

기후변화로 인한 지반공학적 재해 고찰

Geotechnical Risk of Soil Structures Due to Climate Change

윤길림¹⁾, Gil Lim Yoon, 배운신²⁾, Yoon-Shin Bae

¹⁾ 한국해양연구원 책임연구원, Senior Researcher, Korea Ocean Research & Development Institute

²⁾ 한국해양연구원 연수연구원, Researcher, Korea Ocean Research & Development Institute

SYNOPSIS : 21세기 들어 지구의 온난화 등 기후변화로 인하여 기온이 상승하고 해수면이 상승하는 등 그 변화의 증거가 관측되고 있다. 본 논문에서는 지구의 기온상승과 해수면의 상승이 지반구조물에 미치는 영향을 고찰해 보았다. 지구온난화에 따른 해수면 상승이 지반구조물의 안정성에 미치는 영향을 사례별로 예시해 보았고 국내외에서 이에 대한 적절한 대응 방안을 검토해 보았다.

Keywords : 기후변화, 해수면상승, 지구온난화, 지반구조물, 안정성

1. 서론

전세계적으로 지구 온난화와 이상기후에 따라 기온이 상승하고 해수면이 상승하는 등 그 변화의 증거가 관측되고 있다. 정부간 기후변화패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 3차 기후변화에 관한 평가 보고서(IPCC, 2001)에서 지난 세기동안 전지구 평균 기온은 약 0.6 °C 상승하였으며, 21세기에 전지구 평균 기온의 상승폭은 1.4-5.8 °C가 될 것으로 전망하였다. 최근의 보도자료에 따르면 우리나라는 지난 100년(1912-2008) 연평균 기온은 1.7 °C 상승하였고 연강수량은 19% 증가하였다(기상청 보도자료, 2009). 2000년대 한반도 연평균 기온은 1990년대에 비하여 0.2 °C 상승하였다. 국립기상연구소의 기후변화 모델 실험을 통한 미래 기후변화 전망으로 21세기말(2079-2100년)은 20세기말(1979-2000년)에 비해 한반도 연평균기온은 4 °C 증가하고, 연강수량은 17% 증가할 것으로 예상하였다. 본 논문에서는 지구의 기온상승과 해수면의 상승이 지반구조물에 미치는 영향을 고찰해 보았다. 지구온난화로 인한 기후변화 중 구조물에 가장 큰 악영향을 줄 수 있는 요소 중의 하나가 해수면 상승인 것으로 알려져 있다(IPCC WGI, 2001). 해수면 상승의 직접적인 영향을 받는 연안은 독특하고 대체 불가능한 자연생태계를 보유하고 있을 뿐 아니라 사회경제적으로 수송, 산업시설, 자원, 관광 등 인간과 밀접한 관계가 있는 곳이다(조광우 등, 2007). 해수면 상승은 인간거주지, 수자원 및 산업시설을 포함한 산업인프라에 악영향을 미칠 것으로 예상되고 있다. 특히 한반도는 백중사리, 태풍 및 폭풍 등에 의한 해일과 같은 기상재해에 의하여 이미 해수 범람 및 해안침식, 지하수로의 해수 침입 등의 피해를 경험하고 있다(조광우 등, 2005). 삼면이 바다로 둘러싸이고 연안에서 활발한 사회/경제적 활동이 이루어지고 있는 우리나라에서의 해수면 상승은 향후 큰 영향을 미칠 수 있는 바 지구온난화의 과학적 예측에 근거한 대응전략 수립은 필수적이다.

2. 기후변화가 구조물에 미치는 영향

2.1 지구온난화가 연안지역 인프라구조물에 미치는 영향

기후변화가 도심지역의 인프라구조물에 미치는 영향은 중요하다. 지구온난화로 인한 집중호우도 구조물에 치명적 영향을 끼칠 수 있으므로 고려하여야 한다. 그림 1(좌측)은 일본에서 일년동안 일일강수량이 400mm가 넘는 횟수를 보여주고 그림 1(우측)은 1976년에서 2006년까지 시간당 강수량이 50mm가 넘는 횟수를 나타내고 있다(Japan Meteorological Agency, 2006). 그림에서 알 수 있듯이 기습폭우의 발생빈도는 해마다 증가하고 증가율은 최근에 두드러지고 있다. 실제로 일본에서는 기습호우로 인한 막대한 피해를 입은 사례가 있었으며 그림 2는 2004년 집중호우로 인한 Igarashi강의 제방붕괴 사고를 보여준다. 당시 제방 붕괴로 인하여 많은 양의 강물이 넘쳐나서 피해를 입었다. 표 1은 2004년 Niigata torrential rainfall로 인한 피해사례를 보여준다.

특히 연안지역에서 지구온난화에 따른 해수면 상승이 거주지역에 어떤 결과를 초래하는지에 관한 연구는 매우 필요하다. 만일 기후변화와 자연재해가 동시에 발생할 경우 더욱 심각한 재앙을 일으킬 수 있다.(Yasuhara 등, 2007). 예를 들면 지구온난화에 따른 해수면 상승이 지진 (해일) 등 자연재해와 동시 발생할 경우이다. 또한 해수면상승에 동반한 지하수위의 상승도 지진발생시 액상화를 일으킬 수 있다고 알려져 있다. 그림 3은 동반재해 현상의 모식도를 보여준다(Yasuhara 등, 2007).

