



## 斜面地形の住家被害と地震動特性 ～平成 12 年芸予地震における呉市の場合～

鎌田泰子<sup>1)</sup>、高田至郎<sup>2)</sup>、上野淳一<sup>3)</sup>

- 1) 非会員 神戸大学大学院自然科学研究科、工修  
e-mail : 994d838n@y01.kobe-u.ac.jp
- 2) 正会員 神戸大学工学部建設学科、教授 工博  
e-mail : takada@kobe-u.ac.jp
- 3) 非会員 (株)ライフライン工学研究所、工博  
e-mail : ju55@columbia.edu

### 要約

本稿は、平成 12 年芸予地震における広島県呉市の住家被害と市域の斜面形状との関連について検討したものである。住家の被害は、震動による家屋上部構造の被害が主因ではなく、斜面上の宅地の石積み・基礎部分の被害によるものが主であった。また、住家被害は土砂災害の多い東側斜面ではなく、斜面が急な西側に集中した。とくに尾根・谷の規模が小さい地域の尾根先で被害が多かった。さらに住家被害は斜面の中腹部で被害が大きくなることが知られた。これは、不整形地盤における地震動の反射・屈折によって斜面中腹部の地盤応答が大きくなった影響であると考えられる。

キーワード：斜面地形、住家被害、境界波動、平成 12 年芸予地震

### 1. はじめに

平成 12 年 3 月 24 日に安芸灘沖（北緯 34.1 度、東経 132.7 度、深さ 51km）を震源とする M6.4 の芸予地震が発生した。地震の被害は広島県、愛媛県、山口県と広い範囲に及んだ。中でも広島県呉市の住家被害・ライフライン被害は顕著であった。呉市中心部は盆地地形であり、その斜面地には多くの宅地が造成されている。斜面の表層地質は、脆弱な風化花崗岩からなるまさ土である。網干ら<sup>1)</sup>は昭和 60 年 7 月の集中豪雨、小堀ら<sup>2)</sup>は平成 11 年の集中豪雨の折の斜面被害について、傾斜勾配や表層厚、降雨特性などを要因として分析しており、降雨土砂災害の被害場所は北部、東部の農耕利用の多い斜面に多いことが示されている。拙著論文<sup>3)</sup>では 2001 年の芸予地震における呉市の西側斜面地で住家被害が多いとの傾向を指摘している。本稿では、住家被害について定量的に分析を進めた。さらに、斜面地形における地震動特性に焦点を当てて分析を行った。個々の斜面地盤の安定性は、表層地質、表層厚、斜面勾配、降雨量および地震動が関与する。これらの要因については、地盤工学的に多くの研究がなされている。

しかし、斜面の地すべりによる危険性ととも、造成された宅地擁壁の崩壊も考慮されるべきである。本稿では、後者の造成宅地擁壁の被災状況について検討した。また、斜面地の地震動特性は、常時微動測定とアンケート震度調査および、不整形の表層地盤の地盤応答解析結果<sup>4)</sup>に基づいて分析した。

## 2. 呉市の地形と地盤特性

### 2.1 地形特性と災害

呉市中心部は、三方を丘陵に囲まれた盆地堆積地形である。図1は呉市の市街区の等高線(10、50、100m、東京湾平均海面基準)を示している。休山の山裾である東側斜面と、北側斜面は等高線の間隔が広く、傾斜も緩やかである。一方、西側斜面は急傾斜で尾根・谷の地形構造が複雑に入り組んでいる。1889年に呉港の呉鎮守府開庁以来、軍港開発のため海岸地域は埋め立てられていった。図2は1902年に4町村が合併する以前の地形図<sup>5)</sup>であり、当時の海岸線は現在の市役所付近まで入り込んでいた。

呉市の過去の自然災害については、1945年の枕崎台風により死者1,154人、負傷者440人、流失家屋1,162戸、半壊家屋792戸が発生した他、1942年の集中豪雨により、がけ崩れ・河川の決壊など約2,700カ所、死者88人、負傷者467人、1999年の集中豪雨により、死者8人、負傷者5人が発生している<sup>6)</sup>。安芸灘沖での40-50年周期をもって発生している芸予地震については、1905年のM7.3の地震では、広島・愛媛両県で死者11名、負傷者177名、家屋全壊64棟の被害が発生し、1949年のM6.2の地震では、死者2名の被害が出たと報告されている<sup>6)</sup>。このことから呉市では、地震対策よりむしろ、台風・集中豪雨の対策を中心として進められている。また、過去の風水害の被害は東側斜面に集中して見られ、西側斜面には少なかったことが小堀ら<sup>2)</sup>によって指摘されている。

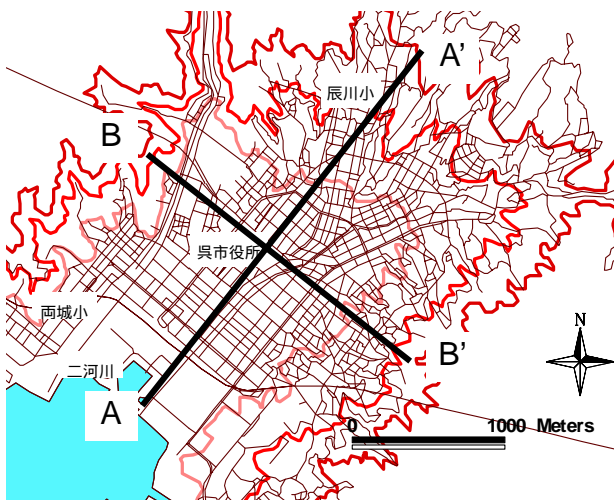


図1 呉市の地形



図2 約100年前の市街地図<sup>5)</sup>

### 2.2 地盤構造

図1中に示すA~A'およびB~B'の二測線に沿う地質縦断図と近傍の地質柱状図を図3、図4に示す<sup>7)、8)</sup>。海岸線沿いのA地点より辰川小学校付近のA'地点を結んだAラインでは、Bラインと交差する市役所あたりからゆるやかな傾斜が始まる。ラインAに沿う市役所より南の平地部では、20~30mの砂れきからなる堆積層があり、海岸付近では一部粘土層が混じる地点もある。市役所より北の緩やかな斜面地では深さ10m程度の付近に基盤層が現れる。一方、東西方向のBラインでは、B地点から二河川付近までは急な斜面地となっている。Bラインの南側の両城小学校付近では、基盤岩が露出している箇所もあり、西側一体の斜面地盤は比較的硬い岩盤からなる。また、東側斜面では西側斜面と比べ緩やかな傾斜勾配であり、休山の風化土が5~10m程度堆積している。

