

1993年グアム島地震震害調査報告

佐藤忠信¹・山崎文雄²・睦好宏史³・東畑郁生⁴

¹正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒661 京都府宇治市五ヶ庄)

²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)

³正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設工学科 (〒338 埼玉県浦和市下大久保 255)

⁴正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

1993年8月8日にマグニチュード8.1の地震に襲われたグアム島の現地震害調査を行った。また断層の破壊過程から地盤加速度を予測した。グアム島の地盤は全般的に良好で、液状化や崖崩れの発生は一部地域に限定され、道路や橋梁の被害も軽微であった。しかし、一部の鉄筋コンクリート建物や発電所が被害を受けた。このため島内の電力供給は2、3日間停止し、上水道も揚水できなくなった。グアム島は頻りに台風に襲われるため、家屋の構造、ライフラインのバックアップ、緊急対応などの面で備えがよく、地震による影響を小さくした。

Key Words : Guam Island, earthquake, structural damage, seismic codes, lifeline

1. はじめに

1993年8月8日午後6時34分(現地時間)、グアム島の南東沖約110kmにマグニチュード8.1の地震が発生した。これはグアムでは84年ぶりの大地震であった。幸いなことに地震による死者や重傷者はなく、軽傷者が71名と報告されている。土木学会耐震工学委員会ではこの地震被害の調査のために、佐藤忠信、山崎文雄、睦好宏史、東畑郁生の4名からなる調査団を9月26日から30日にわたってグアム島に派遣した。現地での調査は、佐藤が地震メカニズムと地盤震動強度を、東畑が地盤震害と港湾施設の被害を、睦好が橋梁と建物の被害を、山崎がライフライン被害と社会への影響を主に担当した。

グアム島は、図-1に示すように、南北約50km、東西の幅が広いところで20kmに満たない島である。被害箇所は新聞等で確認できたので直接調査を行った。しかし、地震後約7週間を経過していたため、被災直後の様子が分かりにくくなっている箇所もあった。また、被害統計や震後対応などの情報収集を目的として、関係機関を訪問調査した。以下に調査結果の概要を報告する。

2. 地震と強震動予測

グアム島を含むマリアナ群島は、太平洋プレートがフィリピン海プレートに潜り込むことによって形成された島弧であり、弧状のマリアナ海溝がグアム島の東側か

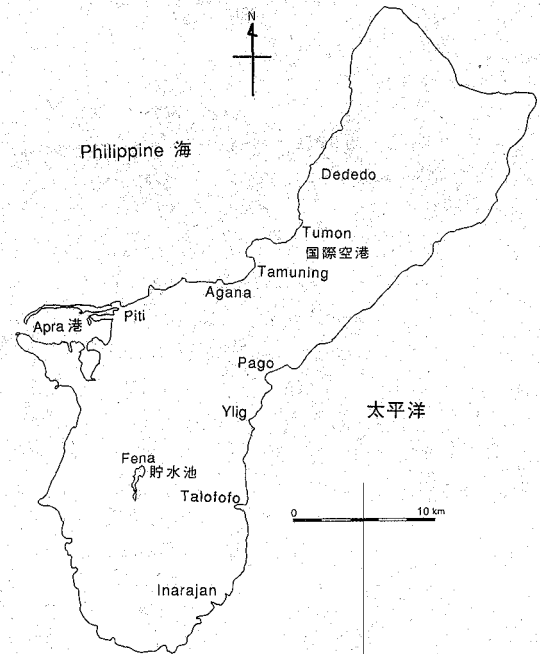


図-1 グアム島

ら南東にかけて存在している。近年のグアム島の被害地震は、アラスカの南岸や日本の太平洋側で起こる地震と同じような震源機構で、グアム島沖の東から南東にかけての太平洋プレートの沈み込み域で発生している。

米国地質調査所 (USGS) とハーバード大学ならびに

表一 Guam島地震の断層面解

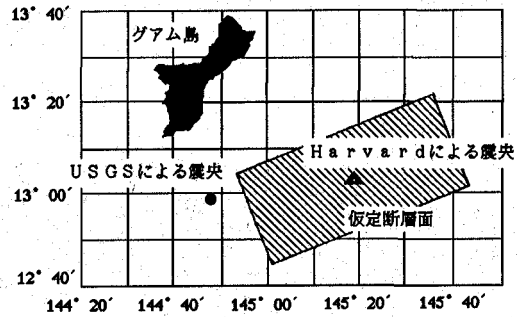
解析機関	地震記録	走向	伏角	滑角	Mo×(10 ²⁰ Nm)	震源位置	
Harv CMT	遠地表面波	313	17	149	5.8	北緯13.06N 東経145.51E	
USGS	遠地P波	329	51	164	2.3	北緯12.98N 東経144.80E	
横浜市立大学のサブイベント解							
イベント	発震時	深さ	継続時間	走向	伏角	滑角	Mo×(10 ²⁰ Nm)
	sec	km	sec				
1	3	60	11	250	11	90	1.57
2	12	56	11				3.08
合計			20				4.65

横浜市立大学・菊地正幸教授が発表している震源パラメータ^{1)~3)}を表一に示す。震源位置についての情報はハーバード大学とUSGSのものしかなく、北緯については両者の値は近いが、東経については0.5度ほど異なっている。USGSの解は遠地P波を用いているので、発震源を表すが、ハーバード大学の解は遠地表面波を用いたものであるため、地震エネルギーが開放された主な位置を表している。したがって以下の解析では、ハーバード大学の解を地震断層の中央位置として用いた。USGSとハーバード大学による震央位置と、解析に用いた断層面とGuam島の相対的な位置を図一に示す。

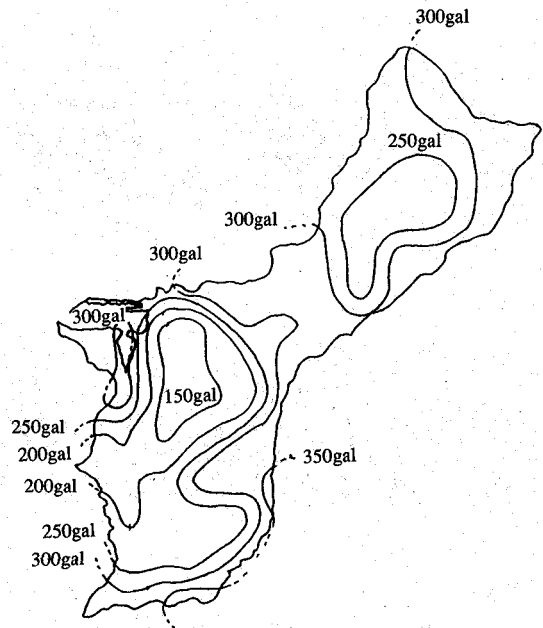
菊地の解析によればメカニズムは縦ずれ型で、2つのサブイベントからなっている。余震の震源位置の分解能が良くないので、P波の節面のいずれかを断層面とすればよいかの客観的なデータはない。しかしサブイベントの深さが50~60kmの狭い範囲に求まっているので、ほぼ水平の緩傾斜の面が断層面であると考えられる。また、地震モーメントに比べ破壊継続時間が短いので、かなり高い応力降下の地震であったことも指摘される。さらに、地震規模にもかかわらず津波が小さかったことも特筆できる。

本震記録は観測されていないため、その周期特性ははっきりしないが、2階以下の低層建物にあまり被害がなく、高層建物に被害が多かったことから、地震動には周期のやや長い成分が卓越していたと推定される。また被害分布などから、局所的な地盤条件が地震動増幅に影響していたものと思われる。

佐藤⁴⁾はこれまで、断層の破壊過程を考慮し、小地震の震源スペクトルから大地震のパワースペクトルを計算して最大地動の期待値を推定する方法を開発してきた。この方法を適用して、Guam島内での地盤地震動強度を推定する。震源特性としては、菊地による遠地P波のサブイベント解を参考にして、地震モーメント4.65×10²⁰Nm、走向角250度、伏角11度とし、震央は北緯13.3度、東経145.35度とした。地震断層は長さ86.19km、幅43.08kmとした。基盤岩のS波速度は3.4km/s、



図一 震央位置と仮定した断層面



図二 解析で求めた最大加速度の期待値

破壊開始点は断層の中央、その破壊速度をS波速度の0.9倍とし、同心円状に一樣に破壊が進行するものとして、基盤岩露頭における最大加速度の期待値を解析的に求めた。

地表面での地震動強度の推定には、表層地盤の増幅を考慮する必要があり、地質条件との関係として、第4紀層で5.5倍、第4~3紀層で5.0倍、第3紀層で3.5倍、最も古い第3紀層で2.5倍と仮定した。対象地域を一辺約6.4kmの縦16、横14、合計224個の網目で覆い、網目の各交点上での地質条件を読みとり増幅度を決定した。この値を網目の各交点で計算された基盤での最大加速度の期待値に乘じ、224個の交点における地表面での最大加速度を求めた。図二は最大加速度の期待値の等高線であるが、被害の大きかったタモン (Tumon)、タムニン (Tamuning)、アガニア (Agana) ならびにアブ

