

사면안정해석을 통한 경계우량 설정법

Rainfall Index by Use of Numerical Analysis of Slopes Stability



김 현 기^{1)*}

Kim, Hyun Ki



이 성 혁²⁾

Lee, Sung Hyeok



신 민 호³⁾

Shin, Min Ho

1. 서론

최근 우리나라는 지구온난화에 따른 엘니뇨, 라니냐 등 세계적인 이상기후에 의한 국지성 호우가 매년 다발하고 있으며, 이에 따른 철도선로 피해도 기상상황 악화와 동반하여 증가 추세에 있다. 또한 국내에서 자주 발생하는 대표적인 재해 원인으로는 태풍을 들 수 있는데 이와 같은 태풍은 매년 7월에서 8월 사이에 우리나라를 관통하면서 막대한 피해를 유발시킨다. 자연재해를 미연에 방지하기 위해서는 재해우려시설물 및 재해우려개소를 추출하고, 대상 개소에 대한 평가를 통하여 최적 공법을 적용하여 영구적인 안전성을 확보하는 것이 최선이지만, 예산 문제로 모든 시설물과 개소에 적용한다는 것은 불가

능하다. 이에 재해를 감지하여 피해를 저감하고 사전에 조치할 수 있는 다양한 감지시스템이 구축되고 있으며, 자연재해 발생 또는 우려시 제도적으로 운영할 수 운전규제기준이 재해유형별로 설정되어있다.

철도방재에서 이상기후의 영향을 가장 많이 받는 분야는 태풍 및 국지성 호우 등을 포함한 강우이며, 이는 철도시설에서 깎기·쌓기비탈면 등 흙구조물의 비중이 큰 것에 기인한다. 강우로 인한 재해의 최소화를 위하여 한국철도공사에서는 2003년도 ‘강우자동경보시스템’을 구축하여 전 노선의 강우상황을 실시간으로 모니터링하고 있으며, 강우시 열차운전규제기준도 시스템에 내장하여 열차운행의 참고자료로 활용하고 있다.

현재 국내외에서 적용되고 있는 강우시 열차운전규제는 강우량과 재해의 통계적 상관성분석에 의하여 설정된 것의 비중이 가장 높고, 재해 사례를 분석하여 개소별 특징과 강우량과의 상관성을 분석한 한계우량(critical rainfall)과 실

1) 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원

2) 한국철도기술연구원, 책임연구원

3) 한국철도기술연구원, 수석연구원

* E-mail : hkkim@krri.re.kr

효우량(effective rainfall) 등의 기법도 활용되고 있다. 하지만, 이와 같은 기법은 정확한 정보를 갖는 다수의 자료가 확보되어야만 유효하므로 제한된 정보를 갖는 지역에서는 적용하기 어렵고 공학적인 안정해석이 뒷받침되지 않아 예기치 않은 재해발생의 가능성이 있다. 이를 최소화하기 위해서는 공학적 기반의 비탈면에 대한 내강우성 평가가 필요하며, 평가결과와 강우지표를 연계하여 활용될 수 있도록 해야 한다.

따라서 본 기술기사에서 열차의 안전운행제어를 통하여 철도재해 발생시 피해 최소화할 수 있도록 강우침투해석과 사면안정해석을 이용하여 각 비탈면에 공학적인 경계우량을 설정하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 강우에 대한 각종 기준

일본의 JR 기존선 및 신간선의 운전규제의 역사는 상당히 오래되었으며, 2차 세계대전 전부터 시행되어 왔다. 재해사례를 이용하여 작성되었으며 각종 우량지표와 지표간 조합의 형태로 운전규제를 하게 되며, 추가적으로 발생한 재해를 분석하여 지속적으로 보완하여 사용하고 있다(Fig. 1).