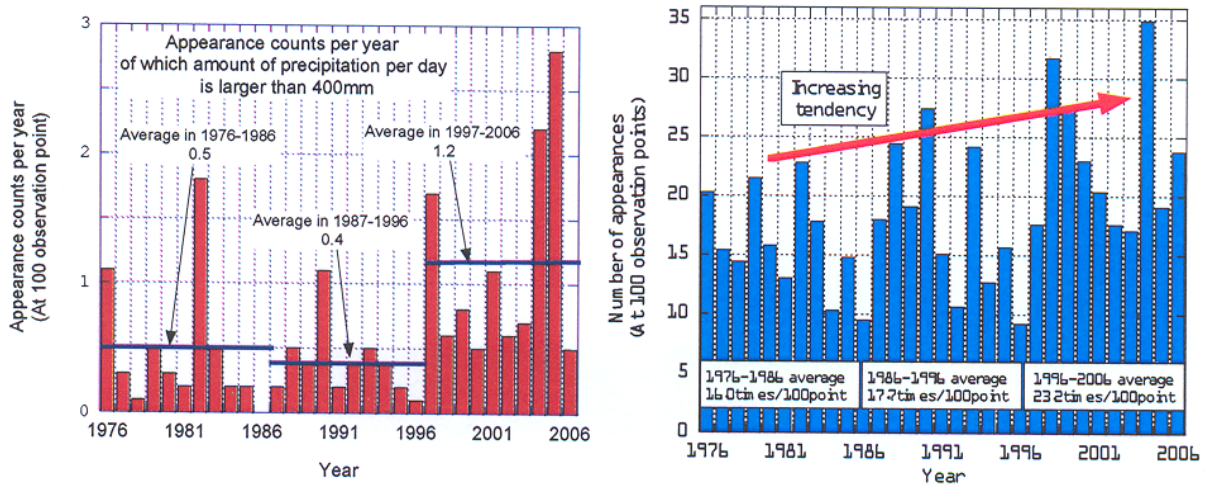


그림 1. 일본의 최근 강우 동향(Japan Meteorological Agency 2006)

표 1. 2004년도 Niigata 기습호우로 인한 피해사례

Completely destroyed house	70 (68 household)
Half destroyed house	5354 (5437 household)
Partially destroyed house	94 (94 household)
House flooded above floor board	2178 (2222 household)
House flooded below floor board	6117 (6176 household)



그림 2. 2004년 집중호우로 인한 Igarashi강의 제방붕괴 사고

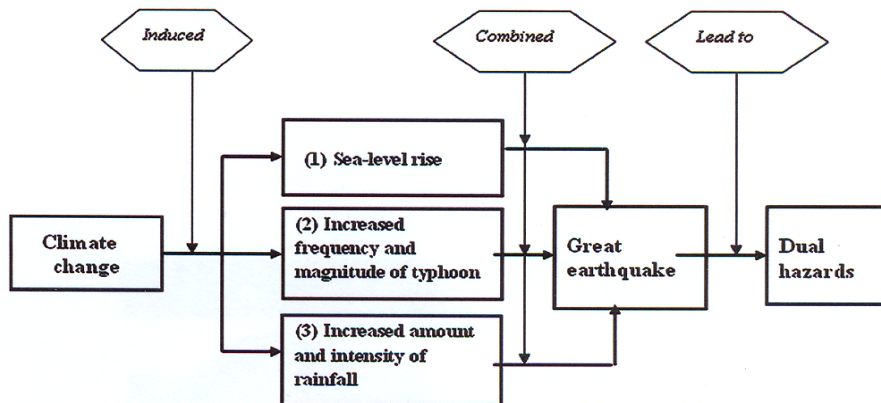


그림 3. 동반 재해의 모식도(Yasuhara 등, 2007)

우리나라의 경우 큰 규모의 지진이 자주 발생하지 않는 중약진 지역으로 알려져 있었으나 최근 2010년 2월 9일 18시 08분 14초에 서울 부근에서 규모 3.0의 지진이 발생했다. 지진이 발생한 위치는 경기도 시흥시 북쪽 8km 지점(37.45°N, 126.80°E)으로, 서울 부근과 수도권 대부분의 지역에서 진동이 2~3초 동안 지속되어 건물이 흔들리기도 하였으며, 대부분의 사람이 진동을 느낄 수 있었다. 이 지진은 국내에서 2010년 들어 7번째로 발생한 지진이며, 사람이 느낄 수 있는 유감지진이 발생한 것은 올해 들어 처음이다. 아울러, 2009년에는 국내에서 총 60회의 지진이 발생하였으며, 이 중 규모 3.0 이상의 지진은 8회, 유감지진은 총 10회 발생하여 한국도 더 이상 지진으로부터 안전지대가 아니라는 주장이 설득력을 얻고 있다. 그동안 지진으로 인한 피해는 일본과 중국에서만 한정된 것으로 알려졌으나 더 이상 한반도도 이같은 자연재해로부터 안전하지 않다는 사실이 입증되고 있는 것이다. 더욱이 지구온난화로 인한 해수면 상승이 지진발생에 더욱 치명적 영향을 준다는 것은 앞으로 이에 대한 대책이 시급하다.

Yasuhara and Adachi(1994)의 연구에 의하면 지구온난화가 미치는 영향으로 (1) 해수면 상승 (2) 대기순환의 변화 (3) 지표면 온도의 상승 등을 초래한다. 그림 4는 지반공학적 관점에서 본 지구온난화에 의한 사건 event tree를 보여준다. 표2는 지반공학 및 지반환경적 변화와 관련한 현상을 보여준다. 표2에서 보는 바와 같이 지하수위 변화는 다른 요인보다 중요한 이슈가 됨을 알 수 있다.

