

実効雨量による事前通行規制の 適用性検討について

渡邊 涼一¹・上田 勝久²

¹株式会社気象工学研究所 技術グループ (〒550-0003大阪府大阪市西区京町堀1-8-5)

²阪神高速道路株式会社 神戸管理部 保安全管理課 (〒650-0041兵庫県神戸市中央区新港町16-1)

阪神高速道路では、豪雨等による土砂災害に対して利用者の安全性を確保するため、雨量規制基準を設定の上、事前通行規制をおこなっている。近年、全国各地で局地的豪雨等に伴う土砂災害が発生しており、通行規制をより適切に発動するための合理的な雨量指標が求められている。

本論では、阪神高速道路における降雨時の事前通行規制基準として、実効雨量を用いた土砂災害危険度判定手法を活用することの可否について評価を行い、その適用性を検証した。

キーワード 実効雨量，土砂災害危険度判定，通行規制基準

1. はじめに

近年、全国各地で局地的豪雨等に伴う土砂災害が発生しており、高速道路利用者の安全性を確保しつつも、不要なサービス停止を招かぬよう、通行規制をより適切に発動するための合理的な雨量指標が求められている。

一般に、土砂災害(斜面崩壊等)発生危険度の判定において、長期的雨量指標として「連続雨量」が、短期的雨量指標としては「時間雨量」が効果的な指標として用いられている。阪神高速道路の通行規制基準でも、同様の指標を採用しており、過去の実績に基づき設定した基準を超えた場合に事前通行規制を行っている。

平成26年台風11号に伴う大雨により、北神戸線の一部において、のり面崩落が発生した。のり面崩落発生時には、事前通行規制の基準に基づき通行止め規制が発動されていたが、通行止め措置がすべて完了していたわけではなく、通行車に被害を及ぼしかねない状況であった。これを踏まえた通行規制基準の見直し検討では、「実効雨量」の適用性についても検証された¹⁾。

本論では、実効雨量を用いた土砂災害危険度判定手法を、事前通行規制基準として適用することについてさらなる検証を行ったので報告する。

2. 土砂災害危険度判定手法について

(1) 実効雨量

実効雨量は、降雨量のうち土中に残留する水分量を単

一のパラメータ(半減期)を用いて表現した指標であり、長期的な影響と短期的な影響を半減期により調整できる。実効雨量の概念図を図-1に示す。実効雨量は、ある時刻に降った雨量の影響が半減期の時間だけ経過すると半分になり、時間と共に降雨の影響が減少していくことを表現している。半減期を長くしていくと、降雨による土中水分量への影響はより長時間持続することになる。

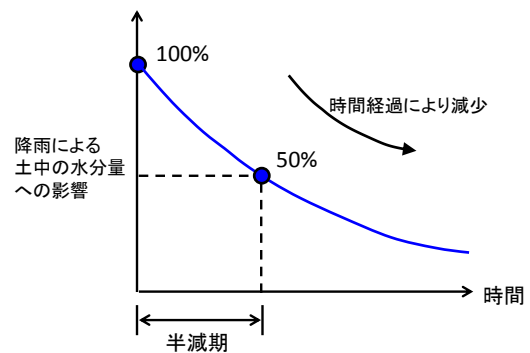


図-1 実効雨量の概念図

時刻 t における半減期 $M[h]$ の実効雨量 $R(t)[mm]$ は次式で定義される。

$$R(t) = r(t) + \alpha R(t-1) \quad (1)$$

ここで、 $r(t)$ は時刻 t における単位時間雨量であり、 $R(t-1)$ は1時間前の実効雨量である。減少係数 α は、半減期 M を用いて次式で求められる。

$$\alpha = \ln(0.5) / M \quad (2)$$

(2) 土砂災害危険度判定手法の概要

降雨に伴う土砂災害(斜面崩壊等)は、地下水位が臨界レベル(既往最大値)を超えることによって引き起こされる場合が多い。地下水位の変動は、2種類の半減期の実効雨量を組み合わせることで表現可能であるとされており²⁾、半減期を適切に設定しておけば「実効雨量既往最大値超過」から「地下水位既往最大値超過」を判定できる。しかし、地下水位変動を適切に表現できる半減期の組み合わせは、その土地(斜面)によって異なっており、地下水位未計測地点について適切な半減期の組み合わせを設定する事は困難である。