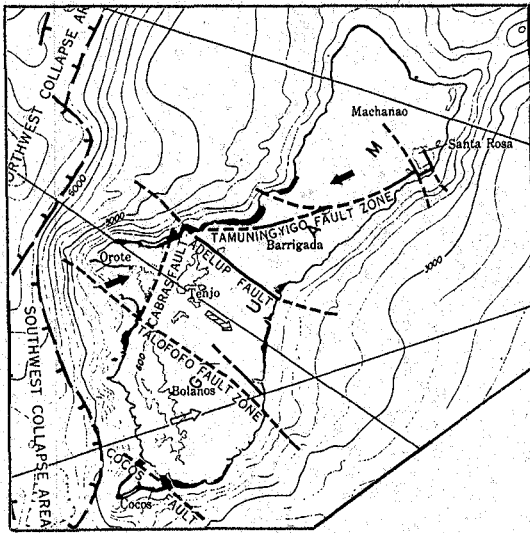


図-4 グアム島内の活断層 (出典: USGS)

ラ (Apra) 商業港などでは、300 Gal を越える最大加速度であったと推定される。

3. 地質と地盤災害

グアム島はマリアナ群島で最大の島 (面積 543 km²) で、その最南端に位置している。島の北半分は石灰岩からなる台地で、海岸線は崖状になっている。台地は北端で 150 m 以上の標高を有し、南に向かって傾斜し島の中央では 50 m 以下の標高となっている。島の南半分は火山岩の開析された高地で、東海岸は石灰岩となっている。多孔質性の石灰岩からなる北側の台地には河川はなく、雨水は地下水として浸透する。一方、南部の火山性の地域には数多くの河川が存在し、雨水は表面流として流出する。島の南部には標高 250 m から 340 m の山塊が西海岸に平行に連なっており、断崖の海岸線以外の所では、珊瑚礁が島を取り囲んでいる。

グアム島の地殻構造⁹⁾は、北部、中部、南部の3つの領域に分けられる。北部の台地は新更新世のときに南西に緩やかに傾いたものである。中部は第3紀の火山岩からなり、小規模な断層や褶曲によって変形されている。中部にみられる始新世の火山岩は、グアム西部にあった初期の火山から噴出したものである。南部の構造は、その後にグアム島南西部に出現した新第三紀の火山から噴出した火山岩からなっており、断層運動や褶曲に基づく変性をあまり受けていない。島の表層地形は、石灰岩からなる台地、開析された火山性の台地、盆状地形、ならびに海岸低地と谷底低地からなっている。

この地震の震源はグアム島からかなり離れているの

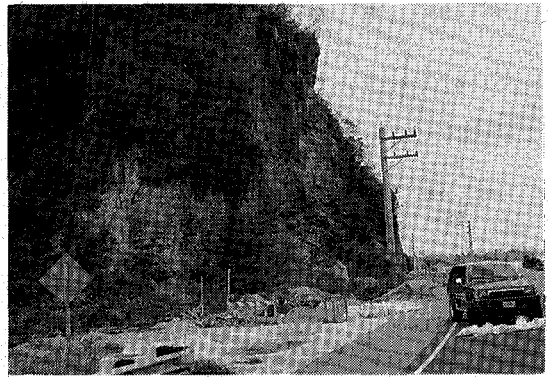


写真-1 断層崖に見られる斜面崩壊

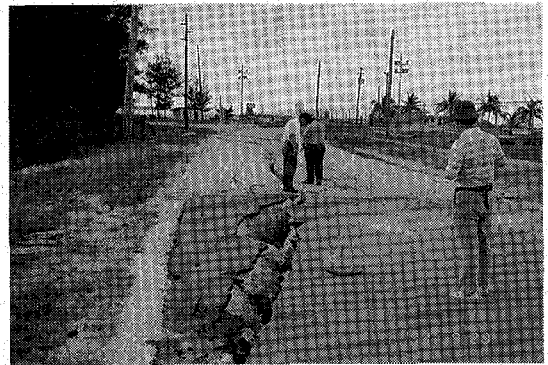


写真-2 軍港への取付道路の液状化被害

で、地震断層が地表面に現れることはなかった。しかし、図-4 に示したグアム島に存在している活断層に沿って、小規模であるが斜面崩壊がかなり発生したことは特筆される。写真-1 はその一例であり、カブラス (Cabras) 断層に沿った道路沿いで発生した斜面崩壊である。

表層地質と関係して発生する地盤災害の主なものは、液状化、盛土や築堤のはらみ出し、地盤沈下や地すべり等である。今回の地震でも、ピティ (Piti) 発電所、商業港、軍港 (写真-2) などで液状化現象が発生したが、いずれも細粒砂で埋め立てられ地下水位の高い場所であった。その他に、局所的な橋台の裏込め土の沈下がかなり見られた。こうした地震災害は、地盤特性との関係がかなり明確である。グアムの表層地盤分類⁵⁾と地震被害分布を比較すると、被害の大半は地盤分類の1 (図-5 に示した谷底および海岸低地)、5 (市街化した平地)、6 (傾斜した露頭) の地域に分布している。

4. 港湾施設の被害

グアム島には、図-1 に示したアブラに軍港と商業港⁹⁾がある。1969年までは、アブラ港は軍港として管理さ

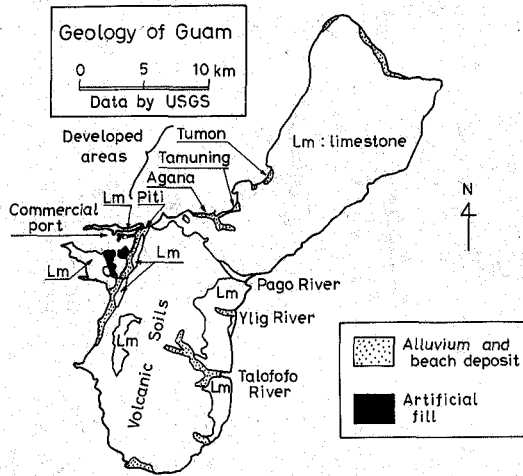


図-5 グアム島の表層地質

れていた。現在は、商業港にはF-1からF-6までの6つの埠頭があり、F-1埠頭は石油の荷揚げ場、F-2埠頭はセメントの荷揚げ場と魚網の修理場、F-3埠頭は漁船専用として利用されている。商業港として主要な埠頭は、残るF-4、5、6の3つで、これらの総延長は約600m、2隻の大型コンテナ船が同時に接岸できる規模のものである。

今回の地震では、F-5、6号埠頭に大きな被害を受け、250mにわたって岸壁が膨らみ出した。アスファルト舗装のエプロンに亀裂が走り、沈下や段差が生じた(写真-3)。亀裂は護岸と平行に4本出現し、裏込めの沈下は平均で約30cmであった。このため荷役用大型クレーンの軌道中央部がひずみ走行不能の状態となり、強風時用のクレーン固定装置も使用不能となった。

地震後1週間は大型船の接岸ができなかったため、アメリカ本土からの食料は、台湾で小型船に積み替えて運んだ。ちなみにこの港は、1960年代に砂州を削って港を掘削し、掘削土砂は護岸の裏込めとして利用した。裏込めの表層土は20cmごとに締固めを行ったが、水面下の土は水中投棄しただけとなっている。このため、今回の地震で液状化し、エプロンの後背ヤードには噴出した砂が溜っていた。

地震が発生した時期は台風の時期と重なっており、荷揚げクレーンの転倒の危険があったため、F-5、6号埠頭の閉鎖を余儀なくされた。隣接するF-4埠頭の被害が軽微であったことから、そこへクレーンを移設し、応急的なクレーンの固定装置を10日間で設置し、港の機能の回復をはかった。今回の地震による被害の復旧には、約1千万ドルが必要と見積られている。

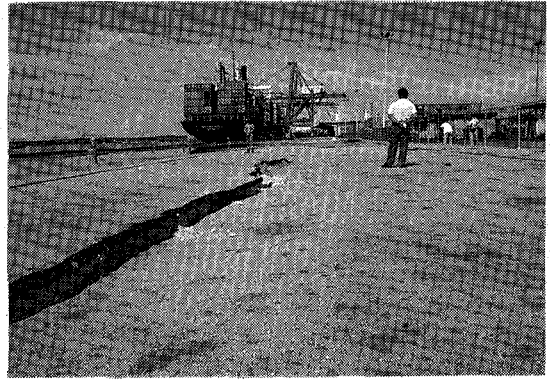


写真-3 アブラ商業港のエプロンに生じた段差

5. 橋梁の被害

米国における橋梁の耐震設計法はAASHTO⁷⁾によって定められているが、その1983年版によれば、耐震設計に用いる基準地床加速度を示す米国の分布図の中に、グアム島は入っていない。そこで、建物の設計規準のUBC⁸⁾から基準震度を推定すると0.25~0.3となる。これを用いて、堅固な地盤上にあり、周期0.5秒、単一式橋脚を有する2径間以上の橋梁を例にとって設計震度を計算すると、0.2程度の値となる。しかし、単径間橋梁では耐震設計を行う必要はなく、桁と橋台における最小桁かかり長を確保すればよいことになっている。