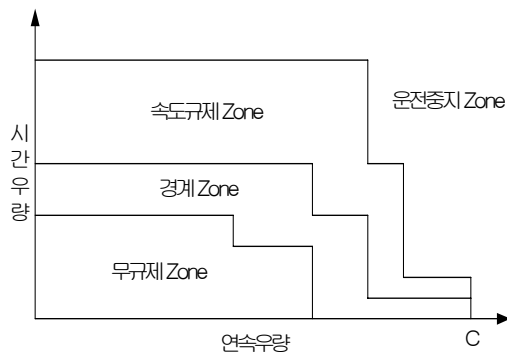


Fig. 1 일본의 운전규제기준 예시

일본철도총합연구소에서는 경험적인 값에 의존하는 기존 국철의 강우시 열차운전규제의 효율화를 위해 경사면의 내강우강도를 정량적으로 파악할 수 있음과 동시에 내강우강도를 운전규제에 반영시켜, 실시간 재해 예측이 가능한 경사면의 강우재해위험도 평가방법과 현장 기술자가 이 방법을 용이하게 이용할 수 있도록 평가 프로그램을 개발하였다(Fig. 2). 한편, JR 동일본 안전연구소에서는 강우와 바람 등에 대한 운전규제가 열차지연의 주요 원인이 되므로 자연재해에 대한 안전성을 평가하기 위한 연구를 진행하고 있다. 이를 위해 강우에 대한 새로운 평가 지표로서 강우 패턴이나 토질의 차이 등, 다양한 조건에 따른 안전성 평가를 가능하게 하는 실효우량법을 개발하였다(Fig. 3). 실효우량 개념은 최근 국립방재연구소에서 진행하는 연구에 도입되어 국내 산사태 위험도 평가에 활용되고 있다.

홍콩에서는 전국에 산재해 있는 불안정한 사면에 대해서 장기적인 계획하에 사면붕괴에 대한 예방과 대책을 강구하기 위해 현재 상태에서 위험도가 높은 사면을 분류하고 대책에 우선권을 부여하여 빠른 시간내에 많은 위험사면을 안정화시키는 목적으로 다양한 노력이 제시되었다(Wakins, 1. T., 1986). 강우시 사면위험도를

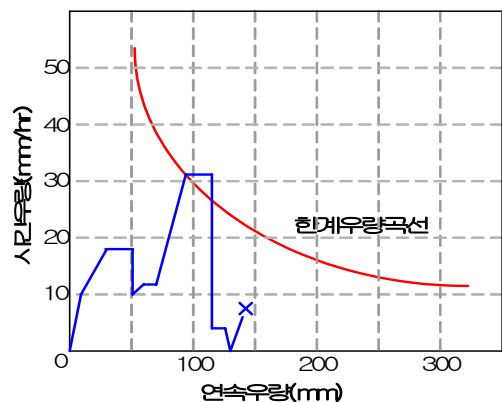


Fig. 2 한계우량곡선과 강우상황 예시

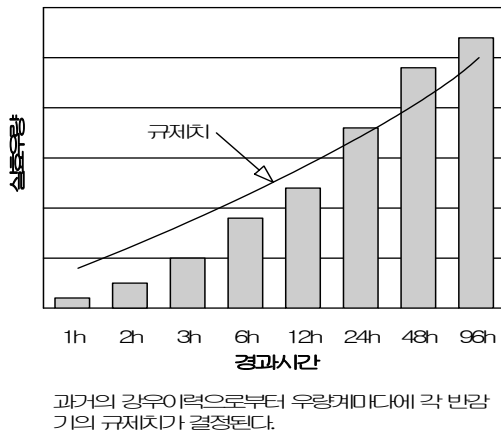


Fig. 3 실효우량에 의한 규제치

예측하여 사전에 경보발령 등의 적극적인 대처가 가능하도록 사면붕괴위험 경계우량을 24시간 예상 강우량 175mm/day로 설정하여 운용하고 있다.

행정안전부에서는 산사태 예보를 위한 기준치로 연속강우량, 시간강우량, 일강우량기준치를 근거로 산사태 주의보 및 경보를 규정하고 있을 뿐만 아니라 산사태 주의보 및 경보에 따른 행동요령도 함께 제시하고 있다. 한국철도공사(2003)의 강우자동경보시스템에 탑재된 운전규제기준은 ‘주의운전’, ‘서행운전’, ‘열차정지’의 3단계로 나누어 설정되어 있으며, 강우로 인한 재해우려시 열차통제의 참고자료로 활용하고 있다. 국내외 운전규제기준의 사례에서 알 수 있듯이 시간우량과 누적우량의 형태로 경계우량을 설정하면 실시간 강우정보와 연계가 용이하고, 강우상황에 따른 안전영역과 불안전영역을 판단할 수 있다.

