

産業用受変電設備における耐震性の検討と向上

Improvement of Seismic Performance of Industrial Substations

従来、受変電設備など電気設備に対する地震対策すなわち耐震性は、原子力発電所など限られたフィールドで検討されてきたが、近年、東海沖地震の発生予測などに関連して、官公庁や一般産業でも地震対策が検討されるようになった。

このニーズに呼応して、産業用受変電設備など電気設備の耐震性の検討を昭和56年から自発的に実施してきたが、その特長は新設設備に対する耐震設計とその検証法の作成にとどまらず、多数の既設設備に対する指針とその対処方法を確立することにあった。

168kV以下の機器及び受変電システムについて検討を行なったが、耐震性という観点からも、縮小形SF₆ガス絶縁開閉装置と監視制御のエレクトロニクス化が推奨される。

石田真之助* Shinnosuke Ishida
山口高明** Kōmei Yamaguchi
黒田長治* Chōji Kuroda
朝岡 繁*** Shigeru Asaoka

1 緒 言

地震に対する備えは、地震多発国の我が国にあっては古くから唱えられてきたことであり、建築関係や原子力発電所などでは既に厳重な耐震設計基準や検証法が確立されている。

一般産業用電気設備にあっては、万一、地震で設備機能が停止した場合の影響度(170kV超過の電気事業用変電所などに比べて比較的小さい)、機器・設備の構造上の機械的強度(比較的大きい)などと、費用・コストの見合いで対象外とされるケースが多かった。

しかし、昭和53年6月の宮城県沖地震や近年の東海沖地震の発生予測などに関連し、受変電設備などの電気設備に対しても地震対策が公共施設や一般産業でも検討されるようになってきている。電力供給用の変電所などに対しては、電気協同研究会から昭和53年10月に「変電機器の耐震設計」¹⁾が、また日本電気協会から昭和55年5月に「変電所などにおける電気設備の地震対策指針」²⁾が発行され、変電所などの耐震設計基準として活用されているが、これらは170kVを超える電気設備を対象としているため、168kV以下の、特に既設の一般産業用受変電設備に対しては指針がなかった。

一般ユーザーの最も関心が高いのは、現有設備がどの程度の強さの地震に耐えられるか、ある大きさの地震に対して耐えられるようにするには、どのような手段を講じたらよいかということであろう。設置年代も大きく異なり、機器の種類も各種各様のものがある電気設備の耐震性を一律に論ずることはできないが、上記の要求を満たすにはどうすればよいかを可及的に追求、検討した結果が本論文である。

既に稼働している多数の変電所など電気設備の耐震性を実際に測定することは不可能であるため、地震の大きさを仮定し、一定の条件の下で機器が耐えられるかどうか、耐えられない場合はどういう手段を講ずればよいかを標準的な機器をベースとして検討した。対策としては、具体的に実施可能で、できるだけ簡単な手段を選ぶ必要があったが、設置後20年を越えるような老朽変電所や、現時点から見ると耐震性に弱点のあるがい子形油入遮断器などは、最近開発され耐震性にも優れる縮小形ガス絶縁開閉装置などに更新するのも根本的対策の一つと言える。

以下、産業用の受変電機器及びシステムの耐震性に対する検討結果について述べる。

2 基礎的検討

2.1 基準地震力

一般に、震源から基盤(岩盤層)を進行してきた地震動は、表層地盤の影響で増幅されて地表面に伝達される。図1に、地震動の地表面への伝達機構と地表面水平加速度の再起年75年での期待値を表わした河角マップを示す²⁾。したがって、厳密に地震とその影響を検討するには、このような地震動の伝達機構を考慮して行なう必要があるが、変電所など電気設備は様々な地盤上に設置されその数も多いので、地盤及び地域の区分は行なわず、地盤の影響を含めた地表での地震力を次

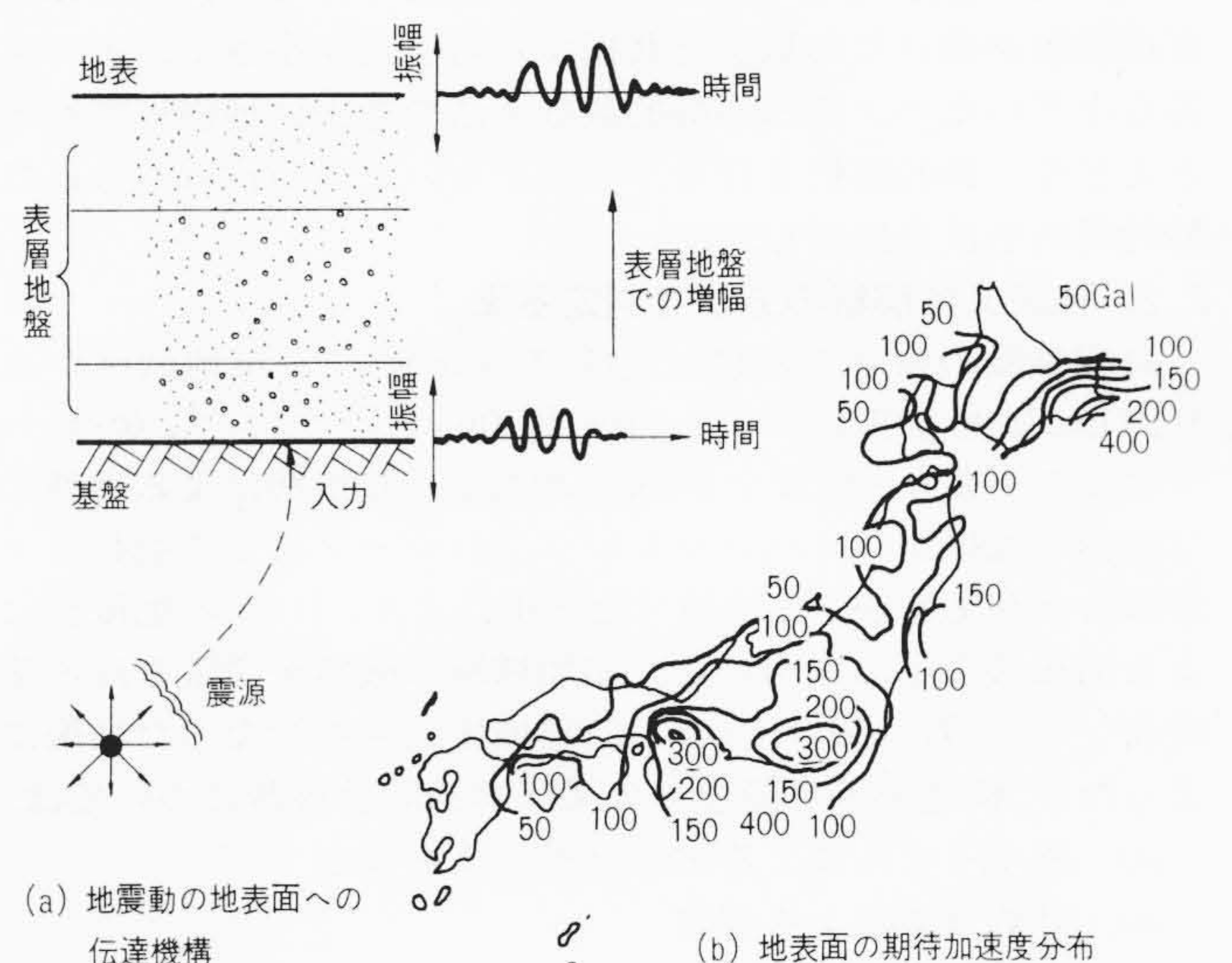


図1 地震動の地表面への伝達機構と地表面の期待加速度分布
震源から岩盤層を進行してきた地震動は、表層地盤で増幅されて地表面へ伝わる。地表面の加速度分布は地域によって異なるが、過去のデータからはほとんどが0.3G(294Gal)以下と推定できる。

