

広島県内の既往災害との比較の観点からみた 2014 年広島土砂災害の特徴

A Feature of 2014 Hiroshima Sediment Disasters from the Viewpoint of Comparison
with Past Disasters in Hiroshima Prefecture

森脇武夫	Takeo MORIWAKI	(呉工業高等専門学校)
土田 孝	Takashi TSUCHIDA	(広島大学大学院工学研究院)
中井真司	Shinji NAKAI	(復建調査設計(株))
加納誠二	Seiji KANO	(呉工業高等専門学校)

2014年8月20日に広島県広島市安佐北区と安佐南区では猛烈な雨によって同時多発的に土石流が発生し、死者74名にのぼる大規模な土砂災害が発生した。これ以外にも広島県では豪雨による土砂災害が繰り返し発生している。本論文では、この2014年8月広島土砂災害と近年広島県内で甚大な被害を出した1999年6.29広島災害および2010年庄原災害について、被害の発生状況、被害をもたらした降雨特性、被害地の地質および地盤工学的特性を比較、検討した。

キーワード：1999年6.29広島災害、2010年庄原災害、2014年広島災害（IGC：B-11、E-6）

1. はじめに

2014年8月19日の夜から20日の明け方にかけて、広島県広島市安佐北区の南側と安佐南区の北側の地域において、この地域で1時間降水量、3時間降水量、24時間降水量が観測史上1位の値となる猛烈な雨が降り、同時多発的に大規模な土石流が発生した。この土石流は山裾に広がる住宅地を直撃し、死者74名に上る甚大な被害をもたらした（以下は2014年広島災害と記す）。この死者74名は、過去30年間における土砂災害の犠牲者数としては最多である。

これ以外にも広島県内では豪雨による大規模な土砂災害が繰り返し発生している。表-1は広島県内で戦後に発生した豪雨による主な土砂災害の一覧である。1945年9月には枕崎台風に伴う豪雨によって呉市・江田島町（現在の江田島市）・大野町・宮島町（現在の廿日市市大野町・宮島町）を中心に死者・行方不明者2,012名に上る甚大な被害が出た。その後、1951年10月にルース台風に伴う豪雨によって大竹市・佐伯郡（現在の廿日市市）を中心に死者・行方不明者166名、1967年7月に梅雨前線豪雨によって呉市を中心に死者・行方不明者159名と、犠牲者が100名以上の大規模土砂災害が発生している。最近では、1999年6月29日に梅雨前線豪雨によって広島市西部・呉市・東広島市を中心に死者・行方不明者32名の犠牲者を出す土砂災害（以下は6.29広島災害と記す）が発生し、2010年7月に局所的な集中豪雨によって庄原市を中心に死者4名の犠牲者を出す土砂災害が発生している（以下は2010年庄原災害と記す）。

これらの災害の規模と降雨条件の関係をしてみると、降

表-1 広島県内での戦後の豪雨による主な土砂災害

災害	被害	降雨条件
1945年 9月災害 (枕崎台風)	呉市、江田島町、大野町、 宮島町を中心に、死者・行 方不明者2,012名、損壊家 屋6,832戸	連続雨量218.7mm(広島)、 250.7mm(呉)、時間最大雨量 57.1mm(広島)4時間雨量 113.3mm(呉)
1951年 10月災害 (ルース台風)	大竹市、佐伯郡を中心に、 死者・行方不明者166名、 損壊家屋2,333戸	連続雨量189.8mm(広島)、 283.4mm(加計) 時間最大雨量26.2mm(広島)
1967年 7月災害 (豪雨)	呉市を中心に、死者・行方 不明者159名、損壊家屋 1,119戸	連続雨量317mm(呉) 時間最大雨量74.7mm(呉)
1972年 7月災害 (豪雨)	三次市、庄原市、加計町を 中心に、死者・行方不明者 名39名、損壊家屋3,008 戸	連続雨量622mm(三次) 時間最大雨量40mm(呉市)
1985年 6月災害 (豪雨)	福山市、呉市、広島市を中 心に、死者・行方不明者2 名、損壊家屋	連続雨量471mm(呉) 時間最大雨量35mm(呉)
1988年 7月災害 (豪雨)	加計町を中心に、死者・行 方不明者名14名、損壊家 屋73戸	連続雨量264mm(加計) 時間最大雨量57mm(加計)
1993年 7月災害 (台風5号)	県北西部(戸河内町、筒賀 村)を中心に、死者・行方 不明者名3名、損壊家屋 819戸	連続雨量228mm(加計) 時間最大雨量33mm(加計)
1999年 6.29災害 (豪雨)	広島市、呉市を中心に、死 者・行方不明者名32名、 損壊家屋582戸	連続雨量232.5mm(広島)、 184mm(呉)、時間最大雨量81mm (広島)、73mm(呉)
2010年 庄原災害 (豪雨)	庄原市、東広島市、世羅町 で死者4名、負傷者5名、 損壊家屋91戸	連続雨量174mm(大戸)、 3時間雨量173mm(大戸)、 時間最大雨量72mm(大戸)
2014年 広島災害 (豪雨)	広島市で死者74名、負傷 者69名、損壊家屋585戸 (2014年12月26日現在)	連続雨量284mm(三入東) 3時間雨量235mm(三入東) 時間最大雨量121mm(三入東)

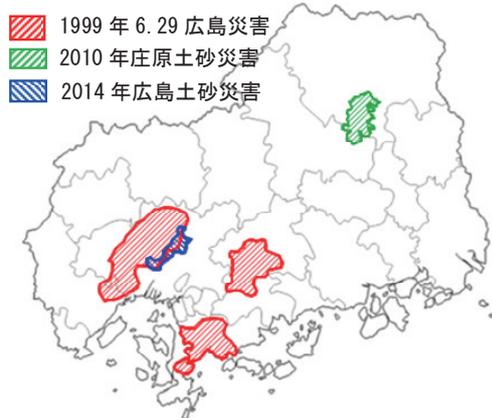


図-1 土砂災害の発生場所



(a) 広島市安佐北区 亀山九丁目
(b) 広島市安佐南区 伴東一丁目

写真-1 1999年6.29広島災害における土石流発生状況 (広島県提供)

雨条件は時間最大雨量・連続雨量ともに年々増加傾向にあるが被害規模は逆に減少傾向にあり、防災施設や防災システムの整備が進んでいると評価できる状況であった。しかし、今回の2014年広島災害では非常に多くの犠牲者が出て、この傾向とは異なったものとなった。そこで、何故このような大規模災害となったかを明らかにするために、最近の広島県内の既往災害の代表的なものである1999年6.26広島災害および2010年庄原災害と今回の2014年広島災害について被害の発生状況、被害をもたらした降雨特性、被害地の地質および地盤工学的特性を比較し、今回の災害の特徴を明らかにするとともに、被害が大きくなった要因について考察する。

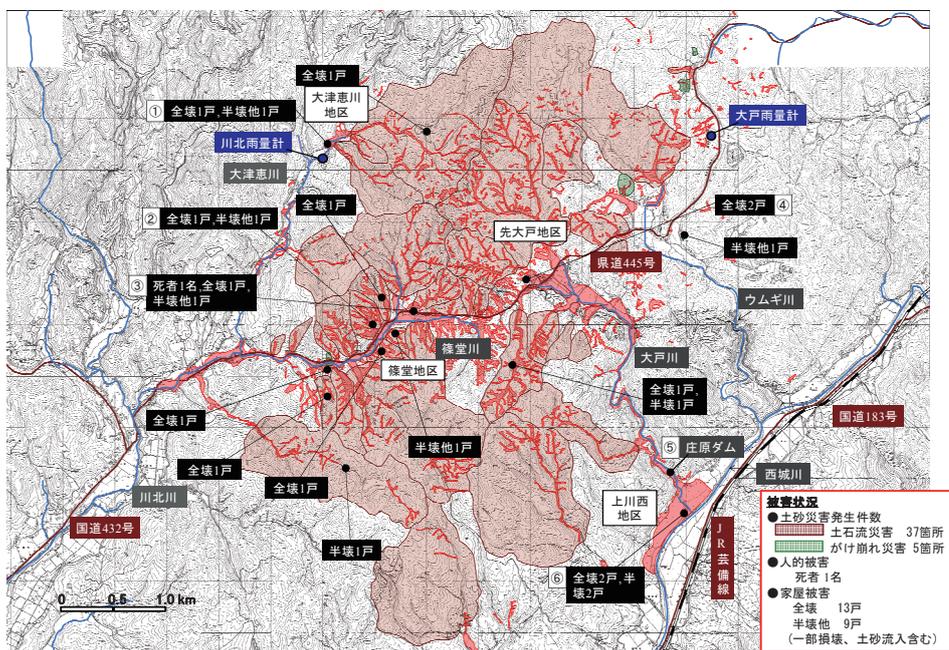


図-2 2010年庄原災害における被害概要 (広島県提供)

