

(31) 崖地形の地震時に於ける動的挙動

埼玉大学工学部
 鹿島建設技術研究所
 埼玉大学大学院
 長谷川工務店
 東京都土木技術研究所

小牧 昭三
 戸井田 克
 大竹 健司
 佐々木 公敏
 正員 小川 好

1. はじめに

地震による構造物や各種施設の被害は、一般的に地震の規模や震源域からの距離だけに限らず、その地域特有の要因によることば知られている。それの中には、地盤の速度構造や地形に基づくものが考えられ、崖もその一つである。崖地形での地震動災害が、特に注目されるようになったのは、1968年十勝沖地震(M:7.9)の際、八戸市の段丘地形の崖ざわに位置していた市役所、市立図書館、八戸工業高等などの耐震性の配慮された鉄筋コンクリート構造物が被害をこうむったからである。1978年伊豆大島近海地震(M:7.0)に於いても、道路をはじめ数多くの土木構造物、建築構造物が被害をこうむった。

崖の崩壊による道路の被害が著しく、震災復興にも多大の支障をもたらしたことは、記憶に新しいところである。写真-1は、静岡県賀茂郡河津町榎本の河津川左岸の段丘地形の崖ざわに沿っていた幅約2.7mの簡易舗装道路が、この地震のために約20mにわたり崩壊した例であるが、この崖を利用して崖地形での地震時の振動性状を究明するために、崖面に直角方向に測線を設けて、崖ざわを含めての地点で地震の同時比較観測を行い、430余りの地震を観測した。しかし、これはいわゆる直下型のM3以下の微小地震が多いため、M4以上の地震がよく観測される水戸市内の台地にある水戸地方気象台の崖を利用して同様な比較観測を行い、約100箇の地震を観測した。

2. 地震観測

崖面に直角な測線(榎本N65°E、水戸N32°E)上で、崖ざわにてきるだけ近づけて観測点I、崖の影響がないと考えられる地点に観測点III、その中間に観測点IIを設けた。すなわち、榎本では崖ざわより1.4m、15.4m、64.4m、水戸では2.5m、14.5m、50.5mの地点に地震計を崖面に直角方向に次々設置した。図-1には、水戸での地震計の設置図を示す。

地震探査の結果、榎本では $V_{p1}=200\text{m/sec}$ (厚さ約1m)、 $V_{p2}=800\text{m/sec}$ (厚さ約7m)、 $V_{p3}=1500\text{m/sec}$ (厚さ約20m)の3層から成り、崖面に現れた露頭から判断しても、薄い表土の下に厚さ約7mの溶岩流の表層破砕部があり、その下部、柱状節理の発達した玄武岩で構成



写真-1. 観測地点(榎本)の崖縁の道路の崩壊

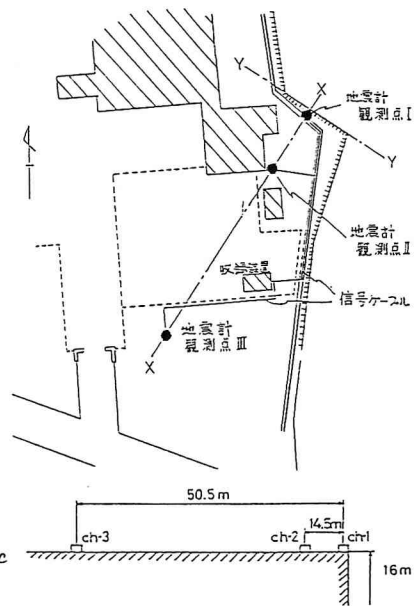


図-1. 地震計の設置位置(水戸)

され、上述の速度構造とよく一致している。崖の形状は上部約17m切立っており、その下の傾斜が次第に緩やかになり、崩落石が累積している。水戸では、 $V_{p1}=280\text{m/sec}$, $V_{s1}=90\text{m/sec}$ (厚さ約3m), $V_{p2}=800\text{m/sec}$, $V_{s2}=200\text{m/sec}$ (厚さ約3m), $V_{p3}=800\text{m/sec}$, $V_{s3}=415\text{m/sec}$ (厚さ約19m), $V_{p4}=1280\text{m/sec}$, $V_{s4}=590\text{m/sec}$ (厚さ約17m) の4層に別けられ、その下に $V_{p5}=2380\text{m/sec}$, $V_{s5}=690\text{m/sec}$ の層が存在する。また、ボーリング柱状図から、湧き起工の下に約22m前後の砂質粘土層と続き、地表から深さ約28m付近までに砂礫層が存在し、速度構造とよく対応している。崖の高さは、約16mであり、地表面からの傾斜角は約6度である。