* 日立製作所国分工場 ** 日立製作所機電事業本部 *** 日立プラント建設株式会社

- のように設定する。
- (1) 最大水平加速度………0.3G(変圧器用ブッシングなどにあつては0.5G)
 - (2) 波形………共振正弦3波
 - (3) 卓越振動数範囲………0.5~10Hz

表1に気象庁の震度階(1949年)を示すが、同表中の地動の加速度の単位Galは $\frac{1}{980}G$ で、0.3Gは294Galとなり、震度IVの烈震に相当し、過去の発生状況からも水平加速度はほとんどが0.3G以下であると推定できる〔図1(b)参照〕。

ちなみに、地震の規模を表わすマグニチュード*M*と震央距離、地震振幅、気象庁震度階との関係で、気象庁では、

$$M = \log_{10} A + 1.73 \log_{10} \Delta - 0.83 \dots\dots\dots (1)$$

ここに *A* : 最大地震振幅(水平2成分を合成したもの)(μ)
\Delta : 震央距離(km)

でマグニチュード*M*を定め、河角教授は、

$$M = 4.85 + 0.5I \dots\dots\dots (2)$$

ここに *I* : 震央距離100kmでの気象庁震度階を示している。

また、鉛直加速度については、水平加速度のほぼ $\frac{1}{2}$ と考えられること、ほとんどの機器はその構造上、鉛直加速度の影響は小さいことから、特殊な例を除き水平加速度で検討することとする。

入力波形及び波数に関しては、過去の地震による地表面地震波形に対し、機器が共振した場合の加速度応答倍率と、共振正弦2波に対する加速度応答倍率を比較すると、正弦2波に対する応答が実地震波形に対する応答を上回ることが分かっており、基礎の存在による増幅率や鉛直加速度の影響などを考慮しても、共振正弦3波で検討すれば十分と言える。

地表面に到達した地震波には、種々の振動数成分の波が含まれているが、これらの振動数成分のうち、特にパワーの卓越した成分の振動数を卓越振動数と呼ぶが、これまでに報告されている大形地震の卓越振動数範囲は、ほぼ0.5~10Hzであるためこれを採用し、この範囲の外にある場合はそれぞれ0.5Hz又は10Hzとする。ただし、変圧器本体など、一般に固有振動数が高いため地震と共振する可能性が小さく、その応答も小さいため、従来の静的設計手法で過去に地震被害がほとんどなく動的解析を行なう必要がないと思われるものには静的解析手法を採用した。

2.2 検証又は解析の方法と判定基準

耐震強度の検証方法には、(1)工場試験と(2)現地試験があり、(1)には(a)加振台による加振法、(b)ハンマリング、(c)ロープによる引張り・解放などが、(2)には(d)起振機による地盤又は機器の加振法、(e)ハンマリング、(f)ロープによる引張り・解放などがあるが、先に述べた理由により、(1)の(a)加振台による加振法を主に採用した。印加箇所は機器が設置される基礎面(一部機器は架台上)とし、実加振試験を行なった結果によったが、構造上不可能なもの又は静的設計機器については、

- (a) 縮小モデルによる試験結果による判定
 - (b) 計算結果による判定
- によることとした。

このようにして求めた各機器の最大発生応力が、それぞれの許容応力以下であることを確認するわけであるが、許容応力/発生応力を安全率と定義し、下記の安全率を判定の基準とした。

$$\left. \begin{array}{l} \text{静的解析：安全率} \geq 2.5 \\ \text{動的解析：安全率} \geq 1.0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

動的解析では、基礎や建屋の応答倍率を考慮した解析条件

表1 震度階 水平加速度0.3Gは294Galで本表中のVI烈震に当たる。これは*M*(マグニチュード)に換算すると約7*M*に相当する。

気 象 庁 震 度 階(1949年)			
震度	名称	程 度 の 説 明	地動の加速度 (Gal)
0	無感	人体に感じないで、地震計に記録される程度の地震。	0.8以下
I	微震	静止している人や、特に地震に注意深い人だけに感じる程度の地震。	0.8~2.5
II	軽震	大勢の人に感じる程度のもので、戸・障子がわずかに動くのが分かるくらいの地震。	2.5~8
III	弱震	家屋が揺れ、戸・障子がガタガタと鳴動し、電灯のようなつり下げ物は相当揺れ、器内の水面の動くのが分かる程度の地震。	8~25
IV	中震	家屋の動揺が激しく、座りの悪い花瓶などは倒れ、器内の水はあふれ出る。また歩いている人にも感じられ、多くの人々は戸外に飛び出す程度の地震。	25~80
V	強震	壁に割れ目が入り、墓石、石灯ろうが倒れたり、煙突、石垣などが破損する程度の地震。	80~250
VI	烈震	家屋の倒壊は30%以下で、山崩れが起き、地割れを生じ、多くの人々は立っていることができない程度の地震。	250~400
VII	激震	家屋の倒壊が30%以上に及び、山崩れ、地割れ、断層などを生ずる地震。	400以上

になっているので安全率は1.0以上としている。静的解析では、共振特性が解析条件に入っていないが、ここで対象としている機器のほとんどのものは、屋外地上か建屋内1階以下に設置されると考えてよいので、応答倍率はほぼ1.6倍以下と想定され、配電盤類についてもこれまでの実加振試験データなどから判断して、応答倍率は2.5倍以下と考えられるので(3)式で十分と判断される。しかし、地上2階以上の建屋内に設置される場合は、建屋の増幅を考慮して個別に検討する必要がある。

なお、地震による受変電設備の被害例については記述を省くが、本稿末尾の参考文献1)、2)などを参照されたい。

3 受変電設備の耐震性検討

3.1 遮断器、保安開閉器

遮断器には72~168kV級だけをとってみても、空気遮断器、がい子形油入遮断器(日立製作所製品名：制弧遮断器)、SF₆ガス遮断器などがあり、構造・形状とも多岐にわたるため表2に代表機種(いずれも日立製作所製、以下同様)の耐震性検討結果を示す。

表2から分かるように、がい子形油入遮断器は固有振動数が共振範囲内にあり、動的解析による安全率が1.0以下であることから、2.1節に述べた地震力に耐えられるようにするには強化対策を必要とするが、がい子はいわゆる脆性材料であり補強も困難で、製作後20年を越える古いものが多いことから、ガス遮断器への交換が望まれる。空気遮断器は標準がい管式は安全率1.0以上に入るが、汚損がい管式は1.0を切るものがあり、それらはいがい管締付金具の強化ないしは長幹がい子による3方向への引張り補強などを必要とする。図2に168kV級OPG形空気遮断器の長幹がい子による3方向引張り補強の構造説明を示す。この強化対策により、共振周波数正弦3波加振に耐えられる限界加速度190Galを680Galに向上できた。ガス遮断器(タンク形)は固有振動数も12.5Hzと剛性が高く、動的解析でも安全率4.0と耐震性が優れていることが実証された。

保安開閉器に関しては、極めて種類が多くその構造形状や取付も多岐にわたるため、代表的な機種についての検討結果を表3に取りまとめて示す。

線路開閉器については水平1点・2点切り、垂直1点切り、負荷断路器を取り上げ、加振点は線路開閉器本体ベース部と

表2 72～168kV級各種遮断器の耐震性 制弧遮断器は安全率が1.0以下で対策を要し、空気遮断器は汚損がい管形に対策を要するものがあり、ガス遮断器は固有振動数も共振範囲外にあり、かつ安全率4.0と耐震性に優れていることが分かる。

