

1990年フィリピン地震の地盤震動強度と構造物の被害

佐藤 忠信・東原 紘道・小長井一男

1. ま え が き

1990年7月16日フィリピンのルソン島中部にマグニチュード7.8の地震が発生した。地震による死者は約2000人、被害総額は約150ペソ（900億円）と言われている。今回の地震とその災害の特徴は以下の様にまとめられる。地震断層が110 km以上にわたって地上に出現し、最大の横ずれ量が5 mにもなった。地表面に現れた主断層に沿った地域での被害はあまり顕著ではなかったが、それより西側に位置しているBaguio市やAgoo市において、地盤振動に基づく建物被害が多数発生した。ルソン島中央部を構成している沖積平野における河川流域や沿岸部のDagupan市において、液状化現象が発生し、地盤沈下や変状に基づく建物や橋梁基礎の沈下・傾斜・倒壊が発生した。主断層に沿った山間部では斜面崩壊がいたるところで発生し、道路が切断された。電力・通信・上水道施設にもかなりの被害が発生した。

この地震の被害を調査するために土木学会から調査団が1990年8月15日から23日にわたって派遣された¹⁾。地震による被災地が東西約100 km、南北約150 kmにもわたることから、調査団は、団長班、常時微動観測班、バギオ(Baguio)班、ダクバン(Dagupan)班、カバナツアン(Cabanatuan)班の5班で構成された。地域名のついた3班は被害の集中した地域に拠点を置いて、その地域の被害を中心に調査することになった。著者らはカバナツアン調査団のメンバーとして地震災害の調査を行った。団員は東原(東京大学地震研究所)、小長井(東京大学生産技術研究所)、小池(川崎製鉄)、Molas(東京大学大学院)、佐藤(京都大学防災研究所)の5名で行なった。現地ではフィリピン建設省からAlejo氏とSequeno氏に、フィリピン稲作研究所工事の現場から大成建設の佐藤氏と竹本氏に調査に参加して頂いた。この班の主な調査目的は断層に沿った地震被害の概要を把握することと震源域での震動強度を推定できるような資料あるいは被害事例を収集することであった。したがって、以下に述べる内容は今回の地震による被害の全容を紹介するものでなく、著者らが行った調査地域の地震被害に重点を置いたものになっている。

Fig. 1に調査した領域を示した。8月16日にDPWH (Department of Public Works and Highway) とPIVOLCS (Philippine Institute of Volcanology and Seismology) を訪問して被害の概況説明を受けた。17日から現地の調査に出向いた、Cabanatuan市内に本拠地を設け、まずDPWHのSan Joseにある支所を訪問し、Nueva Ecijaにおける道路と橋梁の被害についての資料を収集した。その後、Pan-Philippine道路をDigdigまで北上し、道路に沿った斜面崩壊や橋梁の被害、ならびに断層運動の結果地表に現れた地面の変動量を調べた。18日はPalayan, Laurを経由してGabaldonまでの道路に沿っての被害ならびにBongabonにおける液状化や橋梁の被害を調査した。19日はRizal, San Joseを経由してUminganまでSan Jose断層とSan Manuel断層の活動した形跡を調べるとともに橋梁、建物、水道施設などの被害を調査した。20, 21日は担当した地域の被害と他地域の被害とを比較する目的でDagupan, Agoo, San Fernando, Lingayenの被害調査を行った。まず20日はCabanatuanからSanta Rosa, Zaragoza, Tarlac, Urdaneta, Dagupan, Agooを経由してSan Fernandoまでを、21日はSan FernandoからAgoo, Dagupan, Lingayen, Camling, Tarlacを経由してManilaまでの被害の概略を調査した。

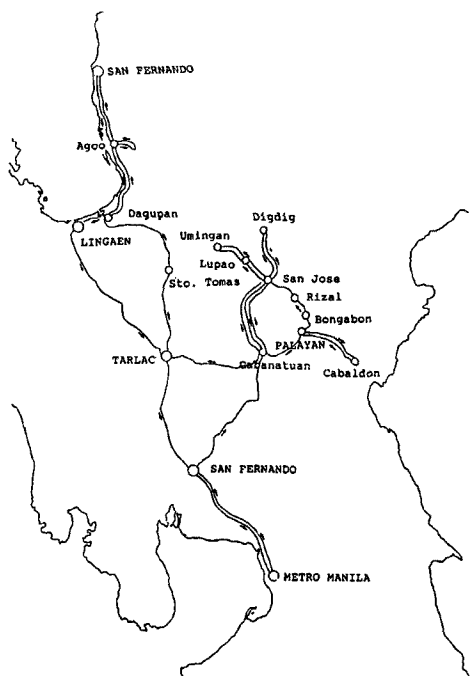


Fig. 1 Outline map of survey area.

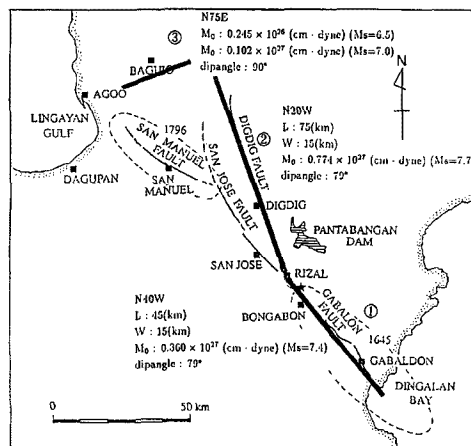


Fig. 2 Assumed faults rupture mechanisms.

2. 断層破壊過程を考慮した最大加速度の推定

統計解析に基づいてマグニチュード M と震央距離 Δ の関数として与えられる地盤種別ごとの最大加速度アテニュエーション則だけでは、ばらつきの大きい実際の最大地動を推定するのは困難であるとの考えから、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²⁾。そして、種々の断層パラメータの変化が最大加速度のアテニュエーション特性に及ぼす影響を明確にし、特に断層近傍での最大加速度が頭打ちとなり、その頭打ち現象に対応する震央距離が高々断層の長さ程度であることを示した。さらに、地震基盤から入射する地震波動の表層地盤による増幅特性および各地域ごとの Q 値を考慮することにより、これまでの日本周辺で発生した歴史地震について最大加速度分布を再現した³⁾。この方法を用いて、1990年7月16日ルソン島地震に対して、震源域での地盤震動の強度がどの程度再現できるかについて検討を加えた。

震源特性は阿部が発表しているデータ⁴⁾を基にしたが、京都大学防災研究所地震予知グループが8月30日から9月4日の6日間、11月17日から12月7日の21日間の2度にわたって行った余震観測の震源分布を参考にして、Fig. 2に示すように、地震が3つのイベントから成るものと仮定した。まず、①の断層がRizalより南部に向かって破壊が進行し、30秒後に②の断層がRizalより北部に向かって破壊が進行したものと仮定した。①の断層については長さが45 km、幅が15 km、②の断層については75 kmと15 kmとし、両者とも断層の傾斜角を75度とした。①と②の断層については地表面に断層が現れていることから断層の上端の深さを0 kmとした。③の断層については断層の動いた形跡が地表面に現れていないので、断層の上端の深さを5 kmとし、余震分布の特性を考慮して、 $M_s=6.5$ と7.0に相当する地震断層を仮定して、破壊が80秒後に北端から開始するとして解析した。この断層の長さとの比は7:1と仮定した。媒質のせん断波速度を3.4 km/secとし、各断層の破壊は断層底辺の隅部から同心円上に破壊速度3.1 km/sでほぼ一様に破壊が進行するものとした。対象地域を一辺20 kmの正方形メッシュで縦25、横15、合計375個の網目で覆い、網目の各交点上での地質条件⁵⁾からFig. 3に示すような増幅度⁶⁾を決定し、地震基盤における入射波の最

