

해일 피해와 피난행태의 거시적 분석: 일본 도호쿠지역 3.11 대지진 사례분석

Macroscopic Analysis on Tsunami Damages and Evacuation Behaviors:
The 3.11 Earthquake in Tohoku, Japan



이준



박내선

1. 서론

지난 2011년, 3월11일 낮 2시 46분, 일본 동쪽 해저 20km 부근에서 강도 9.0의 강력한 지진이 발생하였다. 이번 재난피해의 특징은 그 규모와 강도가 매우 컸으며, 지진으로 인한 직접피해보다는 2차 (해일) 및 3차 피해 (방사능 피해, 전력난 등)가 컸다는 점이다. 진원지는 내륙이 아닌 태평양 해저로 내륙지역의 강도는 7.0 이하였다. 1995년 발생한 고베지진(강도 7.2, 사망자 6,300여명) 후 건축물과 사회기반시설의 내진설계기준이 강화되어, 지진에 의한 직접 피해는 적었다. 그러나 30분후, 최대높이 약 40m, 내륙 14km까지 내습한 해일은 2만 여명의 희생자와 30만 명의 이재민을 발생시키며 일본 동해안의 약 600km에 걸쳐 광범위한 피해를 발생시켰다. 일본에서 연간 300-500회

발생하는 지진과 달리 해일은 주기가 불규칙하고 상당히 다른 양상으로 발생하기 때문에, 예측과 대비가 힘든 자연재해이다. 따라서 3.11과 같이 거대규모의 재난이 발생할 경우의 신속하고 효율적인 대피는 인명피해를 줄일 수 있는 가장 효과적인 수단이 된다. 우리나라에서는 지진과 해일의 발생 빈도와 강도가 낮은 편이지만, 특히 해일의 경우 일본을 거쳐 2차 피해를 입을 가능성이 최근 조심스럽게 예견되고 있다.

본 연구에서는 지난 재난에서 조사된 피난자 행태를 분석하여, 그 특성과 시사점을 제시하였다. 이번 지진 이후 일본국토교통성(国土交通省)에서는 각 지역의 피난소와 임시거주에 생활하는 피난민을 대상으로 대규모 설문조사(復興支援調査アンケート, 2012)를 실시하였다. 약 60여개의 피해 지역에서 시(市)단위로 총 10,601명(3만 통행)

이 준 : 동경대학 사회기반학과, paradani1@gmail.com

박내선 : 한국해양과학기술원 국제협력실, naesun@kiost.ac, Phone: 031-400-7750, Fax: 031-406-6925

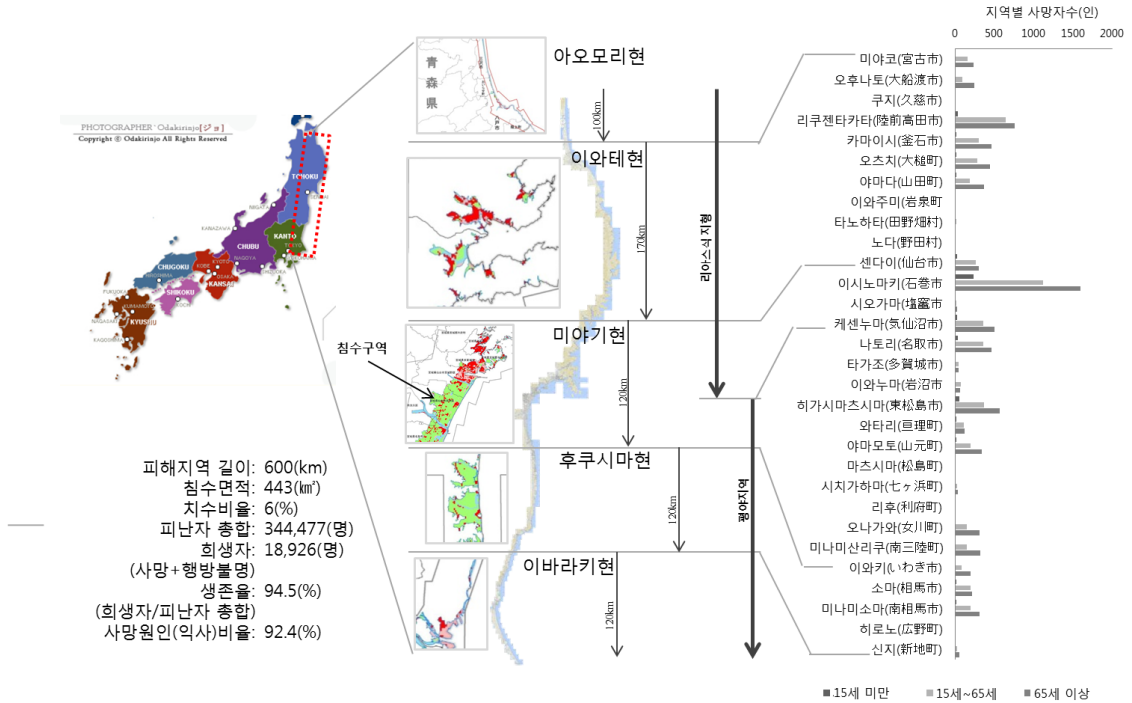


그림 1. 일본동북지방의 지형 및 연령대별 희생자 수

자료: Geospatial Information Authority of Japan, Statistics Bureau Director, 復興支援調査アーカイブ(N=10,601), Metropolitan Police Department, Digital Japan Portal Web Site

에게 다양한 피난행태에 관한 설문을 하였으며, 본 연구에서는 이 자료를 바탕으로 피난수단, 피난거리, 피난속도를 중심으로 분석하였다.

II. 일본의 지형과 피해현황

이번 해일은 일본 동해안의 약 600km에 걸쳐 발생하였으며, 총 443km²가 해일에 의해 침수되었다(서울 면적 대비 73%). 총 피난 인원은 344,477명으로 집계되었으며(해일의 영향권에 있는 강원도 인구의 24%), 현재까지 18,926명이 사망 또는 행방불명 상태이다. 과거 지진재난에서는 화재와 건물붕괴에 의한 희생자가 전체의 90% 이상을 차지했지만, 이번 지진재난에서는 92.4%가 해일로 인해 익사하였다.¹⁾ 1·2차 피해는 아오

모리현(青森縣), 이와테현(岩手縣), 미야기현(宮城縣), 후쿠시마현(福島縣), 이바라키현(茨城縣)에서 발생하였으며, 이를 일본의 도호쿠(東北) 지역으로 부른다. 이와테현과 미야기현 일부는 우리나라 서·남해안과 같은 리아스식 해안으로, 복잡한 침식지형이며, 이바라키현, 후쿠시마현, 그리고 센다이시(仙台市)가 있는 미야기현의 일부는 넓은 평야지대이다. 이와 같은 지형의 차이는 해일의 침수지역과 연관이 있는데, 리아스식 해안지역에서는 강가주변과 산으로 고립된 작은 마을에서 건물이 완파되는 심각한 피해를 입었다. 그로 인하여 오나가와(女川町)와, 오츠치(大槌町)²⁾의 경우 주민의 약 9%가 사망 또는 행방불명되었다. 한편, 평야지대에서는 해일이 최대 14km까지 내륙으로 유입되면서, 넓은 지역에 광범위한 피해를 발생시

1) 도쿄전력에서는 원자력발전소 폭발이 “지진 때문이 아닌 해일 때문이다”라고 발표하였으나, 해일을 지진으로 인한 2차발생재난으로 간주한다.

2) 정(町:일본어로 초)은 마을을 나타내는 행정구역 단위로 우리나라의 읍에 해당한다.