グアム島には一部のリゾートエリアを除いて大きな橋はなく、今回の地震による橋梁の被害は比較的軽微なものであった。被害を受けた橋梁は、橋桁がプレストレストコンクリート(PC)または鉄筋コンクリート(RC)で、橋脚および橋台はRCである。スパンはPC橋で20~30m、RC橋で20m以下で、橋脚高さは3~5m程度である。被害を受けた多くの橋は、グアム島南東部の4号線沿いに位置している。地震による主な被害は、橋桁が橋台にぶつかることによって生じた橋台の損傷、桁および橋脚のコンクリートのひび割れや剝離、道路と橋の取り付け部における裏込め土の沈下である。地震発生後1週間は、橋の点検や道路の沈下部の補修等で通行止めとなったが、橋そのものにはほとんど問題がないため、その後開放された。通行止めとなった期間は、山岳道路等を迂回路として利用し、大きな交通支障は生じなかった。比較的大きな被害を受けた主な橋梁については、その被害状況の概略を以下に示す。

Pago川河口近くに架かるPago橋は、プレキャストRC桁を用いた1径間単純橋である。被害状況は、道路と橋の取り付け部において、橋台背面の裏込め地盤が約60cm沈下して一時通行止めとなったほか、反対側の橋台背面の地盤は、川の方へ永久変位を生じていた。また、

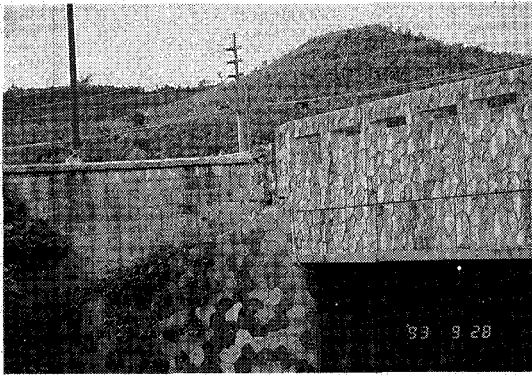


写真-4 Pago 橋の桁一橋台接合部の被害

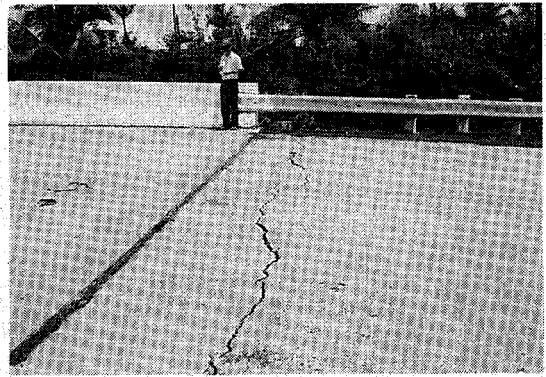


写真-6 Inarajan 橋の橋台背面の沈下と舗装の亀裂

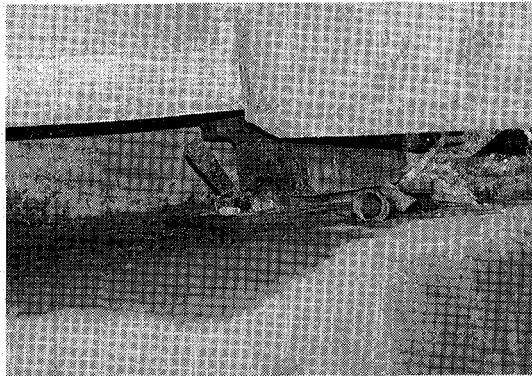


写真-5 Ylig 橋の鋼製支承の劣化と損傷

写真-4に示すように、桁および橋台にひびわれ等の軽微な損傷が見られたが、構造的には問題が無いと思われる。さらに伸縮継手にも軽微な被害が見られた。

Ylig 橋は、3径間のRC連続ラーメン橋で、中間にある橋脚と桁は剛結されている。被害状況は、道路と橋の取付け部盛土が沈下したほか、桁、橋台、橋脚にコンクリートのひび割れや剝離等が生じた。コンクリートが剝離している箇所において、コンクリート内の鉄筋を見てみると、すべての鉄筋に著しい錆が生じており、鉄筋の錆によりコンクリート自体もかなり劣化していたものと思われる。とくに鋼製支承は、錆によりかなり劣化してがたが生じ(写真-5)、車が通るたびに橋が数cm上下する状態であったが、そのまま使用していた。

Talofoto 橋は3径間の単純橋で、側径間はプレキャストI型プレテンションPC桁で、中央径間はポストテンションPC桁である。桁、橋台、橋脚に軽微なコンクリートのひびわれや剝離が見られ、道路取り付け部が沈下し、伸縮継手にも軽微な損傷があった。しかし、機能的には全く問題がないと思われた。

Inarajan 橋は3径間で、側径間はプレキャストI型プレテンションPC桁で、中央径間はポストテンション

PC桁である。この橋にも、道路取り付け部の沈下と舗装の亀裂(写真-6)が見られ、桁と橋台におけるコンクリートのひび割れと剝離が生じた。

その他の橋梁においても、比較的軽微な被害を受けたものがいくつかあるが、修復までのしばらくの間、通行車両の速度制限や重量制限が行われた程度であった。

6. 建物の被害

(1) 設計法の概要

グアム島は米国の準州であるため、設計法は米国本土のものを使用している。建築物の設計には、UBCが用いられており、鉄筋コンクリート構造物にはさらに、ACIの建築規準⁹⁾が適宜使用されている。UBCによれば、地震荷重は以下のようにして求められる。

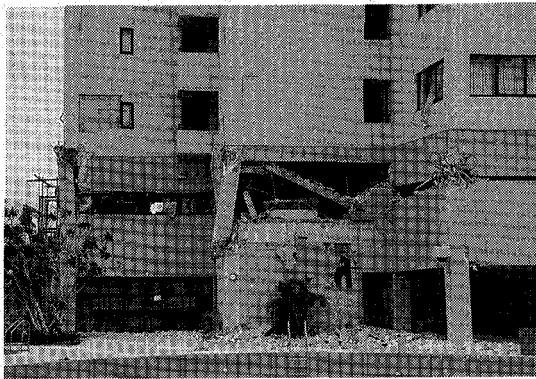
$$V = \frac{Z \cdot I \cdot C}{R_w} W \quad (1)$$

ここに、 V はベースシア、 Z は地域係数(Zone 1: 0.075, Zone 2A: 0.15, Zone 2B: 0.20, Zone 3: 0.3, Zone 4: 0.40)でグアム島はZone 3、 I は重要度係数(一般施設は1.0, 緊急用施設は1.25)、 R_w は構造システムによる係数(壁構造では4~8, フレーム構造では8~10, 曲げ抵抗フレーム構造では5~12, デュアル構造では6~12)、 W は建物の総重量である。また、建物の1次固有周期 T に応じた応答係数 C は、次式で表される。

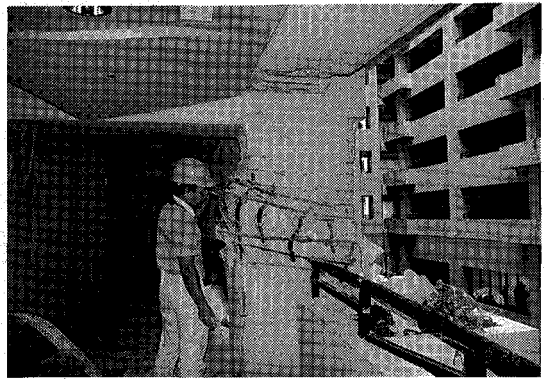
$$C = \frac{1.25 \cdot S}{T^{2/3}} \quad (C \leq 2.75) \quad (2)$$

ここに、 S は地盤係数(岩盤 $S_1=1.0$ 、深さ60mを超える固結土 $S_2=1.2$ 、6~12mの軟性土 $S_3=1.5$ 、12m以上の軟性土 $S_4=2.0$)である。

UBCと日本の建築設計法を用いて、ベースシアの比較を行った例¹⁰⁾を紹介する。同一の形状・目的の建物について、UBCに基づいてグアム島に立地するとして設計した場合と、日本の建築基準法に基づいて沖縄に立



写真一七 2階の柱が圧壊し傾いたRホテル



写真一八 Rホテルの鉄筋コンクリート柱の座屈

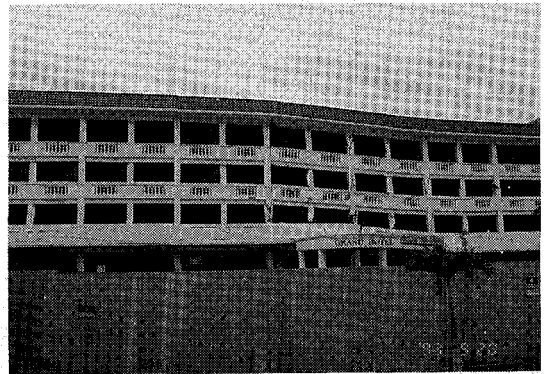
地ずりとして設計した場合を比較した。ちなみに沖縄は、地域係数が0.7と日本で最も低いところである（最大は1.0）。建物用途はホテルとし、構造はRC純ラーメン、基礎形式は支持層を岩盤とする直接基礎、階数は12階、高さは40m、建物の幅は20m、建物長は91m、平均重量は約 0.98 t/m^2 と仮定した。この結果、建物1階において考慮する必要のある地震水平力は、構造システム係数の取り方により幅があるが、UBCによるものは日本の設計法の0.25~0.6倍程度となった。しかし、この想定建物の条件の場合、グアム島では風荷重の方が支配的であり、地震では設計が決らない。ちなみに風荷重については、グアム島の規定の方が、日本のものよりかなり大きい。