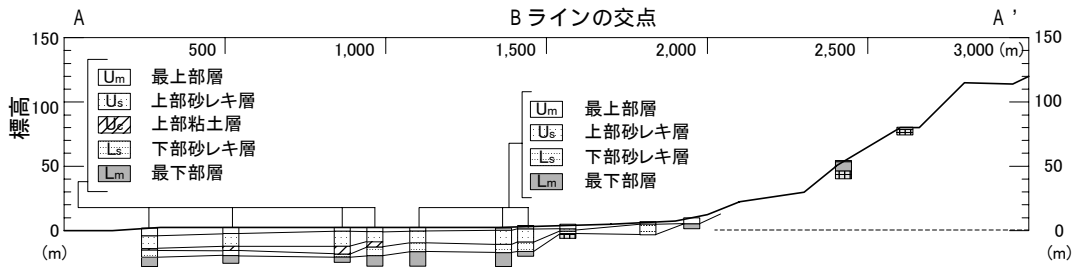


図3 Aラインの地質縦断図

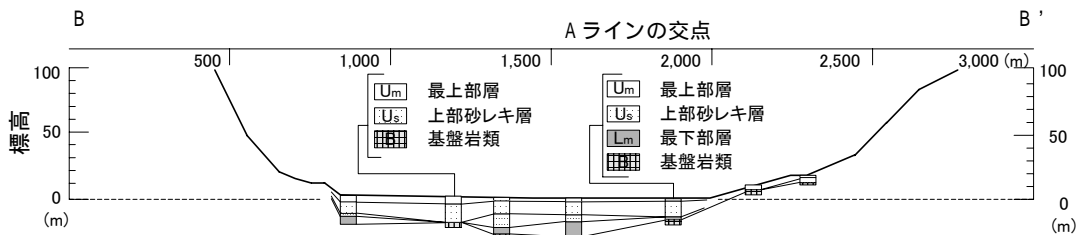


図4 Bラインの地質縦断図

### 3. 住家被害分析

#### 3.1 住家被害の概要

広島県呉市は本地震で甚大な被害が発生した地域の一つであり、市内では全壊 58 棟、半壊 258 棟、一部損壊 12,946 棟の住家被害と死者 1 人、重傷者 12 人、軽傷者 66 人の人的被災が発生した。ところが、兵庫県南部地震で見られた戸建住家の一階部層崩壊の被害パターンはほとんど見受けられず、全壊と査定された住家の被害モードは基礎部の崩壊が大半を占めている。本地震後の 2001 年 3 月末、災害住宅の被害認定基準は 1968 年策定以降初めて見直され、住むという機能的な視点での損失によるものに変更された。これまで全壊とは「住家が滅失したもので、延べ床面積で 70% 以上の損失（半壊は 20% 以上 70% 未満）か、主要構造部の被害額が時価の 50% 以上（半壊は 20% 以上 50% 未満）」と定義されていた。基準の見直し以降、全壊住家は「主要な構成要素の経済的被害を全体に占める損害割合で表し、損害割合が 50% 以上」のものへ変更された。これにより、呉市では土台が崩れるなどして人が住めなくなった「一部損壊」住家を「全壊」へと変更された経緯があった。

図 1 に示した範囲に含まれる住家被害（全壊 43 棟、半壊 156 棟）を分析対象として、住宅謄本と役所の統計資料<sup>9)</sup>から全壊住家の被害の状況、住家の構造、建設年度について検討した。被害の状況は、屋根等の被害も若干見られたが、第一の被害要因は住家の石積みの崩壊、基礎の陥没などによる基礎部分の被害によるものである。住家の上部構造は建て替えられているケースもあるが、石積み部分は宅地造成時に建設されたものである。被害住家の中には、自宅の石積みの崩壊によって被害を受けたものもあるが、住家背後にある隣地の石積みの崩壊によって被害を受けたものも少なくない。全壊住家で見ると、隣地の石積みによる被害は自宅の石積みによるものの 5 分の 1 程度であることが知られた。

全壊住家の建設年度割合は、終戦前後の 1940 年代に 30.2%、高度経済成長期の 1960 年から 1970 年代に 39.5% で、この二つの時期が大半を占める。呉市の人口の推移<sup>10)</sup>によると 1940 年代に人口約 29 万人でピークに達しており、この時期に平地部での宅地がキャパシティを超え、斜面へと一斉に宅地造成がなされた。全壊住家は、ほぼ 1940 年代の同時期に造成された石積みの崩壊によって被害を受けている。住家の構造種別は、86% が木造であり、一部 1980 年以降の比較的新しい鉄骨造の住家も含まれている。

被害を受けた住家の耐震強度は、建設年代と構造様式から判断してほぼ同様と考えて良い。図 5 は全壊及び半壊の住家被害分布を示している<sup>9)</sup>。また、図 6 は石積みや崖被害（斜面高さ 2~5m）の被災箇所を示している<sup>9)</sup>。全壊住家は西側斜面地に集中しており、半壊住家は東側斜面と中心部にも一様に分

散している。一方、石積みの被害は、狭い範囲で斜面が急な箇所が多く見られ、被害分布の傾向は全壊住家と類似している。半壊が傾斜のない中心部に多いのは石積み損壊による被害ではなく、弱体構造の住家が震動によって被災したものであると考えられる。