2. 各災害の概要

図-1は、1999年6.29広島災害、2014年庄原災害および2014年広島災害において土石流とがけ崩れが発生した地域を示したものである。この図から、1999年6.29広島災害における被災地は広島市西部・呉市・東広島市と広島県西部の広い地域で広がっているが、2014年庄原災害と2014年広島災害は非常に狭い地域で発生していることがわかる。

2.1 1999年6.29広島災害の概要¹⁾

1999年6月29日未明から降り始めた梅雨前線の豪雨によって広島県西部ではまさ土斜面を中心に、多くのがけ崩

れ(139か所)と土石流を含む土石流(186か所)等が発生し(写真-1)、死者31名、行方不明者1名、合計32名の人的被害が出た。その内訳は、4箇所のがけ崩れで死者11名、5渓流の土石流等で死者13名、氾濫等で死者7名、行方不明1名であった。また、家屋被害は、全壊154棟、半壊101棟、一部損壊327棟、床上浸水1,363棟、床下浸水2,840棟、合計4,785棟であり、広島県下の被害総額は約670億円余に上った。被害の発生箇所は廿日市市、広島市佐伯区、安佐南区、安佐北区を中心とする広島市西部地域と呉市周辺に集中していた。特に、都市近郊の新興住宅地での被害が多く(写真-1(b))、都市型の土砂災害と位置付けられ、「土砂災害防止法」が制定される契機になった。

2.2 2010年庄原災害の概要²⁾

2010年7月11日から16日に掛けて広島県呉市、東広島市、世羅町、庄原市において梅雨前線の豪雨が断続的に降り、死者4名、負傷者5名の人的被害が発生した。家屋被

害は、全壊 7 棟、半壊 20 棟、一部損壊 64 棟、床上浸水 250 棟、床下浸水 1,361 棟、合計 1,611 棟であり、広島県内の被害総額は約 57 億円余に上った。この内、庄原市では 7 月 16 日の午後 3 時から午後 6 時にかけて時間最大雨量 72mm、3 時間累積雨量 173mm（広島県の大戸雨量計）の集中豪雨が発生した。この集中豪雨により、約 4km×4km の狭い範囲において 200 箇所以上の同時多発的な斜面崩壊と崩壊土砂による土石流が発生し、それらが木々を巻き込みながら溪流から流出して山間地の集落を押しつぶし、道路や農地にあふれ出すという被害が生じた。図-2 は被害の概要である。図のように県道 445 号中迫川北線に平行して西側に大津恵川、篠堂川、東側に大戸川が流れているが、445 号線の両側の山地で山腹崩壊と崩壊土砂の土石流化が集中的に発生し、洪水被害と複合して沿道の住宅、道路、農地に壊滅的な被害を与えた。土石流災害の発生箇所は 37 箇所、がけ崩れ災害の発生箇所は 5 箇所とされているが、特に篠堂川、大戸川の両側ではほとんどの溪流において土石流が発生している。

2.3 2014 年広島災害の概要³⁾

2014 年 8 月 19 日の夕方から 20 日の明け方にかけて降った猛烈な降雨によって、図-3 に示すように広島県広島市安佐北区の南側と安佐南区の北側の地域において午前 3 時半前後に土石流（107 箇所）とがけ崩れ（59 箇所）が比較的狭い地域に集中して起こり、発生した土石流が勢いを持って溪流出口直下にあった住宅密集地に流入した（写真-2）。この災害における人的被害は死者 74 名、負傷者 69 名、家屋被害は全壊 179 棟、半壊 217 棟、一部損壊 189 棟、床上浸水 1,084 棟、床下浸水 3,080 棟であった（広島市災害対策本部 2014 年 12 月 26 日現在）。また、土砂災害が発生した時間帯が、6.29 広島災害のときは午後 2 時～5 時、2010 年庄原災害のときは午後 3 時～6 時で昼間の時間帯であったが、今回は深夜の午前 2～4 時で多くの人が住宅で就寝中であり、なおかつ避難が困難な時間帯であったことが人的被害を大きくした要因のひとつと考えられる。

3. 降雨特性の比較

3.1 1999 年 6.29 広島災害の降雨特性

6.29 広島災害で人的被害の大きかった広島市と呉市の降雨状況を図-4 に示す。広島市佐伯区の日本道路公団八幡川橋観測所では、6 月 23 日午前 9 時から 29 日午前 0 時までの累積雨量 157.5mm、6 月 29 日の日雨量 231.5mm、総雨量 389mm で、6 月 29 日午後 2 時から 3 時までに 81mm の雨が観測された。この地域では 6 月 29 日午後 1 時から 2 時に時間雨量 40mm を越える雨域が宮島を含む直径約 4～5km の円形の地域と広島市の西端をほぼ北にのびる地域に現れ、その後、午後 2 時から 3 時に広島市佐伯区、安佐南区、安佐北区の西側を覆う東西約 10km、南北約 30km の北北東にのびる長円形の雨域に広がり、その中に時間雨量



図-3 2014 年広島災害における土石流発生地点（国土地理院の写真判読図⁴⁾に加筆）



写真-2 安佐南区緑井・八木地区の被災状況（8 月 20 日撮影の国土地理院の斜め写真⁵⁾に加筆）

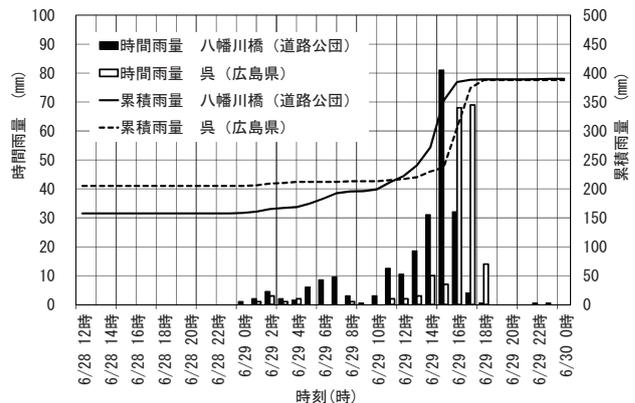


図-4 6.29 広島災害における降雨状態¹⁾

50mm を越える雨域が現れた。

死者 8 名の被害を出した呉市の広島県呉観測所では、6 月 23 日から 29 日午前 0 時までの累積雨量 205mm、6 月 29 日の日雨量 183mm、総雨量 388mm で、6 月 29 日午後 3 時から 4 時までに 68mm、午後 4 時から 5 時までに 69mm の

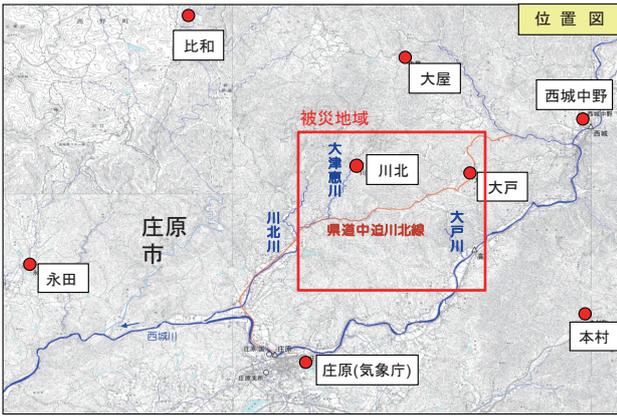


図-5 2010年庄原災害の被災地周辺の雨量計の位置

表-2 2010年庄原災害における観測雨量

雨量計	7月16日 までの7月の 累積雨量(mm)	7月16日 15時~18時の 3時間雨量(mm)	7月16日 15時~18時の 最大時間雨量(mm)
永田	265	3	3
比和	299	8	7
庄原	262	3	3
川北	265	125	54
大屋	300	72	30
大戸	267	173	72
西城中野	257	51	33
本村	262	3	3