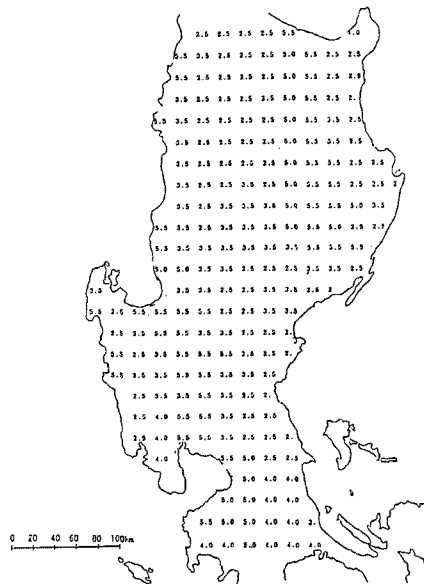


Fig. 3 The distribution of amplification factors.

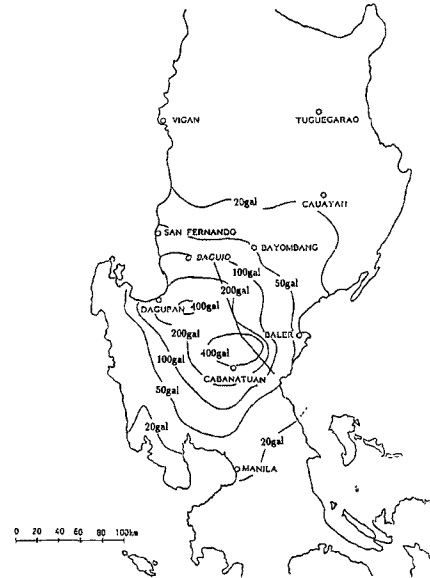
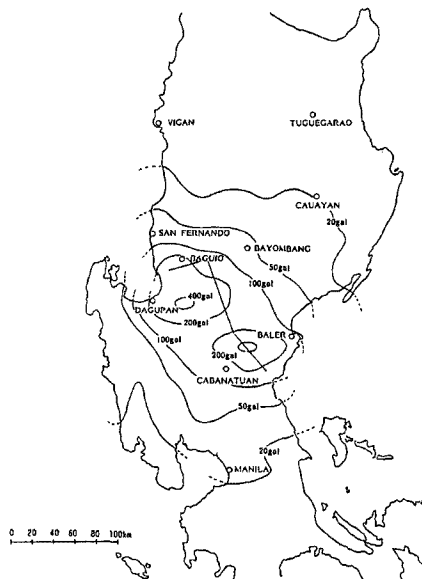
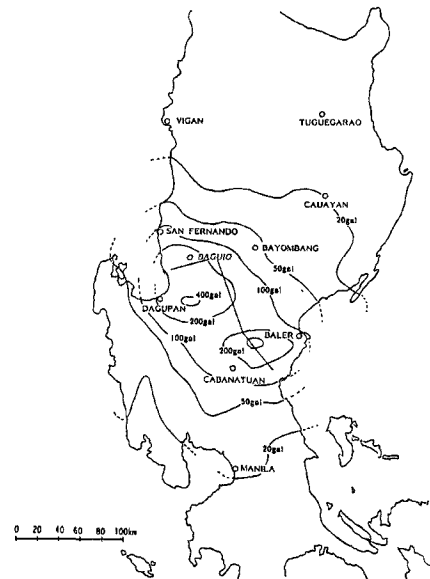


Fig. 4 Contours of maximum acceleration (gal, without subevent).

Fig. 5 Contours of maximum acceleration (gal).
Seismic moment of subevent: 0.245×10^{26}
dyne·cmFig. 6 Contours of maximum acceleration (gal).
Seismic moment of subevent: 0.102×10^{27}
dyne·cm

大加速度の期待値を各交点上で計算し、それに増幅度を乗ずることにより地表面での最大加速度の期待値を375の交点で求めた。Fig. 4, 5, 6はこの値を用いて最大加速度の等高線を描いたものである。Fig. 4は③の断層が無いと仮定したとき、Fig. 5は $M=6.5$ としたとき、Fig. 6は $M=7.0$ としたときのものである。これより、震源域においては400 gal以上の地動加速度の発生したことが解析的にも求められることがわかる。これは気象庁震度Ⅶ以上に相当する。この地震災害の特徴として、Dagupanにおける液状化による被害とBaguioとAgooにおける地盤震動に基づく構造物の被害が大きかったことである。Fig. 4-6の結果

Table 1 Calculated maximum accelerations at four citeies for three different fault rupture models.

	2 fault planes model	3 fault planes model	
		M=6.5	M=7.0
Manila	26 gal	27 gal	27 gal
Cabanatuan	167 gal	168 gal	168 gal
Dagupan	189 gal	209 gal	229 gal
Agoo	190 gal	268 gal	384 gal
Baguio	141 gal	265 gal	303 gal

を基にこれら3都市を含むいくつかの都市における最大加速度の期待値を示したのが **Table 1** である。表から明らかになるように断層③を考えない場合には、Baguio と Agoo における最大加速度の期待値は 100–150 gal 程度であり、建物の地震被害を説明できるような地盤震動強度は求められないが、 $M=6.5-7.0$ 程度の地震断層を想定すると 200–400 gal 程度の地盤震動強度が求められ、地震被害を説明するのに十分な値となっている。

Fig. 7 は $M=7.0$ の場合に、各交点上で求められた最大加速度を3つの断層までの距離の中で最短となる距離に対して図示したものである。距離が 25 km のあたりで最大加速度として 800 gal 程度の値が見られる。全体的な傾向としては震央距離に反比例のアテニュエーション特性になっているが、断層の広がり方を考慮しているので、断層近傍では最大加速度が上限を有していることがわかる。

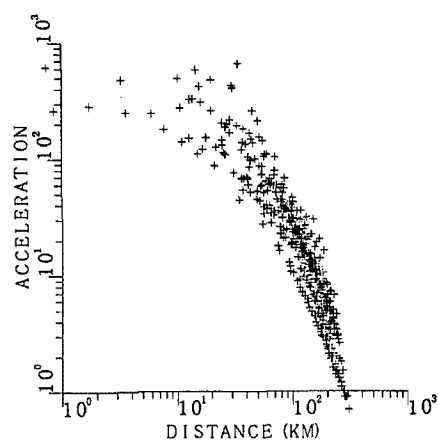


Fig. 7 Attenuation characteristics of theoretically calculated maximum acceleration (gal).

