

地震動の影響を受けた地域における 降雨と斜面崩壊発生との関係について

西村 賢*・海堀 正博**

* 広島大学大学院生物圏科学研究科

** 広島大学総合科学部自然環境科学講座

Relationship between slope failure occurrence and precipitation in the areas affected by a strong motion of earthquake

Masaru NISHIMURA* and Masahiro KAIBORI**

**Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University,
Higashi-Hiroshima 739-8521, Japan*

***Department of Natural Environmental Sciences, Faculty of Integrated Arts and Sciences,
Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739-8521, Japan*

Abstract:

異常がまとまって発生したものとしては、地震から約3ヶ月後の2001年6月19日に集中的な降雨によるものがあげられる。このときには、広島県土木建築部砂防室に報告されているものだけで、呉市を中心に瀬戸内沿岸地域において斜面崩壊14件が発生した（注：これら以外に、小規模なものや災害とならない程度の畑の石積みや石垣の崩れなどは他の日時にも発生している）。

広島県では1999年6月29日に土石流および斜面崩壊等による土砂災害が発生したが、2001年6月発生時付近の降雨量は、1999年6月発生時付近の降雨量に比べ非常に少ない。すなわち、1999年6月の時にはまだ斜面の崩壊が発生しなかった降雨量で、2001年6月には斜面の異常が発生している。これは2001年3月24日の芸予地震による影響があったためではないかと考えられる。地震後の降雨による斜面崩壊の検討については過去に報告された事例が少ない。1995年1月の兵庫県南部地震（M7.3）に関する報告では、地震後の降雨による崩壊地の拡大・新規発生に関する検討（平野ら,1997）や地震後の降雨による斜面崩壊を多平面安定解析によって崩壊発生の原因を考察する検討（沖村ら,1999b）はなされているが、具体的な雨量値と斜面崩壊発生との関係についての検討は行われていない。

そこで、本研究では1999年6月と2001年6月に発生した斜面崩壊を比較し、地震動の影響を受けた地域における地震前後の降雨と斜面崩壊発生との関係の変化を検討することにした。

2. 対象地域および降雨データ

本論文では、1999年6月と2001年6月の双方で被害が発生している広島地域、呉地域、竹原地域を検討の対象とした（図1）。降雨データとしては、1999年6月29日に関しては、（社）地盤工学会中国支部により集められたデータも参考に、気象庁アメダス観測点から32箇所、国土交通省所管の観測点から8箇所、広島県所管の観測点から119箇所、広島市消防局所管の観測点から14箇所、日本道路公団所管の観測点から28箇所を得られた値を用いた。1999年7月から2001年5月に関しては、気象庁アメダス観測点32箇所の値を用いた。2001年6月に関しては、広島県防災情報システムホームページにて得た広島県下235箇所の雨量観測データを用いた。時間雨量は短時間降雨の指標として用い、先行降雨の指標としては実効雨量を用いた。実効雨量は半減期72時間として1時間ごとに減衰させる方法で計算した。対象地域の地質は、広島県に特徴的な風化花崗岩土壌のマサ土である（三木ら,1983）。実効雨量の半減期を72時間としたのは、桑田（2002）による風化花崗岩・マサ土分布地域における土石流発生限界雨量の検討により、半減期72時間を用いた場合が、最も空振り率が低く適合率が高いことが示されているためである。