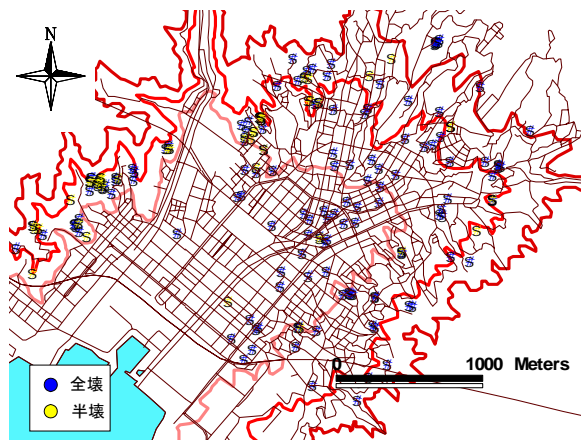


図5 全壊・半壊被害の分布

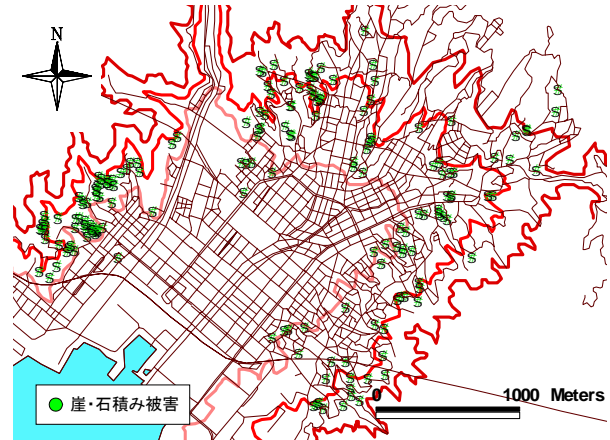


図6 石積み被害の分布

### 3.2 斜面別被害分析

図5の呉市住家被害分布によると半壊の被害は一様に分散して発生しているが、全壊はおもに西側の斜面地である両城・三津田・愛宕地域、北側の斜面である江原・片山地域に集中している。地質・地形的な影響を検討するために、呉市を二河川、国道185号線を境界線として、中心部と北斜面、西斜面、東斜面の3つの斜面に分割して分析した(図7参照)。北斜面は灰ヶ峰の、東斜面は休山の花崗岩の風化土によって堆積された地盤である。西斜面は他の斜面よりも勾配が急で畑地は少なく宅地のみとなっている。中心部は軍港設立時に河川沿いを埋め立てた地域である。

4分割したそれぞれの地域における住家被害率を求めた。ここで示している住家被害率とは各地域の住家被害戸数をその地域の総世帯数で割ったもので、区分ごとの1,000世帯あたりの住家被害率を指す。また、区分ごとの崖・石積み被災箇所の被害率も同様にして求めた。半壊・全壊住家被害率、石積み被害率を表1に示す。全壊半壊、石積み被害ともに西斜面でもっとも卓越しており、次に被害率の高い北斜面の3倍近くに及ぶ。東斜面と北斜面では、被害率の値に大きな差異が見られなかった。また、中心部は急な斜面を含まないことから被害率が低い。また、住家被害の他に相当な崖・石積み被害が発生している。さらに、過去の土石流災害では東側斜面が多発しているが<sup>2)</sup>、今回の家屋倒壊は西斜面に集中していることが知られる。



図7 斜面区分

表1 斜面別世帯あたりの被害率  
(1,000世帯あたりの被害件数)

	全世帯数	全壊住家	半壊住家	崖・石積み被害
西斜面	3,283	5.8	9.4	33.2
北斜面	9,548	2.0	6.5	11.1
東斜面	8,386	0.7	5.3	13.1
中心部	11,701	0.3	3.0	1.5

### 3.3 危険区域と住家被害

呉市被害危険区域図<sup>11)</sup>を用いて危険指定区域と今回の地震住家被害との関係を検討した。この危険指定区域とは、呉市が指定しており、がけ地危険区域と土石流危険渓流に分類される。がけ地危険区域とは、「がけ地の傾斜角度が30度以上、崖の高さが5m以上で、被害想定区域内の人家に被害の恐れがある区域」、土石流危険渓流とは「土石流発生のおそれがあり、人家に被害の恐れがある渓流および影響区域」と示されている。表2は、全壊住家と危険区域の関係を示している。どちらの危険区域にも属さないのは27.8%であるので、全壊住家全体の72%は危険区域に属していることが知られる。しかし、一般に土石流災害で被害の受けやすい土石流危険渓流に属していた全壊住家は全体の約1割足らずであった。また、約7割が急斜面であるがけ地危険区域で発生していることが顕著な特徴である。

とくに、全壊住家被害の多かった両城・愛宕周辺(西斜面)、片山周辺(北斜面)の分布(図8(a)、図8(b))によると、全壊住家は土石流危険区域とは異なり、尾根地形上で発生していることが知られる。軟弱な表層地盤の厚い地域の方が揺れやすいことも地震動を増幅させるが、本地震では急斜面の崖地や尾根地形の影響による地震動増幅の方が、住家や石積み被害に結びついたと考えられる。

表2 危険地区と全壊住家被害

	土石流危険渓流	土石流危険渓流に属さない	小計
崖地危険区域	2 3.7%	34 63.0%	36 66.7%
崖地危険区域に属さない	3 5.6%	15 27.8%	18 33.3%
小計	5 9.3%	49 90.7%	54 100.0%