そこで本論では、様々な半減期の実効雨量の組み合わせを用いて、既往最大値超過(「これまでに経験したことのない状態」となっているか判定し、土砂災害発生危険度を評価する手法を用いた。近年の土砂災害を対象とした既往研究では、この手法の有効性が示されている³⁾⁴⁾。具体的には、スネーク曲線図を用いて、縦軸および横軸の実効雨量の半減期を様々に変化させて、いずれかの組み合わせで既往最大値(CL:クリティカルライン)を超過している場合に、土砂災害発生の危険性が高いと判定する(図-2)。

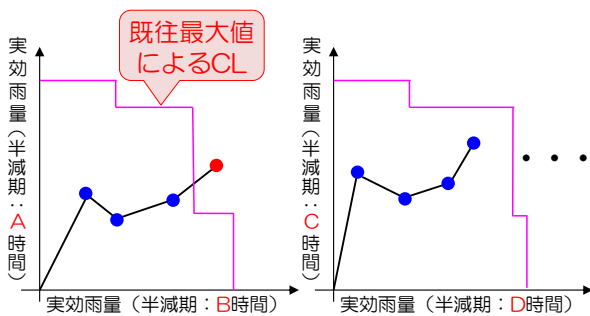


図2 土砂災害発生危険度の判定イメージ

(3) 土砂災害危険度の判定と評価手法

実効雨量の算定には、国土交通省解析雨量(表-1)を用いた。解析雨量は、全国に設置しているレーダーと地上雨量計を組み合わせで作成されるメッシュ雨量データである。阪神高速の北神戸線等では、7カ所の地上雨量計で観測した降雨データを用いて通行規制を判断しているが、解析雨量データを用いることで面的な危険度判定が可能となる。

表-1 解析雨量データの概要

データ期間	1988年4月以降
空間分解能	1km (世界測地系) ※データ期間によって格子サイズ・測地系が異なるが、格子変換・空間内挿により1km・世界測地系に統一
時間分解能	1時間 (毎正時)

本検討では、実効雨量の半減期を0.1~4000時間の範囲で、25種類設定し、合計325通りの組み合わせを用いた。半減期の設定範囲(0.1~4000時間)は、実効雨量が、降雨の短期的な影響と長期的な影響を十分に表現できるように設定している。

危険度判定に用いるCLは、メッシュ毎・半減期組み合わせ毎に、各路線供用開始~災害発生日の前月末までの既往最大値を用いて設定した。降雨事例毎に既往データが蓄積されることで、CLは更新されていく(図-3)。

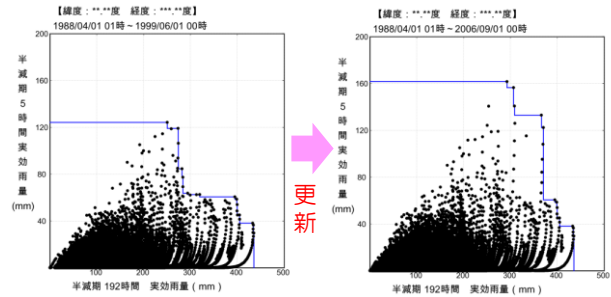


図3 既往最大値によるCLの設定と更新

上記で算出した実効雨量とCLを用いて、メッシュ毎に土砂災害危険度判定を行う。この時、「1時間であと何ミリ降れば既往最大値超過となるか」を325通りの組み合わせで算出し、その中の最小値をそのメッシュ(地点)の危険度とする。これにより、既往最大超過していない場合でも土砂災害発生の危険度を評価することができる(図-4)。