観測は、固有周期1.0sec、減衰定数0.64の速度型地震計によって行った。出力は、そのまゝ広ダイナミック・デジタル地震収録装置の磁気テープに5msec間隔で収録された。

梨本の観測では1978年9月から1979年1月まで約40余りの地震が観測され、そのうち震源MがわかっているものをM2.0以上は黒丸、2.0未満は白丸として図-2に震央マップを示す。水戸では1980年9月から1981年3月までに得られた約100箇の地震を水戸の震度別に図-3に示す。このうち、震度IVは4箇、震度IIIは6箇、震度IIは6箇観測されている。

3. 解析結果

地震記録は、速度に比例した電圧量で観測しているため、この記録より高速フーリエ変換を行って速度スペクトルを求めた。また、周波数領域で微分、積分することにより、加速度、変位スペクトルを算出し、夫々逆高速フーリエ変換を用いて加速度、変位波形を求めた。地震記録が、梨本では比較的短いことから、波形全体を解析の対象としたが、水戸では地震の規模が大きいため60~90秒程度と長いことから、最大振幅を含む主要動部分を15秒を取り出して解析を行った。

観測された地震のうち、梨本は伊東沖で起った40箇について、水戸は茨城県沖、茨城県南西部などで起った10箇について、夫々フーリエスペクトルを求め、各周波数ごとの値を夫々のスペクトルの全面積で除して得

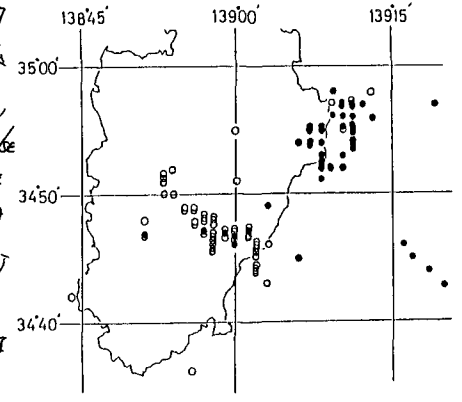


図-2 震央マップ(梨本)

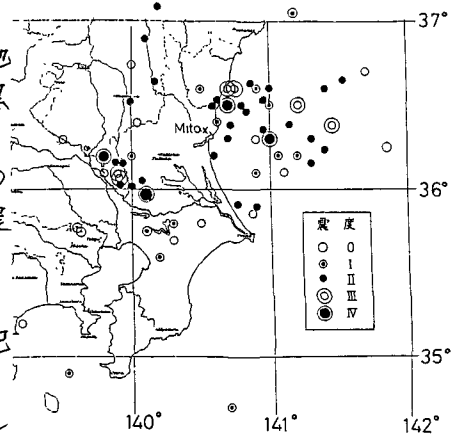


図-3 震央マップ(水戸)

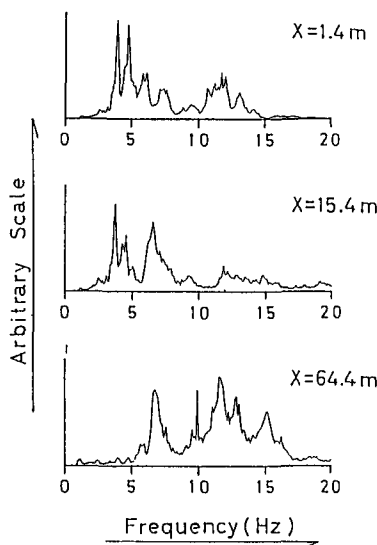


図-4 速度スペクトル(梨本)

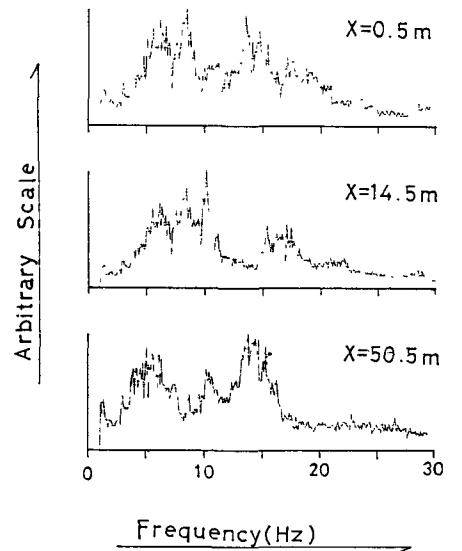


図-5 速度スペクトル(水戸)