3. 地震動の強さと距離減衰

今回の地震の強震記録がフィリピン国内で全く得られていないため、断層に沿う地域および中央平野部の地震動の強さを推定することがカバナツアン地区担当班の主要な課題の一つとなった。このため、なるべく単純な形のブロックなど剛な物体を探し、これらの転倒などを調査することにした。震源地および断層に沿う地域では、竹の皮や草を編んで作った家屋があるだけで地震動を推定できるような構造はきわめて少ない。いくつかの地点でブロックの転倒を調査し、またロッキング、転倒などの目撃談を聞くことができたが、これらの少数の情報から広範な領域の地震動を客観的に判断することは困難であった。フィリピンでは国民の93%がキリスト教徒でありそのうち85%がカトリックである。このため中央平野部の多くの市、町、村には必ずといって良いほど教会があるので、これらの教会での神像の転倒を調査し、広範な平野部での地震動の強度の分布を検討することにした。

矩形の剛体の剛な床上でのロッキング、転倒については Housner の研究がある。ブロックが正弦波で加振される場合、ロッキングは当然、水平加速度が重力加速度に対し矩形の縦横比（アスペクト比）を越えた段階で開始するが、転倒にいたる速度にも一定のしきい値がある。一般的な教会の神像ではこの加速度、速

Table 2 Estimated seismic intensities in the survey area.

市, 町名	断層からの距離*1	推定最大加速度(G)	方 角	現 象
Puncan	0.5 km	>0.27	S 15 E	門柱の転倒 (B/H=0.27)
Culba	1.0 km	>0.6	S 10 E	石油缶のロッキング (B/H=0.66)
Bongabon	6.0 km	>0.22	N 70 E	ビデオスクリーンの転倒 (B/H=0.22)
San Jose~Lupao	10.0 km	>0.23	S 30 W	キャビネットの転倒 (B/H=0.23)
Lupao	11.0 km	>0.28	S 30 W*2	ワードローブの転倒 (B/H=0.28)
Umingan	15.0 km	>0.21	N	神像の転倒 (B/H=0.21)
La Paz	55.0 km	>0.25	W	神像の転倒 (B/H=0.25)
Tarlac	60.0 km	>0.27	S 30 W	ワードローブの転倒 (B/H=0.27)
Moncada	50.0 km	>0.20	W	神像の転倒 (B/H=0.20)
Agoo	50.0 km	0.3~0.5	W	植木鉢の滑落 (本文参照)
Lingayen	77.0 km	<0.20	E - W*2	神像の転倒無し
Mangatarem	76.0 km	<0.20	N 45 S*2	神像の転倒無し
Camiling	68.0 km	<0.20		神像の転倒無し

*1 地表に断層の現れた Digdig および Gabaldon 断層からの最短距離

*2 教会のシャンデリアの揺れの証言から推定

B/H アスペクト比

度のしきい値は 0.2~0.3 G, 15~20 kine となるものと推定される。Table 2 および Fig. 8 はこれらの調査結果をまとめたものである。しかしながら現実の構造およびこれを支持する床は必ずしも剛でなく、また地上にあるとは限らない。このためこれらの加速度、速度の値より低い地震動でロッキング、転倒が起こることも十分考えられ、これらの値はあくまで目安にすぎない。表に記載された方角はこれらの物体の転倒の方角を示している。この中には教会の天井に吊られているシャンデリア (Photo 1) の振れの見撃証言から判断したものも含まれている。

(1) 断層沿いの地域における地震強さ

地上に明瞭に現れた断層近辺では断層直上の家屋の他は外見上顕著な被害は認められない。Fig. 9 に示す Rizal の町の家屋の被害状況からもこの傾向が明瞭に認められる。Rizal 郊外の St. Monica 橋も断層直上にあったことが被災の大きな原因となったと報告されている。しかし、これより 600 m 南側にある橋梁に

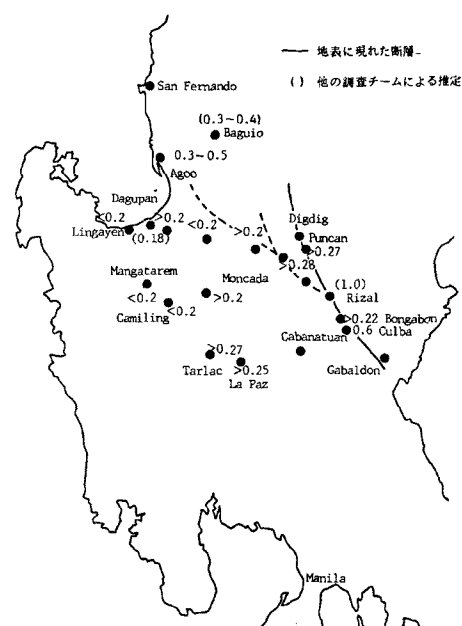


Fig. 8 Estimated seismic intensities in the survey area.



Photo 1 Inside of the Immaculate Conception church.

は軽度の被害さえ認められなかった。しかしながらこれをもって地震加速度そのものが小さかったとは断じきれない。St. Monica 橋の近辺では飛び石現象があったと報告されており、水平のみならず上下方向の瞬間的な加速度もかなり大きかったものと思われる。Rizal から San Jose に向かう道路沿いに液状化の跡が認められるが、これは道路が沖積平野の側におよそ 1~2 km 入ったところで現れている (Photo 2)。道路から 3~5 m 離れたあたりは粒径 0.3~1 mm 程度の砂 (Fig. 10 参照) が堆積しているが、もう少し道路

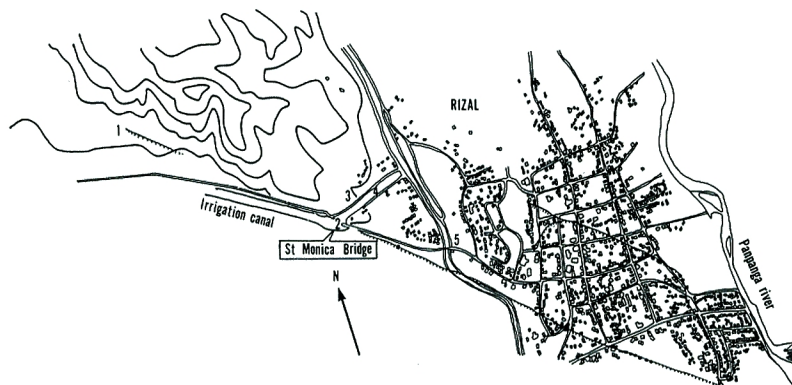


Fig. 9 Distribution of damage to houses in the vicinity of Rizal.



Photo 2 Liquefaction phenomenon in the vicinity of Rizal.

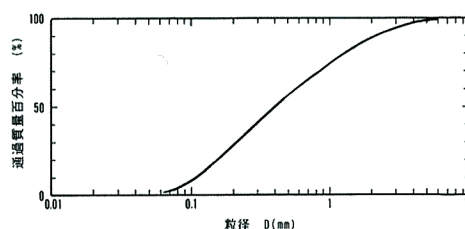


Fig. 10 Grain size distribution curves for sand samples collected in the vicinity of Rizal.