上段:全壊住家件数, 下段:全壊住家件数に対する割合

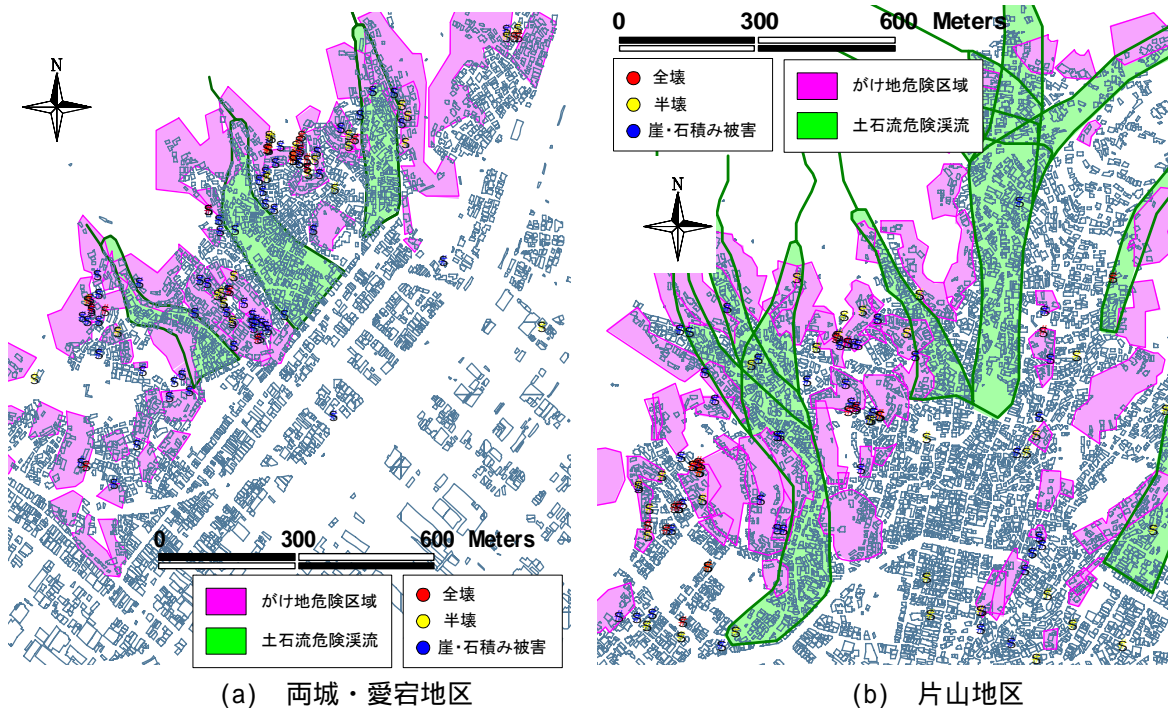


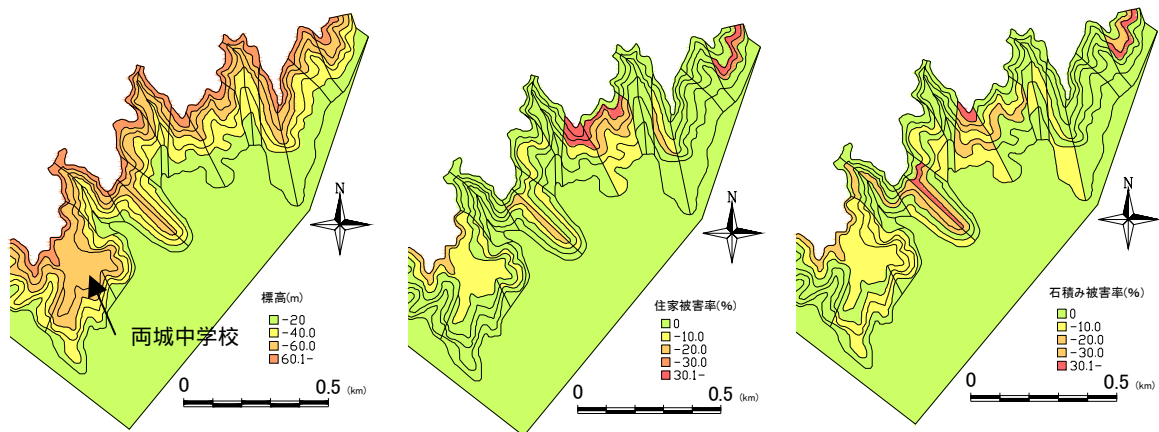
図8 危険区域と被害分布

### 3.4 地域的な被害パターン

被害が集中した西側斜面(両城・愛宕地区)と北側斜面(片山地区)の特徴をさらに詳細に検討した。図9は、二河川より西の斜面地区に対して、標高と土石流危険渓流区域を考慮してブロック分けを行い、ブロックごとの標高(図9(a))、住家被害率(建物戸数に対する全壊・半壊の総被害戸数の比率)(図9(b))

石積み被害率（建物戸数に対する被害箇所数の比率）（図9(c)）を示している。土石流の谷筋付近では被害が少なく尾根の稜線付近に被害が分布している。しかし、図9中の南にある両城中学校がある丘は他の尾根部分と比べ被害が少ない。西側は、尾根部分に被害が多く、同じ標高の地域でも谷部分の被害率は平地部と変わらないか、被害のない箇所もあった。

西斜面ほど被害率が大きくないが、片山地区を含む北斜面も同様に検討した。図10中の西側（図左）の片山地区は地形が複雑で、非常に急斜面地が多い。一方、土石流危険渓流内に含まれる図中央の辰川地区では、被害率は小さいことが分かる。急斜面で地形が複雑に入り組んでいる地域で被害が多く発生していることが知られる。さらに、西斜面と同様に尾根部分の方が谷部分よりも被害が多いことがこの分布からも確認できる。

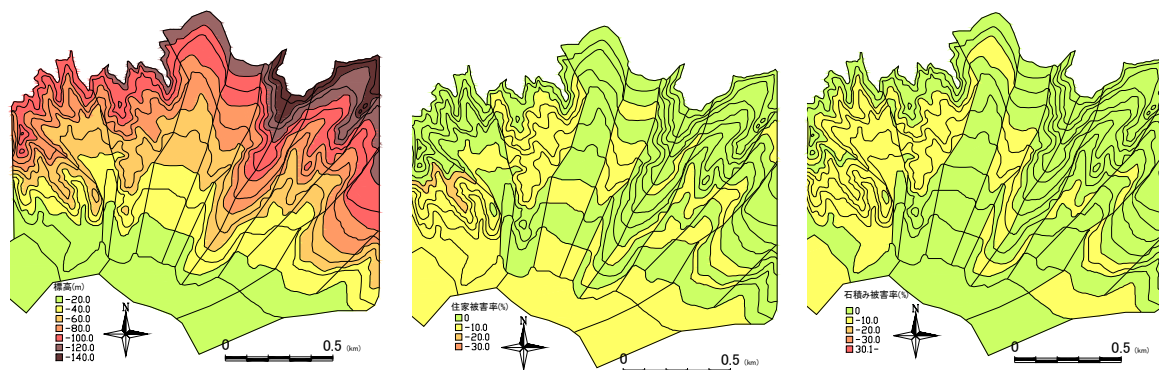


(a) 標高

(b) 住家被害率(%)

(c) 石積み被害率(%)

図9 西斜面被害分布



(a) 標高

(b) 住家被害率(%)

(c) 石積み被害率(%)

図10 北斜面被害分布

### 3.5 標高と被害率

尾根地形でも比較的標高の高い地域に被害が集中していることが知られる。図9、図10に示した西・北斜面区域を対象として、標高10m区分ごとに全壊・半壊・石積み被害率の分布を求めた結果を図11に示す。西側斜面では標高30~60mの辺りで被害率のピークが表れ、それ以上の標高では減少する。また、東側斜面でも標高40~70mにピークが見られる。標高110m以上になると住家の数も少なくなるが、標高60~110mあたりまでは標高の各区分あたり200~1,000戸の住家があり、住家が存在しないわけではない。局所的に尾根形状で被害が大きくなるとともに、斜面の中腹部で被害率が高くなる傾向が知られる。