このように、グアム島の耐震設計で考慮している地震力は、概して日本のものと比べ小さい。なお地域係数については、この地震のあと、カリフォルニアの地震多発地域と同じZone 4に引き上げる話が取りざたされていた。

(2) 被害の概況

建物の被害は、タモン湾に面したリゾートホテル群に集中した。構造被害が大きく取り壊しとなるのは、2つのホテルである。

Rホテルは、地震発生のわずか2週間余り前の7月21日に開業したばかりの鉄筋コンクリート12階建てホテルで、120の客室と100室のコンドミニアムからなる。並んで立つ2棟のうち、海寄りのA棟の2階が片側のみ完全に潰れ（写真一七）大きく傾いた。ホテル内部も外観以上に損傷が激しく、柱が座屈し鉄筋が折れ曲がる（写真一八）などの被害が見られた。このためA棟はグアム政庁から取り壊し命令を受け、そのための準備をしている最中であった。数多くあるホテルのうち、なぜ最新のこのホテルがこのように大きな被害を受けたかは不明で、オーナー自身も、米国本土のコンサルタントに依



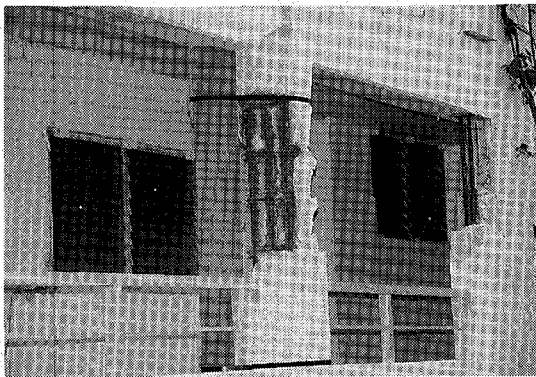
写真一九 大きな被害を受け取り壊されたGホテル

頼して調査している最中であった。不幸中の幸は、死者や重傷者がなかったことであろう。潰れた2階のレストランにも客は居たそうだが、間一髪で崩壊前に逃げ出したという。

Gホテルは、1989年に開業した客室99室の鉄筋コンクリート4階建てのホテルである。一階にレストランや店が入り、2階以上が客室である。正面には壁の一切ないこのホテルは、大部分の柱がせん断破壊するなど崩壊一歩手前の状態であった（写真一九）。当然修復は不可能で、9月下旬にはすでに解体工事が開始されていた。

そのほかのホテルにも、程度は軽いが被害はあった。Nホテルでは、屋上の貯水タンクが破損し客室に浸水した。Hホテルは旧館の被害が大きく、設備関係の移設のため数カ月の休業を強いられた。RFホテルでは、玄関車寄せのコンクリートひさしが落下し、タクシー2台が下敷になったが、ここでも運よく運転手は車外に居て難を免れた。このほか、ほぼ全てのホテルが、エキスパンション・ジョイント部の破損やブロック壁のひび割れなどの被害を被った。

ホテル以外には高層建築は殆ど無く、被害の程度も概して軽い。数少ない被害の1つとして、鉄筋コンクリー



写真—10 柱が損傷したタムニンの8階建てマンション



写真—11 十字架が落下した Inarajan の教会

ト3階建の税務局ビルは、損傷が大きく取り壊しになる。またタムニンにある鉄筋コンクリート8階建てのマンションでは、柱が損傷し鉄筋が露出するなどの被害があったが(写真—10)、修復工事中であった。島の南端イナラハン(Inarajan)では、古い鉄筋コンクリートの教会の屋根から十字架が落下するなどの被害があり(写真—11)、このほかの教会でも被害が報告されている。学校建築については、Ordet/Chalan Pago 小学校, Upi 小学校, Inarajan 高校などの校舎に大きな構造被害が生じ、多くの教室が使用不能の状態となった。またこのほかの10校でも被害が報告されている。

一方、住宅の被害は軽微であった。グアム島は台風に頻りに襲われるので、家屋は大半が平屋で頑丈な造りである。地震動の卓越周期とも関連するであろうが、高層ホテルに被害が出たのに比して家屋被害は少なく、地震により倒壊した家屋は見られなかった。

7. 電力施設の被害と停電

グアム島の電力供給は、グアム電力公社(GPA)によって行われている。需要家数は、住宅が約3万件、産業お

よび政府関係が約6千件である。しかし海軍も発電設備を所有し、海軍関係の施設や住宅については直接に電力供給もしている。GPAのおもな電力施設としては、アプラ湾に面したCabras火力発電所(出力14.2万kW)、島北部のTanguisson火力発電所(出力5.3万kW)とDededo発電所(出力3.3万kW)があり、合計発電能力は22.8万kWである。このほか小規模の発電機が数箇所にあるが、いずれも出力は小さい。GPAでは近年の急激な電力需要の伸びに対応するため、発電能力の増強に努めているが、余裕はほとんどなく綱渡り状態が続いている。

一方、海軍の発電施設としては、Cabras発電所に隣接してPiti火力発電所がある。5機の発電機のうち、1号機は老朽化のためすでに退役しており、4機の合計出力は6.7万kWである。これらについても、稼働始めたのが1950年代(2,3号機)と1960年代(4,5号機)で、信頼性の低下が指摘されている。このほかの施設を合わせて、海軍の発電能力は7.9万kWである。海軍の発電した電力についても、GPAの送電系統により一般需要家にも供給されている。

送配電線の延長は856kmで、内訳は送電線が208km、架空配電線が592km、地中配電線が56kmである。

グアム島は台風に度々襲われるため、電力施設も耐風対策が進んでいる。電柱は太く、継続設計風速は時速155マイル(秒速68.9m)、瞬間最大設計風速は時速180マイル(秒速80.0m)と非常に大きい。なお1992年8月の台風オマー(Omar)によって、GPAは1300万ドルもの被害を被り、復旧に約4週を要している。

地震によってGPAの発電施設では、Cabras発電所の2基の1万ガロン燃料タンクのうち、1基のタンクの基礎部リング・コンクリートに亀裂が生じ、油漏洩が発生した(写真—12)。しかしコンクリート防液堤によって、外部への流出は避けることができた。Cabras発電所の発電機や変電機器などには被害は生じていない。発電所内では沈下などの地盤変状が見られ、直径42インチの冷却水取入れ管に亀裂が生じた。その他の発電所のディーゼル発電設備などにも多少の被害があった。GPAの発電関係の総被害額は約150万ドルで、その大部分はCabras発電所が占めている。GPAの変電・送電関係については、碍子の損傷などがあったが、被害は全体に軽微であった。

海軍のPiti発電所は、地震により大きな被害を受け、推定被害額は約2400万ドルであった。地震発生時には、2号機と5号機が稼働していたが、非常用蓄電池がすべて棚から落下・破損し、この結果直流電流が失われ、2,5号機は発電機タービンの軸とローラー軸受けが損傷した(写真—13)。また停止中の3,4号機にも被害があった。構内では液状化が大規模に発生し、屋外の変圧器が