に近い場所では路床にあったと思われる数 mm にもなる粒子を含む砂れきが堆積している。これは液状化した細砂に洗い出された可能性もある。Rizal の郊外の沖積段丘の麓での断層のずれ (Photo 3) は N40W の方向に 1.65 m で上下のずれはほとんどない。このあたりでの断層の水平ずれ量がもっとも小さく、これから Digdig 断層にそって北上するにつれて水平のずれ量は増加する。中田らによれば Rizal から Gabaldon 断層を南下すると水平ずれ量は再び大きくなるが場所による変動が大きい。

Digdig 断層沿いの Puncan の部落 (国道 5 号線マニラ起点 177 km) ではコンクリートブロックの門柱 (45 cm×45 cm×165 cm) が S15E の方向に倒れた (Photo 4)。この門柱の根元では最初からブロック間の接着が完全であった様子はなくブロックをつないでいた 1 本の鉄筋も地震前から外気にふれていた様子でか



Photo 3 Surface faulting in the vicinity of Rizal.

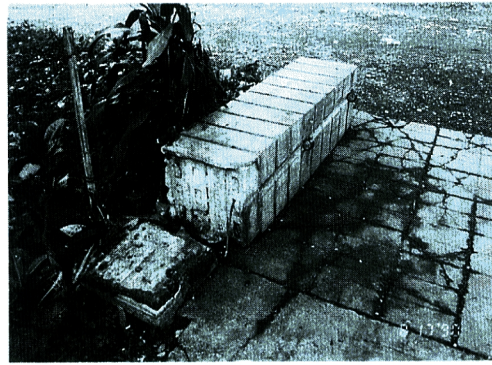


Photo 4 A fallen gatepost in Puncan village.

なり錆びており、門柱は地震時にほとんど抵抗なく折損したものである。この門柱の縦横比からこの方向の地盤の加速度は 270 gal 以上あったものと推定される。この門柱は断層から約 200 から 300 m 離れたところにある。この Puncan 部落内の断層の左横ずれは N15 W の方角で約 4.4~5 m であり、上下のオフセットは明瞭でないが東側がやや高い。この住民は地震動を感じる前に大きな地鳴りを聞いたと証言している。

Rizal から Digdig と反対の南側の Laur の部落は Coronel 川が中央平野部に流れ出るあたりにある。ここで小学校の校庭を N45E の方角に地割れが走っており、この延長上にある教室のブロック壁および地割れの近辺のブロック塀が倒されていた (Photo 5)。Laur は中田らによる断層線から 2 km ほど西側に離れており、この地割れは断層とは異なるものである。ここからさらに Coronel 川の上流に向かって南下した Culuba (クルバ) の部落で一斗缶 (18 l 入り石油缶) に土を満たし植木鉢にしていたものが、これを載せたコンクリート粗面 (地上) の上で S10E の方角にロッキングしたとの証言があった。石油缶の縦横比が 3:2 であることを考えると、転倒には至らなかったものの加速度は瞬間的に 0.6 g 程度に達したか、あるいは極めて強い上下動を伴ったものと思われる。



Photo 5 A schoolyard in Laur.

地上に明瞭に現れた断層は南部の Gabaldon 断層から北部の Digdig 断層につながって延びているが、San Jose から北西側に分岐する形で San Jose 断層、さらにこの San Jose 断層から東よりに San Manuel 断層があり、地上で断層の破壊面は観測されなかったが、これらの断層の延長上にある Baguio, Agoo で大きな被害がありまた余震域もこうした地域に集中していることからこのあたりにも震源があった可能性が指摘されている。このうち Agoo の郊外マルコスハイウェイの入り口に、写真に示すようなコンクリートモルタル製の大型の浅い円形の植木鉢が 6 個置かれていたが、これらのうち 5 個が煉瓦を積んだ台座から転落していた。さらにその内 4 個はほぼ西に向かって落ちていた。90 cm×90 cm の正方形の台座の位置は地面から 40~50 cm の高さにあり、このうえに深さ 50 cm、底面の直径 83 cm、上面の直径 205 cm の鉢が載せられていたものである。鉢の底面と台座のモルタルとの摩擦係数はきわめて大きく、モルタル同士を接触させて滑らせようとする鉛直から 45 度ぐらいに傾けないと動き出さない。寸法から判断して台座を固定した状態での鉢のみの転倒は考えにくく、台座および地盤を含めた全体が動いた可能性も併せて考える必要があると思われる。台座基礎部の状況は定かでないが、かりにこの部分が動いたとしても、水平に 0.5 G を越す加速度が加わったか、さもなければ上下方向にもかなり大きい地震動が加わったと思われる。

(2) 中央平野部での地震動の強さ

断層から離れた平野部での地震動はおもに教会内部の彫像、塑像などの転倒をもとに評価した (Photo 6)。しかしながら多くの聖像の寸法比はほぼ共通しており、これ以上の細かい評価は下しにくい。中央平野部は震源からの距離に加えて表層の沖積層の厚さの影響も強く受けると考えられるので大まかな地域に分けてその特徴を述べる。

断層に近い Cabanatuan 地域ではクリスチャンカレッジ, Central Luzon University の図書館などの建造物が破壊されたほかは、めだった被害が報告されていない。中央平野部にはコンクリート製、鉄骨構造の大小さまざまな給水塔が建っているが、Cabanatuan から南側の Gapan にかけての国道5号線の沿線ではこれらの被害を見かけなかった (Photo 7)。Cabanatuan の北にある San Geronimo カトリック教会 (Photo 8) では、聖像がやや傾いたペデスタルから N24E の方角に転落し、冷蔵庫の扉が開いて中の食料品が飛び出したものの顕著な被害はなかった。このあたりは中央平野の東の端にありなだらかな丘陵地に接近したところであり、表層の厚さは薄く、かつその変化は小さいものと思われる。

中央平野のほぼ中央の La paz の町の St Cristo 教会では、コンクリート製のしっかりしたペデスタル (Photo 9) から西の方角に重さ 30~40 kg の聖像が落下した。地震時にこの教会に居合わせた人の証言ではシャンデリアがほぼ東西方向に大きく揺れたようで、この方角の地震動が卓越したようである。この東 10 km の Tarlac の町の San Sebastian 教会では、二階の神父の居室でドレッサーがロッキングを起こしたが、

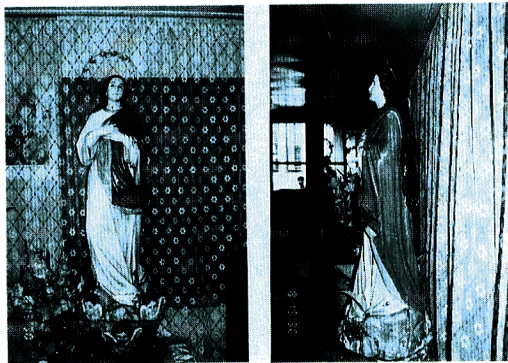


Photo 6 A holy statue in the Immaculate Conception church.



Photo 8 The San Geronimo church at Cabanatuan.



Photo 7 A water supply tower in the vicinity of Gapan.

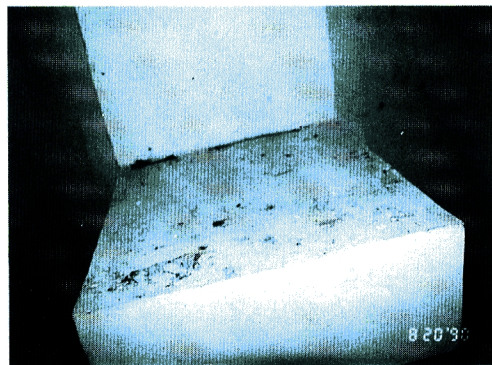


Photo 9 A pedestal of holy statue in the San Cristo church at Lupao.