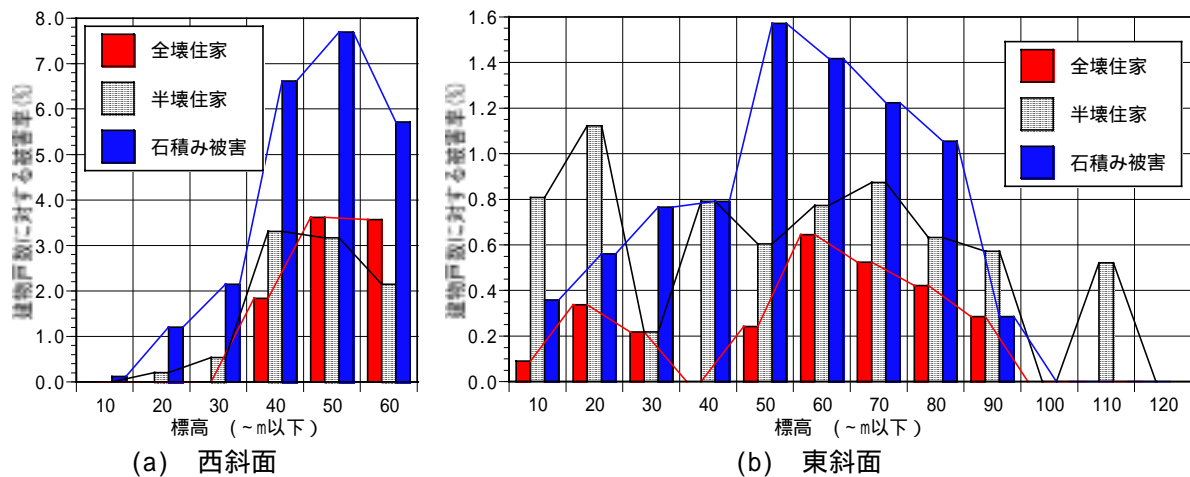


図 1 1 標高と被害率

#### 4 . 斜面形状の地震動特性

芸予地震における呉市の住家被害は、斜面上の宅地での石積み・基礎部分の被害が主な原因であり、とくに斜面が急な西斜面で被害率は高く、被害は土石流危険渓流区域の谷筋ではなく急斜面の尾根先に被害が集中し、さらに斜面の中腹部で被害のピークをもつ、などのことが知られた。急斜面上では石積みの傾斜勾配はほぼ鉛直に近いものもあり、上部の重さにより石積みが迫り出しているものも見かけられた。急斜面での被害は限られた地理的条件の中で造成されたために元々崩壊しやすい状態のものが被害を受けたことは一つの要因である。

石積みや擁壁の耐震性に関しては、これまでに池本<sup>12)</sup>が数値解析によって城の石垣の耐震性の分析を進めている。渡辺<sup>13)</sup>は、擁壁模型の実験を行い、水平震度が大きくなるほど土圧の理論値と実験値の差が大きくなることを示しており、擁壁の安定性は常時と地震時では大きく異なることを指摘している。一方、本稿では個々の石積み安定性に作用する要因を追求するのではなく、これら地震被害が斜面中腹部に現れる要因として、斜面地形がもたらす不整形の表層地盤の地震応答特性に注目し、現地調査や数値解析結果をもとに検討を進める。

##### 4 . 1 常時微動測定

中村<sup>14)</sup>によって提案された水平鉛直振幅スペクトル比（微動の鉛直成分の振幅に対する水平成分の比率。以下、H/V比）は、微動から地盤の震動特性を評価するには有効である。しかし、振幅比は実際の地震動で得られるものよりも振幅レベルが低く、地表面が基盤に近い地盤や不整形構造地盤では、とくに目立った卓越周期が存在しにくい、などの報告<sup>15)</sup>もある。そこで、現地での微動観測実施によって、H/V比と地盤特性値との関係について検討した。

今回の微動測定では、辰川小学校付近の北側の地域から南側の埋め立て地域への側線 MA（図 1 のライン A に沿う）と、盆状断面となる東西側線 MB（図 1 のライン B に沿う）を計測対象地域とした。調査時期は、2001 年 10 月末である。主な測定機器は携帯用振動計で水平二成分と鉛直一成分の速度センサーからなり、サンプリング周波数は 100Hz である。

図 12 はライン MA、MB 上の H/V 比を示している。市内の中心部に向かうにつれて卓越周期が長くなっていくことが知られる。図中の印は、付近のボーリングの N 値をもとに、道路橋示方書<sup>16)</sup>に従って算出された地盤の固有周期を示している。地盤の H/V 比の卓越周期は、ライン MA、MB の中央部では四波長則から導かれる地盤の固有周期とほぼ対応している。MA6~8、MB3~5 とボーリングデータから推定される卓越周期が 0.2 秒以上の地盤はスペクトルの卓越も明らかである。一方、卓越周期が 0.2 秒以下の地盤では H/V 比に目立った卓越周期が現れにくい傾向を示している。ライン MA の斜面端部で

は H/V 比の卓越周期の方がやや長くなる傾向を示すが、増幅比は平地部に比べて小さい。成層地盤ではなく、緩やかな谷筋の斜面勾配をもつ MA ラインでは、薄い表層地盤の影響によって、斜面地形の 3 次元地形効果が現れていると考えられる。一方、MB ラインでは MB6~8 は標高が急激に上昇しており基盤岩が地表面近くに露出してきていると考えられる。ここで得られる微動には、卓越した周期は現れず、ほぼフラットなスペクトルを示している。