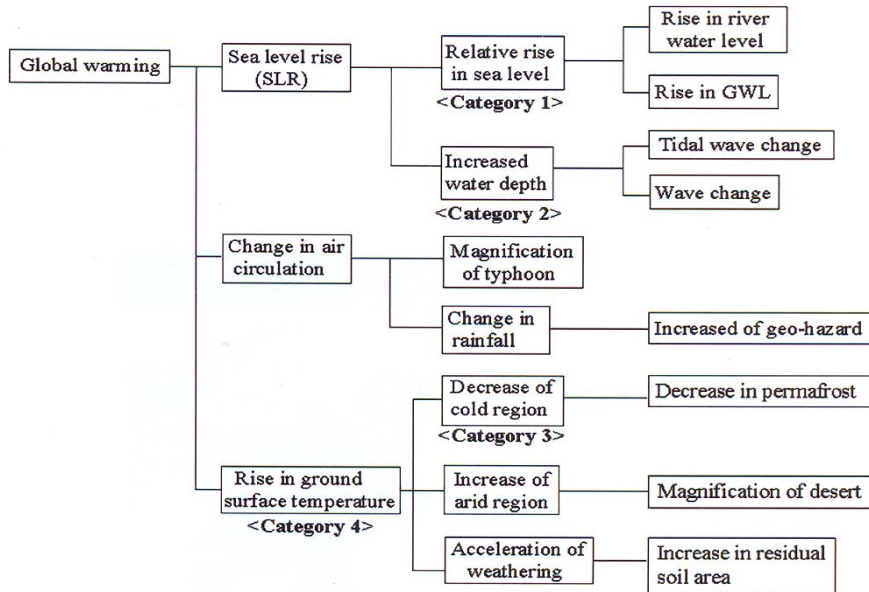


그림 4. 지구온난화로 인한 지반공학적 문제에 관한 event tree(Yasuhara and Adachi, 1994)

지하수가 빠지면서 지하수위가 내려가면 지반 꺼짐이 발생할 수 있고 이는 해수면 상승과 복합되어 구조물에 악영향을 일으킬 수 있고 내륙보다는 해안가에서 발생시 더욱 치명적인 것으로 알려져 있다 (Yasuhara 등, 2007). 국내 해안도시에서도 장마철 집중호우는 지반 꺼짐 현상을 일으키므로 특히 경계의 대상이다. 따라서 해수면 상승을 미리 예측하고 지반 꺼짐 발생시 최악의 시나리오를 채택한 해안 및 항만 설계가 필요하다.

반면 Yasuhara 등(2007)의 연구에 의하면 해수면 상승은 지하수위 상승을 초래하여 기초의 안정성에 심각한 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다. 만일 국내 해안도시 건물에 파일 기초가 설치되어 있지 않은 경우 건물자중을 초과하는 양압력으로 인하여 기초의 안정성에 문제를 일으킬 수 있다. 이런 경우 구조물의 부력을 상쇄시키기 위한 여러 가지 대책이 시급한 실정이다.

표 2. 지구온난화로 인한 지반공학적 이슈(Yasuhara and Adachi, 1994)

Category	Physical event	Possible concrete event
(1) Sea-level rise (SLR) Increase in groundwater level (GWL) Increase in river-water level	Decrease in effective stress Swelling Uplift force Seepage	Decrease in bearing capacity Collapse of soil structure Floating of structure Seepage failure Piping
(2) Increased water depth	Change in tidal wave Wave-induced force	Displacement and settlement of foundations Damage of structures Increase of erosion
(3) Change in rainfall	Prolongation of rainfall Increase in rainfall intensity	Increase in landslide and slope failure
(4) Rise in ground-surface temp.	Thawing of frozen soil Acceleration of weathering Magnification of desert	Decrease in bearing capacity Increase in disasters of residual soils

2.2 해수면 상승이 구조물에 미치는 영향

2.2.1 해수면 상승 현황

20세기 해수면 변화에 대한 대부분의 연구는 장기 조위자료에 의존하고 있다(Cho, 2003). IPCC 3차 보고서(IPCC WG I, 2001)은 이들 결과들을 이용하여 20세기 지구평균 해수면 상승률은 1.0~2.0 mm/yr로 평가하였다. 20세기 지구온난화에 따른 해수면 상승은 주로 해양 수온 상승을 통한 해양의 열팽창, 육상 빙하 및 빙모의 해빙, 남극 및 그린란드 빙상의 용해, 영구동토 해빙 등에 기인한다(IPCC WG I, 2001). 지구온난화에 따른 우리나라 주변의 해수면 상승과 관련하여 아직까지 정확한 연구 결과가 도출되지 못하고 있는 실정이다. 한반도 해수면 변화와 관련하여 Cho(2003)는 한반도 주변 23개 조위자료를 사용하여 후빙기지각변동을 보정하여 산출한 해수면 변화율의 평균치는 $2.30 \pm 2.22 \text{ mm/yr}$ 인 것으로 보고하였다.

21세기 해수면 상승은 지구온난화의 가속화에 기인하여 가속되는 것으로 예측되고 있다. 지구평균 해수면은 2100년에 1990년에 대비 0.09~0.88 m 상승하며 그 중간 값은 0.48 m로 예측되었다. 중간 값을 기준으로 21세기 해수면 상승률은 20세기에 비하여 2.2~4.4배 증가하는 것으로 예측되었다(조관우 외, 2007). 해수면 상승은 연안지역에 영향을 주는 가장 중요한 지구적 기후변화의 요소로 간주되고 있다. IPCC-Working Group I은 해양의 열팽창과 산악빙하의 용해로 인하여 2100년까지 해수면이 30cm에서 110cm까지 상승할 것이라고 제시하였다. 그러한 상승률은 현재의 상승률보다 3배에서 10배나 되는 것이다. 국내 해수면 상승에 의한 해안선의 후퇴는 범람과 해안침식이 수반되는 현상으로 30~50cm의 해수위 상승은 우리나라 동해안의 경우는 사빈해안의 침식을 유발하고 서해안의 경우 조간대의 감소를 의미한다(최, 1994).