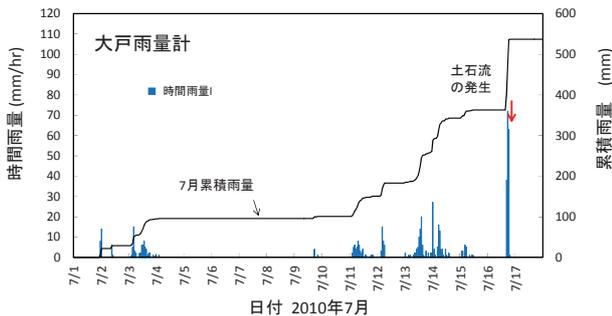
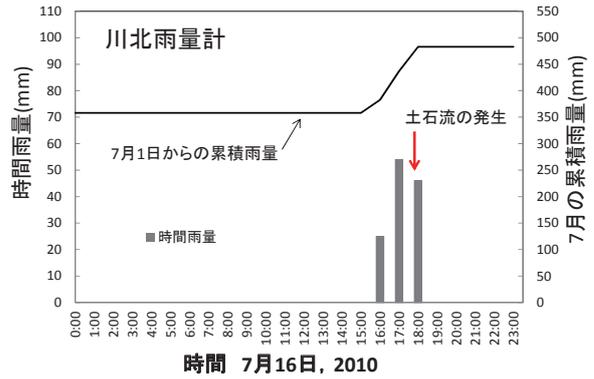


図-6 2010年庄原災害における7月の降雨状態

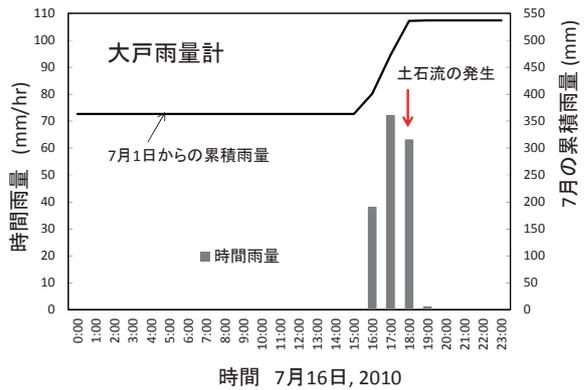
雨が観測された。この地域では、6月29日午後3時から4時に時間雨量60mmを越える雨域が能美島、江田島から呉市にかけて北北東にのびる東西約6km、南北約15kmの長円形の地域に現れ、その後、この雨域は午後4時から5時に呉市から北北東(東広島市)にかけての地域に移動した。

3.2 2010年庄原災害の降雨特性

図-5は被災地周辺に設置されている雨量計の位置である。図のように広島県と気象庁によって周辺の8箇所に雨量計が設置されており、被災地域では大戸と川北の雨量計が災害をもたらした雨量を観測している。表-2は8箇所の雨量計の7月16日までの7月の累積雨量、7月16日15時~18時の3時間の雨量、7月16日15時~18時間の最大時間雨量である。全ての雨量計が7月16日までの7月の累積雨量が250mm以上であるが、7月16日15時~18時の3時間雨量と最大時間雨量には大きな差が見られ、3時間雨量で100mmを超えたのは川北と大戸の2箇



(a) 川北雨量計



(b) 大戸雨量計

図-7 2010年庄原災害における7月16日の降雨状態

所のみである。このことは、極端に狭い範囲に限定的に集中豪雨が発生したことを示している。図-6は大戸雨量計における7月1日からの7月17日までの累積雨量と時間雨量(正時から正時の雨量)の推移である。図に示すように、7月に入ってから断続的な降雨によって累積雨量は7月16日の段階で363mmに達し、隣接した川北では累積雨量が358mmであった。

図-7は大戸と川北における7月16日の時間雨量の推移である。図に示す通り16日の15時~18時の3時間に大戸で173mm、川北では125mmの集中豪雨が発生した。大戸雨量計はこの間に最大60分間雨量として91mm(15時40分~16時40分)を記録している。広島地方気象台のアメダス雨量計は大戸雨量計から約9km離れた庄原市中心部に設定されているが、15時~18時の3時間累積雨量は65mmであり、そのほとんどが17時から17時40分の間に集中した。庄原で観測された最大時間雨量64mmはこの地点で観測史上最大であったが、大戸の県の雨量計ではその値の約1.5倍の最大60分間雨量91mmを観測しており、今回の雨がこの地域にとってこれまでの経験をはるかに上回る豪雨であったことを示している。また、図-5に示した雨量計の位置をみると、大戸および川北の雨量計は最も被害が大きかった篠堂川と大戸川の流域からやや離れているため、これらの流域の雨量は雨量計で観測された雨量よりも大きかった可能性が高い。以上のように、先行降雨がない状態で3時間に125~173mmの豪雨が集中

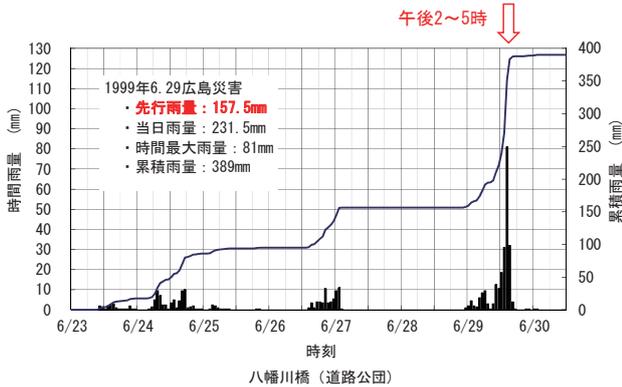


図-8 6.29 広島災害における降雨状況¹⁾

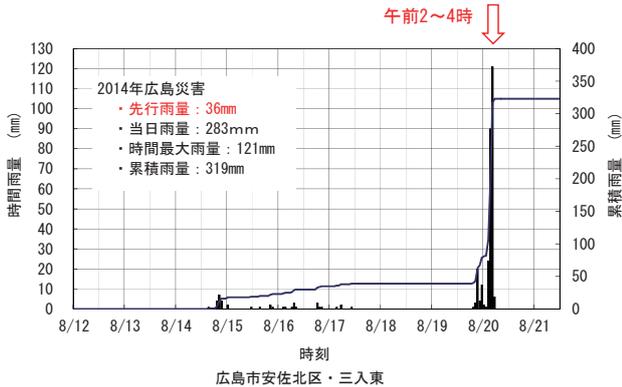


図-9 2014 年広島災害における降雨状況

し、降り始めから約 2 時間後に土石流が発生したため、本災害では災害発生前に土砂災害警戒情報、避難勧告など防災情報はすべて間に合わなかった。

3.3 2014 年広島災害の降雨特性

今回の災害では、平成 26 年 8 月 19 日の夜から 20 日の明け方にかけて猛烈な雨が降り、安佐北区三入東では 1 時間雨量 121mm、3 時間雨量 235mm、24 時間雨量 283mm とこの地点で観測史上 1 位の値を記録した。図-8 と図-9 に、6.29 広島災害で多くの土石流が発生した広島市佐伯区八幡川橋と今回の災害で大きな土石流が起こった安佐北区三入東の降雨記録を示す。災害当日までの先行雨量は 6.29 広島災害が 157.5mm で今回が 36mm と今回の方がかなり少ないが、当日雨量は 6.29 広島災害が 231.5mm で今回が 283mm と今回の方が多くなっている。特に、時間最大雨量は 6.29 広島災害が 81mm で今回は 121mm、3 時間雨量は 6.29 広島災害が 148mm で今回は 235mm であり、今回の災害では極めて短時間に多量の降雨があったことがわかる。

また、2010 年庄原災害のときの降雨状況と比較してみると、今回の豪雨は時間 50mm 以上の強い豪雨が約 3 時間続き、地域的に限定した範囲に集中した点が庄原災害に類似しているといえる。さらに、発災前 24 時間には先行する降雨がなく突然の豪雨であったため避難勧告など行政的な対応が間に合わなかったことも共通している。異なっている点は、今回の災害における 1 時間雨量（正時）の最大値が庄原災害の観測雨量の 72mm をはるかに上まわっていること、発災前 1 週間の先行降雨をみると今回の災害