タイプ	制弧遮断器	空気遮断器		ガス遮断器
		標準がい管形	汚損がい管形	
概略構造例				
形式	B0I-100-PA, B0I-100(250B, 350B)-PA, ほか	OPG-250A/350A-PA(S), ほか	OPG-250A/350A-PA(S), ほか	OPT(B)-60/70-25LA PA(R ₃)
解析	動的	動的	動的	動的
固有振動数 (Hz)	2.5～6.0	72/84kV 6.7～7.6 164kV 3.2～4.6	72/84kV 4.2～6.7 164kV 3.0～4.5	12.5
安全率	0.2～1.0	72/84kV 1.0～1.3 164kV 1.0	72/84kV 0.8～1.4 164kV 0.6～0.8	4.0

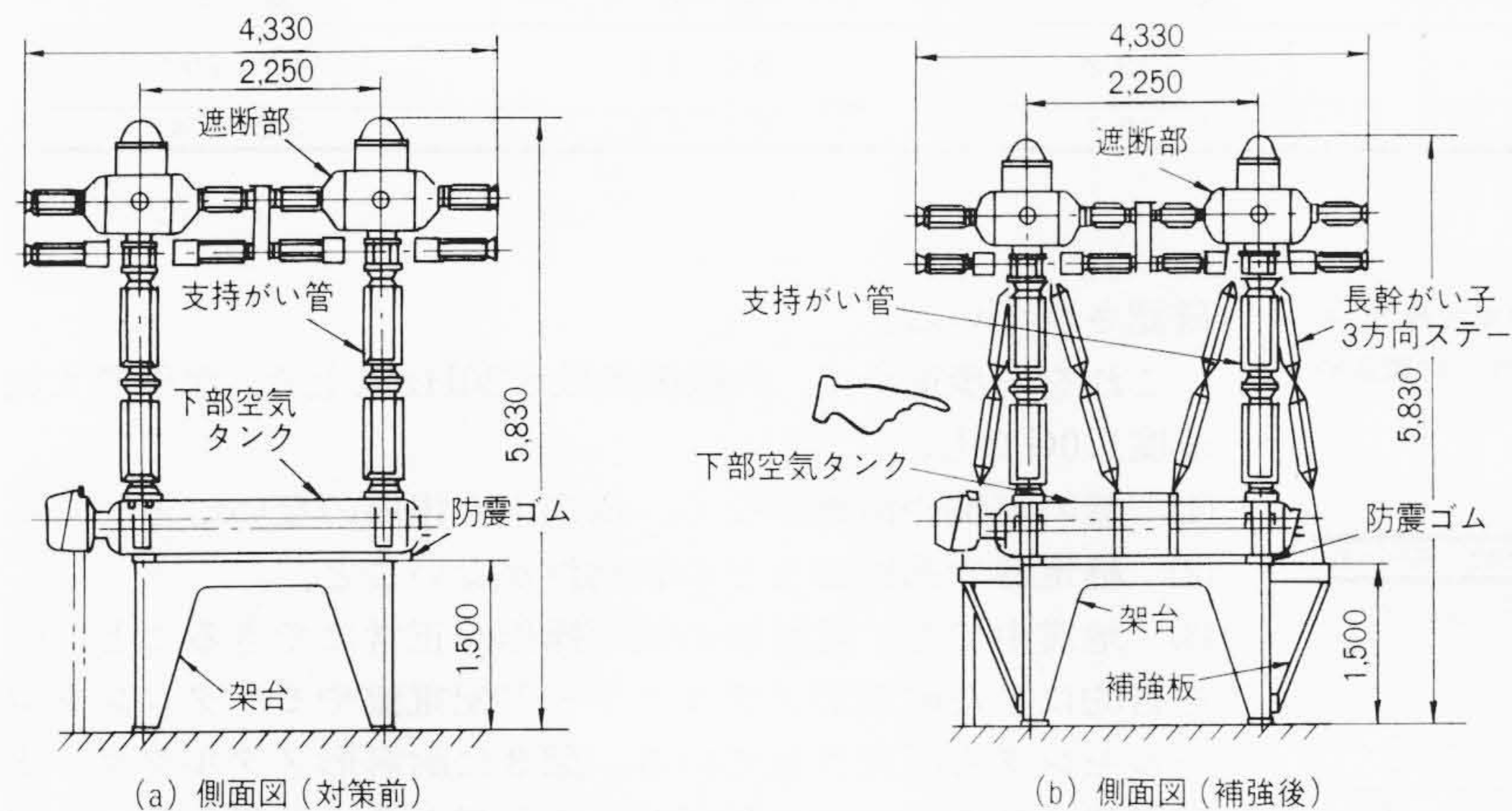


図2 168kV空気遮断器(汚損がい管使用)の強化例 支持がい管上段から3方向に長幹がい子で引張り補強し、架台に補強板を追加することにより、限界加速度190Galを680Galに向上できた。(形式：OPG-500A/750A-PAR(S)，支持がい管：LM-2I60，がい管締付金具：A形)

し動的解析により強度的に最も弱いがい子基部について検討した。いずれも許容応力のほうが大で線路開閉器そのものについては十分な強度をもっているが、接続導体にはフレキシブル導体を用いる(少なくとも接続導体に若干の余裕をもたせる。)ことが望ましい。

避雷器には直列ギャップを使用する制弧避雷器とギャップレスの酸化亜鉛避雷器があるが、いずれも架台上に設置される場合が多く、架台を含めると構造形状とも多岐にわたるため、加振点を避雷器の取付部とし固有振動数が10Hzを超えるものについても共振3波時の動的解析を行なった。避雷器はがい子構造のためがい管下部に最弱点部があり、制弧避雷器の一部(OD-150及び140kV級ODB形)に安全率1.0を切るものがあった。これらについては古いものが多いことから、保護特性に優れ、汚損特性も大幅に向上している酸化亜鉛避雷器へのリプレースが推奨される。

3.2 変圧器、計器用変成器

変圧器本体は金属材料を主体とした構造物で、短絡電磁力や輸送時の外力の大きさなどから強度は決まっており、固有振動数が高く地震動に対して共振する可能性はなく、耐震上十分な強度をもっている。したがって、他のがい子形機器同様ブッシングが弱点となるが、油入変圧器での水平加速度0.5Gでの静的(変圧器本体)及び動的(ブッシング)解析の結果の一例を表4(a)に示す。

変圧器は標準地盤、基礎上に設置されていることを前提に、またブッシングの加振点はブッシング取付ポケット下端に設

定し実施した。結果は表4に見るように、本体及びブッシングのいずれも十分な強度をもつことが検証されたが、高压側ブッシングに引張り・曲げ応力をかけないように接続導体に「たるみ」を付ける、低压側ブッシングと導体接続は可とう導体を介して接続する、ことが推奨される。

なお、油入変圧器の放圧装置やブックホルツ継電器などの付属装置については、地震動による変圧器内部の繰返し圧力変動による放圧板の疲労劣化を避けるため、繰返し疲労を受けない方式の避圧弁に、また地震動による誤動作のない構造のピトー管式の継電器に交換するなどが望まれる。

計器用変成器は一般に架台上に設置されるが、架台の高さ、形状は多岐にわたるので、加振点は計器用変成器の下部に設定し、変圧器と同様に機器の固有振動数が地震の卓越振動数(0.5～10Hz)を上回る場合は静的解析を、0.5～10Hz以内にある場合は動的解析を、水平加速度0.5G(動的の場合、共振正弦3波)で実施した。その結果をまとめて表4(b)に示す。いずれも十分な安全率をもっているが、変圧器と同様にケーブルなど接続導体に若干の余裕をもたせること、地盤沈下や基礎のき裂などが無いことが重要である。