2.2.2 해수면 상승이 사회경제시스템에 미치는 영향

해수면 상승이 연안시스템에 미치는 영향은 연안 저지대 및 습지의 범람 증대와 이동, 연안 침식 증대, 폭풍 해일 및 홍수의 위험 증대, 표층수 및 지하수의 염분 침투 등이다(조관우 외, 2007). 특히 사회 기반시설 및 경제 활동에 미치는 영향으로는 주요 사회 기반시설(항구, 연안도로, 철도 등), 연안산업(석유 및 석유 화학 공장 등) 및 서비스에 대한 위협으로 토지 및 건물 자사 가치하락과 해수면 상승 영향에 대한 보호 비용 증대, 보험료의 증대, 정치적 제도적 불안 및 사회 동요 등을 유발할 수 있다. 전 세계에 연안 저지대는 일반적으로 산업 및 인간 활동 등이 집중 되는 곳이다. 세계적으로 연안에는 주민이 집중적으로 분포하여 연안 30km 이내에 세계 인구의 20%, 100km 이내에 37%가 분포하고 있는 것으로 알려져 있다. IPCC (1994)에 따르면 세계인구가 53억 되는 시점에는 세계 주민의 50~70%가 연안에 거주하며 세계의 대도시중의 상당수가 연안에 위치할 것이라고 하였다.

이와 같은 연안에서의 인간 활동은 세계적으로 습지 파괴와 같이 연안에 심각한 영향을 주고 있으며 연안에서의 다양한 사회경제 활동은 태풍에 의한 범람과 같이 다양한 연안의 위험을 이미 경험하고 있다. 이런 기존 위험 요소에 해수면 상승은 연안에 심각한 영향을 끼치며 지구온난화에 의한 다른 기후 변화와의 상호 작용을 통해서 다양한 악영향을 미칠 수 있다.

현재 평균 4천 6백만 명의 인구가 매년 폭풍 해일에 의한 홍수를 경험하고 있으며 50cm의 해수면 상승이 일어나면 이 수는 9천 2백만 명, 1m 해수면 상승은 1억 1천 8백만 명으로 이 수치가 증가할 것으로 예상되었다(IPCC WG II, 2001). 이 예측치에 인구 성장 예측을 추가하면 그 수치는 훨씬 증가할 것이다(조관우 외, 2007). 많은 연구 결과 소형 섬 및 삼각주 지역들이 특히 1m 해수면 상승에 취약한 것으로 나타나고 있다(Brown, 2001). 적절한 완화장치 조치(방파제 건설 등)를 취하지 않는 경우 육지 손실은 이집트의 경우 1%, 네덜란드 6%, 방글라데시 17.5%, 마셜군도는 약 80%에 달하며 수천만 명의 주민이 거주지를 옮겨야 하고 저지대 소형 군도 국가에서는 전 국토가 유실될 가능성이 있다(Brown, 2001).

우리나라의 경우 조관우(2007)의 연구에 따르면 해수면 상승 취약성 지수로서 해수면 상승에 따른 범

람 면적과 범람 인구를 선정 연안의 사회경제시스템에 대한 영향평가를 수행하였다. 즉, 취약성 평가를 위한 해수면 상승 시나리오는 지구온난화에 의한 해수면 상승과 더불어 조석 및 태풍해일에 의한 상대적 해수면 상승효과를 고려하여 14개 시나리오를 산출하였다. 산출된 해수면 시나리오 중 조석 및 태풍해일을 고려한 1m 상승에 대하여 한반도 최대 범람 가능 면적은 약 2,643 km³로서 한반도 전체 면적의 약 1.2% 정도가 취약한 것으로 나타났다. 취약 지대 거주하는 범람 가능 인구는 약 1,255,000명으로 한반도 전체 인구의 약 2.6%이고 지리적으로는 서해안이 남해안과 동해안에 비하여 훨씬 더 취약한 것으로 나타났으며 서해안 중에서도 북한이 남한보다 더 취약할 것으로 예상되었다(조광우, 2007).

Kitajima et al. (1993)은 1m 해수면 상승에 대한 일본의 인프라시설의 유지 보호를 위하여 11조 5천 엔의 비용이 드는 것으로 추산하였으며 전 일본 연안을 보호하기 위한 비용은 약 20조 엔 이상이 드는 것으로 추산하였다. 향후 도시화로 인하여 인간은 대도시에 집중될 것이고 그런 경향은 개발도산국에서 더욱 심할 것으로 예상된다(Kitajima et al., 1993). 이들 대부분의 도시들은 적절한 해안 방파제나 재해 방재 시설을 갖추지 못하므로 해수면 상승 및 기후변화에 의한 폭풍 해일 및 태풍의 빈도 및 강도 증가에 취약할 것이다. 최근 우리나라 해안도 태풍 및 강도 변화에 크게 영향을 받고 있는 것으로 나타났으며 이에 대응하기 위한 비용 산정이 시작되고 있다(마산시, 2004; 부산시, 2005)

2.2.3 해수면 상승이 미치는 영향 사례 -제방/둑

강변이나 강기슭은 야구장, 테니스장 등 레저장소와 자전거 통행도로, 꽃밭과 같은 환경친화적 공간으로 다양하게 이용되고 있기 때문에 강둑, 하안 등의 해수면 상승에 대한 취약성 평가는 중요하다. Komine (2007)의 연구에 의하면 해수가 강의 상부로 흐르면서 염분을 함유한 지역이 확대될 것으로 예상하였다. 따라서 강의 제방과 강둑을 구성하고 있는 흙의 재료가 영향을 받는 것은 자명한 일이다(그림 5). 흙의 특성은 또한 구성물에 포함되어 있는 수분의 영향을 받기 때문에 제방과 강둑은 지구온난화에 의한 강한 폭우나 해수면 상승으로 인하여 얼마나 취약한지 알아보아야 한다. 본 절에서는 일본에서 연구한 기후온난화 및 해수면 상승에 의한 제방과 강둑과 같은 기반시설의 취약성 평가를 인용하였다.