3. 경계우량을 위한 사면안정해석

3.1 건설공사비탈면 설계기준

국토해양부(2011)에서 제시한 안전을 기준은 안정해석방법과 입력변수가 내포하는 불확실성

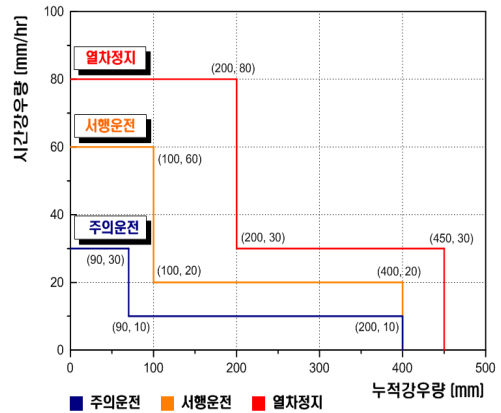


Fig. 4 현행 강우시 운전규제기준

을 감안하여 경제성을 확보하면서 보수적인 설계를 유도하고자 설정하는 값으로서 장기적인 비탈면의 안정성을 확보하기 위한 해석에 사용하는 기준안전율을 경우 다음 Table 1과 같이 제안하고 있다.

3.2 강우침투해석

3.2.1 불포화함수특성곡선

Pressure Plate Extractor와 같은 불포화함수 특성 시험을 시행하면, 불포화함수특성곡선을 얻을 수 있다. 여러 연구자(Brooks & Corey 1964 ; van Genuchten 1980 Fredlund and Xing 1994 등)가 제안한 경험식과 이론식을 이용하면 체적함수비 변화에 따른 투수계수 변화, 강도 변화를 파악할 수 있다.

3.2.2 강우침투해석

우기시 안정성 검토를 위해서는 강우의 침투를 고려하여 해석할 수 있으며, 여러 가지 상용 프로그램이 개발되어 있으므로 이를 이용하면 강우침투해석 결과를 얻을 수 있다. 통상적으로 강우침투에 대해서는 이차원 유한요소해석을 수행하게 되며, 지반의 불포화 특성을 고려한 침투

Table 1 쌓기비탈면 안정해석시 적용하는 기준 안전율

| 구 분 | 기준안전율 | 참 조 |
|-----|--------------|---|
| 건기 | FS > 1.5 | · 지하수가 없는 것으로 해석하는 경우 |
| 우기시 | FS > 1.3 | · 일반적인 쌓기 비탈면은 별도의 지하수위 조건없음. 한쪽쌓기 한쪽짜기 비탈면에서는 측정한 지하수위 또는 침투해석을 통한 지하수위를 이용하여 해석 · 쌓기 표면에 강우침투가 발생하는 경우에는 강우침투를 고려한 해석 실시 |
| 지진시 | FS > 1.1 | · 지진관성력은 파괴토체의 중심에 수평방향으로 작용시킴 |
| 단기 | FS > 1.0~1.1 | · 1년 미만의 단기적인 비탈면의 안정성 |

- * 도로, 단지, 철도 등의 포장체가 형성되는 쌓기비탈면의 경우에는 필요시에 우기시 안전율을 검토하고 건기시의 안전율도 만족하도록 설계함
- * 강도정수를 최대강도가 아닌 잔류강도로 해석한 경우 : 위 기준에서 0.1 감소
- * 비탈면 상하부 파괴범위 내에 가옥, 건물 등의 고정시설물이 있는 경우 : 위 기준에서 0.05 증가
- * 비탈면 상부 파괴범위 내에 1, 2층 시설물의 기초가 있는 경우 : 별도 검토
- * 상기 조건을 중복 적용하여 FS < 1.0인 경우에는 최소안전율 1.0 적용