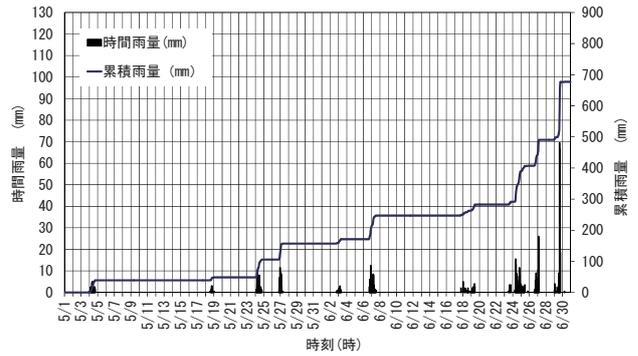


図-10 6.29 広島災害における 2 か月間の降雨状況

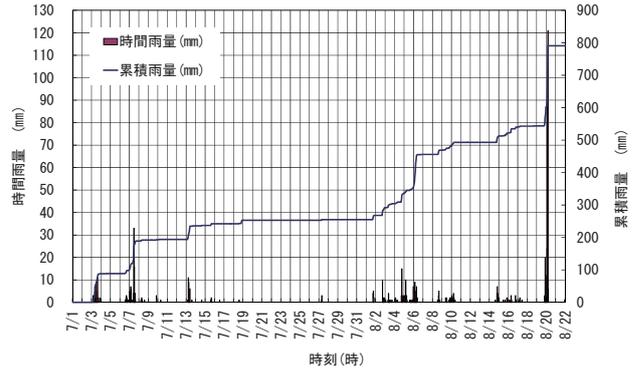


図-11 2014 年広島災害における 2 か月間の降雨状況

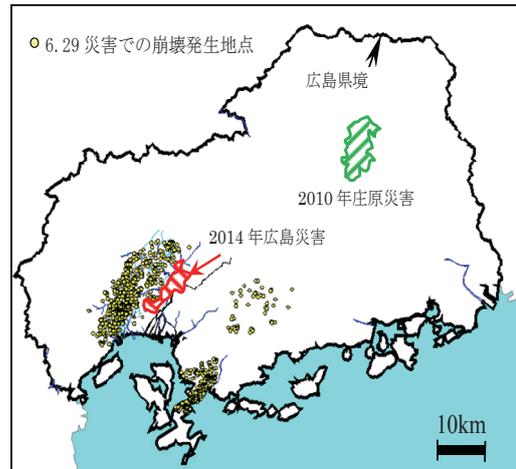


図-12 6.29 広島災害における斜面崩壊発生地点

ではほとんど降っていないが、庄原災害では断続的に時間 10mm～30mm の雨が先行していた点があげられる。

長期的な降雨の影響を検討するため、図-10 と図-11 に 6.29 広島災害と今回の災害の起こる 2 か月前からの降雨状況を示す。降雨の長期的な影響を調べる際に、どの程度の期間を取れば良いかの明確な根拠はないが、ここでは試みに 2 か月間を取ってみる。一般に、まさ土斜面を代表とする表層崩壊には 1～2 週間程度の事前降雨が影響すると考えられているが⁶⁾、ここで示した 2 か月前からの降雨は表層からそれ以深の基盤層に浸透し、基盤層中にある亀裂や破碎帯などに存在する地下水の量に関係していると思われる。なお、図-10 の 6.29 広島災害においては八幡川橋の 2 か月前からの時間雨量のデータが得られなかったため、広島市西部と同様に大きな土砂災害が起こった呉市のデ



写真-3 篠堂地域の斜面崩壊の状況（アジア航測㈱提供）

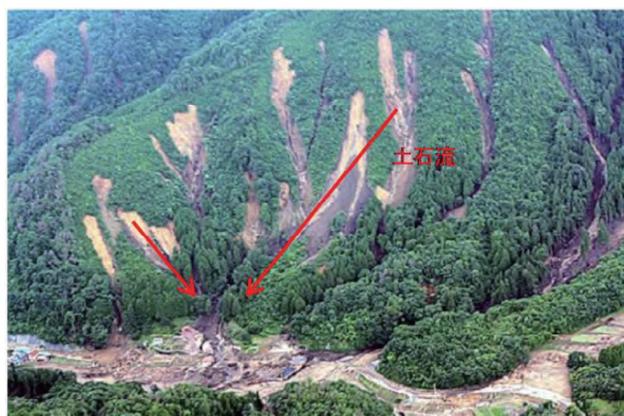


写真-4 篠堂川右岸における山腹の崩壊（広島県提供）



写真-5 篠堂川右岸で発生した土石流による家屋の被害（広島県提供）

ータを用いた。前述したように災害前1週間の先行雨量は今回の災害の方がかなり少ないが、2か月前から1週間前までの累積雨量は6.29広島災害で282.5mm、今回の災害で493mmであり、長期的に見た累積雨量は今回の災害の方が1.7倍ほど大きなものであった。なお、災害1週間前までの1か月間累積雨量は6.29広島災害が234mmで今回の災害が299mm、3か月間累積雨量は6.29広島災害が385.5mmで今回の災害が584mmであり、いずれの期間をとっても長期的な累積雨量は今回の災害の方が大きかった。また、2010年庄原災害の起こる2か月前（5月17日）から1週間前（7月9日）までの累積雨量は大戸で480mm、川北で503mmであり、今回の災害の降雨状況は2010年庄原災害

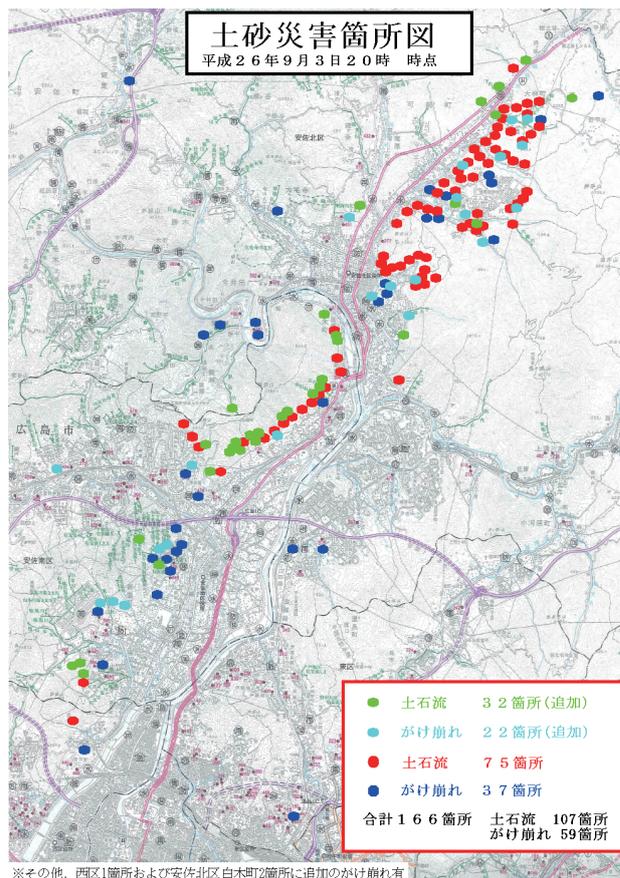


図-13 2014年広島災害におけるがけ崩れと土石流の発生箇所（広島県提供）

と類似した状況であったといえる。以上のことと、災害発生から10日以上経過した8月31日に土石流が発生した溪流調査を行った際に、土石流流下跡およびその側方から依然として多量の地下水が流出していたことを考慮すると、土石流の発生した山体には長期的な降雨によって多量の地下水が存在していたと考えられ、それが今回の大規模な土石流の発生につながった可能性がある。

4. 被害状況の比較

4.1 1999年6.29広島災害における土石災害の発生状況

6.29広島災害における崩壊箇所を航空写真などから判読すると、1,616地点にのぼり、その大部分は図-12に示すように概ね広島市西境から広島市安佐南区祇園までの東西約7km、廿日市市から広島市安佐北区可部までの南北約30kmの細長い長円形の地域、呉市を中心とする直径約10kmの円形の地域、および東広島市の直径約15kmの地域に集中していた。なお、この図には2010年庄原災害と2014年広島災害での被災場所も参考のために示してある。

また、斜面崩壊の発生時刻は、住民からの聞き込み調査によれば、廿日市市周辺および佐伯区屋代川で6月29日午後2時頃、佐伯区下小深川周辺で午後3時頃、安佐北区亀山周辺で午後4時頃、呉市吉浦および安芸郡吾戸町周辺で午後5時頃であった。この崩壊発生地点とその発生時刻