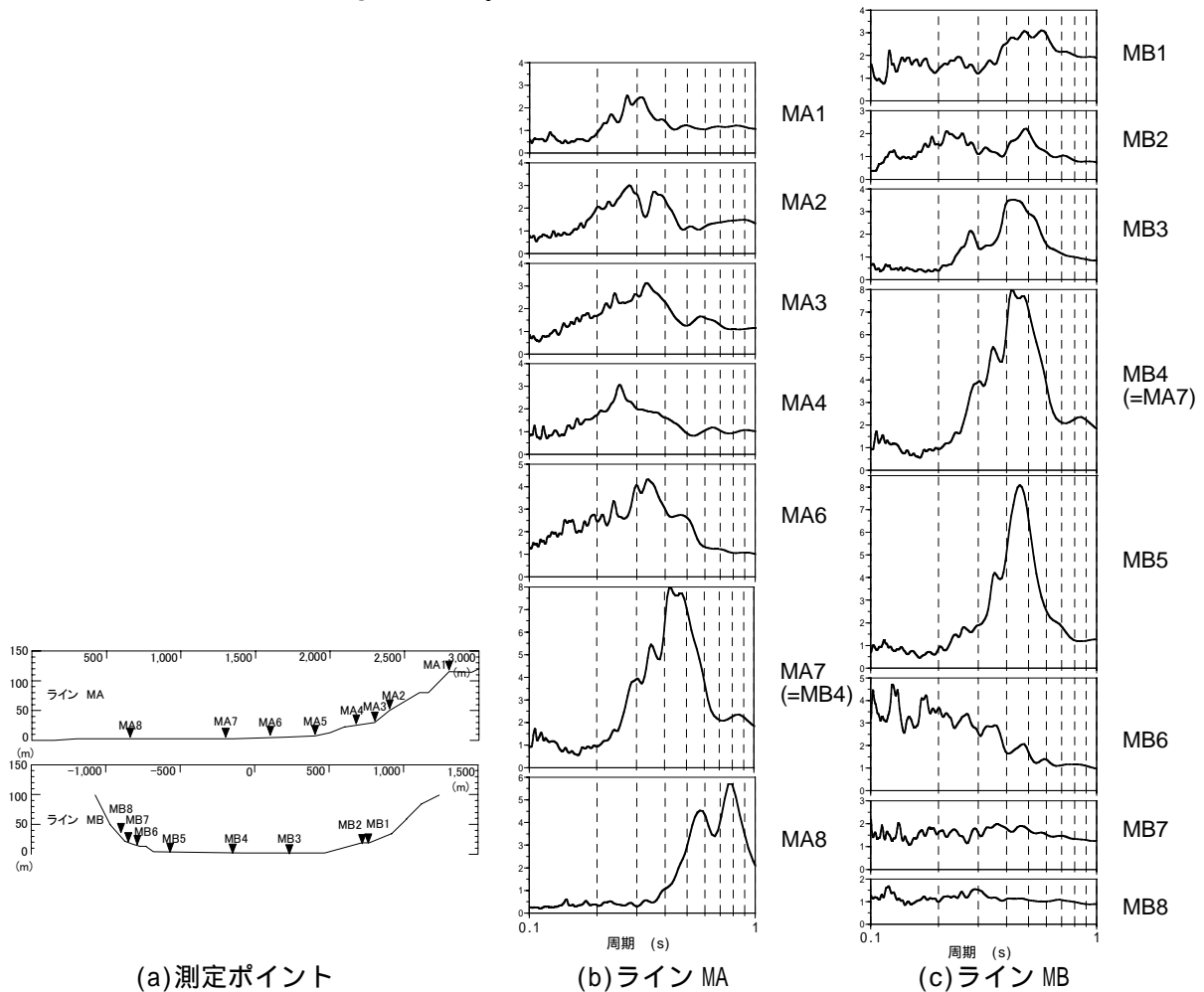


図 1.2 微動による H/V 比

#### 4.2 アンケート震度調査

アンケート震度は、アンケート調査票記入結果の分析によって地震動を推定する指標であり、調査票には物理的な反応（回答者のまわりの物品の揺れ具合やその被害程度）に関する質問項目と、感覚的な反応（回答者の行動や直感）に関するものがあり、各回答番号の重みづけされた値の平均値をもって震度が算出されるように設定されている。本研究では、1995 年の兵庫県南部地震の折に実施されたアンケート調査結果をもとに、高震度階における計測震度とアンケート震度から算出される気象庁震度階換算値とが良く対応するように選択肢や震度係数を再設定した著者ら<sup>17)</sup>による評価手法を用いた。

アンケートの対象は、第 3 章で示した常時微動観測地点付近および住家の被害が大きい地域とした。配布は常時微動測定と同時期に実施し、回収方法は、玄関での対面方式と、アンケート票と返送封筒を手渡した郵送方式で行った。その結果、呉市中心部では 120 枚のアンケート票を回収した。呉市平地部では平均して震度 5.3 が得られた。本地震において呉市役所（ポイント MA7）で観測された加速度記録（PGA NS:284.9gal、EW:336.1gal、UD265.5gal）<sup>18)</sup>より算出される計測震度は 5.4 であり計測震度と良い対応している。アンケート震度と地形との関連については後述する。



#### 4.3.2 次元地盤応答解析

図1中のラインA上に沿った地盤断面をモデルとする2次元等価線形解析を行った。本解析の詳細は拙著論文<sup>4)</sup>で示しており、本稿ではその概要と次節で示す他の調査結果との対応を中心にまとめる。呉市役所で観測された加速度(図13参照)の南北成分を一次元等価線形によって基盤波に戻した。解析モデルを図14に示す。ボーリング等の地盤データをもとに、長さ約2,800mの半月型で四角形メッシュを設定した。モデル底面は固定、海側(図左側)の側方境界はエネルギー伝達境界、山側(図右側)は底面と同じで剛境界である。

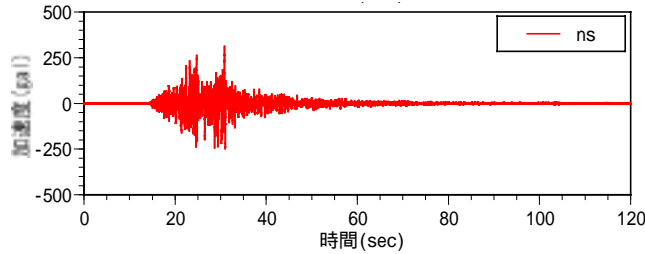


図13 市役所の加速度波形(南北成分)

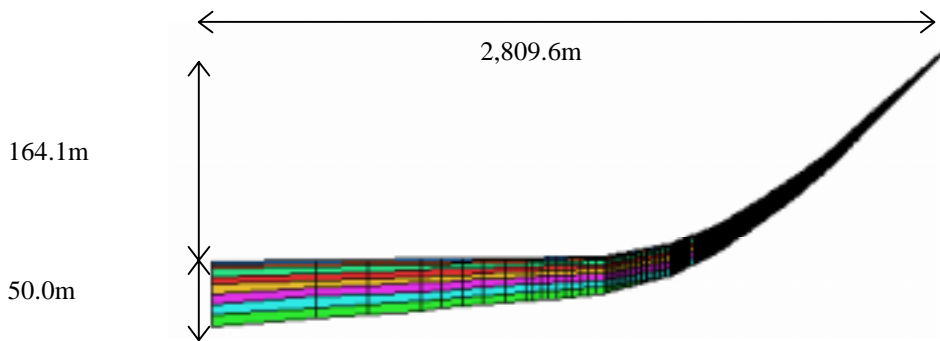


図14 解析モデル(縮尺x:y = 1:5)

図15中のケース1は図14のモデルのx軸の長さが2,500mまでのもの、ケース2は図14のモデルを用いた計算結果である。両ケースにおいて、地震動の卓越周期に近い地盤の固有周期の地点でPGAの振幅は極値を示し、さらに斜面の中腹にあたる辰川小学校付近(海岸線から約2,500m)で高い振幅を示す。図16は海岸線から1,500、2,500、2,700mの地点における地表面加速度応答スペクトルと入力加速度スペクトルの比から得られる増幅関数を示している。最大応答加速度が算出された地点の卓越振動数は、高周波である。層厚の変化する表層地盤内での波動の反射・屈折による焦点効果によるもので斜面中腹に地震動エネルギーが集中したためと考えられる。