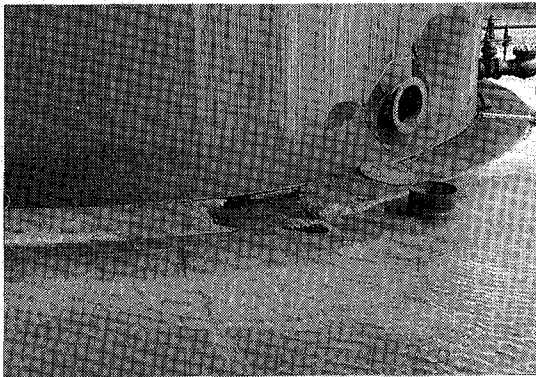


写真-12 油が漏洩した Cabras 発電所の燃料タンク

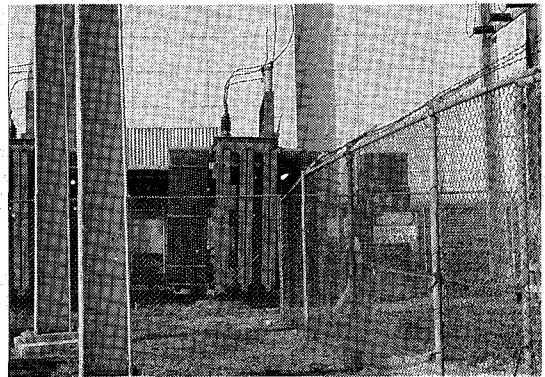


写真-14 基礎から傾いた Cabras 発電所の屋外変圧器

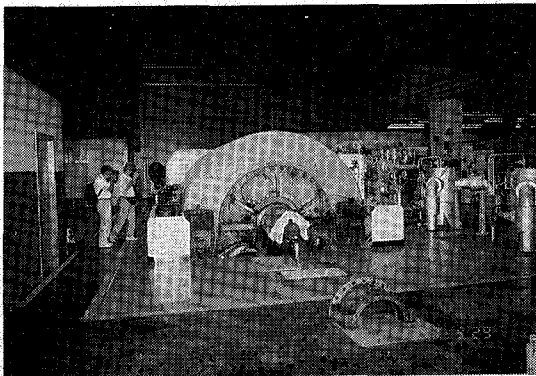


写真-13 損傷した Piti 発電所の5号機タービン

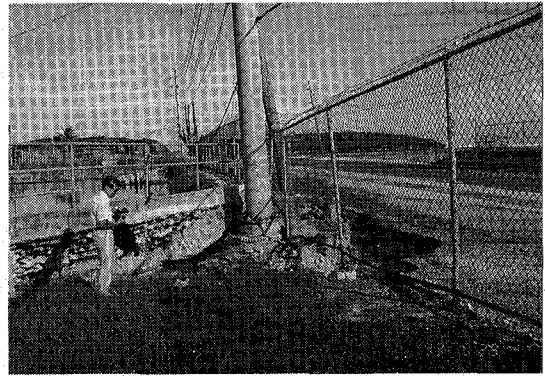


写真-15 液状化により沈下した Piti 発電所構内の電柱

基礎から傾き(写真-14)、埋設管の破損や電柱の沈下(写真-15)などが生じた。この発電所の敷地は、1950年頃に海の埋め立てにより造られたもので、締め固めなどの対策はされていなかったものと思われる。9月末時点で、4号機は稼働し5号機は修理中で、2,3号機は更新する予定である。

地震発生時、GPAの発電量は19万kWでその供給限界に近づいていた。地震発生とともに安全装置が働いて、すぐに全島は停電した。GPAでは、すぐに事前の災害復旧計画を実行に移した。300人の人員を非常召集し、発電施設や送配電設備の被害を調査し、復旧作業を開始した。地震発生から6時間5分後には、電力復旧の優先順位一番のグアム・メモリアル病院に電力が戻り、その次には、水道用井戸に対しての復電が進められた。翌日の8月9日17:35までには、GPAの電力供給量の21%が一旦復旧し、96基の水源地井戸のうち77基への電力供給が再開されていた。しかし、送電線のトラブルにより、Macheche発電所のタービン発電機が停止し、再び停電が発生した。この後、Dededo発電所のタービン発電機とグアム空港のディーゼル発電機も停止した。しかし地震の丸2日後には、島の33主要送電系統が復

旧し、約90%の需要家に電力が戻った。この間、壊れた変圧器や亀裂の生じた碍子などの被害を次々に修復した。この時点で、GPAと海軍を合わせた発電量は16.7万kWで、通常の電力使用量と比べ少し不足していたため、数時間の計画停電を行った。電力の完全復旧は、地震4日後の8月12日午後10時であった。

なおグアム島の観光ホテルやオフィビルなどの大口電力需要家は、一般に自家発電機を所有している。とくに幾つかの大ホテルは、全設備を賄えるだけの発電機を備えているため、停電の影響はあまり受けない。またショッピングセンターや飲食店などでも、発電機を所有しているところが多い。また家庭内やオフィス室内でも使えるような小型発電機も、度重なる停電対策として、このところかなり普及してきている。

8. 上水道施設の被害と断水

グアム島の上水道事業は、グアム水道公社(PUAG)によって運営されており、需要家総数は約3万件である。主たる水源は96基の深井戸であり、全供給水量(約10万トン/日)の約85%の割合を占めている。深井戸は

電力によって地下水を汲み上げるもので、その大半は、良好な帯水層のある島北部に位置している。そのほかの水源としては、6箇所の自噴泉によるものと、海軍および空軍からの購入水がある。このほか、海軍の水源としては、南部の山間部に人造湖のFena貯水池がある。浄水場は特に設けておらず、深井戸に隣接する小屋で(写真一16)、塩素消毒を行っている。

そのほかの施設としては、ポンプ場が24箇所、貯水タンクが25基ある。貯水タンクの貯蔵水量は1日分の使用量に満たず、これを2日分に増加させる計画を推進中である。これは、電力依存度が高く停電の影響を大きく受ける上水道システムを強化するためのものである。これと同時に、各深井戸などに自家発電設備の設置工事を行っている(93年中に完成)。また、度々起きる断水に対応するため、PUAGは18台の給水車を保有している。

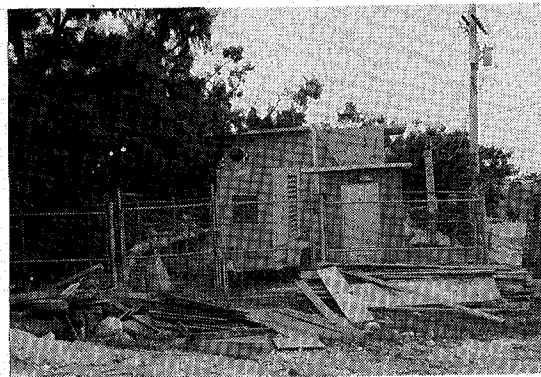
送水管および供給管網は、径16インチから3/4インチの管からなり、総延長は約700kmに及ぶ。この管路網についても、北部から南部への送水管径の拡張や、漏水が多い古い管の更新を進めている。

上水道設備の地震被害としては、島南東部の橋梁下に付設された送水管が5箇所で破断した。これらの被害のうち、Ylig橋、Merizo橋、Pago橋、Inarajan橋の送水管は、地震翌日中に補修が終った。もう1つのTalofofo橋の管は、補修前に破断箇所を系統から切り離すことで対処した。作業班は不休で管路と深井戸の復旧に当たり、全96基の深井戸は早期に使用できる状態になった。

その他の管路被害は、深井戸に電力が復旧し管路に水圧が戻るにつれて次々と発見された。8月13日の時点で、PUAGは65箇所の管損傷と100箇所の軽微な漏水を修理したが、管の埋設深度が1.5m~2.5mであるため、被災箇所の発見に手間取った。その後9月末時点までに、計約400箇所の管被害が補修された。管路網以外のPUAGの水道施設については、大きな被害の報告はない。海軍の水道設備については、Fena貯水池に軽い構造被害があったこと以外は不明である。

なお、PUAGはグアム島の下水道事業も運営しているが、下水道設備については、処理場にも管路にも被害がなかった。上水道と比較して、下水道管路に被害のなかった理由として、PUAGの責任者は、管が新しいことを挙げている。

上水道施設への被害は軽かったものの、GPAの停電により深井戸の揚水機能はほぼ全的に停止した。このため、地域差はあるものの、地震後すぐに島中で断水や水圧低下が生じた。GPAの電力復旧の優先順位が、深井戸は病院に次いで高いため、地震翌日から復電し始めた。しかし水圧が戻るには、井戸再稼働後さらに12時



写真一16 PUAGの深井戸・車載発電機・塩素消毒小屋

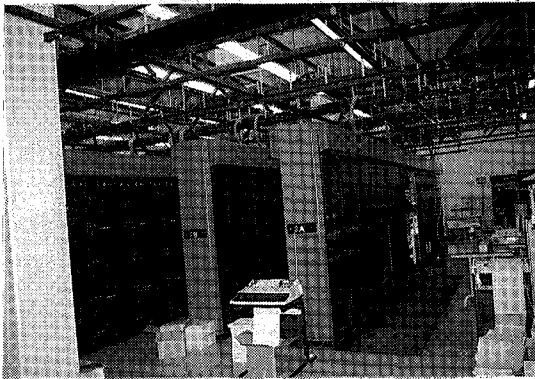
間を要した。また海軍も水確保のため、Fena貯水池地区の電力復旧を急いだ。

断水地区の住民に対して、PUAGは給水車で水を配給した。この水は、深井戸に車載発電機(写真一16中央)を運び、ポンプを稼働して汲み上げたものである。水道が復旧した住民に対しても、飲料水の煮沸ないしは塩素消毒をするよう、PUAGは新聞やラジオで広報した。