Photo 10 A church collapsed by liquefaction at Pura.

聖堂内部の聖像は一つも転倒していない。この町で 6～8 m の高さの鉄骨製の給水塔の上部の円筒形の給水タンクが傾いているのを見かけたが、一般に大きな被害は報告されていない。このあたりは中央平野を南に向かって流れる Panpanga, Talavera 川水系と、北に向かって流れる Agno 川水系の境界にあたる。

この Tarlac の北では被害が大きくなり Moncada にある教会の聖像も転倒している。また Talavel の支川にある Pura の町では液状化により教会の建物が全壊した (Photo 10)。これよりさらに北の Agno 川の本川には液状化で大きな被害を受けた Carmen 橋が架かっている。

Carmen 橋を越えてさらに北の Urdanate の教会では、再び被害は少なく聖像は一つも転倒していない。調査を行った範囲でこの他に被害が少ない地域は Lingayen, Mangatarem, Camiling など中央平野西よりの山腹に沿った地域であり、特に Lingayen ではわずか 10 km しか離れていない Dagupan に比べあまりにも被害が見られないという点が際だっていた。これらの地域の教会でも聖像の転倒はなかった。

今回の地震では強震記録が無く、各地の地盤震動強度を正確に把握することが困難であったので、2 節で解析的に最大加速度を推定したが、これがどの程度まで実際の値と一致するかを明らかにしておく必要がある。わが国では墓石の転倒を調査して最大加速度の推定を行うことが多い。フィリピンでは墓の形式が異なっているので、これに代わるものとして、教会の中に安置されている各種の神像の転倒に着目して震度の推定を行った。調査結果から得られた震度を断層からの最短距離に対して示したのが Fig. 11 である。解析的に求めた震度と Baguio におけるブロックの転倒から推定された震度ならびに Dagupan における液状化現象から推定される震度も図中に示されている。これから解析的に求めた震度と地震被害から推定される震度との間に比較的良好な相関のあることが分かる。Fig. 12 はわが国の地震に大して同様な解析を行って観測値との比較を行ったものである。解析的に求めた最大加速度の期待値が観測値を比較的良好に説明していることが判る。

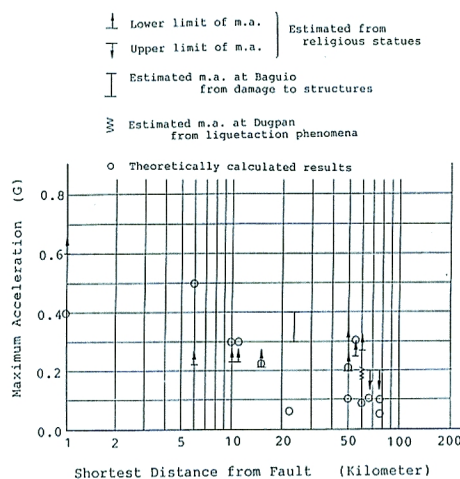


Fig. 11 Comparison of maximum ground intensities obtained by several methods.

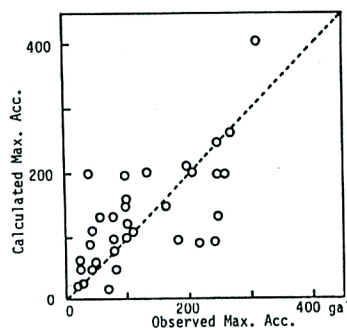


Fig. 12 Comparison of calculated and observed maximum accelerations for 8 Japanese earthquakes.

4. 道路と斜面崩壊

Digdig 断層および Gabaldon 断層に沿って道路の被害, 斜面崩壊が多く発生した。この地域の地質は新第三紀の砂岩, 泥岩, 石灰岩を基盤とし, これを覆っている段丘砂れき, 第四紀のれき, 砂, 粘土を主体とする沖積層から構成されているが, 基礎岩盤は断層の影響を受けかなり攪乱されている。これに加え, 高温多雨の雨季と乾季が交代する条件下で, 山地表層のラテライト化が発達している。鉄, アルミニウムに富み赤紫色の濃いラテライト性土は風化土中で最も深い風化層を有するもので, 全層の厚さが数十 m を超える例も報告されている。Luzon 島の山岳地帯は世界的に稀有の豪雨地帯であるが, 断層沿いの山腹はネムなどの灌木と藪に覆われた場所が多く, このような場所では常時から地滑りが多発し, 覆蓋植物が長期間安定して繁茂している様子ではない。このような豪雨に伴う山地の浸食, 岩屑の流出が植物による有機物の蓄積を阻害し, 土壌のラテライト化をより加速し, 雨季に発生したこの地震による斜面崩壊およびこれに伴う被害を一層大きくしたと考えられる。

(1) ディグディグ断層沿いの道路・斜面の被害

Photo 11 は DPWH のカバナツアン支部でまとめられた国道 5 号線 (通称日比友好道路) 沿いの斜面崩壊および舗装被害の発生箇所を示したものであり, これを整理したものを Fig. 13 に示す。この道路は

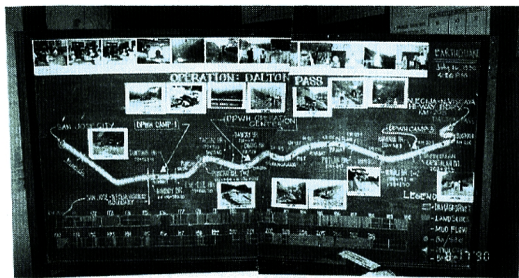


Photo 11 Damage conditions of Rout 5 surveied by the buranch office of DPWH.

Nueva Ecija の州都 Cabanatuan から北上し, San Jose 市の北から山岳地帯に入る。そして, Puncan 村, 横ずれ量の大きな断層で有名な Digdig 村, 州境の Datalon Pass を経てルソン島の北部に至る幹線道路である。Digdig 断層沿いの Talvera 峡谷を縦走しているために, Digdig 以南においても 4 箇所断層に切断されている。この被害は大きなものではない。しかしこの道路には多数の切り土斜面 (及び若干の盛り土斜面) があり, 地震で地盤が緩んだ所に反復して雨期の降雨があるために, 土砂崩

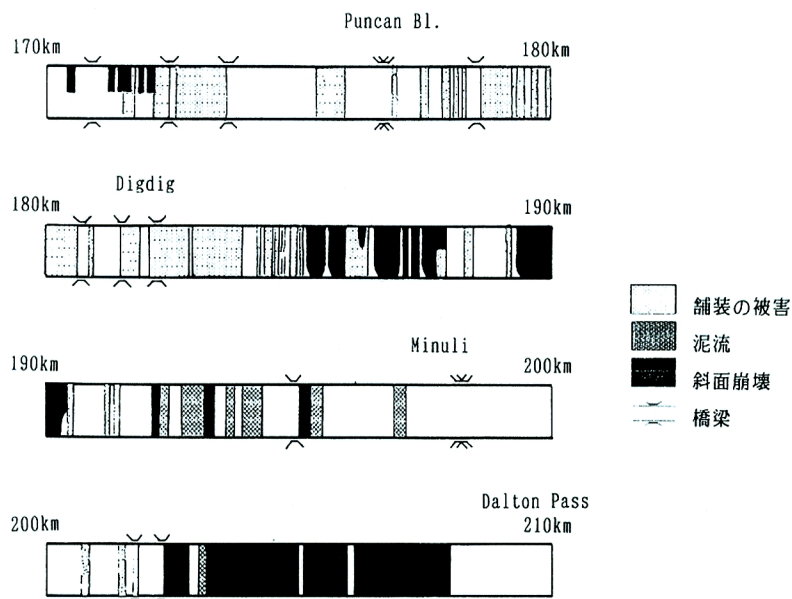


Fig. 13 Damage conditions of Rout 5 surveied by the buranch office of DPWH.