표 1. 지역별 자동차 이용률과 사망률 (자료: 復興支援調査アーカイブ, N=9,698)

지역	자동차 이용률%	사망률 ³⁾ %	지역	자동차 이용률%	사망률%
야마모토(山元町)	94	3.41	리쿠젠타카타(陸前高田市)	63	6.21
리후(利府町)	90	0.02	타노하타(田野畑村)	61	0.62
이와즈미(岩泉町)	90	0.08	미나미산리쿠(南三陸町)	58	2.94
히로노(廣野町)	89	0.04	케센누마(氣仙沼市)	58	1.25
신지(新地町)	86	1.00	야마다(山田町)	57	3.13
이와누마(岩沼市)	86	0.33	오즈치(大槌町)	57	4.91
와타리(亘理町)	81	0.73	타가조(多賀城市)	54	0.17
미나미소마(南相馬市)	78	0.75	오나가와(女川町)	52	4.81
소마(相馬市)	78	1.15	이시노마키(石巻市)	52	1.91
이와키(いわき市)	75	0.09	시오가마(塩竈市)	52	0.08
센다이(仙台市)	74	0.18	미야코(宮古市)	49	0.69
나토리(名取市)	70	1.19	마츠시마(松島町)	41	0.09
오후나토(大船渡市)	69	0.84	카마이시(釜石市)	39	1.99
노다(野田村)	64	0.58	평균	67	1.33
시치가하마(七ヶ浜町)	64	0.32			

켰다. 대부분 농경지였지만, 센다이와 같이 인구 밀집지역도 포함되었으며, 특히 후쿠시마원자력발전소와 해안가의 하수처리장과 같은 주요 기반시설들의 파괴로 피해는 더욱 장기화, 광역화되었다.

III. 피난 거리·수단

해일은 지진발생 후 지역별로 30분에서 1시간 40분 사이에 도달하였다. 지진발생 후 20분 내에 80%의 주민이 피난을 시작하였는데, 이는 해일 경보가 발령되고, 각종 매체가 이를 신속하게 주민에게 전달하였기 때문이다.

우선 각 수단별 이동거리를 살펴보면, 걸어서 피난한 사람들의 80%가 630m 미만의 거리를 대피하였고, 차량을 이용한 피난의 80%는 3.25km 이내의 거리로 평상시의 경우 대략 10분정도에 움직일 수 있는 거리였다(그림 2). 이를 조금 더 구체적으로 살펴보면, 리아스식 해안에서의 평균이동거리가 차량은 2.6km, 보행은 598m인 반면에, 평지에서는 차량 1.6km, 보행 324m로 리아스식 해안에서의 피난거리가 60% 이상 더 멀다.

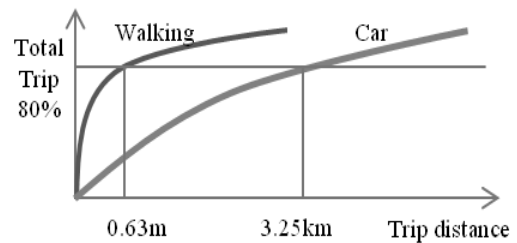


그림 2. 피난거리

(자료: 復興支援調査アーカイブ, N=7,810)

이는 리아스식 해안에 위치한 마을들은 지형적으로 넓은 면적이 아닌 산과 강에 둘러싸인 형태로 인구밀도가 낮아서 피난소까지의 거리가 더 멀었기 때문으로 추정된다. 그리고 평야지역에서는 차량 이용자보다 자전거 이용자의 피난거리가 오히려 먼데, 이는 자전거가 차량에 비해 정체에 영향을 덜 받으므로 평지에서 거리상으로 유리함을 보여준다(그림 3).

일반적으로 차량을 이용한 피난이 금지되어 있음에도 불구하고, 표 1에서 보는 바와 같이 자동차를 이용한 피난율은 평균 67%에 달했다. 특히 평야지역인 야마모토에서는 리아스식 해안보다 피난

3) 사망률=(사망자+행방불명자)/인구

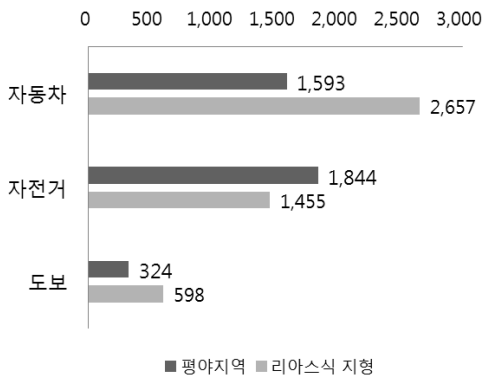


그림 3. 피난수단별 평균 피난거리
(자료: 復興支援調査アーカイブ, N=7,810)

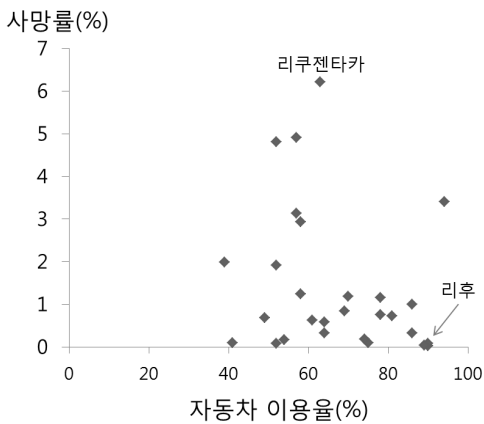


그림 4. 자동차 이용율과 사망률

소의 거리가 가깝지만, 94%나 되는 사람들이 차량으로 피난하였다. 일반적으로, 차량을 이용한 피난이 사망률을 높일 것이라는 우려와는 달리, 차량을 이용한 피난과 사망률 간의 상관관계는 지역별 편차가 커서, 이는 지형과 밀접한 영향이 있는 것으로 추측된다. 가장 많은 인명피해를 입은 오나가와와 오츠치의 자동차 이용율은 57%, 52%인 반면, 리후처럼 자동차 이용 피난율이 90%나 되나 사망률은 0에 가까운 지역도 있었다(그림 4).

규칙을 잘 지키기로 유명한 일본인들이 규정을 어겨가면서까지 자동차를 이용하여 피난한 이유는 무엇이었을까? 이번 설문에서 60%에 가까운 이들이 그 이유를 가족과 함께 피난하기 위해서라고

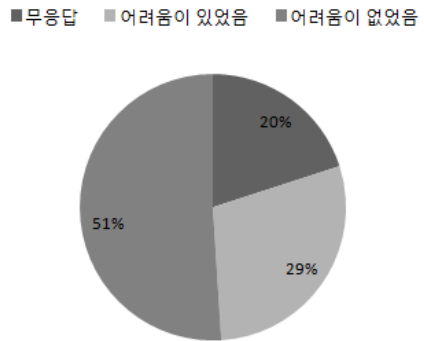


그림 5. 자동차 이용 피난 시 문제점
(자료: 復興支援調査アーカイブ, N=5,201)

답하였다(그림 7). 고통의 부모나 어린 아이들과 함께 피난을 한다면 자동차를 선택할 가능성이 높아지는 것이다. 그렇다면, 자동차를 이용한 피난은 예상대로 비효율적이었을까? 실제로 차량을 이용하여 피난을 하였던 사람들 중 절반은 피난에 문제가 없었다고 했으며 30%만이 어려움을 겪었다고 응답했다(그림 5). 예상대로, 차량 이용 시 문제발생의 가장 주요한 원인은 교통정체였으며(12%), 그 다음으로는 신호등 고장을 꼽았다. 지진 발생 후 대규모 정전사태가 발생하였기 때문에 신호등이 마비된 곳이 많았다.

지금껏 차량이용은 피난 수단으로써 일괄적으로 억제되었지만 인구과소지역에서의 실제 이용률 및 그 대피율을 고려해볼 때 이에 대한 계획을 재고해볼 필요가 있다. 차량의 효율적인 이용으로 안전한 대피율과 구명율을 높일 수도 있기 때문이다.

IV. 피난 속도·장소

피난속도의 경우도 리아스식 해안과 평야지대로 구분할 수 있는데, 그림 6과 같이 차량은 약 9km/h의 속도로 약 15분이 걸려 피난소에 도착하였고, 보행의 경우는 2.56km/h에 약 10분이 걸린 것으로 조사되었다. 도보속도는 낮지만, 가까운 곳의 피난소를 찾아야하고, 자동차는 상대적으로 높은 속도이지만, 시설규모가 큰 원거리의 피난소를 이용해야 하기 때문에 피난시간이 길어지는

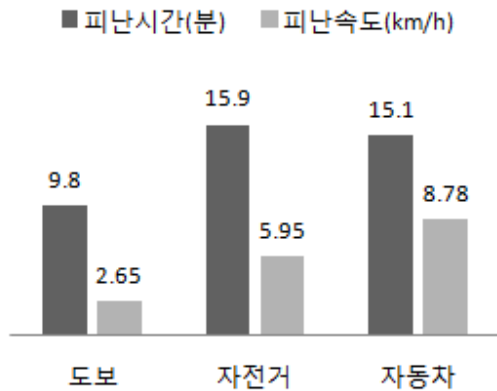


그림 6. 수단별 피난시간·속도
(자료: 復興支援調査アーカイブ, N=7,810)

것을 볼 수 있다. 하지만 차량의 평균속도는 평소에 비해서 매우 낮았고, 각 지역별 편차가 컸다.

인구과소지역과는 달리, 대도시에서는 차량사용의 증가로 인한 즉각적인 교통체증이 나타나는 경우가 많았고, 교외지역에서는 대피소까지의 거리가 멀고, 이용가능한 도로가 많지 않아서 정체가 발생하였다.

차량을 이용한 대피 시 주의할 점은 대피 중 정체 등으로 차량을 버릴 경우, 교통을 심각하게 마비시켜 매우 위험한 상황이 될 수 있다는 점을 인지하는 것이다. 자동차를 이용한 피난을 진행하다가 갑자기 정체시점에 차량을 그대로 버릴 경우 후

속차량들의 통행에 방해가 되기 때문에 차량을 이용해서 피난을 시작한 경우 해일위험지역에서 정체현상이 발생한다면, 매우 위험한 상황이 발생할 수 있다. 그러므로 피난수단으로 차량을 선택해야 한다면, 피난자 입장에서는 최단거리 뿐만 아니라 안전한 도로인지, 정체시 우회할 수 있는 길인지를 고려해야 한다. 정책 입안자 입장에서는 이러한 상황이 발생할 것을 대비한 우회로 확보 등의 대책마련이 매우 중요하다.

실제로, 차량을 이용하는 피난자는 심각한 정체를 겪더라도 차량을 쉽게 버리지는 못할 것 같다. 피난수단으로 차량을 선택한 이들은 그 이유로 “가족과 같이 피난하기 위하여 (58%)”, “피난 거리가 멀어서 (50%)”, “차량도 자신의 재산의 일부이기 때문에(18%)”, “걸을 수 없는 사람이 있어서 (14%)”라고 응답하여, 도중에 쉽게 차량을 포기할 수 없는 상황임을 알 수 있다(그림 7).

피난 장소 그림 8에 대하여 살펴보면, 리아스식 해안 지역에서는 지정피난소가 비교적 멀고, 고립되어 있으므로 피난자가 판단하는 안전한 지역의 건물옥상에 피난한 이들이 많았다(31.2%), 반면에 평지지역에서는 주변에 있는 학교(4)를 선택한 이들이 많았다(29%). 이는 지형에 영향을 덜 받아서 비교적 균일한 거리에 학교가 위치해 있기 때문으로 판단된다.