- ①メッシュ毎、半減期組み合わせ毎(325ケース)に「1時間であと何ミリ降れば既往最大値(CL)超過となるか」を算出。325ケースの最小値をそのメッシュ(地点)の危険度とする。
- ②上記の判定結果を用いて時系列や分布図を作成し、土砂災害発生危険度を評価。

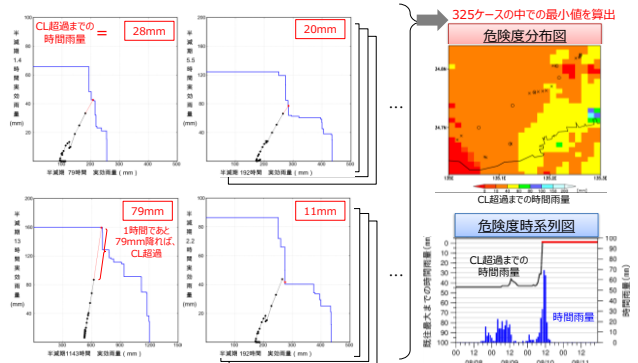


図4 危険度判定の評価方法

3. 土砂災害危険度判定手法の適用性評価

(1) 対象事例

2004年以降に発生した土砂災害を対象とし(表-2), 土砂災害危険度判定手法の検証を行った。対象事例のほとんどは, 台風に伴う降雨によって土砂災害が引き起こされていた。また, 土砂災害の発生は, 「箕谷」地点より北西部の山沿いに多く見られた(図-5, 図-6)。

表-2 検証対象とした土砂災害事例

No.	災害発生日(降雨要因)	発生路線
1	2004年9月29日(台風21号)	7号北神戸線
2		31号神戸山手線
3		
4		7号北神戸線
5		7号北神戸線
6	2004年10月20日(台風23号)	7号北神戸線
7		湾岸垂水線
8		
9		7号北神戸線
10		7号北神戸線
11	2006年7月20日(停滞前線)	7号北神戸線
12		7号北神戸線
13	2014年8月10日(台風11号)	7号北神戸線
14		湾岸垂水線
15		
16		
17		
18		

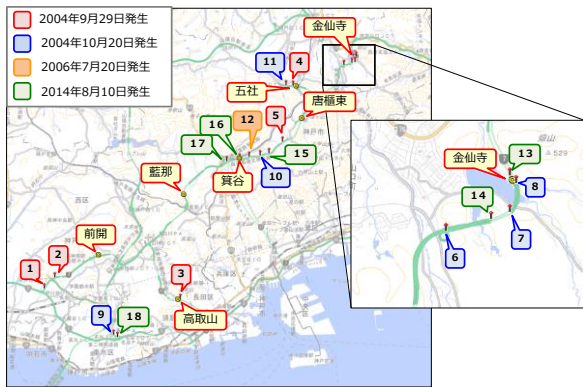


図5 地上雨量計及び土砂災害発生地点の位置

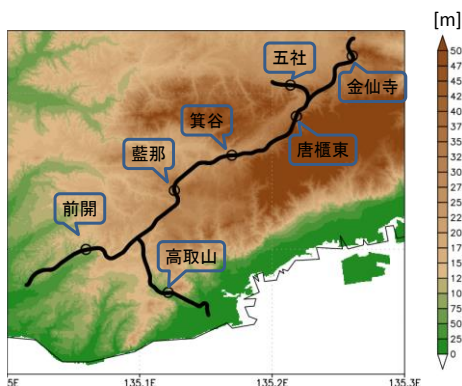


図6 標高地形図(国土地理院)

(2) 土砂災害危険度判定手法による災害事例検証

a) 災害捕捉事例

2004年9月29日事例および2014年8月10日事例における土砂災害危険度判定結果の一例を示す。算出した危険度(既往最大値超過までの時間雨量)の時系列(図-7, 図-8)をみると, 実効雨量が既往最大値を超過した時刻は災害発生時刻とほぼ一致しており, 災害発生を的確に捉えられていることが分かる。