は、前述した強い雨域が現れる空間的な位置およびその時間的な移動とよく一致していた。

6.29 広島災害での 186 箇所のがけ崩れのうち、広島県が行った 51 箇所の詳細な調査結果⁷⁾ から、崩壊斜面の勾配は 30～55°のものが約 80%を占め、崩壊斜面下方の平坦地における崩壊土砂到達距離は、がけの高さ (H) の 2 倍 ($2H$) を上回る箇所は 2 箇所、50m を上回る箇所は 4 箇所、残り 45 箇所は $2H$ もしくは 50m 以下の範囲にあった。また、崩壊源頭部から尾根までの水平距離は 90%以上が 70～80m 以下で比較的短かった。また、土石流（土砂流）が発生した流域内の崩壊斜面の勾配は 35～40°を中心に 30～45°が約 70%、崩壊面積は 300m² 以下のものが約 80%、崩壊深は 1.0m 以下が約 70%を占めていた。土石流の発生源の大部分は溪流源頭部付近で発生した表層崩壊であり、溪床・溪岸の不安定土石や立木を巻き込んで流下した。土石流に多量の流木が含まれていたことも 6.29 広島災害の特徴のひとつである。

4.2 2010 年庄原災害における土砂災害の発生状況

写真-3 は山腹崩壊が集中的に発生した篠堂川流域の航空写真である。篠堂川および平行する県道 445 号線の両側の斜面において多数の山腹崩壊が発生し、崩壊土砂が土石流となって道路、河川、道路沿いの家屋、農地の上に流下した。写真からわかるように、山腹の斜面が同時多発的に崩壊し、それらが土石流となって隣あった溪流から一斉に流出すること、しかもこれが降り始めから約 2 時間半でほぼ同時に発生したことは、都市部と中山間地域の違いはあるが、今回の災害よく類似しているといえる。土石流の源頭部の崩壊の規模は、幅が 5～15m で溪流まで崩壊が連続している場合と、長さ 20m 程度の規模で崩壊し、その下部は崩壊していない場合もあった。表層部の厚さは 0.5～1.5m であった。

写真-4 と写真-5 は、篠堂川右岸における山腹の崩壊と土石流の発生および家屋の被害の状況である。35°以上の急勾配の斜面が同時に崩壊し、崩壊土砂は土石流となって県道 445 号線、篠堂川に流入した。土石流は、県道 445 号線に流出し、2 軒の家を押しつぶした後、篠堂川に流入した。全壊した一戸に住んでいた女性が家屋とともに川に流され死亡した。写真-5 には家屋の被害の状況を示しているが、今回の土石流災害と比較すると、土石流に含まれる巨礫は少なかったといえる。

表-3 1999 年 6.29 広島災害での流出土砂量

番号	溪流名	流域面積 A(km ²)	流出土砂量 V(m ³)	単位面積当たりの流出土砂量 V/A(m ³ /km ²)	
①	中倉川	0.561	15,100	27,100	
②	大毛寺川左支川	0.069	3,200	45,600	
③	安川左支川	0.046	2,200	46,700	
④	猿滝川	0.503	6,100	12,200	
⑤	古野川	0.873	21,100	24,300	
⑥	堂ヶ原川支川	0.021	2,700	158,600	
⑦	荒谷川	3.705	30,400	18,500	
⑧	下ヶ迫川支川	0.195	5,400	41,700	
⑨	屋代川	0.806	20,800	31,300	
		平均	0.75	11,889	45,111
		A=0.1～1.0km ² での平均	0.59	13,700	27,320

表-4 2014 年広島災害での流出土砂量（暫定値）

番号	溪流名	流域面積 A(km ²)	流出土砂量 V(m ³)	単位面積当たりの流出土砂量 V/A(m ³ /km ²)	
I-1-9-294	緑井 緑井七丁目	0.17	13,000	76,471	
I-1-9-295	緑井	0.07	7,200	102,857	
I-1-9-295-2	緑井				
I-1-9-1004	八木	0.02	500	25,000	
I-1-9-299	緑井・八木 緑井八丁目	0.31	11,200	36,129	
I-1-9-303	八木 県営緑丘	0.23	33,000	143,478	
I-1-9-1005	八木	0.02	3,100	155,000	
I-1-9-1006	八木	0.03	9,900	330,000	
I-1-9-1006-2	八木 光廣神社裏				
I-1-9-305	八木	0.14	4,900	35,000	
I-1-9-306	八木 阿武の里団地	0.18	22,200	123,333	
I-1-9-1007	八木	0.02	1,400	70,000	
I-1-9-307	八木 八木ヶ丘団地	0.25	10,400	41,600	
I-1-9-27	八木	0.21	8,900	42,381	
I-1-9-1009	八木 八木六丁目	0.06	2,000	33,333	
I-1-9-28	八木 八木六丁目	0.28	12,100	43,214	
I-1-9-29	八木 八木八丁目	0.20	19,100	95,500	
I-1-9-30	八木 中国電力	0.19	16,600	87,368	
		平均	0.15	10,969	90,042
		A=0.1～1.0km ² での平均	0.22	15,140	72,447

4.3 2014 年広島災害における土砂災害の発生状況

今回の土砂災害の発生地域は、前掲の図-1 に示したように 6.29 広島災害において広島市西部周辺で起こった地域の東側に隣接し、東西約 3km、南北約 15km の非常に狭い地域に集中している。

6.29 広島災害では、がけ崩れが 186 箇所、土石流（土砂流）等が 139 箇所、合計 325 箇所が発生した。一方、今回の災害では図-13 に示すように、がけ崩れが 59 箇所、土石流が 107 箇所、合計 166 箇所が発生した。今回の災害での発生箇所は 6.29 広島災害の約半分であるが、土砂災害の発生した地域の広さを考慮して比較すると、非常に狭い地域に集中して多数の土砂災害が発生したことが分かる。また、6.29 広島災害では土石流よりがけ崩れの発生箇所が大きく上回っていたが、今回の災害ではがけ崩れの方が土石流の約半数と少なかったことも特徴のひとつである。

一方、今回の災害の諸元は現時点では未整理で、正確な

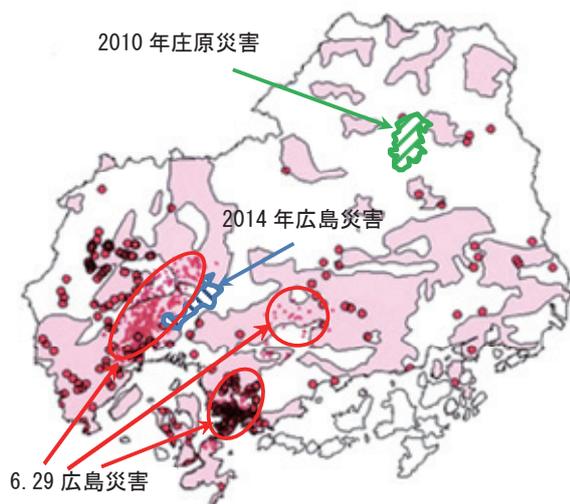


図-14 既往土砂災害被災地と花崗岩分布域

比較を行うことはできないが、今回の土石流の源頭部の破壊形式は薄い平面的な表層崩壊だけでなく、被圧地下水によって谷部がV字形やU字形に押し出されたような形状となり、崩壊深が数m以上の箇所も多数見られたこと、および流木の量が6.29広島災害に比べてやや少なく、溪流によって大小の違いはあるものの岩石が主体の土石流であったことが特徴として挙げられる。

また、6.29広島災害と今回の災害で発生した土石流の流出土砂量を比較したものが表-3と表-4である。6.29広島災害のデータは6.29広島県土砂災害対策検討委員会が代表的な9つの溪流に対して調査を行った結果⁷⁾を用い、今回のデータは国土交通省中国地方整備局が行なった調査データのうち、緑井・八木地区のデータを使用した。なお、このデータは速報レベルでの暫定値である。6.29広島災害での流出土砂量は表-3に示すように3つの溪流で10,000m³を超えるものもあるが、いずれも流域面積が0.5km²以上の比較的大きな流域面積の溪流で発生している。一方、今回のこの地区の土石流が発生した溪流の流域面積は表-4に示すように、全て0.4km²以下であるにも関わらず、8つの溪流で10,000m³以上の流出土砂量がある。また、流域面積の違いを考慮するため、単位流域面積当たりの流出土砂量で比較すると、6.29広島災害では平均値が45,111m³/km²、今回の災害では90,042m³/km²と今回の方が2.0倍ほど大きいことが分かる。さらに流域面積が極端に小さいものと大きいものを除いたもので比較すると、6.29広島災害では平均値が27,320m³/km²、今回の災害で72,447m³/km²と今回の方が2.7倍ほど大きく、単位面積当たりで多量の土砂が生産・流下したことが分かる。特に、大きな被害が出た県営緑丘住宅の流出土砂量は33,000m³で単位面積当たりの流出土砂量は143,478m³/km²、阿武の里団地の流出土砂量は22,200m³で単位面積当たりの流出土砂量は123,333m³/km²で極めて大きな値となっている。一般に、標準的な土石流の単位面積当たりの流出土砂量は12,000~157,000m³/km²の範囲にあるとされている⁸⁾が、県営緑丘住宅と阿武の里団地の値はこの最大値に近い値となっている。