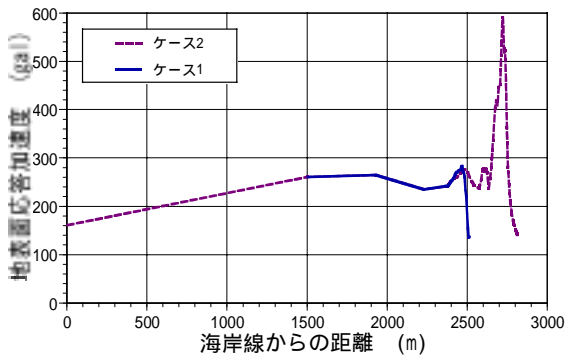


図15 表層の応答加速度

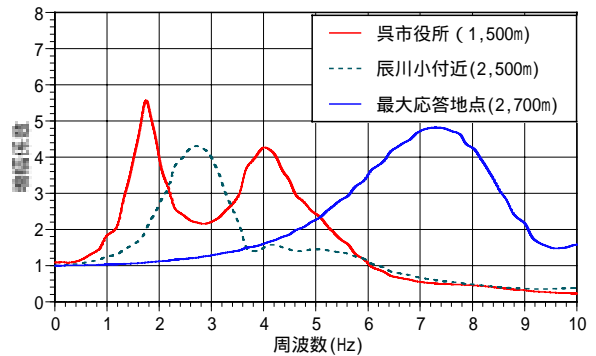


図16 増幅関数

#### 4.4 斜面地形と地震動評価

常時微動観測地点に沿ったライン A、B ごとに卓越周期および震度を図 17、図 18 に示した。常時微動 H/V 比の卓越周期、および観測地点付近の地質図から推定される地盤の周期を図 17(b)、図 18(b) に示した。アンケート震度については、常時微動観測点から半径 50m 以内で得られたアンケート震度の中央値をその地点のアンケート震度として、図 17(c)、図 18(c) に示した。また、ライン A について地盤応答解析結果から、入力加速度スペクトルと地表面の加速度応答スペクトルとの比から得られる伝達関数を導き、その卓越周期を図 17(d) に示した。

基盤岩上の地盤では常時微動の卓越周期はボーリングのデータから得られる卓越周期よりも斜面上で若干長くなる傾向を示した。伝達関数から得られた卓越周期も、絶対値は異なるが、斜面中腹で周期が長くなる傾向が見られる。

アンケート震度は、ライン A、B ともに平地よりも斜面で震度が高くなる傾向が知られる。斜面形状が緩やかに変化するライン A で推定された震度では、図 15 に示す応答加速度のように海岸から 2,500m 超えた付近で震度が高くなり、また斜面の中腹部でも若干震度が高くなる傾向を示した。

2次元解析では、斜面中腹で卓越周期が長くなり、振幅も大きくなる。この傾向は常時微動 H/V 比の卓越周期とも対応している。斜面地の地震動特性は、斜面形状がもたらす地震動の反射・屈折によって斜面中腹部の地震動振幅が大きくなったものであり、つまり硬軟地盤の境界付近に発生する境界波動の影響といえる。著者らによる地震直後の速報<sup>19)</sup>で、斜面地における物的被害の集中を見かけ上の「なぎ

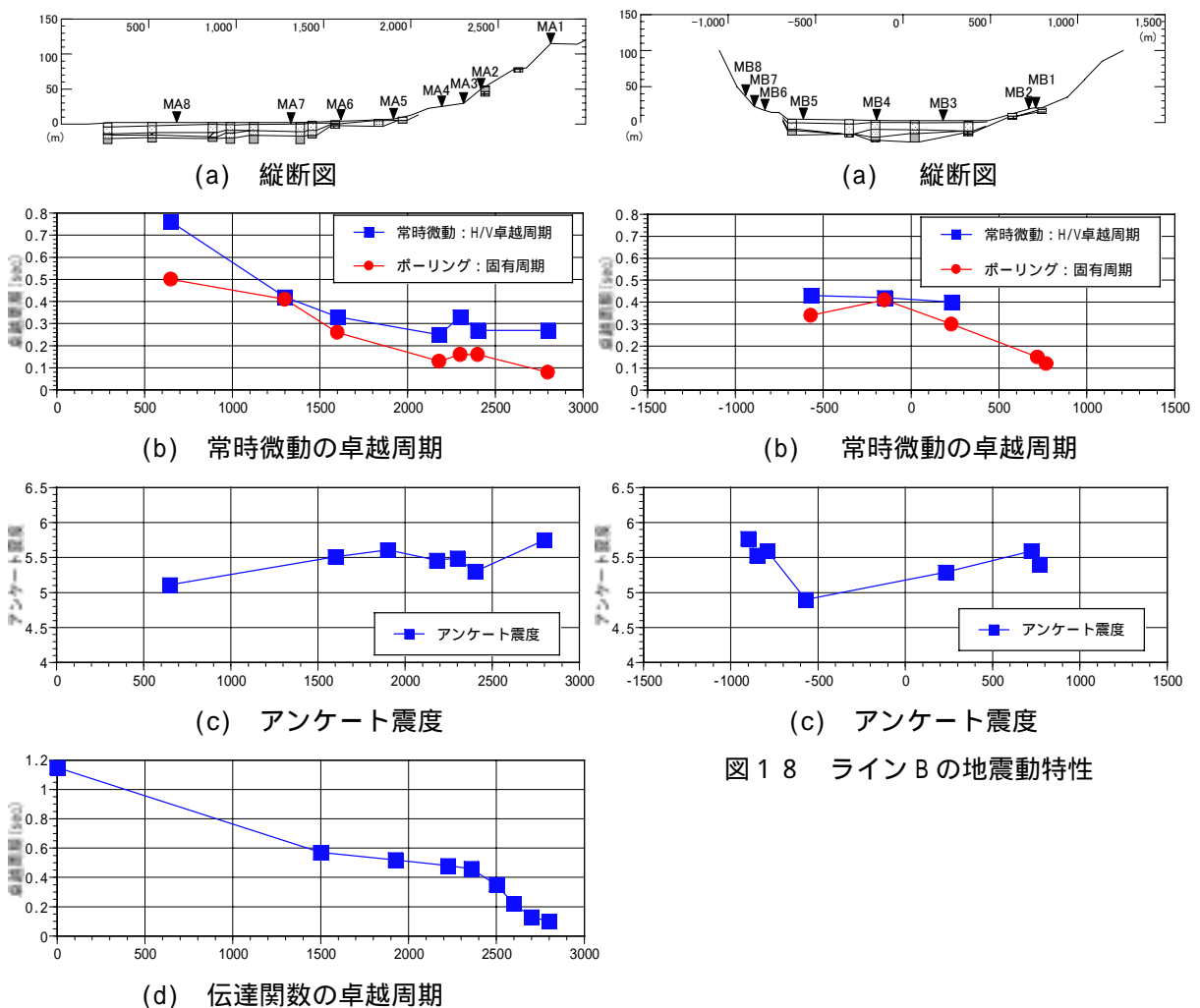


図 18 ライン B の地震動特性

さ現象」と提起していたが、局地的な地盤構造の変化・斜面全体の形状による境界波動の影響によるものであることが解析結果より伺われる。また、斜面地に関して、海岸付近の A 地点から 2,000～2,500m の箇所にある卓越周期が伸びた地点は、図 17(a)の縦断面図で標高 30～70m に位置し、図 11 で得られた北斜面の住家・石積み被害率が高く評価された地域と対応している。尾根地域で被害が集中する要因もあるが、地震動の卓越周期が短く、斜面地の地盤の固有周期とも符号したことも斜面で被害が大きくなったことの要因として挙げられる。