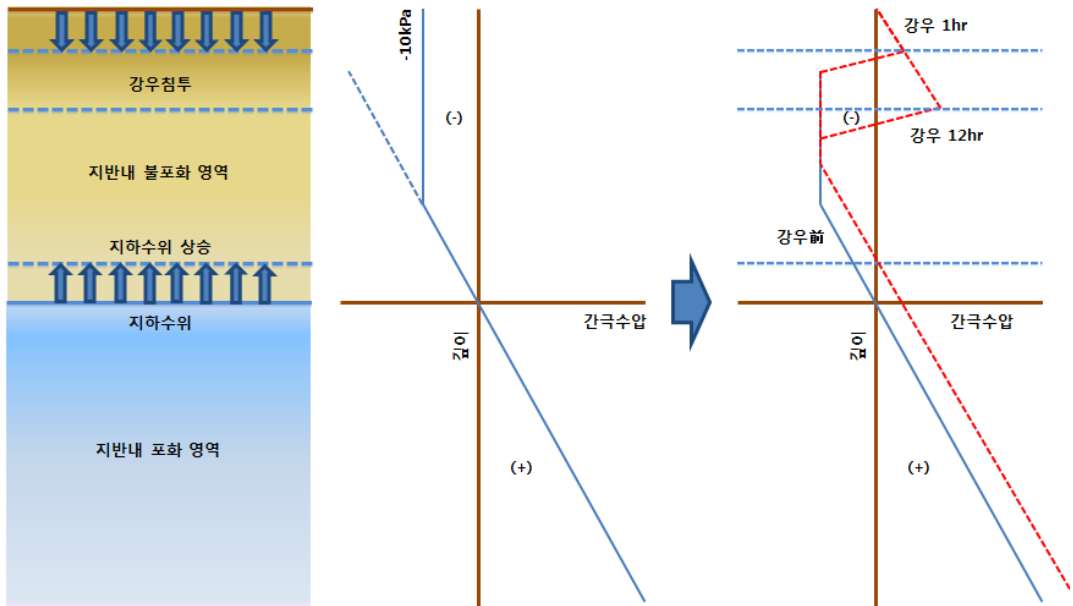


Fig. 5 강우침투에 의한 지반내부의 간극수압 변화 개념도

해석을 시행하며, 해석 결과로 산출된 비탈면 내의 간극수압 분포를 연계한 안정성 해석이 가능하다. 침투 해석에 사용된 지반의 포화 상태에서의 투수계수는 실내 투수시험 결과와 기존 문헌, 경험식 등을 비교하여 최적 값을 선정한다. 강우 강도는 통상적으로 일정 강우강도로 일정 시간 지속하는 방식으로 적용하며, 시간대별로 나누

어 해석결과를 확인한다. 강우침투는 지반내부의 불포화 정도에 따라 침투속도와 양이 결정되므로 불포화함수특성곡선과 포화투수계수를 수치해석 초기에 연동되도록 입력하여 해석을 수행하여야 하며, 침윤전선 발생과 지하수위의 증가를 유발(Fig. 5, 6)하기 때문에 지반내부 간극수압 변화를 동반하게 된다.

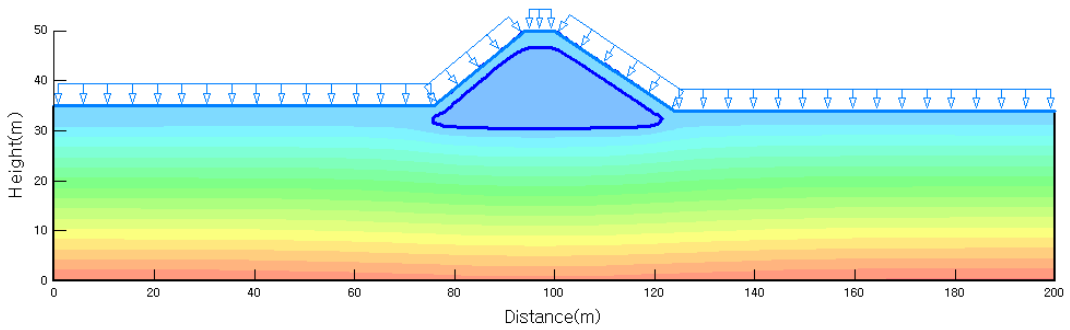


Fig. 6 쌓기 비탈면 내부로의 강우침투경향

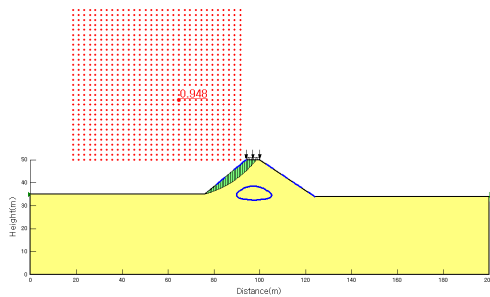


Fig. 7 성토사면(시간강우량 60mm/h, 24hr)

3.3 사면안정해석

극한평형해석법은 절개면 안정성 해석뿐만 아니라 토압, 지지력 등과 같은 지반공학적 문제를 설명·해결하는데 기초를 이루는 방법으로 대상 지반을 하나의 토체로 간주하여 임의의 파괴면에 대한 힘과 모멘트의 평형조건을 고려하여 해석하는 방법이다. 이 방법을 이용하면 강우침투 시간에 대한 사면의 안정성을 평가할 수 있다.

3.4 경계우량 설정방법

비탈면설계기준에 의한 기준안전율(강우침투 해석 기준) 1.3을 적용한 강우침투해석과 연계한 사면안정해석결과를 이용하여 운전규제를 위한 경계우량을 설정하는 방법은 다음과 같이 제안할 수 있다.