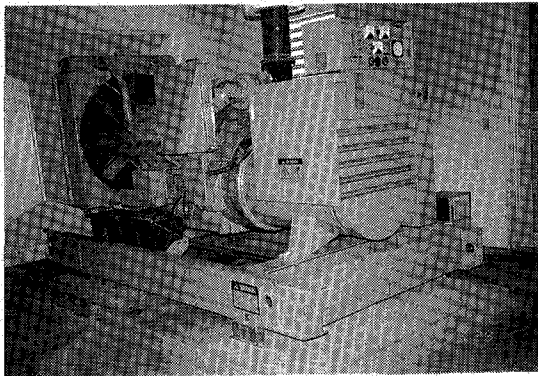
今回の地震では、グアム島の下水道は1日から2~3日断水したが、1992年8月の台風オマーでは、停電の影響で1週間以上も断水した。この時PUAGは、約半数の井戸に、軍から発電機を借りている。このような経験から、島民は比較的断水にも慣れている。しかし台風と地震の違いは、台風は前もって水を汲み置くなどの準備ができるのに対し、地震の場合はそれができない。また、水道管は地中にあるため、台風の影響はほとんど受けないが、地震による地盤破壊の影響は大きい。したがって今回の地震は、PUAGにとっても大きな試練であった。

9. 電気通信システムの被害と輻輳

グアム島の電気通信事業のうち、近距離電話は、グアム電話公社(GTA)が担当しており、その契約需要家は約5万回線である。GTAの電話線は、1976年の台風で大被害を被ったことを契機として、約12億ドルを投じて地下化を行い、現時点での地中線化率は99%に達している。そのほか、交換機などの機器についても耐震対策が充分施されており、交換機は天井および床に固定されている(写真一17)。またGPAからの電力が途絶えた時のために、全設備を運転できるだけの非常用電源装置を備えている。電力は平常でも蓄電池を通して電源としており、商業電力が停電となれば、蓄電池だけでも8時間の操業が可能である。さらにディーゼル発電機(写真一18)を稼働させれば、操業に支障はなく、燃料も1ヶ



写真一七 耐震対策が施されている GTA の電話交換機



写真一八 停電に備えた GTA のディーゼル発電機

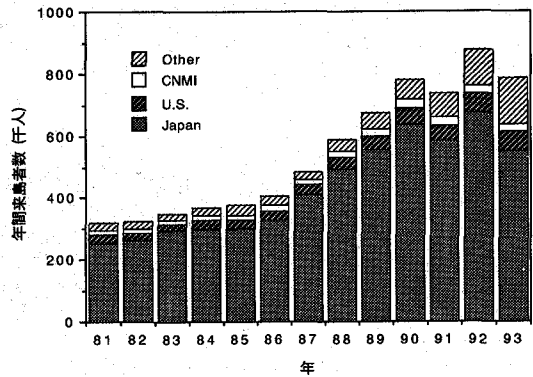
月は大丈夫だという。

遠距離電話事業は、MCI 社と IT&E 社の 2 社が行っているが、今回は調査を行っていない。

GTA は耐震対策が進んでいるため、機器関係について被害は一切報告されていない。また高い地中線化率のため、電話線の被害はほぼ皆無であった。わずかに残った架空線ケーブルの一部が切断されているのが、数日後に発見されたのが唯一の被害である。建物などの多少の被害を含め、GTA の被害額は約 50 万ドルであった。

グアム島でも、地震直後には輻輳が生じた。しかし、人口の少ない小さな島であることと、地震発生が日曜日の夕刻で家族と一緒にいた人が多かったため、皆が電話に飛びつくといった状態ではなかった。島内の近距離電話には多少の輻輳が生じたものの、5~10 分間程度で、大方は数回かけ直すうちに通じたという。

輻輳が大きかったのは遠距離電話の方で、グアム島地震の速報が日本やアメリカのテレビに放送されると、電話が殺到した。地震直後のこの放送前には、グアム島からの発信呼はつながったそうだが、すぐに輻輳状態になった。当日ホテルに滞在していた日本人観光客の話では、日本の家族に何度も電話しようとしたが繋がらず、



図一六 グアム島への年間訪問者数の推移

20:30 頃、日本から電話が入ったという。このような話から推定して、1993 年釧路沖地震などの日本の地震で生じたような、深刻な輻輳状態¹¹⁾ではなかったものと考えられる。

10. 観光への影響

グアム島の観光事業¹²⁾が始まって約 25 年であり、現在、観光はグアム島最大の産業である。地震発生前には、タモン湾沿いを中心に 26 の観光ホテルが営業し、約 6000 室の収容能力があった。図一六は過去 13 年間の年間来島者数の推移である。来島者の大半は観光客で、13 年間で約 2.5 倍に増加し、1992 年は 87.6 万人であった。年間の平均増加率は約 9% で、これまでほぼ順調な成長を続けてきた。1991 年に観光客数が減少したのは、年初の湾岸戦争の影響が大きい。1992 年は当初 100 万人の大台を越えるものと見込まれていたが、8 月の台風オマーの影響によってその達成が阻まれた。観光客の 1992 年の国別シェアでは、日本が 77% と断然トップで、以下、アメリカ (7%)、韓国 (4%)、北マリアナ諸島 (CNMI, 3%) と続いている。近年、日本のシェアが停滞気味なのに対し、韓国の躍進が目につく。

地震による観光産業への被害と影響は大きかった。タモン湾沿いの高層ホテル群に被害が集中し、使用できなくなった客室は、約半数の 3000 室に上った。しかし急ピッチで修復工事が進められ、地震 1 ヶ月後には 4000 室が、また 2 ヶ月後には 5000 室が使用可能な状態となった。しかし中には、応急修理を施し料金を割り引く部屋もあった (写真一十九)。10 月 1 日には 455 室を有する大型ホテルが開業し、部屋数はほぼ地震前の状態に回復した。この間多くのホテルでは、予約客は受け入れたものの、レストランのメニューや営業時間などを限定するなど、営業規模を一時縮小した。

図一七は、過去 4 年間の月別の来島者数である。今回

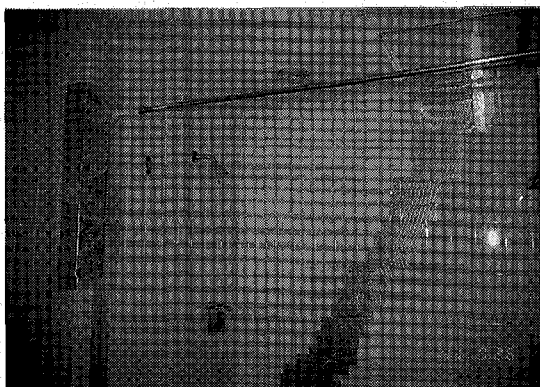


写真-19 Pホテルの客室内バスルームの応急修理

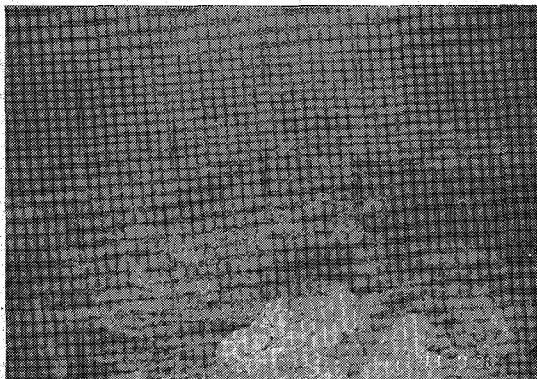


写真-20 アブラ湾内の珊瑚の地震被害

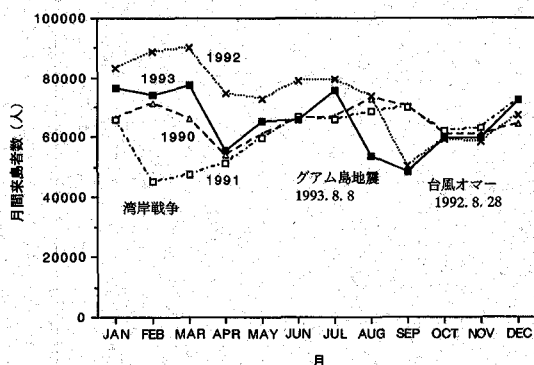


図-7 グアム島への来島者の月別内訳

の地震は8月8日に起きたため、8月だけで日本のお盆休み客など約2万件がキャンセルし、8、9月は大幅に観光客数が落ち込んだ。日本の旅行社も、8月16日まではツアーの催行を中止した。10月以降は、各種のキャンペーンを行って観光客の呼び戻しを図り、1993年の年間来島者数は最終的に78万人となった。8、9月という観光客の多く見込まれる時期に、2年続けて自然災害に見舞われるし、2年前は湾岸戦争による海外旅行自粛の影響をもちに受けるし、このところグアムの観光産業は災難続きである。また、日本を含めた世界的な不況の影響が特に93年は大きく、「地震はもう過去のことでは不況の方がより大きな問題」と観光局では語っていた。

今回の地震では幸いなことに、全壊したホテル2棟を含めて、死者および重傷者はいなかった。しかし、ホテル客の中には、余震を恐れて自分の部屋に戻らず、食堂や外で夜を過ごした人も多かった。被害の大きかったホテルでは、客が自分の荷物を取りに戻ることすら許されず、日本領事館から証明書を発行してもらい、旅行を取りやめ帰国した人もいた。