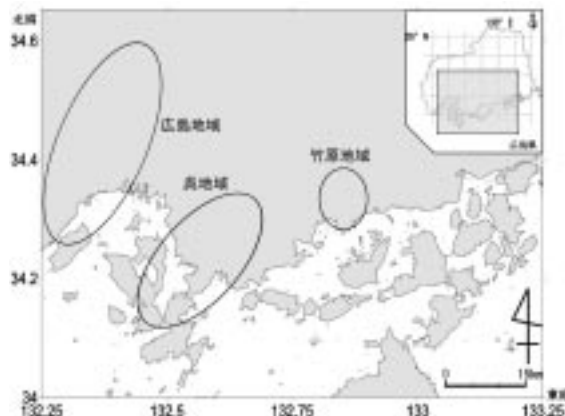


図1 本研究の検討対象地域

3. 1999年6月29日と2001年6月19日の土砂災害につながる降雨の状況

1999年6月は月雨量が広島県各地で400mmを超えたが、特にアメダス呉観測所では520mmもの雨量が観測された。5月末から6月中旬にかけては時間雨量10mm/hr前後の降雨もあったが、無降雨期間も長く、6月17日16時の対象地域における実効雨量値は、広島および呉地域では8mm、竹原地域では6mmであった。6月17日16時から19日13時にかけての45時間で、広島地域では57mm、呉地域では36mm、竹原地域では57mmの雨量があったものの、その後は23日11時まで無降雨の状態が続いた。23日11時の実効雨量値は広島地域では20mm、呉地域では14mm、竹原地域では22mmであった。その後24日6時から25日12時にかけての30時間で、広島地域では96mm、呉および竹原地域では115mmの雨量があり、1日あまりの無降雨状態を経て、26日14時から27日5時にかけての15時間で、広島地域では65mm、呉地域では84mm、竹原地域では80mmの雨量があった。27日5時の実効雨量値は広島地域では128mm、呉地域では155mm、竹原地域では152mmであった。実効雨量の値は100mmを超えているが、時間雨量は20mm/hrを超えておらず比較的弱い降雨が続いた。その後、40時間の無降雨状態を経て6月29日を迎えた。29日9時における実効雨量値は、広島地域では115mm、呉地域では102mm、竹原地域では99mmである。

図2に、1999年6月29日の広島県における降雨状況を13時から19時にかけての経時変化として示す。地図上にグラデーションで塗りつぶしている部分は175mm以上の実効雨量の分布範囲を25mm間隔で、黒の曲線は10mm/hr以上の時間雨量の等値線を10mm間隔で表している。この図より以下のことを読みとれる。6月29日の降雨の範囲はN-SからNNE-SSW方向に分布している。雨量の値は時間雨量30mm/hrを超える範囲が多数分布し、実効雨量も200mmを超えている。時間雨量は西から東へ降雨の分布範囲が移るにつれ弱まっている。広島地域において被害が発生した14時から16時にかけては、実効雨量値が150～250mmに達していて、時間雨量もほぼ全域で30mm/hrを超えており、多い所では60mm/hr以上になっている。呉地域において被害が発生した15時から18時にかけては、実効雨量値が175～275mmに達していて、時間雨量も20～60mm/hr以上を記録している。竹原地域において被害が発生した17時から18時にかけては、図には示していないが実効雨量値が100～150mm、時間雨量が20～40mm/hr以上である。以上のことを表1にまとめた。

一方、2001年6月の月雨量も、アメダス広島観測所では1999年6月と同じ程度の400mmの雨が降ったが、呉観測所では300mm、竹原観測所では360mmの月間降水量であった。榛鼓 晉 恩観 ° 年 6 栗 愀 倏 聯