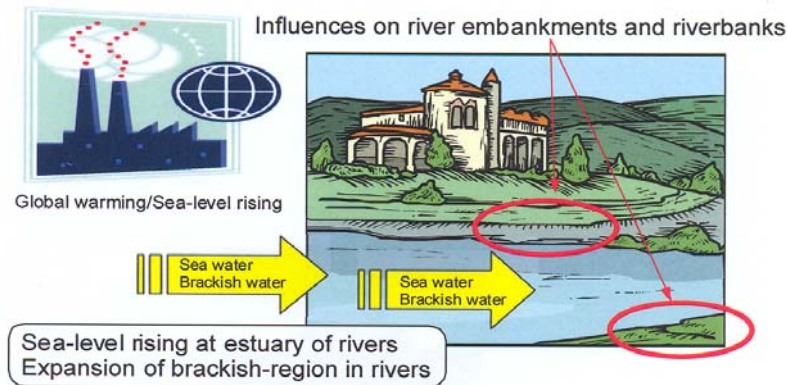


그림 5. 하천의 염분을 함유한 지역 확장이 제방과 강둑에 미치는 영향(Komine 등, 2007)

Komine (2007)는 9개의 시료 샘플을 이용하였고 시료가 채취된 장소는 그림 6에 표기되었다. 제방과 강둑의 취약성 평가를 위하여 시료가 증류수를 함유할 경우와 염분을 함유할 경우 시료의 기계적 특성 (mechanical property)변화를 파악할 목적으로 액소성 시험이 수행되었다.

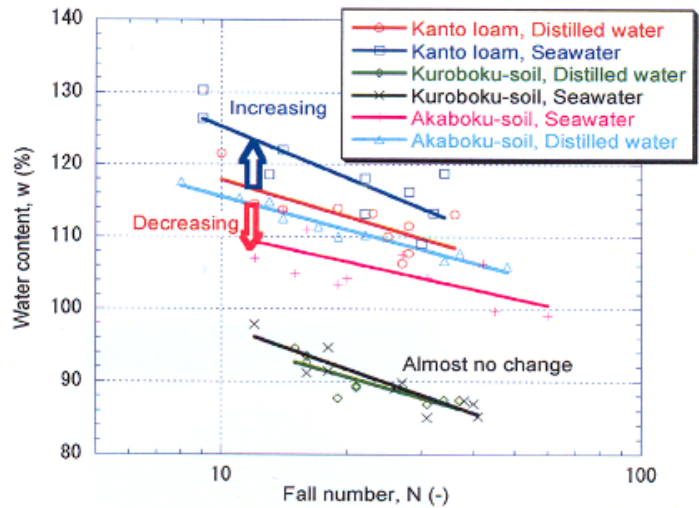
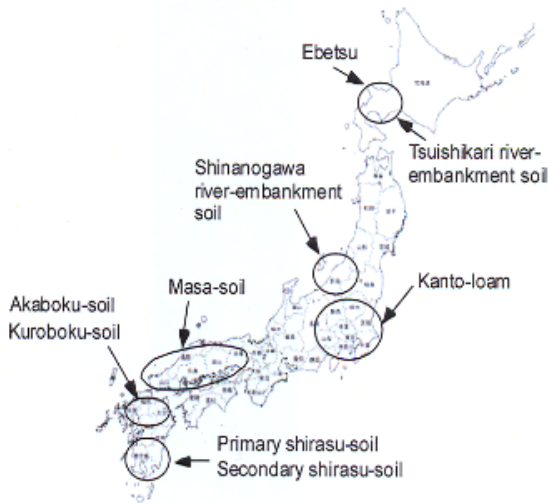


그림 6. 샘플시료가 채취된 지역을 표기한 지도와 액성한계 시험 결과(Komine 등, 2007)

그림 6의 액성한계 시험결과에서 Kanto loam의 수분 함유량은 염분을 함유할 경우 증가되었고 이는 염분을 함유하지 않는 경우보다 시료 변형이 감소함을 보여준다. 반면 Akaboku-soil은 염분을 함유하면 액성한계가 줄어들어 수분함유량이 감소하여 시료의 변형은 증가한다.

다른 다섯 지역의 체적변화계수, m_v 는 염분을 함유할 경우 증가하였고 이는 특정지역의 제방과 강둑의 구성성분에 염분이 스며들 경우 함몰될 가능성이 있음을 시사한다(Komme, 2007). 압밀계수, c_v 또한 관측되었고 측정결과에 따르면 염분을 함유할 경우 특정 지역 압밀계수가 증가되었고 이는 염분 함유시 제방 및 둑의 압밀속도가 빨라질 수 있음을 유추할 수 있다. 투수계수(k)는 물이 얼마나 제방과 둑 내부로 잘 침투하는지 알 수 있는 물성치이고 데이터 베이스를 활용하면 염분 함유시 제방의 거동 예측을 위한 중요한 단서가 될 수 있다.

이와같이 시험결과 데이터 베이스로 특정지역의 재해경감을 줄일 수 있는 적절한 대응을 계획할 수 있다. 현재 국내에서 해수면 상승에 따른 지반-구조물의 취약성 평가는 전무한 상태이다. 우선 해안권역별로 그룹을 형성한후 각 그룹별 시료를 채취한 후 전술한 시험을 통하여 해안지역의 해수면 상승에 대비한 거동을 추측할 수 있다.

2.2.4 해수면 상승이 미치는 영향 사례 -기초의 안정성

2차 세계대전 이후 일본 동경과 오사카 등 대도시에서 지하수 제거로 인한 지반함몰로 많은 피해를 입었지만 1980년대 지하수 제거에 관한 규제로 지반함몰은 현저하게 줄어들었다. 반면 지하수위가 회복되면서 침하량 증가와 지지력 감소와 같은 기초의 불안정성을 야기시켰다(Kusakabe and Kawai, 1989). 급격한 지하수 상승은 부력으로 인한 구조물의 안정성에 심각한 영향을 끼칠 수 있어서 지구온난화로 인한 해수면 상승과 지하수위 상승에 대비한 지반 공학적 대책마련은 중요하다. 특히, 지하수위 상승에 따른 기초의 히빙 현상과 침하량 평가 방법에 관한 연구가 필요하다. 국내에서는 아직 지하수의 상승에 따른 구조물의 안정성 평가에 관한 연구가 이루어지지 않았으므로 기후 변화에 대비한 구조물 대응에 관한 연구가 필요하다.