れが多発している。DPWH の Nueva Ecija 州事務所は OPERARION DALTON PASS を発動して復旧に努めていたが、そのほとんどのエネルギーは土砂崩れ対策に費やされているようである。当チームも経験したが、通行止めのほとんどは、やはり降雨による土砂崩れが原因である。

San Jose-Nueva Ecija Highway (サンノセ・ヌエバエシハ・ハイウェイ) 境 (マニラ起点 170 km) から Dalton Pass (ダルトンパス) (マニラ起点 208 km) に至る 38 km の区間で道路に被害を与えた道路斜面の崩壊は75箇所到达了。このうち泥流は $400,000 \text{ m}^3$ にも達したと見積もられている。この道路はルソン島北部のサンタフェなどを中心とする山岳地域からラワン材などを輸送する幹線道路であると同時に、北部地域の生活物資輸送の動脈でもある。このため斜面崩壊により道路の埋まった箇所では28台のブルドーザー、19台のローダー、5台のグレーダー、15台のダンプトラック、そのほかバックホウ、クレーンなどの重機を投入し、懸命の復旧作業が行なわれた (Photo 12)。中には1車線の確保も困難な箇所もあり、ようやく確保した車線もその後、二次的に発生する斜面崩壊で再び埋められてしまう状況にあった。断層に沿って流れる Digdig 川は数多く発生した地滑りにより大量の樹木が流れ込み、これらが橋長 78 m、5 径間の Puncan 第2橋 (マニラ起点 176 km) の橋脚にせき止められ、これによって橋の上流側は貯水池のように水位が増し危険な状態にあった (Photo 13)。

この国道5号線は AASTHO の規格に基づき片側一車線、厚さ 23 cm のコンクリート舗装がなされており、この舗装の被害は、盛り土部の崩壊、橋台裏込土の沈下、流出などに伴うものの他、直接断層のずれによるものがある。Puncan 第2橋からやや北にいったところ (マニラ起点 178 km) で断層が国道5号を横切っている場所では N25W の方角で約 4 m の左横ずれが観測された (Photo 14)。上下のずれは約 60 cm で東側が西側に比べ高い。国道はここではほぼ南北方向に走っているため、舗装の道路直角方向の横ずれは約 2 m である。この断層を挟んで 5~6 m の幅の舗装が破碎されているが、これを離れると顕著なひび割れな



Photo 12 Slope failures along Route 5 (172 km from Manira) near the Digdig fault.



Photo 13 The piled driftwoods at the second Puncan bridge.



Photo 14 A surface faulting on Route 5 (178 km from Manira).

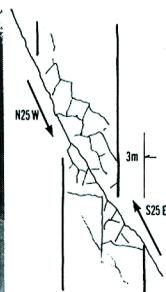


Photo 15 A surface faulting at the Calasigan pass (180 km from Manira).

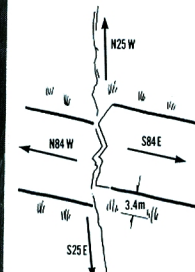
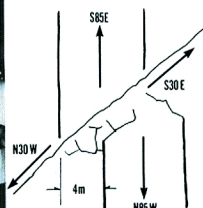


Photo 16 A surface faulting at Digdig (182 km from Manira).



どの舗装の変状は見あたらない。Digdig の南カラシガン峠（マニラ起点 185 km）では N25 W の方向で 4.8 m の左横ずれが観測された（Photo 15）。道路は N84W の方向に走っているため道路直角方向のずれは 3.4 m である。ここはプレッシャーリッジ（圧縮丘）と呼ばれる断層上の丘を通る切り通し部分で上下方向の段差は顕著でない。Digdig の部落内で Digdig

と Carranglan を結ぶ道路も断層が横切っている（Photo 16）。この場所での左横ずれ量は N30W の方向に 4.6 m、上下のずれは約 1 m であった。道路は N84W の方角に走っているため、道路直角方向ずれ量は約 4 m である。断層部分を除いては Carranglan に向かってまっすぐ延びる道路の線形や舗装に顕著な変状は認められない。また断層直上の家屋が大きな被害を受けたのに対し、わずかに離れた家屋に外見上の被害は認められない。

(2) リザールーサンホセ間の道路の被害

Riza-San Jose 間の道路のうち Rizal 寄りの部分は、断層線とほぼ平行に走り断層線から高々数 km の位置にある。ここでは地盤の沈下によると見られる路面の亀裂がかなり発生している。両側は水田であるが、一部に噴砂の痕跡が見られる。地震時には土砂は相当の液状化現象をしたものと考えられる。Rizal は USGS が発表した震源位置から北西約 10 km のところにある。この町でも断層直上の家屋、構造物を除いて顕著な被害がない。このことは今回の地震断層に沿って共通して見られる特徴である。Rizal の北はずれの沖積段丘に沿って灌がい用の水路がある（Fig. 9）。この水路はこの沖積段丘を約 500 m 切り通し、これによって出た土砂を段丘沿いの平地側の盛り上げ構築したものであり、ここに架かる St. Monica（サンタモニカ）橋とその取付道路が大きな被害を受けた（Photo 17-19）。阿部、中田らによるとこの箇所は断層の直上に当たっており、このことが被害の直接の原因であるとしているが、用水路の中央平野に面した側の盛土部が沈下あるいは滑り、このため越流が起こったことがさらに被害を大きくしたものと推定される。取付道路はやはり AASHTO に基づく片側 1 車線のコンクリート舗装で橋台部から約 12 m も平野側に流されていた。この橋のさらに北の段丘の山腹で 1.65 m の N40W 方向の左横ずれ断層を確認している（Photo 3）。上下のずれはほとんどなく、30~40 cm 開いた形跡があり水が貯まっていた。かんがい用水の切り通し付近の段丘上で飛び石現象の形跡があったとの報告があり断層近くで強い地震動があったことを窺わせる反面、この橋から Rizal 側に 800 m 戻ったところのかん

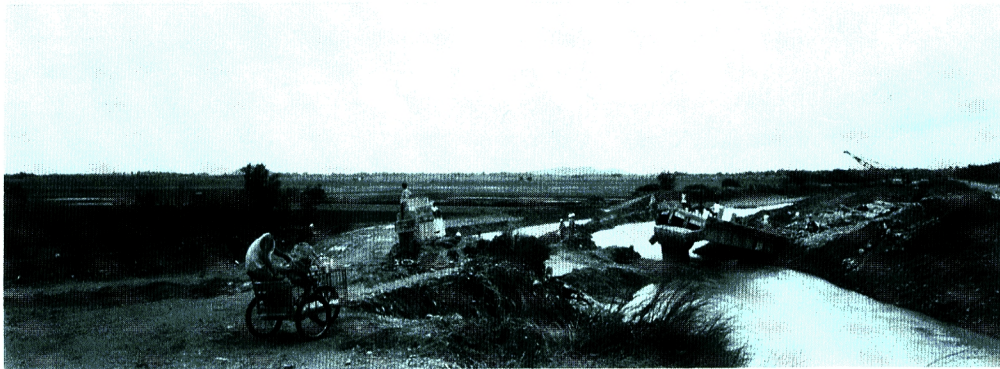


Photo 17 Damage to the St. Monica bridge.