観光に関連して興味深いのは、グアム島を取り巻く珊瑚礁への地震被害である。珊瑚礁はグアム島の貴重な観

光資源で、毎年数多くのダイバーが、珊瑚礁のダイビングを目的にグアム島へやってくる。この珊瑚が、地震によってかなり手痛い被害を受けたとの話を聞き、観光用の潜水艦に乗船しその様子を調査した。写真-20は潜水艦の窓から撮影したアブラ湾内水深30mにおける被害を受けた珊瑚である。かなり多くの珊瑚に亀裂や剝離が生じ、斜面上で滑っているものもあった。ガイドの説明では、珊瑚がもとの状態に戻るには百年以上要することであった。

11. マスコミの対応

グアム島には4つのAMと5つのFMのラジオ局がある。このうち地震直後から地震報道を行ったのはAM局であり、そのうちの1つ、K57局に対して訪問調査を行った。K57はふだんからニュースを中心とした番組編成をしており、日中は毎時CBSニュースとローカルニュースを放送している。地震が発生した日曜の18:35は、ジャズ番組の最中であつたがすぐに放送を中止した。地震発生時、放送局のすぐ近くのレストランに、非番のトークショーのパーソナリティがおり、すぐに局に駆けつけた。そのほかの人も集まり、19:30頃から地震報道を開始した(写真-21)。災害対策本部(Civil Defense)や被災建物などに記者が赴いて実況放送したり、津波情報、道路閉鎖や停電・断水などの情報、それに住民からの情報など、いろいろな地震関係ニュースを夜通しで放送した。多くの住民が、停電の中で唯一の情報源のラジオに耳を傾けていたものと思われる。K57局は日頃、台風情報を流すことが多く、停電でも放送できるように発電機を備えていた。しかし、テレビ・チャンネルはほとんどケーブル局であるため電力負荷が大きく、停電の時に放送できるだけの非常用電源は持たず、地震発生当日に放送を行ったローカル・テレビ局はなかった。



写真-21 地震報道を続けたAMラジオ局

グアム島の日刊紙は、パシフィック・デイリー・ニュース¹⁾が唯一である。通常の発行部数は、宅配が約1万部、店売りが約1万6千部の計2万6千部である。地震発生時、同社はすでに翌日の紙面の準備ができていたが、すべて変更して、地震関係の記事の準備を始めた。新聞制作に必要な電力を全て賄うことのできる発電機2台を所有しており、停電は影響しなかった。このほか500ガロンの貯水タンクと連絡用の無線システムも保有し、緊急対策プランも準備されており、災害時も新聞発行できる体制となっている。このようにして作成した新聞は、地震後しばらくは3万5千部に発行部数が増加し、島民の貴重な情報源となった。

12. 社会生活への影響

家屋被害が少なかったため、地震による一般住民への直接的被害としては、非構造部材の損傷、家具の転倒や落下、食器や書物の散乱などが主なものであろう。地震で揺れている最中に停電となり、地域により停電は1日から3~4日続いた。グアム島には都市ガスがなく、大半の住民は、調理や給湯にも電力を利用している。また水道も多くの地域で断水した。このようなライフライン途絶の市民生活への影響は、大きいと予想されるが、グアム島の住民は停電や断水には慣れていても思われる。なにせ1992年8月の台風オマーでは、グアム観光局によると、停電が約3週間、断水が約1週間、空港閉鎖が約2週間も続いたのだから、この地震の影響はこれと比較すると小さかったであろう。

商業港が1週間にわたって閉鎖したことも、市民生活に影響を与えた。この間、海運での入荷が停止したため、野菜などの生鮮食料品は極端に不足し、空輸により倍近い値段で売られるトマトやレタスもあった(8月18日付新聞)。また甚大な地震被害を受けたホテルや他の産業で、少なくとも300人の従業員が解雇された模様であ

る。

地震発生時には、学校は夏休み期間中であつたが、多くの校舎や教室に構造被害が生じ使用不能の状態となった。8月23日から新学期が始まり、校舎が被害を受けた学校では、午前と午後の2部に分けて教室を2回使用するところもあった。また、被害程度の判定や補修工事の遅れに関し、子供の安全を心配する親の不満の声も出た(8月25日付新聞)。

13. 緊急対応

グアム島は台風の常襲地帯であるので、災害時の緊急対策マニュアルが1978年に作成されており、今回の地震直後にも災害対策本部(Civil Defense)が設置され、震後の緊急対策を実施した。グアム島では、この緊急対策マニュアルに従った訓練を年4回行っていることもあり、地震直後に島内全域が停電したにもかかわらず、災害復旧に関係する諸機関の緊急時における連絡網の確保や地震直後における担当者の召集が、比較的スムーズに行われた。地震直後に、グアム島知事から災対本部長に緊急対策の発動が要請された。これは、暴風雨警報のレベル3に相当するもので、日曜日の夕方にもかかわらず、1時間後には50名のスタッフが召集され緊急活動の体制が確立し、グアム全島における時々刻々の被災状況が、緊急対策本部で把握された。

緊急対策活動としての最初の要請が道路局に発令され、道路網の確保と被害実態調査が道路局によって行われ、地震発生後1時間以内に被害状況の全貌が災対本部で把握された。次に警察と消防署へ、一般家屋ならびに建物の被害調査ならびに被災住民の救助の要請が発令され、地震後2時間程度で被害の概要が災対本部により把握された。ちなみにパシフィック・デイリー・ニュースに掲載された公共施設の被害や死傷者の情報は、全て災対本部から出されたものである。

その後、緊急対策マニュアルに沿って、関係諸機関へ順次被害の把握と緊急対策の要請がなされ、地震の2日後には、知事が被害の全貌をほぼ把握していた。なお、緊急対策室には61本の緊急連絡電話回線(電話番号911)が設置されており、住民からの災害情報も受け付けた。この緊急対策マニュアルは、災害時における情報伝達と警報システムの確保ならびに制御に関する組織、災害時に必要とされる物資と人材の確保とそれらの適正な配置と調整に関する方策、災害時における消防活動に関する組織、災害時における被災者の医療処置・生存者の避難・災害地からの死者の搬出等を含む救助活動のガイドライン、グアム島にある医療機関で処置できる許容量以上の死傷者がでた場合の緊急処置、災害時における道路の修理・被災建物の点検・土石流の除去・公共交通

機関の復旧等のガイドライン、災害教育の方法論、災害後における被害の評価法等を含む13項目について、政府機関のみならず民間のボランティアを含む組織の行動規範を詳細に記述したものである。わが国になじみのないものとしては、核攻撃を受けたときの放射線からの防護と避難壕に関する記述がある。わが国の地方自治体にも同様なマニュアルを作成しているところもあるが、地域住民がマニュアルを手軽に閲覧できる体制にはなっていない。

14. ま と め

マグニチュード8.1の地震に襲われたグアム島の被害現地調査を行った。本震の地震動記録は得られていないが、断層の破壊過程から予測した地震動は、地盤増幅を考慮すると300 Galを越す地域もあった。しかし、グアム島の地盤は全般的に良好で、液状化や崖崩れの発生は一部の地域に限定されていた。また道路や橋梁の被害も軽微であった。建物の被害では、タモン地区の2つのホテルが使用不能となったほか、大部分の高層ホテルに多少なりとも被害が見られた。これに対して、一般の住宅には構造被害はほとんど見られず、地震動の卓越周期が長かったものと推測される。

アブラ港周辺の埋立地には、液状化とそれに関連する被害が発生した。商業港は岸壁に亀裂が走り、1週間閉鎖された。Cabras発電所では燃料タンクが1基破損し、Piti発電所では発電機の損傷や変圧器の傾斜などが発生した。これらの被害によって、島内の電力供給は2、3日間停止し、水道など他のライフラインや住民生活に影響を与えた。しかしグアム島は、台風に頻繁に襲われるため、ライフラインの停止などに対し、ある程度の備えはできていた。観光産業は、地震によるホテルの被害と地震報道の影響で、日本人を主体とする観光客が大幅に落ち込んだ。地震発生直後には、災害対策本部が設置

され、緊急対策マニュアルに沿って、緊急対応を迅速に遂行した。

グアム島の地震被害や地震による影響は、グアム島に固有のものもあるが、ライフラインのバックアップ体制など、わが国の都市防災において参考となる教訓もあった。最後に、今回の調査では、グアム島のいろいろな機関の方々に情報提供をいただき、この場を借りて謝意を表す。