Murakami 등(2005)은 수치해석법을 이용하여 해수면 상승에 따른 지하수위 변화를 예측하였다. 그림 7는 해수면이 0.8 미터 상승시 지하수위 증가 분포도를 보여준다. 해안선 근처에서는 지하수위가 거의 0.8 미터까지 증가하지만 해안선 근처에서 그보다 적게 증가하는 경우도 있다. 그러므로 지역적 특성을 고려한 지하수위 증가 분포 평가가 필요하다.

지하수 상승은 지반, 상부구조물 및 하부구조물에 영향을 준다. 지하공간에서의 지하수 상승과 기초의 주변상황을 보여주는 모식도를 그림7에 나타내었다(Murakami et al., 2005). Yasuhara 등 (2003)의

연구에 의하면 지하수가 상승하여 기초의 바닥까지 이르면 (1) 흡착으로 인한 지표지반의 swelling 현상 (2) 지지력 감소 (3) 지면 전단 응력 증가로 인한 침하량 증가 등이 발생한다. 지하수위 증가에 따른 기초의 안정성 메카니즘은 Yasuhara 등 (2003)에 자세히 소개되었고 지하수위 상승에 따른 지지력 감소, 기초의 침하량 계산 및 액상화 가능성에 관한 연구도 기술되었다. 그들의 연구에 따르면 점토 지반보다 사질토 지반에서 지지력 감소가 두드러졌고 지하수위와 기초저면부 깊이에 따라 각기 다른 지지력 감소 양상을 보였다.

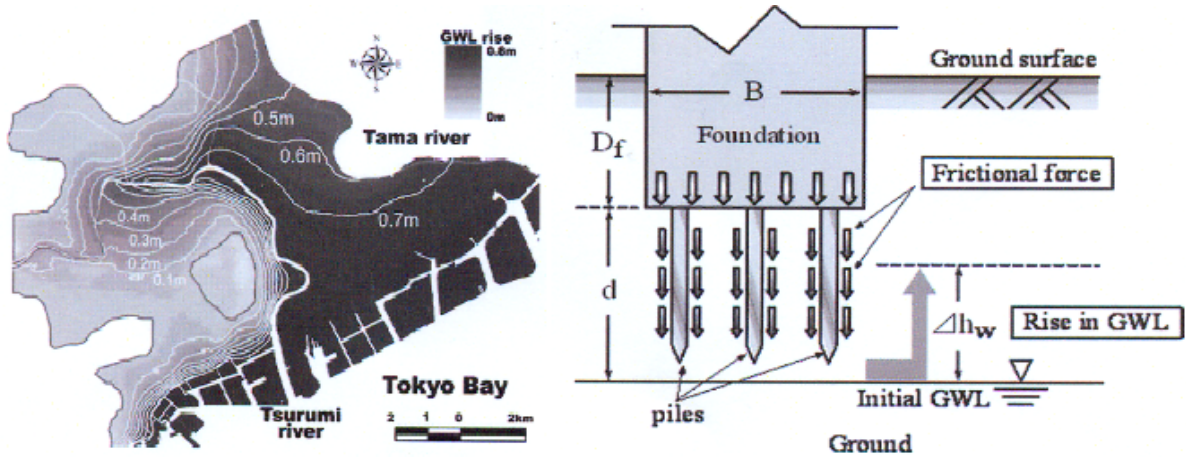


그림 7. 0.8 미터 해수면 상승시 지하수위 증가 분포도와 지하수위 증가에 따른 깊은 기초 거동 모식도(Murakami et al., 2005)

3. 기후변화관련 대응방안

홍수에 관련된 죽음, 재산과 환경 피해 증가와 국가 영토해역이 줄어드는 현상 등이 해수면의 상승에 기인하고 이는 도피(retreat), 적응(accommodate) 아니면 보호(protect)와 같은 응답 선택에 관한 결정을 필연적으로 야기시킨다(Barth and Titus, 1984). 많은 연구자들은 기후변화의 결과로 극단적 현상이 더욱 빈번해 질 것이라고 시사하였다. 세계 기후 시스템은 너무 복잡해서 이해하기에 어려움이 있고 세계 해수면을 관찰하는 현재의 시스템은 주요 수위 변화를 감지하지 못한다. 미래 해수면 상승에 관한 본질, 시기, 크기에 관하여 상당한 불확실성이 남아있다. 강이나 인접한 연안해역 하류지역의 높아진 수위상승은 근접 부지의 자연 배수를 방해하여 도로, 건물, 농업대지 등에 피해를 준다.

점차 산업화된 도시의 발달은 고층 빌딩과 같은 거대한 인프라 시설이 증가함에 따라 해수면 상승과 같은 기후변화로 인한 자연 재해의 피해가 더욱 커질 수밖에 없다. 앞서 열거한 바와 같이 강물 수위는 관련 인프라시설물, 다리, 항만 구조물, 방파제 및 제방에 영향을 주고 강하류와 인근 연안주변의 수위 상승은 부지의 배수를 어렵게 하여 도로, 건물 및 농업대지에 피해를 줄 수 있다. 해수면의 상승과 기후변화의 잠재적 영향은 다양하고 불확실하지만 그에 대한 적응이 필요한 것에는 의심할 여지가 없다.

