

斜面表層部における降雨流出浸透特性を考慮した
各種降雨指標の適用性に関する研究

平成 25 年 2 月 20 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

池永 隼也

要旨

近年，日本では短期間に局所的に発生する豪雨，いわゆるゲリラ豪雨が多発する傾向が見られる．また，日本の国土は大部分が急峻な山地からなり，それに沿って道路・鉄道・家屋などが建設されている場合も少なくなく，短期間集中豪雨に起因する斜面崩壊が発生した際に被害が大きくなりやすい傾向がある．そのような被害の防止策を検討するに際して，豪雨時の斜面崩壊の誘因となる降雨の斜面に対する流出浸透特性を解明することが求められる．

そのような観点からゲリラ豪雨とスコールの類似性に着目して，タイ・カセサート大学との共同プロジェクトとして，タイのナコンナヨック・プーケットの実斜面において，雨量，表面流出量，斜面内部の間隙圧や体積含水率の現地計測をおこなってきた．

本研究では，その現地計測結果に基づいて実斜面に従来の手法とは異なる新たな手法でマルチタンクモデルを適用し解析をおこなったので，その解析結果について考察を加える．

斜面崩壊に伴う被害の防止・軽減の手段としては，崩壊の危険性が高い斜面に対して補強工を実施するハード対策・危険な時期を的確に予測し住民避難や道路・鉄道の通行，運行規制を行うソフト対策の二つが主として挙げられる．しかし，ハード対策には多大な費用がかかるということから現実的に困難な場合も多く，ソフト対策を用いた斜面崩壊による被害の防止・軽減を高い精度で実施することが必要不可欠である．そのソフト対策として代表的なものが土砂災害早期警戒体制であり、道路や鉄道を運営する各種機関がそれぞれ様々な降雨指標を利用して警戒体制をしいている．

本研究では，現地計測結果に基づいて，そのような土砂災害早期警戒体制に利用されている各種降雨指標の適用性を検討するとともに，具体的な警戒体制の発令基準値についても提案をおこなう．

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	2
1.3	既往の研究との関連	2
1.4	本論文の構成	5
第 2 章	原位置計測	6
2.1	タイにおける原位置計測	6
2.1.1	ナコンナヨックにおける原位置計測	6
2.1.2	プーケットにおける原位置計測	7
2.2	タンクモデル解析で用いる各種観測値の算定	8
2.2.1	欠損雨量の算定	9
2.2.2	流出量の算定	9
2.2.3	浸透量の算定	9
第 3 章	斜面表層に対するタンクモデル解析の適用	12
3.1	3 連マルチタンクモデルの概要	12
3.2	3 連マルチタンクモデルのパラメータ同定手法	13
3.2.1	カルマンフィルタ	13
3.2.2	誤差計算	15
3.3	実斜面への適用結果および考察	16
第 4 章	各種降雨指標の検討	19
4.1	間隙圧	19
4.2	プーケットにおける各種降雨指標の検討	20
4.2.1	実効雨量の検討	20
4.2.2	API の検討	21
4.2.3	連続雨量の検討	21

4.2.4	時間雨量の検討	22
4.3	ナコンナヨックにおける各種降雨指標の検討	23
4.3.1	実効雨量の検討	23
4.3.2	API の検討	24
4.3.3	連続雨量の検討	25
4.3.4	時間雨量の検討	25
4.4	降雨指標検討結果のまとめ	26
4.5	土砂災害早期警戒体制における注意喚起領域	26
第 5 章	まとめと今後の課題	28
参考文献		29
謝 辞		30

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

豪雨に起因する斜面崩壊による被害を防止・軽減する方法として、斜面崩壊が起こりうる危険な時期を的確に予測し、住民避難や道路・鉄道の通行、運行規制を行うソフト対策の精度向上は、単に斜面災害を軽減して住民の生命を守るというだけでなく、斜面崩壊の時期を的確に予測し道路・鉄道において斜面崩壊が起こらないにも関わらず規制をかける、いわゆる空振り規制を少なくすることで、その地域の交通の円滑化にもつながるということから重大な意味を持つ。

そのようなソフト対策として一般的に利用されているのが、土砂災害早期警戒体制と呼ばれるもので、図 1.1 に示すように横軸に長期降雨指標、縦軸に短期降雨指標をとり、そこに限界包絡線を描いた図によって表される。降雨が開始すると、長期降雨指標・短期降雨指標をもとに降雨履歴を結んだ線（スネークカーブ）が時間の経過とともに描かれていき、それが限界包絡線に達すると規制をかけるというものである。ここで、長期降雨指標・短期降雨指標として何をを用いるか、また、そのような降雨指標を用いた場合どの部分が危険領域になるかの 2 点が重要な論点となる。特に、長期降雨指標・短期降雨指標は様々な指標が提案されており、道路・鉄道を運営する各種機関によって利用している降雨指標は様々である。そして、豪雨時の斜面崩壊の根本的な要因が降雨量にあるという知見から、それらの降雨指標は、短期降雨指標なら時間雨量、長期降雨指標なら累積降雨量というような雨量で設定されている。しかし、豪雨による斜面崩壊の厳密な要因は、斜面内に雨水が浸透し間隙圧が上昇することでせん断強度が低下することが主として挙げられるが、現在利用されている降雨指標にはそのような斜面の安定性に深く関わる地盤内部の力学的挙動が反映されていないという問題点が指摘される。また、危険領域の設定の仕方についても、過去の降雨履歴・被災履歴をもとに統計的観点から確立雨量を規制基準値とするなど、斜面内における力学的な安定性を考慮していないという問題点が指摘される。

また、近年の気候変動に伴い、図 1.2 に示すように、日本においても熱帯性気候を有するタイで発生するスコールと同じような降雨履歴をたどる時間雨量にし

て 40mm を越える短期間集中豪雨が発生しており、和歌山県の古座における従来型豪雨とは異なる降雨特性がみられる。そのような近年の降雨特性の変化に伴い、それに見合った土砂災害早期警戒体制の見直しも今後取り組んでいかなければならない課題である。

1.2 研究の目的

本研究では、短期間集中豪雨の際に発生しやすい斜面の浅層崩壊に着目し、タイのプーケットとナコンナヨックの実斜面における原位置計測結果の中でも、斜面の安定性に深く関わる斜面浅層における間隙圧と各種降雨指標の関連性を調べることで、各種降雨指標の適用性を検討するとともに、土砂災害早期警戒体制における斜面浅層崩壊の注意喚起領域に関する提案をおこなう。

さらに、斜面表層の流出浸透特性を知るために本研究では斜面に対しておこなった 1 次元タンクモデル解析結果を用いて 3 連マルチタンクモデル解析を行い、各種パラメータの同定を行ったので、その解析結果に対する考察をおこなう。

1.3 既往の研究との関連

降雨時における地盤内への雨水浸透特性を把握するため、室内試験、および原位置計測は数多く行われているが^{1),2)}、短期間集中豪雨は近年増加傾向にあるとはいえその発生回数がまだ少なく、かつどの地域で発生するかを予測することが困難であるため、国内では十分な計測データを確保することは困難である。

上述した課題に対処するため、大津ら³⁾は短期間集中豪雨の降雨特性と熱帯性気候地域におけるスコールの降雨特性の類似性に着目した。熱帯性気候地域では雨季にあらゆる箇所において高頻度でスコールが発生しており、斜面への降雨浸透に着目した原位置計測が容易であると推測される。ここで、スコールと日本におけるゲリラ豪雨の発生機構については、気象学的観点からは異なるものであるとの指摘もある。しかし、同研究においては、短時間に高強度の降雨が集中する場合の斜面における雨水の流出浸透特性を検討するという観点からは、両者は同等の外乱条件であると捉えている。

このような観点から、大津らはゲリラ豪雨発生時の斜面内部への降雨浸透のメ

カニズムの解明を目的として、カセサート大学（タイ）との共同プロジェクトとして、タイのナコンナヨック、およびプーケットにおいて、それぞれ 2007 年 9 月、2011 年 7 月より原位置計測を行ってきた。

本研究では、原位置計測結果をもとにして、ナコンナヨックとプーケットの地質の違いが土砂災害早期警戒体制にどのように影響するかを検討する。

また、これまでに Ohtsu ら⁴⁾は斜面崩壊の一つである不飽和領域における浅層崩壊に着目し、斜面安定性評価の前段階として、降雨時における雨水の流出浸透挙動を予測する手法として、不飽和領域を考慮した拡張型マルチタンクモデルを提案してきた。さらに各計測サイトで得られた観測結果を適用することでそのモデルの妥当性、および適用範囲について検証してきた。

Hotta⁵⁾は表層タンクのパラメータ同定をカルマンフィルタの原理を用いて行い、実斜面における観測値との比較・検討により高い精度で降雨時における法尻部の流出挙動を表現した。一方で、中腹流出量および中腹浸透量については、観測値と解析結果に差が見られた。

そこで、本研究ではパラメータ同定手法の改良を行い、解析結果をもとに 3 連マルチタンクモデルの適用性を検討する。

土砂災害早期警戒体制については、具体的には JR 総研が提案する図 1.3 に示すような警戒体制が一般的である。近年日本においても多発している図 1.2 に示すような短期間集中豪雨に対しては、図 1.3 における領域 2 における規制基準値が重要になってくる。そこで、本研究では深さ 0.5m から数 m において崩壊が生じる斜面浅層崩壊を対象として、領域 2 に適用可能な警戒基準値について検討する。また、土砂災害早期警戒体制に用いられている指標は様々であり、本研究では原位置計測結果に基づきそれらの降雨指標の適用性についても検討する。NEXCO や JR では、長期降雨指標として連続雨量、短期降雨指標として時間雨量を用いて、通行規制、および運転規制を行っている。連続雨量というのは、降雨開始からの累積雨量の事である。どこまでを一連の降雨とするかによって連続雨量の値は異なってくるが、本研究では 6 時間無降雨でリセットされるものを連続雨量 1、12 時間無降雨でリセットされるものを連続雨量 2 と総称し、その 2 種類の連続雨量について検討する。

上述したように、連続雨量や時間雨量を降雨指標として用いるのが一般的であるが、Soralump⁶⁾はタイにおける過去の斜面崩壊事例の分析結果から、斜面内部

において体積含水率が高まっている場合には，豪雨発生直後，すなわち対象とする降雨の累積降雨量が微小な場合にも，斜面崩壊が発生する危険性を指摘している．つまり，上述した降雨量のみを反映した方法には，問題があることを示唆している．このため，Soralump⁶⁾は斜面崩壊において降雨の先行履歴効果を考慮するため，式(1.1)で算出される先行履歴降雨指標（Antecedent Precipitation Index：以下，API)を用いた早期警戒体制を提案し，現在タイで使用されている．

$$API_t = (K_t \times API_{t-1}) + P_t \quad (1.1)$$

ここに， API_t [mm]および API_{t-1} [mm]は，それぞれある日 t ，およびその 1 日前時点 $t-1$ での先行履歴降雨指標を， K_t は低減率， P_t [mm/day]はその日の日雨量を表す．この関係式のもつ物理的な意味は，右辺第 1 項が，斜面内部で先行降雨により体積含水率が高まっている影響を表現するものである．なお，式(1.1)における低減率 K_t は，後に紹介する日本において適用されている実効雨量の減少係数 a_n と本質的には等価である．しかし，Soralump の方法において，低減率 K_t はタイの公的機関によって発表される 1 日当たりの降雨量から蒸発量を除いた量と降雨量の比が適用されている．Soralump が API を提案する背景は，図 1.4 を用いて以下のように要約される．限界降雨包絡線といった既存の理論では，図 1.4(a)に示すように，降雨の開始を点 O としてスネーク曲線を描く．しかし，先行降雨がある場合には，同図に示すように土砂災害発生危険基準線に到達する前に斜面崩壊が生じた例がある．この問題を解消するために，API という概念を導入して，図 1.4(b)に示すように，降雨の開始を点 O から点 S に移行させて，降雨の先行履歴効果を考慮している．

実効雨量は土砂災害の発生に及ぼす先行降雨の影響を考慮した積算雨量のことで，式(1.2)で算出される．

$$R_t = r_t + \sum_{n=1} a_n \cdot r_{t-n} \quad (1.2)$$

$$a_n = 0.5^{n/T}$$

ここに、 $R_t[\text{mm}]$ は時刻 t の実効雨量、 $r_t[\text{mm/hr}]$ は時刻 t の時間雨量、 a_n は減少係数、および $T[\text{hr}]$ は半減期を示す．計算期間については、実効雨量への影響を考慮して、減少係数 0.004 以上になる期間が目安となる．

この実効雨量を考慮した土砂災害早期警戒体制として代表的なものに、**図 1.5**に示すような総合土砂災害対策検討委員会による手法(提言案)がある．この手法は、地表および地中の水分量を表す 2 種類の実効雨量によって基準雨量を設定するもので、実効雨量の半減期は鈴木ら⁷⁾によるタンクモデル貯留高の推移特性と類似するように、1.5 時間および 72 時間を採用している．また、JR 東日本においては、**表 1.1**に示すように被災対象を浸食・表層崩壊・深層崩壊の 3 種に分類し、それら各々に対して別々の実効雨量を用いて規制値を決定している．ただし、地表および地中水分量の変化傾向は斜面の地質に依存することから、地質が変わると地中の水分量を表現できなくなるという問題点もある．本研究では、半減期が 1.5 時間、6 時間、24 時間、72 時間の実効雨量について検討する．

本研究では、タイのプーケットとナコンナヨックにおける原位置計測結果を用いてこれら各種降雨指標の適用性を検討する．

1.4 本論文の構成

本論文の構成は全 5 章からなる．

第 1 章において、序論として研究の背景、目的、および既往の研究との関連について述べた．

第 2 章では、タイにおける原位置計測の概要を説明したのち、第 3 章で述べるタンクモデル解析に用いるインプットデータ、および観測値の算定方法について説明する．

第 3 章では、本研究で用いる 3 連マルチタンクモデルの概要、およびそのパラメータ同定手法について説明し、実際の斜面における計測データを用いて、タンクモデル解析をおこなった結果について検討する．

第 4 章では、間隙圧の原位置計測結果に基づいて、各種降雨指標の適用性について検討する．また、具体的な警戒体制について提案をおこなう．

第 5 章では、第 3 章で検討した拡張型タンクモデル、および第 4 章で検討した降雨指標と警戒体制に関するまとめと今後の課題について述べる

第 2 章 原位置計測

2.1 タイにおける原位置計測の概要

2.1.1 ナコンナヨックにおける原位置計測

ゲリラ豪雨のような局所的短期間集中降雨時の，斜面における雨水流出および雨水浸透のメカニズムの解明を目的として，タイ・バンコクの北東約100kmの地点に位置するナコンナヨックの道路脇斜面において2007年9月から原位置計測を行っている．当該斜面に関しては集中豪雨により04年8月に崩壊が発生し，これを埋め戻した斜面である．

計測器配置に関する断面図，および平面図を図 2.1，および図 2.2 に示す．同図に示すように，当該斜面では，土壌水分計，テンシオメータ，および雨量計を設置して，それぞれ体積含水率，間隙圧，表面流出量，および降雨量を計測している．また，当該斜面における斜面全体の集水面積は 575m^2 であり，中腹部の集水面積は図 2.2 における $A_2=150\text{m}^2$ ，法尻部の集水面積は $A_3+A_4=425\text{m}^2$ とする．なお，2010 年よりそれぞれの計器の計測間隔が，無降雨時には 10 分間であり，降雨時のみ 1 分間となるように自動制御している．

ここで，当該斜面の地質は，中生代ジュラ紀から白亜紀の流紋岩の風化帯からなっており，表層部は高温多湿の条件下での強風化によって粘土化したものである．また，室内試験によって得られた当該斜面の力学特性を表 2.1 に示す．透水特性については，表層部の飽和透水係数は， $10^{-5}\sim 10^{-6}\text{ cm/sec}$ であった．図 2.3⁸⁾ に斜面中腹部 GL-0.6m，GL-1.0m および法尻部 GL-0.6m，GL-1.0m における粒径加積曲線を示す．なお，土の粒径にはふるい分けだけでは分析できない細粒分が多く含まれているため，ふるい分け分析およびストークスの法則にもとづく水沈降分析によって粒度分析を行っている．粒度分布は斜面法尻部 GL-0.6m 以外 D_{50} が約 0.03mm 以下であることから斜面を構成している地質は細粒分が卓越していると判断される．しかし，法尻部 GL-0.6m のように法尻部の浅い領域においては，部分的にかなりレキおよび砂が混入している箇所もある．また，図 2.4⁸⁾ に三角座標による分類を示す．この結果から，中腹部 GL-0.6m は礫まじり砂質細粒土，中腹部 GL-1.0m は砂質細粒土，法尻部 GL-0.6m は粘性土質砂質礫，法尻部 GL-1.0m は砂礫まじり細粒土で構成されていると推定される．

土壌水分計に関しては多点式土壌水分計を用いて計測をおこなっていた。しかし、多点式土壌水分計は棒状の形をしており、差し込んでいるまわりの土も締め固められていないことから、降雨時に水分計に沿って雨水が流れてしまい、土壌の水分量を適切に把握できないという問題点が認められた。よって本研究においては、土壌水分計の解析結果は用いていない。

斜面に建設されている水路に対して V ノッチを設置し、V ノッチからの越流水位を水位計により計測している。なお、越流水位と表面流出量の関係は JIS B 8302 のせき式流量公式に定められる次式を用いている。

$$Q=0.00084\times H^{2.5} \quad (2.1)$$

ここに $Q[\text{m}^3/\text{min}]$ は表面流出量， $H[\text{cm}]$ は越流水位を表している。

2.1.2 プーケットにおける原位置計測

プーケットにおける原位置計測は、プーケット島南西部カタ地区のカタ小学校に近接する切取り道路斜面において 2011 年 7 月から行われている。原位置計測に先立ち実施した風化の度合いを知るための比抵抗電気探査を図 2.5 に示す側線 A ～D および側線 2～4 に沿って実施したところ、図 2.6 に示すような結果が得られ、当該サイトは花崗岩の風化により場所的不均一性が高いことが確認される。本研究では側線 3 と側線 4 の間に測定断面を設けていることから、ここでは代表的なものとして側線 C、側線 3、側線 4、における電気探査結果を示す。また、図 2.7 に示すテスト孔から採取された供試体を用いて KU 多段階せん断試験を行ったところ表 2.2 に示す結果が得られた。粘着力および内部摩擦角は、供試体が破壊された際のせん断応力と垂直応力の関係を拘束圧を変えることで応力平面に 3 点プロットし、そこに近似線を引くことによって求めている。また、有効粘着力および有効内部摩擦角と飽和度の関係を図 2.8 に示す。この図によると、各深度とも飽和度が上昇するにつれて有効粘着力、有効内部摩擦角どちらも減少し、土のせん断強さが減少することを示している。テスト孔から採取された供試体を用いて SWCC のテストを行った結果を図 2.9、図 2.10 に示す。この図をみると、中腹部・法尻部ともに深部にいくほど低サクションにおける体積含水率の値が高くなり、深部へいくほど SWCC の勾配が急になっている。この結果は、斜面の表層ほど風

化が進行しているため粒度が小さくなり，それによって体積含水率の変化に対するサクションの変化が小さくなるということを表していると考えられる．

計測器配置に関する断面図，および平面図を図 2.11，図 2.12 に示す．同図に示すように，当該斜面では，土壌水分計，テンシオメータ，水位計，および雨量計を設置し，それぞれ体積含水率，間隙圧，表面流出量，および降雨量を測定している．また，当該斜面全体の集水面積は 30.15m^2 であり，本研究では法尻部が斜面全体の 4 分の 1 であると考え，法尻部の集水面積を 7.5375m^2 としている．

ブーケットにおいてもナコンナヨックと同様にそれぞれの計器の計測間隔が，無降雨時には 10 分間，降雨時のみ 1 分間となるように自動制御している．

当該地域の地質条件はナコンナヨックと異なり，カタ花崗岩と呼ばれる花崗岩により構成されており，法尻部の飽和透水係数は $5.48 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ であった．

図 2.5 に示す配置図に従い，ハンドオーガーサンプリングによって採集した供試体を用いて室内試験が行われ，それによって得られた結果から作成された粒径加積曲線，塑性図，三角座標による分類をそれぞれ図 2.13，図 2.14，図 2.15 に示す．それぞれについて，測定断面に近い B3, B4, C3, D3 における図を示す．まず，粒径加積曲線は各地点・各深度ともに粒径幅が広く，ほぼ均質な傾向を示しており，これは当該斜面の地質の組成が表層から深部まで等しいことを示している．次に塑性図による分類によると，斜面中腹部（測線 B 上）は低液性限界のシルトで比較的透水性が高く，一方，斜面法尻部（測線 C・D 上）にむかうに従って高液性限界の粘土で透水性のやや低い土が混在している結果を示した．また，B から D にかけて，つまり中腹から法尻にいくにつれて深さ方向でバラつきが見られることから，中腹部よりも法尻部の方が深さ方向で透水性に乱れがあることがわかる．三角座標による分類では，中腹部の地質は図 2-15 (a)，(b) に示すように深度ごとにやや不均質であるが，おおむね細粒分質礫質砂(SFG)もしくは礫まじり細粒分質砂(SF-G)で構成されていると推定される．一方，法尻部は深部まで比較的均一であり細粒分質礫質砂(SFG)に分類される．

2.2 タンクモデル解析で用いる各種観測値の算定

本研究においては，3 章で述べるような拡張型マルチタンクモデルによる解析をタイ・ブーケットにおける実際の斜面に適用することで，斜面表層部における

雨水の流出浸透特性を把握しようと試みている．その過程で，あらかじめ設定しておく必要がある欠損雨量，観測値として用いる流出量および浸透量について述べる．

2.2.1 欠損雨量の算定

実際の斜面は表層部に木や草などの植物が生えており，それらの植物が流出の妨げとなるので，流出の開始は降雨の開始時間から遅れて生じる．この植生による影響を考慮しているのがタンクモデルの流出孔までの高さ H であり，欠損雨量と呼ばれる．斜面にタンクモデルを適用する際は，それぞれのタンクの流出孔までの高さ H をあらかじめ設定する必要がある．2012 年に観測された降雨に関して 1 雨の累積雨量および総流出量をそれぞれプロットしたものに線形近似を適用すると，図 2.16 のようになる．この図に示すように各降雨の累積雨量と総流出量は概ね近似線に沿うかたちとなることから，欠損雨量は各々のタンクで一様に近似線の X 切片の値・2.7mm とした．

2.2.2 流出量の算定

斜面法尻部における流出量は，以下に示す式(2.2)によって単位変換した 1 分間流出量を加算して求めた 10 分間流出量を用いる．

$$q_R = \frac{Q_R}{7.5735} \quad (2.2)$$

ここに q_R [mm/1min] は法尻部の流出量， Q_R [L/1min] は計測された表面流出量，7.5735 はプーケットの計測サイトにおける法尻部の集水面積で単位は[m²]である．法尻部における流出量は第 3 章でタンクモデル解析を行う際の観測値として用いる．

2.2.3 浸透量の算定

浸透量は，既往の研究においては時系列ノッチ逆算浸透量が用いられてきたが，本研究ではシングルタンクモデル解析によって得られた解析浸透量を用いた場合の解析結果に関して考察を行う．

まず、既往の研究に用いられてきたノッチ逆算浸透量としては、式(2.3)によって算出される1分間浸透量を加算して求めた10分間浸透量を用いる。浸透量は降雨量から流出量を引いたものであるという観点から、斜面中腹部の浸透量を求めている。

$$q_I = q_P - q_R$$

$$\text{ただし, } q_R = \frac{Q_R}{30.15} \quad (2.3)$$

ここに、 q_I [mm/1min]は浸透量、 q_P [mm/1min]は降雨量、 q_R [mm/1min]は中腹部の流出量、 Q_R [L/1min]は計測された表面流出量、30.15はプーケットの斜面全体の集水面積で単位は[m²]である。

次に、シングルタンクモデル解析によって求める解析浸透量について説明する。

シングルタンクモデルというのは、図 2.17 に示すように斜面表層の水収支をタンク1つで表現するもので、 P は降雨量、 E は蒸発量、 X はタンクの貯留量、 H は流出孔までの高さ、 α は流出係数、 β は浸透係数を表す。

このタンクモデルにおいて、流出量、および浸透量は式(2.4)、式(2.5)を用いてそれぞれ算出される。

$$\text{If } \begin{cases} X - H \leq 0 \\ X - H > 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} q_R = 0 \\ q_R = \alpha \cdot (X - H) \end{cases} \quad (2.4)$$

$$q_I = \beta \cdot X \quad (2.5)$$

q_R [mm/1min]は表面流出量、 q_I [mm/1min]はタンクから斜面内部への浸透量である。

本研究では、このシングルタンクモデル解析で得られた浸透量は、斜面全体の平均的な浸透量すなわち斜面中腹部における浸透量と同等と考え、その解析結果を、タンクモデル解析を行う際に観測値として用いる中腹浸透量としている。

シングルタンクモデル解析を行うには、欠損雨量（流出孔までの高さ） H 、流出係数 α および浸透係数 β をあらかじめ設定しておく必要がある。欠損雨量については、2.2.1で述べた方法と同じように2.7mmと設定し、流出係数 α は0.15、

浸透係数 β は 0.12 と設定し、解析を行った。流出係数および浸透係数は、気象庁が土砂災害の危険性を予測する際に、斜面表層部の水収支および土壌中の水分量を推定することを目的として現在実際に使用している、直列 3 段タンクモデルにおける最上段の流出係数および浸透係数の値を用いた。シングルタンクモデルを 9 月 12 日の降雨に適用した流出量の結果を図 2.18 に示す。この図をみると、シングルマルチタンクモデルは高い精度で流出量の観測値を表現できていることが分かる。

また、シングルタンクモデル解析では図 2.19 のピンクの領域に示すような表層貯留量を考慮することができる。この表層貯留量は斜面表面の凹凸や斜面表層数 cm の間隙に蓄えられる水分量とみなすことができ、実際の斜面表面における水収支をより厳密に表現している。さらに、この表層貯留量は降雨後に浸透量に置き換わることで図 2.19 にも示すように降雨後にも浸透が発生し、斜面崩壊が降雨後に生じやすいということも表現している。このように、表層貯留量を新たに考慮することが可能な点で、逆算浸透量よりもシングルタンクモデル解析の結果を観測値として用いる方が適切であると本研究では考える。よって、本研究ではシングルタンクモデル解析の結果を 3 章において説明する 3 連マルチタンクモデル解析を行う際の観測値として用いることとする。

第 3 章 斜面表層に対するタンクモデル解析の適用

本章では、タイ・プーケットで計測されたデータを使用して、プーケットの斜面表層部における拡張型マルチタンクモデルを適用した結果について考察する

3.1 3 連マルチタンクモデルの概要

タンクモデルは 1972 年に菅原⁹⁾によって考案された広域を対象とした流出計算手法であり、簡易に各流域の水収支および水循環を表現することを可能とするモデルである。このタンクモデルの基本概念を拡張し異なる形状のタンクを組み合わせることで、斜面における表面流出、浸透および地下水位の変動を表現することを目的に考案されたのがマルチタンクモデルである。高橋ら¹⁰⁾は斜面リスク評価の一環として、降雨時における地下水位の変動をマルチタンクモデルの適応により予測した。このタンクモデルを改良し、斜面不飽和領域における土壌水分量の変動を予測することを可能としたのが拡張型マルチタンクモデルである。

本研究で用いる 3 連マルチタンクモデルは拡張型マルチタンクモデルの 1 種であり、図 3.1 に示すように斜面表層を 3 つのタンクが連なったものとみなして斜面表層の水収支を表現しようと試みたモデルである。図 3.1 において、 P は降雨量、 E は蒸発量、 X は各タンクの貯留量、 H は流出孔までの高さ、 α は流出係数、 β は浸透係数を表す。また、 U, M, L はそれぞれ斜面の上段(Upper), 中段(Middle), 下段(Lower)を表す添え字である。また、3 連マルチタンクモデルでは 1 雨に対し、各パラメータは時間的に変化せず一定値を用いて降雨時の斜面における雨水の流出浸透挙動を表現する。

このモデルの特徴としては、タンクを斜面上段、中段、下段の 3 箇所に配置しているため、斜面の法肩部、中腹部、法尻部それぞれにおける降雨の際の斜面への浸透量を推定することができるということが挙げられる。

このタンクモデルにおいて、流出量、および浸透量は式(3.1)、式(3.2)を用いてそれぞれ算出される。

$$\text{If } \begin{cases} X_i - H_i \leq 0 \\ X_i - H_i > 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} q_{R,i} = 0 \\ q_{R,i} = \alpha_i \cdot (X_i - H_i) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$q_{L,i} = \beta_i \cdot X_i \quad (3.2)$$

$q_{R,i}$ [mm/10min]は表面流出量， $q_{L,i}$ [mm/10min]はタンクから斜面内部への浸透量である． $i=U, M, L$ で，つまり上段，中段，下段それぞれ上式を用いて算出される．

3.2 3連マルチタンクモデルのパラメータ同定手法

3連マルチタンクモデルにおいては，逆解析手法のひとつであるカルマンフィルタの概念を用いて未知パラメータの抽出を行い，誤差計算をすることにより最適パラメータを求める．以下でそのパラメータ同定の過程について説明する．

3.2.1 カルマンフィルタ

カルマンフィルタは，未知パラメータがある離散型の状態変化において線形方程式に従っている場合に適用することができる．今，ある状態 t から状態 $t+\Delta t$ に遷移する場合には，式(3.3)の状態方程式を用いて表すことができる．また状態 $t+\Delta t$ に遷移した後にある観測値が与えられた場合には，式(3.4)の観測方程式を用いて未知パラメータを更新することで最適なパラメータを求めることができる．

$$X(t+\Delta t) = A(t)X(t) + B(t)U(t) + \mu(t) \quad (3.3)$$

$$Y(t+\Delta t) = C(t+\Delta t)X(t+\Delta t) + \varepsilon(t) \quad (3.4)$$

ここに $X(t)$ は未知パラメータ， $Y(t)$ は観測値， $A(t)$ は遷移行列， $B(t)$ ，および $U(t)$ は既知ベクトル， $C(t)$ は観測行列， $\mu(t)$ はシステムノイズ，および $\varepsilon(t)$ は観測ノイズである．カルマンフィルタの観測方程式に必要な観測値として，本研究では下段タンクの側孔からの流出量，および中段タンクの底孔からの浸透量を対象とする．

ここで，表層タンクにおける水収支の関係式を式(3.5)から式(3.7)に示す．

$$\frac{dX_U}{dt} = (P - E) - \alpha_U \cdot (X_U - H_U) - \beta_U \cdot X_U \quad (3.5)$$

$$\frac{dX_M}{dt} = (P - E) + \alpha_U \cdot (X_U - H_U) - \alpha_M \cdot (X_M - H_M) - \beta_M \cdot X_M \quad (3.6)$$

$$\frac{dX_L}{dt} = (P - E) + \alpha_M \cdot (X_M - H_M) - \alpha_L \cdot (X_L - H_L) - \beta_L \cdot X_L \quad (3.7)$$

また、前述したようにカルマンフィルタの概念は、未知パラメータがある離散型の状態変化において線形方程式に従っている場合に適用することができるが、拡張型マルチタンクモデルにおける構成式は非線形であるため、本研究ではテーラー展開によって線形化を行っている。

$X(t)$, $\alpha(t)$, $\beta(t)$ はテーラー展開を用いて式(3.8)から式(3.10)で表される。なお、2次以上の微小項は無視している。

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \Delta t \cdot \frac{dX(t)}{dt} \quad (3.8)$$

$$\alpha(t + \Delta t) = \alpha(t) + \Delta t \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt} \quad (3.9)$$

$$\beta(t + \Delta t) = \beta(t) + \Delta t \cdot \frac{d\beta(t)}{dt} \quad (3.10)$$

ここで、表層タンクにおける雨水流出過程、および浸透過程のカルマンフィルタの各行列式は以下の形で表される。

$$X(t) = \left[\frac{dX_U}{dt} \quad \frac{dX_M}{dt} \quad \frac{dX_L}{dt} \quad \frac{d\alpha_U}{dt} \quad \frac{d\alpha_M}{dt} \quad \frac{d\alpha_L}{dt} \quad \frac{d\beta_U}{dt} \quad \frac{d\beta_M}{dt} \quad \frac{d\beta_L}{dt} \right]^T \quad (3.11)$$

$$Y(t) = \left[\frac{dq_{I,M}}{dt} \quad \frac{dq_{R,L}}{dt} \right]^T \quad (3.12)$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} -(\alpha_U + \beta_U) & 0 & 0 & -(X_U - H_U) & 0 & 0 & -X_U & 0 & 0 \\ \alpha_U & -(\alpha_M + \beta_M) & 0 & (X_U - H_U) & -(X_M - H_M) & 0 & 0 & -X_M & 0 \\ 0 & \alpha_M & -(\alpha_L + \beta_L) & 0 & (X_M - H_M) & -(X_L - H_L) & 0 & 0 & -X_L \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$B(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.14)$$

$$C(t) = \begin{bmatrix} 0 & \beta_M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_M & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_L & 0 & 0 & X_L & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$U(t) = \begin{bmatrix} (R-E) - \alpha_U \cdot (X_U - H_U) - \beta_U \cdot X_U \\ (R-E) + \alpha_U \cdot (X_U - H_U) - \alpha_M \cdot (X_M - H_M) - \beta_M \cdot X_M \\ (R-E) + \alpha_M \cdot (X_M - H_M) - \alpha_L \cdot (X_L - H_L) - \beta_L \cdot X_L \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

上述した流出浸透計算の行列式において，表層部における下段タンクの流出量の差分，および中段タンクの浸透量の差分を数値解析のインプットデータとして与え，逆解析によって流出係数 α ，および浸透係数 β のパラメータセットを得る．この際にインプットデータとして，2章で述べた観測流出量および解析浸透量を与える．こうして得られたパラメータセットの中で， $0 < \alpha < 1$ かつ $0 < \beta < 1$ を満たすものだけを抽出し，3.2.2で説明する誤差計算に代入するパラメータセットとする．

3.2.2 誤差計算

まず，カルマンフィルタで得られたパラメータセットをそれぞれタンクモデルに代入し，解析流出量，および解析浸透量を得る．そして，観測値と解析値の誤差の和，および最大値を計算し，それぞれのパラメータセットの偏差値を式(3.17)で求める．ここでは， n 個のパラメータセットが得られているとする．

$$y_i = \frac{10(x_i - \mu_i)}{\sigma_i} + 50 \quad (i=1 \sim n) \quad (3.17)$$

ここに， y_i は偏差値， x_i は誤差， μ_i は誤差の平均， σ_i は誤差の標準偏差を表す．

最後に，式(3.18)で偏差値の和を求め，その和が最小となるパラメータセット i を最適パラメータとする．

$$z = \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.18)$$

ここに， y_i はそれぞれの偏差値， z は偏差値の和， n はパラメータの個数を表す．

3.3 実斜面への適用結果および考察

本研究においては，タイ・プーケットの実斜面に対して3連マルチタンクモデルを適用し，表3.1に示すような2012年にプーケットにおいて観測された7降雨を対象にタンクモデル解析を行った．

まず，これら7降雨に対してシングルタンクモデル解析の結果を用いて3連マルチタンクモデル解析をおこなった結果の比較を図3.2に示す．本研究では，法尻部の流出量，および中腹部の浸透量をパラメータ推定の際のインプットデータ，および誤差計算の際の観測値として用いているため，図3.2では法尻部の流出量・中腹部の浸透量の観測値と解析値を示す．この図をみると，タンクモデルが法尻流出量，中腹浸透量ともに高い精度で観測値を表現できている．つまり，3連マルチタンクモデルによって斜面表層の水収支が表現できることが分かる．

次に，解析によって得られたパラメータについて述べる．3連マルチタンクモデル解析をおこなって得られた最適パラメータを表3.2に示す． α は流出係数， β は浸透係数を表し， U ， M ， L はそれぞれ斜面の上段(Upper)，中段(Middle)，下段(Lower)を表す添え字である．また，タンクモデル解析で用いるインプットデータや観測値として法尻部の流出量と中腹部の浸透量を用いていることから，それらに最も影響を与える下段タンクの流出係数と中段タンクの浸透係数を信頼のかけ

る値と考え，その 2 箇所の係数について検討する．まず，パラメータの傾向をみる為に，最大 10 分間雨量，降雨の立ち上がりにおける 10 分間最大増加雨量（最大勾配），および累積雨量とそれぞれの係数の相関図を図 3.3 に示す．流出係数に関しては，相関性がみられるものはない．一方，浸透係数に関しては最大勾配および最大 10 分間雨量と右肩下がりの相関がみられた．このことは降雨強度が増大すると浸透係数が減るということ，すなわちホートンの提案する浸透能式が表す降雨による浸透能の減少を表現している可能性があると考えられる．しかし，傾向を読み取るにはプロット数が少ないので，今後さらに解析を行うことでプロット数を増やし傾向を探る必要がある．