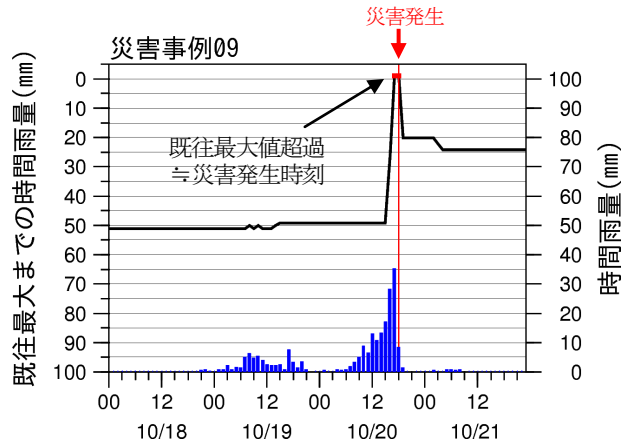


図7 危険度時系列図(2004年10月20日事例(No.9地点))

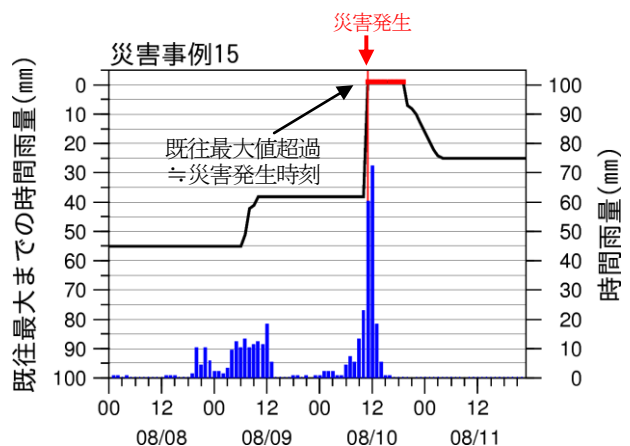


図8 危険度時系列図(2014年8月10日事例(No.15地点))

メッシュ毎に算出した危険度(既往最大値超過までの時間雨量)を用いれば, 土砂災害発生危険度を面的に把握する事も可能である。災害発生時の危険度分布図の一例を示す(図-9, 図-10)。災害発生時刻において, いずれの災害発生地点でも実効雨量が既往最大値を超過しており, 災害発生を捕捉できていたことが改めて確認できる。

この危険度判定手法では, 既往最大値を超過していても災害が発生しない場合でも, その既往データを用いてCLを更新することで, 空振り判定が減少し, 判定精度が向上していく点も大きな特徴である。