Photo 18 Damage to the embankment of irrigation ditch beside St. Monica bridge.



Photo 19 Damage to the road at St. Monica bridge.

がい用水路のコンクリート橋にはまったく被害が認められなかった (Photo 20)。

Rizal からこの橋を通り San Jose へ向かう道路では数箇所舗装のひび割れが認められた。水田が多いが必ずしも完全な平坦地ではなく所々に小河川の扇状地が見える。ここは道路が先ほどの段丘の麓から沖積平野の中に向かって 1~2 km 離れたところである。道路の両側の水田に噴砂の跡が認められた。採取した砂の粒度分布は Fig. 10 に示されている。

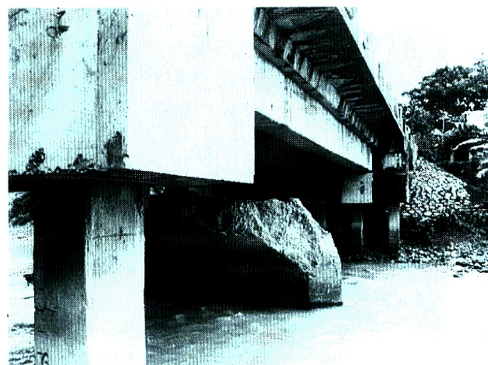


Photo 20 A bridge (non-damaged) in the suburbs of Rizal.

(3) Gabaldon(ガバルドン)断層沿いの道路の被害

Palayan-Gabaldon 間の道路では Luar 以東は、日比友好道路と同様に断層沿いの峡谷を縦走しているが、やはり地震と降雨による土砂崩れおよび路面の湛水のため、通常の乗用車では通行できず、4 輪駆動車が必要である。ちなみに地元の人たちの足であるジープニーは本領を発揮して、相当の山奥まで交通を確保している。Rizal から南部の Gabaldon 断層に沿う地域では Digdig 断層沿いの地域に比べ谷幅が広く沖積層の発達が著しい。また山腹の植生は北部に比べて樹木が少なく、灌木、藪に覆われている割合が比較的多いようである。したがって、この谷を流れる Coronel 川では Digdig 川に比べ流木がめだたない。Laur と Mojon の間には Bato Ferry (バイトフェリー) 橋というコンクリートの水没橋 (Photo 21) があるが、ここでは第 2 Puncan 橋のような流木の滞留は見られな



Photo 21 Bato Ferry submerged bridge.



Photo 22 Slope failure ridge at Baterya.



Photo 23 Slope failure toe at Baterya.

かった。この地域では道路はこの広がった沖積谷地あるいは河岸段丘を通っている区間が長く、このため山腹には数多くの地滑りが発生したものの山腹に沿った国道5号線のように高密度な道路被害は見られなかった。しかしながらこの道路は所々で扇状地を通過し、ここでは常時から流下土砂が多いためか橋梁がなく通常車両の通行は困難である。

Baterya (バテリア) 部落あたりの道路は幅 300 m にわたり長さ 2 km 以上に及ぶ大規模な地滑りで数 10 m にわたりおし流れていた (Photo 22, 23)。これは Gabaldon の町の近くにある Dupinga (ドゥッピンガ) 橋に向かう行程中で最大規模のものである。滑落崖の様子を Photo 22 に示す。むき出しになった滑り面は赤紫色で、かなり厚く粘土質の表層が堆積しており、ラテライト化が進んでいるように思われる。この地滑りがどの程度の地震動で起こったものなのか推定することは、周辺に竹の皮や草を編んで造った家屋の

他に構造らしい構造が少ないことから極めて困難である。この地滑り箇所から断層に沿って北 5 km のところの Culuba (クルバ) の部落で植木鉢に使われていた石油缶がコンクリートの粗面のうえでロッキングしたとの目撃があり、この場所で瞬間的な加速度が 0.6 g をこえたものと推定される。

5. 橋梁の被害

前書きで述べたように、今回の地震による橋梁の被害の全てを調査する時間的な余裕はなかったもので、ここでは、著者らの調査地域内でかつ断層近傍にあって比較的大きな被害を出した 4 橋梁を主にして、その被害の形態を述べる。他の地域（主に Dagupan 市周辺）での落橋等の被害が基礎地盤の液状化に伴う支持力喪失を主たる原因とするのに対し、これらの橋梁は強い地震動によって下部工が破壊されたことが被害の原因となっている点に特徴がある。ただしこれらの橋梁の設計図等の資料の入手は不可能であった。

(1) Maniela 橋

San Jose 市北方にあって、日比友好道路を形成する単径間の単純支持コンクリート桁橋である (Photo 24)。本橋梁が位置する San Jose 市周辺は、断層帯から若干ずれているものの、表層土壌は軟弱である。その北側および西側には低山があるが、これらの山腹は比較的緩傾斜であるにもかかわらず、斜面の崩壊が散在する。これらの斜面崩壊の発生と地震との関係は確認できなかったが、おそらくその因果関係は有意ではないと推測される。それは地元の人達がこのような崩壊はほぼ常態であり、この年に限ったことではないと述べているからである。



Photo 24 Damage to Maniela bridge.

本橋梁の周辺の地盤の沈下は著しく、特に南側アバットメントが大きく傾斜後退したため、桁が可動端である南側から落下した。当時仮設されていた仮橋は、この橋桁の上に、比較的小断面の山型鋼および木材によって組み上げられたものである。調査時期は、この道路による物資輸送のシーズンではないが、それでも基幹道路であるために交通量は相当にあった。落下した橋桁は、単に川床の軟弱土の上ののっているだけであるだけでなく、仮橋自体も剛性が小さい。このため一見すると補強が不十分ではないかと感じられた。

しかし、おそらくはシーズンの関係であろうが、通過する車両のほとんどが、ジープニー（一部に小型トラックを含む）を主体する旅客輸送であり、貨物の輸送は比較的少なかった。しかもそれらは食糧および日曜雑貨であるためもっぱら小型貨物自動車を使用されていた。

(2) St. Monica 橋

Rizal 市北方の灌漑運河を渡る 2 径間の単純支持コンクリート桁橋である (Photo 17-19)。Rizal と San Jose を結ぶ道路のうち Rizal 寄りの部分は、断層線とほぼ平行に走り断層線から高々数 km の位置にある。この道路には地盤の沈下によると見られる路面の亀裂が相当数発生している。両側は水田であるが、一部に噴砂の痕跡が見られる。地震時に液状化現象が広い範囲にわたって発生したものと考えられる。