지구온난화와 해수면 상승에 의한 결과는 첫째 염분이 지하수로 흘러들어가는 화학적인 영향과 바닷물이 지하수로 함쳐져서 지하수위 상승을 일으키는 물리적인 영향을 생각할 수 있으나 화학적 영향에 관한 연구는 아직 진행 중에 있다(Yasuhara 등, 2007). 물리적인 작용으로는 지하수의 상승에 의한 직접적인 피해와 지진등 자연재해와 지하수의 상승의 복합작용에 의한 간접적인 피해가 있다. 아래 표3은 선진국과 개발도산국에서의 해수면 상승에 따른 대응과 적응전략을 보여준다.

표 3 해수면 상승으로 인한 피해에 대비한 대응과 적응 전략(Yasuhara 등, 2007)

	Traditional or conventional measures	Innovative measures
Developing countries	Revetment Groin Revetment and groin Planting mangrove Natural geosynthetics such as jute	Gabion Concrete wall Ground improvement Geosynthetics
Developed countries	Concrete wall	<p>Against single hazard</p> <ul style="list-style-type: none"> • Installation of piles • Lowering groundwater level (GWL) • Upgrading embankment (e.g., superdykes) • Ground improvement <ul style="list-style-type: none"> -Improvement of density -Adding drainage system -Adding chemical material -Utilization of carbon oxide • Ground reinforcement <ul style="list-style-type: none"> -Geosynthetics -Geosynthetics with cement or quicklime <p>Against dual hazard</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lowering GWL • Piles for mitigation of liquefaction • Cement treatment • Gravel drain, particularly using recycled materials

지하수위 상승에 의한 지반꺼짐(land subsidence)에 대한 대응책으로는 지하수 제거(groundwater abstraction)의 제한이 가장 보편적이고 유효한 수단이고 사질토에서의 액상화 방지를 위하여 배수시설물 설치가 도심지에서의 대응수단이 될 수 있다. 또한 구조물이 부유현상을 막기 위하여 파일이나 앵커 파일을 관입하여 방지할 수 있고 지하수 제거(ground abstraction)도 지하구조물과 거대구조물의 부유현상을 줄일 수 있다. 그러나 지하수제거(ground abstraction)는 지반꺼짐(land subsidence)을 초래할 수 있으므로 지하수위를 주의깊게 관찰하여 부유현상과 지반꺼짐(land subsidence)을 모두 줄일 수 있는 최적의 지하수위를 유지할 필요가 있다.(Yasuhara 등, 2007). 지반꺼짐으로 피해를 입는 저지대 및 연안 지역에서는 적응(adaptation)에 특별한 주의가 필요하다.

해수면 상승과 기후변화의 잠재적 영향은 변동적이고 불확실하다. 하지만 이에 대한 적응과 대응이 필요하다는 것에는 의심이 없다. 적응(adaptation)이라는 개념을 변화된 현상에 순응하는 것이라면, 대응(response)이라는 개념은 변화된 현상에 대처하는 것이라고 정의한다. 따라서 재난을 예방하고 대처하는 업무의 차원에서 본다면 기후변화에 따라 발생하는 재난에 대해서는 순응하는 소극적 개념보다는 적극적으로 대처하는 대응의 개념이 필요하다.

4. 국내외 기후변화의 대응전략 및 향후 과제

일본에서는 재해발생전 대책수립 (beforehand countermeasures)에도 불구하고 완전한 자연재해 방지는 불가능하므로 재해지역의 사후관리(aftercare)도 중요한 적응(adaptations)과 대응책 (countermeasures)

중 하나로 간주하고 있다 (Komine, 2008). 그림 8에서 보는 바와 같이 2004년 Niigata Chuetsu 지진발생 후 많은 재해폐기물이 발생함을 알 수 있다. 지진당시 입은 피해로 발생한 폐기물은 표에 나타내었다.

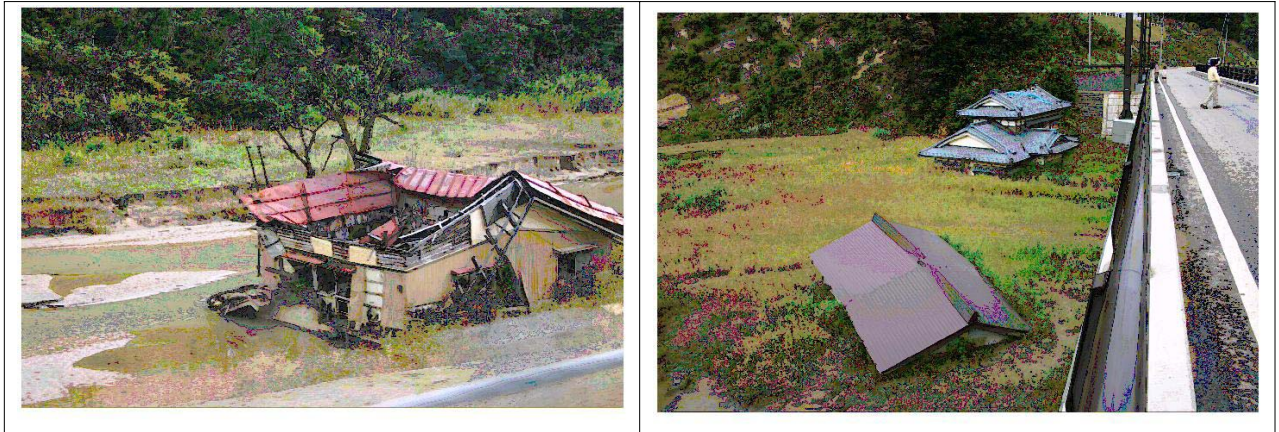


그림 8. Houses damaged by 2004년 Niigata Chuetsu 지진으로 피해를 입은 가옥사진(Komine, 208)

표 5 2004년 Niigata Chuetsu 지진으로 인한 피해사례(Komine, 2008)

사망자	65
부상자	4795
가옥의 완전 파손	3175
가옥의 부분적 파손	2165
인프라시설물 파손	40343

그림 9는 일본에서 재해폐기물 활용의 좋은 예를 보여준다. 2004년 Niigata Chuetsu 지진으로 인한 재해폐기물로 만든 사방댐 (debris barrier)을 축조하였고 이는 재해 사후관리의 적응 (adaptation)과 대응책 (countermeasures)의 좋은 예라고 하겠다.