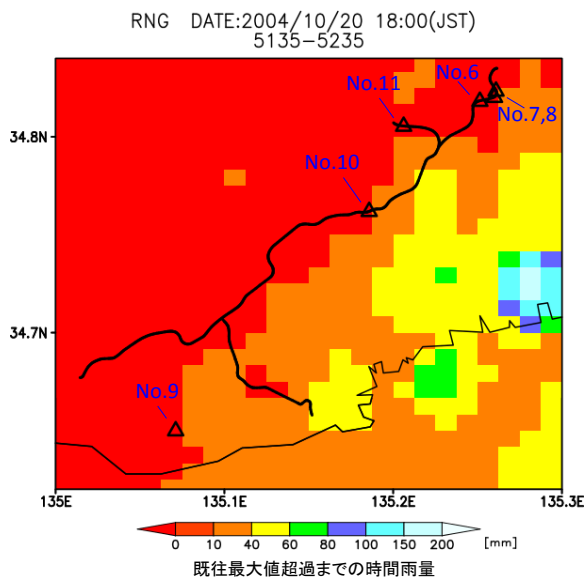


図9 災害発生時刻の危険度分布図 (2004年10月20日事例)
図中の△は災害発生地点を示す。

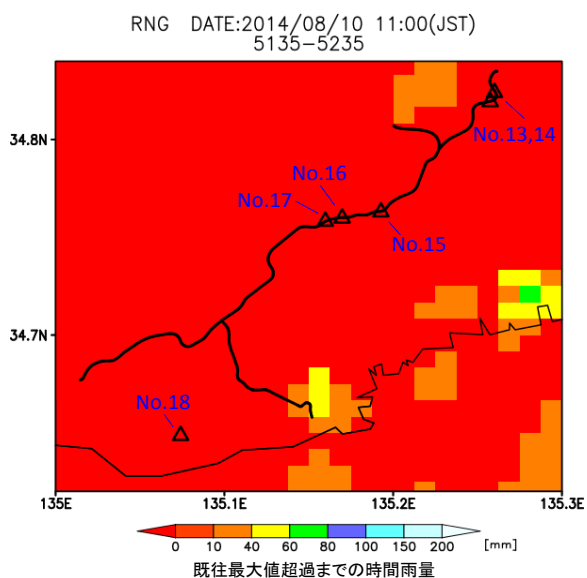


図10 災害発生時刻の危険度分布図 (2014年8月10日事例)
図中の△は災害発生地点を示す。

b) 災害見逃し事例

本手法では危険性が高いと判定されず、見逃しとなった事例もあった。2006年7月20日事例では、数日間断続的に続いた降雨により、斜面で表層崩壊が発生した。

危険度判定結果の一例を示す(図-11, 図-12)。19日～20日の災害発生時(詳細な発生時刻不明)には、既往最大値の超過はみられなかった。分布図より、周囲においても既往最大値を超過した地点はみられなかった。

この事例において表層崩壊が発生した斜面は、路線開通工事に伴う改変を受けており、斜面劣化より崩壊に至ったとされている。このような人為的な改変を受けた地点に本手法を適用する際は、斜面の劣化状況なども考慮する必要があることが示唆された。

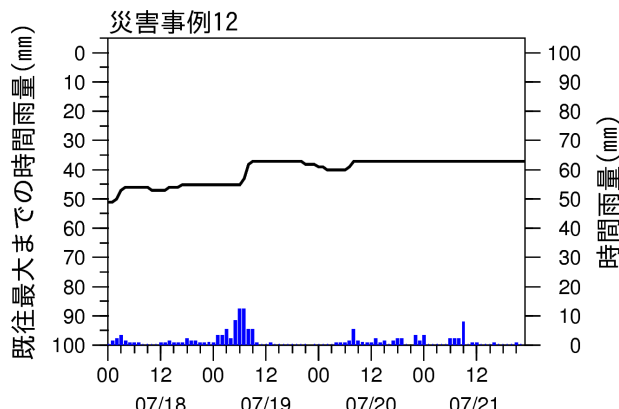


図-11 危険度時系列図 (2006年7月20日事例 (No.12地点))

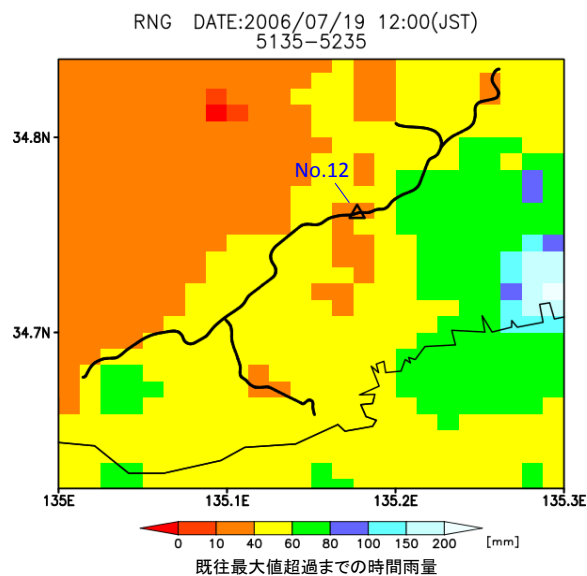


図-12 災害発生時刻の危険度分布図 (2006年7月20日事例)
図中の△は災害発生地点を示す。

(3) 通行規制基準への適用性評価

阪神高速道路 北神戸線・神戸山手線における現行の通行規制基準は、「時間雨量」と「連続雨量」の組み合わせによって設定されている。7カ所の地上雨量計の観測値に基づいて下記の①または②の基準を超過した場合に通行規制が発動される。