本橋梁は断層の直上に位置するため、両側（特に南側）の取付道路は斜面もろとも完全に崩壊している。橋梁自身も、両側アバットメントが大きく傾斜後退し、橋脚も大きく傾斜して 2 本の桁はともに固定支承を引きちぎる形で落下するなど激しい崩壊を示している。

この道路はコンクリートの標準的な舗装を有する往復 2 車線の道路であるが、交通量は非常に少なかっ

た。また本橋には細い迂回道路があるだけであるが、交通障害は認められなかった。

(3) Vega 橋

Bongabon 町北方で Pampanga 川を渡る 7 径間の単純支持コンクリート桁橋である (Photo 25)。橋軸はほぼ断層線と平行である。橋脚はすべて一斉に頂部を南側に向けて転倒している。橋桁はこれら橋脚の上に北側からのしかかっている。

兩岸の土地の変容は著しく、アバットメント後方の取付道路部分は 50 cm ほど沈下し、さらに降雨の影響で土壌が流失しつつあった。これに併せてアバットメントは川の外側に向かって 2 m 以上の後退を示していた。降雨が続くため川の流量は増していたが、水深が浅かった。落下してもなお辛うじて橋桁がつながっていることから、住民達は土嚢を用いて応急処置し徒歩で通行していた。橋脚の破壊形態と兩岸の河川堤防の変状から液状化現象のあったことが推定できたが、増水のため河川敷内において、その形跡を確認することは出来なかった。

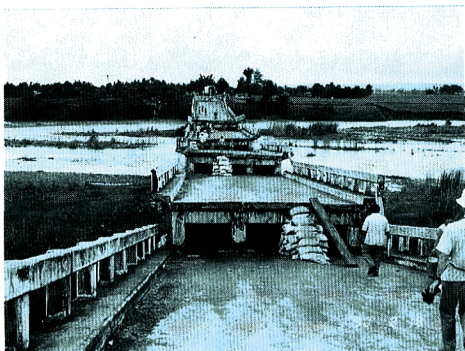


Photo 25 Damage to Vega bridge.



Photo 26 Damage to Dupinga bridge.

(4) Dupinga 橋

Gabalton 町北方の 7 径間の単純支持コンクリート桁橋である (Photo 26)。中央部の橋脚 1 本のみが橋軸直角方向に傾斜沈下し、この点で床面は折れ曲がっている。その他の橋脚の変容は見い出せなかった。Palayan 市から Gabaldon 町にいたる道路のうち Laur 町以東は、日比友好道路と同様に断層沿いの峡谷を縦走しているが、ここがきわめて活発な地殻変動地帯であるために、調査期間においても、地震と降雨による土砂崩れおよび路面の湛水のため、通常の乗用車では通行できなかった。しかしこのような被害は、実は地震の発生をまつまでもなく、毎年の雨期に相当高い頻度で発生しているものである。

このため、このような被害モードは、住民の生活様式に十分に組み込まれている。このうちきわめて軽量の住居のもつ耐震性および雨期の居住性は注目に値するが、このことは交通行動においても同様に認められる。後述するようにジープニーによる住民の足は十全に確保されていたのである。

(5) その他の橋梁の被害

峡谷部分にも大型の橋梁がいくつか存在する。しかしその上部構造には損傷は全く見られなかった。ただ取付部分の地盤が一部変形しているだけであった。平野部においてもいくつかの橋梁に同様の所見があっ

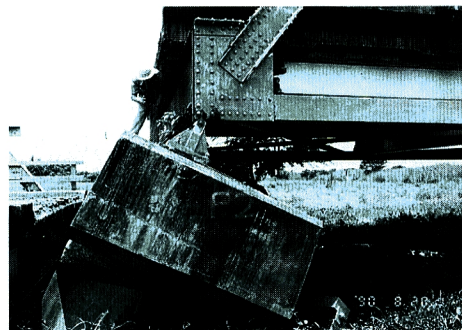


Photo 27 Damage to Carmen bridge.

た。調査地域以外の例を見ても、これが最も標準的な損傷の態様であると考えられる。ダグバン市内のマグサイサイ橋やダグバン市南東の沖積平野を流れるアグノ川にかかる13スパンの単純トラス橋で、全長 655 m のカルメン橋 (Photo 27) の被害は地盤の液状化に基づく地盤の大変状によって、橋脚基礎が崩壊したことに起因している。

6. む す び

前書きでも述べたように、今回の地震災害の特徴はマグニチュードが7.8という巨大地震であることから、多義にわたる地盤や構造物の被害が見られたことである。本報告では Baguio や Agoo 市に発生した建物の被害、Dagupan 市に発生した液状化に基づく各種の被害について述べることはしなかった。これは、その重要性を無視したわけではなく、十分な調査時間が無かったので、内容としてまとめたものを書けるとは考えられなかったからである。今後出版される土木学会調査団、建築学会調査団の報告書にはここで述べなかった内容の詳しい報告が為されるはずであるので、それをご参照頂きたい。

なお、調査地域内における建築物の被害として、Puncan 村の教会の完全な破壊、Umingan 町の2階建建物の1階部分の崩壊、Bongabon 町の公立病院の使用不能、Luson State 大学の3階建建物の2階部分の崩壊、Cabanatuan 市の Christian College の1部の崩壊などがある。また相当の広範囲に亘って、旧いカトリック教会の柱等に損傷が見られた。

参 考 文 献

- 1) Japan Society of civil Engineers Investigation Team, Preliminary Report of JSCE Reconnaissance Team on July 16, 1990 Luzon Earthquakes, August 1990.
- 2) Sato, T. and Kiyono, J.: Proc. of 7th JEES, pp. 541-546, 1986.
- 3) 土岐・佐藤・清野・斉藤：第23回土質工学研究発表会, pp. 805-808, 1988.
- 4) Abe, K.: Preliminary Report for the Mechanism Solution of July 17, 1990 Luzon Philippin Earthquake.
- 5) Geology and Mineral Resources of the Philippines, Vol.1 Georogy, Bureau of Mines and Geo-Sciences, Ministry of Natural Resources, 1982.
- 6) 翠川・小林：日本建築学会論文報告集, 第290号, pp. 83-94, 1980.

STRUCTURAL DAMAGE AND INTENSITY OF GROUND SHAKING DURING THE 1990 PHILIPPIN EARTHQUAKE

By *Tadanobu* SATO, *Hiromichi* HIGASHIHARA and *Kazuo* KONAGAI

Synopsis

This is a survey report, in which the damage to structures done by the 1990 Philippine Earthquake and the intensity of ground shaking during the earthquake are discussed. No strong motion accelerographs were available for areas 100 to 150 kilometers from the epicenter.

We therefore calculated the theoretical distribution of maximum accelerations in the region near the earthquake source. The calculated intensity of ground motion was compared with the estimated maximum acceleration levels from fallen religious statues in churches. The survey results on heavily damaged bridges especially failure modes are discussed.

The slope failures along the fault extent are also discussed.