ふるスペクトル密度を全部加えたものを、架本付。図4に、水戸付。図5に示す。これによると、架本の観測では、観測点I、観測点IIで3.9Hz付近の波が卓越し、観測点IIIではあまりその付近に卓越が見えぬ。水戸の観測では、観測点I、観測点IIで8Hz付近の波が卓越し、観測点IIIではあまりその付近に卓越が見えぬ。これは、少からず崖の影響によるものと考えられる。架本の崖では、観測地点の地盤をモデル化して、有限要素法により振動性状を計算した結果、3.9Hz付近に卓越が見え、スペクトル解析の結果とよく一致している。

振動性状におよぼす崖の増幅度を見る目的で、速度波形の最大振幅を観測点Iと観測点IIについて比較した。水戸の観測を比較した結果を図6に示す。これによると、観測点Iでの増幅率が約2倍となっていることがわかる。架本付、更にこの関係をMについて見たものを、図7に示す。これによると、Mが大きくなると、増幅率が4倍、5倍となり、M2程度のものは、増幅率が2倍から3倍に集中している。このような増幅傾向は、加速度、変位波形についても見られる。

4. 崖芝わに於ける振動方向性

崖芝わでの振動方向の方向性を見る目的で、水戸で1982年12月から1983年1月まで、観測点Iで水平二方向成分の観測を行った。観測された地震波形は、同時刻歴で観測されていることから初期微動群より2秒間隔で崖面の方向をx軸、崖面に直角方向をy軸として軌跡を求めた。また、その方向性を見るために、振動方向と崖との角度 θ を求め、 $0 \sim 180^\circ$ の間で、図8に示す同時刻における点 (V_{xi}, V_{yi}) と原点を結ぶ速度の大きさを A_i と。

$$S(\theta) = \sum_{i=1}^n A_i \begin{cases} A_i = \sqrt{V_{xi}^2 + V_{yi}^2} & : 0 \leq |\tan^{-1} \frac{V_{xi}}{V_{yi}}| < \theta + \Delta\theta & n = 1, 2, \dots, 400 \\ A_i = 0 & : \theta > |\tan^{-1} \frac{V_{xi}}{V_{yi}}|, |\tan^{-1} \frac{V_{xi}}{V_{yi}}| \geq \theta + \Delta\theta \end{cases} \quad (1)$$

により積み重ねた $S(\theta)$ を2秒間隔で求めた。ただし、 $\Delta\theta = 1^\circ$ とする。

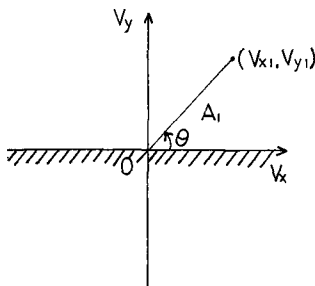


図-8. ある時刻における振動方向と崖との関係

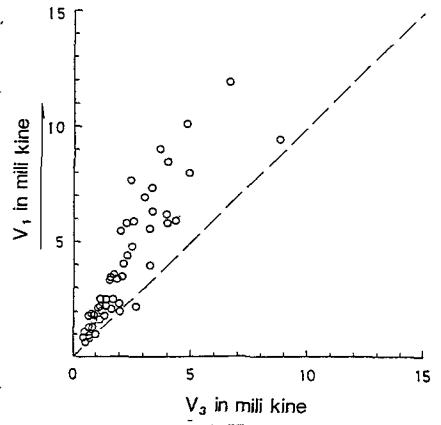


図-6. 観測点I,IIでの速度波形の最大振幅の関係

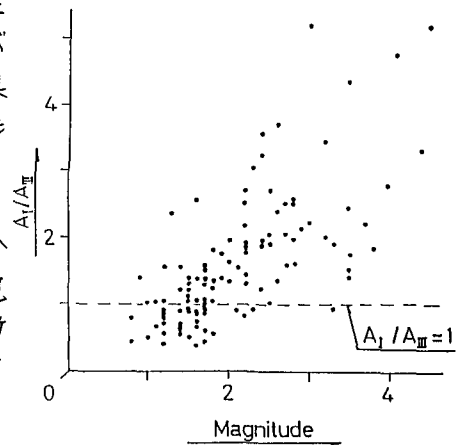


図-7. 観測点IIに付観測点Iの最大速度振幅比とMとの関係

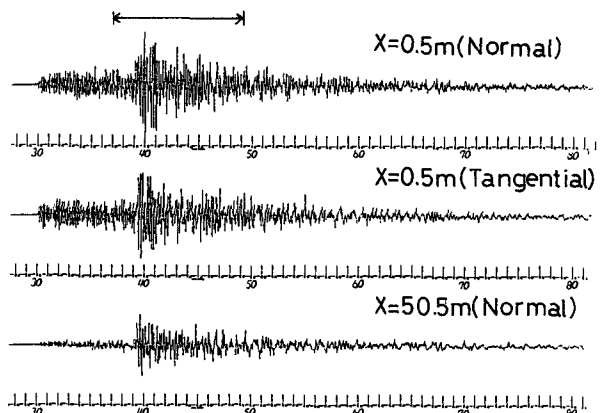


図-9. 茨城県南部で発生した地震の一例(M:6.0,1982年2月27日21時40分)