つづいてパラメータの値に関して検討する．中段タンクの流出係数はどれもシングルタンクモデルにおける浸透係数である 0.12 よりも大きい値となった．その原因はインプットデータとして用いる中腹浸透量を算出したシングルタンクモデルは 1 分間隔で解析を行っているのに対し，3 連マルチタンクモデルは 10 分間隔で解析を行っているという点にある．タンクモデルはある一定間隔毎の水収支をその都度タンクで計算することはできるが，時々刻々と絶え間なく起こる流出や浸透によるタンク内の貯留量の変化を考慮できていない．また，その貯留量の誤差は解析を行う間隔が広がれば大きくなる．それが原因で中腹の浸透係数が 0.12 よりも大きくなったと考えられる．そのことを踏まえて，11 月 21 日に発生した降雨に関して 1 分間隔で 3 連マルチタンクモデル解析を行った法尻流出量および中腹浸透量の結果を図 3.4 に示す．この結果をみると，中腹浸透量は観測値を高い精度で表現できている．しかし，法尻流出量は 1 分間雨量が大きくなっていく際には流出量が発生するものの，それ以外の期間では流出量は 0 になった．降雨量が増加する際に流出が発生するのは，パラメータを推定する際のインプットデータとして降雨の立ち上がりの流出量を使用しているからだと考えられる．降雨の立ち上がり以外で流出量が 0 になるのは，下段タンクに雨水が集まらないからであると推察される．3 連マルチタンクモデルにおいては，斜面中腹部に降った降雨の影響が法尻流出量として生じるのには時間差が生じるが，実際のプーケットの斜面は小さい為，降雨による雨水供給と流出の発生に時間差はあまりない．それにより高強度の降雨の影響による法尻流出量が 1 分間隔の 3 連マルチタンクモデルでは現れないと考えられる．しかし，まだ 1 降雨についてしか 1 分間隔ではタンクモデル解析を行えていないので，今後さらに解析数を増やして結果を吟

味していく必要がある．

さらに，係数のばらつきの原因としては，欠損雨量が降雨によって変化しているということが以前から指摘されている．累積雨量と総流出量の間に図 2.16 に示すような線形関係が成り立つとすると，流出比は式(3.19)で表される

$$\frac{Q}{X} = a + \frac{b}{X} \quad (3.19)$$

ここに， $Q[L]$ は総流出量， $X[mm]$ は累積雨量， a は近似線の傾き， b は近似線の y 切片である．ここで b は欠損雨量の変化に伴い値が変化する，つまり，流出比すなわち流出係数は欠損雨量が変化すると変動する．そしてそれは累積雨量 X が小さければ顕著となることが式(3.19)から分かる．

以上のように，欠損雨量がパラメータのばらつきに関与している可能性も踏まえて今後 3 連マルチタンクモデルによって解析する降雨数をさらに増やし，最適パラメータの傾向を探っていく必要がある．

最後に，プーケットの斜面における透水性を把握するために，解析で得られた法尻部と中腹部の解析浸透量の比較を図 3.5 に示す．これら図から，降雨によって多少の差はあるものの，全体的に法尻部と中腹部の浸透量にそれほど大きな違いはないということが分かる．ここで，斜面浅層崩壊ですべり面が生じる可能性のある GL-0.6m における体積含水率を法尻部と中腹部で比較した図 3.6 をみると，体積含水率は中腹部よりも法尻部が顕著に増加していることが分かる．つまり，地盤内に入った雨水の量に大きな差はないにもかかわらず，法尻部の方が土壌に水分を蓄えていることになる．さらに，中腹部と法尻部の間隙圧の推移を示した図 3.7 をみると，法尻部の方が水分を蓄え降雨後高い間隙圧を保っていることが分かる．ここで，4 章で詳しく説明するが間隙圧とは間隙水圧とほぼ同じものであり，斜面の危険性を高める要因である．これらのことから，法尻部の方が中腹部よりも雨水を貯留しやすく，豪雨時の斜面浅層崩壊の危険性がより高いということがいえる．

以上のことから，4 章では豪雨の際より危険な状態になりやすい法尻部において間隙圧との相関性をみることで，土砂災害早期警戒体制に用いられている各種降雨指標の適用性を検討する．

第 4 章 各種降雨指標の検討

前章では、タイ・プーケットの実斜面における 3 連マルチタンクモデル解析の適用結果と原位置計測結果より、中腹部よりも法尻部の方が斜面崩壊の危険性が高いということが分かった。そのことを踏まえ、本章では法尻部における間隙圧の原位置計測結果にもとづき、土砂災害警戒態勢に用いられている各種降雨指標の適用性について検討する。間隙圧の計測されている位置から、本研究では斜面浅層崩壊を対象としている。

4.1 間隙圧

本研究では、斜面内部における間隙圧の上昇が斜面崩壊の原因となると考え、その間隙圧と各種降雨指標に相関性があるかどうかを調べることで各種降雨指標の妥当性を検討する。それに伴いまず、間隙圧が斜面の安定性にどのように関与しているのかを本節で説明する。

間隙圧とは間隙水圧と間隙空気圧の和を表しているが、本研究では間隙空気圧は大気圧と等しいと仮定しているので、間隙圧は間隙水圧と同等とみなせる。以下本研究では間隙圧という言葉を用いて議論する。

本研究で着目する豪雨時の斜面崩壊は斜面浅層・不飽和領域における非円弧すべりが多く、そのような場合の斜面の 1 つのスライスにおける安全率は式(4.1)のように表される¹¹⁾。

$$F_s = \frac{c' + (\gamma H - u_w) \cos^2 \alpha \tan \phi'}{\gamma H \sin \alpha \cos \alpha} \quad (4.1)$$

ここに、 F_s は安全率、 c' [kPa] は有効粘着力、 u_w [kPa] は間隙水圧、 ϕ' [°] は有効内部摩擦角、 α [°] は傾斜角、 γ [kN/m³] は土の単位体積重量、 H [m] はすべり面深さを示す。式(4.1)をみると、間隙圧が上昇すると斜面の安全率は減少し、斜面崩壊の危険性が増すということが分かる。そのような斜面崩壊の危険性を左右する間隙圧の変化を正しく評価できる降雨指標が土砂災害早期警戒体制における降雨指標であると本研究では考え、以下各種降雨指標と間隙圧の相関性を調べることで、

それぞれの降雨指標の適用性について検討する。

4.2 プーケットにおける各種降雨指標の検討

本節では、タイ・プーケットの原位置計測によって得られた間隙圧と各種降雨指標の相関性を調べることで、風化の度合いが不均質な自然斜面に近い花崗岩質の斜面における各種降雨指標の適用性について検討する。計測データについては、2012年の8月31日から12月6日までに計測された法尻部における間隙圧のデータを用いる。

4.2.1 実効雨量の検討

実効雨量は1.3においても述べたように、土中の水分量が半分になるのに要する期間である半減期を考慮し、地盤内の水分量の減少を表現することができる指標である。つまり、実効雨量の有用な点は地盤の危険性の減少を時々刻々で評価できるので、規制解除を正しいタイミングで行うことができる点である。

本研究で検討対象とするのは、半減期が1.5時間・6時間・24時間の実効雨量であり、それぞれの実効雨量と法尻部における深さ20cm, 60cm, 100cm, の間隙圧との同時刻における相関図を図4.1に示す。この図をみると、GL-0.6mの間隙圧が最大でも-1ほどにしか上昇しておらず、危険な状態になりにくいことが分かる。よって、以下本論文ではプーケットにおけるGL-0.6mの間隙圧との相関性は検討対象から省くこととする。図4.1(a)をみると、半減期1.5時間実効雨量はどの深さの間隙圧とも相関がみられない。また、実効雨量の値が5を下回るような非常に小さい値の時もGL-0.2m, GL-1.0mにおいて間隙圧が正圧を示していることから、半減期が1.5時間では実効雨量の減少が早すぎるために、地盤内の間隙圧の減衰を正しく評価できていないことが分かる。ただし、JR東日本における警戒体制にもあるように半減期1.5時間実効雨量は浸食に対する指標である。ここで、斜面浸食というのは結合力の弱まった地表の土粒子を表面流が運搬することによって生じ、表面流出量が浸食に及ぼす影響は大きいと考えられる。そこで、半減期1.5時間実効雨量と表面流出量の推移を図4.2に示す。この図をみると、実効雨量は表面流出量の値の変化に呼応している。つまり、半減期1.5時間実効雨量は浸食の危険性を判断する指標としては適切であるということが分かる。

図 4.1(b)および図 4.1(c)をみると、GL-0.2m、GL-1.0m において実効雨量と間隙圧の間に正の相関がみられる。しかし、半減期 24 時間実効雨量の相関は異なる領域にプロットされており、間隙圧が低い際にも実効雨量が大きな値を示す場ことがあることが分かる。これは降雨量が大きくなると、実効雨量の減少が間隙圧の減少よりも遅くなってしまうことを表している。この事は、規制解除を遅らせる原因となりうる。また、9 月 26 日に発生した降雨の際の間隙圧および半減期 6 時間・半減期 24 時間実効雨量の推移を図 4.3 に示す。この図をみても、連続する降雨によって半減期 24 時間実効雨量は値が大きくなり、減少していく際に間隙圧の挙動を適切に表現できていない事が分かる。

以上のことから、半減期 6 時間実効雨量が GL-1.0m における間隙圧の変化を最も表現できており、プーケットのような花崗岩質の斜面における浅層崩壊に適した指標であるということがいえる。GL-0.2m は本研究で対象とする斜面浅層崩壊が起こる深さではないので、以降 GL-1.0m に着目して降雨指標の検討を行うこととする。

4.2.2 API の検討

API は 1.3 においても述べたように、流出を考慮せずに蒸発散量を考慮した係数を用いることで、1 日毎にその時の地盤内に存在する水分量を表現しようとする指標である。GL-1.0m における間隙圧と同時刻の API の相関図を図 4.4 に示す。この図をみると、間隙圧と API の間には正の相関がみられ、API は GL-1.0m における間隙圧の変化を表現できていることが分かる。また、API と間隙圧の推移を示す図 4.5 をみると、間隙圧を正しく評価できていることが分かる。ただし、間隙圧が -1 を下回るような小さい場合でも API が 100 を超える高い値を示している場合もあり、API が地盤内の間隙圧を過大評価していることが分かる。その原因は GL-1.0m における間隙圧の消散が 1 日単位では早いのに対し、API は減少速度が遅いという点にある。つまり、プーケットにおいては API は規制の解除を遅くしてしまう可能性があるという点では適切な指標とは言えない。

4.2.3 連続雨量の検討

連続雨量は降雨が継続していくと降雨量が加算されていき、ある一定時間無降雨状態となるとリセットされるという特徴を持った降雨指標であり、実効雨量や

API のようにその時々地盤内の水分量を考慮しようとするものではなく、加算されていった雨量によって間隙圧の最大値を評価しようとするものである。そのことを踏まえて、GL-1.0m における間隙圧の最大値と連続雨量の最大値の相関図を図 4.6 に示す。この図をみると、どちらの連続雨量においても連続雨量が大きくなると間隙圧も大きくなるような傾向がみられ、連続雨量の最大値で間隙圧の最大値を評価することができていることが分かる。ここで、図 4.6(a)と図 4.6(b)を比較すると、図 4.6(b)では連続雨量が 40mm ほどまでいかないと間隙圧が正圧を示さないのに対し、図 4.6(a)では 15mm ほどの少ない連続雨量で間隙圧が正圧を示し始める。この違いは、リセットされるまでの時間が短い連続雨量 1 では、先行降雨の影響を無視して追い雨による間隙圧の上昇を正確にとらえることができていないことから生じている可能性を示唆している。そこで、12 月 1 日から 12 月 2 日にかけて観測された GL-1.0m における間隙圧とそれぞれの連続雨量の推移を図 4.7 に示す。この図をみると、連続雨量 1 で 29mm に至る降雨を先行降雨、12mm に至る降雨を追い雨と考えることができる。間隙圧はまず先行降雨によって大きく上昇する。その後、連続雨量 1 はリセットされ、先行降雨により上昇した間隙圧が消散する前に追い雨が発生することで間隙圧はさらに上昇し、地盤がより不安定化する 1 つの目安と考えられる正圧まで至っている。つまり、連続雨量 1 では途中でリセットされてしまい、追い雨による間隙圧の上昇を正しく評価できていないということがこの図からわかる。

以上をまとめると、連続雨量 1 は先行降雨による影響を見落とすことがあるということから、連続雨量 2 が斜面浅層崩壊に対する指標としてより適切であると考えられる。また、図 4.6(b)の赤線で囲う領域において間隙圧が 0 近辺からさらに大きくなっていることから、連続雨量 2 において 40mm を斜面崩壊の注意喚起の基準値の目安、即ち今の段階で斜面崩壊は生じないが後に来る降雨によって危険になりやすい状態にあると判断する目安として考えることができる。

4.2.4 時間雨量の検討

降雨が降った後間隙圧が上昇するまで時間差があることから、時間雨量の最大値と GL-1.0m における間隙圧の最大値の相関図を図 4.8 に示す。この図をみると、時間雨量の増加に伴い間隙圧も大きくなる傾向にある。つまり、最大値同士で評価するという観点から考えると、時間雨量は間隙圧を評価できることがわかる。

時間雨量に関しても、20mm から 30mm の間で間隙圧が正圧においてさらに上昇する傾向を見せることから、25mm 程度を注意喚起の目安と考えることができる。

4.3 ナコンナヨックにおける各種降雨指標の検討

本節では、タイ・ナコンナヨックの原位置計測によって得られた間隙圧と各種降雨指標の相関性を調べることで、一度崩壊を起こし埋め直されたことで盛り土に近い流紋岩質の斜面における各種降雨指標の適用性について検討する。また、斜面浅層崩壊の可能性がある深さ 60cm, 100cm における間隙圧を検討対象とする。計測データについては、2008 年の 5 月 19 日から 12 月 15 日、2010 年の 9 月 3 日から 11 月 7 日に計測された法尻部における間隙圧のデータを用いる。ただし、計測器は京都大学の計測器とは異なるカセサート大学のものを使用しており、正圧以上の間隙圧も 10kpa 手前まで計測することができている。

4.3.1 実効雨量の検討

まず、2008 年に計測された間隙圧と各種実効雨量の相関図を図 4.9 に示す。これらの図をみると、どの実効雨量も GL-1.0m における間隙圧との相関がみられない。また、GL-0.6m に関しては最も正の相関がみられるのは半減期 24 時間実効雨量であるということが分かる。しかし、図 4.9(c)をみると実効雨量が 0 に近い際にも GL-0.6m における間隙圧が 0 から 2 程度の高い値を示していることが分かる。この結果より、半減期が 24 時間でも間隙圧の消散速度よりも実効雨量の減少速度の方が早く、正しく評価できていない事が推測される。そこで、半減期 72 時間実効雨量と間隙圧の相関図を図 4.10 に示す。この図をみると、GL-0.6m においては 0 から 2 程度の間隙圧の見落としはまだあるが、間隙圧が高い領域における正の相関は強くみられることが分かる。また、GL-1.0m においては半減期を 72 時間にしても相関がみられないことが分かった。さらに、半減期が 6 時間、24 時間、72 時間の実効雨量と間隙圧の推移を図 4.11 に示す。この図をみると、ナコンナヨックの斜面は透水性が低い為、0 から 2 程度の間隙圧を数日にわたって維持しており、どの実効雨量も正しく評価できていないということが分かる。しかし、さらに高い間隙圧と実効雨量の推移を示した図 4.12 をみると、GL-0.6m における間隙圧の推移を最もよく捉える事ができているのは、半減期 72 時間実効雨量だという

ことが分かる。

次に、2010年に計測された間隙圧と各種実効雨量の相関図を図4.13に示す。

図4.13(a)、図4.13(b)をみると、どの組み合わせにおいても実効雨量と間隙圧に相関は見られない。図4.13(c)をみると、半減期24時間実効雨量はGL-1.0mにおいて間隙圧とやや正の相関がみられる。ここで、2010年ではGL-1.0mにおける間隙圧の見落としはみられないが、2008年ではそれが見られていた。その原因としては、検討を行った期間内で2008年においては日雨量が最大で136mm、日雨量40mmを越える日が14日あったのに対し、2010年においては日雨量が最大で54.5mm、日雨量40mmを越える日が3日しかなかったことが考えられる。つまり、2008年の方が大規模な降雨があったことで、特に旧すべり面付近のGL-1.0mの間隙圧が2010年よりも上昇しやすく、高い間隙圧を見落としてしまうということが起きたと考えられる。同じ理由で、半減期72時間実効雨量と間隙圧の相関を示した図4.14においても、GL-1.0mにおける間隙圧の見落としが2010年ではなくなっている。大規模な降雨の影響も考慮できているものが降雨指標としてふさわしいと考えられるので、2008年における検討結果を優先することとする。

以上をまとめると、ナコンナヨックにおいては深さ60cm程度における斜面崩壊に対しては半減期72時間実効雨量、深さ100cm程度における斜面崩壊に対しては、半減期が72時間よりも長い実効雨量が、指標としては適切であると考えられる。ちなみに、2010年においても図4.14に示すように半減時間72時間実効雨量とGL-0.6mにおける間隙圧は正の相関がとれており、2008年の検討結果が適用できることが分かる。また、図4.15に示す半減期1.5時間実効雨量と表面流出量の推移をみると、プーケットと同様にナコンナヨックにおいても実効雨量は表面流出量と呼応しており、半減期1.5時間実効雨量は浸食に対する降雨指標としては適切であるということが分かる。

4.3.2 APIの検討

2008年および2010年におけるAPIの最大値と間隙圧の最大値の相関図を図4.16に示す。図4.16(b)をみると、GL-0.6m、GL-1.0mともに間隙圧との正の相関が見られるが、図4.16(a)をみると、GL-1.0mの間隙圧とは相関が見られなかった。その原因は、4.3.1で述べたことと同様の理由で2008年におけるGL-1.0mの間隙圧の消散が2010年よりも遅く、APIではその減少速度の遅さを評価できないとい

うことにある．つまり，一般的には斜面浅層 60cm 程度の危険性を評価する指標として API は適切であるが，斜面表層に旧すべり面などの水分を貯留しやすい領域が存在する場合には，間隙圧の減少を正確にとらえることができていないという点で適切ではないと考えられる．このことは，図 4.17 に示す API と間隙圧の推移をみても分かる．

4.3.3 連続雨量の検討

連続雨量の最大値と間隙圧の最大値の相関図を図 4.18 に示す．この図をみると，連続雨量 1 は間隙圧との相関がみられず，連続雨量 2 は GL-0.6m，GL-1.0m における間隙圧と正の相関が見られる．ただし，GL-1.0m に関しては，降雨開始時のサクシヨンの状態に影響を受けて，プロットされる領域が 2 つに分かれている．

つづいて，2008 年の 7 月 22 日から 8 月 18 日における間隙圧と連続雨量の推移を図 4.19 に示す．それぞれの推移の様子をみると，日雨量に呼応して間隙圧も上昇しているがその後何日も高い値を保っているのに対して，連続雨量はどちらも日雨量に日雨量に呼応して上昇したとしても 1 日単位ではすぐにリセットされてしまい，残留間隙圧の影響を GL-0.6m，GL-1.0m とともに考慮できていないことが分かる．

以上をまとめると，連続雨量 2 は GL-0.6m における間隙圧の最大値を評価することはできると考えられが，ナコンナヨックのような透水性が低い斜面では残留間隙圧の見落としがみられ，先行降雨による影響を正しく評価できない可能性があり，連続雨量は降雨指標として適切ではないと考えられる．

4.3.4 時間雨量の検討

時間雨量の最大値と間隙圧の最大値の相関図を図 4.20 に示す．先ほど示した図 4.17 でも分かるように，間隙圧はそれが計測される 1 日前の日雨量に呼応していることから，間隙圧の最大値は 1 日前の時間雨量の最大値とした．図 4.20 をみると，時間雨量はどちらの間隙圧とも相関は見られないことが分かる．つまり，ナコンナヨックにおいては，間隙圧の消散が非常に遅くある時点における時間雨量だけでなく幅広い期間の時間雨量が関わってくるので，斜面表層崩壊の危険性を判断する指標として時間雨量は適切ではないと考えられる．

4.4 降雨指標検討結果のまとめ

連続雨量および時間雨量は残留間隙圧の影響を考慮できないという理由から、ナコンナヨックにおいてはすべり面よりも浅い GL-0.6m においても斜面崩壊の危険度も適切に判断できないという結果になった。実効雨量に関しては、プーケットにおいては半減期 6 時間実効雨量が GL-1.0m の間隙圧の変化を表現できているのに対し、ナコンナヨックでは GL-0.6m で半減期が 72 時間、すべり面付近の GL-1.0m ではさらに長い半減期が適切であると分かった。さらに API に関しても透水性の違いから、ナコンナヨックの GL-0.6m において最も適切であるということが分かった。以上のことから、すべり面付近だけではなくそれよりも浅い領域においても透水性の違いが顕著に現れ、プーケットとナコンナヨックでは適切な降雨指標が異なるということが分かる。ここで、ナコンナヨックの斜面は崩壊後埋め直されていることから盛土、プーケットの斜面は崩壊が無かったことから切土と考えると、盛土の方が間隙圧の消散が遅く斜面崩壊の危険性が高いということになる。しかし、図 1.3 の領域 2 をみると盛土よりも切土の方がより低い基準値で限界包絡線が設定されており、切土の方が危険と判断されている。その原因は、盛土は締め固められており切土よりも土粒子間の結合力が大きく崩壊が生じにくいという事だと考えられる。ただし、間隙圧の上昇は斜面の不安定化につながる事は事実であるので、本研究ではナコンナヨックのような盛土に近い斜面に対しても降雨指標の適用性の検討対象とした。

4.5 土砂災害早期警戒体制における注意喚起領域

これまでの各種降雨指標の検討によりプーケットのように花崗岩質で透水性が高いような場合には間隙圧の挙動から、連続雨量 2 および時間雨量において注意喚起の目安となる値を設定できることを説明してきた。それをもとに、プーケットの斜面のような風化花崗岩質で自然斜面に近い斜面の浅層崩壊に対する土砂災害早期警戒体制を図 4.21 のように提案する。連続雨量 2 を長期降雨指標、時間雨量を短期降雨指標として設定し、時間雨量が 25mm 以上、連続雨量 2 が 40mm 以上になる領域を注意喚起領域とした。ここで、プーケットとナコンナヨックにおける流出比と累積雨量の関係を示した図 4.22 をみると、連続雨量が 40mm 程度でナ

コンナヨックにおいてもプーケットと同様に流出比が 0.2 に近い値を示し浸透量が大きい。また、図 4.18(b)をみると連続雨量が 40mm あたりから間隙圧が急激に上がっているのが分かる。つまり、40mm という値は間隙圧が上昇する一つの目安であるといえる。本研究で提案する注意喚起領域は、斜面崩壊の危険性はまだ無いが、今後の降雨によっては斜面が不安定な状態に移行する可能性がある領域と本研究では位置づける。また、図 4.21 においてはプーケットで実際に観測された降雨のスネークカーブも同時に示した。赤線は間隙圧が 0 以上に到達した降雨で、黒線は間隙圧が 0 以上に達しなかった降雨である。この図によると、連続雨量が 40mm 以上になると間隙圧は 0 以上になるが、時間雨量が 25mm 以上になっても間隙圧は 0 以上にはなっていない。つまり、間隙圧の上昇に連続雨量は大きく関わっていることが分かる。それに加え、本研究では短期間集中豪雨による斜面の浅層崩壊を対象としているので、時間雨量も深く関わってくるという観点からこのような時間雨量と連続雨量を複合して基準線を引いている。また、注意喚起領域に達しているにもかかわらず間隙圧が 0 以上になっていない降雨がある。この降雨は降雨開始時の間隙圧が -11.1 と低く、このような高サクション状態に降雨が開始した事が、間隙圧が大きくならなかった原因と考えられる。

日本における豪雨時に斜面崩壊が発生しやすいのは、まさ土すなわち風化花崗岩で形成された斜面であるということから、この目安の値は日本においても適用することができると考えられる。

第 5 章 まとめと今後の課題

本研究では第 3 章において、プーケットの実斜面に対する 3 連マルチタンクモデル結果および原位置計測結果から、中腹部よりも法尻部の方が雨水を貯留しやすく斜面崩壊が生じる危険性が高いことが分かった。しかし、まだ解析した降雨数が少ないので、今後さらに解析数を増やしパラメータのばらつきの原因を検討していく必要がある。

第 4 章においては、法尻部の方が雨水を貯留しやすく危険ということから、法尻部における間隙圧と各種降雨指標の相関性を調べることで降雨指標の適用性を検討した。各種降雨指標の適用性をまとめたものを表 5.1 に示す。この表において○は適用可能、×は適用が困難、△は適用できるが問題点もあるということを意味する。この表をみると、ナコンナヨックの方が実効雨量の適切な半減期が長くなり、適用できる指標の数も減っている。また、ナコンナヨックの GL-1.0m においてはほとんどの指標が適用できないという結果になった。その原因は、プーケットよりもナコンナヨックの方が特にすべり面付近において間隙圧の消散が非常に遅いことで、残留間隙圧の見落としが生じることにある。この結果は地盤の透水性の違いが降雨指標の適用性に与える影響は大きいということを表している。

また、プーケットにおける検討結果をもとに土砂災害早期警戒体制を提案したが、降雨開始時のサクシヨンの影響で注意喚起領域に達しても間隙圧はそれほど上がってない場合がみられた。このようなことから、今後は降雨開始時のサクシヨンによって降雨を分類し、警戒体制を検討していく必要がある。

本研究ではプーケットにおける風化花崗岩で形成された自然斜面に近い斜面における計測結果をもとに各種降雨指標を検討し、土砂災害警戒体制を提案した。しかし近年、自然斜面だけでなく道路供用後の傾斜地盤上盛土の豪雨時の崩壊が増加してきている傾向にあり、盛土の崩壊危険性をあらかじめ予見し防災することが求められている。そのようなことから、今後は新たに盛土における計測を実施し、その結果をもとに豪雨時の雨水浸透流出挙動を適切に把握しそれを反映させた土砂災害早期警戒体制についても研究を行う予定である。

参考文献

- 1) 杉井俊夫，竹下裕二：不飽和地盤の浸透特性の評価方法，土と基礎,55(9), pp.20-22, 2007
- 2) Nisigaki, M.: Research on Behavior of Groundwater and Its Application to Foundation Engineering, Dissertation of Kyoto University, 1979.
- 3) 大津宏康，堀田洋平，高橋健二，中村一樹，新村知也：熱帯性豪雨(スコール)に起因する斜面降雨浸透に関する原位置モニタリング，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2009 論文集, pp.1-6, 2009.
- 4) Ohtsu, H., Hotta, Y., Takahashi, K. and Nakamura, K.: A Study on Applicability of Modified Multi-Tank Model for Unsaturated Soil Slope, Proceedings of EIT-JSCE Joint Seminar on Rock Engineering 2008, pp.184-191, 2008.
- 5) Hotta Yohei: Evaluation of Unsaturated Soil Slope Stability against Heavy Rainfall Using Modified Multi-Tank Model System, Master's thesis of Kyoto University, 2009.
- 6) Soralump, S.: Landslide Risk Management in Thailand using API model, Proceeding of EIT-JSCE Joint International Symposium, pp.42-81, 2009
- 7) 岡田憲治：土壌雨量指数，測候時報，69-5，pp.67-100，2001
- 8) Nimura Tomonari: A Study on Runoff-Infiltration Characteristics of the Weathered Soil Slope caused by a Squall, Master's thesis of Kyoto University, pp.27, 2010
- 9) 菅原正巳：水文学講座流出解析法，共立出版，pp.206-211，1972
- 10) 高橋健二，大津宏康，大西有三：タンクモデル法を用いた地下水位挙動を考慮した斜面リスク評価の研究，地盤工学会誌，Vol.5，No.10，pp.15-17，2003
- 11) 社会法人地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 23，豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測，pp.49-50, 2006

謝 辞

本論文を作成するにあたり，お世話になった方々に感謝の意を表します．

まず，京都大学大学院工学研究科教授・大津宏康先生にはご多忙の合間を縫って質問に応じてもらい，研究に関する様々なアドバイスを頂き大変感謝しております．お話をさせて頂くたびに先生の研究に対する熱意が伝わり，非常に刺激的中身のある研究生活を送ることができました．

京都大学大学院工学研究科准教授・木元小百合先生には本研究の副査として，お忙しい中筆者の論文に目を通して頂き，細部に至るまで様々なアドバイスを頂いたこと，大変感謝しております．

京都大学大学院工学研究科准教授・塩谷智基先生には，学生との交流を積極的に図っていただき，研究室を盛り上げ過ごしやすい場を作って頂いたこと，大変感謝致します．

京都大学大学院工学研究科助教授・稲積真哉先生には，ご多忙の中においても伸び伸びと研究に打ち込める環境を作っていただき，大変感謝いたします．

水文技術コンサルタント株式会社高橋健二氏には，ご多忙の中，大変貴重なご意見を頂き大変感謝いたします．

大八木智子秘書には，研究生活を送る上で様々なことを助けて下さいました．大変感謝しております．

大津研究室の諸先輩方ならびに同回生の方々のおかげで，非常に充実した研究生活を送ることができました．本当にありがとうございました．

最後に，大学で有意義に学ぶ環境を与えて下さり，研究面だけではなく日々の生活においても近くで支えて頂いた家族に心から感謝を申し上げます．

表1.1 JR東日本の通行規制体制

実効雨量の種類	被災対象	規制値	
半減時間1.5時間の 実効雨量	表面の浸食	速度規制	30mm以上
		運転中止	40mm以上
半減時間6時間の 実効雨量	浅い層からの崩壊	速度規制	60mm以上
		運転中止	85mm以上
半減時間24時間の 実効雨量	深い層からの崩壊	速度規制	120mm以上
		運転中止	170mm以上

表2.1 当該斜面の力学特性

斜面傾斜角 [°]	27.65	間隙比	1.05
土の単位体積重量 [kN/m³]	17.66	有効粘着力 [kPa]	14.5
土粒子密度 [g/cm³]	2.71	有効内部摩擦角 [°]	33.9
乾燥密度 [g/cm³]	1.33		

表2.2 KU多段階せん断試験結果

テスト孔 深度(m)	サンプル 番号	G _s	有効粘着力	有効内部摩擦 角	注
TP-1 GL-0.4m	PK-7	2.38	0.166	20.04	60% Saturation
	PK-5	2.38	0.099	20.06	80% Saturation
	PK-6	2.38	0.078	17.03	100% Saturation
TP-1 GL-0.6m	PK-10	2.37	0.090	27.01	60% Saturation
	PK-11	2.37	0.034	27.00	80% Saturation
	PK-9	2.37	0.002	23.93	100% Saturation
TP-1 GL-1.0m	PK-17	2.41	0.070	30.12	60% Saturation
	PK-21	2.41	0.042	28.18	80% Saturation
	PK-24	2.41	0.034	25.58	100% Saturation
TP2 GL-0.4m	PK-31	2.37	0.147	36.03	60% Saturation
	PK-30	2.37	0.050	32.68	80% Saturation
	PK-29	2.37	0.025	26.30	100% Saturation
TP2 GL-0.6m	PK-39	2.38	0.075	31.84	60% Saturation
	PK-38	2.38	0.059	24.37	80% Saturation
	PK-37	2.38	0.019	24.43	100% Saturation
TP2 GL-1.0m	PK-42	2.37	0.110	33.18	60% Saturation
	PK-43	2.37	0.114	29.57	80% Saturation
	PK-44	2.37	0.011	28.89	100% Saturation

表3.1 タンクモデル解析に用いた降雨

降雨の発生日時	累積雨量	最大10分間雨量	継続時間	総流出量
	[mm]	[mm/10min]	[min]	[L]
プーケット 2012/8/23	42.0	11.5	363.0	125.1
プーケット 2012/8/27	58.5	10.5	282.0	138.7
プーケット 2012/9/12	30.5	8.0	339.0	121.1
プーケット 2012/9/18	30.0	10.0	154.0	190.3
プーケット 2012/10/13	31.5	8.0	128.0	133.8
プーケット 2012/10/17	27.5	15.0	98.0	222.5
プーケット 2012/11/21	44.5	12.5	120.0	217.0

表3.2 最適パラメータ

降雨の発生日時	最適パラメータ					
	α_U	α_M	α_L	β_U	β_M	β_L
プーケット 2012/8/23	0.234	0.194	0.341	0.754	0.410	0.492
プーケット 2012/8/27	0.246	0.282	0.360	0.753	0.440	0.635
プーケット 2012/9/12	0.227	0.406	0.535	0.269	0.468	0.496
プーケット 2012/9/18	0.321	0.340	0.629	0.425	0.348	0.288
プーケット 2012/10/13	0.848	0.375	0.262	0.190	0.246	0.379
プーケット 2012/10/17	0.942	0.458	0.597	0.051	0.242	0.315
プーケット 2012/11/21	0.229	0.468	0.311	0.382	0.356	0.212

表5.1 各種降雨指標の適用性

降雨指標		プーケット	ナコンナヨック	
		GL-1.0m	GL-0.6m	GL-1.0m
実効雨量	半減期 1.5 時間	×	×	×
	半減期 6 時間	○	×	×
	半減期 24 時間	△	△	×
	半減期 72 時間	—	○	×
連続雨量	連続雨量 1	△	×	×
	連続雨量 2	○	△	△
API		△	○	×
時間雨量		○	×	×

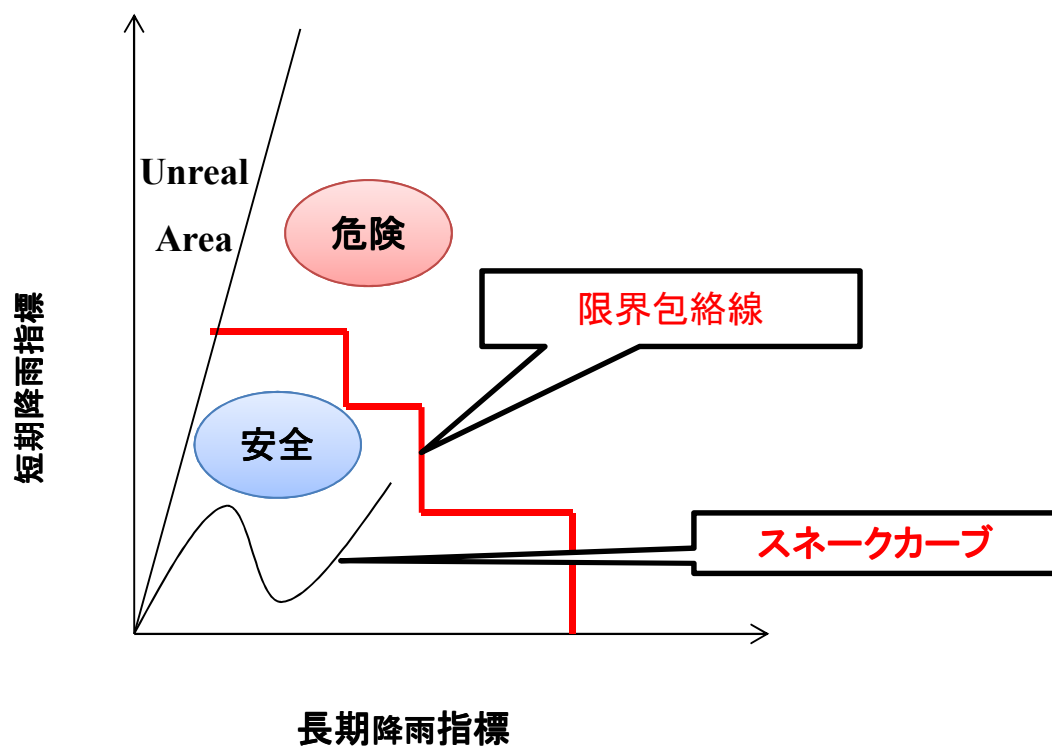
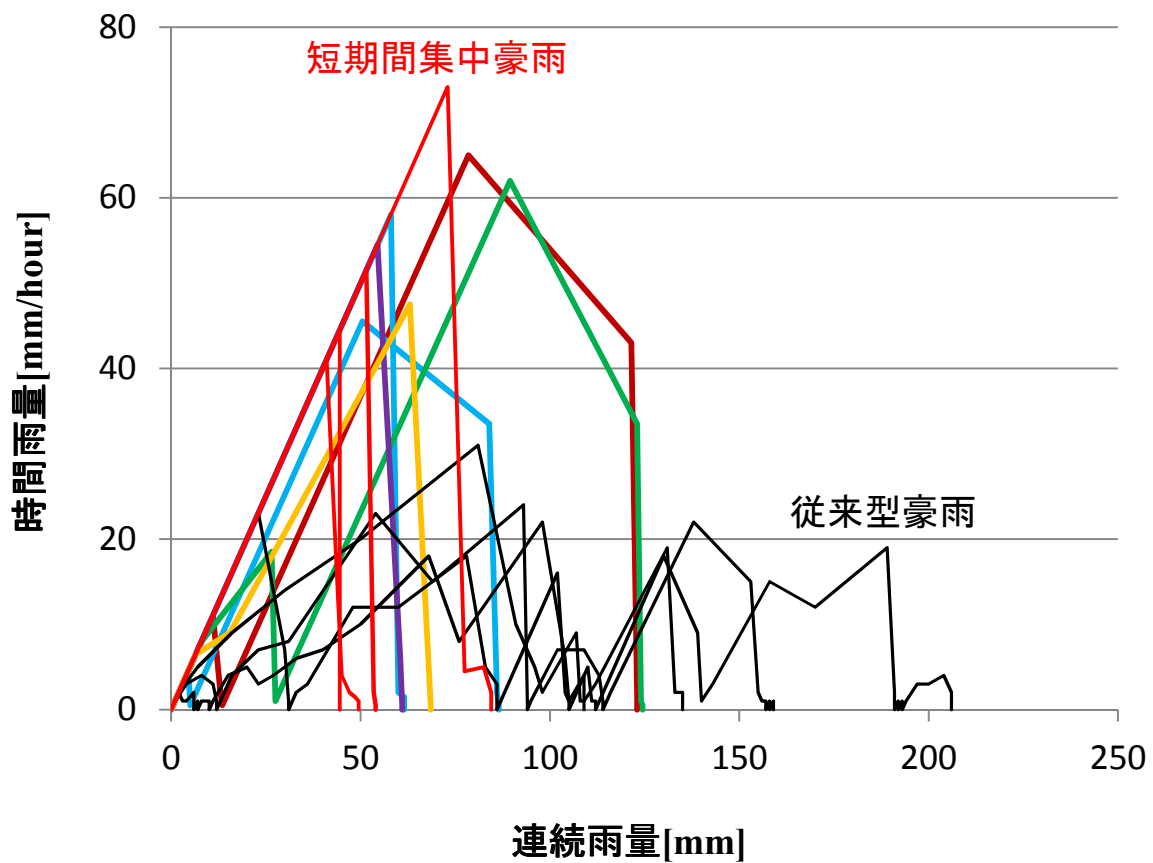