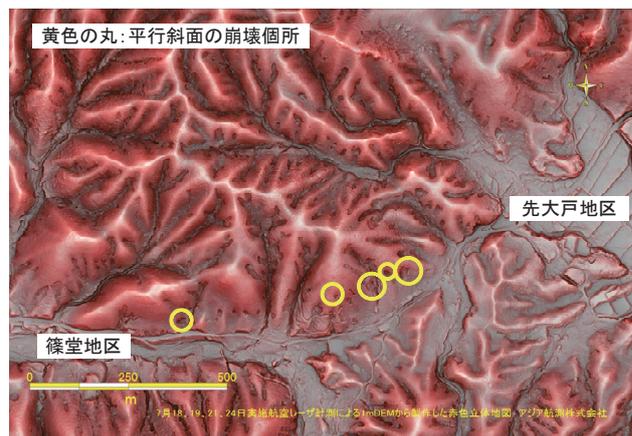


図-15 2010年庄原災害の被災地域の赤色立体地図 (アジア航測(株)提供)

5. 地質と地盤工学的特性の比較

5.1 1999年6.29広島災害の地盤工学的特徴

図-14に既往土砂災害被災地と花崗岩分布域との関係を示す。6.29広島災害において被害の大きかった広島市西部および呉市には、広島型花崗岩と呼ばれる粗粒黒雲母花崗岩が分布しており、崩壊箇所の大部分はこれが強風化したまき土によって覆われていた。崩壊地点周辺の風化土層厚を、簡易動的コーン貫入試験の $N_d=50$ 以下の地層として判定すると⁷⁾、集水地形を呈する箇所においては、広島地区で崩壊下部と中部から上部にかけて1.0~2.2mと上方になるほど深くなる傾向にあり、呉地区ではほぼ1.6~1.7mの範囲にあった。一方、集水地形を呈さない箇所においては、広島地区で崩壊下部と上部で2.8~2.9m、崩壊中央部で約1.9mと崩壊中央部で浅い傾向にあったが、呉地区では崩壊下部と上部で1.7~2.1m、崩壊中央部で2.6mと逆の傾向があった。そして、集水地形を呈さない箇所の風化土層厚が集水地形を呈する箇所に比べて大きい傾向にあった。

6.29広島災害における崩壊地点周辺の風化土の土質工学的特性として、三軸試験において正規圧密状態と考えられる範囲の粘着力は $c'=0\sim 8.8\text{kN/m}^2$ の範囲にあるが、 $c'=0$ の場合が最も多く全体の約75%を占めていた。一方、同様な範囲の内部摩擦角は $\phi'=28.8\sim 38.2^\circ$ の範囲にあり、平均値は 32.9° であった。また、乾燥密度は $\rho_d=1.37\sim 1.73\text{g/cm}^3$ 、間隙比は $e=0.53\sim 0.92$ の範囲にあった。透水係数は、広島地区で $k=9.4\times 10^{-4}\sim 7.2\times 10^{-2}\text{cm/s}$ 、呉地区で $k=7.6\times 10^{-5}\sim 5.7\times 10^{-3}\text{cm/s}$ の範囲にあり、広島地区の透水係数が少し大きい傾向にあった。

5.2 2010年庄原災害の地盤工学的特徴

被災地の基盤地質は流紋岩類(高田流紋岩類、中生代後期白亜紀)であり、一部は吉舎安山岩類(中生代後期白亜紀)となっている。さらに、これらの層の上に備北層群(第三期中新世中期)が覆っている箇所や、火山灰質土である黒ぼくが覆っている箇所もあった。広島県で大きな土砂災害が発生してきたのは県西部や呉市などを中心とした風



写真-6 2010年庄原災害における平行斜面中腹の崩壊 (その1)



写真-7 2010年庄原災害における平行斜面中腹の崩壊 (その2)

化花崗岩（まさ土）層が分布している地域であったが、庄原災害は風化流紋岩や黒ぼく層によって表土が覆われている地域においても、集中豪雨によって斜面崩壊と土石流災害が同時多発的に発生することを示した。

図-15 はヘリコプターからのレーザー測量によって作成した最も被害が大きかった先大戸地区と篠堂地区の赤色立体地図である（アジア航測（株）提供）。赤色立体地図は、傾斜量を赤の彩度に比例させ、急斜面ほどより赤くなるように、尾根谷度を明度に比例させ尾根や独立峰ほど明るく、谷や窪地ほど暗くなるように調製した疑似カラー画像である。図-15 から、斜面の崩壊形態は2つに大別される。1つは、谷地形において斜面が崩壊しているケースである。そのほとんどは、尾根より20～40m 下部が源頭部となって崩壊し、土石流が発生した。源頭部の崩壊の規模は幅が5～15m であり、溪流まで崩壊が連続している場合と、長さ20m 程度の規模で崩壊し、その下部は崩壊していない場合もあった。表層部の厚さは0.5～1.5m であり、源頭部では地盤内の孔を通じて崩壊部の底部に水が流入していた痕跡が見られた。以上に述べた源頭部の位置と状況については、今回の災害との類似がみられる。もう1つの崩壊形態として、写真-6 や写真-7 に示すような、谷地形ではない平行斜面の中腹のみが崩壊するといったケー

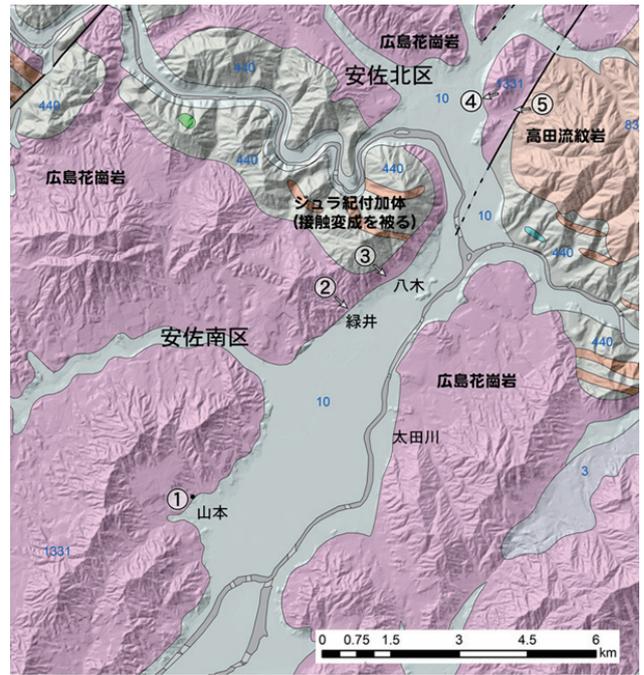


図-16 2014年広島災害の被災地の地質図¹⁰⁾



写真-8 阿武の里団地の土石流源頭部



写真-9 八木ヶ丘団地の土石流源頭部

スが多くみられた。図-15 に中に示す黄色の丸は、現地調査によって確認することのできた平行斜面の崩壊地であるが、図からはそれ以外にも同様の崩壊形態と思われるものが複数確認できる。このような平行斜面中腹のみが崩壊

するといったケースは、風化花崗岩地帯ではあまり見られない崩壊形態であり、今回の土砂災害でもみられなかった。花岡ら⁹⁾はこのような崩壊のメカニズムとして、斜面上部の風化流紋岩層と斜面下部の黒ボク層の境界付近において2つの土層の透水係数の違いによって地下水が滞留し、浅い円弧すべりが発生したと推定している。

5.3 2014年広島災害の地盤工学的特徴

今回の災害で被害の大きかった広島市安佐南区八木地区と安佐北区可部地区の地質は、**図-16**に示すように広島花崗岩、高田流紋岩、玄武岩、接触変成を受けたジュラ紀付加体が入り組む複雑な構造となっていると推定されている¹⁰⁾。そのため、同じ八木三丁目でも数百メートルしか離れていない県営緑丘住宅と阿武の里団地での土石流流下物は全く異なり、県営緑丘住宅では広島でよく見られる花崗岩が主体となっていたが、阿武の里団地やさらに隣接する八木四丁目八木ヶ丘団地では泥質や珪質の片岩などの変成岩が主体となっていた。