二成分観測の一例として1983年2月27日の茨城県南部の地震(M:6.0)の記録を図-9に示す。図-10に、この地震41~43秒についての振動軌跡を示す。また、(1)式より、この地震を2秒間隔で解析した結果を図-11に示す。これによると、S波到来時の39~41秒、41~43秒で直角に近い方向によく振動しているが、その前後では顕著に見えない。(1)式の振動振幅は、速度振幅であり、しかも絶対値を用いていることになるので、振動エネルギーに比列したものと考えてさしつかえない。すなわち、図-11は、崖に於ける地震動のエネルギー配分を示しているものと考えられる。

5. おわりに

今回の解析によって得られた結果をまとめると、以下のようなになる。

- (1) 崖の近傍では、祭本はふ8ヶ所付近、水戸は8ヶ所付近に卓越が見られる。
- (2) 観測点と崖の影響のないと考えられる観測点Ⅲでの振幅の最大値を比較すると、祭本、水戸の両地点とも、加速度と速度、変位のすべてについて、崖ざわが小さくなっていることがわかった。
- (3) 水戸の崖ざわでの振動方向性。今回の観測で地震波の振動エネルギーの大きい範囲内では、崖面に直角に近い方向によく振動していることがわかった。

地震観測を行うにあたり、99名の御協力をいただいた武井久徳防災業務課長をはじめとする水戸地方気象台の方々へ深く感謝致します。また、解析についても助言をいただいた東京大学地震研究所の松山澄子氏へ深く感謝致します。

<参考文献>

- (1) 大保直人・小坂昭三・音田 功
崖の近傍に於ける振動性状Ⅲ—飯能爆破実験を利用して—、第12回自然災害科学総合シンポジウム論文集、1976
- (2) 小坂昭三・戸井田 亮
崖近傍の振動性状—伊豆半島に於ける観測—その一、第17回自然災害科学総合シンポジウム論文集、1980

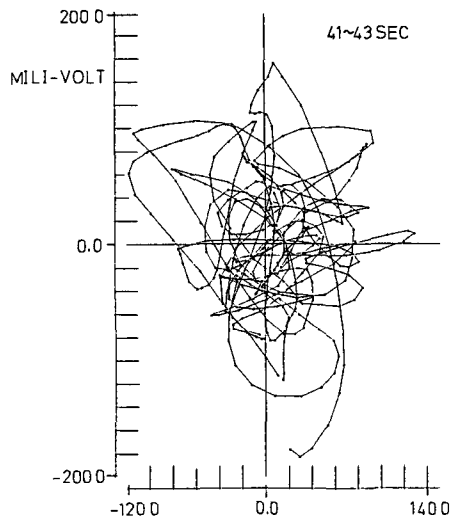


図-10. 振動軌跡

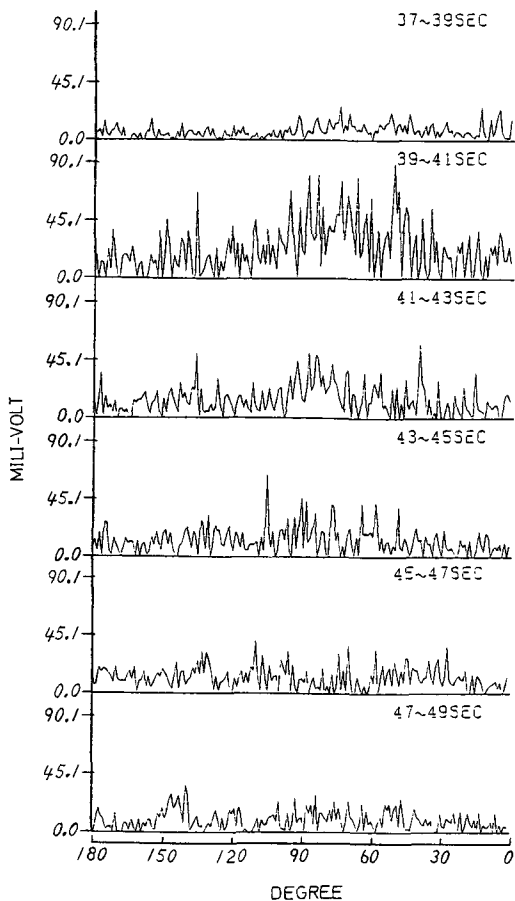


図-11 振動方向性