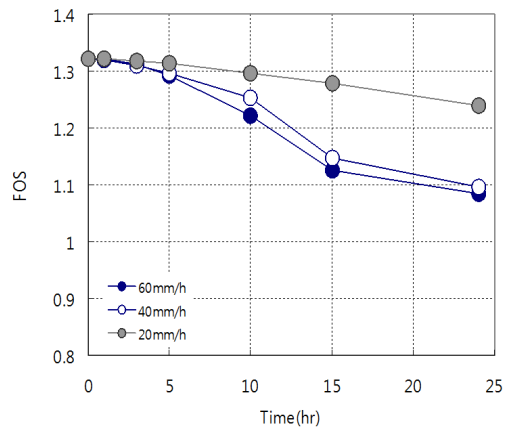


Fig. 8 강우침투에 따른 안전율 변화 예

- 1) 1차적으로 시간강우량에 대한 안전율 변화를 그래프로 작성
- 2) 데이터를 이용한 추세선 작도 및 추세식 추출
- 3) 추세식을 이용하여 기준 안전율=1.3을 적용하여 시간강우량을 역산
- 4) 해당되는 강우지속시간과 연계하여 강우정보(시간강우량 vs 누적강우량) 산정

이상의 방법을 적용하면, Fig. 9와 같은 결과를 얻을 수 있으며 현재 한국철도공사에서 설정한 기준이나 일본의 규제기준과의 직접적인 비교 분석이 가능할 뿐만 아니라, 공학적 근거를

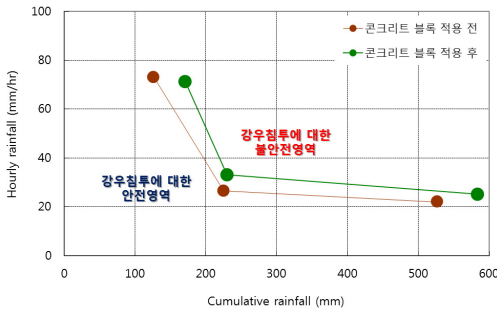


Fig. 9 경계우량 설정 예

갖는 우량지표로 된다. 향후 비탈면 설계에서 우기시 안정해석을 강우침투해석으로 시행하는 경우, 본 경계우량 설정법을 이용하면 각 비탈면의 내강우성을 평가할 수 있고, 그 결과를 데이터베이스화할 경우, 철도뿐만 아니라 도로 등에 대한 운전규제가 가능한 것으로 판단된다. 특히, 누적우량과 시간강우량의 평면으로 경계우량이 작도되기 때문에 실시간 강우상황을 그대로 도표로 비교할 수 있다는 장점이 있다.

4. 맺음말

열차는 여타 육상·항공교통수단과는 별개로 불의의 사고시 막대한 인명피해를 동반하게 되므로, 강우 등과 같은 자연재해를 보다 현실성있게 예측할 수 있는 기법을 개발하고, 이를 적극적으로 현장에 적용하여 강우시 주행중인 열차 안전을 확보해야만 한다. 국내외에서 적용되고

있는 강우시 열차운전규제기준은 기본적으로 통계적인 방법을 이용하여 공학적 기반이 부족하기 때문에, 본 기술기사에서는 철도 재해예방을 위하여 기존에 제안된 경험적 열차운전규제기준을 보완함을 목적으로 경계우량 설정법을 제안하였다.

건설공사를 시행하면 필연적으로 비탈면이 발생하게 되고, 안정성 검토를 통한 설계를 수행하게 된다. 각 비탈면별로 본 기술기사에서 제안한 내강우성 평가를 통하여 경계우량이 설정되면, 강우정보와 결합 및 연계를 통하여 열차와 차량의 안전을 한층 확고히 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. '건설공사비탈면 설계기준', 국토해양부, 2011
2. '철도시설물안전성강화기술개발' 연구보고서, 국토해양부, 2003
3. '철도시설물안전관리네트워크 시범 구축' 연구보고서, 국토해양부, 2011
4. 'Risk Assessment and Risk Communication in Civil Engineering', CIB Report, Publication 259, 2001
5. '降雨に関する運轉規制等要領(在來線)解説(平成2年5月)', JR東日本

담당 편집위원: 김현기
(한국철도기술연구원
철도구조연구실 선임연구원)
hkkim@krri.re.kr