参考文献

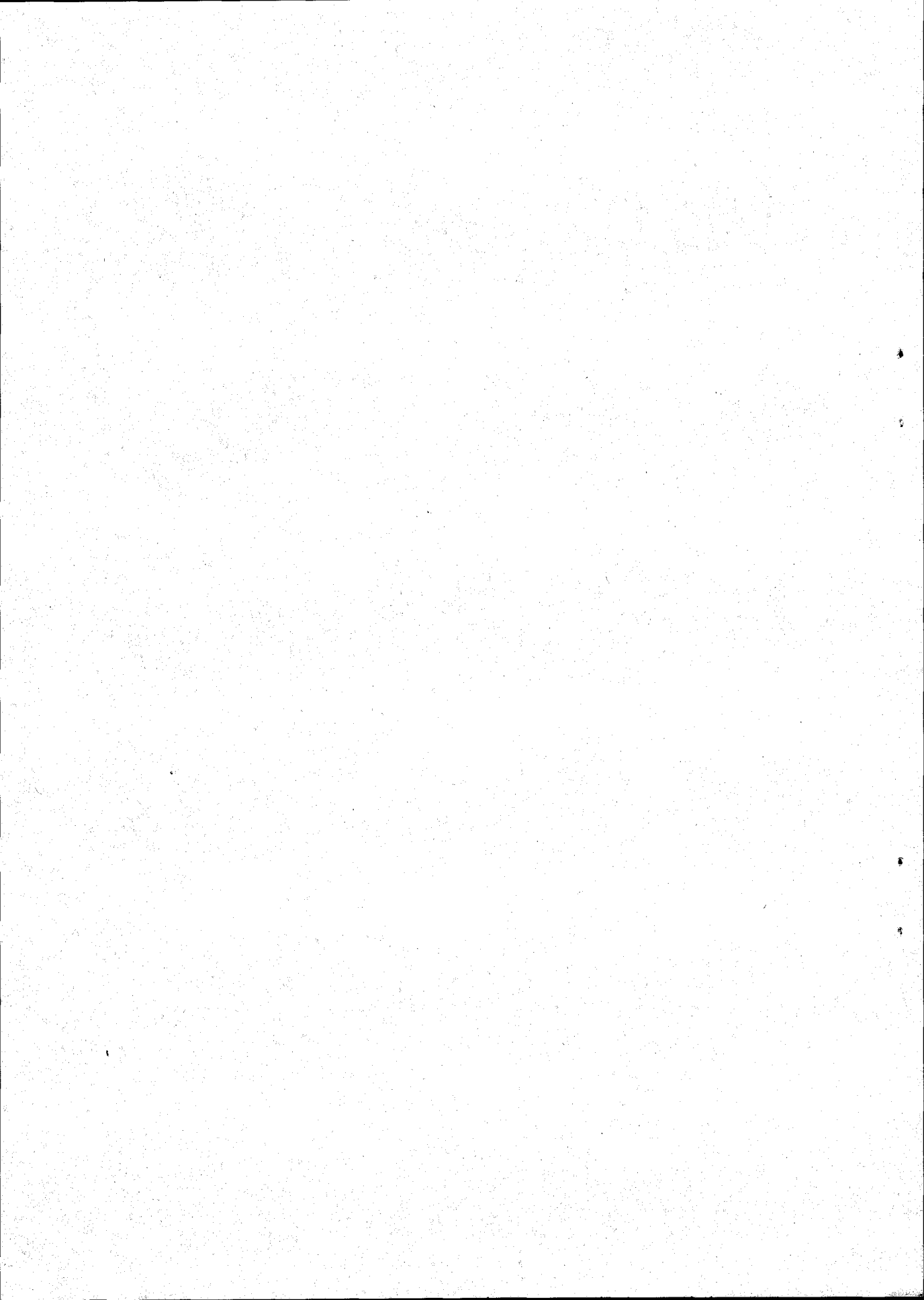
- 1) USGS : Preliminary Determination of Epicenters, *Monthly Listing*, August, 1993.
- 2) Dziewonski, A. M., Ekström, G. and Salganik, M. P. : Centroid-moment Tensor Solution for July-September 1993, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 83, pp.165-174, 1994.
- 3) 菊地正幸 : YCU 地震学レポート No.25, 1993.
- 4) Sato, T. and Kiyono, J. : Attenuation of Peak Ground Motion Taking into Account the Fault Extent, *Proc. of 7th Japan Earthquake Eng. Symp.*, pp.541-546, 1986.
- 5) Tracy, L.J. et al. : *General Geology of Guam, Geological Survey Professional Paper 403-A*, United States Government Printing Office, 1964.
- 6) Port Authority of Guam : *New Mater Plan for the Commercial Port of Guam*, 1990.
- 7) American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) : *Guide Specifications for Seismic Design of Highway Bridges*, 1983.
- 8) International Conference of Building Officials : *Uniform Building Code 1991 Edition*, 1991.
- 9) American Concrete Institute (ACI) : *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89)*, 1989.
- 10) 日本建築学会 : 1993年グアム島地震調査 (速報), 1993.
- 11) 山崎文雄 : 地震と産業被害, 日本損害保険協会, 1994.
- 12) Guam Visitors Bureau : *Research Report*, Dec., 1993.
- 13) *Pacific Daily News*, Special Edition, Aug. 29, 1993.

(1994.6.2 受付)

RECONNAISSANCE REPORT OF THE 1993 GUAM EARTHQUAKE

Tadanobu SATO, Fumio YAMAZAKI, Hiroshi MUTSUYOSHI and
Ikuro TOWHATA

A reconnaissance survey was conducted to Guam Island after the 1993 Guam Earthquake of magnitude 8.1. Ground acceleration was estimated based on a source model. Ground failure and liquefaction were observed but were limited to some areas. Although roads and bridges had little damage, some reinforced concrete buildings and power plants had significant damage. Power outage occurred for a few days and affected the operation of deep wells of water system. Since Guam is frequently attacked by typhoons, the effects of the earthquake was minimized due to its well-preparedness to natural disasters.



で低下すると、主塔は塔頂反力に抵抗できず、座屈することになる。この時のモード最大位置での振幅を極限振幅とする。

図-5.1に、弾塑性有限変位解析から得られた極限振幅と風洞試験から得られた構造減衰 $\delta=0.02$ に対応するモード最大位置での定常振幅を示す。振動時に制振装置が作動せず主塔の振幅が増大した場合、振動振幅は構造減衰 $\delta=0.02$ に対応する振幅で定常状態となるが、極限振幅を上回ることはないため、崩壊には至らないことを確認した。

6. ま と め

本稿では、明石海峡大橋主塔の架設時から吊橋完成時に至るまでの制振対策について述べた。ここで、得られた結果についてまとめると以下ようになる。

- ① 高さ約300mの主塔の空力的応答特性を改善する方法として、一様隅切案、テーパ隅切案、風穴案を比較検討した結果、3案の中ではテーパ隅切断面が空力的により優れている。
- ② テーパ隅切断面を採用した主塔の限定振動は、わずかな減衰を付加することにより振幅を大幅に低減できる。
- ③ 吊橋主塔の制振対策について、主塔の安全性と作業時の作業性の面から合理的な制振条件の設定を提案するとともに、制振対策の設計手法を確立した。
- ④ 設計された制振対策について、全体構造モデルの複素固有値解析によりその効果を確認するとともに弾塑性有限変位解析により主塔振動時の極限振幅を算出し、万一、制振装置が作動しない場合にも主塔

の崩壊が生じないことを確認した。

本稿では、明石海峡大橋主塔の架設時から吊橋完成時に至るまでの制振対策について、主塔の基本断面決定から、実施された制振対策、ならびに制振効果の解析的確認と安全性の照査について述べた。ここで実施された一連の主塔制振対策と、現地での実際の風の特性や主塔の振動特性を比較するために、本橋主塔には主塔の動態観測設備が設置されている。この結果については、今後稿を改めて報告する予定である。

最後に、明石海峡大橋主塔の制振対策を実施するに当たって、御指導を頂いた海洋架橋調査会耐風委員会（宮田利雄委員長）の委員各位、御助言を頂いた本州四国連絡橋公団の関係各位、ならびに工事関係者の皆様にご心より謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 岡野, 栗野, 森下: 明石海峡大橋主塔の耐風性(主塔断面形状の選定), 本四技報 No. 54, 1990. 4.
 - 2) 海洋架橋調査会耐風委員会: 本州四国連絡橋の海洋架橋技術に関する調査研究・耐風委員会報告書, 1990. 3.
 - 3) 辰巳, 秦: 明石海峡大橋主塔の制振対策, 第46回建設省技術研究会論文集, 1992. 11.
 - 4) 辰巳, 森, 秦: 明石海峡大橋主塔の制振対策, 本四技報 No. 68, 1993. 10.
 - 5) 辰巳, 秦他: 明石海峡大橋主塔の制振対策, 第2回振動制御コロキウム講演論文集, 1993.
 - 6) 寺元他: 花畔大橋主塔のTMDによる制振対策, 構造工学シンポジウム Vol. 36 A, pp. 1129~1140, 1990.
 - 7) 山口他: 構造物のパッシブコントロール(2)—TMDを中心として, 振動制御コロキウム Part-A, 1991.
- (1994. 6. 30 受付)

VIBRATION CONTROL OF THE TOWERS OF AKASHI KAIKYO BRIDGE

Kensaku HATA, Masaaki TATSUMI, Kohzo OHKURA and
Etsuro OHNISHI

The main towers of the Akashi Kaikyo Bridge are about 300m high and have very flexible futures. So the vibration of the towers due to the wind is one of the most important problem not only during construction but also after completion of the bridge. The shape of cross section was improved to stabilize the divergent torsional vibration at high velocity, and Tuned Mass Dampers (TMDs) are installed to reduce the amplitude of the vortex induced oscillation caused by the wind slower than the design wind speed both during construction and after completion of the bridge. In the report, the outline of vibration control of the towers of the Akashi Kaikyo Bridge is reported.

