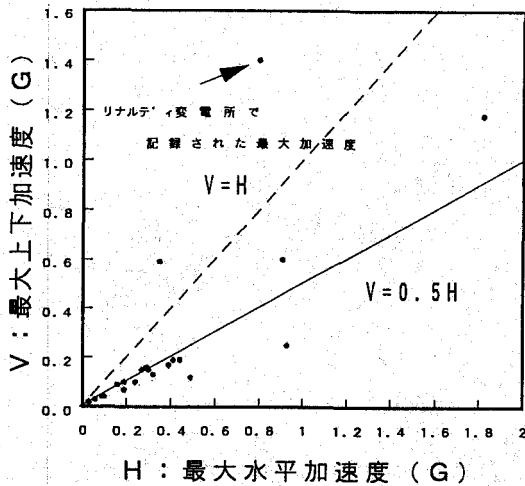


図-7 水平動と上下動の最大加速度の関係

機器の耐震設計条件を米国の耐震設計法であるモーダル解析法で規定された加速度応答スペクトルと比較するために、横軸に固有振動数を取り、縦軸に加速度応答スペクトル(G)をとって、図-5に示す。この図に示すように、日本で標準的な動的設計を採用している0.5~10Hzの固有振動数をもつ変電機器の強度は、米国の約2倍であることがわかる。ただし、日本の場合、変電機器の固有振動数が0.5Hzを下回るとき、または10Hzを上回るときには、設計波形(共振正弦3波)をそれぞれ0.5Hz、10Hzとしているため、単純に加速度応答スペクトルには換算できない。図-6には、ノースリッジ地震で最も被害を受けたシルマー変換所で記録された水平地震波形記録の加速度応答スペクトルを示す。この図より、加速度応答スペクトルの0.5~10Hzの最大値が1.8G程度と読み取れることから、今回の地震で記録されたシルマー変換所の最大水平加速度は、日本の設計で考慮されている1.8Gとほぼ同等であるといえる。一方、この加速度応答レベルは、現行のDWPやSCEの基準で用いられている加速度応答スペクトルを大きく上回っていたため、DWPでは、設計基準を改定する方向で現在、検討が進められている。図-7には、ノースリッジ地震で観測された最大水平加速度と最大上下加速度の関係⁹⁾を示す。多くの観測点では、最大上下加速度は最大水平加速度の約1/2付近に分布しているが、リナルディ変電所などの数地点では、上下動のほうが大きくなっている。この理由として、前述したように、リナルディ変電所の設置されている場所が沖積層と軟岩(鮮新世)の境界に位置し、震源断層が傾斜約35°~45°の逆断層であることや地点によって特殊な地形効果の影響が大きく作用したなどの原因が考えられる。このような大きな上下地震動を有する地震力がリナルディ変電所に作用したため、写真-5に示すソリッドタイプの母線が、それを支持する碍子の損壊により落下した。この母線支持

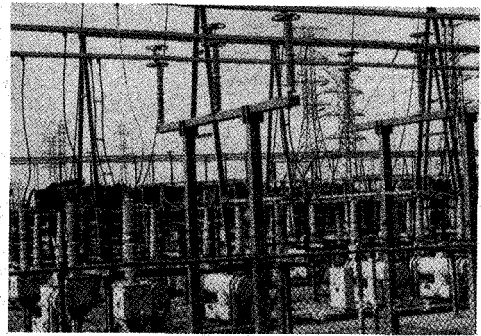


写真-5 ソリッドタイプ母線

構造物は、基礎の部分については、0.3G、構造部については、0.5Gの水平設計加速度が考慮されていたが、碍管部や母線部分には、耐震設計が行われていなかった。

上記の考察から、仮に日本の電力施設にノースリッジ地震のシルマー変換所で記録された程度の水平地震力が加わったとしても、米国ほどの被害がでる可能性は少ないと考えられる。しかしながら、この大きな上下動が損傷要因の一つであると仮定すると、日本の場合も米国の場合と同様に母線については、他の機械力によってきまる条件で設計されており耐震強度は十分と考えられているため、このような大きな上下動が変電機器に作用した場合、被害が発生する危険性を否定できない。