舵 一 楡 酷 5 箇 潔 以上でちた扶颯伴翠 箔酋 彳 熾 觸 訥 聯 肉 芝 撞 晉 孀 kcal 予 の 雨

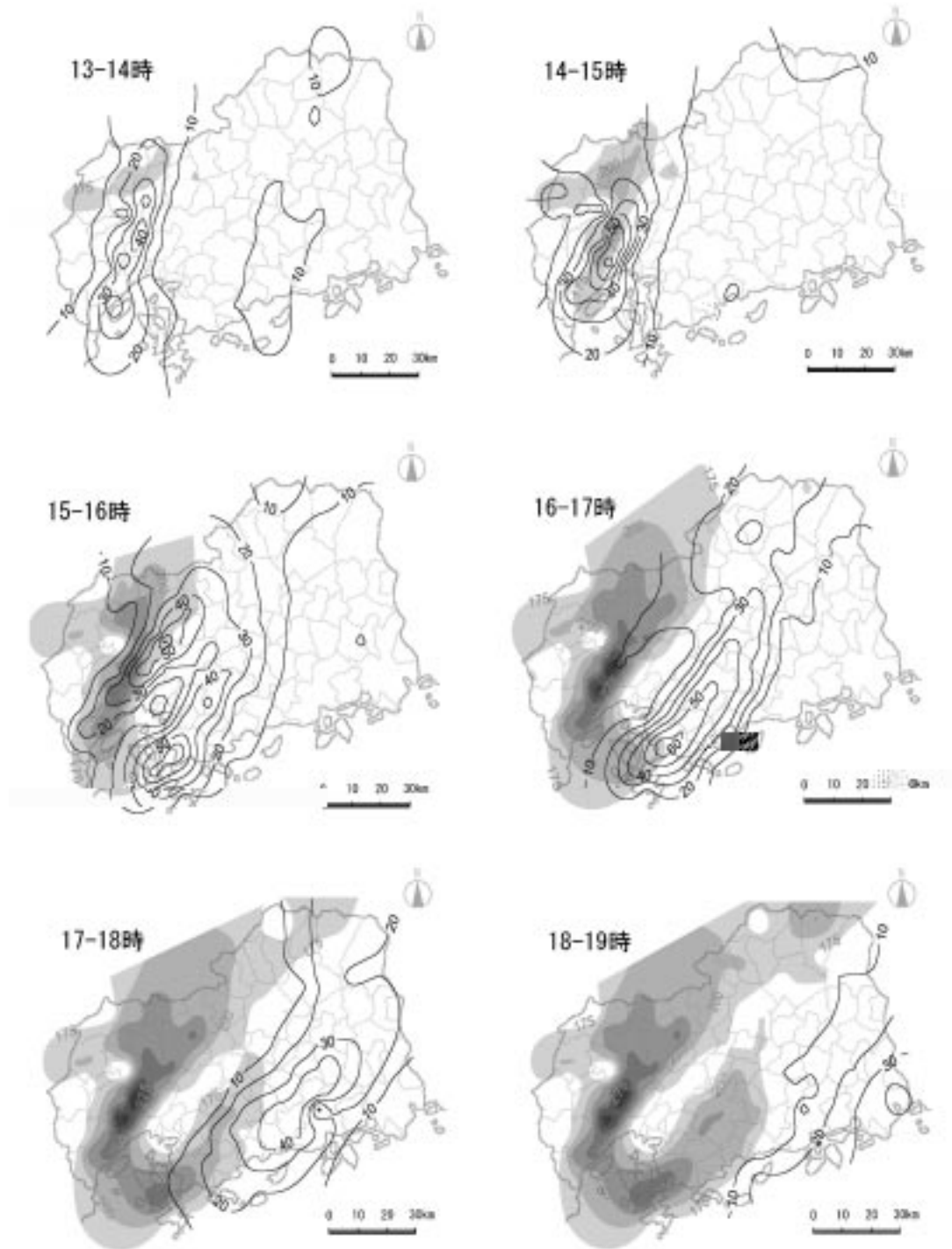


図2 1999年6月29日の広島県における時間雨量および実効雨量の経時変化
(実効雨量は175mm以上のみをグラデーションで表す)

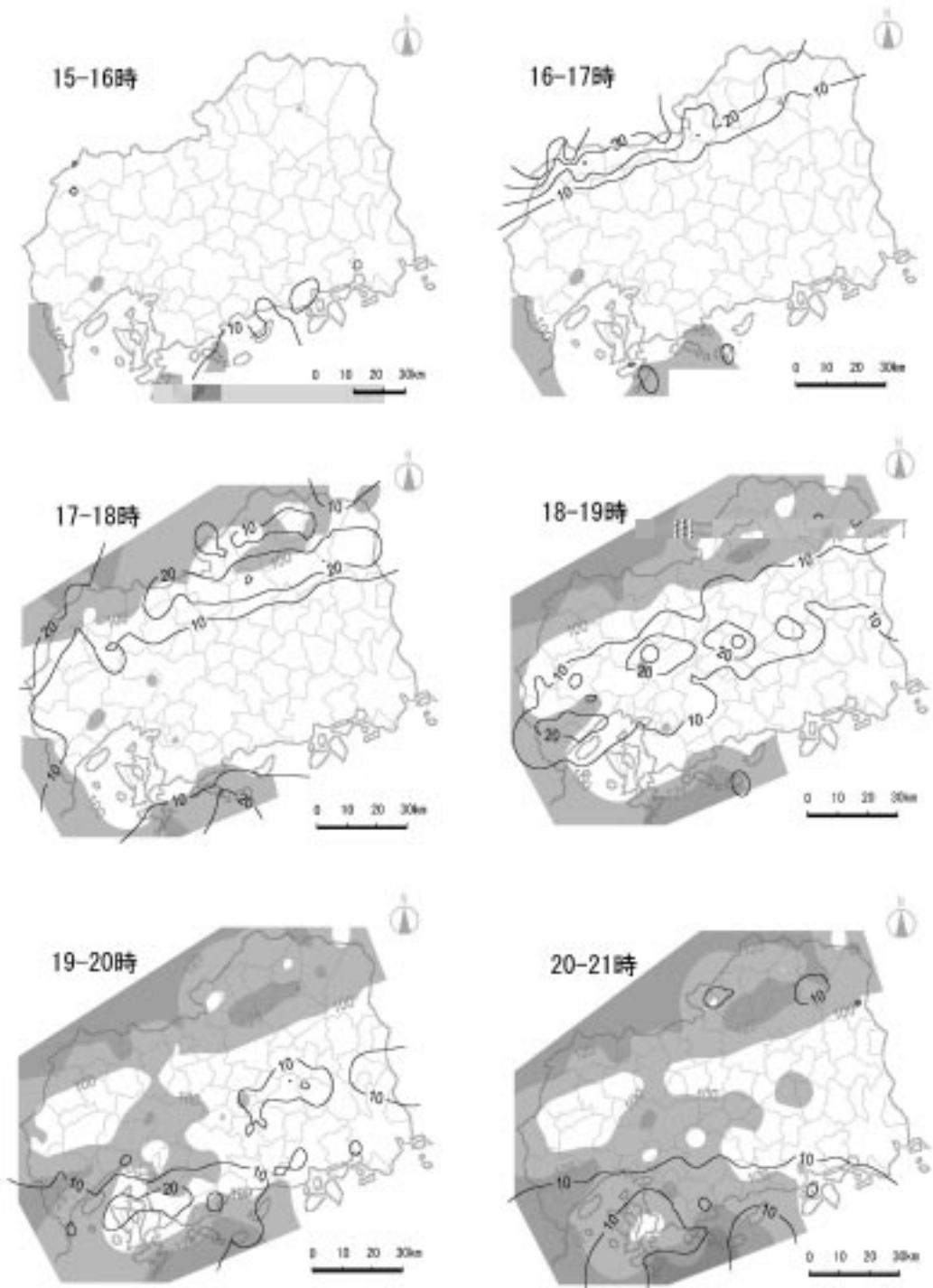


図3 2001年6月19日の広島県における時間雨量および実効雨量の経時変化
(実効雨量は100mm以上のみをグラデーションで表す)

そこで、呉および竹原地域において発生した斜面崩壊が、広島地域において発生した斜面崩壊とほぼ同じ頃に起きたものと考え、21時頃の時間雨量および実効雨量を斜面崩壊発生時の降雨量として用いた。対象地域における2001年6月の斜面崩壊の時間雨量、実効雨量、被害件数を表2に示す。

表1 1999年6月29日対象地域の雨量データおよび被害件数

被害地域	時間雨量 (mm/hr)	実効雨量 (mm)	被害件数 (件以上)
広島	20-60以上	150-250	500
呉	20-60以上	175-275	250
竹原	20-40以上	100-150	5

表2 2001年6月19日対象地域の雨量データおよび被害件数

被害地域	時間雨量 (mm/hr)	実効雨量 (mm)	被害件数 (件以上)
広島	約10	約150	1
呉	10-20*	100-125*	10
竹原	10-20*	75-125*	1

* 被害発生時刻不明のため推定値

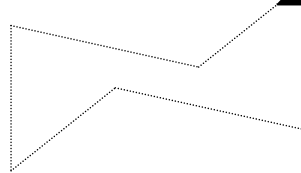
表1および表2より、1999年6月29日と2001年6月19日を比較すると、時間雨量、実効雨量、被害件数ともに1999年6月29日の方が圧倒的に多い。時間雨量に関しては10～40mm/hr以上、実効雨量に関しては約25～150mmの差がある。この差が被害の発生件数に影響を与えたことも考えられるが、対象地域における1999年6月に発生した個々の斜面崩壊に結びついた時間雨量および実効雨量を調べたところ、2001年6月斜面崩壊発生時における時間雨量および実効雨量双方とも1999年6月より大きな値はなく、2001年6月の崩壊発生に結びついた降雨量では1999年6月には斜面崩壊が発生していない。

このことから、1999年6月29日から2001年6月19日までの間に、地盤の強度低下につながる要因があったことがうかがえる。例えば、最も大きな要因としては2001年3月24日に発生した芸予地震(M6.7)による地震動の影響が考えられる。

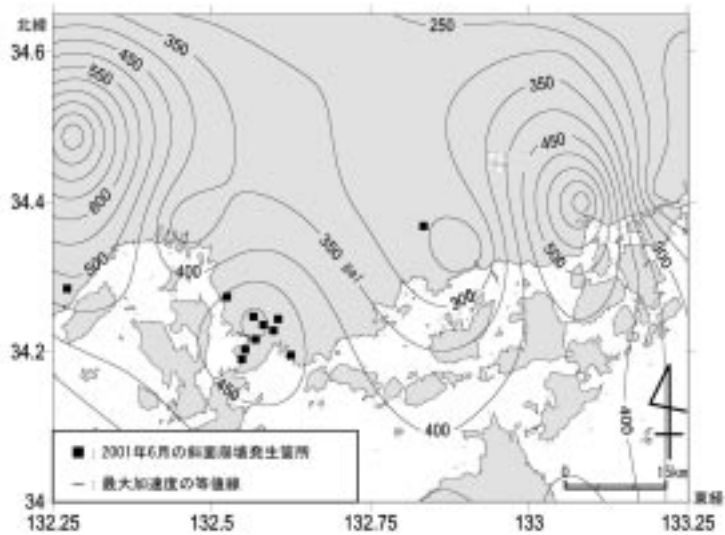
4. 平成13年芸予地震による地震動の影響

2001年3月24日午後3時24分頃、瀬戸内海芸予灘を震源とする地震が発生した。地震の規模を表すマグニチュードは6.7で、震源の深さは約51kmである。広島県ならびに愛媛県を中心に斜面崩壊、落石等の斜面異常が生じ、屋根瓦の破損、石垣崩れといった住宅被害も多数発生した(写真1～3)。また、賀茂郡河内町で被害には至らなかったものの落石防護ネットで巨礫が止まった斜面や、擁壁やモルタル吹きつけにクラックが生じているのを確認した。