- ①時間雨量45mm以上かつ連続雨量160mm以上
- ②連続雨量210mm以上

連続雨量は6時間以上の降雨中断 (2mm/h以下の降雨含む) によって0値にリセットする。

この現行基準による実際の通行規制発動状況と検討手法を用いた場合の通行規制発動状況を検証し、比較を行った(表-3)。ここでは、土砂災害発生事例だけでなく、通行規制を発動したものの、実際には災害が発生しなかった空規制事例についても検証を行った。事例毎にみると、検討手法を用いた場合は、現行基準に比べて見逃し、空振りが減少していることが分かる。次に、災害箇所・規制区間単位での評価(表-4, 表-5, 表-6)でも同様に検討手法の方が土砂災害の捕捉精度が高いことが分かる。

表-3 現行基準と土砂災害危険度判定手法（検討手法）における通行規制の検証。（○：災害捕捉規制，●：空規制，×：災害見逃し，△：一部捕捉・見逃し，－：判定無）

		現行基準	検討手法
土砂災害発生事例	2004年09月29日（台風21号）	×	△
	2004年10月20日（台風23号）	○	○
	2006年07月20日（停滞前線）	×	×
	2014年08月10日（台風11号）	○	○
通行規制発動事例 （※災害非発生）	2011年05月30日（台風02号）	●	－
	2011年09月03日（台風12号）	●	●
	2013年09月16日（台風18号）	●	●
	2015年07月17日（台風11号）	●	●

表-4 過去の土砂災害発生事例に対する検証（災害箇所単位）

	災害捕捉	見逃し	計
現行基準	5	13	18
検討手法	13	5	18

表-5 過去の土砂災害発生事例に対する検証（規制区間単位）

	災害捕捉	見逃し	計
現行基準	1	6	7
検討手法	5	2	7

表-6 過去の通行規制発動事例に対する検証（規制区間単位）

	空規制
現行基準	5
検討手法	6

4. まとめと今後の課題

(1) 実効雨量の適用性

本論では、様々な半減期の実効雨量を組み合わせを用

いた土砂災害危険度判定手法の適用性の検討を行った。本手法を用いた検証では、災害発生時刻を的確に捉えられており、現行基準に比べて土砂災害発生の捕捉精度が高いことが確認できた。

現在、阪神高速の北神戸線等では、7カ所の地上雨量計で観測した限定的な降雨データを用いて通行規制を判断している。本手法のようにメッシュ雨量データを用いることで土砂災害発生危険度を面的に把握できる点は、適切な通行規制を行う上で非常に有用であると考えられる。また、通行規制基準への適用だけでなく、構造物管理（巡視実施の判断等）の指標としての活用等も期待される。

(2) 実運用化に向けた課題

本検討手法を通行規制基準の指標として用いる場合、次の課題が挙げられる。

実運用上は規制準備の為にリードタイム確保が必須であるため、予測雨量を用いた危険度予測手法を検討する必要がある。また、実効雨量を用いた本検討手法では、降雨終了後も、危険判定が長時間続く場合がある。そのため、この手法における規制解除のタイミング（条件）を別途検討する必要がある。

参考文献

- 1) 上田勝久・青木康素・井上喬博：北神戸線のり面崩落を踏まえた事前通行規制基準の見直し検討，阪神高速道路第47回技術研究発表会論文集，2014
- 2) 小杉賢一朗・藤本将光・山川陽祐・正岡直也・糸数哲・水山高久・木下篤彦：山体基岩内部の地下水位変動を解析するための実効雨量に基づく関数モデル，砂防学会誌，Vol.66，No.4，p.21-32，2013
- 3) 小杉賢一朗・水山高久：2014年7月9日に発生した長野県南木曾町の土石流災害の誘因となった降雨イベントの解析，砂防学会誌，Vol. 67，No.4，p.18-22，2014
- 4) 小杉賢一朗：斜面崩壊の誘因となった降雨の評価手法，砂防学会誌，Vol.67，No.5，p.12-13，2015