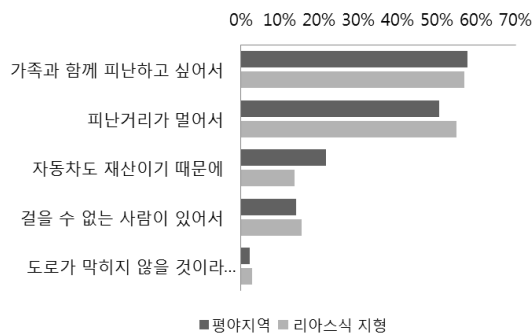


그림 7. 피난수단으로 자동차를 선택한 이유
(복수응답)(자료: 復興支援調査アーカイブ, N=5,201)

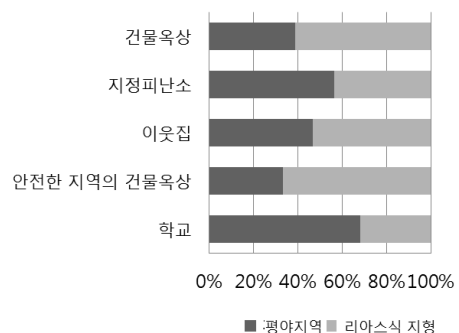


그림 8. 선택한 피난장소
(복수응답: 復興支援調査アーカイ브, N=7,810)

4) 일본에서는 많은 초·중·고·대학교의 학교시설이 지정피난소로 지정되어 있다. 넓은 공터는 건물붕괴로 인한 피해우려가 적어 안전하게 피할 수 있는 공간을 제공할 뿐만 아니라 교실과 실내체육관 등의 시설은 장기피난소로 활용이 가능하기 때문이다.

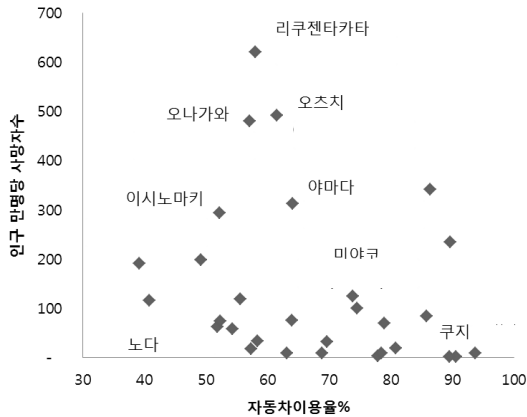


그림 9. 자동차이용률과 인구 만명당 사망자수

V. 시사점

3.11 동일본 대지진을 겪으면서 방재와 재난관리와 관련하여 주목을 받은 단어가 바로 “감재(減災)”이다. 인간이 제어하기 힘든 규모의 자연재해를 막으려는(防) 노력에 비해 적은 비용으로 많은 그리고 즉각적인 효과를 얻을 수 있기 때문이다. 특히 그 중에서도 가장 소중한 인명을 얼마만큼 구할 수 있을 것인가는 대피, 피난과 직결된다. 해일에 대한 피난은 그 규모가 도시단위로 매우 크다는 특징이 있다. 불행 중 다행히 지진과는 달리 해일은 도달시간을 미리 예측할 수 있어, 대피 및 대책 수립시간을 확보할 수 있다.⁵⁾ 따라서 시뮬레이션⁶⁾을 통한 대피장소 및 대피로의 설계와 평상시의 대피훈련으로 대피율을 높일 수 있으며, 개선점과 피난방법에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

3.11 대지진시 발생한 해일에 대한 피난행동의 특징을 정리하면 다음과 같다. 첫째, 보행보다는 차량을 이용한 피난이 많았다(평균 67%가 차량을 이용하여 피난, 표 1). 아직까지 차량이용률과 피해율의 직접적인 상관관계는 밝혀지지 않았다. 그러나, 미국(FEMA: Federal Emergency Management Agency), 일본(MLIT: Ministry of Land