그림 9. 2004년 Niigata Chuetsu 지진시 폐기물로 만든 사방댐(Komine, 2008)

국내에서는 국무총리실 산하에 기후변화 대책기획단을 두고 기후변화 대응 종합기본계획을 수립 중에 있으며, 각 부처는 부처간 협력을 강화하고 온실가스 감축방안 강구, 적응대책 수립 등 기후변화에 대응하기 위해 심혈을 기울이고 있다. 구체적으로, 기후변화 대응을 위한 주요 3개 분야 (기후변화과학, 기후변화영향·적응·취약성, 기후변화완화)를 중심으로 정부차원의 기후변화대응 종합기본계획을 수립 중에 있으며, 이를 시행하기위한 구체적 방법으로 기후변화 대책기본법이 입법예고 중에 있다.

소방방재청은 지난 2008년 6월 ‘기후변화대응과’를 신설하여 정부차원의 기후변화 대응에 발맞추어 기후변화로 빈발, 대규모가 예상되는 자연재난에 대한 대책을 수립 중에 있다.

해수면 상승에 대한 영향 및 효과적 대응책을 구상하는 경우 관측 및 평가를 통한 현황 파악과 더불어 정확한 예측이 요구된다. 우리나라와 같이 지역적 해수면 상승 예측 기술은 현재 낮은 정확도를 가지고 있어 이에 대한 정확도 향상이 향후 대응을 위하여 필수적으로 요구된다. 해수면 상승은 장기적이고 광범위한 지역이 영향을 받으므로 현 방어시설의 점검 및 계획을 수시로 점검하여 대응할 수 있는 장기적 정비 계획이 요구된다.

4. 결 론

본 논문에서는 지구온난화로 인한 기온 및 해수면 상승이 지반구조물에 미치는 영향을 고찰해 보았다. 해수면 상승이 구조물에 미치는 영향을 사례별로 예시해 보았고 기후변화 관련 대응방안과 국내외 대응전략을 고찰해 보았다. 국내의 경우 기후변화가 지반구조물에 미치는 영향 연구와 이에 대한 대응방안 및 전략이 필요하며 향후 지속적인 연구가 요구된다.

참고문헌

1. 조광우, 맹준호(2007), “우리나라 해수면 상승 대응방향에 관한 소고”, 한국해양환경공학회지, 제10권, 제4호, pp.227~234.
2. 조광우 외(2005), 해안도로의 환경적 문제점과 개선방안, 한국환경정책평가연구원
3. 마산시(2004) “태풍 매미에 의한 해일피해 원인조사 및 재해방지 대책”, 대한토목학회.
4. 부산시(2005) “해일피해영향분석 및 피해방지계획 수립용역보고서
5. IPCC(2001) Climate Change 2001:Synthesis Report, Cambridge Univ. Press.
6. IPCC WG I(2001) Climate Change 2001:The Scientific Basis., Cambridge Univ. Press.
7. IPCC WG II(2001) Climate Change 2001:Impact, Adaptation, and Vulnerability., Cambridge Univ. Press.
8. Japan Meteorological Agency(2006) *Watch report of climate change*, p.33.
9. Yasuhara, K., Murakami, S., Mimura, N., Komine, H., and Recio, J.(2007) “Influence of global warming on coastal infrastructural insability”, Sustainable Science, Vol. 2, No. 1, pp.13~25.
10. Yasuhara and Adachi(1994) “Influences of sea level rise due to global warming on earth structures and foundations”, Jpn Geotechn Soc, 42-9(437), pp.51~54.
11. Cho, K.(2003) “Sea-level Trend at the Korea Coast, Korean Environmental Sciences Society”, 11(11), pp.1141~1147.
12. IPCC(1994) “Preparing to Meet the Coastal Challenges of the 21st Century”, Conference Report, World Coast Conference 1993.
13. Brown, L. R.(2001) “Rising Sea Level Forcing Evacuation of Island Country, Eco-Economy Update, Earth Policy Institute.
14. Kitajima, S., T. Ito, N. Miura, Y. Tsutsui and K. Izumi(1993) “Vulnerability Assessment to Sea-Level Rise and Coastal Management”, Proceedings of the IPCC Eastern Hemisphere Workshop, pp.115~123.
15. Komine, Hideo(2007) “Vulnerability of riverbank materials by sea-level rising due to Global Warming in Japan”, Second Malaysia-Japan Symposiu on Geohazards and Geoenvironmental Engineering.

16. Kusakabe, O. and Kawai N.(1989) "Reduction in bearing capacity and increase in settlement of a footing due to upward seepage flow", J. of Japan Geotechnical Society, Vol.37, No.6, pp.57~62.
17. Murakami S, Yasuhara K, Suzuki N, Ni Wei, Komine H(2005) "Vulnerability assessment to liquefaction hazard induced by rising sea-levels due to global warming", Proc. Int'n Conf. on Geotech. Eng for Disaster Mitigation, Vol.1, pp.571~576.
18. Yasuhara K, Murakami S, Mitsuyama S(2003) "Instability of foundations undergoing rise in groundwater level", Proc. Int'n symposium on groundwater problems related to geo-environmental, Vol. 1, pp.205~210.
19. Barth, M. C. and J. G. Titus(1984) A Challenge for this Generation. New York: Van Nustrov Reinhold; Dean, R. G. et al., 1987. Responding to Changes in Sea Level. National Academy Press, Washington, D. C.
20. Hideo Komine(2008) "Adaptations and Countermeasures for Mitigating Impacts due to Global Warming in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering" 2nd Vietnam-Japan Symposium on Mitigation & Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters.