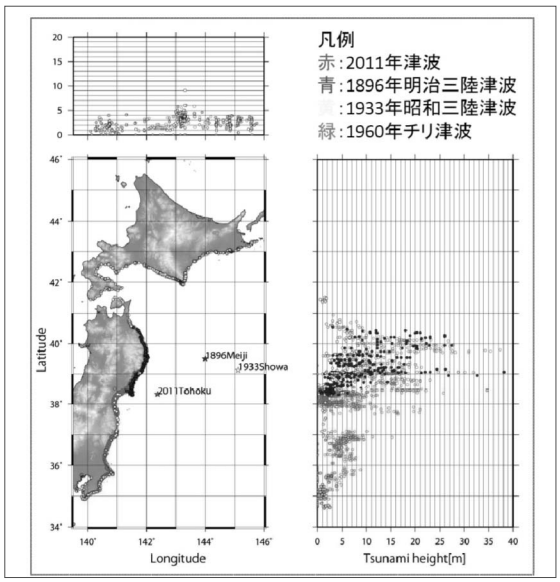
일본 토호쿠지방 태평양 쓰나미에 의한 피해와 Mechanism

아리카와 타로
독립행정법인 항만공항기술연구소
arikawa@pari.go.jp

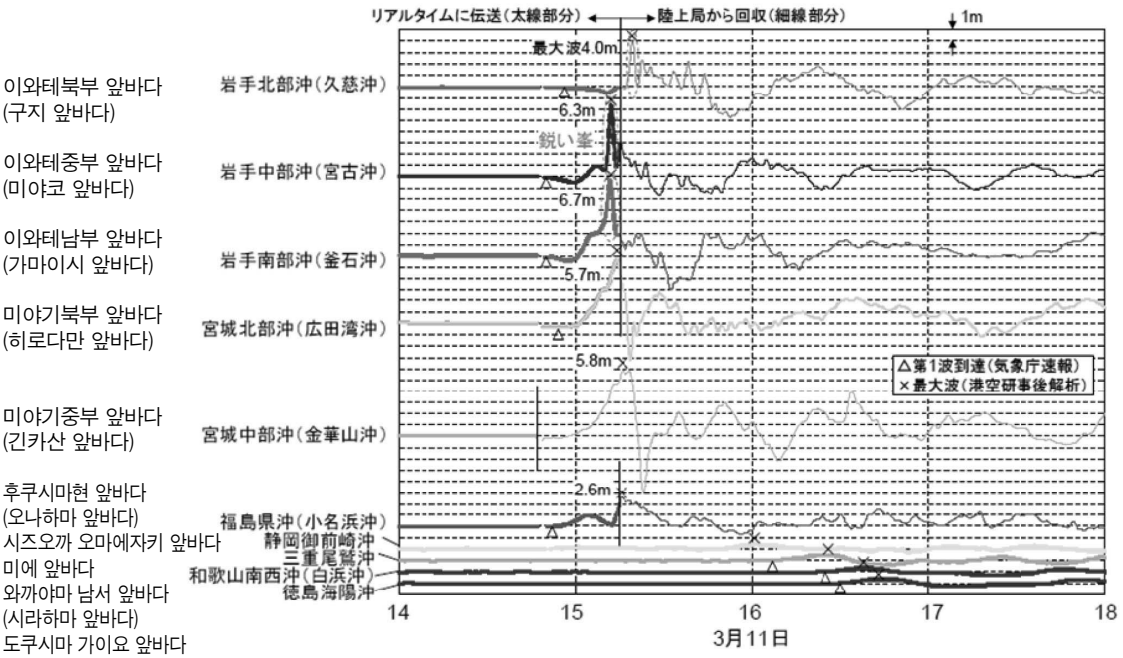
1. 쓰나미의 크기

2011년 3월 11일 14시46분에 발생한 대규모 지진에 의한 거대한 쓰나미가 일본 태평양 연안부를 강타하여 많은 인명과 막대한 재산 피해를 입혔다.

관측된 쓰나미의 높이는 〈그림 1〉과 같다. 홋카이도 지방에서의 쓰나미 높이는 그림 위쪽에, 그 외 지방에서의 쓰나미 높이는 오른쪽에 빨간색으로 나타나 있으며, 이번에 발생한 쓰나미 높이는 큰 것은 30m를 초과하였음을 알 수 있다. 그림을 자세히 보면, 이와테현에서의 쓰나미는 메이지산리쿠 쓰나미의 경우보다 평균적으로 큰 규모이고, 미야기현 남측에서는 이들과 비교할 수 없을 만큼 더욱 더 거대한 쓰나미가 내습한 것을 알 수 있다. 미야기현 남측에서는 과거 "서기 869년 정관지진" 쓰나미와 동등한 규모라고 할 수 있다.



〈그림 1〉 동북지방 태평양 앞바다 지진에 의한 쓰나미 높이와 과거에 발생한 쓰나미 높이의 비교
빨간색 : 2011년 쓰나미, 파란색 : 1896년 메이지산리쿠 쓰나미, 노란색 : 1933년 쇼와산리쿠 쓰나미, 초록색 : 1960년 칠레지진에 의한 쓰나미



〈그림 2〉 외해에 설치된 GPS 파랑계에 의해 계측된 쓰나미 파형

2. 쓰나미의 Mechanism

2.1 바다에서의 쓰나미

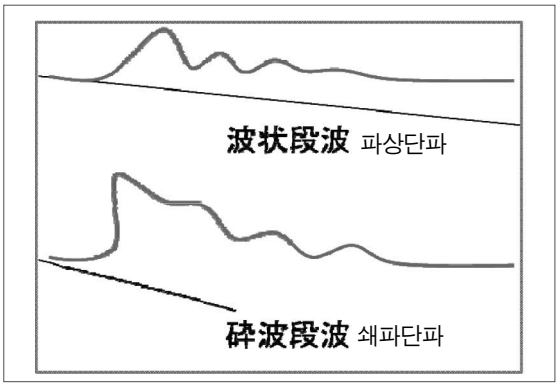
〈그림 2〉 는 각 지역 앞바다에 설치된 GPS 파랑계에 의해 관측된 쓰나미의 파형이다. 이와테(岩手)현에서부터 미야기(宮城)현에 걸친 광범위한 지역에서 6m 전후의 높은 쓰나미가 발생하여 이번 쓰나미의 규모가 대단히 컸다는 것을 알 수 있고, 그 중 가마이시(釜石) 지역에 쓰나미가 가장 빠르게 도달함과 동시에 높이도 가장 큰 것을 알 수 있다. 이에 비해 좀 더 남측 지역인 후쿠시마(福島)에서부터 와까야마(和歌山) 지역의 최대파는 북측 지역에 비해 그 높이가 낮고 도달시간도 늦음을 알 수 있다.

2.2 육지에 도달한 후의 쓰나미

〈그림 1〉과 같이 각 지역 앞바다에서 6m 전후에 이르는 쓰나미는 육지쪽으로 이동하면서 파고가 더욱 높아졌다. 그 당시 상황에 대한 사진 및 촬영 자료는 많이 확보되어 있다.

그 중에서도 매우 특징적인 것은, "단파"라는 형태의 쓰나미가 각 지역에서 관측되었다는 것이다. 〈그림 3〉은 단파의 종류를 나타낸 것이며, 센다이 평야 해안가의 사빈해안 등지에서 나타나는 '파상단파' 또는 거대한 쓰나미가 쇄파 형태로 된 '쇄파단파'가 각 지역에서 나타났다. 특히, '쇄파단파'는 진행해 오는 파가 부서지면서 그 위력이 증대되고, 천천히 육지쪽으로 이동하여 올라 오면서 막강한

위력을 연안부에 작용하게 된다. 이 때문에 매우 강고한 구조물이나 방호시설이 파괴되기도 한다.



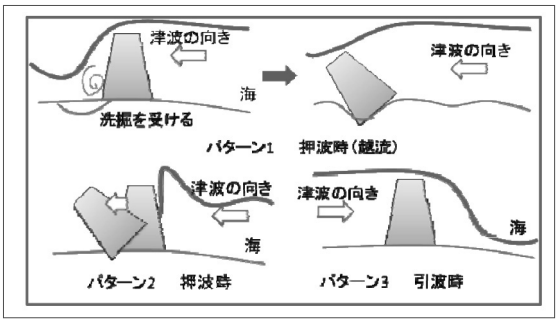
〈그림 3〉 단파의 종류

3. 구조물의 피해

3.1 방호시설의 피해

이번 쯔나미는 방조제, 방파제 등의 많은 방호시설에 피해를 입혔다. 〈사진 1〉은 이와테현 미야코시 다로에서의 쯔나미로 인한 방조제 피해 상황을 나타낸 것으로, 방조제가 외해방향으로 전도되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 방조제가 높게 밀려오는 쯔나미 파에는 견뎠지만, 내륙 안쪽에 해수가 남게

〈사진 1〉 다로의 방조제 (우측 바다에서 4월15일 촬영)



〈그림 4〉 방조제의 피해 Pattern

되고 그 후 해수가 외해쪽으로 빠져나갈 때 방조제가 외해 방향으로 전도된 것으로 추측할 수 있다.

이처럼 수많은 방파제, 방조제가 쯔나미에 의해 파괴되었는데, 대다수가 외해쪽으로 빠져나가는 해수의 압력에 견디지 못하고 전도된 것이다. 〈그림 4〉는 방조제 피해 상황의 주요 Pattern을 나타낸 것이다. Pattern 1과 2는 밀려오는 쯔나미 파에 의한 것으로, 특히 Pattern 1은 쯔나미가 구조물을 월류할 때 육지측의 지반이 세굴되어 안정성을 잃고 전도하는 것을 나타낸다. 한편 Pattern 3은 외해쪽으로 빠져나가는 파에 의해 발생하는 것이다.

〈사진 2〉는 이와테현 오쓰치초 방조제의 피해상황을 나타낸 것인데, 이것은 Pattern 1과 2가 복합적

〈사진 2〉 오쓰치초 방조제의 피해
(좌측 바다에서 4월 8일 촬영)

〈사진 3〉 가마이시만 입구 쓰나미방파제의 파괴된 모습 (2011년 6월20일 촬영)

으로 작용하여 방조제가 전도된 것으로 추측된다.

〈사진 3〉은 가마이시만 입구 쓰나미방파제가 쓰나미에 의해 파괴된 모습이다. 수심이 가장 깊은 곳은 63m 정도이며, 전도된 방파제의 무게는 수만톤에 이른다. 가마이시의 경우처럼, 만 내 안쪽의 수역이 넓은 경우에는 만 입구부가 닫혀져 있는 폐쇄성 때문에 만 내로 진입하는 쓰나미가 억제되며, 해안선 방조제를 따라 육지역으로 진입하는 쓰나미를 감소시킬 수 있는 면적인 방호시스템이 유효하게 된다. 그러나 〈사진 3〉과 같이 방조제가 이미 파괴된 경우에는 방호효과가 크게 감소한다. 다만 〈사진 3〉에서는 방조제가 완전히 파괴되지 않았기 때문에 쓰나미의 육지역 진입을 막는데 있어 다소 역할을 하였을 것으로 판단된다. 이와 같이 방호시설에 피해가 발생하면 배후지역의 피해 경감효과가 적어지므로, 앞으로는 예상 밖의 큰 쓰나미에도 그 기능을 충분히 발휘할 수 있는 구조물로 방호시설을 바꾸어 나갈 필요가 있다.

3.2 배후 지역의 건물 피해

이번 쓰나미에는 가옥피해는 물론 콘크리트 구조물에 대한 피해도 많이 발생하였다. 〈표 1〉은 슈토(1992)가 제안한 쓰나미 높이와 피해의 관계를 나타낸 것이다. 표에 의하면, 목조가옥은 쓰나미 높이 2m 정도부터 피해가 막심한 것을 알 수 있다. 한편, 콘크리트 구조물에 대해서는 5m에서 16m까지 빈칸으로 되어 있는데, 이는 지금까지 이러한 사례가 많지 않았다는 것을 나타낸다.

〈표 1〉 쓰나미에 의한 피해형태 (슈토, 1992)

쓰나미파고(m)	1	2	4	8	16	32
쓰나미형태 완경사면 급경사면	해안에서 위로 점점 올라감 빠른 조석	앞바다에서도 물기둥, 제2파 쇄파 빠른 조석	형태는 좌측과 동일하나, 선두쇄파가 증가	어떠한 장소라도 조석과 비슷한 상하운동을 나타내지 않고, 제1파 권파형 쇄파		
목조가옥	부분파괴	전체파괴 (2m~)				
석조가옥	견딘다			전면파괴 (7m~)		
철골,철콘 건물	견딘다 (~5m)				전면파괴	
어선		피해발생	피해율 50%	피해율 100%		
방조림	피해경감, 표류물 저지, 쓰나미 피해 경감		부분적 피해, 표류물 저지	전면적피해, 효과없음		
양식장	피해발생					
연안 집락		피해발생	피해율 50%	피해율 100%		

〈사진 4〉 미야기현 나토리시 주변 (2011년 3월18일 촬영)

〈사진 5〉 미야기현 나토리시 주변 (2011년 3월 18일 촬영)

〈사진 6〉 이와테현 리꾸젠다카다시에 있는 철골구조물 (2011년 4월 6일 촬영)

〈사진 7〉 이와테현 오쓰치초 철골 건물피해 (2011년 4월8일 촬영)

(1) 목조가옥

쓰나미가 육지역으로 밀려 들어오면 대부분의 목조가옥은 부력에 의해 떠내려간다. 〈사진 4〉는 미야기현 나토리시 주변의 모습이다. 쓰나미의 침수심(지반에서 쓰나미의 높이로 정의)이 약 2m 정도로 아직 남아 있는 가옥도 있지만 대부분이 휩쓸려 나간 것을 알 수 있다. 〈사진 5〉와 같이 떠내려가지 않고 남아있는 가옥도 쓰나미의 큰 충격으로 인해 거의 제 모습을 알아 볼 수 없을 정도로 파괴되었다.

(2) 철골, 철근콘크리트 구조물

철골 건물의 경우, 구조물의 벽면이 기둥에 비하여 상대적으로 약하기 때문에 쓰나미에 의해 벽면이 파괴된 채로 건물이 남아있는 경우가 많다. 〈사진 6〉은 이와테현 리쿠젠다카다시에 있는 3층 철골구조 건물로, 3층의 천장까지 쓰나미의 힘이 미쳤음에도 불구하고 무너지지 않고 벽면만 상당히 많이 떨어져 나간 상태로 있다. 한편, 〈사진 7〉과 같이 벽면에 큰 힘이 작용하여 건물의 기둥이 거의 모두 같

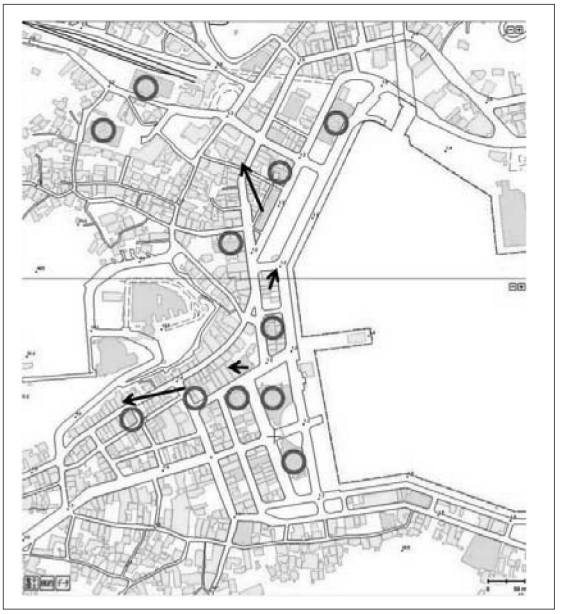
〈사진 8〉 2층 및 3층 철근콘크리트 건물의 피해 (2011년 3월27일 촬영)

〈사진 9〉 콘크리트 벽면의 피해 (2011년 4월9일 촬영)

은 방향으로 꺾여 파괴된 사례도 있다. 이는 면적이 작은 기둥에 대해서는 쯔나미의 힘이 크게 작용하지 않지만 상부에 큰 벽이 있는 경우에는 이렇게 꺾여 파괴될 가능성이 있다는 것을 보여 주는 것이다.

콘크리트 구조물의 경우, 침수심이 10m를 넘는 곳에서는 벽면이 부서지기도 하고 건물이 흘러 떠내려가기도 한다. 미야기현 오나가와초에서는 많은 철골 및 콘크리트 건물이 피해를 입었다.

〈사진 8〉은 안벽 근처에 있던 것으로 보이는 3층 아파트가 떠내려 와 있는 모습과 오른쪽 옆 2층 건



〈그림 5〉 오나가와 어항 부근 3층 이상 건물 피해

물의 파출소가 옆으로 전도되어 있는 것을 보여주고 있다. 오나가와초에서는 침수심이 약 18m에 이르렀는데 건물들이 모두 완전히 수몰되고 떠내려간 것을 알 수 있다. 〈사진 9〉는 15cm 두께의 철근콘크리트 벽이 파괴되어 있는 모습으로 쯔나미의 위력을 알 수 있게 해주는 사진이다.

〈그림 5〉는 오나가와 어항 주변의 3층 이상 건물이 피해를 입은 상황을 나타내는 것으로, 동그라미는 3층 이상 건물을 나타내고 화살표는 쯔나미에 의해 건물이 떠내려간 방향을 나타낸다. 대부분의 많은 건물들이 가옥들과 비슷한 양상으로 부력에 의해 떠내려간 것으로 추측된다. 그러므로 대피용 빌딩을 지정할 때는 이러한 요인을 충분히 고려해야 할 필요가 있다.

3.3 표류물에 의한 피해

쯔나미에 의한 피해 중에서도 눈에 띄는 것은 표류물에 의한 것으로, 선박, 자동차, 가옥, 기와 등 수

〈사진 10〉 육상에 표류된 선박 (2011년 3월 28일)

〈사진 11〉 표류선박에 의해 파괴된 것으로 추정되는 철골구조건물 (2011년 3월28일)

많은 표류물이 떠내려 갈 때 이러한 것들에 의해 발생하는 피해의 확산이다.

〈사진 10〉은 미야기현 기센누마시 해안에서 약 600m 안쪽 내륙으로 떠밀려 올라온 선박이다. 표류된 선박들은 도로에 접해있는 건물들을 파괴하였고, 〈사진 11〉은 그 당시 표류선박에 의해 파괴된 것으로 보이는 철골구조 건물이다.

자동차의 표류도 많이 발생하는데 이것들은 전신주를 쓰러뜨리기도 하고, Oil tank 등도 표류하여 피해를 확산시키기도 한다. 또한, 자동차, 선박, Oil tank 등의 인화물질에 의해 화재가 발생할 수 있으므로 충분한 주의를 기울여야 한다.

4. 대피에 있어서

마지막으로는 대피에 관한 것이다. 이번 쯔나미에 있어 대피가 늦어진 원인으로는 정전 때문에 경보가 제대로 작동을 하지 않은 것, 방호시설 설치에 따른 안도감, 지정된 대피장소에 예상외로 큰 쯔나미가 내습한 점, 칠레지진 쯔나미나 다른 지진 경험에서 느껴진 방심, 자동차로도 탈출할 수 없었던 점 등 여러가지 요인이 복합적으로 이루어져 있는 것으로 보인다. 또한, 고령자나 10살 미만의 어린이들이 많이 희생되었는데, 대피 행동에 뒤쳐지는 사람들에 대한 배려도 필요하고, 앞으로 피난계획에 있어 반영해야 할 필요가 있다.

5. 결론

이번 토호쿠지방 태평양 지진은 여러 지역에 거대한 쯔나미를 발생시켰고 사상 유례가 드문 막대한 피해를 입혔다. 쯔나미가 단순히 컸다는 것 외에, 단파형태의 강력한 힘을 발휘하는 쯔나미가 여러 지역의 연안부에 내습한 것이 이번 피해가 크게 확산된 요인의 하나로 생각된다. 앞으로는 이런 거대한 쯔나미가 콘크리트 구조물도 쉽게 파괴할 수 있는 힘을 가지고 있다는 것을 고려하여 방호시설을 계획하고 설계하며, 대피에 있어서도 더욱 안전하고 민첩하게 대피할 수 있는 체계를 수립하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 東北地方太平洋沖地震津波合同調査 Group
(http://www.coastal.jp/ttjt/)
2. http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/seika/h21seika/pdf/namegaya.pdf
3. http://www.pari.go.jp/files/3651/303113448.pdf
4. 首藤伸夫(1992) : 津波強度と被害, 津波工学研究報告, 第9号, 東北大学工学部

저자 약력

- 1995 : University of Tokyo (BS)
- 2000 : University of Tokyo (Ph.D)
- 2000 : Port and Harbor Research Institute of Ministry of Transport
- 2001 : Port and Airport Research Institute, Independent Administrative Institution
- 2003 : Senior researcher of Marine Environment and Engineering Department
- 2005 : Project researcher of Tsunami Research Center, concurrent post
- 2007 : Senior researcher of Tsunami Research Center, concurrent post
- 2007 : Visiting associate professor of Yokohama National University, concurrent post
- 2011 : Research Director of Coastal and Ocean Engineering Field of PARI