図1.1 一般的な土砂災害早期警戒体制の概念図



- | | |
|--|------------------------|
| — 古座
(2006 /2/26 , 4/10 , 5/7 ,7/5) | — 茨木(2012/8/14 , 8/18) |
| — プーケット
(2011/10/17 , 11/13 , 2012/7/3 , 7/7) | — 京田辺(2012/8/14) |
| | — 枚方(2012/8/14) |
| | — 生駒山(2012/8/14) |
| | — 長岡京(2012/8/13) |

図1.2 スコールとゲリラ豪雨の降雨履歴

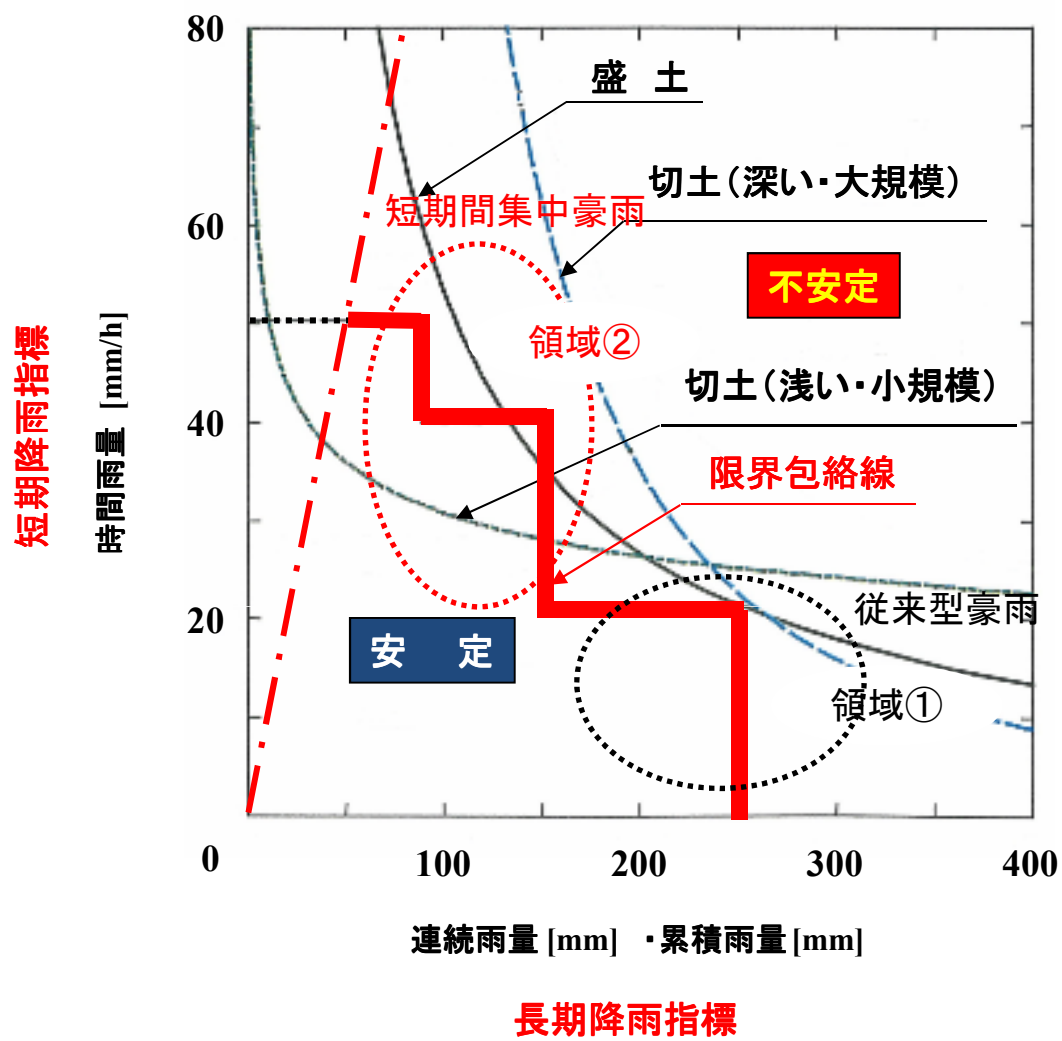
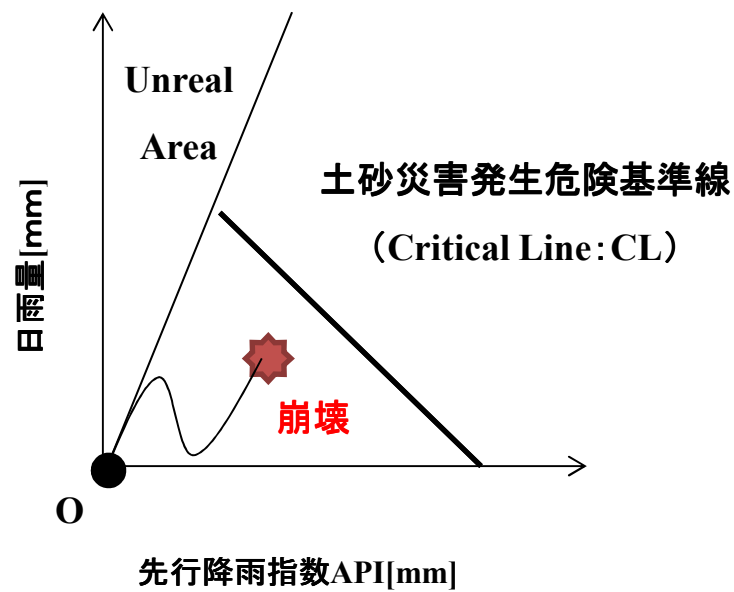
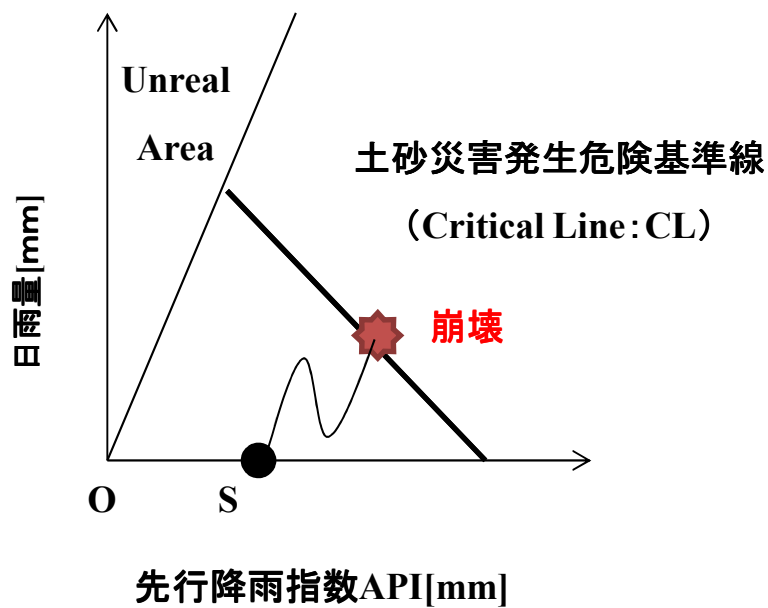


図1.3 土砂災害早期警戒体制(JR総研提案)



(a) 既存の土砂災害早期警戒体制



(b) APIを考慮した土砂災害早期警戒体制

図1.4 土砂災害早期警戒体制の比較

CL (Critical Line): 土砂災害発生危険基準線

EL (Evacuation Line): 避難基準線

WL (Warning Line): 警戒基準線

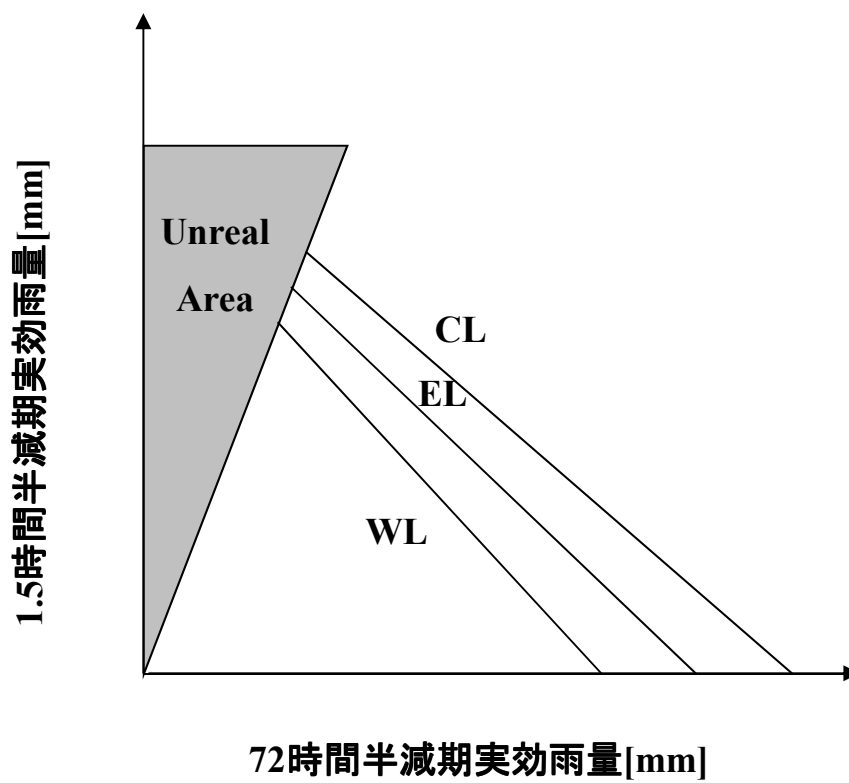


図1.5 提言案

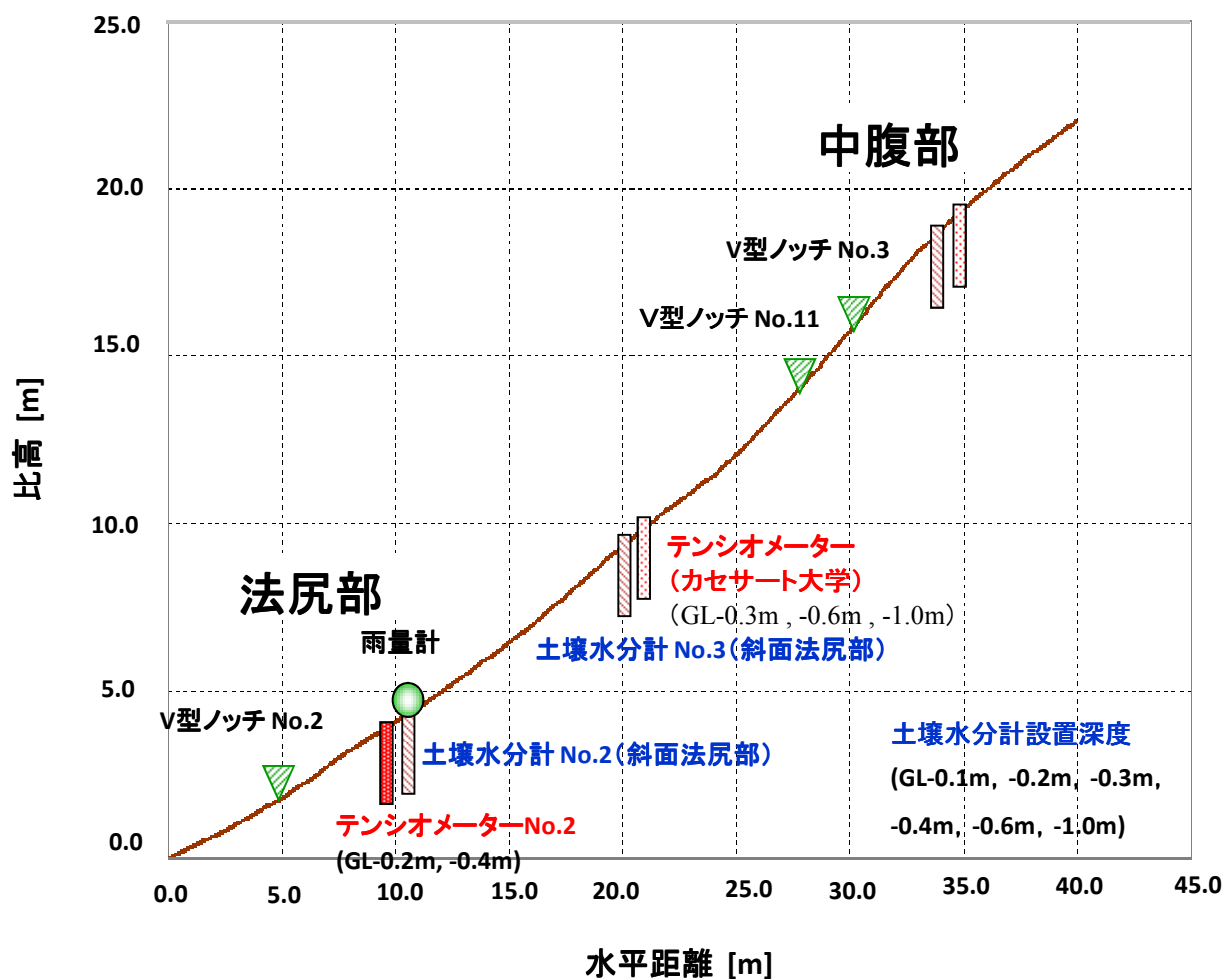


図2.1 斜面断面図

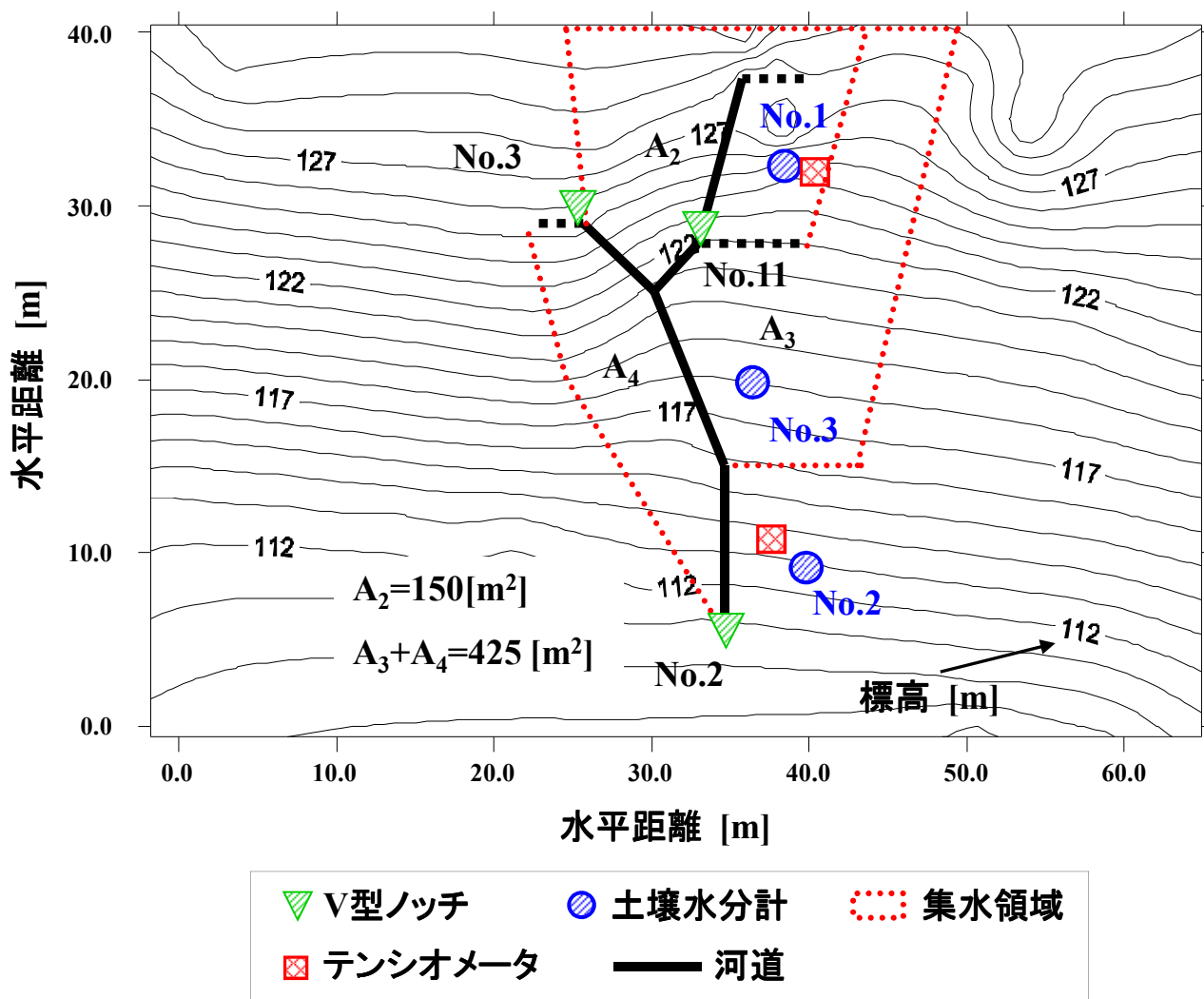


図2.2 斜面計器平面図

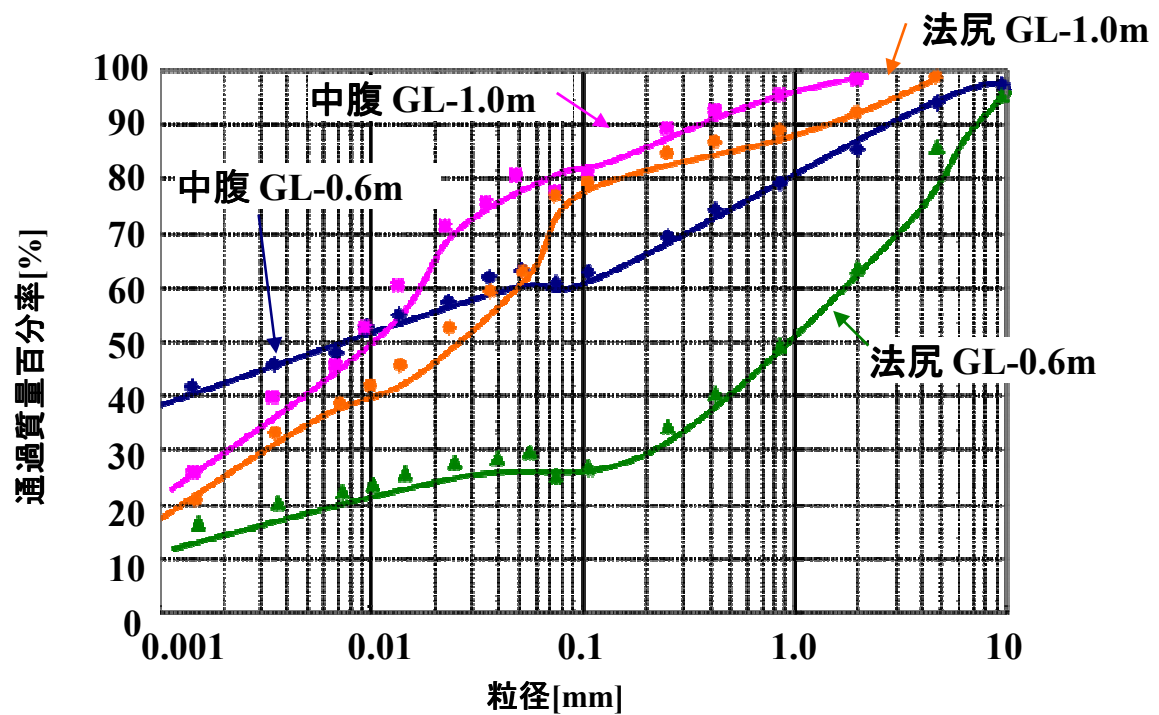


図2.3 中腹部と法尻部の粒径加積曲線

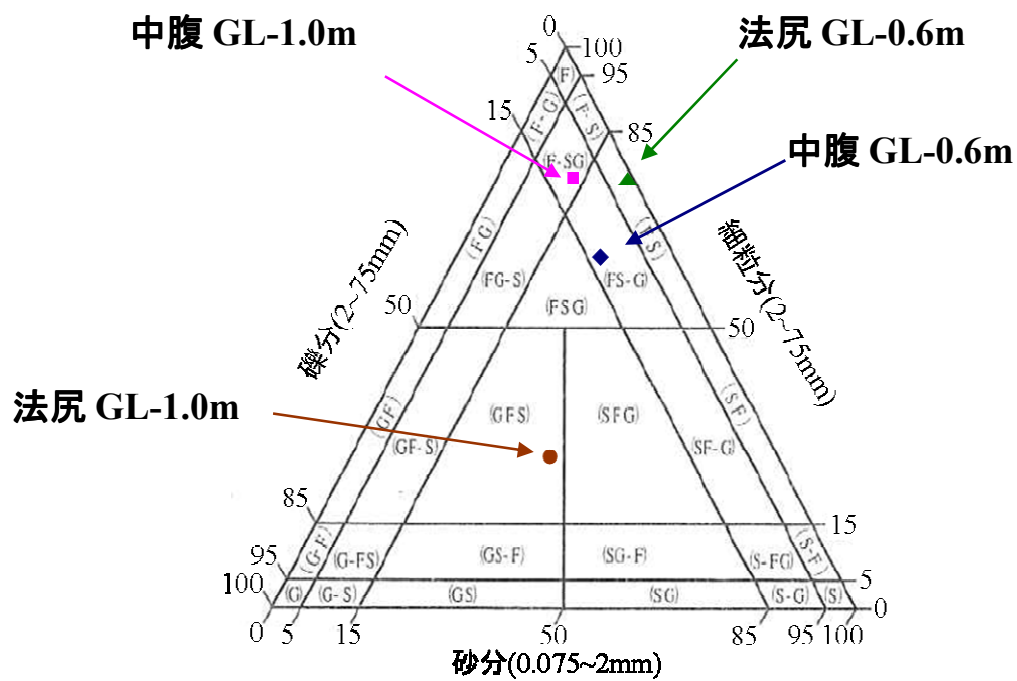


図2.4 三角座標による分類

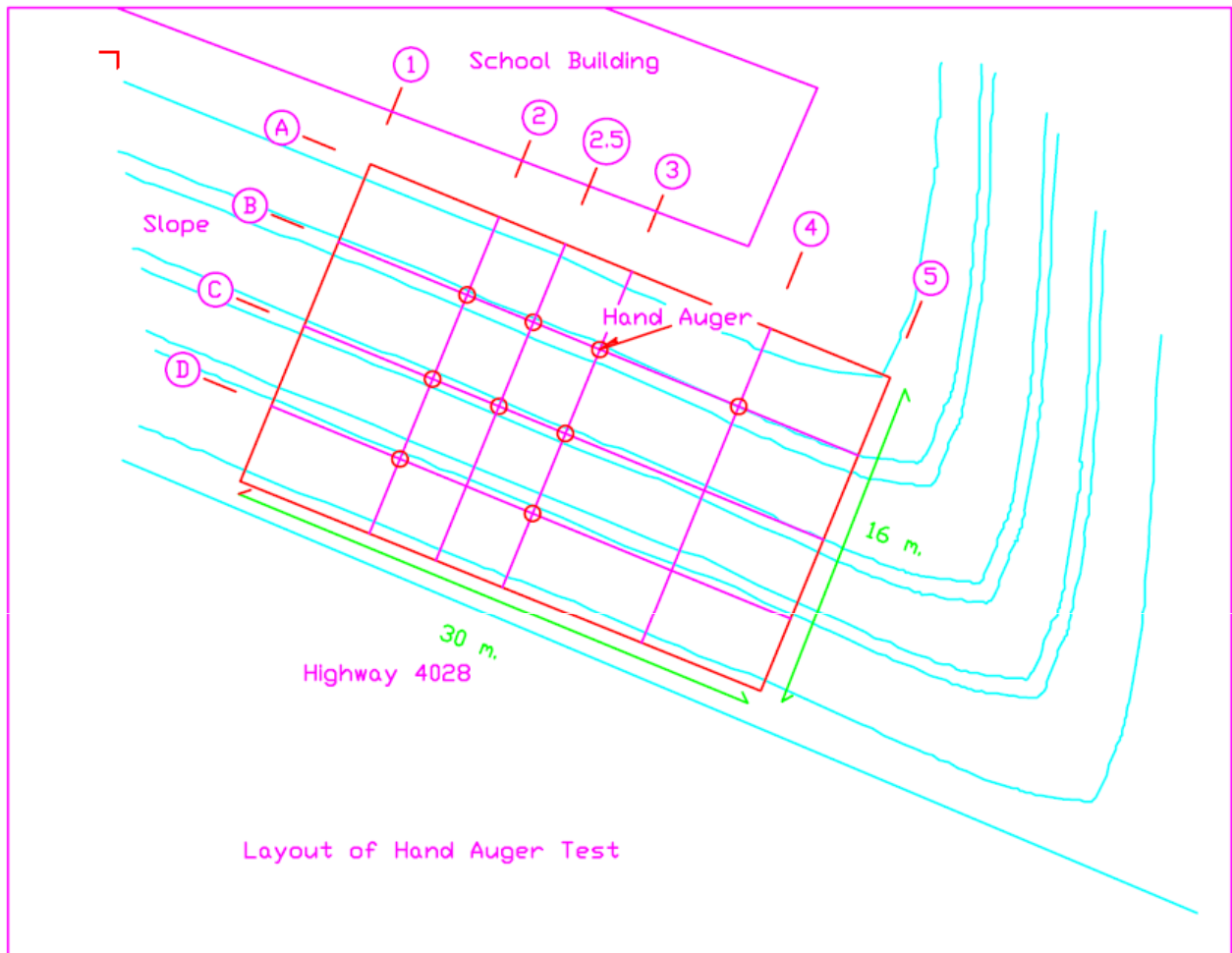
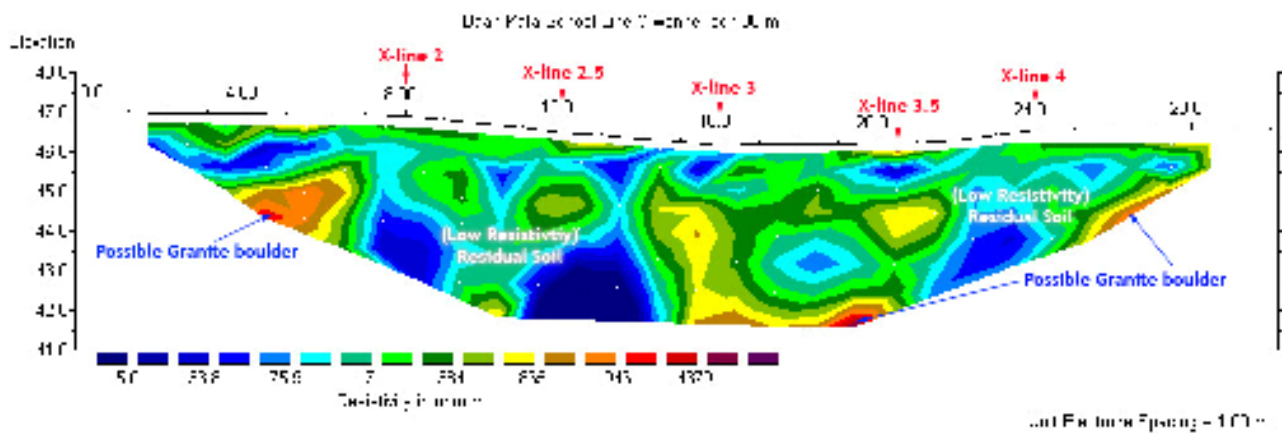
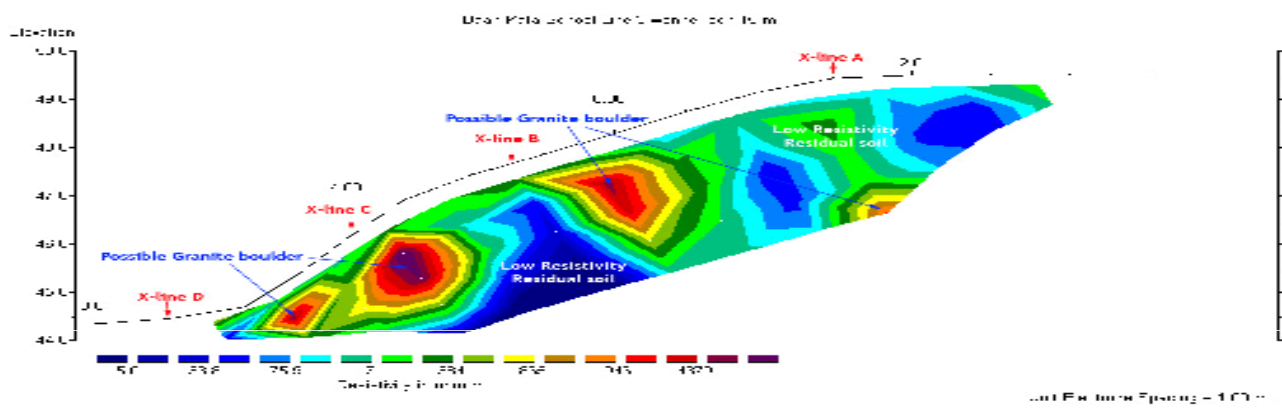


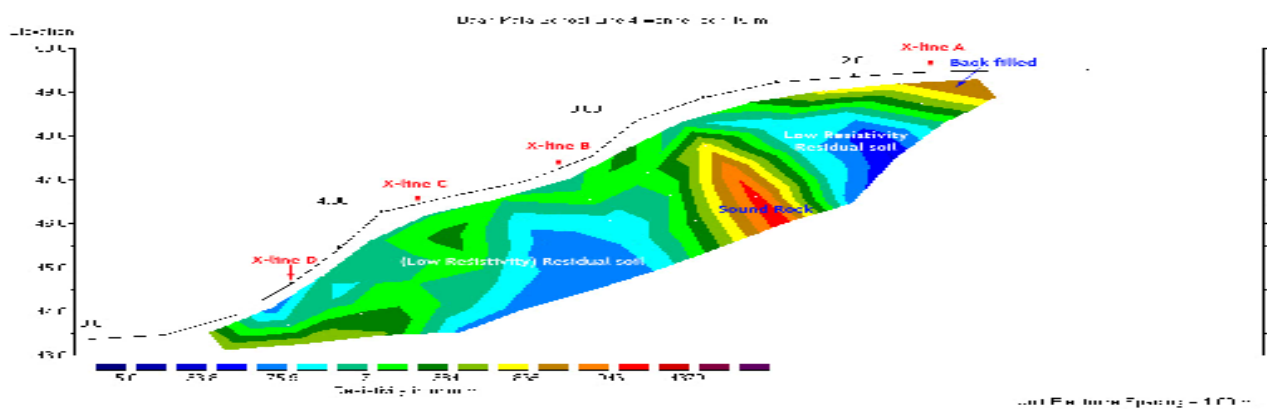
図2.5 原位置調査における側線



(a) 測線Cの抵抗値分布



(b) 測線3の抵抗値分布



(c) 測線4の抵抗値分布

図2.6 比抵抗電気探査の結果

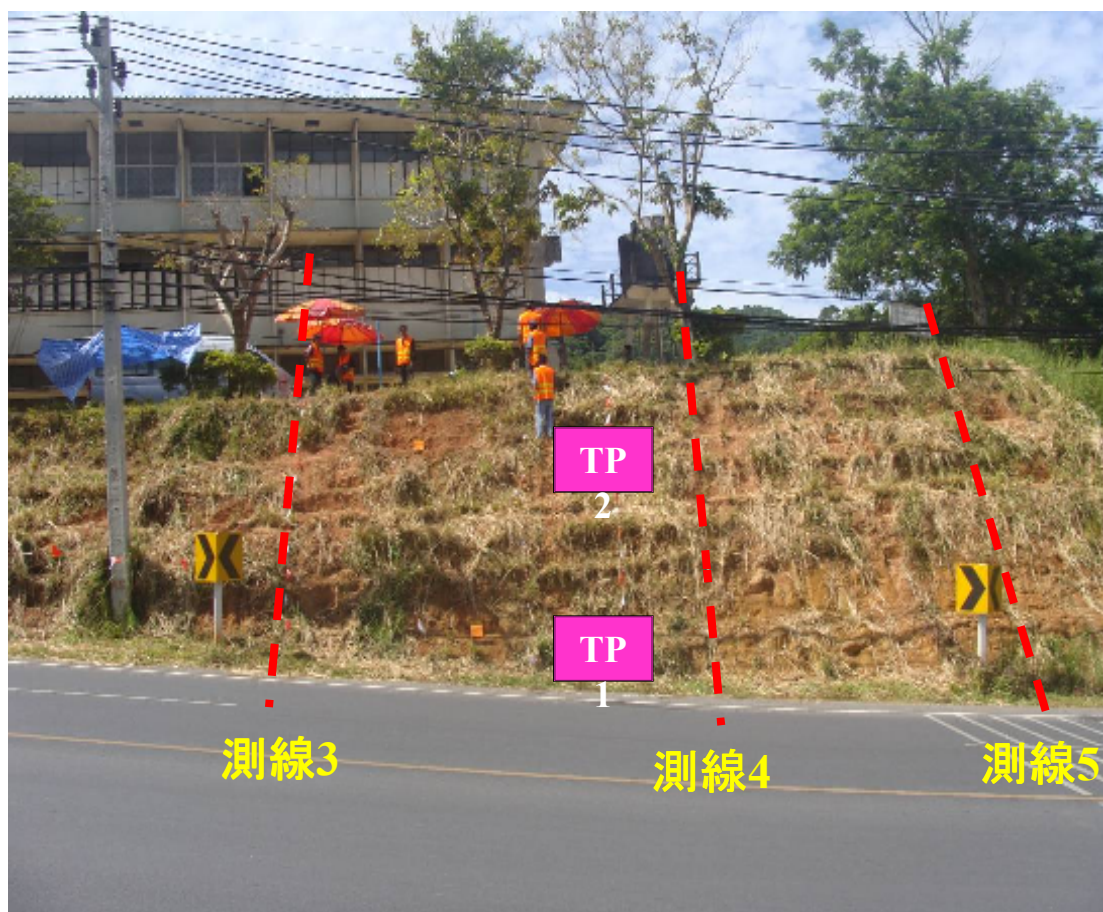
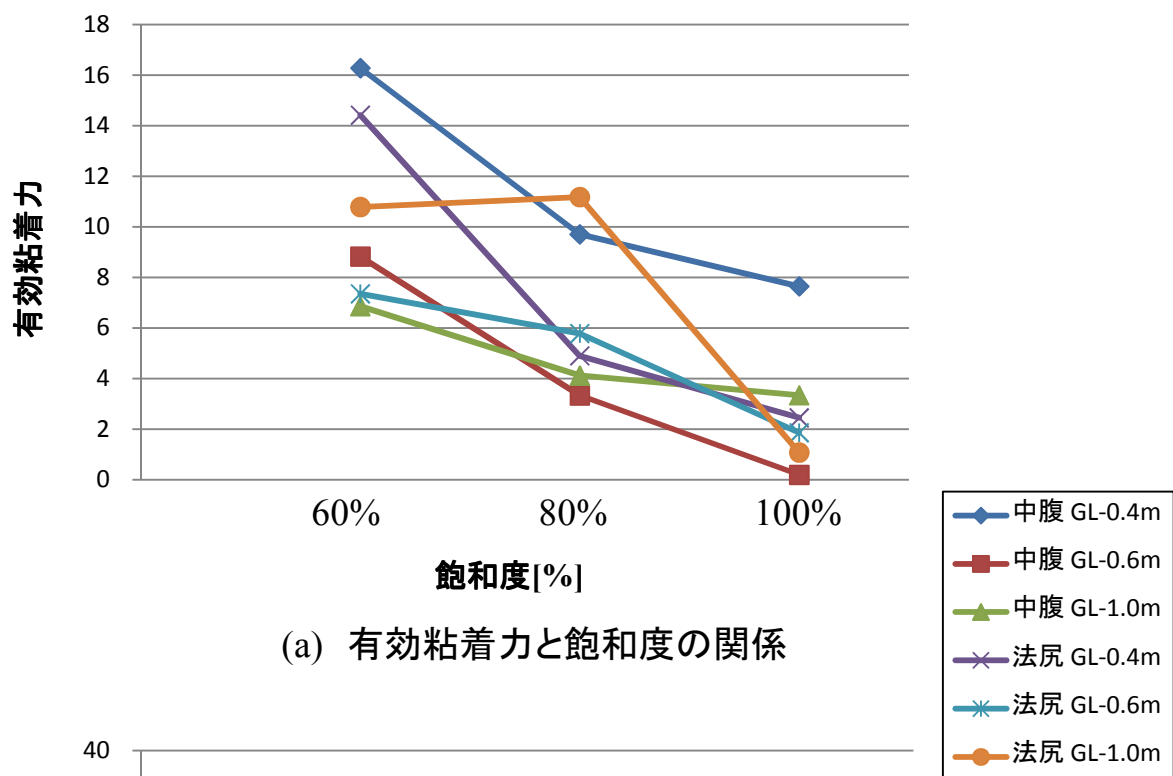
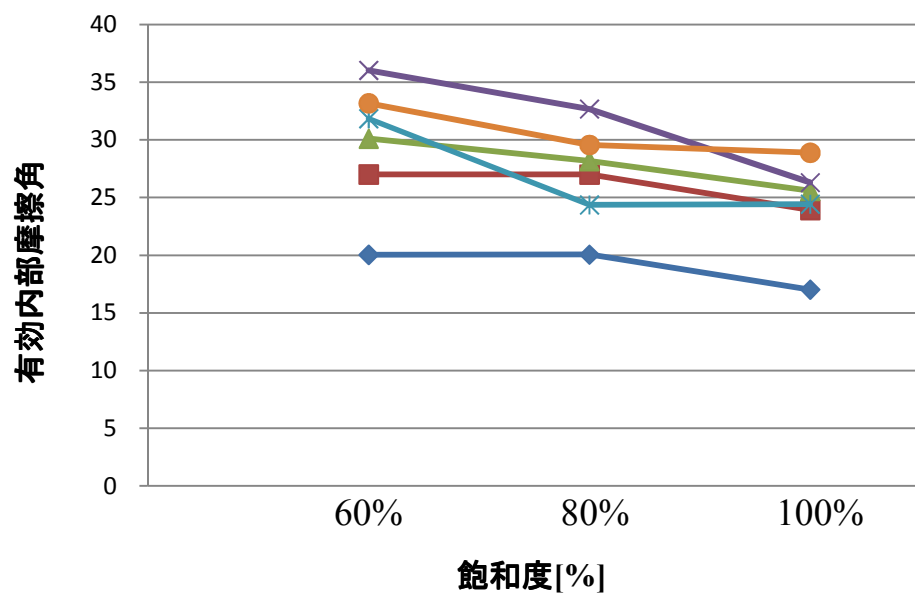


図2.7 テスト孔の位置

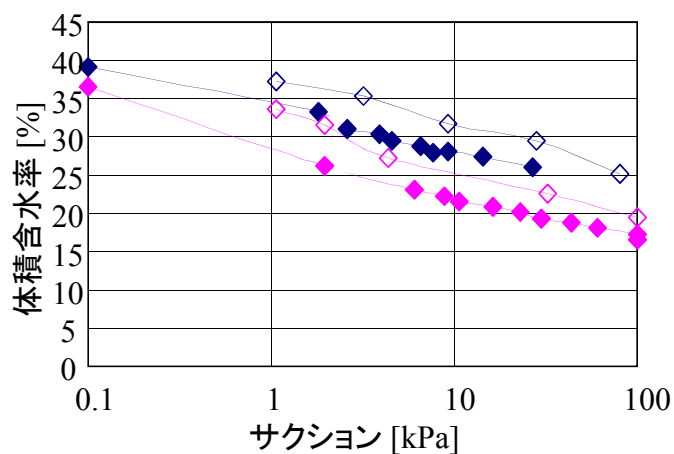


(a) 有効粘着力と飽和度の関係

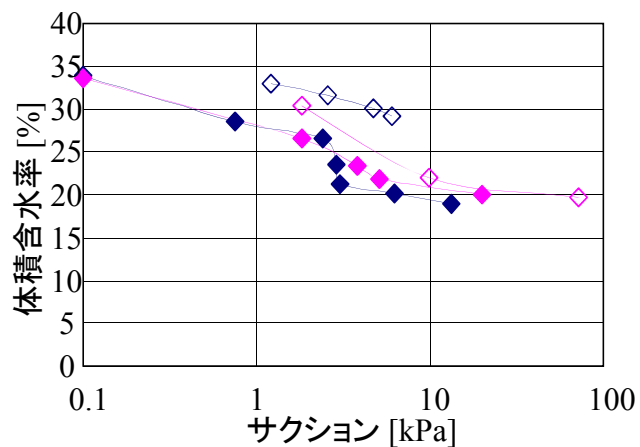


(b) 有効内部摩擦角と飽和度の関係

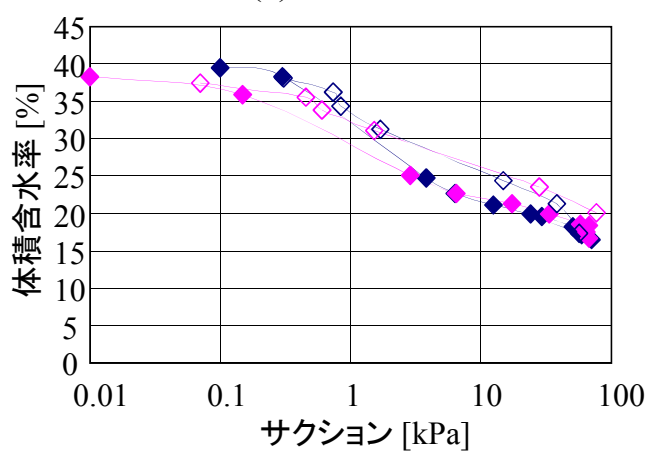
図2.8 飽和度との関係



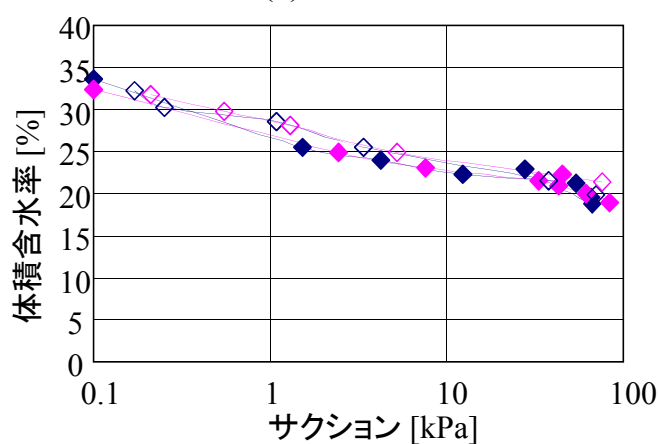
(a) GL-0.4m



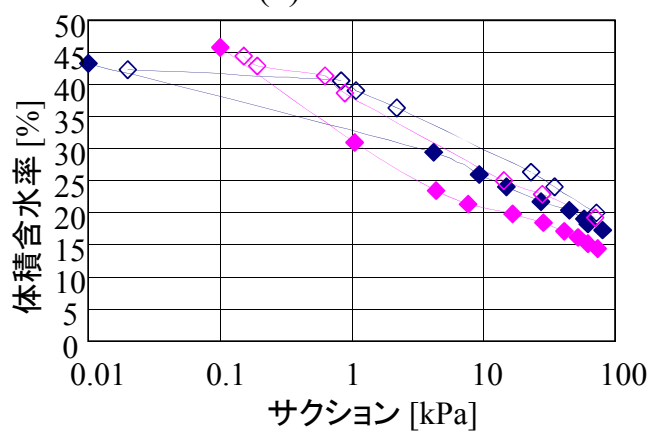
(a) GL-0.4m



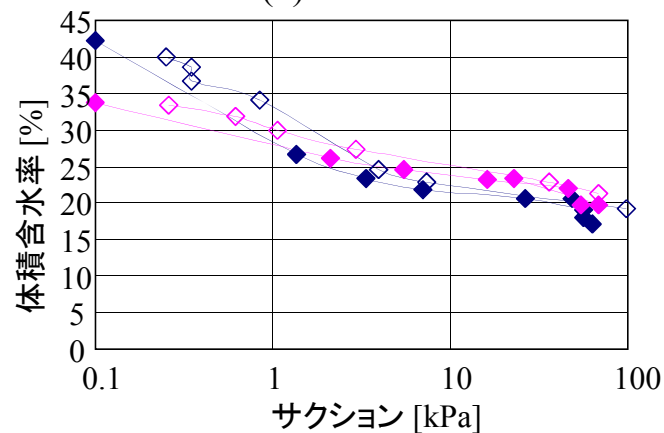
(b) GL-0.6m



(b) GL-0.6m



(c) GL-1.0m



(c) GL-1.0m



図2.9 室内試験結果(中腹部)

図2.10 室内試験結果(法尻部)

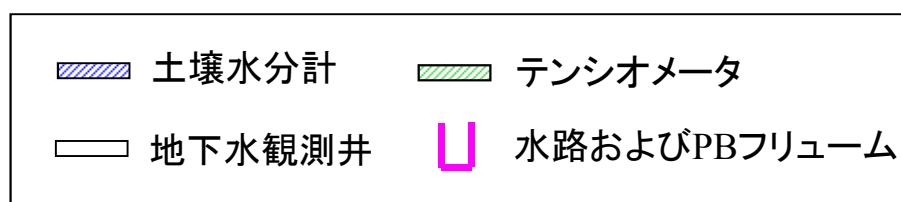
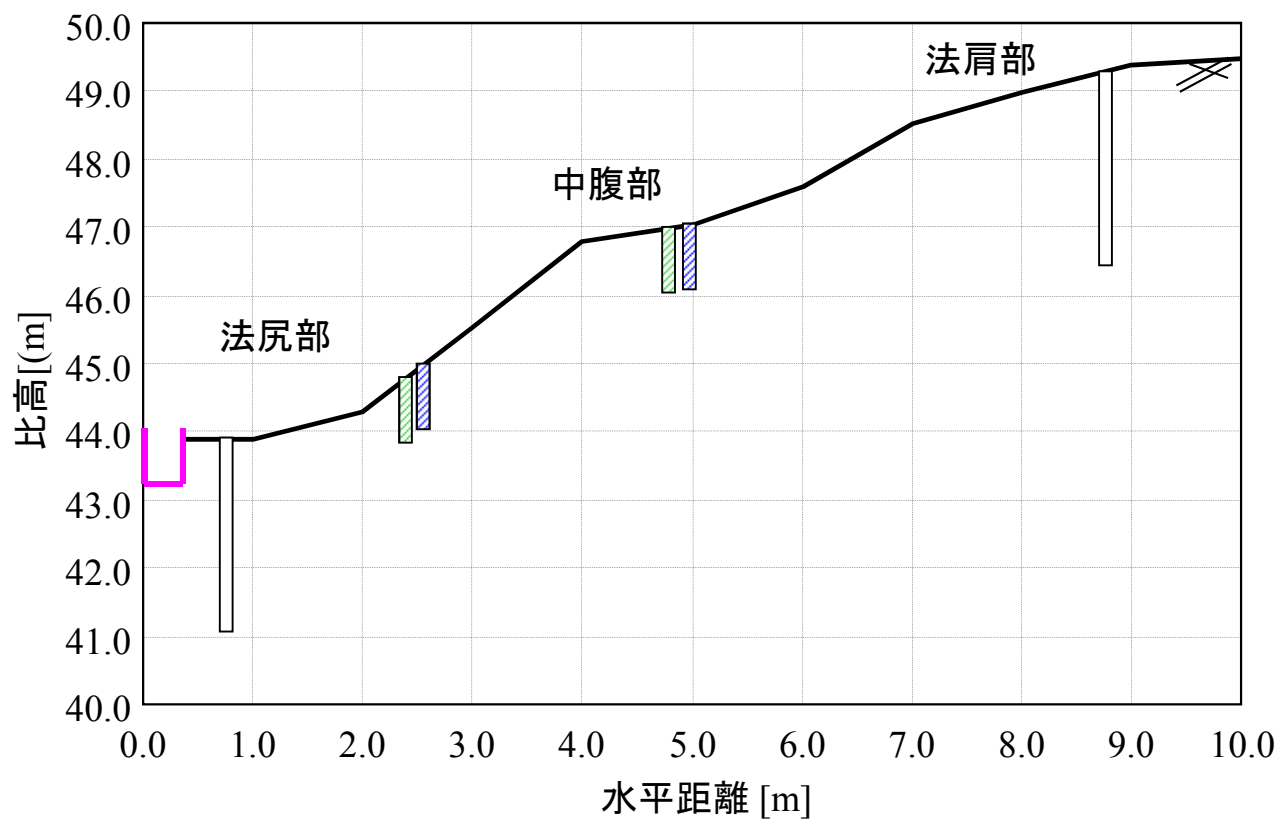


図2.11 斜面断面図(プーケット)

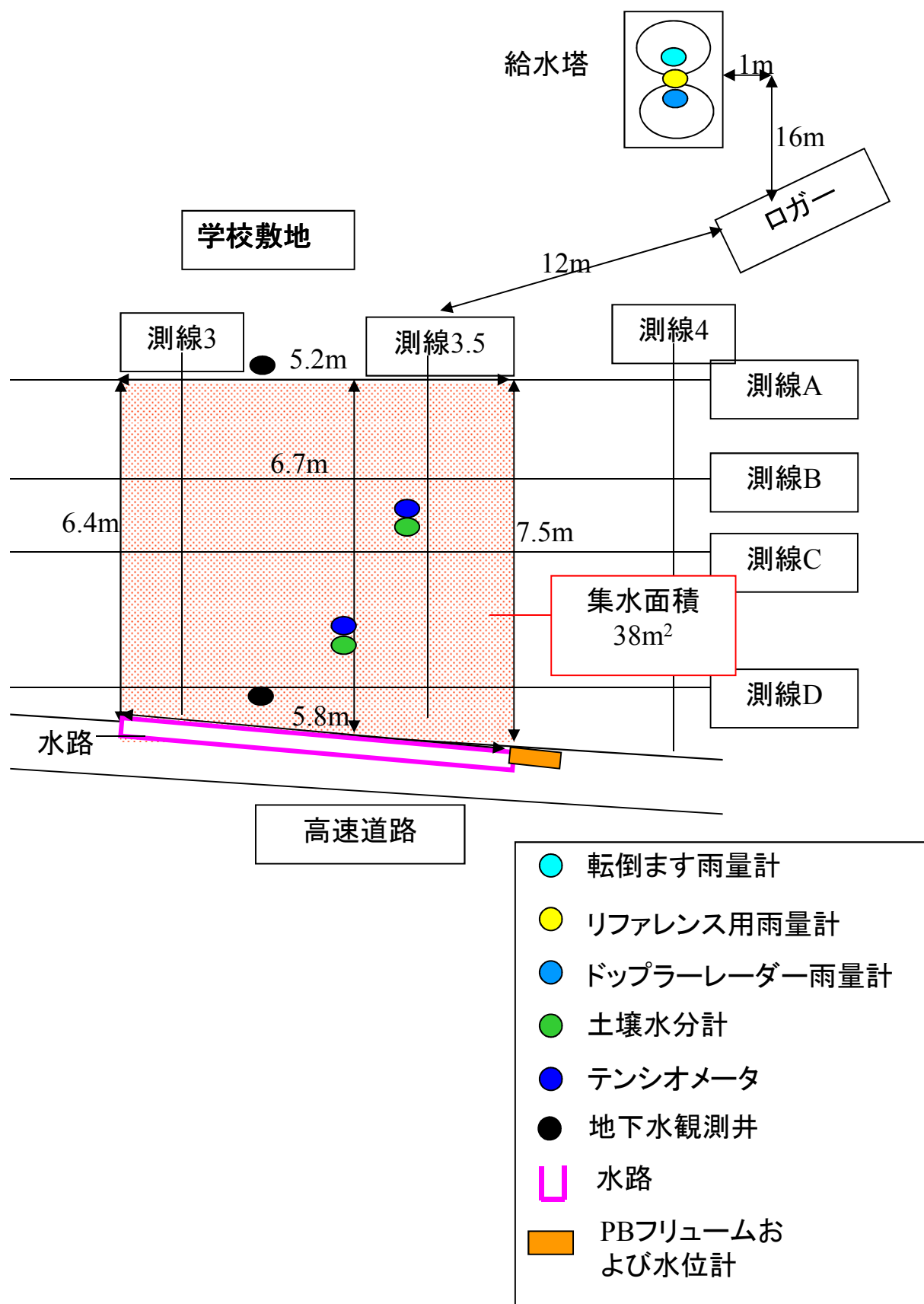
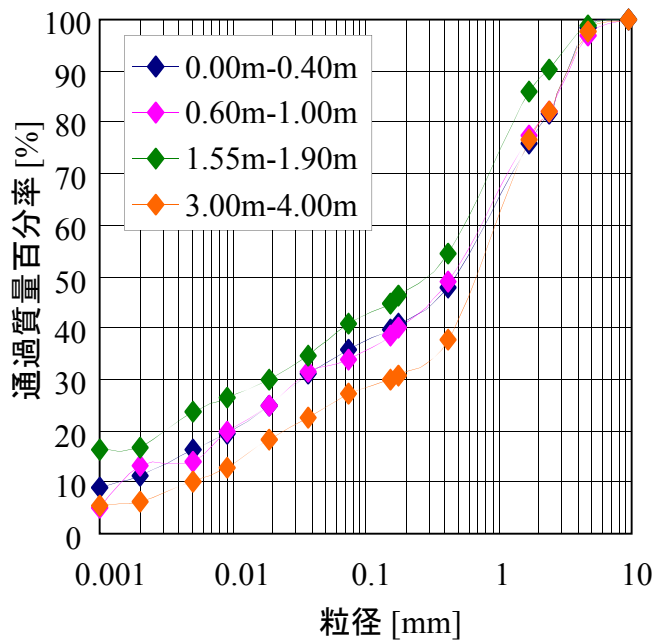
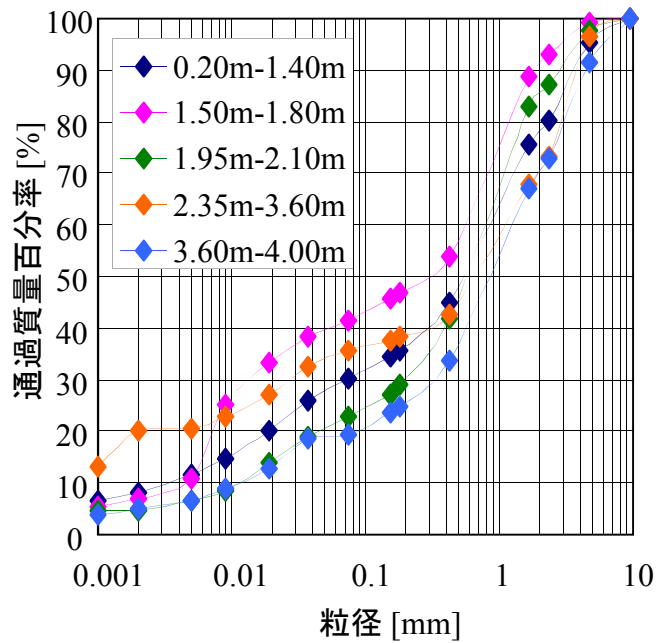


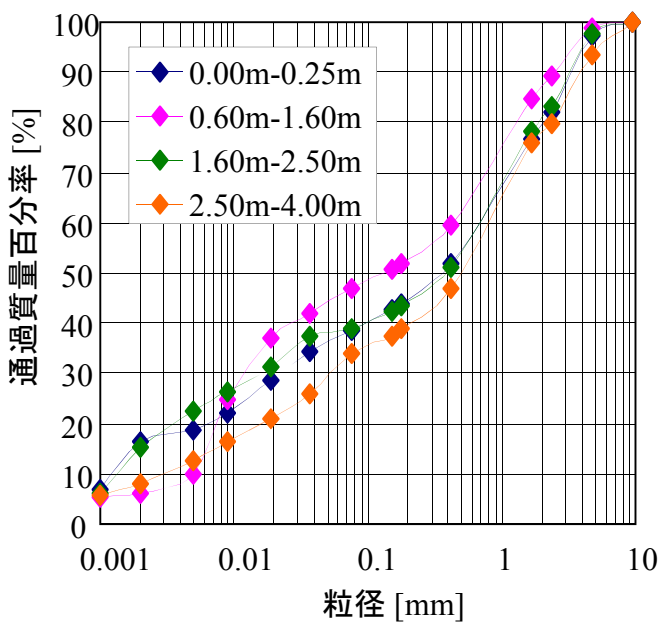
図2.12 斜面計器平面図(プーケット)



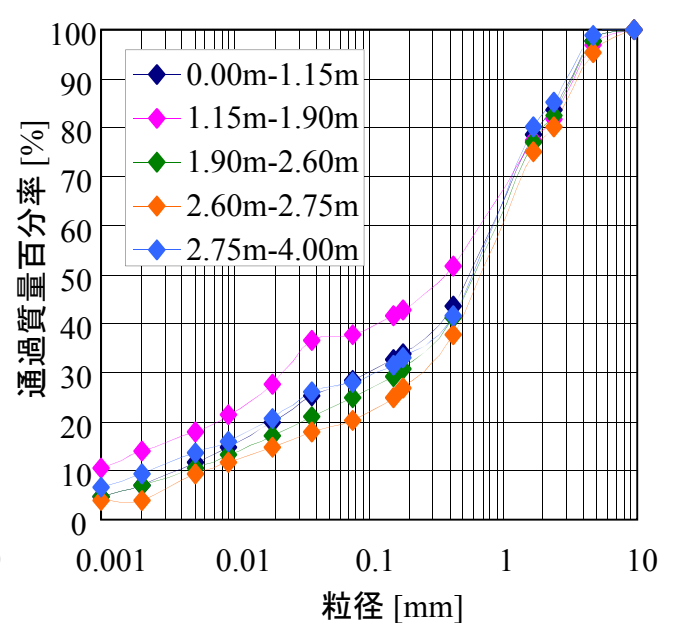
(a) B-3



(b) B-4

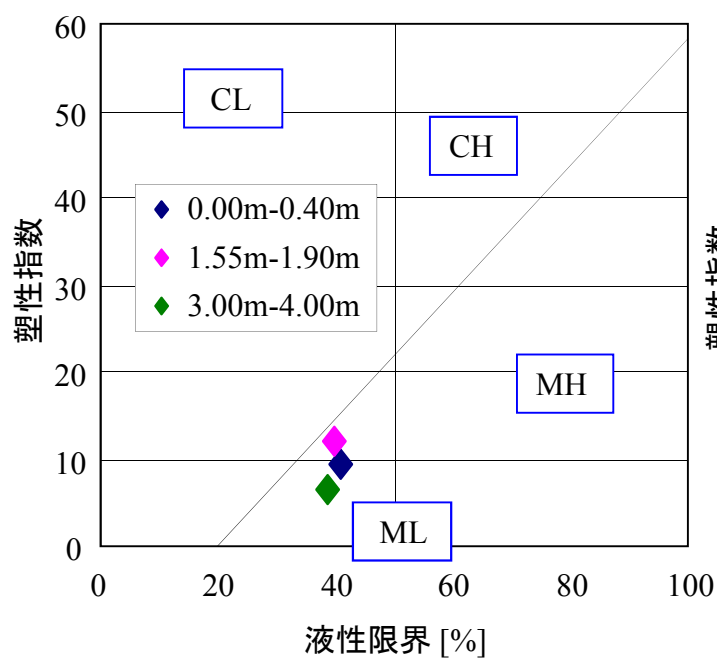


(c) C-3

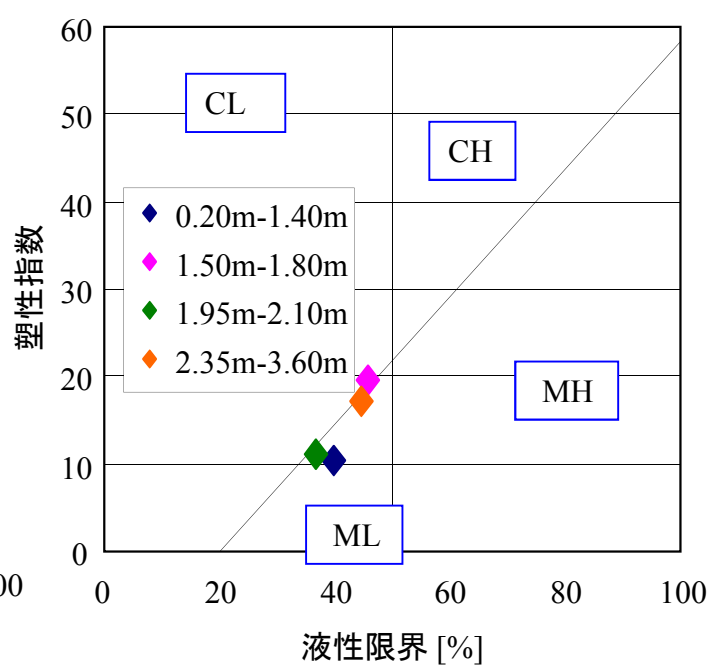


(d) D-3

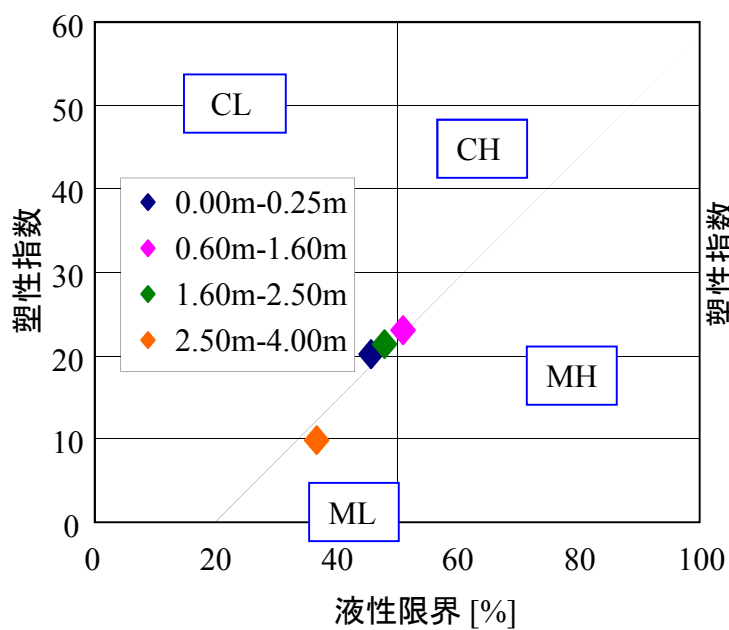
図2.13 粒径加積曲線



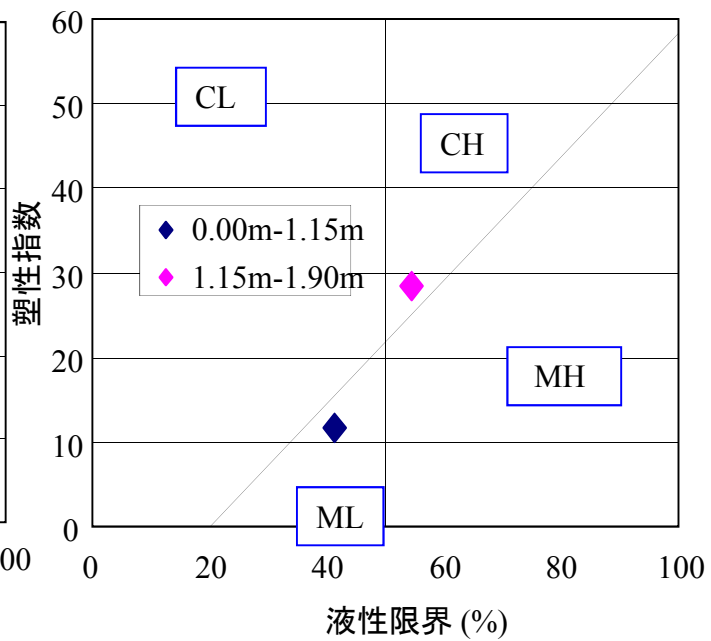
(a) B-3



(b) B-4

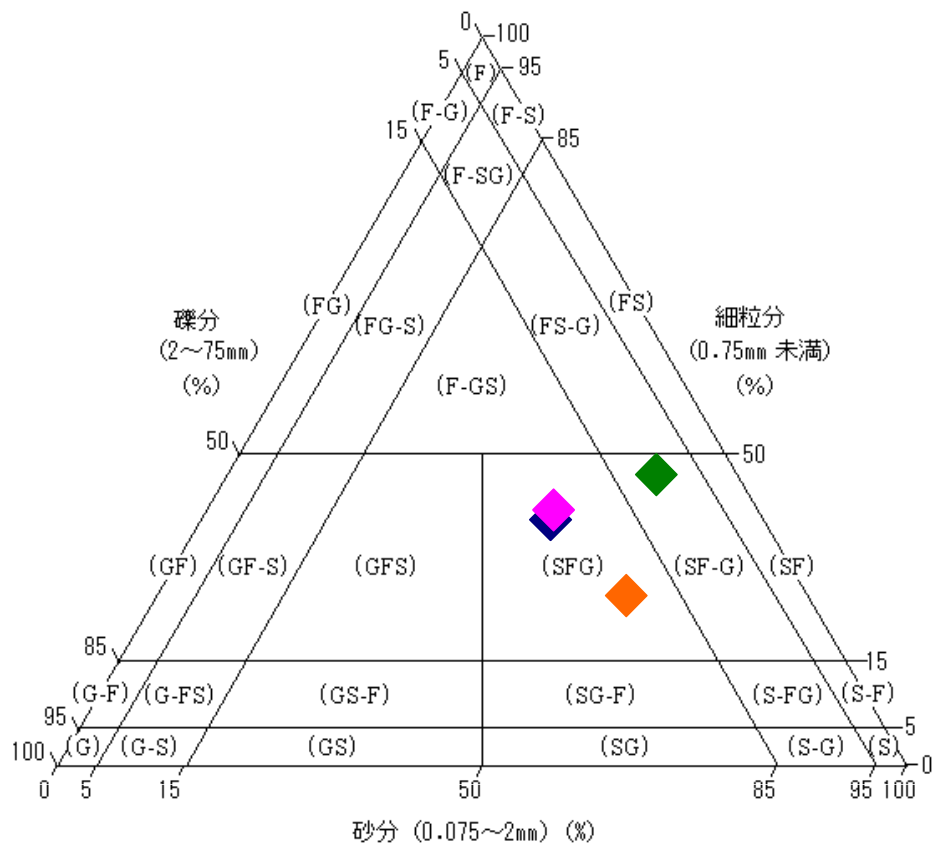


(c) C-3



(d) D-3

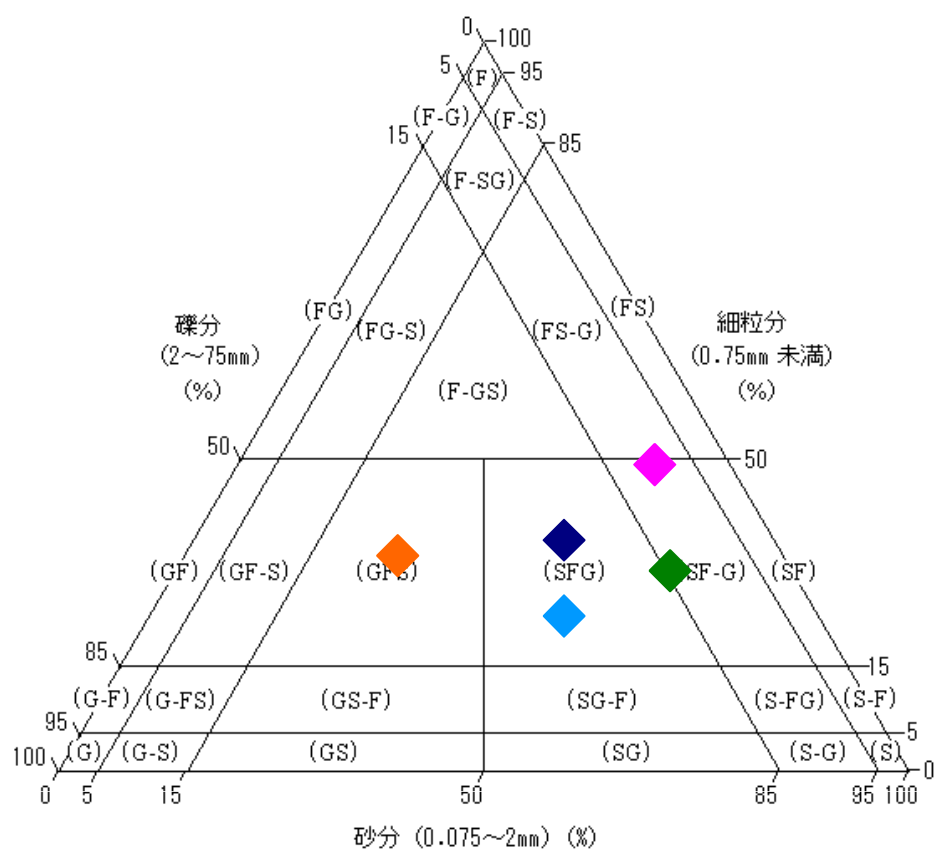
图2.14 塑性图



- ◆ 0.00m-0.40m : 細粒分質礫質砂 (SFG)
- ◆ 0.60m-1.00m : 細粒分質礫質砂 (SFG)
- ◆ 1.55m-1.90m : 礫まじり細粒分質砂 (SF-G)
- ◆ 3.00m-4.00m : 細粒分質礫質砂 (SFG)

(a) B-3

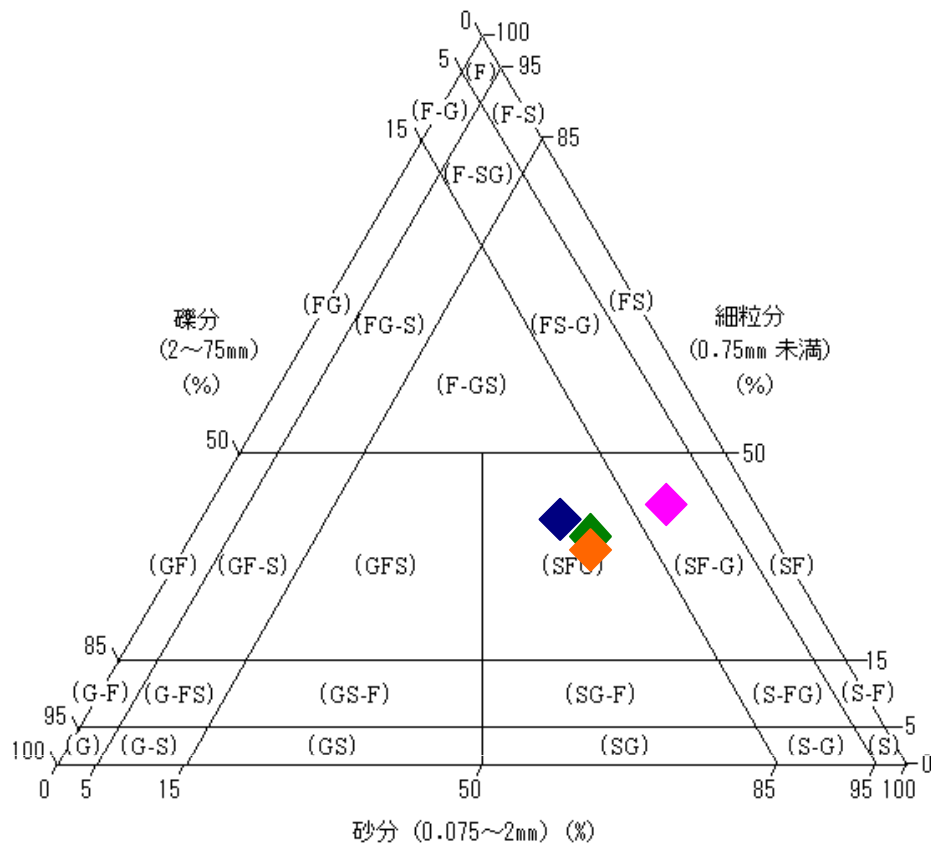
図2.15 三角座標



- ◆ 0.20m-1.40m : 細粒分質礫質砂 (SFG)
- ◆ 1.50m-1.80m : 礫まじり細粒分質砂 (SF-G)
- ◆ 1.95m-2.10m : 細粒分質礫質砂 (SFG)
- ◆ 2.35m-3.60m : 細粒分質砂質礫 (SFS)
- ◆ 3.60m-4.00m : 細粒分質礫質砂 (SFG)

(b) B-4

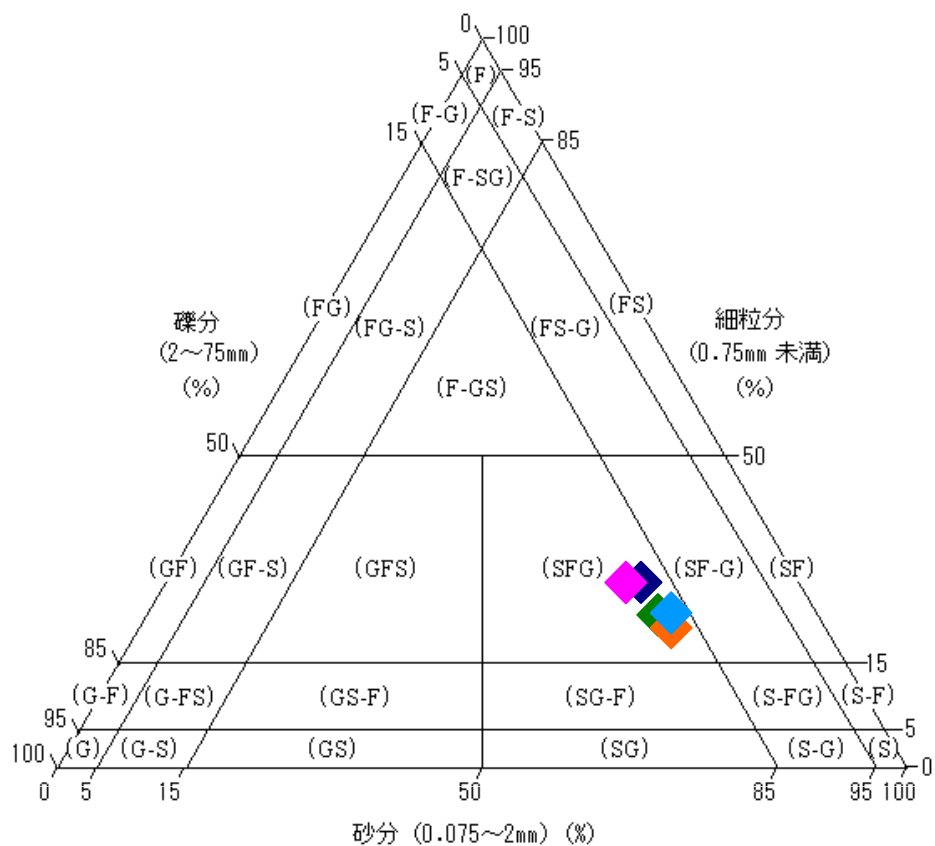
図2.15 三角座標



- ◆ 0.00m-0.25m : 細粒分質礫質砂 (SFG)
- ◆ 0.60m-1.60m : 礫まじり細粒分質砂 (SF-G)
- ◆ 1.60m-2.50m : 細粒分質礫質砂 (SFG)
- ◆ 2.50m-4.00m : 細粒分質礫質砂 (SFG)

(c) C-3

図2.15 三角座標



◆	0.00m-1.15m : 細粒分質礫質砂 (SFG)
◆	1.15m-1.90m : 細粒分質礫質砂 (SFG)
◆	1.90m-2.60m : 細粒分質礫質砂 (SFG)
◆	2.60m-2.75m : 細粒分質礫質砂 (SFG)
◆	2.75m-4.00m : 細粒分質礫質砂 (SFG)

(d) D-3

図2.15 三角座標

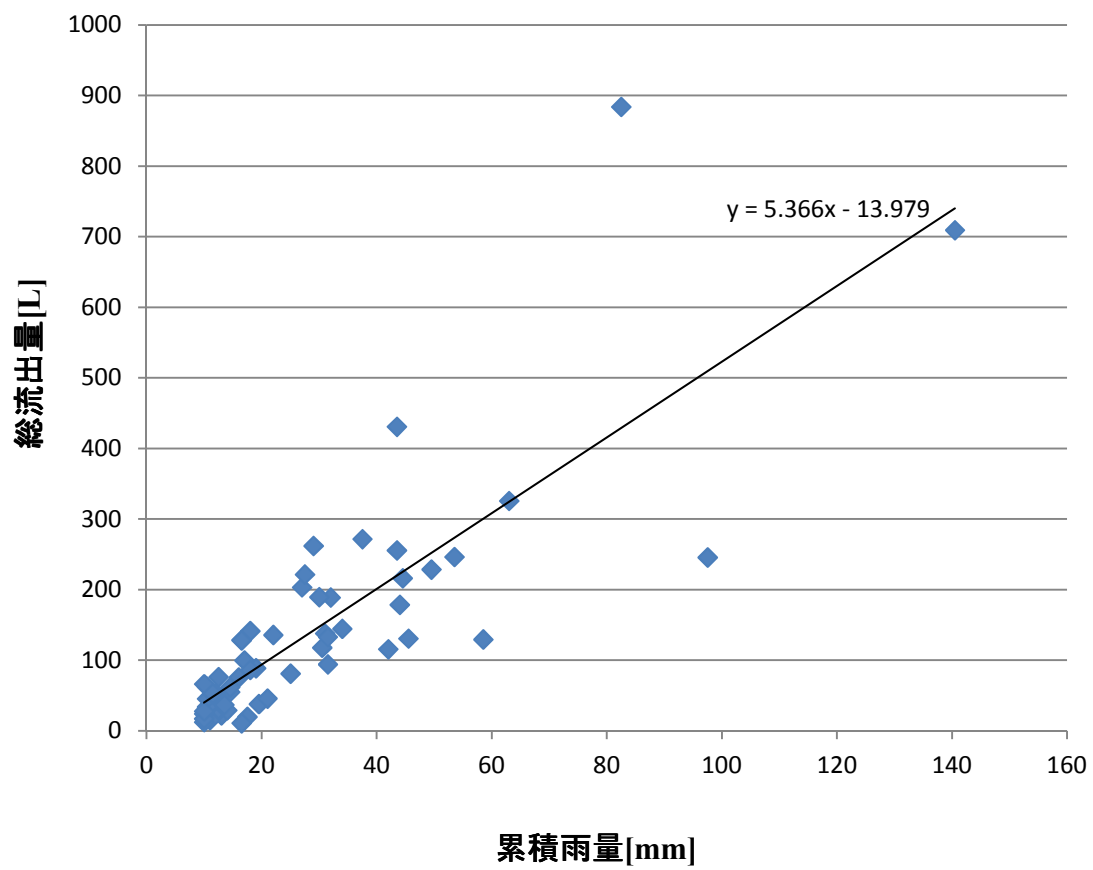


図2.16 累積雨量と総流出量の関係

P : 降雨量	E : 蒸発散	X : 貯留量
α : 流出係数	H : 流出孔高さ	β : 浸透係数

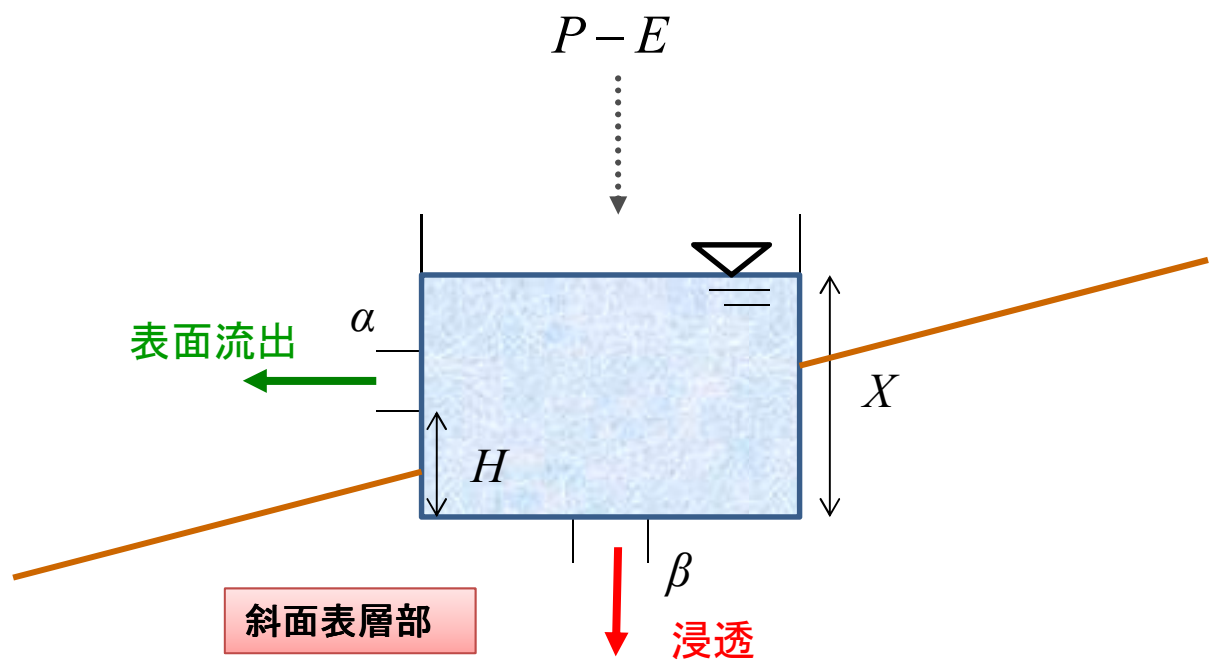
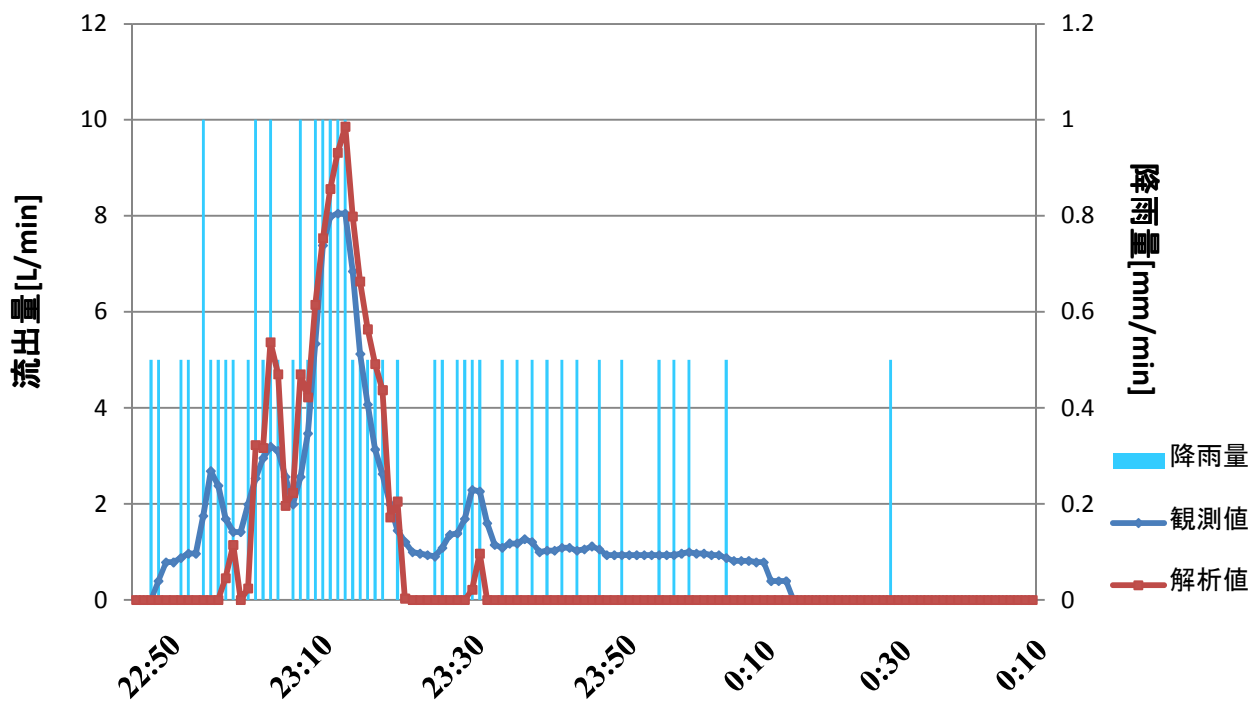
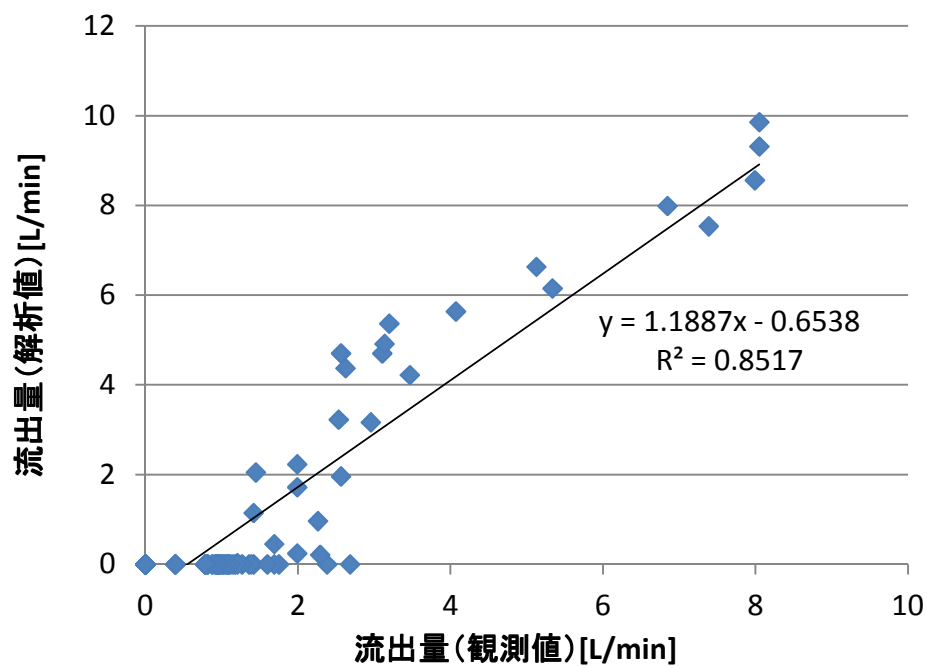


図2.17 シングルタンクモデルの概要



(a) 流出量の観測値と解析値の比較



(b) 流出量の観測値と解析値の相関性

図2.18 シングルタンクモデルの適用結果

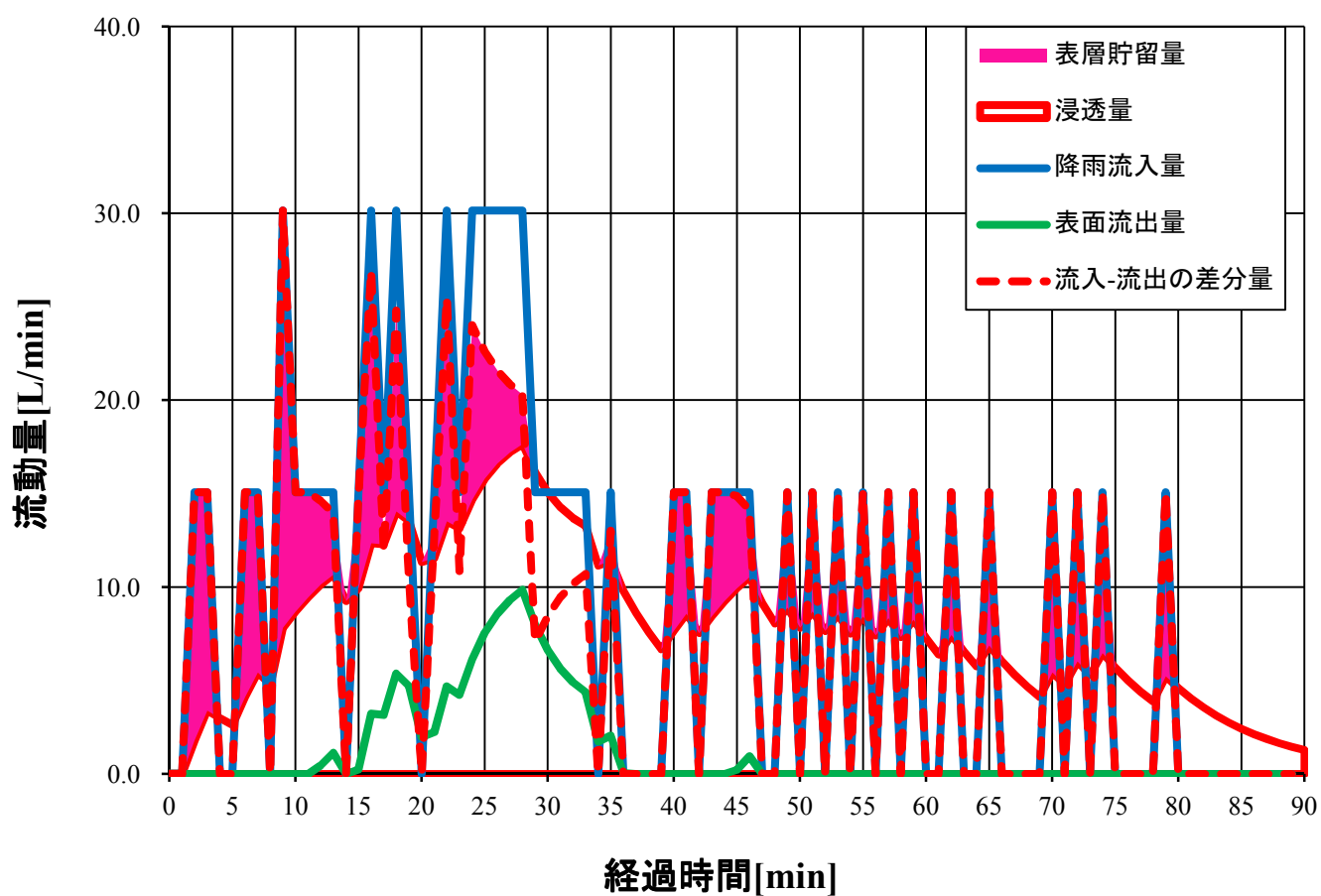


図2.19 シングルタンクモデル解析による水収支

P : 降雨量	E : 蒸発散	X : 貯留量
α : 流出係数	H : 流出孔高さ	β : 浸透係数

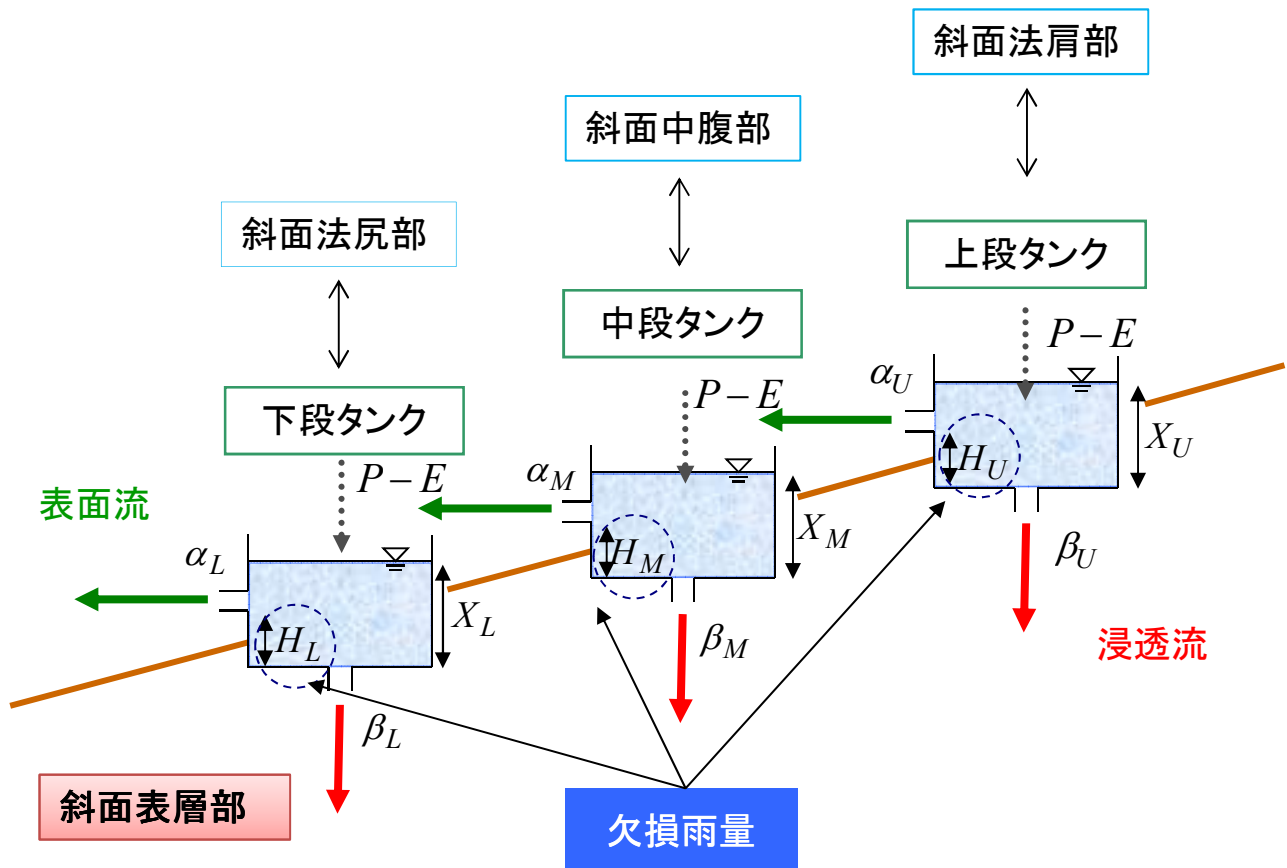


図3.1 拡張型マルチタンクモデルの概要

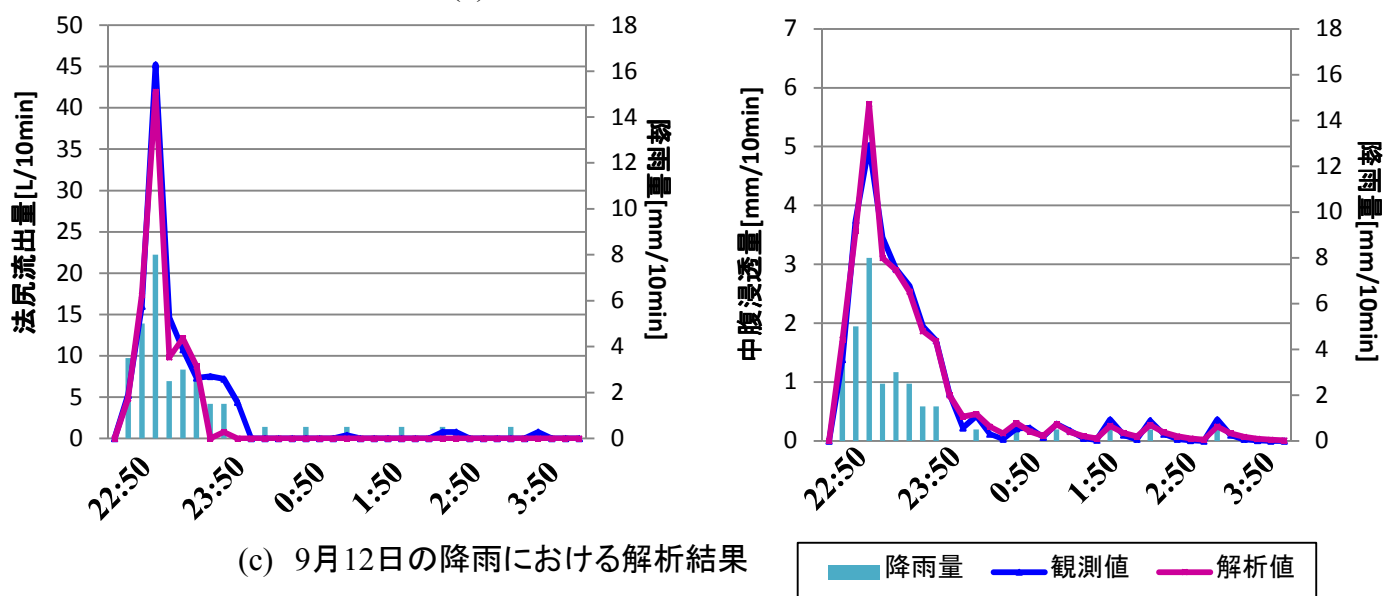
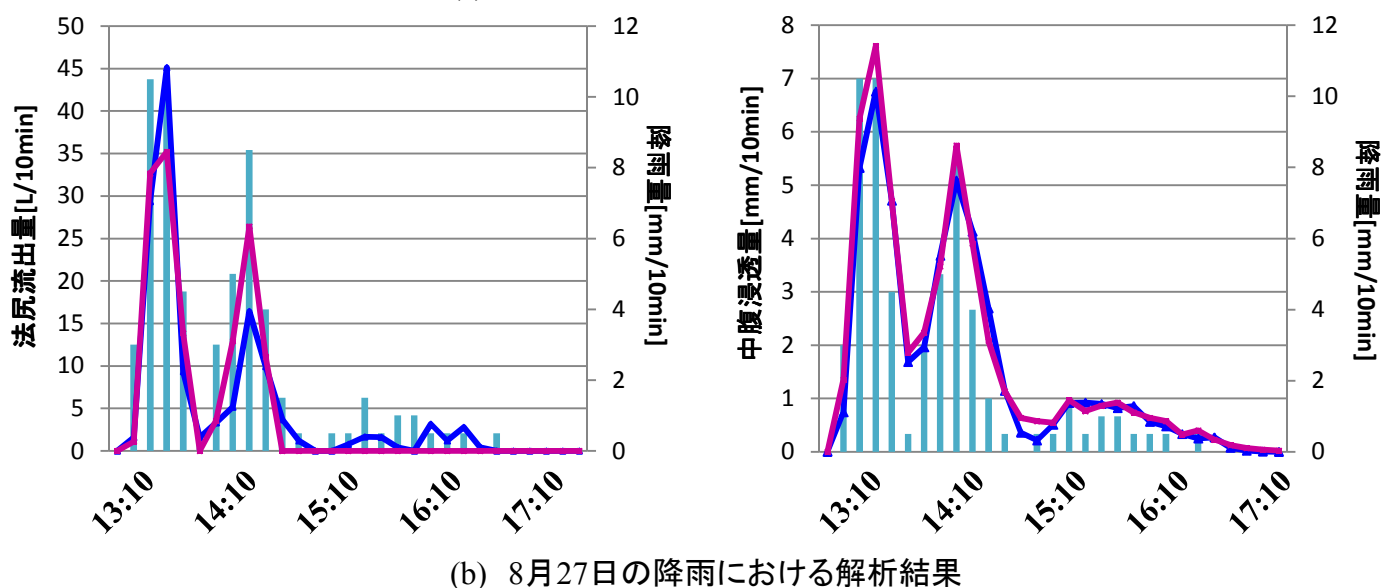
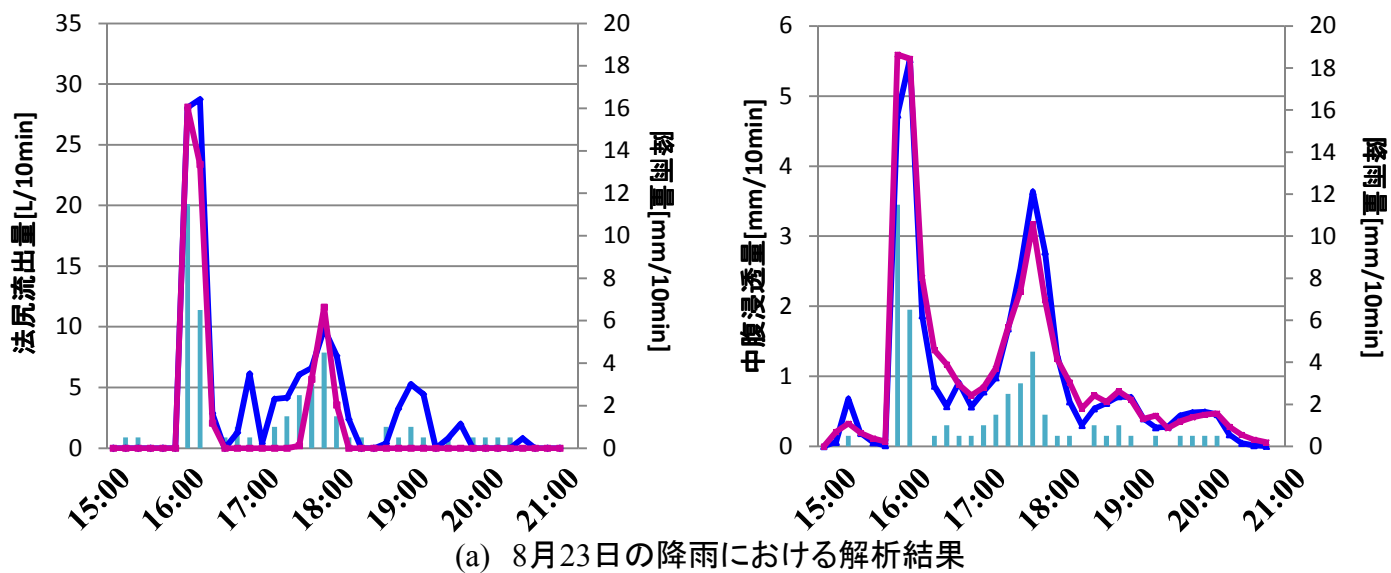
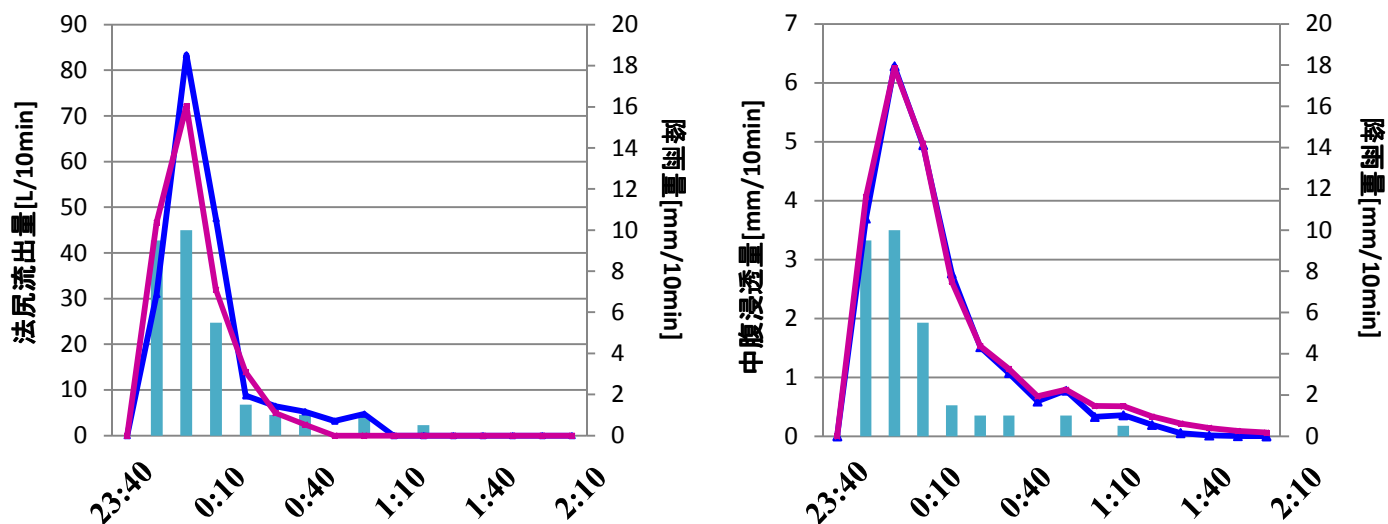
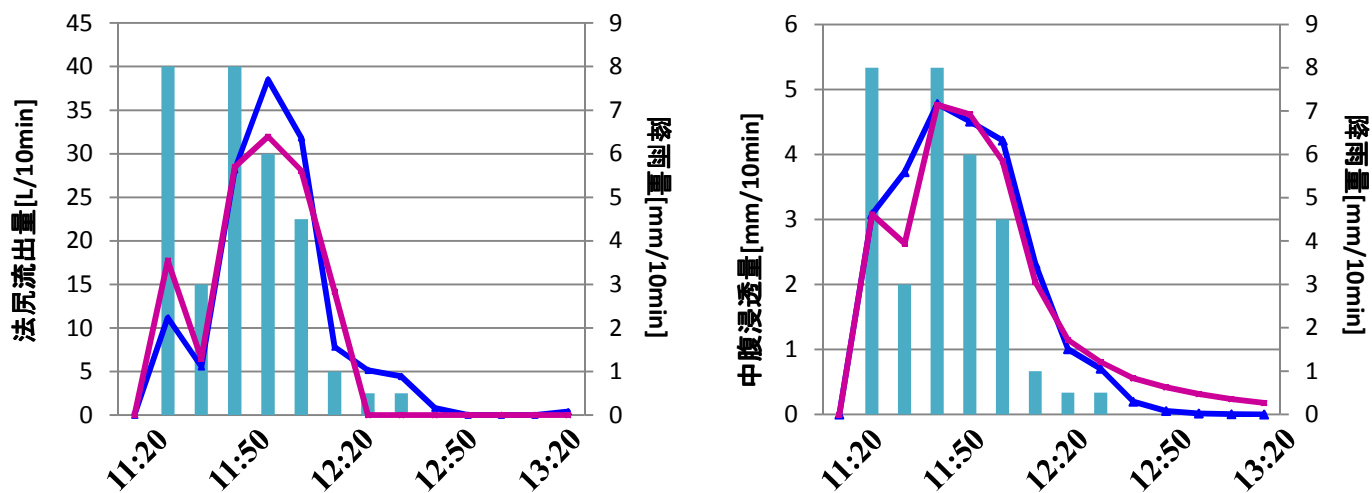


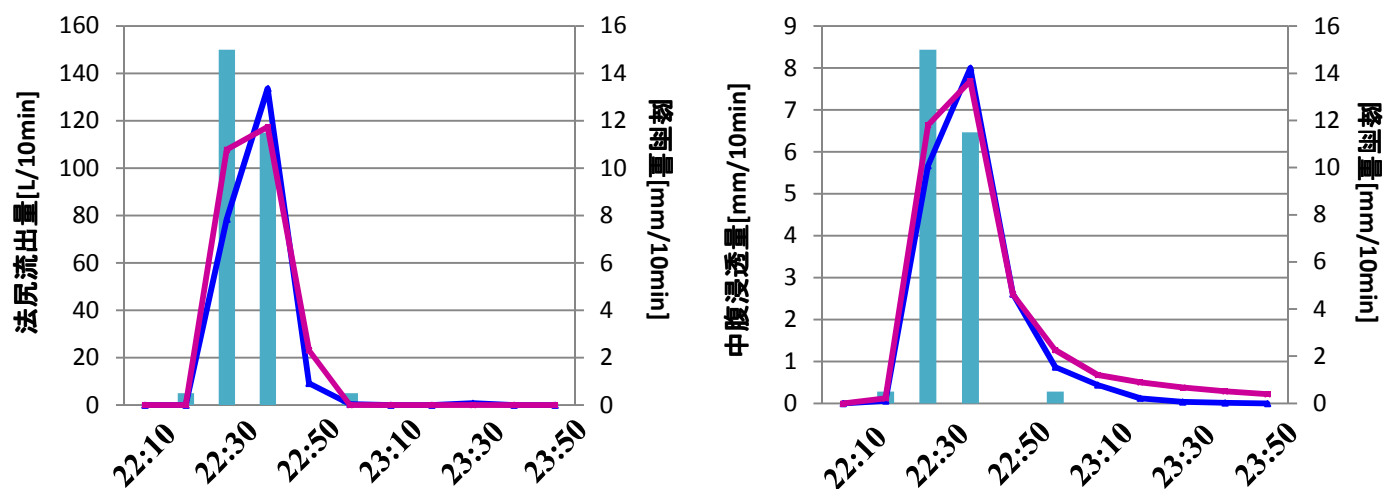
図3.2 法尻流出量, 中腹浸透量の解析結果



(d) 9月18日の降雨における解析結果



(e) 10月13日の降雨における解析結果



(f) 10月17日の降雨における解析結果

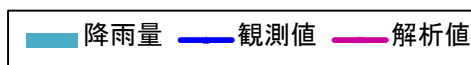
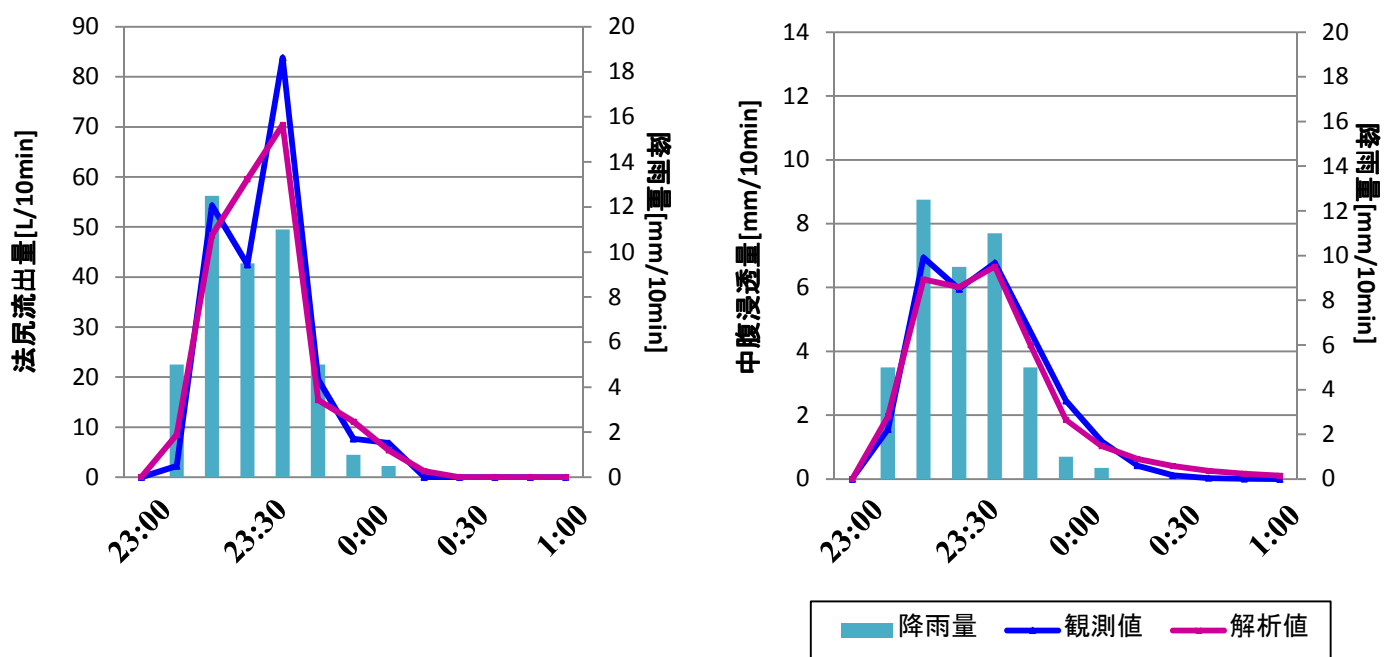
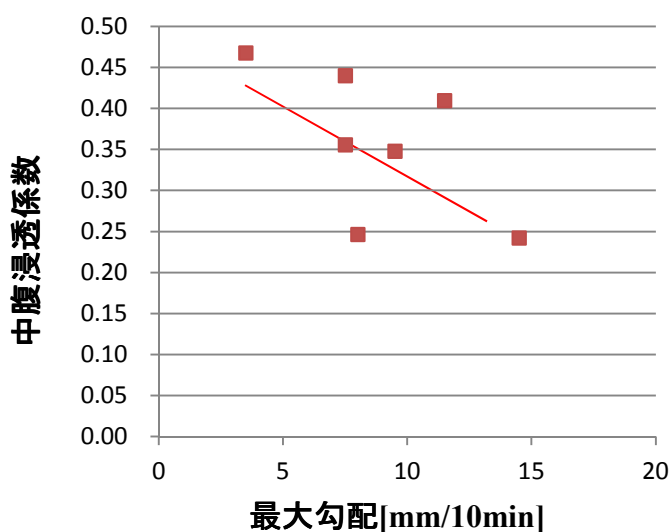
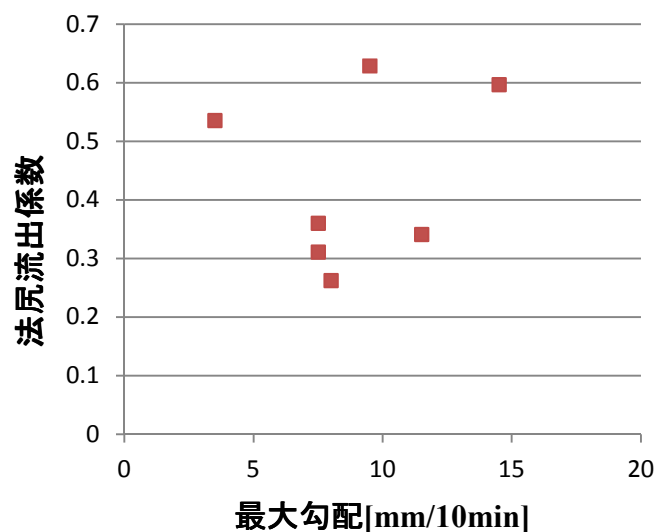


図3.2 法尻流出量, 中腹浸透量の解析結果

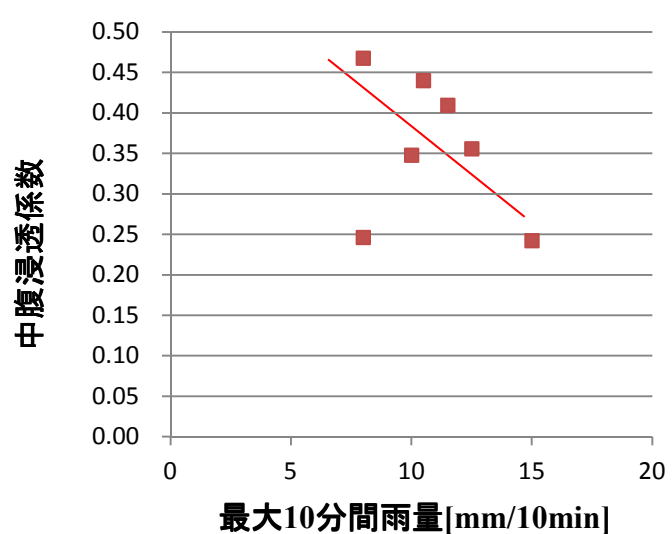
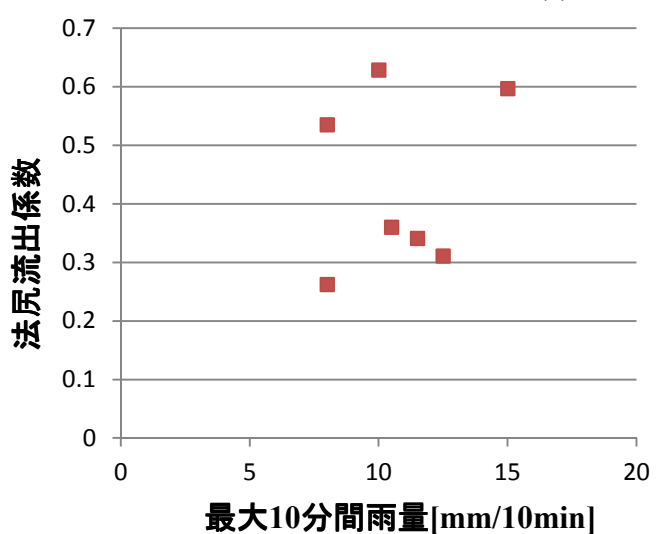


(g) 11月21日の降雨における解析結果

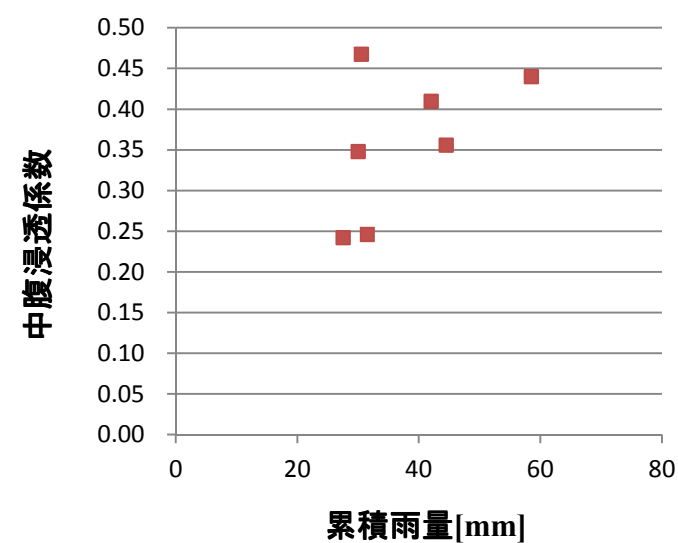
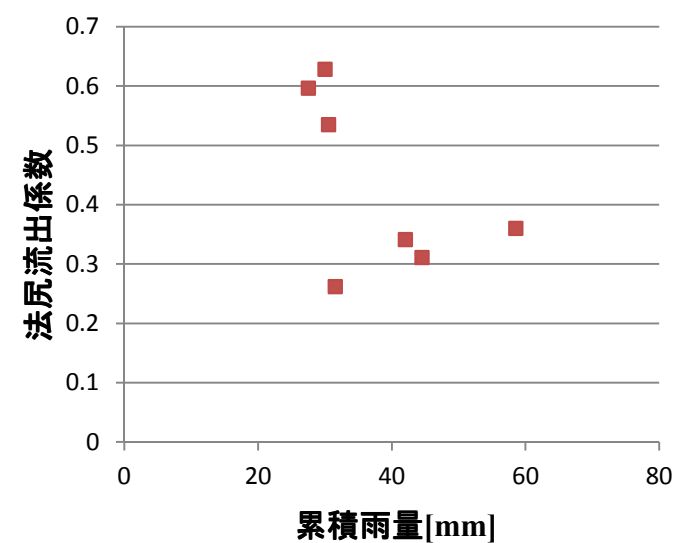
図3.2 法尻流出量, 中腹浸透量の解析結果



(a) 最大勾配と係数の関係

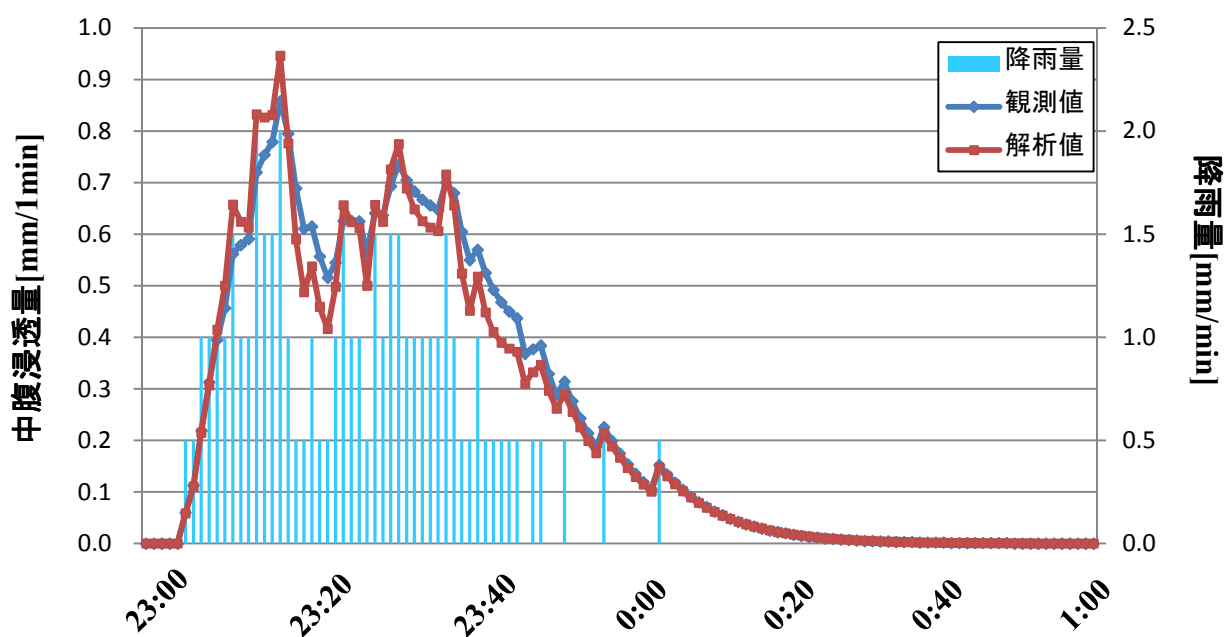


(b) 最大10分間雨量と係数の関係

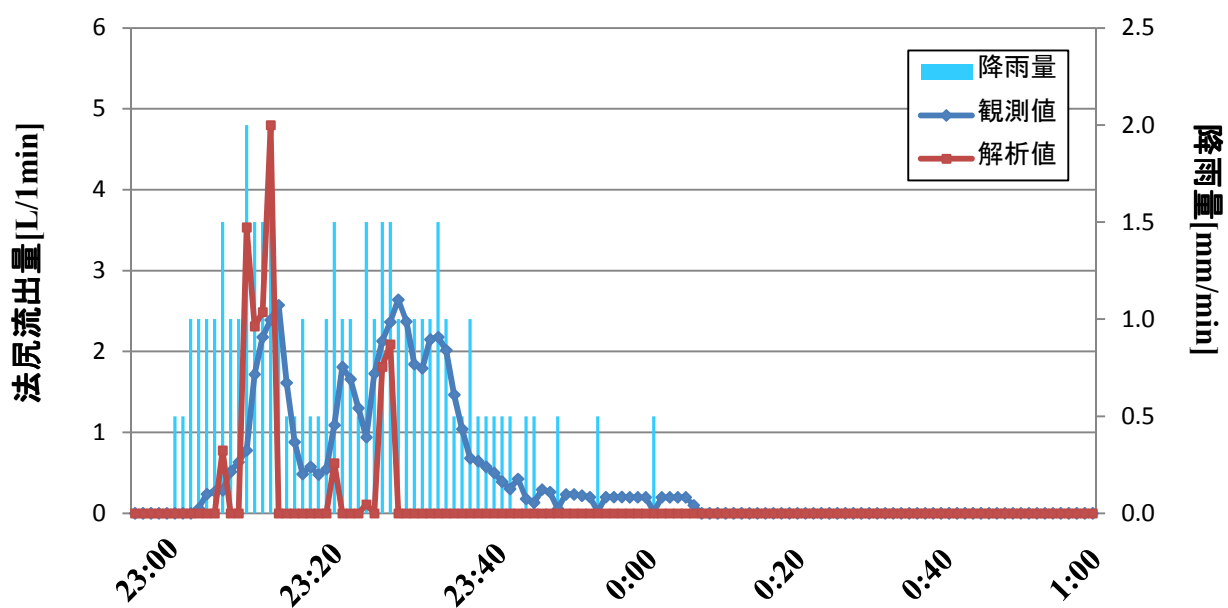


(c) 累積雨量と係数の関係

図3.3 パラメータの傾向



(a) 中腹浸透量の解析結果の推移

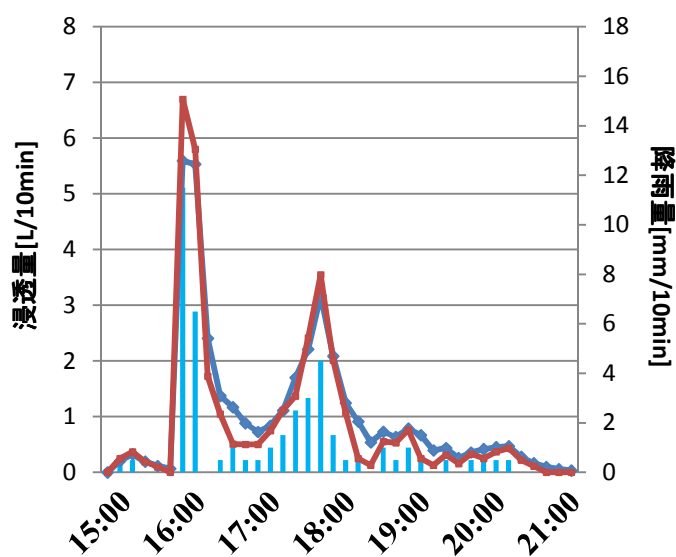


(b) 法尻流出量の解析結果の推移

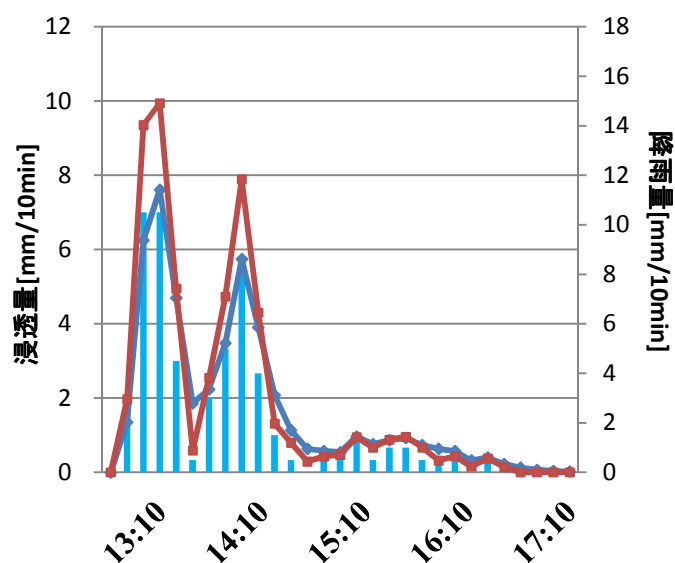
降雨の発生日時	最適パラメータ					
	α_U	α_M	α_L	β_U	β_M	β_L
プーケット 2012/11/21	0.927	0.335	0.374	0.191	0.117	0.738

(c) 最適パラメータ

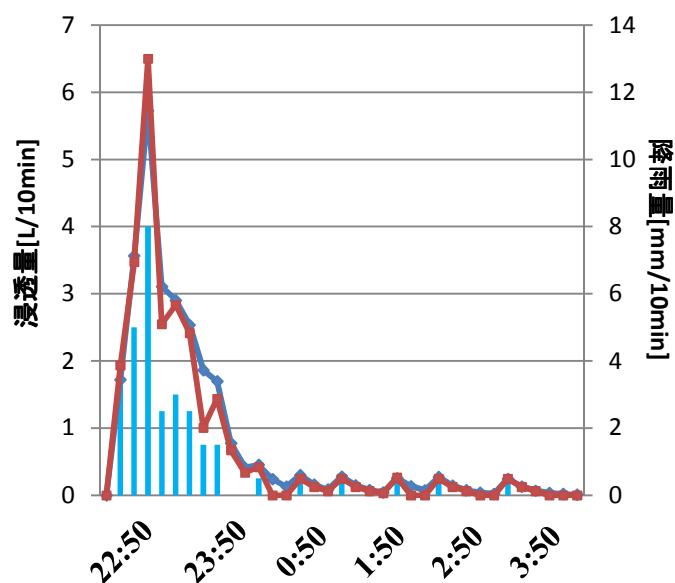
図3.4 1分間隔でのタンクモデルによる解析結果



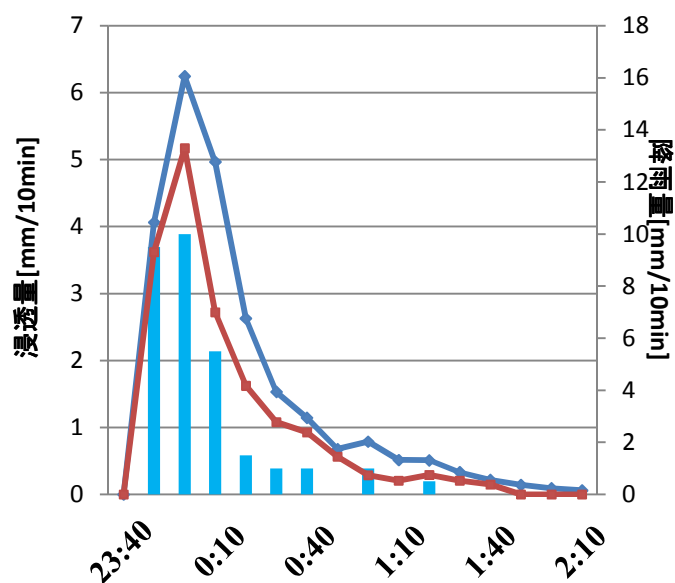
(a) 8月23日の降雨における比較



(b) 8月27日の降雨における比較



(c) 9月12日の降雨における比較



(d) 9月18日の降雨における比較

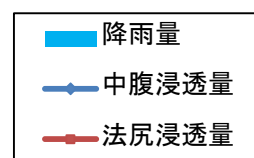
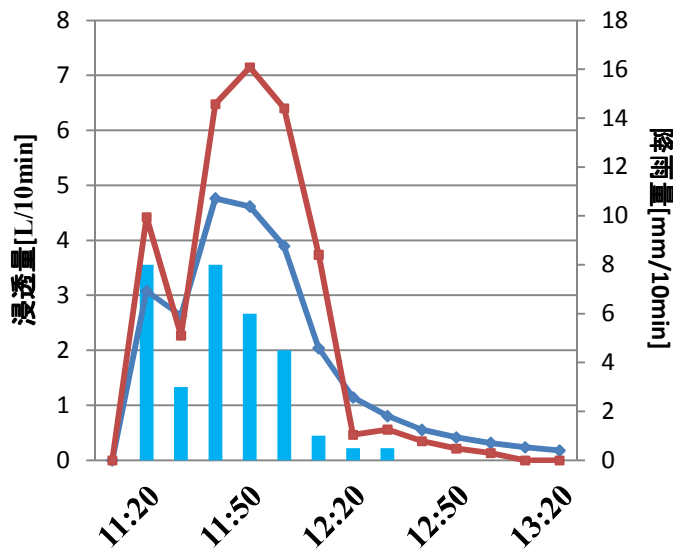
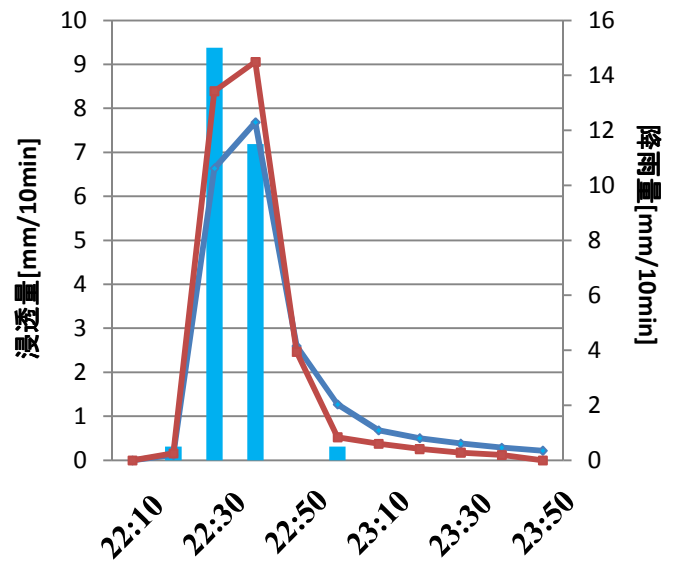


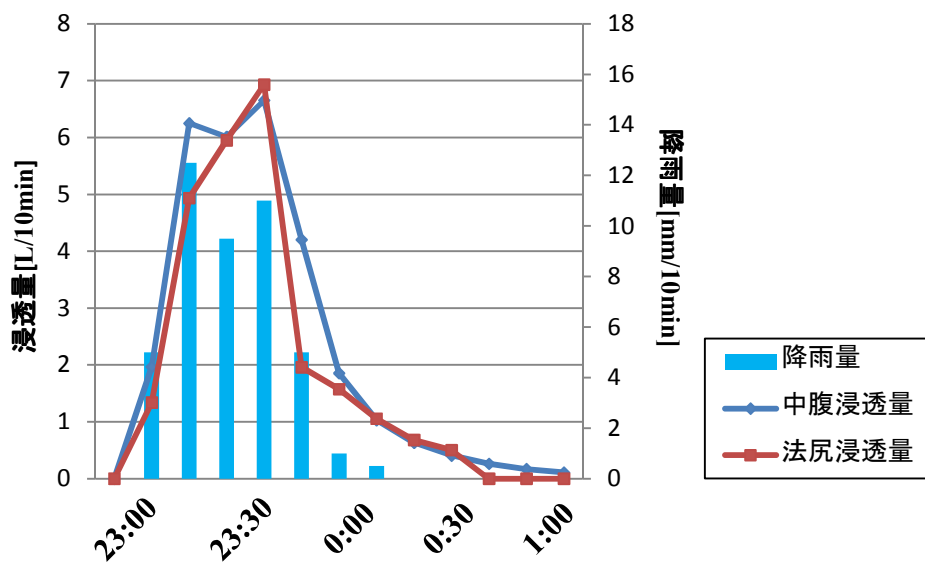
図3.5 法尻解析浸透量と中腹解析浸透量の比較



(e) 10月13日の降雨における比較

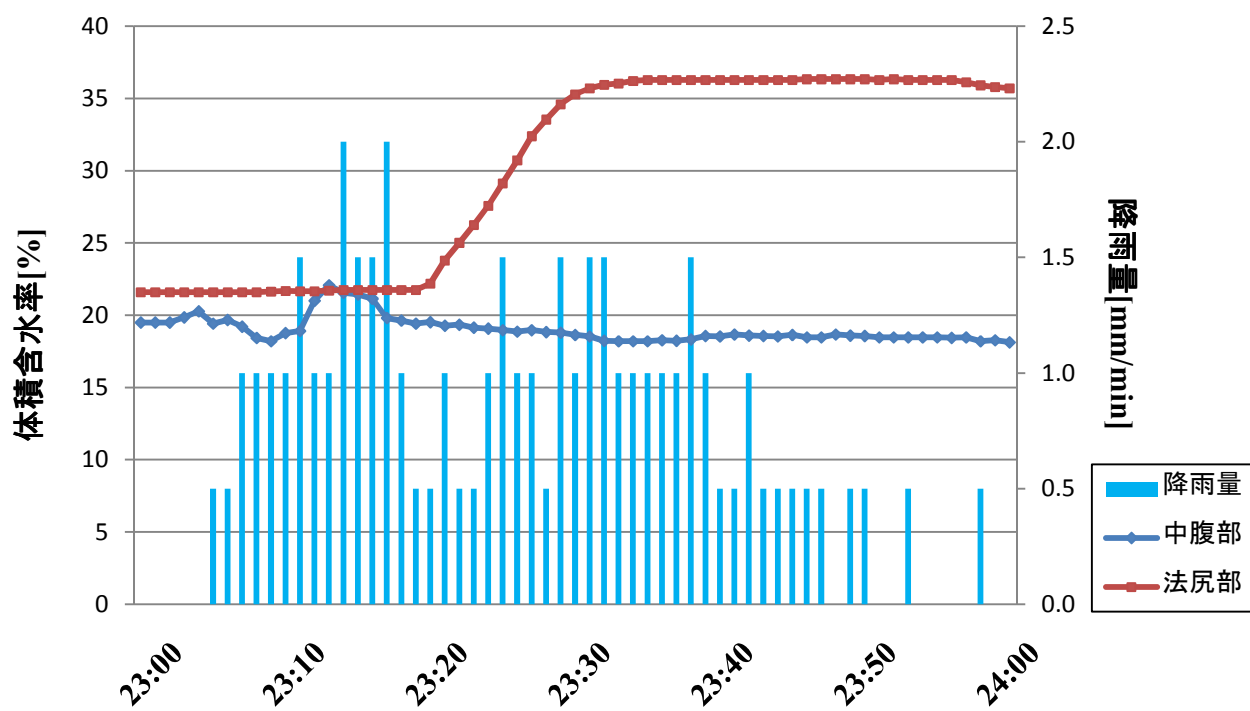


(f) 10月17日の降雨における比較

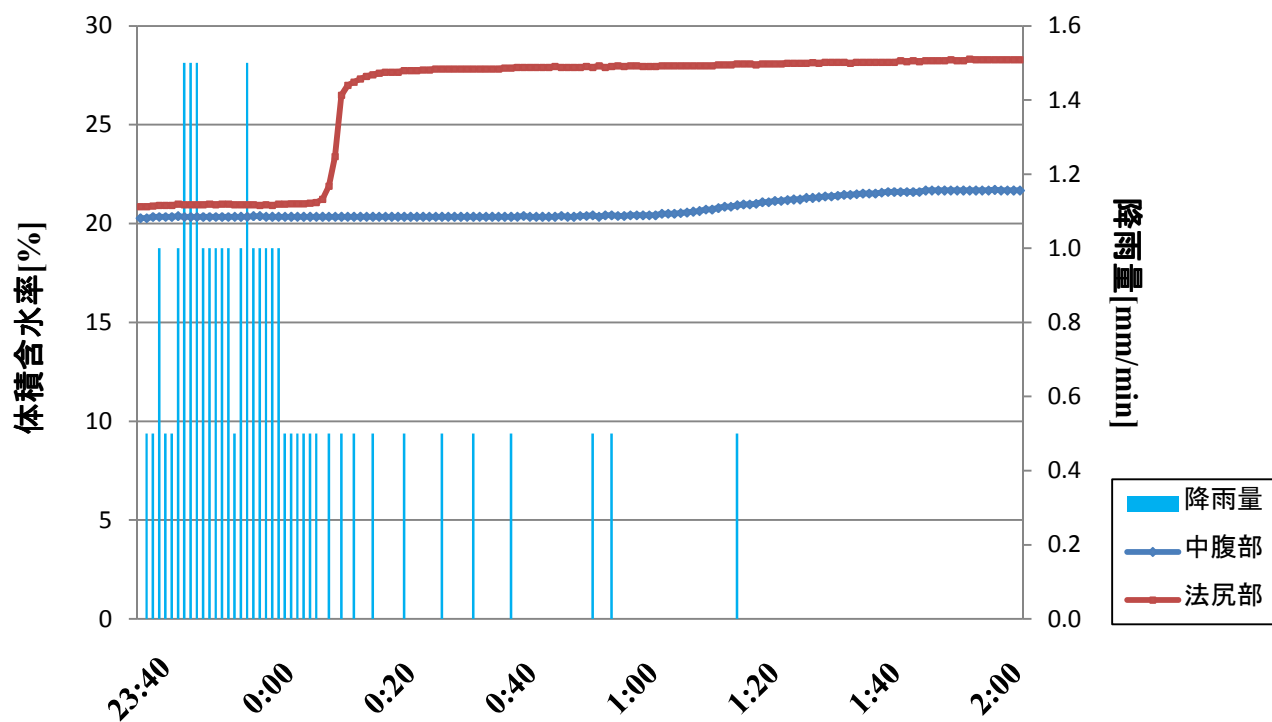


(g) 11月21日の降雨における比較

図3.5 法尻解析浸透量と中腹解析浸透量の比較

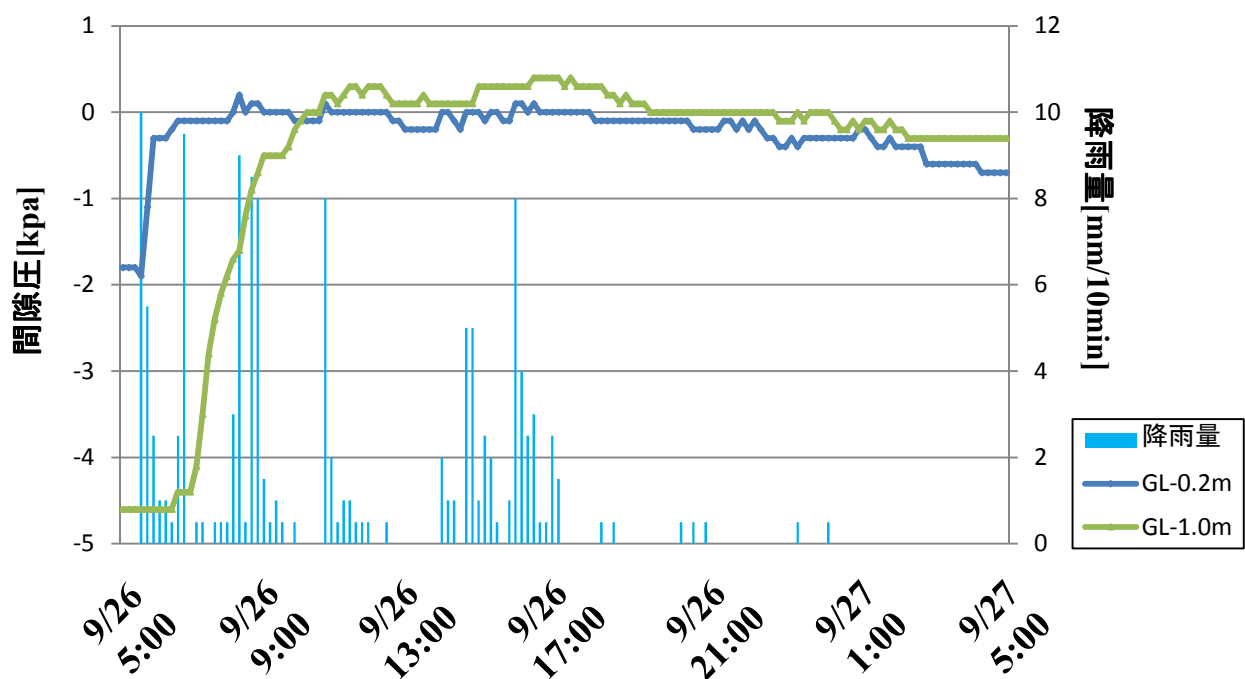


(a) 11月21日の降雨における比較

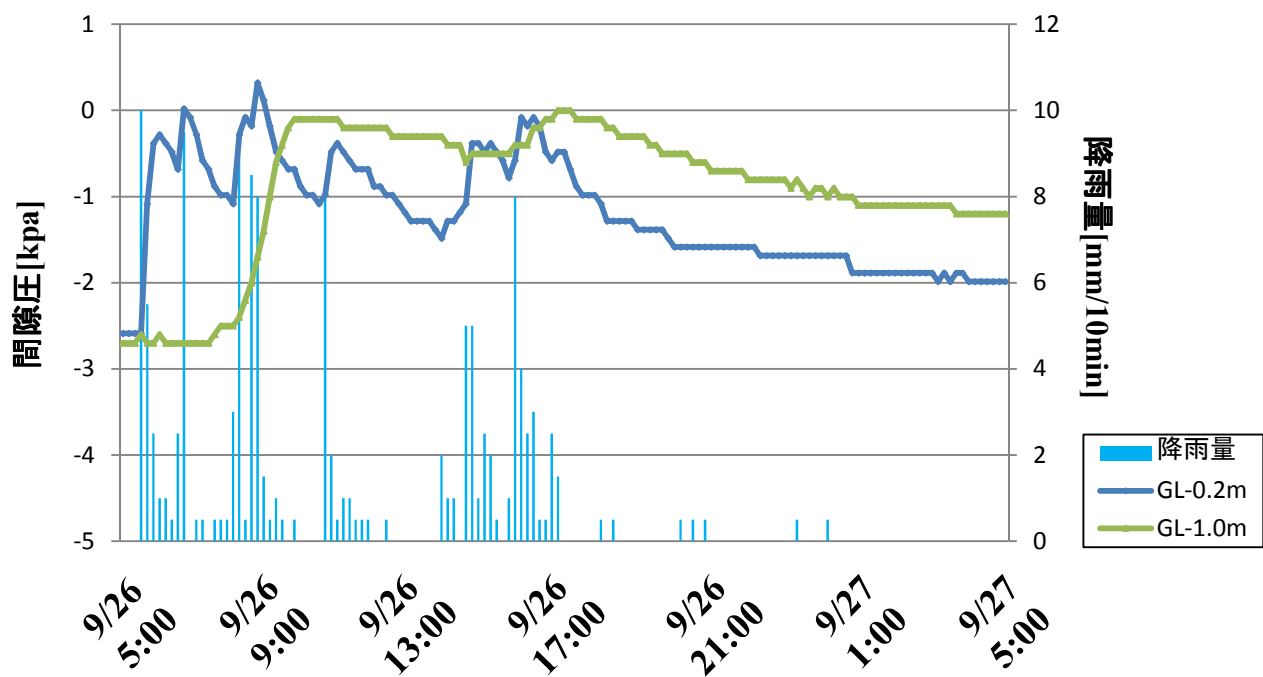


(b) 9月18日の降雨における比較

図3.6 体積含水率の推移

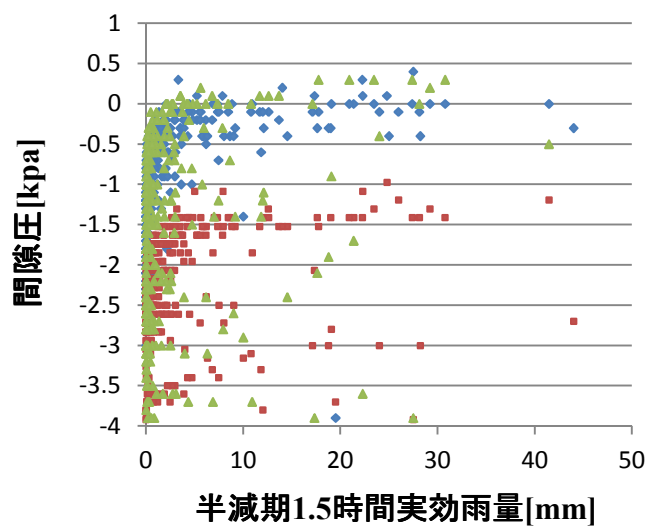


(a) 法尻部における間隙圧の推移

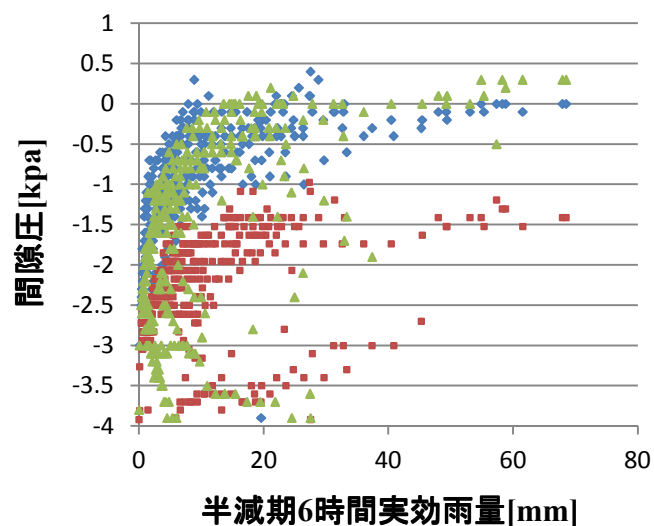


(b) 中腹部における間隙圧の推移

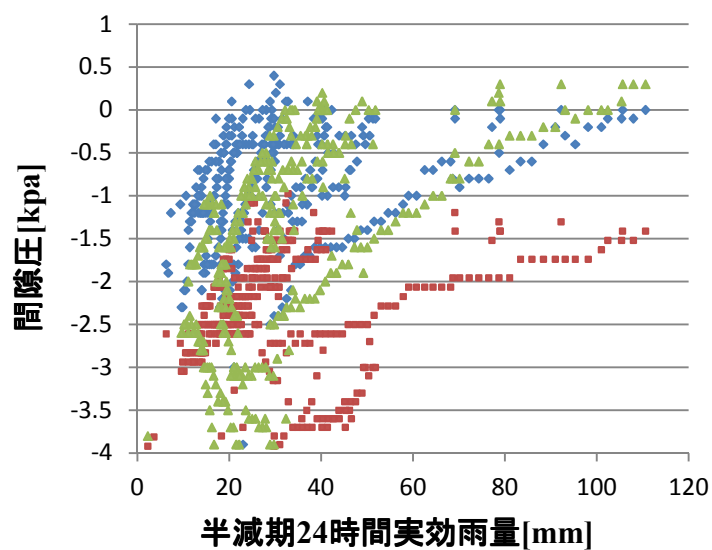
図3.7 間隙圧の推移



(a) 半減期1.5時間



(b) 半減期6時間



(b) 半減期24時間

図4.1 実効雨量と間隙圧の関係

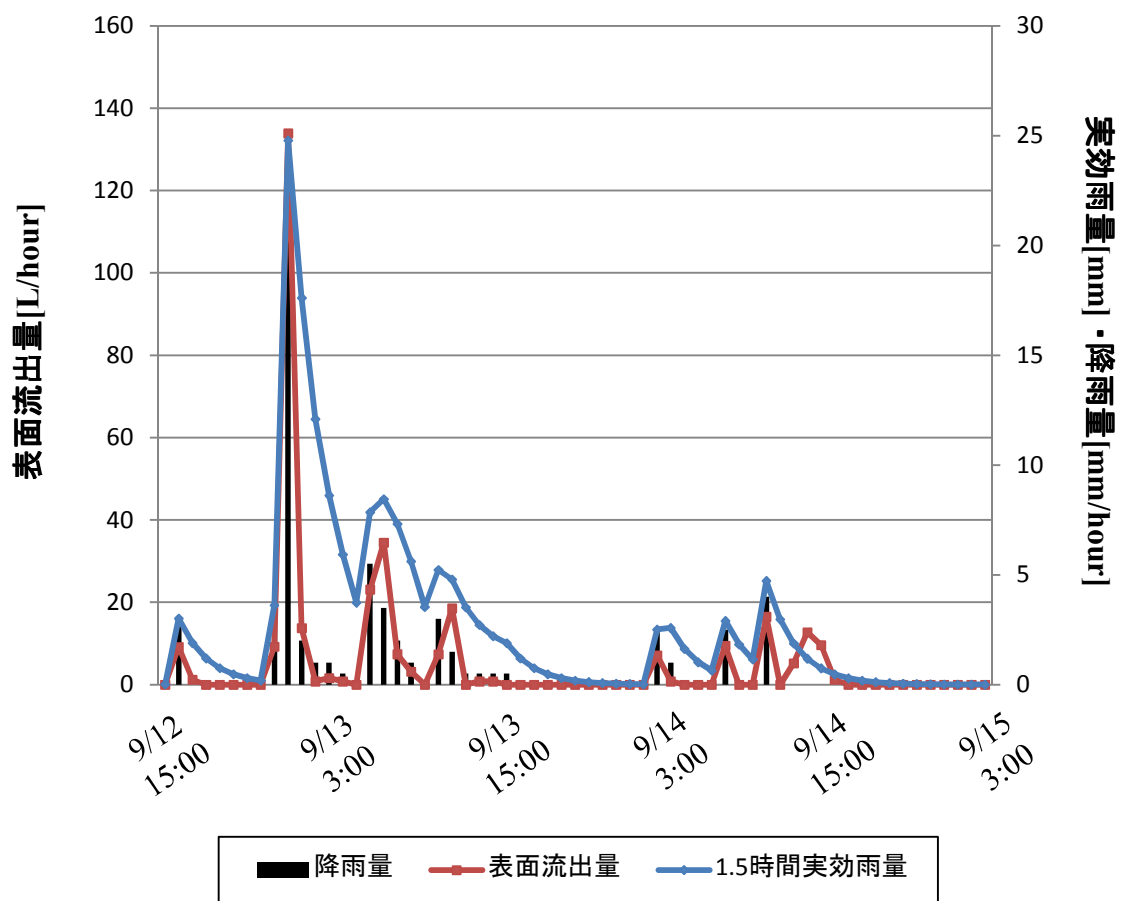


図4.2 半減期1.5時間実効雨量と表面流出量の推移

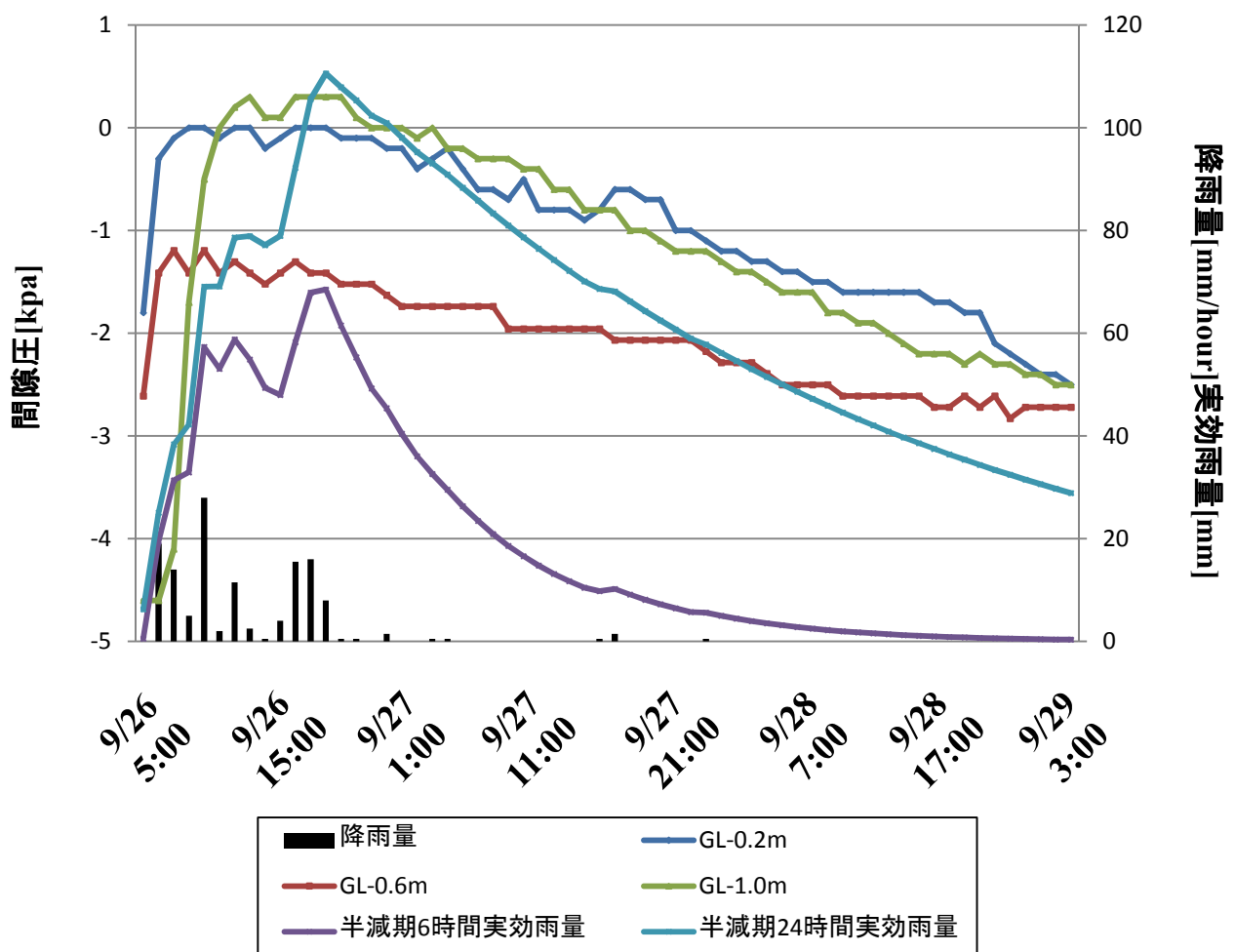


図4.3 間隙圧と実効雨量の推移(2012年9月26日)

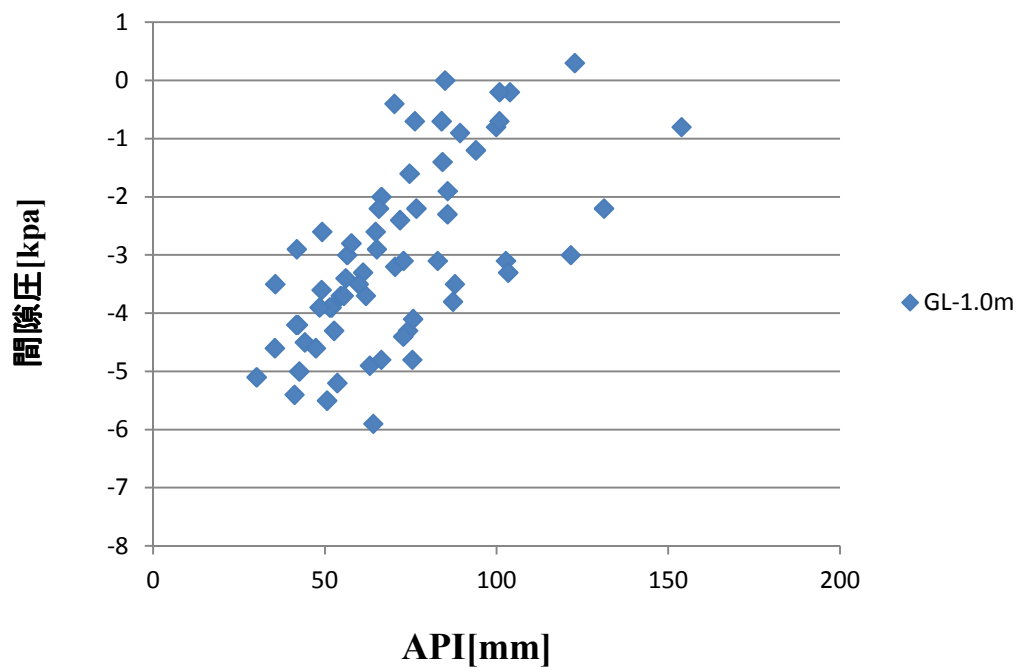


図4.4 APIと間隙圧の関係

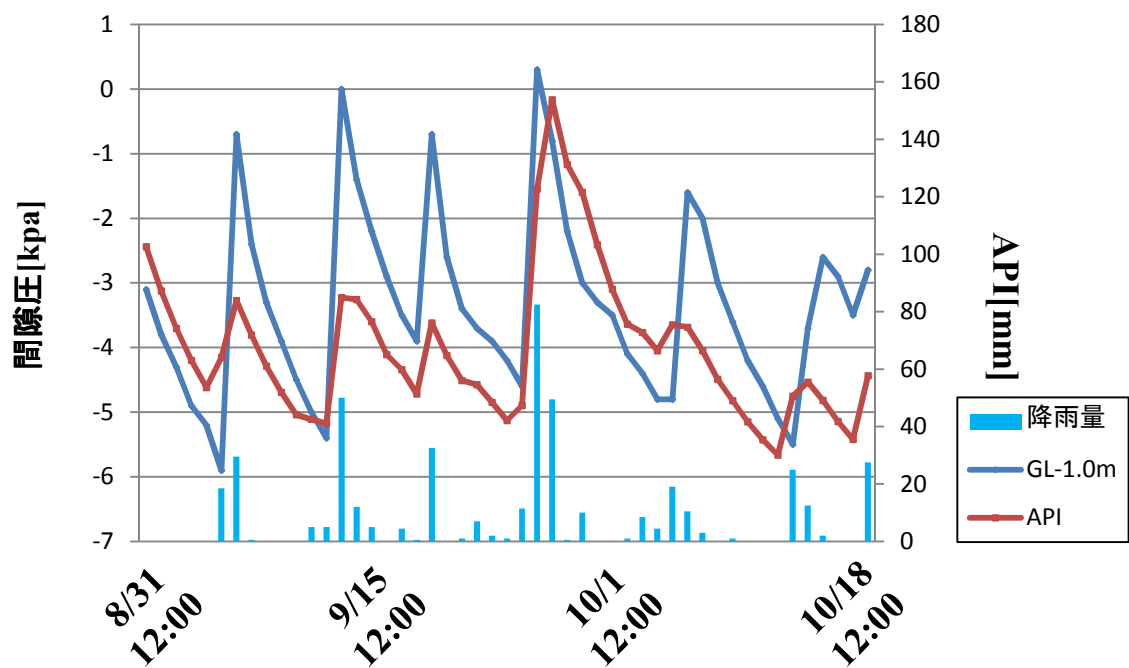
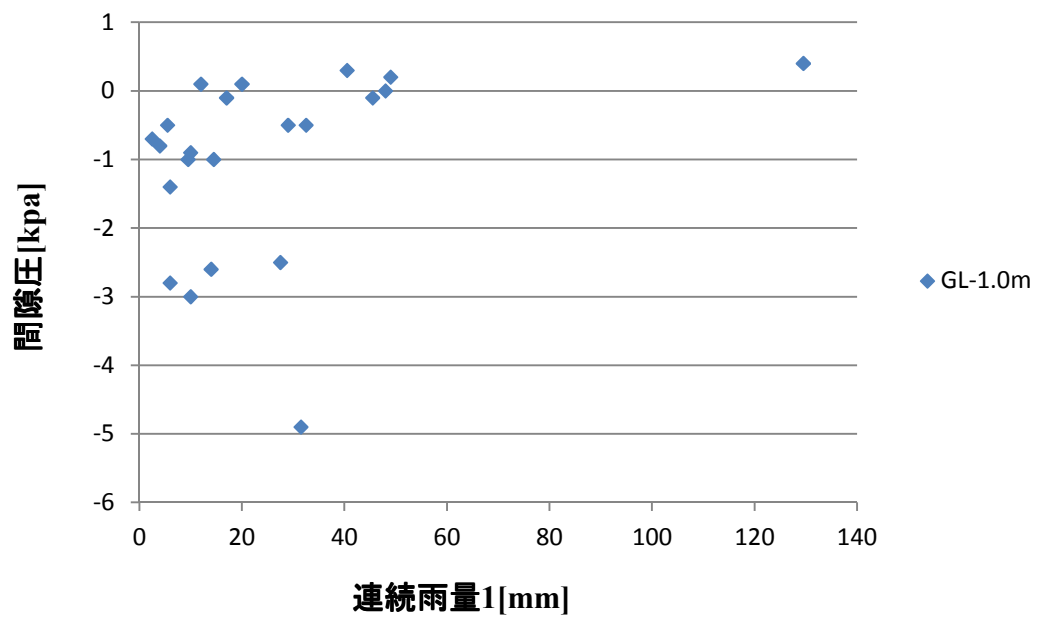
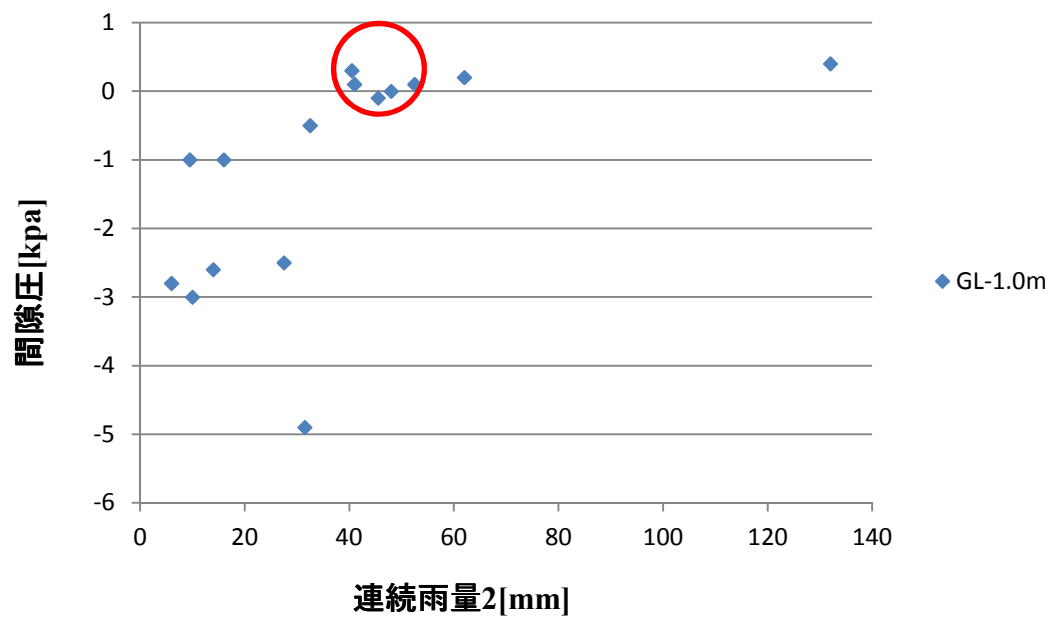


図4.5 APIと間隙圧の推移

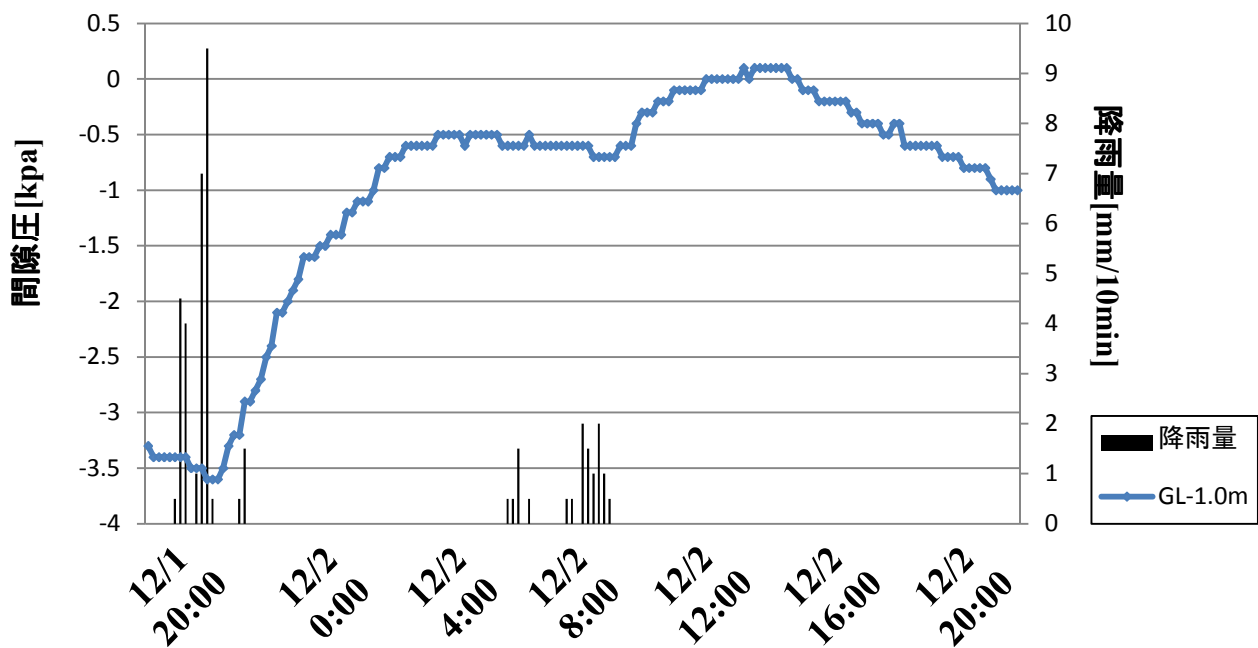


(a) 連続雨量1と間隙圧の関係

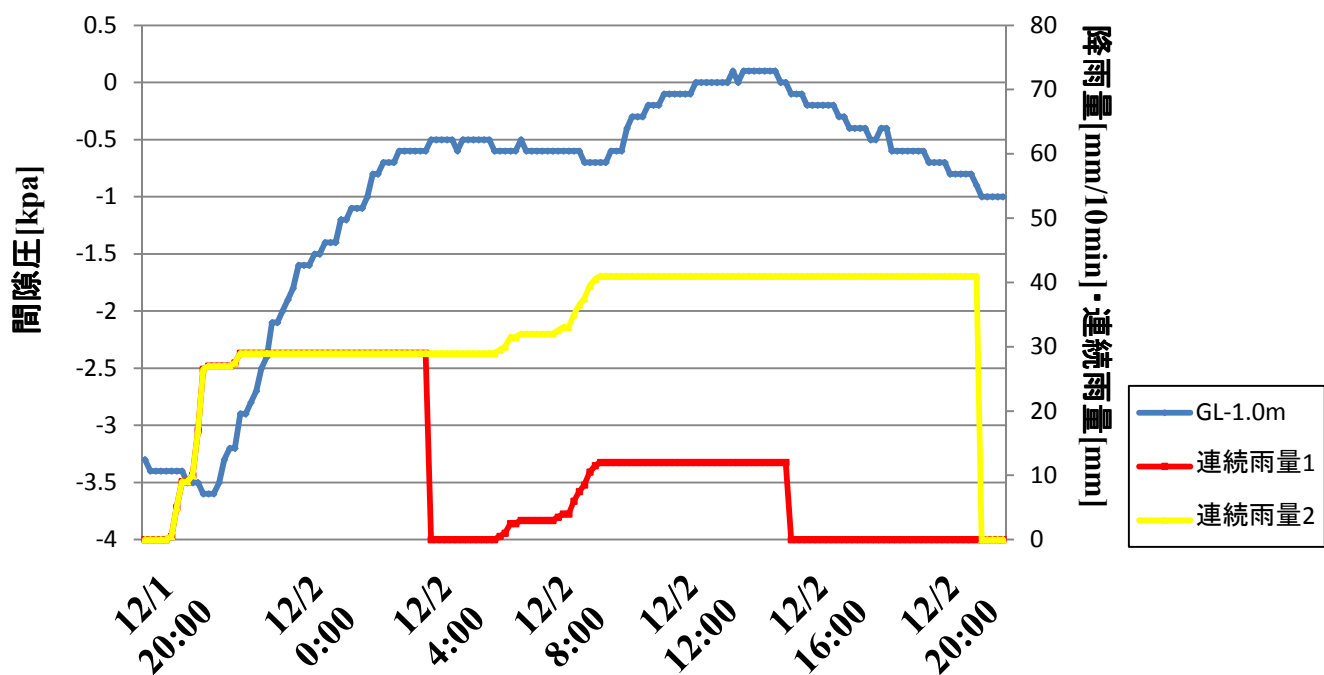


(b) 連続雨量2と間隙圧の関係

図4.6 連続雨量と間隙圧の関係



(a) 降雨量と間隙圧の推移



(b) 連続雨量と間隙圧の推移

図4.7 連続雨量と間隙圧の推移

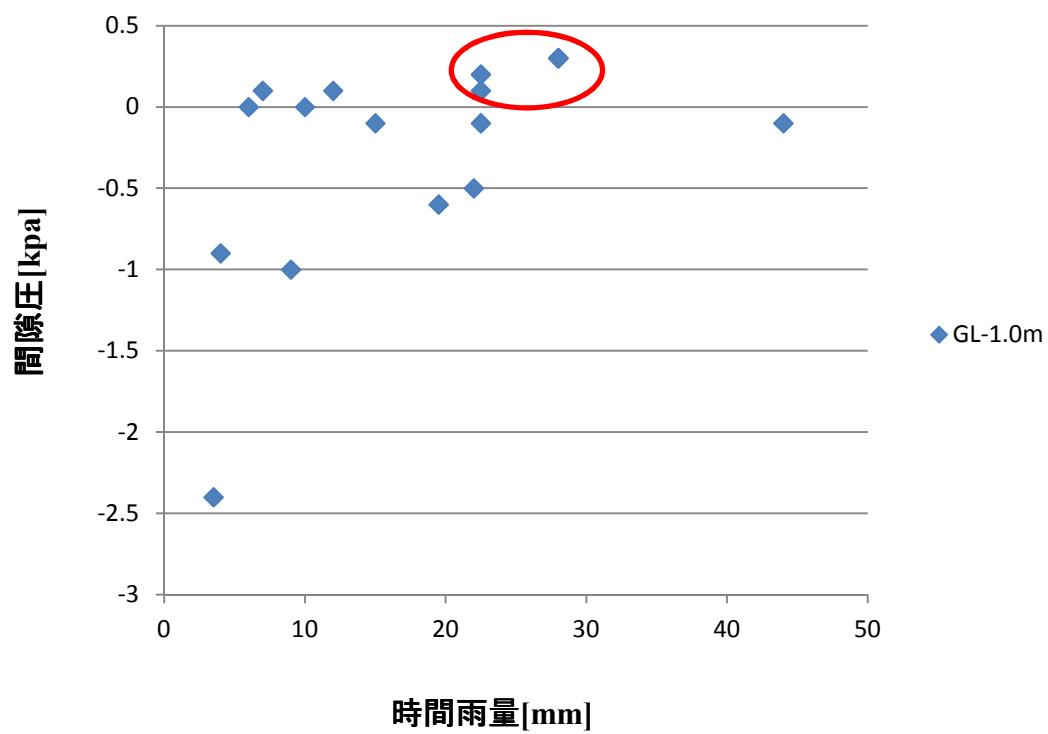
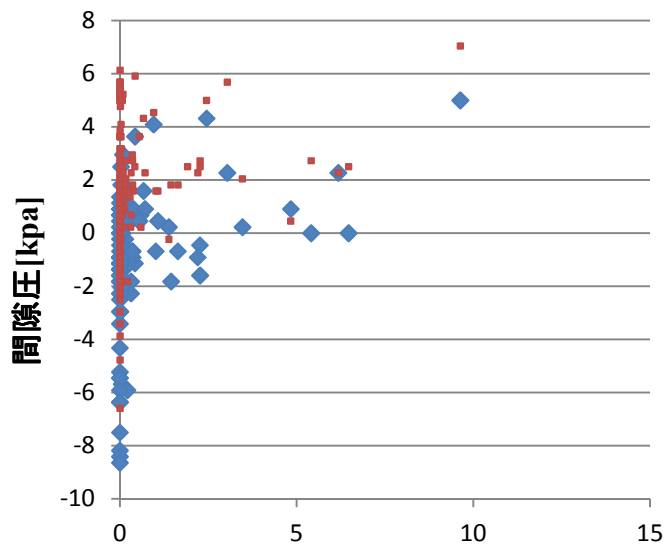
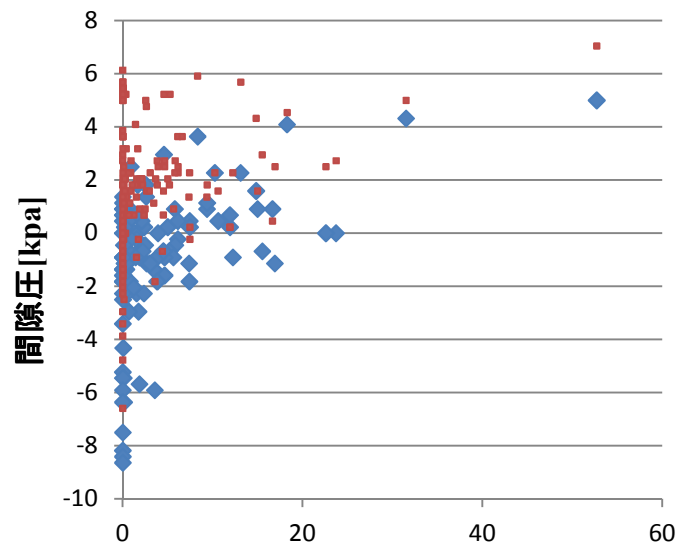


図4.8 時間雨量と間隙圧の関係



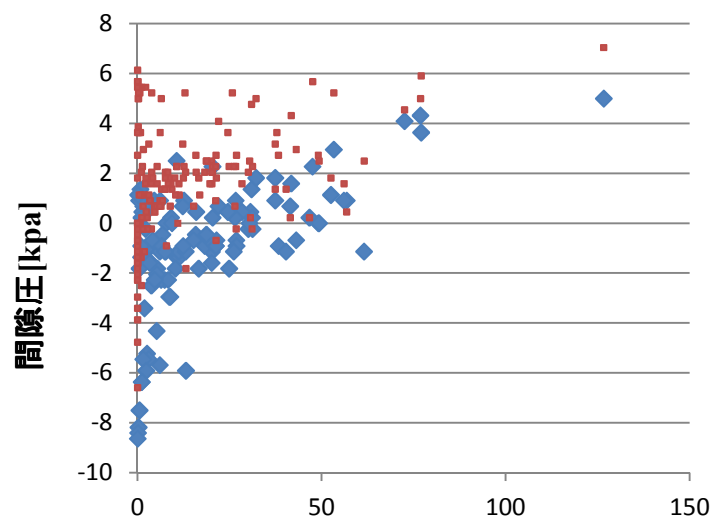
半減期1.5時間実効雨量[mm]

(a) 半減期1.5時間



半減期6時間実効雨量[mm]

(b) 半減期6時間



半減期24時間実効雨量[mm]

(b) 半減期24時間

図4.9 実効雨量と間隙圧の関係(2008年)

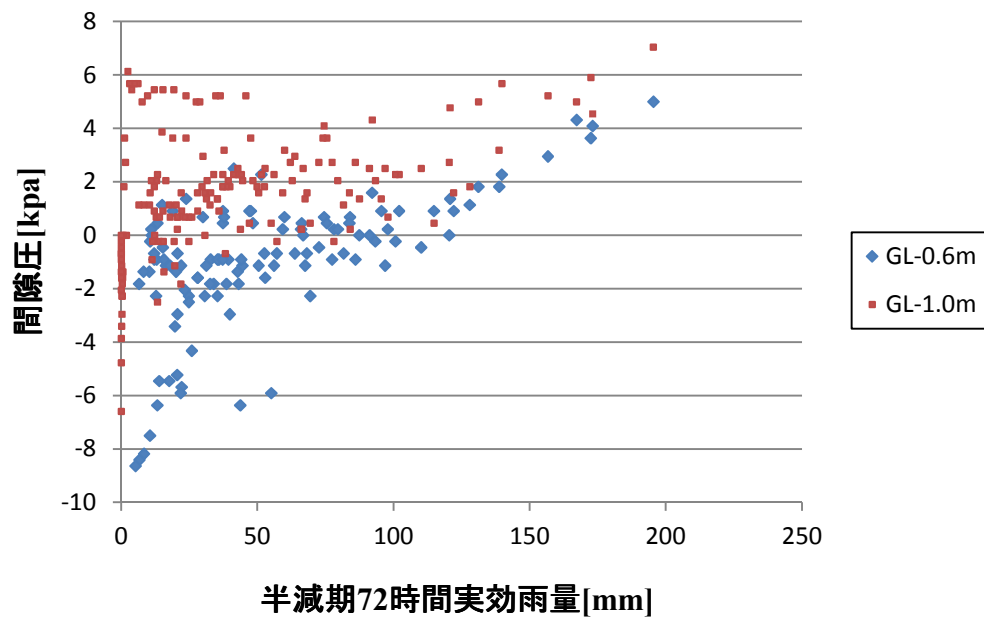


図4.10 半減期72時間実効雨量と間隙圧の関係(2008年)

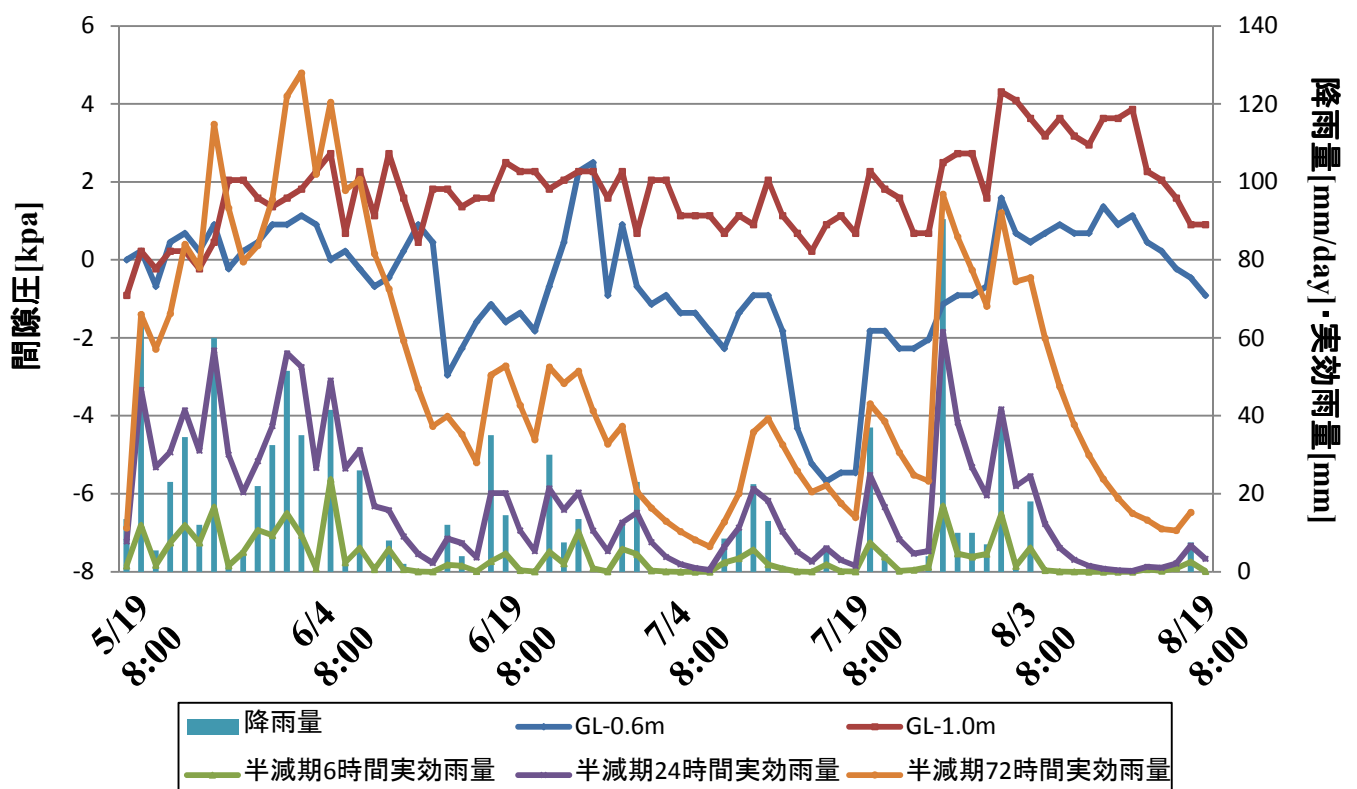


図4.11 実効雨量と間隙圧の推移(2008年)

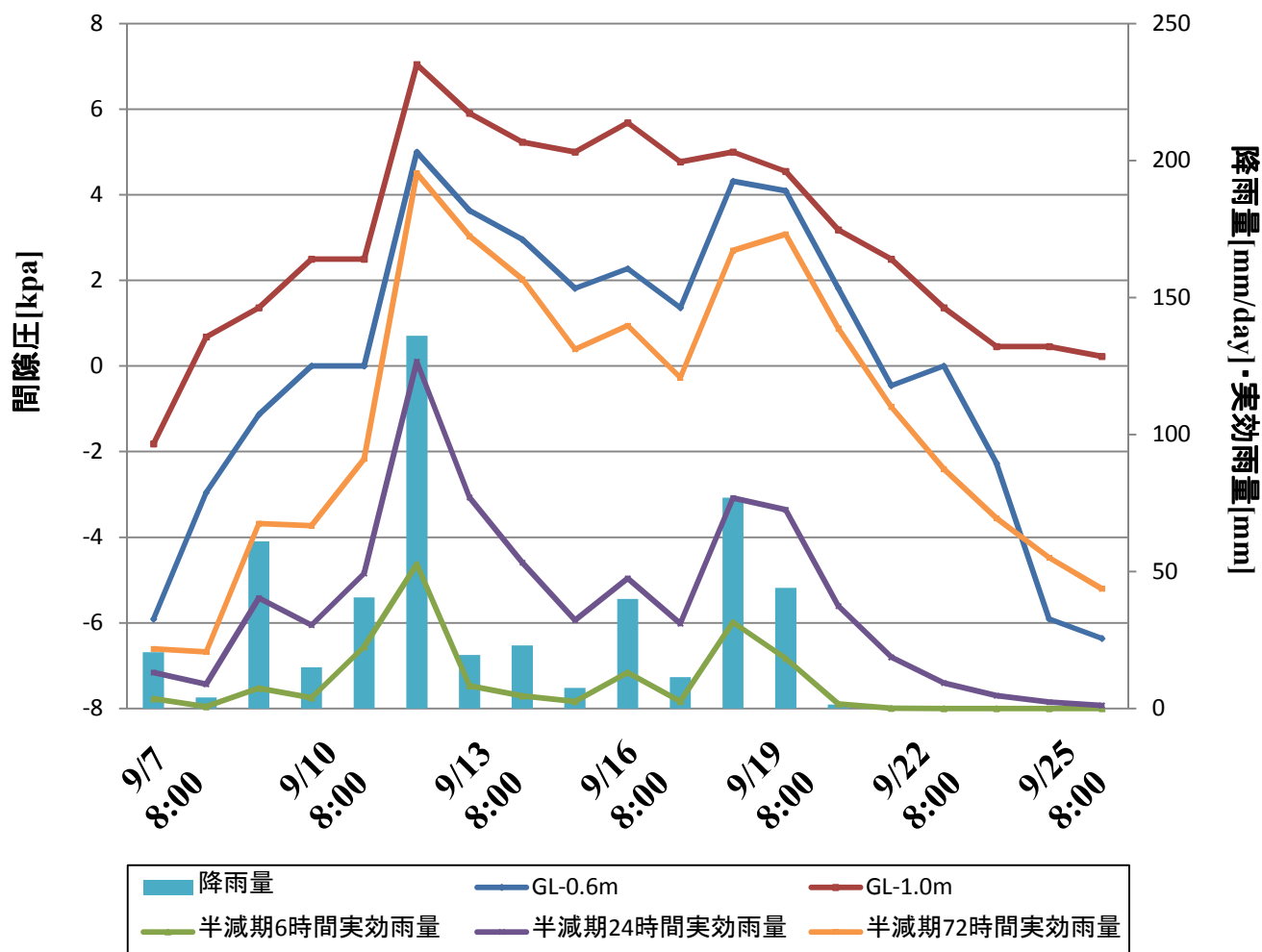


図4.12 実効雨量と間隙圧の推移(間隙圧が高い領域)