5. 機能損失とその復旧

(1) 停電戸数の推移

SCEとDWPの需要家への停電解消状況を図-8に示す。SCEの管轄エリア内では、地震発生直後に保護リレー動作により一度遮断器がoffとなりトリップし、約110万戸の需要家が停電した。30秒後、高速再閉路が働いて遮断器がonとなり通電可能となった47.5万戸の需要家は、停電が解消した。停電が長期化した地域は、ヴェンチュラおよびサンタバーバラ郡であり、そのうち約10万戸は断続的な停電であった。地震発生から約11.5時間後の17日15:00までに、85%に当たる95万戸の停電が解消した。約16.5時間後の同日21:00までに、約95%にあたる110.5万戸の停電が解消、約33.5時間後の18日8:00までに、約97%にあたる110.7万戸の停電が解消し、2日後の19日15:00までにすべての停電が解消した。

DWPの管轄エリア内では、地震発生後、リナルディ変電所が全停となり、系統全体が機能停止したため、ロスアンゼルス全域にあたる136万戸の需要家が全面停電した。約8時間後には50%の停電が解消し、3日後には約90%の停電が解消したが、すべての供給支障が解消したのは9日後

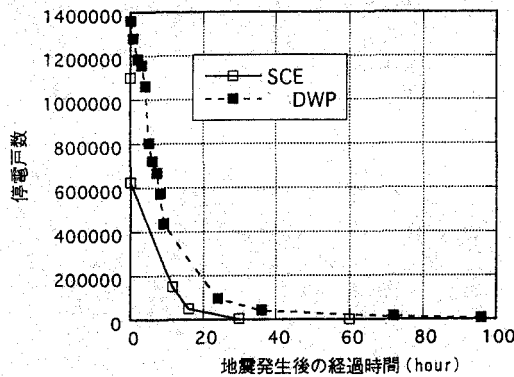


図-8 SCEとDWPの停電戸数の推移

の26日であった。

(2) 系統事故の概要

地震発生直後、SCEの電力系統では、パーディ開閉所が損傷したためにトリップし、ヴェンチュラおよびサンタバーバラ郡に配電している下位の電力系統は、本系統から分断された。発電設備には異常がなかったが、この影響でオーモンドビーチ(Ormond Beach)発電所、マンダレー(Mandalay)発電所が停止し、この2つの郡の全需要家に供給支障が発生した。また、ヴィンセント500kV変電所が地震により損傷を受け、ミッドウェイ(Midway)500kV変電所と完全に分断された。さらに、F変電所-ラグナベル変電所間、シルマー変換所、ヴィクタービル変電所-ルゴ変電所間、マックロー変電所-エルドラド変電所間などがすべてトリップし、DWPの系統と完全に分断された。

一方、DWPの管轄エリアでは、地震発生当時、1,879MWの電力供給を行っていたが、地震発生直後、リナルディ変電所が全停止したため、ロスアンジェルス市全域に供給しているDWP系統が全停状態となった。地震直前は、リナルディ変電所を経由して、パロヴェルデ(Palo Verde)原子力発電所を含む東方の発電所のみから当該地域に電力供給が行われており、管内4つの火力発電所であるハーバー、バレー、スキッターグット、ヘインズの各火力発電所は、発電を行っていなかった。また、シルマー変換所の被害により、北方への直流送電が不可能となった。シルマー変換所では、93年10月に火災にあったため、地震時には1,100MW(全体で3,100MW)分が使用不能のままであり、地震の直前には約800MWを送電していた。さらに、シルマー変換所の北方に位置するカスティック水力発電所は、発電可能な状態であったが、リナルディ変電所との間の送電鉄塔が倒壊し、リナルディ変電所への送電が不可能となった。

地震後、ロスアンジェルス地域の系統が分断されたために、オレゴン州をはじめとする全米各地やカナダに電

力動揺が広がった¹⁰⁾。たとえば、ヴィンセント-ミッドウェイ間の500kV送電線が分断されたために、その分の電力が345kVや230kVの送電線に流れ、多くの発電所が自動停止した。ワイオミング州では、ジム・ブリッジャー(Jim Bridger)石炭火力発電所、デブ・ジョンソン(Dave Johnson)火力発電所が停止し、15万の需要家が約3時間停電した。アリゾナ州のナバホ(Navajo)石炭火力発電所やニューメキシコ州のフォーカーナーズ(Four Corners)石炭火力発電所もトリップした。また、カナダのブリティッシュコロンビア(British Columbia)およびアルバータ(Alberta)では、発電所トリップにより周波数異常が発生し、需給調整用の負荷に対する電力遮断が行われた。そのほか、西部各地の小規模発電所の多くが停止した。これらの発電所は、物理的な損傷を受けたのではなく、DWP系統を中心とするロスアンジェルス地域の系統が分断されたために発生した電力動揺が原因で停止したものである。

(3) 復旧過程

DWPのとした復旧戦略は、東方からの電力を健全な設備を通じて需要家に供給することであった(以下の説明で用いる変電所の位置関係は、図-1を参照)。まず、17日5:10に最初のステップとして、DWP系統の東方に位置する発電所から電力を受けているヴィクタービル500kV変電所から、2-287kV送電線を用いて、約350マイル離れたB変電所に供給を開始した。17日6:10に、BからFへ送電を再開し、17日7:36に、Fから南方のヘインズ火力発電所へ送電してハーバー火力発電所を稼働し、東部地域の供給支障を解消した。その後、FからG、GからA、GからE、LからKの各変電所に次々と送電を再開し、南部地方の供給支障が解消された。この時点で、K、U、J、リナルディ各変電所は、復旧されないままであった。18日には、崩壊した送電鉄塔の代わりにクレーン車や仮設鉄塔などで送電線を支持し、カスティック水力発電所からリナルディ変電所への送電を再開した。カスティック発電所から電力が供給されると、リナルディ変電所では、健全な変電機器を利用してJへ一度送電し、別回線を利用して、リナルディ内の健全な2つの変圧器を起動して送電量を増加させた。これにより、JからUおよびTに18日18:00までに送電を再開した。このあと、リナルディ変電所からMおよびバレー火力発電所に送電を再開し、バレーを稼働させ、EおよびS変電所への送電を再開した。これらの操作により、19日には、ほぼ被害を受けた地域の住民の供給支障が解消された。

なお、シルマー変換所の完全復旧には、約1年を要するが、これは、交直変換を行う特別な電力機器を使用しているため、機器のストックがないなどの理由によるものである。

6. 系統設計と復旧に関する考察

系統設計と復旧という観点から、今回の地震の事前・事後体制の問題点について考察する。DWPの管轄エリアでは、ロスアンゼルス地域への全ての電力供給が、リナルディ変電所を経由していたため、リナルディ変電所の機能停止は、全需要家に供給支障を引き起こした。DWP系統の場合、4つの火力発電所が系統内に分散して配置されており、システム的には、供給源の分散化がなされていた。しかしながら、地震時には4つの火力発電所がすべて停止中だったため、これらも稼働させるためには、逆に各発電所に電力を供給しなければならなかった。同様にSCEでは、パーディ開閉所を経由して、ヴェンチュラおよびサンタバーバラ郡の全需要家に電力供給がなされていた。このため、パーディ開閉所の機能停止は、同地区の需要家の供給支障を引き起こした。もし、地震時にリナルディ変電所やパーディ開閉所以外から被災地域に電力供給を行っていたら、あるいは稼働していなかった火力発電所がロスアンゼルス地域に電力供給を行っていたら、供給源が分散されるために電力供給支障は、もっと局限化されていたものと考えられる。つまり、地震など非常時を考えた場合には、常時の運用方法も考慮して供給源の分散化を図る必要がある。

また、DWPでは、制御センターのバックアップ電源（ディーゼル発電機）が起動せず、コンピューターが停止し、復旧が遅延する要因の1つとなった。こうした事故は、今後の事前の防災対策を考えるうえで、想定しておく必要がある。

さらに、地震直後には、埋設管の損傷により漏洩したガスに、電力復旧時に、断線した配電線からのスパークが引火して火災となる事故が生じた。このような事故は、電力とガスの両事業者が、地震後に緊密に連絡を取り合っていれば、防ぐことができたと考えられる。今後は、地震の復旧時に、関連のある機関との連絡体制をもっと強化する必要がある。

7. まとめ

1994年1月17日にサンフェルナンドバレー一帯を襲ったノースリッジ地震による電力設備の被害と復旧について調査し、以下のような結論を得た。

(1) 今回の地震と1971年サンフェルナンド地震の変電機器被害を比較すると、類似した被害形態が多く、被害は変電・開閉設備の碍子・碍管部に集中している。

(2) シルマー変換所では、1971年サンフェルナンド地震と比較して、被害金額が約3~4割程度に減少した。この原因のひとつとして、耐震設計基準が改定された効果や耐震性が高いタンクタイプのガス遮断器を採用したことな

どが挙げられる。

(3) 日本の変電機器の水平動に対する耐震設計基準は、米国よりも厳しいため、ノースリッジ地震で最も被害を受けたシルマー変換所で記録された地震力が日本で発生した場合、米国ほど被害がでる可能性は少ない。

(4) 日本の耐震設計基準では、上下動の設定は米国よりゆるく、リナルディ変電所で記録されたような極端に大きな上下加速度が発生した場合、変電機器が損傷する恐れがある。

(5) ロスアンゼルス地域の系統の分断は、米国の広域地域に電力動揺を発生させ、多くの需要家に供給支障を引き起こした。また、これらの電力動揺は、オレゴン州やカナダの電力系統に周波数低下を引き起こし、これらの地域に需給調整を目的とする負荷遮断が行われた。

(6) 災害発生時の電力供給支障を局限化するためには、常時の系統運用においても供給源の分散化を図る必要がある。

本報では、電力設備に焦点を絞り、サンフェルナンド地震とノースリッジ地震の被害の比較および変電機器の日本と米国の耐震設計基準の考察を行った。DWPでは、さらに耐震設計基準を厳しくする動きもあるが、既存の設備をすべて新基準に合うように改めるには、莫大なコストがかかる。こうした状況下では、さらに大きな設計用地震動の設定を指向する他に、電力設備の機能被害に着目し、都市機能への影響を最小限に抑えるようなシステム構成の検討も必要であろう。

謝辞：本文における事実関係の記述は、主としてDWPおよびSCEから提供された資料に基づいている。貴重な情報を提供して下さった両社の関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) DWP : *San Fernando Earthquake of February 9, 1971, Effects on power system operation and facilities*, Department of Water and Power of the City of Los Angeles, 1974.
- 2) 大町達夫代表：1994年ロスアンゼルス地震と都市機能障害の調査研究。文部省科学研究費突発災害研究成果, 1994.
- 3) 電気事業連合会：変電設備耐震対策委員会報告書(詳細編), 1979.
- 4) 変電機器耐震設計専門委員会：変電機器の耐震設計, 電気協会協同研究, 第34巻 第3号, 社団法人電気協同研究会, 1978.
- 5) 井上大栄代表：1993年釧路沖地震被害調査報告, 電力中央研究所報告・調査報告, U92047, 1993.
- 6) 岩楯敏広代表：1993年北海道南西沖地震被害調査報告, 電力中央研究所報告・調査報告, U93028, 1993.
- 7) DWP : *Los Angeles Department of Water and Power Annual report 1991-1992*, Los Angeles Department of Water and Power, 1992.

- 8) 大友敬三, 井上大栄, 伊藤洋, 千木良雅弘: 1989年ロマ・ブリエータ地震による電力設備の被害と復旧に関する調査, 電力中央研究所報告・調査報告, U90027, 1990.
- 9) CDMG: Fifth quick report on CSMIP Strong Motion Data from the Northridge/San Fernando Valley Earthquake of January 17, 1994, *Report OSMS 94-05*, 1994.
- 10) 豊馬誠: ノースリッジ地震の北米西部電力系統への影響, 海外電力, 1994.
- 11) 唐崎隆史: サザンカリフォルニアエディソン, ロスアンジェルス電気水道局への訪問調査メモ, 東京電力, ワシントン事務所, 1994.
- 12) West coast substations subcommittee of substation committee: *Recommended practices for seismic design of substation committee*, Power engineering society IEEE, Feb. 1978.

(1994. 6. 24 受付)

DAMAGE AND RESTORATION OF ELECTRIC POWER FACILITIES IN THE NORTHRIDGE CALIFORNIA EARTHQUAKE OF 1994

Yoshiharu SHUMUTA, Keizo OHTOMO, Fumio YAMAZAKI
and Katsuhiko ISHIDA

On January 17, 1994, the northern part of Los Angeles, California, was heavily shaken by the Northridge earthquake of surface magnitude 6.8. The earthquake had significant effects on residential and commercial buildings and lifeline facilities. This paper focuses on the damage and restoration of electric power facilities. In particular, damage of power facilities by the 1994 Northridge earthquake was compared with that by the 1971 San Fernando Earthquake. Current earthquake resistant practices on the substation equipment both in Japan and USA were also carefully examined. As a result, the effects of revision of earthquake-resistant design criteria for substation equipment were observed. The damage to substation equipment in Japan is expected to be less than that in USA, even if the same level of acceleration as the Northridge Earthquake occurs in Japan.