本研究では、平成13年芸予地震による地震動の影響の解析方法として、独立行政法人防災科学技術研究所のK-net(強震度地震観測網)およびKIK-net(基盤強震観測網)のデータを用いた。およ



落合（1997）は、無限長モデル斜面において地震時の斜面変動の発生機構を検討し、地震による斜面変動の解析を行う際には、入力する地震力の成分として水平方向（NS成分とEW成分の合力）



の強い揺れが継続したことがわかる。

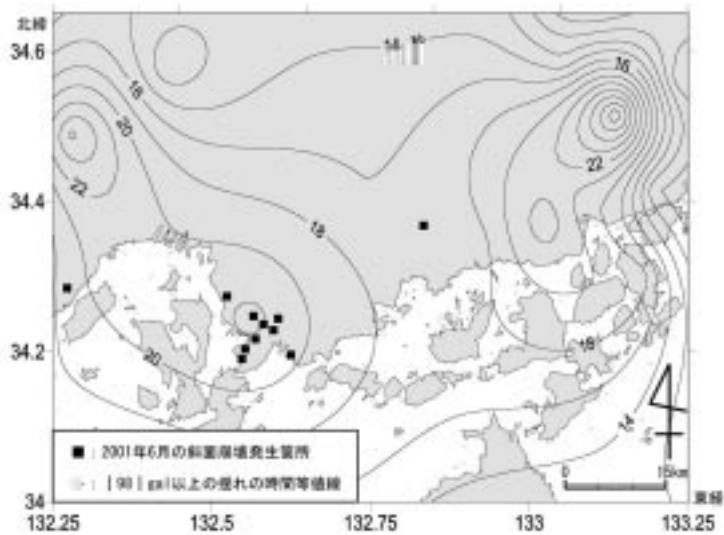


図6 98 gal以上の揺れが続いた時間と2001.6.19斜面崩壊発生箇所

対象地域における平成13年芸予地震およびその後の降雨（2001年6月）により発生した斜面崩壊の移動方向と揺れの方向との関係について検討を行った。38箇所の斜面崩壊の移動方向と、崩壊発生場所に最も近い強震動観測点における水平動の軌跡とを合わせたものを図7に示す。縦軸および横軸の単位はG (gravity)、白抜き矢印は崩壊移動方向を示す。また、2本の実線で囲まれた範囲は図より読みとれる卓越する揺れの方向である。

近藤ら（2002）は、地震による斜面崩壊は地震慣性力によって発生するため、崩壊土塊の移動方向に最も影響を与える地震加速度は、移動方向と反対側方向の地震加速度であるとしているが、筆者らは、移動方向と反対側方向の地震加速度に加え、移動方向と同じ方向の地震加速度も土砂移動方向に影響を与えたと考えた。

この図より、平成13年芸予地震において各観測点で揺れが卓越した方向は、湯来観測所ではENE-WSWからEW方向、呉観測所ではNE-SWからENE-WSW方向、大野観測所ではNW-SEからWNW-ESE方向、三原観測所ではNNW-SSEからNS方向であることが読みとれる。また、地震時および地震後の降雨による斜面崩壊が、卓越する揺れと同じ方向もしくは反対側方向に移動したものは36.8%であり、揺れが卓越すると予想される方向に移動しているものもあるが、異なる方向に移動したもののほうが多くあることがわかる。その原因は、多くの斜面崩壊が発生した場所が、強震動観測点の設置場所と離れていたため、もしくは局所的な地形および地質構造の影響を受けたためであると考えられる。

しかし、卓越する揺れではなくても、すべての方向について約0.25G（約250gal）の地震加速度を記録している。すなわち、250gal以上の地震加速度に相当する地震動の影響を受けた場所では、揺れが卓越する方向ではなくても崩落・崩壊しやすい物質の向いている方向に、地震時および地震後の降雨によって土砂移動現象が発生すると考えられる。

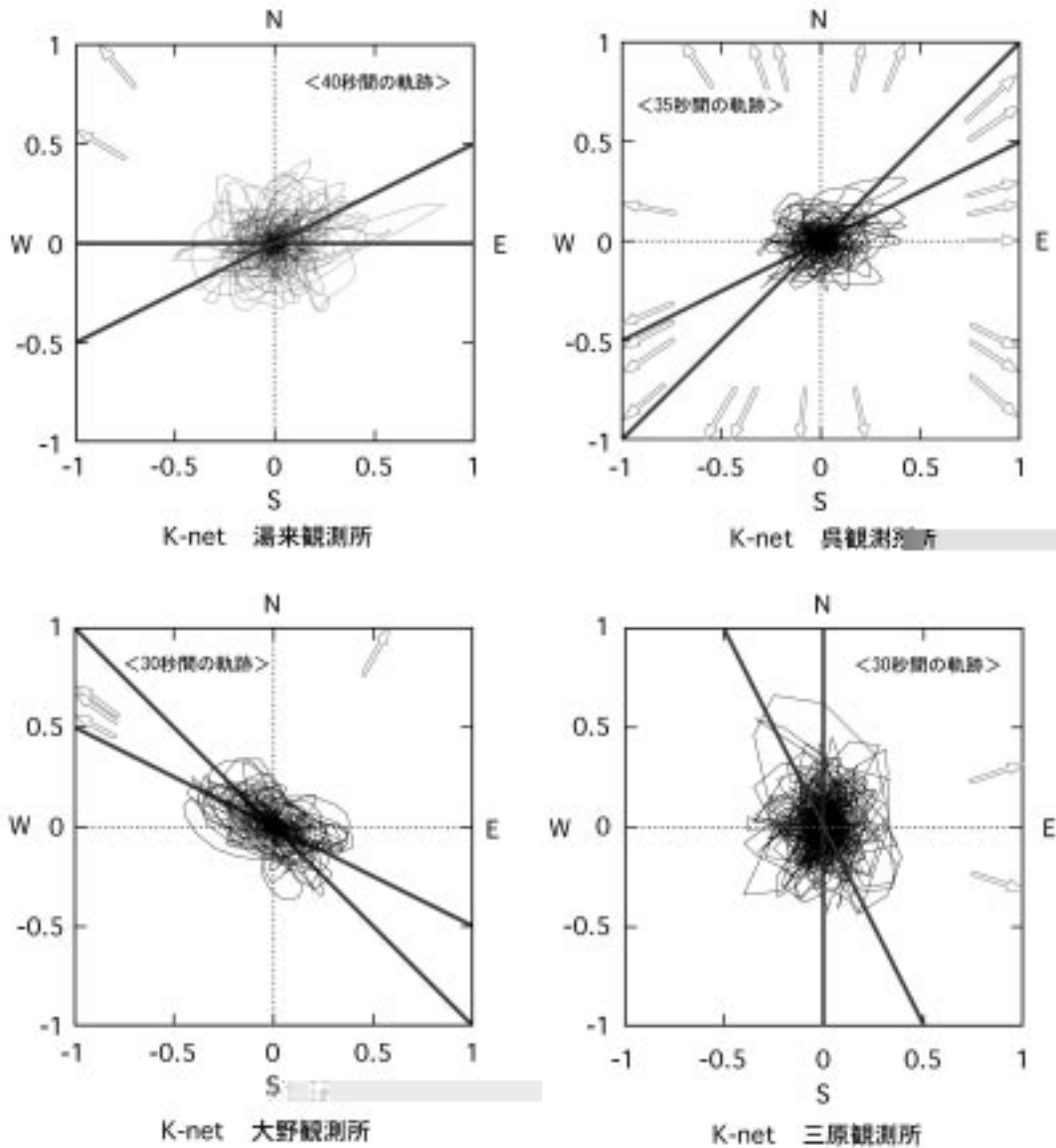


図7 水平動の軌跡と崩壊移動方向

φNàS'j#àwo•x(HSBWJUz z(HVwü'xHu ^M²z
 Šwiçp"†•hc"xNýb"3•wM²) Öb£

5 . 芸予地震前後に被害の発生につながらなかった雨量の検討

1999年7月1日から2001年6月18日までに、対象地域とした広島地域、呉地域、竹原地域における、斜面崩壊発生時と同様な降雨状況の有無について検討した。平成13年芸予地震前に関しては1999年6月斜面崩壊発生時の雨量データと、芸予地震後に関しては2001年6月斜面崩壊発生時の雨量データと比較した。