写真-8と**写真-9**は阿武の里団地と八木ヶ丘団地の土石流源頭部の写真である。阿武の里団地の源頭部は幅約3.6~5.5m、崩壊深さ1.0m前後、斜面勾配約40°で、八木ヶ丘団地の源頭部は幅約4m、崩壊深さ1.8m前後、斜面勾配約37°で、ともに基岩上にあった風化表層土が崩壊していた。また、これらの崩壊部の底面や側面には地下水が噴出したと思える孔がいくつか認められた。

土石流による被害の大きかった安佐南区八木地域におけるいくつかの地点より採取した試料を用いて粒度試験を行った¹¹⁾。**図-17**に粒径加積曲線を示す。これより、粒径が約0.001mmから10mm以上まで幅広く分布するとともに、粒度分布が場所によって違うことがわかる。また、6.29広島災害における災害現場の土砂より得られた粒径加積曲線と比較すると今回の災害現場の方が、細粒分が多いことが分かる。なお、今回の試料では液性・塑性限界試験を実施していないため、日本統一分類法に従って小分類まで分類することはできなかったが、粒度分布から源頭部の試料はいずれもシルト分を主体とする細粒土Fmに分類される。また、6.29広島災害におけるまさ土は、細粒分混じり礫質砂(SG-F)と分類される。

八木三丁目県営緑丘住宅上の土石流源頭部においてチューブサンプリング法で不攪乱試料を採取し、室内で不飽和状態及び飽和状態の試料での一面せん断試験を実施した¹¹⁾。その結果、不飽和状態の試料では $c_d=15.5\text{kN/m}^2$ 、 $\phi_d=39.8^\circ$ 、飽和状態の試料では $c_d=14.8\text{kN/m}^2$ 、 $\phi_d=30.3^\circ$ の結果が得られた。6.29広島災害における試料の強度定数は $c'=0\sim 9\text{kN/m}^2$ 、 $\phi'=30^\circ$ 前後であり¹⁾、内部摩擦角に大きな差はないが、粘着力においては本現場の試料が大きく上回っている。また、飽和状態においては粘着力がほとんど減少しておらず、飽和度の増加に対する強度の低下は小さく、降雨に対して比較的強度のある地盤であると評価できる。

また、変水位透水試験を行ったところ、透水係数は

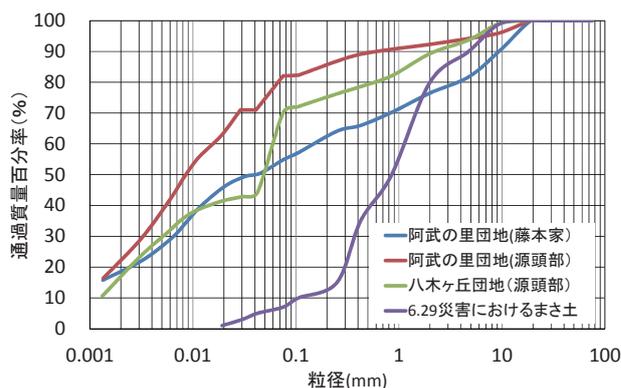


図-17 安佐南区八木地区の粒径加積曲線

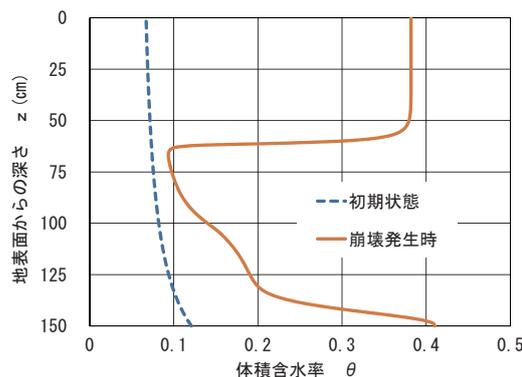


図-18 一次元飽和・不飽和浸透解析結果

$2.7 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ で、6.29広島災害における試料よりかなり小さい値となった。この結果および現場調査の結果をもとに、表層厚を1.5mとし、降雨の浸透流解析を行った¹¹⁾。その結果を**図-18**に示す。この解析ではRichards¹²⁾の提案した一次元非定常不飽和浸透流方程式を基礎方程式として、差分法による数値解析を行った。本研究では解析に必要な水分特性曲線が得られていないため、土質特性の近いvan Genuchtenモデル¹³⁾のパラメータを用いた。用いたパラメータは、 $k_{sat}=3.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 、 $\theta_r=0.057$ 、 $\theta_s=0.41$ 、 $\alpha=0.124$ 、 $n=2.28$ 、 $m=0.63$ 、 $Q_{out}=-5.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ である。また、この解析での降雨強度は、崩壊発生時刻の9時間前から実際の雨量と同じものを使用した。その結果、**図-18**から崩壊発生時においては、地表から0.5m程度は体積含水率が大きく上昇し、飽和状態($\theta_s=0.41$)に近づくとともに、底面付近の限られた部分でも体積含水率が上昇するものの、深さ0.5~1.25m部分では依然として不飽和状態であり、表層内において降雨による底面からの地下水位の上昇がほとんど認められないことが分かった。

以上の室内試験、現地調査、浸透流解析の結果を用いて斜面の安定解析を行った。解析では、表層厚を $H=1.5\text{m}$ 、斜面勾配を $\beta=35^\circ$ 、強度定数を安全側の $c'=14\text{kN/m}^2$ 、 $\phi'=30^\circ$ とする半無限斜面とし、地表面から0.5mは飽和状態($\gamma_{sat}=17.4\text{kN/m}^3$)であるが、それ以深は不飽和状態($\gamma_t=14.7\text{kN/m}^3$)で地下水面は存在しないとして、次式から安全率Fsを求めた。

$$F_s = \frac{c'}{W \sin \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} - \frac{U \tan \phi'}{W \sin \beta} \quad (1)$$

ここに、 W は斜面の単位長さ当たりの土塊の全重量、 U はすべり面の間隙水圧である。

その結果、安全率は $F_s=2.10$ となり、今回の斜面条件と降雨条件では崩壊しないことが分かった。また、表層全体が降雨によって飽和し、表層全体を流れる浸透流による間隙水圧がすべり面に作用すると仮定して安定解析を行ったが、結果は $F_s=1.51$ となり、この地盤では粘着力がかなり大きいため飽和状態となったとしても斜面崩壊が発生しない結果となった。これより、今回の斜面崩壊は地表面から雨水が鉛直に浸透して地下水面を形成し、すべり面の間隙水圧が上昇して斜面が不安定化するという通常の半無限斜面の崩壊メカニズムで説明することが困難であった。

以上の結果と八木地区と緑井地区の土石流の発生地である阿武山には断層・節理・破砕帯などの透水性の高い部分が散見され、この部分には常時地下水が存在していた調査結果¹⁴⁾、および崩壊断面にはパイプフローの孔が多数認められたことを併せて考えると、阿武山の一部斜面では図-19に示すようなメカニズムで不安定化が起こったのではないかと考えられる。図-19(a)は阿武山の平面図をイメージしたもので、断層・破砕帯・節理などの不連続面に沿って形成された溪流を土石流が流下した様子を表している。なお、不連続面の方向は実際の方向を正確に表したものではない。図-19(b)は阿武山の断面図をイメージしたもので、右側は豪雨のない通常時を、左側は今回の豪雨時の様子を表している。阿武山では登山道の途中で常時、名水が湧出していた個所もあり、地下水を滞水でき、透水性の高い断層・節理・破砕帯部分には常時地下水が一定量存在していたと考えられる。なお、図中の青線は地下水脈を、赤線は地下水の流れをイメージしたものである。特に今回は、前述したように長期的な事前の降雨量が多く、山体内のこの部分には多量の地下水が存在し、それが上方に降った短期間かつ多量の降雨によって被圧され、斜面と平行な浸透流による間隙水圧以上の水圧となって斜面の表層土を押し上げるように作用し、斜面を急激かつ大規模に不安定化させた可能性が考えられる。

6. まとめ

2014 年広島災害と近年広島県内で甚大な被害を出した 1999 年 6.29 広島災害および 2010 年庄原災害について被害の発生状況、被害をもたらした降雨特性、被害地の地質および地盤工学的特性を比較した。その結果、2014 年広島災害の特徴として以下のことが明らかとなった。

- (1) 降雨条件として、時間最大雨量は 6.29 広島災害で 81mm、2010 年庄原災害で 72mm、今回は 121mm、3 時間雨量は 6.29 広島災害で 148mm、2010 年庄原災害