Infrastructure, Transport and Tourism), 한국(NEMA: National Emergency Management Agency) 등 대부분의 나라에서 지금까지 피난의 주요 수단을 보행으로 가정하고 피난로를 설계·계획하여 왔다. 이는 대도시의 상황을 설정한 것으로, 인구과소지역에서는 차량을 이용한 대피가 효율적인 수도 있다는 점이 이번 지진피난분석을 통해 알 수 있었다. 인구밀도가 높지 않은 지역의 경우 1,000인/km² 이내 50%이상의 자동차이용 피난자는 어려움 없이 피난소에 갈 수 있었다. 이는 보행피난의 경우 이동거리에 한계가 있으며 특히 연령대 및 건강상태 등에 따라 그 차이가 발생하므로, 지형, 인구밀도, 교통조건, 피난 거리 및 시간을 포함, 다양한 교통수단을 고려한 피난의 종합대책을 강구할 필요가 있다는 것을 시사한다.

두 번째 특징은 고령자의 피해가 가장 심각하게 발생하였다(그림 1). 실제로 전체 희생자 중에서 68%가 60세 이상의 노인이었다. 이는 과소지역을 포함한 재난에 취약한 지역에서 고령화가 매우 심각하게 진행되고 있는 것과 밀접한 관련이 있는데, 우리나라도 비슷한 문제를 안고 있다. 따라서 피난계획 수립 시 고령자를 배려한 설계가 앞으로 더 중요해질 것이다.

세 번째 특징은, 지형에 따라 해일의 피해양상이 달랐다는 점이다. 평야지역에서는 철근콘크리트구조의 건물들이 완파되는 일은 적었지만, 빠른 시간 내에 넓은 면적이 해일에 휩쓸리는 피해를 입었으므로 도로를 이용한 피난보다는 높은 건물로의 대피가 유용하였다. 반면, 리아스와 같이 침식에 의해 생성되는 지형은 주변에 높은 지형이 많아 상대적으로 대피가 수월하였지만, 강을 따라 거슬러 올라간 해일이 내륙 깊숙한 곳까지 피해를 주어, 강주변지역이 예상치 못한 큰 피해를 입었다.⁷⁾ 따라서, 지형에 따른 피난수단과 피난장소, 피난경로의 설계가 필요하다.

5) 해일도달시간예측의 오류는 큰 피해로 이어지기도 한다. 3.11의 경우도 이 해일도달시간을 잘못 예측하는 바람에 피해가 더 커졌다는 평가다. (예측시간: 2시간, 실제 도달시간: 30분)

6) 지진의 발생위치와 달리 해일의 발생위치는 예측이 일부 가능하기 때문에, 해일의 도달시간을 시뮬레이션을 통해서 예측할 수 있다. 경우에 따라 5분 (시즈오카현 静岡縣)이내에서 수시간까지 존재한다.

참고문헌

Federal Emergency Management Agency (FEMA), www.fema.gov, accessed on 7th May, 2011

Ministry of Land Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), www.mlit.go.jp, accessed on 7th May, 2011

National Emergency Management Agency (NEMA), www.nema.go.kr, accessed on 7th May, 2011

復興支援調査アーカイブ, <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp>, accessed on 2nd July, 2012

Digital Japan Portal Web Site <http://portal.cyberjapan.jp>, accessed on 2nd July, 2012

Metropolitan Police Department <http://www.keishicho.metro.tokyo.jp>, accessed on 2nd July, 2012

Statistics Bureau, Director-General for Policy Planning & Statically Research and Training Institute, www.stat.go.jp, accessed on 2nd July, 2012

Geospatial Information Authority of Japan, www.gsi.go.jp, accessed on 22nd August, 2012

7) 피해지역의 침수도를 살펴보면, 강변을 따라서 해일이 급속하게 유입되는 것이 관측되었다. 장애물이 없고, 주변보다 낮은 강변을 따라서 빠른 속도로 유입된 해일은 강변주변에 큰 피해를 발생시켰으며, 주민들이 예상하고 피난할 시간적 여유가 없었기 때문에 더욱 피해가 컸다.