芸予地震前に関しては、1999年10月から2001年3月までの月雨量を対象地域についてみた

ころ、1999年6月の月雨量に比べ、すべての月において半分以下の雨量しか降っていない。しかし、月雨量が少なくても集中して降雨があったことも考えられるため、時間雨量30mm/hrを超える短時間強雨の発生日時について調べた。対象地域においては、広島地域で2000年10月9日8時に32mm/hrを記録している他は30mm/hrを超えたものはなかった。32mm/hrを記録した広島地域に関してもその前後で無降雨状態が続いていた。以上のことより1999年10月から2001年3月までの期間では、1999年6月29日に匹敵する降雨状況がなかったと言える。

1999年7月から9月に関しては、月雨量が1999年10月から2001年3月に比べて多かったため、実効雨量値を求めて検討を行った。対象地域において1999年6月29日の状態に最も近い時間雨量および実効雨量の値は、広島地域で9月24日9時から10時にかけて時間雨量19mm/hr、実効雨量89mm、呉地域で8月18日20時から21時にかけて時間雨量19mm/hr、実効雨量79mm、竹原地域で7月28日1時から2時にかけて時間雨量16mm/hr、実効雨量56mmであった。表1より、1999年6月の斜面崩壊発生時における時間雨量および実効雨量の最低値は、それぞれ20mm/hrおよび100mmであり、1999年7月から9月までの降雨ではその値に達していないことがわかる。

芸予地震後に関しては、対象地域における2000年12月の月雨量がアメダス広島観測所では15mm、呉観測所では28mm、竹原観測所では35mmと、降雨が非常に少ない状態であったため、2001年1月からの時間雨量を用いて実効雨量値を求めた。

2001年6月19日に斜面の崩壊が発生した時点での対象地域における実効雨量値は、広島地域で約150mm、呉地域で100～125mm、竹原地域で75～125mmであることは前述した。

一方、芸予地震後の2001年3月25日から6月18日までの実効雨量値では、2001年6月19日斜面崩壊発生時に匹敵する値は対象地域において認められず、最も近い値として広島地域で5月24日0時の65mm、呉地域で5月24日0時の68mm、竹原地域で6月18日22時の68mmであった。しかし、65～68mmの先行降雨があるにしてもその後の1時間雨量が10mm/hrを超えていないため、被害発生に結びつかなかったと考えられる。

また、2001年3月25日から6月18日までの時間雨量に関しても30mm/hrを超す短時間強雨は、アメダス倉橋観測所で6月6日に31.5mm/hrが観測されたのみで対象地域においては皆無であった。発生前日の2001年6月18日には対象地域を含め広島県各地で20mm/hrを超える時間雨量を観測しているが、6月7日以降無降雨状態が続いており実効雨量値も20mmを下回る値であったため、被害にはならなかったものと思われる。

なお、2001年5月2日正午すぎに呉市で民家の庭の石垣が一部崩れ落ちた。アメダス呉観測所による5月2日正午の実効雨量は51mm、正午から13時にかけての時間雨量は0mm/hrであった。このように、小規模な斜面の異常や石垣の異常などはこのほかにもあるものと思われる。

6. まとめ

平成13年芸予地震によって発生した崩壊や崩落などの斜面の異常は、地震加速度が250gal以上のところに分布していることがわかった。また、芸予地震の発生時点での地中の水分状態は、先行降雨の解析から比較的乾いた状態にあり、そのため同程度の地震と比べたときに、崩壊や崩落などの斜面の異常が少ないことが示唆された。そのため、地震後には比較的容易に小さな降雨によっても斜面の異常が生じる可能性が考えられ、広島、呉、竹原の3地域を検討の対象として降雨と斜面崩壊との関係を調べてみた。その結果、以下のことが明らかになった。

強い地震の発生前にあたる 1999 年 6 月 29 日斜面崩壊発生時の時間雨量は、広島、呉、竹原地域において、それぞれ 20 ~ 60mm/hr 以上、20 ~ 60mm/hr 以上、20 ~ 40mm/hr 以上、また、実効雨量（半減期 72 時間）はそれぞれ 150 ~ 250mm、175 ~ 275mm、100 ~ 150mm であった。これに対し、強い地震の発生後にあたる 2001 年 6 月 19 日斜面崩壊発生時の時間雨量は、それぞれ約 10mm/hr、10 ~ 20mm/hr、10 ~ 20mm/hr、また、実効雨量はそれぞれ約 150mm、100 ~ 125mm、75 ~ 125mm であった。

2001 年 3 月 24 日に起きた平成 13 年芸予地震において、対象地域で観測された最大加速度は広島地域 450 ~ 500gal、呉地域 450 ~ 550gal、竹原地域 250 ~ 300gal の強い揺れであった。また、| 98 | gal 以上の揺れが続いた時間はそれぞれ 18 ~ 20 秒、20 ~ 23 秒、16 ~ 18 秒であった。