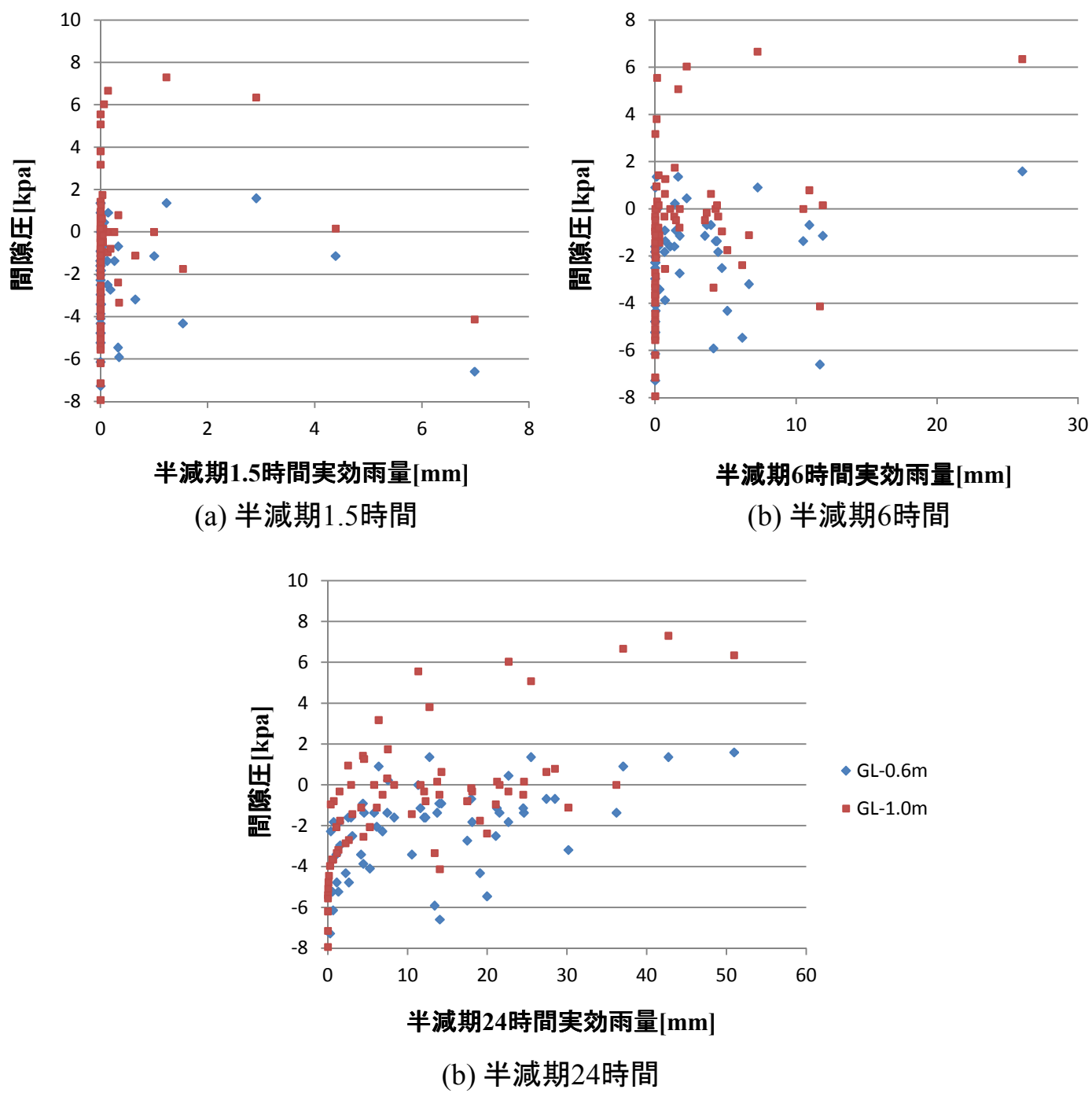


図4.13 実効雨量と間隙圧の関係(2010年)

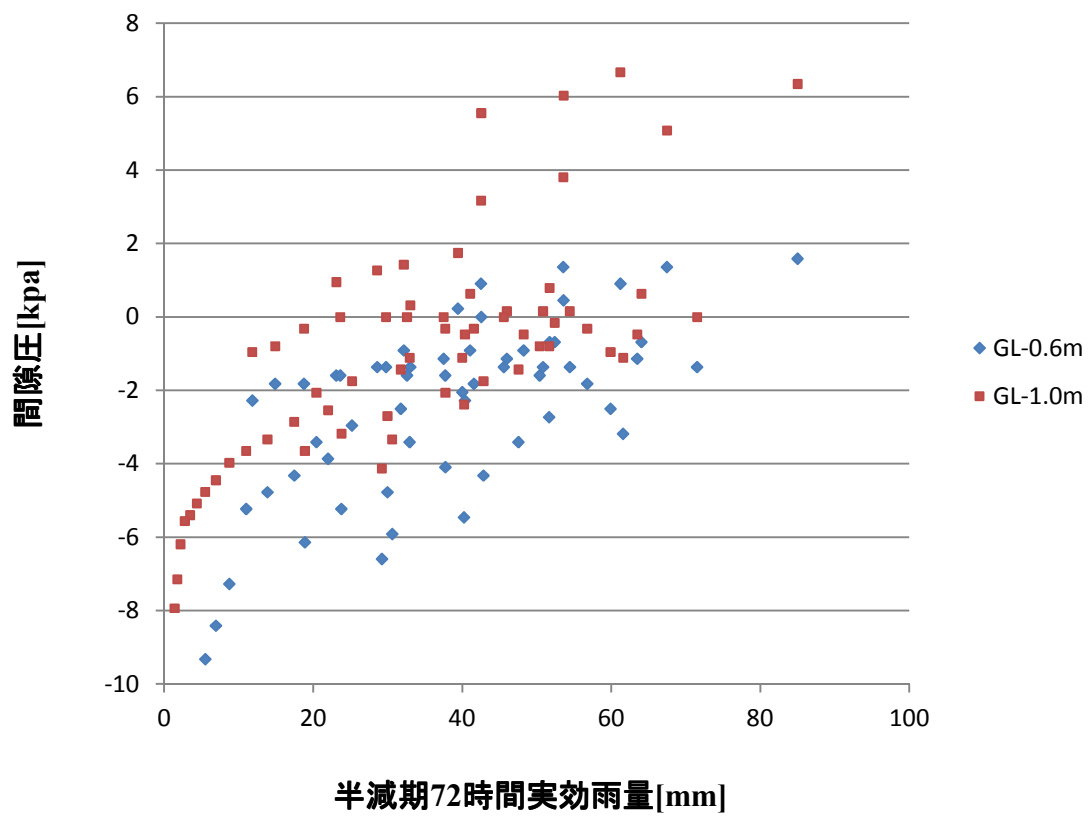


図4.14 半減期72時間実効雨量と間隙圧の関係(2010年)

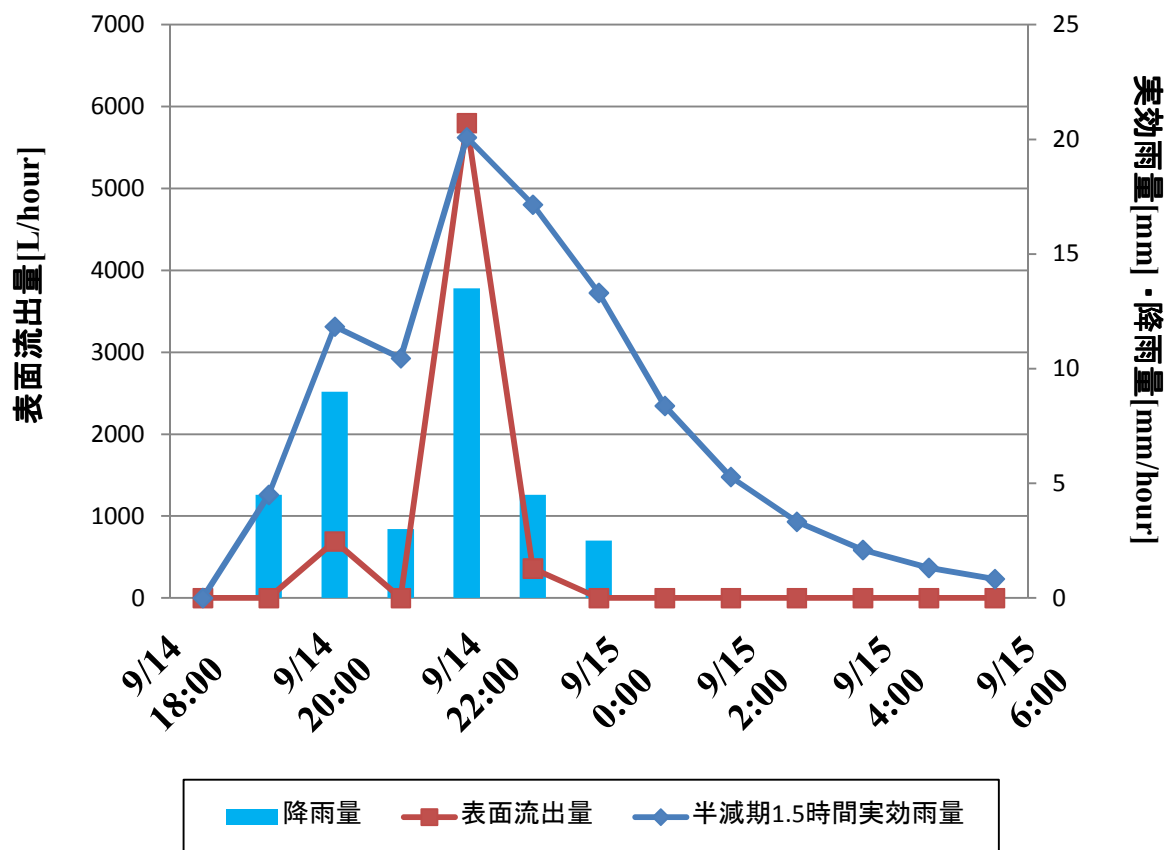
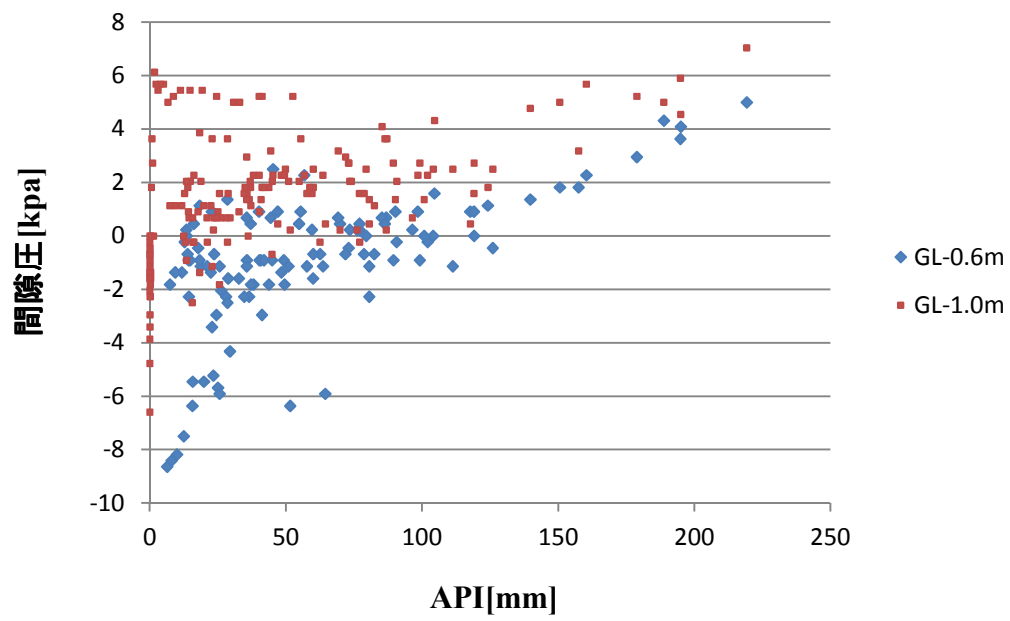
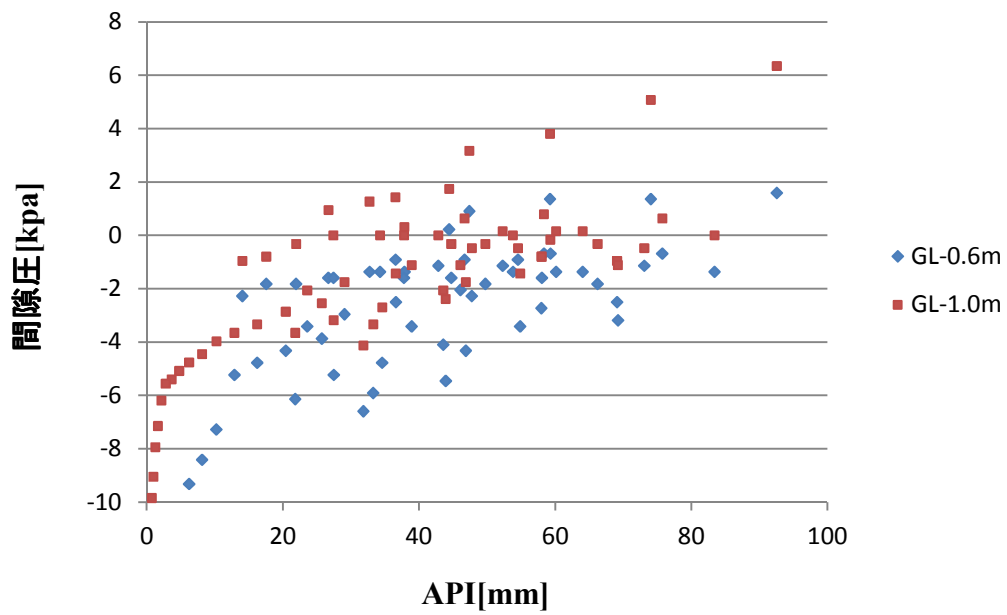


図4.15 半減期1.5時間実効雨量と表面流出量の推移



(a) 2008年におけるAPIと間隙圧の関係



(b) 2010年におけるAPIと間隙圧の関係

図4.16 APIと間隙圧の関係

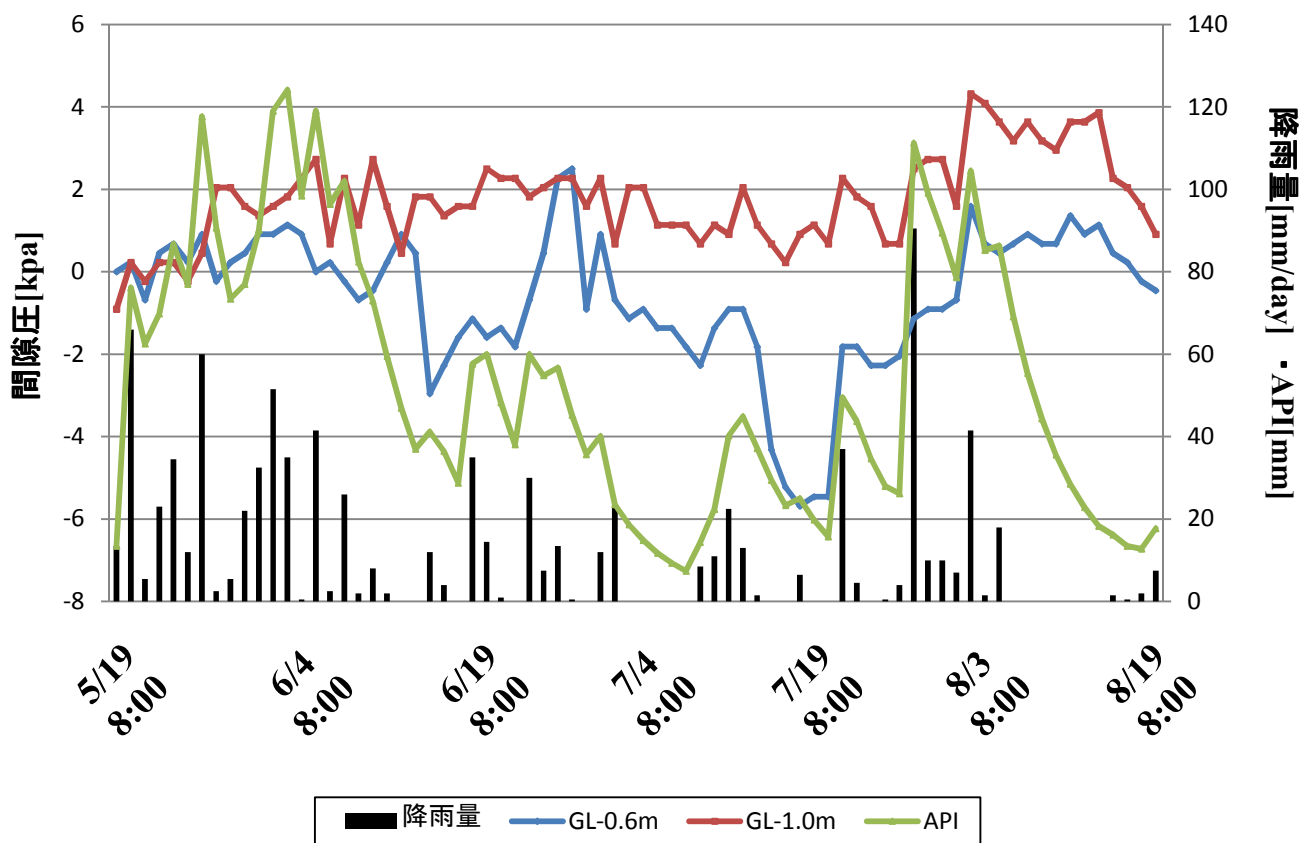
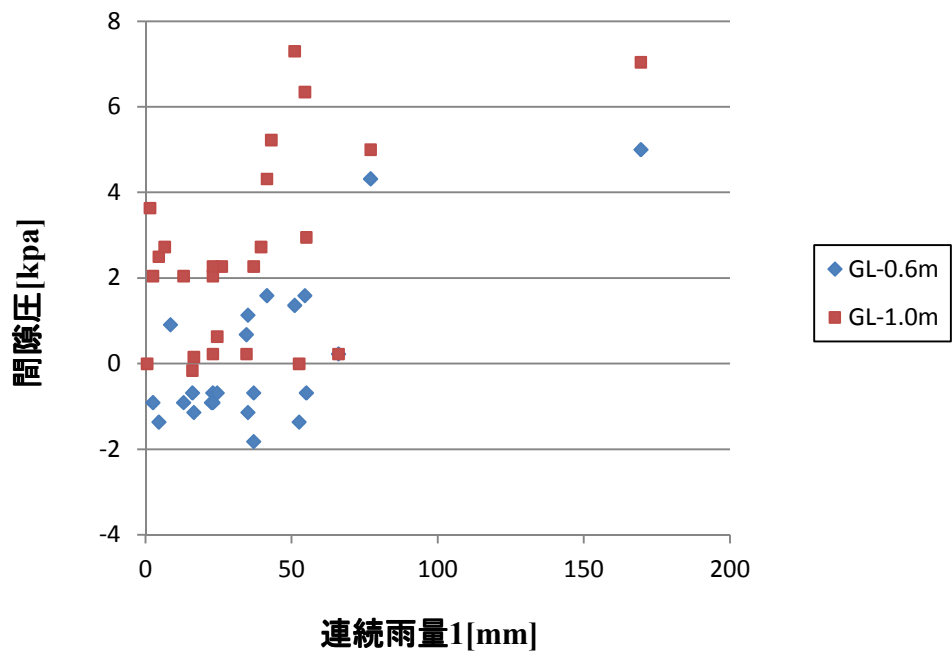
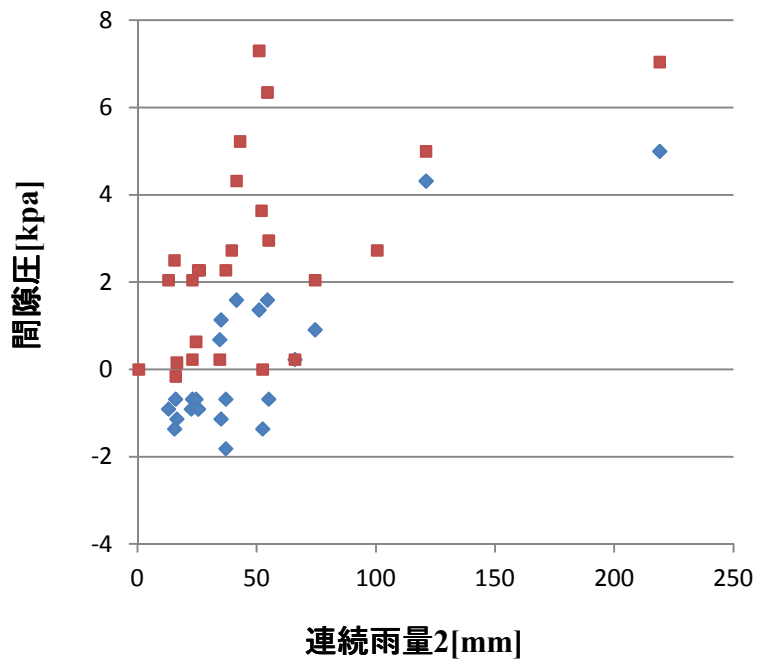


図4.17 APIと間隙圧の推移(2008年)



(a) 連続雨量1と間隙圧の関係



(b) 連続雨量2と間隙圧の関係

図4.18 連続雨量と間隙圧の関係

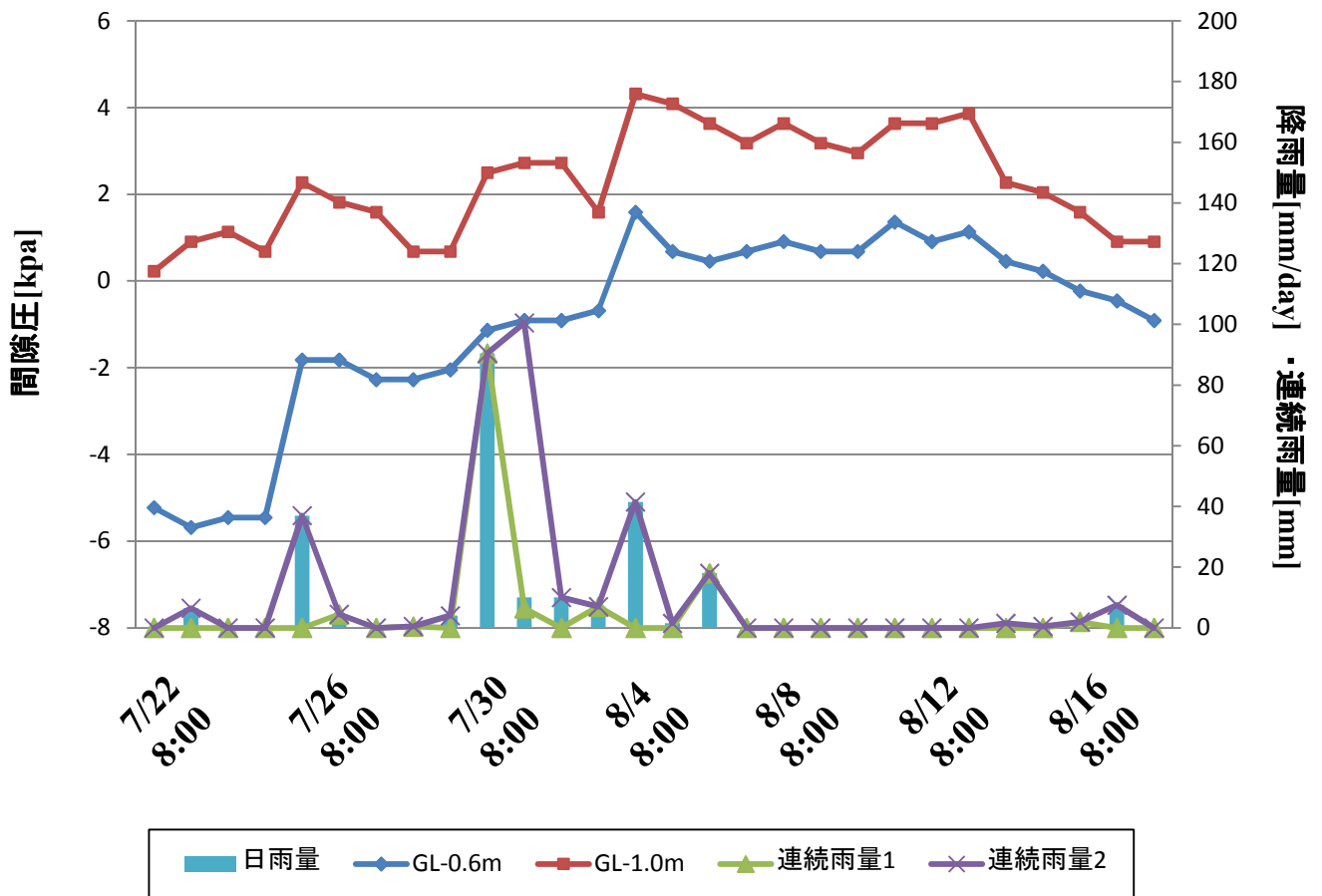


図4.19 連続雨量と間隙圧の推移

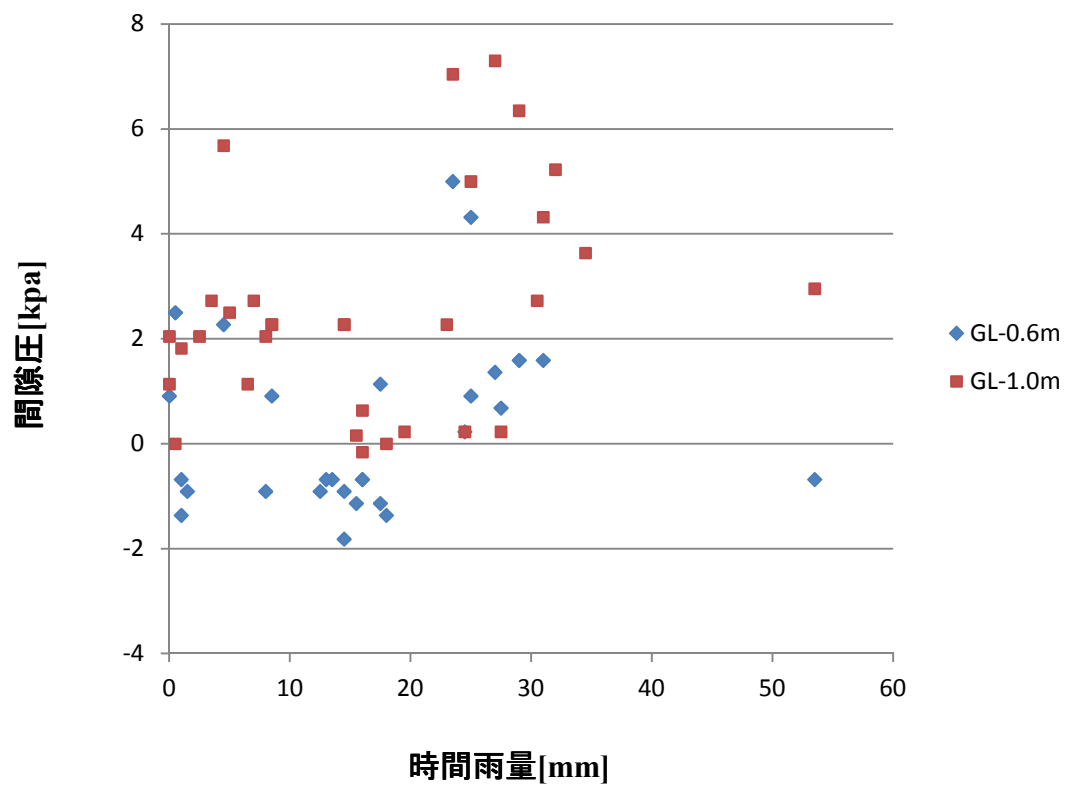


図4.20 時間雨量と間隙圧の関係

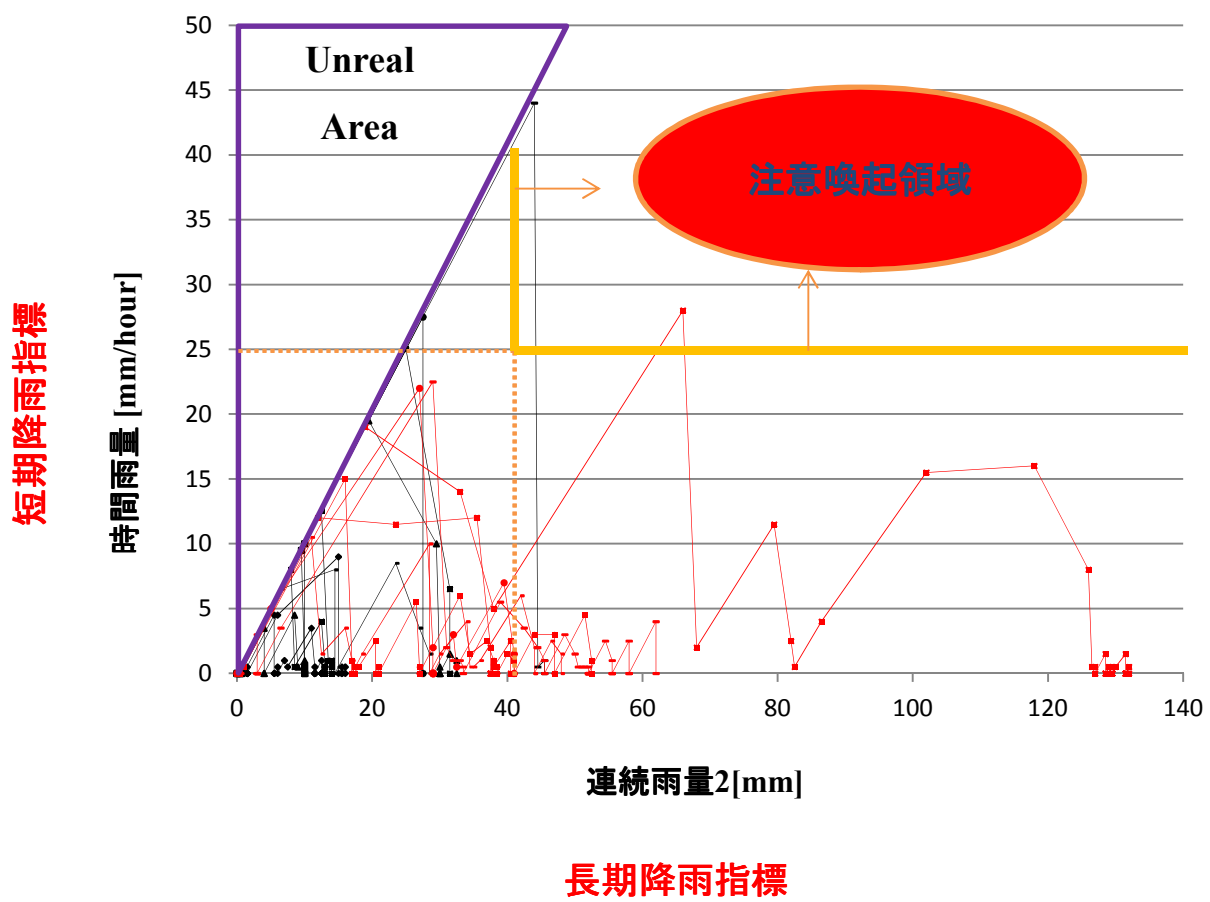
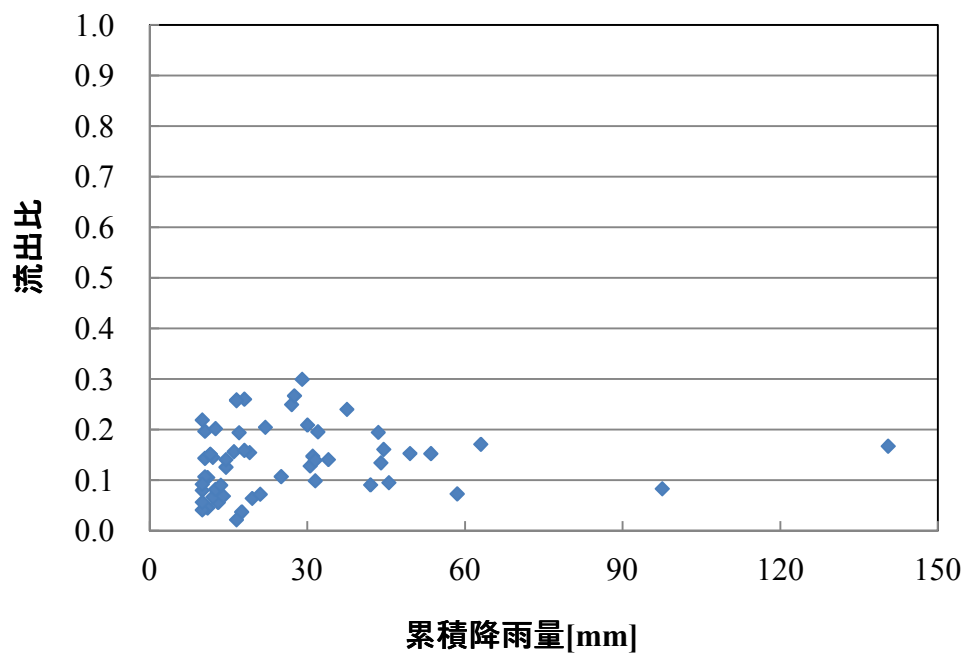
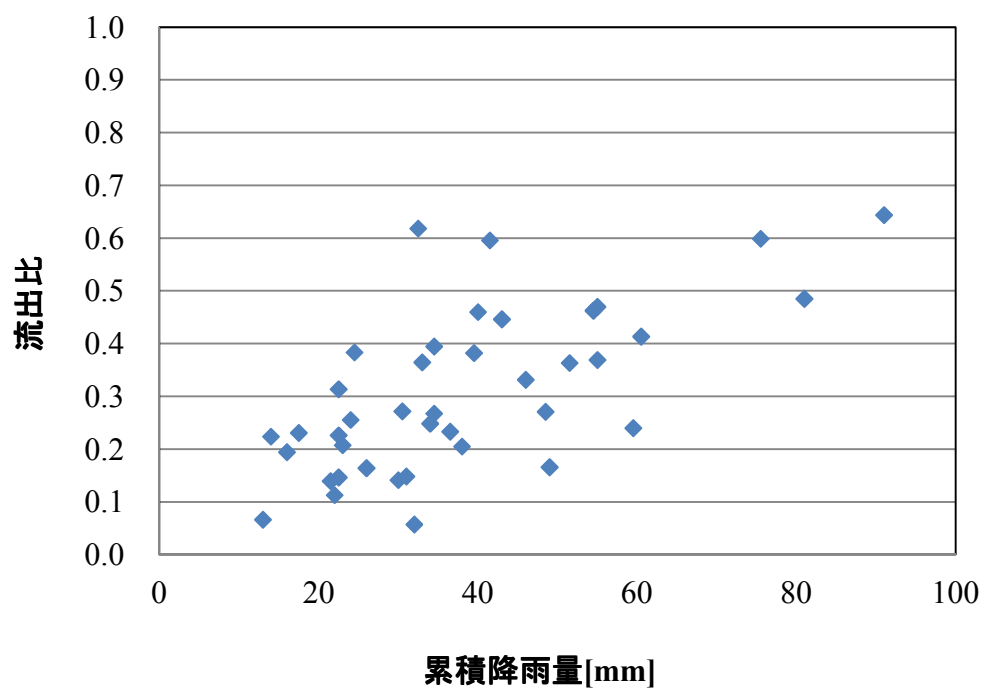


図4.21 土砂災害早期警戒体制の提案



(a) プーケット



(b) ナコンナヨック

図4.22 累積雨量と流出比の関係