## 5. 結論

芸予地震における呉市の住家被害と斜面地形との関係について、被害データおよび現地調査を行い分析した。これらの結果を以下に示す。

- ・ 呉市の住家被害の主要因は斜面地での宅地の石積みや基礎部分の被害によるものであり、住家よりも、石積みの方が崩壊しやすかった。全壊住家の中には、隣地の石積みの崩壊の被害による住家被害も自宅のその 5 分の 1 の割合で起こっていることが知られた。
- ・ 地震による被害は呉市の西側斜面に集中し、土砂災害の多い東側斜面の被害は小さかった。全壊住家は呉市によるがけ地危険度区域に多く含まれるが、土石流危険渓流にはほとんど含まれていなかった。とくに、斜面中腹部で尾根・谷の形状が複雑な地域の尾根の稜線近くで被害が集中した。
- ・ 斜面地では、山手に向かう斜面中腹で石積み・住家の被害率はピークを示し、その後小さくなる傾向があった。斜面形状がもたらす地震動の反射・屈折によって斜面中腹部において地震動振幅の増幅や卓越周期が長くなったものであり、硬軟地盤の境界付近で発生する境界波動の影響と云える。
- ・ 盆地形状の中心部で被害が小さく、斜面中腹部で被害が集中したのは、短周期成分の地震動が卓越し、斜面中腹部の尾根地域の地震動増幅によって石積み・住家に強い揺れが作用していたことによるものと考えられる。

## 謝辞

本論の呉市の地盤資料収集にあたり、国立呉工業専門学校の小堀慈久氏の多大なご協力を得た。また、調査、分析にあたり、西範大氏（当研究室卒業生）の多大なご協力を得た。ここに記して感謝の意を示す。

## 参考文献

- 1) 網干壽夫、小堀慈久：まさ土地域の斜面崩壊調査について - 広島県呉市の場合 -、第 40 回土木学会中国四国支部学術講演会概要集、1988 年、pp.280-281.
- 2) 小堀慈久、佐川修：平成 11 年 6 月集中豪雨による呉市斜面災害の状況分析、呉高専 35 周年記念学術論文集、2000 年、pp.95-100.
- 3) 高田至郎、上野淳一、尾崎竜三、鎌田泰子：2001 年芸予地震におけるガスおよび水道管路の被災分析、建設工学研究所論文報告集 第 43-B 号、2001 年、pp.123-139.
- 4) Ueno, J., Takada, S., Ozaki, R. and Kuwata, Y: Damage of Gas and Water Pipes in Slope City, Kure, due to the 2001 Geiyo Earthquake, Taiwan and *Proc. of Taiwan-Japan Workshop on Lifeline*, Kobe, Japan, 2002, pp.128-138.
- 5) 芸藩通志：巻 35、1825 年、pp.473-475.
- 6) 呉市役所所：呉市の歴史、ホームページより <http://www.city.kure.hiroshima.jp/kureintrod/kurehistory.html>
- 7) 国土地理院：数値地図 50m メッシュ日本 -、CD-ROM 版、2000 年.
- 8) 中国地方基礎地盤研究会：広島県地盤地図'97、1997 年、pp.1-311.
- 9) 呉市：家屋被害表、内部資料、2001 年.
- 10) 総務庁統計局：国勢調査報告
- 11) 広島県呉市：呉市被害危険区域図 縮尺:1/5,000、2000 年.

- 12) 米倉良介、池本敏和、宮島昌克、北浦勝：剛体バネモデルを用いた金沢城跡石垣の地震時安定性、平成 12 年度土木学会中部支部学術講演会、I-37、2001 年。
- 13) 渡辺健治、ムナヒュールマン、古関潤一、館山勝、小島謙一：擁壁の安定性に関する傾斜、振動台実験、第 25 回地震工学研究発表会、1999 年、pp.477-480。
- 14) 中村豊：常時微動測定に基づく表層地盤の地震動特性の推定、鉄道総研報告、Vol.2、No.4、1988 年、pp.18-27。
- 15) 中島康雅、木紀男、渡邊大輔、柳川克也：単周期の時間変動特性と空間変動特性に関する研究、第 10 回日本地震工学シンポジウム、1998 年、pp.841-844。
- 16) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編、1996 年、p.43。
- 17) 高田至郎、上田直樹：計測震度に対応したアンケート震度算出手法、第 10 回日本地震工学シンポジウム、1998、pp.631-636。
- 18) (独)防災科学技術研究所：強震ネットワーク、観測点 hrs019、<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>よりダウンロード。
- 19) 高田至郎：2001 年芸予地震被害報告書、神戸大学工学部地震工学研究室、2001 年。

( 受理 : 2002 年 12 月 5 日 )

( 掲載決定 : 2003 年 5 月 19 日 )

## **Relationship between Damage to Houses and Ground Motion Characteristics on Slope Morphology at Kure City during the 2001 Geiyo Japan Earthquake**

KUWATA Yasuko<sup>1)</sup>, TAKADA Shiro<sup>2)</sup> and UENO Junichi<sup>3)</sup>

1) Graduate School of Science and Technology, Kobe University

2) Member, Professor, Kobe University, Dr. Eng.

3) Research Institute of Lifeline Engineering, Dr. Eng.

### **ABSTRACT**

This paper addresses damage to houses related to ground motion characteristics on slope morphology in the case of Kure City, Hiroshima Prefecture during the 2001 Geiyo, Japan, Earthquake (M6.4). In the valley morphology of the city, earthquake damage concentrated on slope areas. Main causes of damage to houses were due to fragilities of stonemasonry wall and foundation of houses, but not due to earthquake resistance of house structures. They especially occurred at the ridge on steep slope in the west, though slope failures often have taken place at the east slope due to heavy rainfall. Furthermore, damage to houses was mostly observed in the middle-height area on slopes. FEM calculation and field survey show that the ground motion on slope morphology becomes larger in the highly damaged area.

*Key Words: Slope morphology, Damage to houses, Boundary wave, 2001 Geiyo, Japan, Earthquake*