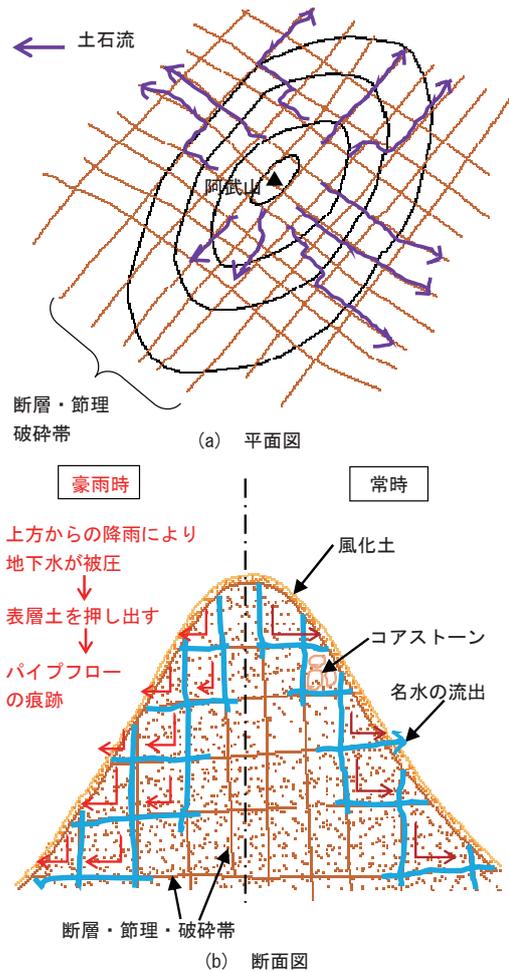


図-19 2014 年広島災害での阿武山における斜面不安定化のイメージ図

で 173mm、今回は 235mm であり、今回の災害では極めて短時間に多量の降雨があった。

- (2) 2 か月程度の先行雨量は、6.29 広島災害で 282.5mm、2010 年庄原災害で 503mm、今回の災害は 493mm であり、今回の降雨は 2010 年庄原災害と同様に 6.29 広島災害の 1.7 倍程度大きく、土石流が多発した原因のひとつと考えられる。
- (3) 豪雨のあった地域は、6.29 広島災害では広島市・呉市・東広島市などの広い範囲に及んでいたが、2010 年庄原災害では約 4km×4km、今回の災害では約 3km×15km の非常に狭い範囲に限定されていた。
- (4) 土砂災害が発生した時間帯として、6.29 広島災害のときは午後 2 時～5 時、2010 年庄原災害のときは午後 3 時～6 時で昼間の時間帯であったが、今回は深夜の午前 2～4 時で多くの人が住宅で就寝中であり、なおかつ避難が困難な時間帯であったことが人的被害を大きくした要因のひとつと考えられる。
- (5) 土石流とがけ崩れが同時多発的に発生した点は 3 つの災害で共通している。土砂災害の形態としては、6.29 広島災害のときは土石流に比べてがけ崩れが多く、2010 年庄原災害と今回の災害では土石流の方が多く、

前述した降雨条件の違いが関係していると考えられる。また、住宅密集地の直上で土石流が繰り返し発生し、土石流が流路を変えて住宅密集地を直撃した点が今回の災害の特徴である。

- (6) 災害の発生した地域の基盤的地質としては、6.29 広島災害では広島花崗岩とまさ土で、2010 年庄原災害では一部に吉舎安山岩はあるものの主体は高田流紋岩で、今回は広島花崗岩とまさ土の地域以外に堆積岩や変成岩の地域もあり、表層がまさ土以外の場合でも強い集中豪雨によって土石流が発生している。また、今回の土石流では流木による被害が少なく、巨岩を含む岩石と土砂による被害が顕著であった。
- (7) 土石流の源頭部の破壊形式としては、6.29 広島災害と 2010 年庄原災害では比較的薄い平面的な表層崩壊が主体であったが、今回の災害では被圧地下水によって谷部が V 字形や U 字形に押し出されたような形状となり、崩壊深が数 m 以上の箇所も多数見られた。
- (8) 今回の安佐南区緑井・八木地区で発生した土石流の単位流域面積当たりの流出土砂量を 6.29 広島災害と比較すると約 2.7 倍程度大きい。土石流の規模が大きくなった要因として、猛烈な豪雨と断層・破碎帯・節理の存在が関係していた可能性がある。
- (9) 安佐南区八木地区の土石流源頭部から採取した不攪乱試料の強度定数として、不飽和状態では $c_d = 15.5 \text{ kN/m}^2$, $\phi_d = 39.8^\circ$, 飽和状態では $c_d = 14.8 \text{ kN/m}^2$, $\phi_d = 30.3^\circ$ の結果が得られた。6.29 広島災害における試料の強度定数は $c' = 0 \sim 9 \text{ kN/m}^2$, $\phi' = 30^\circ$ 前後であり、内部摩擦角に大きな差はないが、粘着力においては本現場の試料が大きく上回っていた。また、透水係数は $2.7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ で、6.29 広島災害における試料よりかなり小さい値となった。
- (10) 安佐南区八木地区の現地調査、土質試験、浸透流解析の結果を用いて斜面の安定解析を行った結果、今回の降雨条件では斜面崩壊しない結果となった。また、風化表層全体が飽和した状態として安定解析を行ったが、この地盤では飽和状態となっても斜面崩壊が発生しない結果となった。
- (11) 以上の結果から、今回の土石流を引き起こした斜面崩壊は、地表面から雨水が鉛直に浸透して地下水面を形成し、すべり面の間隙水圧が上昇して斜面が不安定化するという通常の半無限斜面の崩壊メカニズムで説明することが困難であり、山体に常時存在していた地下水が上方に降った多量の降雨によって被圧水となって斜面の表層土を押し上げるように作用して斜面を急激かつ大規模に不安定化させた可能性が考えられる。

広島県、広島市、土木学会・地盤工学会平成 26 年広島豪雨災害合同緊急調査団をはじめとする関係各位に甚大なるご協力をいただきました。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 地盤工学会：平成 11 年の広島県豪雨災害調査報告書，98p.，2000.
- 2) 土木学会：平成 22 年 7 月広島県庄原市土砂災害現地調査報告会報告資料，土木学会ホームページ，<http://committees.jsce.or.jp/report/node/28>, 2014.
- 3) 土木学会，地盤工学会：平成 26 年広島豪雨災害合同緊急調査団調査報告書，296p.，2014.
- 4) 国土地理院ホームページ：<http://portal.cyberjapan.jp/site/mapuse4/>, 2014.
- 5) 国土地理院ホームページ：http://saigai.gsi.go.jp/1/h26_0816game/hiroshima/naname/qv/5D5A0327.JPG, 2014.
- 6) 例えば，網干寿夫，低引洋隆：真砂土自然斜面の崩壊について，第 7 回土質工学研究発表会講演概要集，pp.507-510, 1972.
- 7) 広島県：6.29 広島県土砂災害対策検討委員会討議資料，第 1 回～第 4 回，1999.
- 8) 広島県土木局土木整備部砂防課：土砂災害防止法基礎調査マニュアル・特定開発行為許可制度の手引き，財団法人広島県建設技術センター，pp.2-44, 2009.
- 9) 花岡尚，川口将季，土田孝，中川翔太，加納誠二：2010 年庄原土砂災害における平行斜面の崩壊事例に関する調査と考察，地盤と建設，pp.71-80, Vol.29, No.1, 2012.
- 10) 産業技術総合研究所地質調査総合センターホームページ：<https://www.gsj.jp/hazards/landslide/20140820-hiroshima.html>, 2014.
- 11) 岩井鉄平，森脇武夫，加納誠二，鹿瀬一希：平成 26 年 8 月広島土砂災害における斜面崩壊メカニズムの考察，土木学会中国支部第 67 回研究発表会発表概要集，pp.247-248, 2015.
- 12) Richards, L.A.: Capillary Conduction of Liquids in Porous Mediums, *Journal of Applied Physics* 1, pp.318-333, 1931.
- 13) van Genuchten, M.Th.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal* 44, pp.892-898, 1980.
- 14) 土木学会，地盤工学会：平成 26 年広島豪雨災害合同緊急調査団調査報告書，pp.138-149, 2014.

謝辞

本論文をまとめるに当たり，国土交通省中国地方整備局，

(2015 年 6 月 19 日 受付)