平成 13 年芸予地震およびその後の降雨による土砂移動現象のうち、卓越する揺れと同じ方向もしくは反対側方向に移動したものは約 4 割であった。また、卓越する揺れではなくても、すべての方向において 250gal 以上の地震加速度に相当する地震動の影響を受けていた。

1999 年 7 月 1 日から 2001 年 6 月 18 日までの期間において、平成 13 年芸予地震発生前には 1999 年 6 月 29 日斜面崩壊発生時の雨量に匹敵するような降雨はなかった。また、芸予地震発生後でも、2001 年 6 月 19 日の斜面崩壊発生時の雨量に匹敵するような降雨はなかった。

以上のことより、250gal 以上の地震加速度に相当する地震動の影響を受けた地域では、地震によって受けた揺れの方向に関係なく、地震前の斜面崩壊発生に必要な雨量の 6 ~ 8 割程度の降雨量で、斜面崩壊や石垣崩れなどの現象につながる可能性があるといえる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、独立行政法人防災科学技術研究所からは地震動の記録を使わせていただいた。また、広島県土木建築部砂防室、呉市土木建築部土木課、(社)地盤工学会中国支部、広島市消防局、広島県呉地域事務所、東広島地域事務所からは降雨観測データや地震動による崩壊などの情報を教えていただいた。ここに記して厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 林拙郎・川邊洋・沼本晋也(2001):台湾921集集大地震による山地災害の特徴、平成13年度砂防学会研究発表会概要集、pp.284~285.
- 平野昌繁・石井孝之(1997):1995年兵庫県南部地震による六甲山地の斜面崩壊の特性と経時的変化、砂防学会誌、Vol.50, No.1, pp.23~32.
- 地頭園隆、下川悦郎、松本舞恵、寺本行芳(1998):1997年鹿児島県北西部地震による斜面崩壊の分布と地形的特性、砂防学会誌、Vol.51, No.1, pp.38~45.
- 近藤観慈、林拙郎(2002):斜面の安定性解析、1999年台湾の地震に伴って発生した山地災害の調査、平成12年度~平成13年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(1))海外学術調査研究成果報告書、pp.260~262.
- 桑田志保(2002):土砂移動現象発生予測のための素因・誘因分析の新しい試み、2002年広島大学大学院修士論文、pp.34~42.
- 三木幸蔵・古谷正和(1983):土木技術者のための岩石・岩盤図鑑、鹿島出版会、pp.144~147.

- 水山高久・海堀正博・松村和樹・土屋智・平松晋也・恩田裕一・寺田秀樹(2001):平成13年3月24日の芸予地震による土砂災害、砂防学会誌、Vol. 54, No. 1, pp. 98 ~ 99.
- 森伸一郎(2002):地震動と被害、愛媛大学芸予地震学術調査団最終報告書、pp. 15 ~ 34.
- 中川康一・赤松純平・楡井久(1996):阪神・淡路大震災 - 都市直下型地震と地質環境特性 -、日本地質学会環境地質研究委員会編、東海大学出版会、pp. 58.
- 落合博貴(1997):地震による斜面変動の特徴とメカニズム、地震による斜面災害 - 地すべり学会北海道支部編 -、pp. 3 ~ 12.
- 沖村孝・鳥居宣之・永井久徳(1999a):地震後の降雨による山腹崩壊、地震に対する安定性と山地災害に関する総合的研究、平成8年度~10年度文部省科学研究費補助金(基盤研究(A)(1))研究成果報告書、pp. 63 ~ 76.
- 沖村孝・鳥居宣之・永井久徳・渡辺英志(1999b):地震後の降雨による山腹斜面崩壊に関する研究 - 地震動が表土層厚に与えた影響 -、神戸大学都市安全研究センター研究報告3、pp. 1 ~ 15.
- 佐々恭二・北川隆司・福岡浩・落合博貴・井口隆・藤田崇・小宮山賢太郎・王功輝(2001):平成13年3月24日芸予地震による斜面災害緊急調査結果、地すべり、Vol. 38, No. 1, pp. 78 ~ 84.
- 山本哲朗・寺山崇・河内義文(2002):2000年鳥取西部地震(M7.3)および2001年芸予地震(M6.7)の際に発生した岩盤崩落・落石の調査とその特徴、地すべり、Vol. 39, No. 1, pp. 87 ~ 94.

* 参照したホームページ一覧

- ・ 広島県防災情報システムホームページ
<http://www.bousai.pref.hiroshima.jp/hdis/index.html>
- ・ 独立行政法人防災科学技術研究所ホームページ
<http://www.bosai.go.jp>