

# 津波による列車への被害予測解析手法の検討

東北大学大学院 学生会員 島村 宗一郎  
災害科学国際研究所 正会員 今村 文彦  
富士常葉大学 正会員 阿部 郁男

## 1. はじめに

2011年3月11日、太平洋三陸沖を震源とするMw9.0の巨大地震に伴い東北地方太平洋沖地震津波が発生、地域により被害状況は様々であるが、道路や橋梁、発電所、上下水道など生活の礎となるインフラの被害も顕著であり、その中でも、鉄道への被害は過去に類を見ないものとなった。列車被害による人的被害は見られなかったが、太平洋沿岸を走る鉄道への被害が広範囲で確認されている。そのため被災後の復旧・復興活動にも影響を与え、地域での経済活動への損失も甚大であった。また、2004年インド洋津波によりスリランカ・カハワでは、列車被害による死者数は約1,500人にも上った。津波による列車被害というものは、人的さらに社会的にも大きな影響を及ぼすことから、列車に対する減災システムの再検討および構築は非常に重要であると考えられる。

本稿では、津波数値解析を用いた津波による列車への被害予測手法について検討を行い、島村ら(2012)で提案した転倒限界浸水深と比較・考察について論ずる。

## 2. 列車被害予測領域

幸いなことに、東北地方太平洋沖地震津波において列車被害による直接的な人的被害は無かったと報告されている。しかしながら、鉄道構造物への被害が甚大であり、車両への被害は過去最大級であると言える。津波による車両被害は8列車の被害が確認されており、大別すると転倒または浮上による脱線・漂流と浸水のための3つになる。そこで、本稿では以下に示す島村ら(2012)で提案された津波による列車の転倒モーメントモデルと浮上モデルに倣い、津波数値解析から算出される浸水深及び流速を用いることで列車被害予測領域の算出を行なった。

$$F_{st}(\frac{1}{3}h + \frac{2}{3}H_r) + F_d(\frac{1}{2}h + \frac{1}{2}H_r) + \frac{1}{2}F_f B_g = \frac{1}{2}MgB_g \quad (1)$$

$$F_f = Mg \quad (2)$$

$$F_{st} = \rho g A h, F_f = \rho g B h, F_d = \frac{1}{2} \rho C_d L (h u^2) \quad (3)$$

ここで、 $F_{st}$ :静水圧、 $F_f$ :浮力、 $F_d$ :動水圧、 $\rho$ :流体の密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $g$ :重力加速度[m/s<sup>2</sup>]、 $A$ :流れに対して水平方向の投影面積[m<sup>2</sup>]、 $B$ :底面積[m<sup>2</sup>]、 $L$ :流れに対して水平方向の幅[m]、 $h$ :浸水深[m]、 $u$ :流速[m/s]、 $C_d$ :形状抗力係数(=2.0)、 $R$ :遡上高[m]である。また列車被害予測領域とは津波による列車の転倒または浮上が予測される領域のことを示す。

## 3. 津波数値解析

断層モデルは東北大学モデルversion1.0を用いる。計算条件として、連続式とNavier-Stokes方程式を水深方向に積分した非線形長波理論を支配方程式とし、Leap-Frog差分法で解いた。また、地形データ、粗度データ、堤防データは国土地理院の公開データ(震災前)を用いて、領域のメッシュサイズを1350m > 450m > 150m > 50mで接続計算している。今回は南から、仙台湾、牡鹿半島、気仙沼、大船渡・陸前高田、宮古の5つの領域での計算を行ない、実現象の検討のために海岸構造物が機能した場合と全く機能しなかった場合の2パターンの解析を行なった。今回は仙台湾及び宮古での解析結果且つ海岸堤防が機能したパターンを示す。

島村ら(2012)で検討が行われた転倒限界浸水深での結果と比較することで転倒限界浸水深の精度や再現性を確かめる。

## 4. 検討結果

先に述べたように、津波数値解析結果から列車被害予測領域の算出を行い、結果を図-1,2に示す。図中の黄色部が津波による列車被害予測領域であり、黒実線で示された範囲が転倒限界浸水深(=1.1m)以上の領域(転倒限界浸水深領域)となっている。まず、確認すべき点として東北地方太平洋沖地震津波により被災した列車(図-1中のPoint1、図-2中のPoint2)の位置では両領域内にあることが確認できる。ここで、両領域について空間的に比較を行なうと地域による差異が確認できた。図-1の東松島地区(西部)及び図-2の津軽石地区では列車被害予測領域と転倒限界浸水深領域がほぼ一致していることが分かる。しかし

表-1.東松島・石巻地区及び津軽石地区での津波数値解析結果(各ポイントにおける列車被害予測時刻比較表)

	東松島・石巻						津軽石			
	Point1	Point2	Point3	Point4	Point5	Point6	Point1	Point2	Point3	Point4
転倒限界予測時間 [min]	65.9	64.5	62.0	NaN	68.7	60.5	NaN	46.9	42.2	39.0
浮上限界予測時間 [min]	65.9	64.6	62.0	NaN	NaN	60.5	NaN	47.0	NaN	39.0
転倒限界浸水深時間 [min]	66.0	64.3	62.0	NaN	68.0	60.5	NaN	47.0	41.1	39.0



図-1 列車被害予測解析結果(東松島・石巻)

ながら、図-1の石巻地区(東部)では両領域の陸側境界付近で転倒限界浸水深領域の方が過大評価されていることが分かる。これは、地形的な要因が強く影響していると考えられる。転倒限界浸水深を算出するにあたりH,Yeh(2007)で示された津波波力算定方法を用いており、この算定方法には一様傾斜の地形を仮定することで津波波力を浸水深のみで算定可能になるという特徴がある。このために内陸になるにしたがって、津波波力の差異が生じ易くなる。つまり、転倒限界浸水深を用いる場合には内陸には適さないであろうと言える。

また、空間的な比較に対して津波発生後から列車に転倒・浮上が確認されるまで時間影響時間つまり影響開始時間の比較も行なった。今回は図-1,2に示すように各領域で汀線から垂直内陸方向に合計10点を設定し、各点での転倒及び浮上限界予測時間と転倒限界浸水深到達時間を算出し、まとめたものが表-1である。表-1から転倒及び浮上のタイミングはほぼ同時に発生しており、転倒限界浸水深を満たす時刻ともほぼ同時であることが分かる。しかしながら、津軽石では永瀬(2011)によると被災した車両は浮上しながら動いていたと提言されている。

このことより、本検討手法では転倒と浮上のタイミングの違いを確認できないという問題が挙がるが、転倒限界浸水深との比較結果は良好であり、転倒・浮上に関わらず列車の被災時間の推測は転倒限界浸水深を用いることで可能であると考えられる。

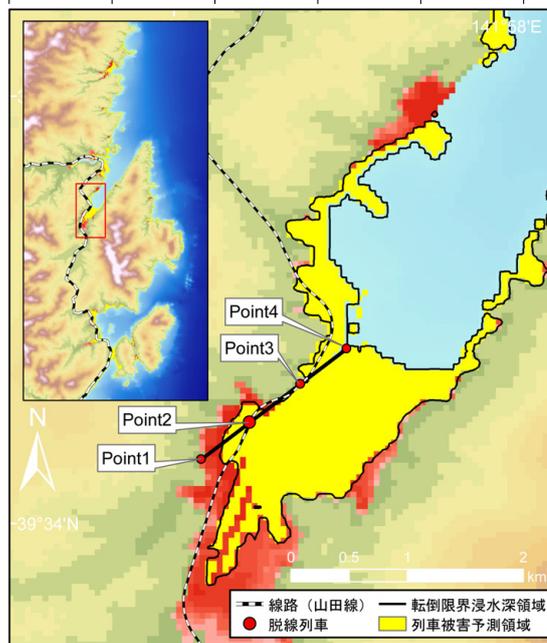


図-2 列車被害予測解析結果(津軽石)

## 5. 結論

今回、東北地方太平洋沖地震津波を対象とした津波数値解析により列車被害予測手法の検討と転倒限界浸水深に対する精度について言及することができた。

しかしながら、津波数値解析においてより詳細な地形データや津波波力算定法の改善が必要になるであろう。謝辞

本稿を執筆する上で、東日本旅客鉄道株式会社 JR東日本研究開発センター 防災研究所の皆様にご指導頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 島村宗一郎, 今村文彦, 阿部郁男(2012): 東北地方太平洋沖地震津波における沿岸鉄道での列車被害メカニズムの検討, 土木学会論文集B2(海岸工学) Vol.68 No.2 pp.181-185
- 永瀬和彦(2011): 大津波に遭遇した車両の挙動に関する一考察, 第18回鉄道技術連合シンポジウム論文集, pp.413-416
- H. Yeh: Design Tsunami Forces for Onshore Structures. Journal of Disaster Research, Vol.2, No.6, pp.531-536, 2007
- T.Tomita,F.Imamura,T.Arikawa,T.Yasuda,Y.Kawata:DAMAGE CAUSED BY THE 2004 INDIAN OCEAN TSUNAMI ON THE SOUTHWESTERN COAST OF SRI LANKA, Coastal Engineering Journal, Vol. 48, No. 2, 99-116, 2006