3.3 配電盤、監視制御盤

配電盤類の構造は多岐にわたり、設置場所も多種多様であるが、盤本体の倒壊や滑動、取付器具の緩み、落下がないことという観点からは、盤本体のチャンネルベースへの、又は床面への固定、特殊計器や継電器などの支持固定、飛出し防止をしっかりとっておけば、十分な耐震強度をもっていることが

表3 72〜168kV級保安開閉器の耐震性 線路開閉器、回転形断路器、PV、NV形断路器とも十分な安全率をもっているが、避雷器では制弧避雷器の一部に安全率1.0を切るものがあり、酸化亜鉛避雷器は固有振動数も高く十分な安全率をもっている(加振点はいずれも本体ベース部)。

タイプ	線路開閉器	回転形断路器	PV, NV形断路器	避雷器																		
				制弧避雷器	酸化亜鉛避雷器																	
概略構造例																						
	<table><tr><th>定格電圧</th><th>H</th><th>重 量</th></tr><tr><td>84kV</td><td>2,530mm</td><td>270kg</td></tr><tr><td>98kV</td><td>3,035mm</td><td>330kg</td></tr></table>	定格電圧	H	重 量	84kV	2,530mm	270kg	98kV	3,035mm	330kg	<table><tr><th>定格電圧</th><th>H</th><th>重 量</th></tr><tr><td>84kV</td><td>1,260mm</td><td>110kg</td></tr><tr><td>98kV</td><td>1,260mm</td><td>110kg</td></tr><tr><td>140kV</td><td>1,620mm</td><td>140kg</td></tr></table>	定格電圧	H	重 量	84kV	1,260mm	110kg	98kV	1,260mm	110kg	140kV	1,620mm
定格電圧	H	重 量																				
84kV	2,530mm	270kg																				
98kV	3,035mm	330kg																				
定格電圧	H	重 量																				
84kV	1,260mm	110kg																				
98kV	1,260mm	110kg																				
140kV	1,620mm	140kg																				
形 式	NY-PA(RA) NY-PGA(RGA) PGLB-PA, ほか	EB-70L PA EBG-70L PA EBW-70L PA	NV-FF PV-FF	OD-150 ODB-110, 110P ODBR-110P, ほか	ZLA-25S, C ZLA-50S, C																	
解 析	動 的	静 的	静 的	動 的	動 的																	
固有振動数 (Hz)	1.5~7.0	12.5	12.0~12.2	5.0~9.7	4.3~25.5																	
安全率	1.2~6.6	15.2	15.5~15.7	0.7~4.0	2.2~5.4																	

表4 変圧器、計器用変成器の耐震性 変圧器や計器用変成器は、それ自体は固有振動数、安全率とも高く、十分な耐震性を備えている。付属品や基礎及び接続導体に留意する必要がある。

(a) 変圧器本体及びブッシング

種類	製品機種内容		耐震解析	固有振動数	安全率
変圧器本体及びブッシング	(1) 変圧器本体		静的	15以上	5
	(2) 69kV, 80.5kV	標準がい管	静的	24	13
		汚損がい管		23	11
	(3) 115kV	標準がい管	静的	18	12
		汚損がい管		16	10
	(4) 161kV	標準がい管	動的	13	8
		汚損がい管		11.6	5

(b) 計器用変成器

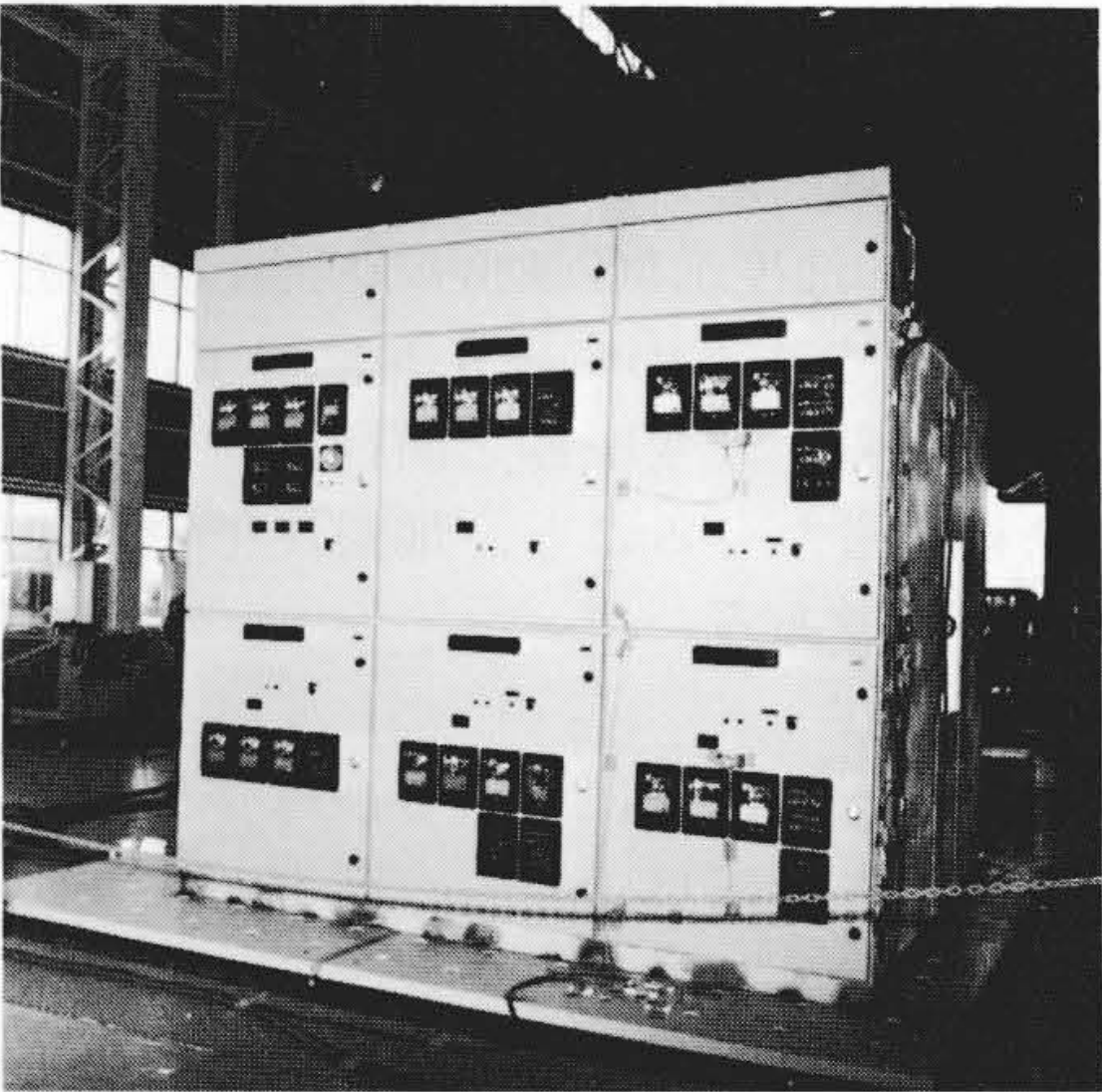
No.	種類	製品機種内容		耐震解析	固有振動数	安全率
1	変流器	69kV, 80.5kV	標準がい管	静的	19.2Hz	13
			汚損がい管		17.0Hz	11
		161kV	標準がい管	動的	7.8Hz	3.5
			汚損がい管		5.5Hz	2.5
2	計器用変圧器	66kV, 77kV	標準がい管	静的	12.0Hz	7.2
			汚損がい管		10.8Hz	6.5
3	コンデンサ形計器用変圧器	66kV, 77kV	標準がい管	静的	17.0Hz	16.7
			汚損がい管		15.0Hz	14
		154kV	標準がい管	動的	7.5Hz	5
			汚損がい管		5.0Hz	3.5

確認されている。
これを一歩進めて、共振振動数が20Hz以上で、水平最大加速度1.0Gでも、

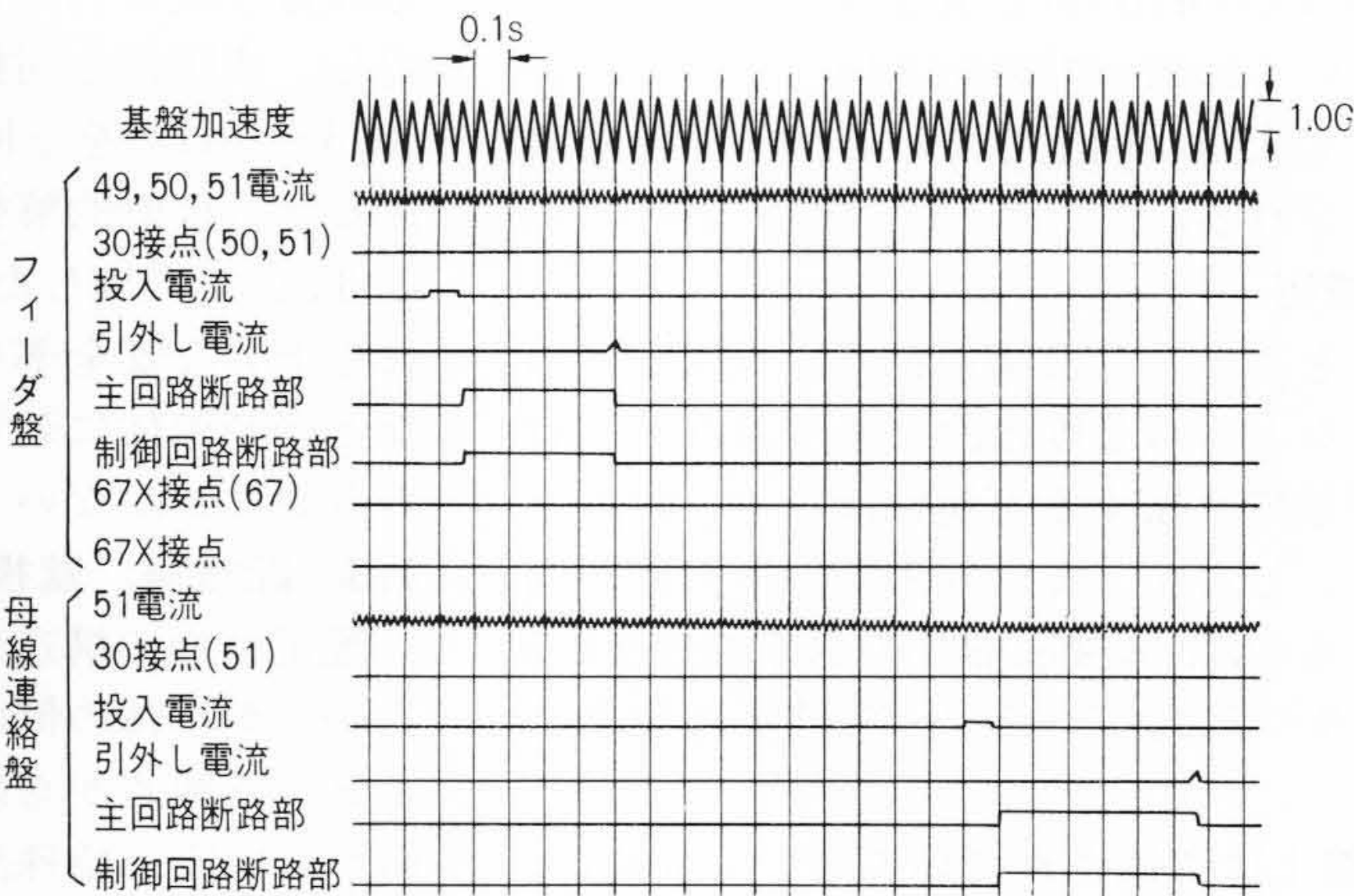
- (1) 盤の転倒や滑動がなく、構造上も損傷のないこと。
 - (2) 継電器や遮断器などの誤動作がないこと。
 - (3) 地震中でも、遮断器の開閉操作が正常にできること。
- を目的にした耐震形メタルクラッド配電盤やモータコントロールセンタも開発されている。図3に耐震形メタルクラッド配電盤の3面列盤での耐震試験の状況とその結果を示す。20t振動台に据え付けての実加振試験の結果、前後・左右方向とも共振周波数は20Hz以上であること、加速度1.0G、加振周波数5〜20Hzで各部の応力が許容値以下であること、機器に損傷や異常がないこと、が確認された³⁾。なお、ハンマリングによる自由振動試験で固有振動数は測定でき、補強の効果や列盤効果などはこの方法で検証することが簡便である。図4にハンマリングによる高圧メタルクラッド配電盤の自由振動試験結果を示す。

3.4 自家用発電設備、蓄電池

地震による停電時の電源確保の観点からも、これらの設備

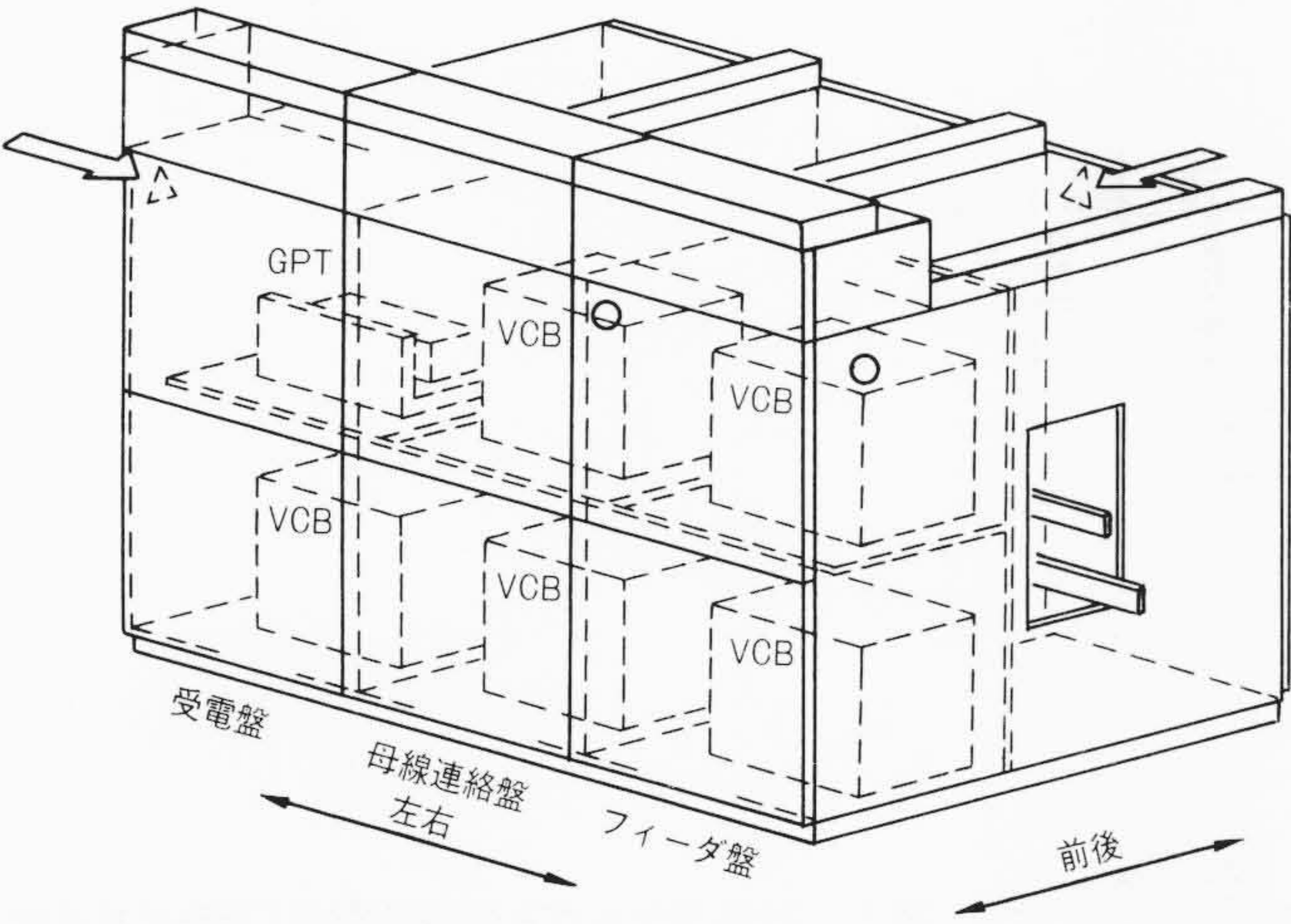


(a) 大形振動台での耐震試験状況



(b) 耐震試験での動作状況オシログラム (左右方向, 20Hz)

図3 高圧メタルクラッド配電盤の耐震試験状況 7.2kV, 1,200/2,000A真空遮断器収納メタルクラッドを3面列盤にして大形振動台(20t)に固定しての実加振試験で、各部の応力が許容値以下で、機器にも異常のないことが確認された。



注：略語説明など
△(打撃点), ○(測定点), GPT(計器用変成器), VCB(真空遮断器)

試験条件			固有振動数
前後方向	受電盤, 母線連絡盤とフィーダ盤	3面	38.0Hz
左右方向	受電盤, 母線連絡盤とフィーダ盤	3面	29.0Hz

図4 高圧メタルクラッド配電盤の自由振動試験 ハンマリングによる自由振動試験は、大形加振台使用の場合などに比べて簡便に固有振動数、すなわち改善効果などを知ることができる。

の耐震性は重要な課題である。ディーゼル発電設備については「自家用発電設備耐震設計のガイドライン」が日本内燃力発電設備協会から発行されている⁴⁾が、移動止め不付の防振台床への移動防止金具追加, 弾性支持の消音器, 配管などへの振れ防止, 配管サポート支持間隔の適性化などが推奨される。

蓄電池設備は昭和48年消防庁告示第2号により、構造、性能などが規制され耐震形となっているが、昭和48年以前の既納品については、消防法の基準を満足していないものもあり、個別に耐震対策を考慮する必要がある。

3.5 アルミパイプ母線, スイッチハウス

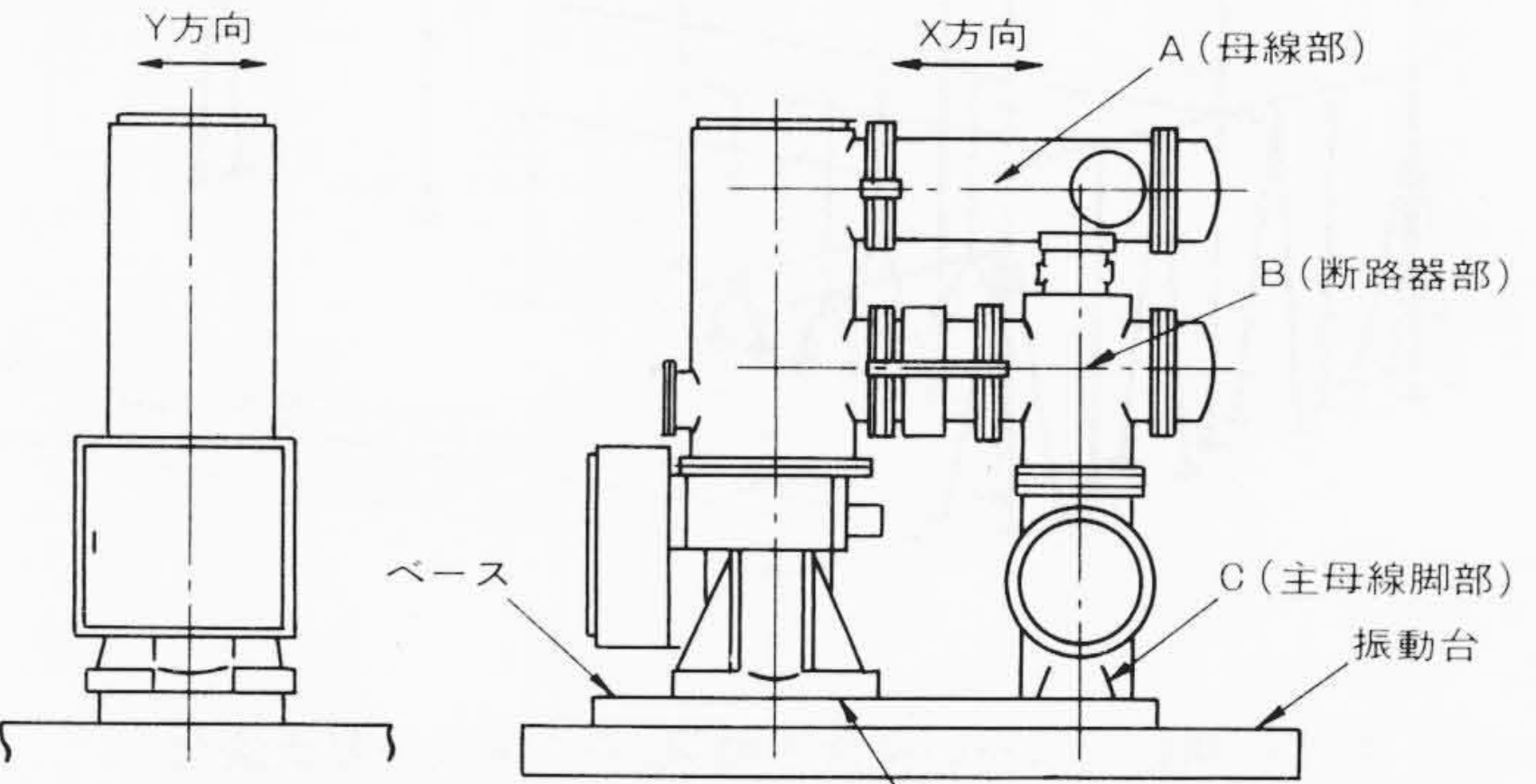
アルミパイプ母線式変電所の場合は、電力用規格により設計、製作が行なわれ、地震力は水平加速度0.5G静的解析が条件となっているが、鉄構架台の高さ、形状、パイプ母線の配置などが多岐にわたるため一概に論ずることは難しい。このため実施例により電気協同研究第38巻第4号第II編「アルミパイプ母線の耐震設計」を参考として水平加速度0.3G、共振正弦3波の動的解析を行ない、水平加速度0.5G静的解析と比較

表5 アルミパイプ母線の耐震性 固有振動数が地震の卓越振動数内にあり共振するものがあるが、0.5G静的、0.3G動的解析の結果では、対象としたアルミパイプ母線は十分な安全率をもっている。

(a) 共振周波数				
軸方向加振		直角方向加振		
第1共振点 (鉄構架台, パイプ母線)	第2共振点 (支持がい子)	第1共振点 (パイプ母線)	第2共振点 (鉄構架台)	第3共振点 (支持がい子)
4.4~6.2Hz	11.2~14.5Hz	5.2~6.0Hz	8.6~10.6Hz	12.8~16.0Hz
(b) 応答倍率				
軸方向			直角方向	
パイプ母線	支持がい子	鉄構架台	パイプ母線	支持がい子
10倍	10倍	5倍	20倍	10倍
(c) 安全率比較表				
項目	パイプ母線 曲げ応力	支持がい子 曲げ荷重	支持がい子 ねじり荷重	架台基礎ボルト 引張応力
0.5G 静的	2.4	4.76	7.87	4.0
0.3G 動的	1.86	3.07	6.2	1.2

表6 SF₆ガス絶縁開閉装置の耐震性 66/77kVガス絶縁開閉装置実機を使つての耐震試験で、X、Y両方向に0.5G、4波を加振し、各部の応力を測定した結果、各部とも十分な安全率をもっていることが確認された。

測定部位	0.5G, 4波加振時発生応力		許容応力 (kg/mm ²)	安全率	
	X方向(kg/mm ²)	Y方向(kg/mm ²)		X方向	Y方向
A	1.1	1.0	41	37.3	41.0
B	1.4	1.6	41	29.3	25.6
C	7.2	18.4	41	5.7	2.2
D	6.9	16.7	41	5.9	2.5



注：付図は、耐震試験時の供試品状態を示す。D(遮断器脚部)

検討した。その結果の要約を表5に示す。この実施例では、安全率は確保されていたが、一般にはパイプ母線への防振ダンパを追加、鉄構架台のビーム中間へのポスト追加、隣接径間長の不ぞろい化などが補強策となる。

スイッチハウスの耐震強度は、建築基準法により水平加速度0.2G静的解析で設計されているが、電気設備として見た場合、2.1~2.2の地震力判定基準にマッチするためには、側面及び壁パネルへの補強追加、接続導体のフレキシブル化などが推奨される。

3.6 SF₆ガス絶縁開閉装置

ガス絶縁開閉装置は平面配置としているため、重心が地上約1mと低く、構成機器単体についての剛性が高い、基礎に埋め込まれた埋込みベースに据え付け後溶接をする施工法をとっているなどにより、耐震性に優れた装置である⁵⁾。66/77kVガス絶縁開閉装置実機による耐震試験の試験方法と試験結果を表6に示す。ガス絶縁開閉装置の遮断部及び断路部を閉路状態にして、同表に示すX、Yの2方向に0.5G、正弦4波を加振し、加振時の各部の応力を測定したが、いずれも十分な安全率をもっていることが検証された。

実仕様に即して基礎上にガス絶縁変電所として構成されたものでは、多数の質点が3次元的に結合され、複雑で大規模な構造物となるため実機での加振試験は困難となり、有限要素法を用いた動的解析を立体構造物解析プログラムを使って電子計算機で行ない、固有振動数、変位、発生応力などを算出して裕度を確認している。計算モデルの168kVガス絶縁変電所を図5に示す。基礎の影響も考慮して動的解析を行なった結果、各条件でがい管、シース、タンク、三相一括母線、架台とも安全率は2.0以上で、十分な耐震性を保有していることが確認された。

3.7 引留鉄構

屋外変電所の鉄構は、技術基準及びJEC-127、128送電用鉄塔・鉄柱設計標準に準拠して設計製作が行なわれているが、高さ、形状、構造、母線の配置などが多種多様であり、一律に耐震強度を論ずることはできないので、以下に66kV及び154kVの二つの実施例の解析結果を述べる。解析方法はガス

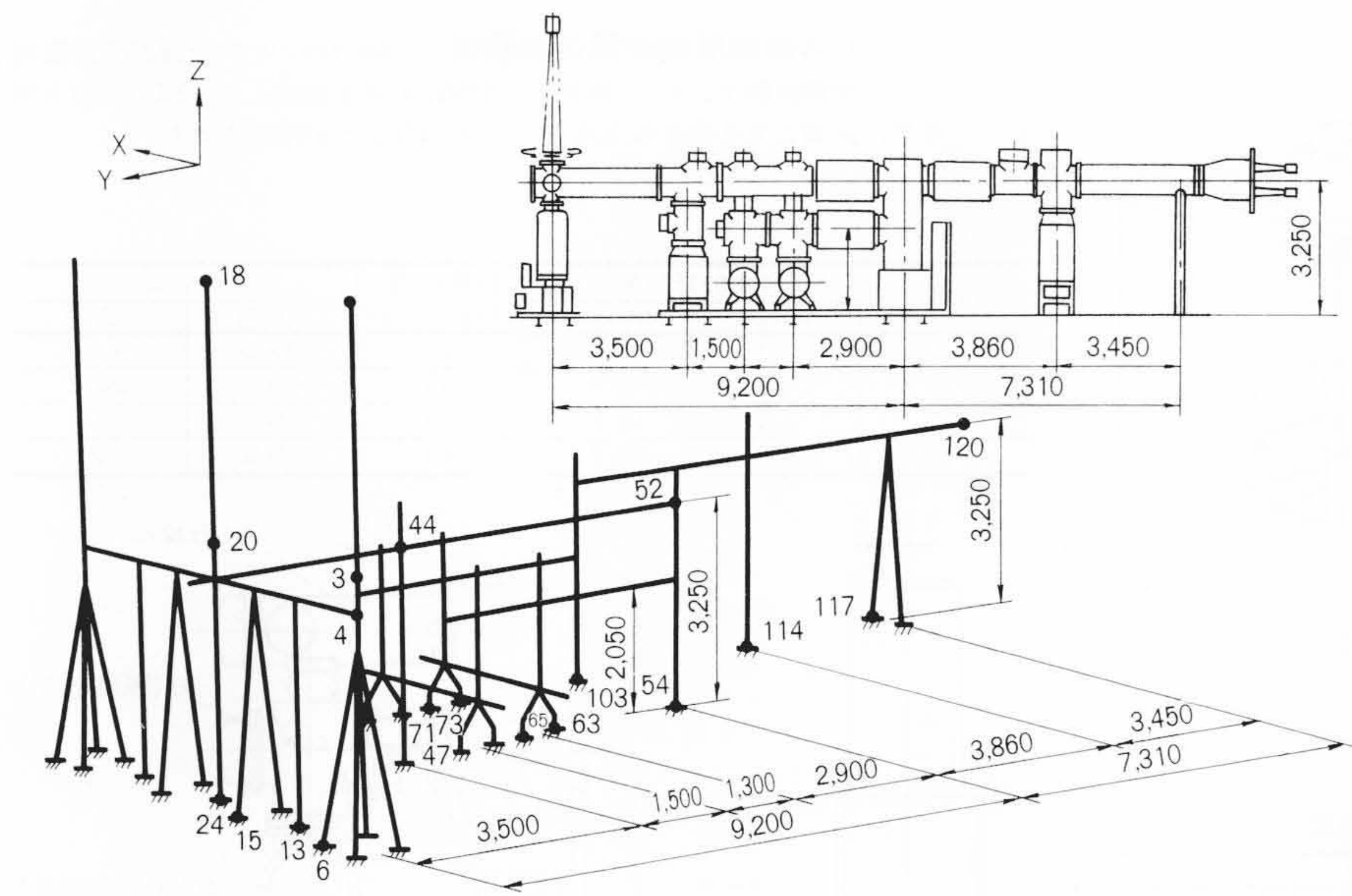


図5 計算モデルガス絶縁変電所(168kVガス絶縁変電所) 水平加速度の大きさは、0.3G×(基礎・地盤の応答倍数)として各部の応力を計算した。基礎は1体、2分割、4分割のそれぞれについて実施している。

表7 引留鉄構動的解析の条件と結果(安全率及び最大変位)
鉄構全体を解析モデル化し、引張荷重と共振正弦3波による重畳を考慮した応答解析を行ない、安全率と最大変位を確認した。

(a) 荷重条件

機 種	荷 重	架空地線引留張力	母線引留張力	風 圧 荷 重
63kV鉄構		400kg	800kg	120kg/m ²
154kV鉄構		500kg	1,000kg	240kg/m ²

(b) 安全率

機 種	荷 重 応 力	引張荷重+地震荷重		判 定
		せん断	曲げ+圧縮	
63kV鉄構		20.0	1.67	良
154kV鉄構		5.0	1.01	良

(c) 最大変位

機 種	荷重条件	変 位			経過時刻
		X方向	Y方向	Z方向	
63kV鉄構	引張荷重+地震荷重	2.99mm	0.01mm	43.80mm	0.6秒
154kV鉄構	同 上	58.24mm	0.09mm	4.54mm	1.0秒

絶縁変電所と同様に有限要素法を用い、鉄構全体を解析モデル化し、母線引留張力による引張荷重と風圧荷重の重畳を考慮した静的解析、及び共振正弦3波による応答解析を行なった。応答解析には、時刻歴モデル解析法を使用した。

表7に解析条件と解析結果を、図6に154kV引留鉄構の応答変位図を示す。これらの静的及び動的解析から、実施例の66kV及び154kV送電線引留用屋外鉄構の強度は十分確保されていることが確認できた。

4 結 言

以上、168kV以下の遮断器、保安開閉器、変圧器、配電盤、自家用発電設備、蓄電池、アルミパイプ母線、ガス絶縁開閉装置、引留鉄構など、主要な産業用の受変電設備の耐震性について検証し、既設設備で耐震性を強化するにはどうすればよいかを併せて検討した。受変電設備はその種類が豊富で、製作年代も20年を越えるものから最近のものまで多岐にわたるため、実際の構成・設置状況がそれぞれ異なるので単一の結論は出せないが、基礎、架台の強化と十分な締付け、機器接続導体の適度の余裕などは共通の改善策で、変電所としてみた場合は地震にも強いガス絶縁変電所が推奨される。なお、

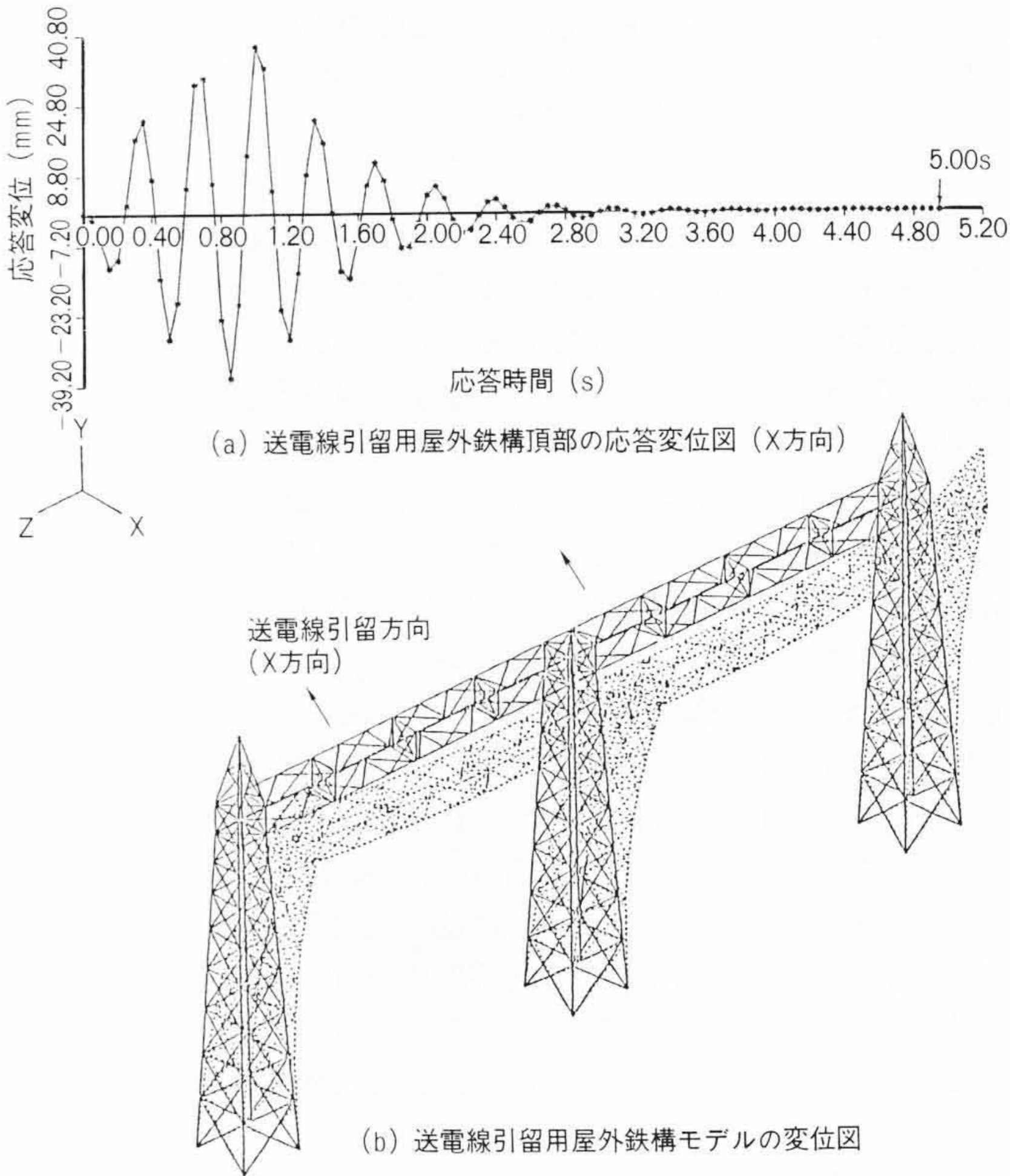


図6 引留用屋外鉄構の応答変位図 送電線引留用屋外鉄構は、送電線の引張荷重と地震荷重の重畳で、1秒後にX方向へ大きく変位している。

実地の具体的耐震強度解析については、立地条件や基礎を含めた詳細検討が必要であり、ユーザーと連携して地震に対しても備えのある受変電設備としてゆく考えである。

参考文献

- 1) 変電機器耐震専門委員会：変電機器の耐震設計，電気協同研究，34，3，電気協同研究会(昭53-10)
- 2) 電気技術基準調査委員会：変電所における電気設備の耐震対策指針，JEAG 5003-1980，日本電気協会(昭55-5)
- 3) 吉川，外：原子力発電所用大容量真空遮断器2段積メタルクラッド配電盤，日立評論，64，8，579～584(昭57-8)
- 4) 耐震措置調査研究委員会：自家用発電設備耐震設計のガイドライン，日本内燃力発電設備協会(昭56-3)
- 5) 石田，外：最近の産業用受変電システム，日立評論，67，2，159～164(昭60-2)