津波と余震の重畳現象の発生確率の検討
A study on occurrence probability of superposition of tsunami and earthquake

18N3100015H　志賀　典親（設計工学研究室）
Norichika SHIGA/ Design Lab.

Key Words : *earthquake, tsunami, superposition, breakwater*

1.　はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の影響で，より多様な地震被害に注目されるようになった．その被害には，津波や液状化現象、原子力発電所事故等の二次災害，もしくは複合災害が挙げられる．その中でも，岡田は津波の波力と地震力が同時刻に構造物に作用する，津波と地震の重畳現象(以下，重畳現象)の危険性を主張している．[1]しかし，重畳現象がどの程度の確率で発生するかについての研究がなされておらず，どういった条件において注意すべき課題であるか明確でない．よって，本研究では本震発生後の条件付確率として重畳現象の発生確率を地域別に検討する．

2.　検討手法

重畳現象は構造物に想定外の力を作用させるため，破壊により被害の拡大が予想される，防波堤や防潮堤，原子力発電所への被害が懸念されている．よって，本研究では防波堤を対象構造物に設定する．

対象地震には津波を発生させやすい海溝型地震を設定し，余震は狭義の余震のみを対象とする．

はじめに東北地方太平洋沖地震での余震ハザード評価を行い，評価手法の妥当性を確かめる．それを踏まえて，近年起こりうる南海トラフ地震での重畳現象に関して信頼性評価を行う．

3.　余震のハザード評価手法

本震からの経過時間T_1～T_2[日]において，ある地点の地表面加速度Yがyを超える余震確率$P(Y>y|T_1,T_2)$は，ポアソン過程より以下の式となる．

$$P(Y>y|T_1,T_2) = 1-\exp\{-[N(Y>y|T_2)-N(Y>y|T_1)]\} \quad (1)$$

$N(Y>y|T)$は，本震発生～T[日]においてYがyを超える平均余震発生回数で，防災科学技術研究所の資料[2]を参考に次式で求めることができる．

$$N(Y>y|T) = n(T,M_{min})\sum_i\sum_j P(Y>y|m_i,r_j)\,P(r_j|M_w)P(m_i|T) \quad (2)$$

$n(T,M_{min})$は規模M_{min}以上の余震の平均発生回数で，$P(Y>y|m_i,r_j)$は規模m_i，震源最短距離r_jの余震発生時においてYがyを超える確率，$P(r_j|M_w)$は本震が規模M_wのとき余震と対象箇所の距離がr_jとなる確率，$P(m_i|T)$は本震発生～T[日]において規模m_iの余震が発生する確率を表している．以下に詳細を示す．

⑴ 平均余震発生回数（非定常）

本震発生～T[日]におけるM以上の平均余震発生回数nの算出には，大森・宇津公式と GR 式を組み合わせた以下のモデル[3]を用いる．

$$n(T,M) = Kexp\{-b(M-M_{th})\ln 10\}\frac{(T+c)^{1-p}-c^{1-p}}{1-p} \quad (3)$$

ただし，$p\neq 1$であり，上式の定数は表−1 に示す，東北地方太平洋沖地震について最尤法によって求められた地震調査研究推進本部のデータ[3]を用いる．ここで，M_{max}は余震の最大Mを表し，ハザード評価はM_{max}で打ち切りとする．

表−1　東北地方太平洋沖地震のパラメータ

Mmax	b	Mth	K	c	p
7.6	0.814	5.0	91.75	0.036	1.148

上式を用いて，規模M_1～M_2の平均余震発生回数$N(T,M_1,M_2)$は以下通りに求める．

$$N(T,M_1,M_2) = n(T,M_1)-n(T,M_2) \quad (4)$$

⑵ 設定加速度の超過確率

距離減衰には司ら[4]の最大加速度算出式を用いる．

$$\log_{10}A = b-\log_{10}(X+c)-0.003X \quad (5)$$
$$\mathrm{b} = 0.50M_w+0.0043D+0.62+\sigma$$
$$\mathrm{c} = 0.0055\ 10^{0.50M_w}$$

ここで，A は最大加速度[Gal]，D は震源深さ[km]である．余震の震源深さは，全て本震と同じ 24km とする．また，地表面加速度の地盤増幅率は一律で 1.4 とする．断層最短距離 X は，Mにより断層長 L[km]を算出し，$L/2$ [km]を半径とする球を設定し，その球面から対象箇所までの距離とする．[5]

$$log_{10}L = 0.5M_w-1.85 \quad (6)$$

なお，X<L/2 となる場合には一律に X=3 とする．

⑶ 余震と対象箇所の距離がr_jとなる確率

余震域は，崔ら[6]の拡幅断層面の考え方を用い，$M_w=9.0$の東北地方太平洋沖地震の断層面を相似的に拡幅し，**図−1** の通り余震域A_{after}[km^2]を設定する．

$$A_{after} = 10^{0.778M_w-1.60} \quad (7)$$

確率計算では，余震域において5km間隔で格子状に震源点を設定し，余震はそれらの点から一様に発生するものとする．

ここで，GR 則が本震直後であっても適用可能であるか検証を行う．東北地方太平洋沖地震における上記の

余震域内で本震経過時間毎の地震記録[7]を用いて確かめたのが**図-2** である．平均余震発生数は式(3)を用いて算出した．どの時間帯であっても M5.7 付近までが適用可能範囲であり，M5.0 では観測値は平均余震発生数の約半分となっていた．そのため，M5.0<m<M5.7 間では以下の式(8)の通り，倍率を掛けて平均発生回数を算出する．

$$n'(T,m) = 0.5\left\{1 + \frac{m - M_{th}}{5.7 - M_{th}}\right\} n(T,m) \qquad (8)$$

また岡田らはケーススタディにおいて，加速度 200gal を超えた場合に安全率が 1 を下回ることを確認している．[1]**図-3**に式(5),(6),(7)より求めた釜石港における200gal以上の超過確率を示す．検知限界$M_{th} = 5.0$以下は，超過確率が0のため，余震ハザードの算出はM_{th}～M_{max}間とする．

(4) 規模m_iの余震発生確率

刻み幅$\Delta m = 0.1$を設定し，m_iの余震発生確率は以下の通り算出する．

$$P(m_i|T) = P\left(m_i - \Delta m/2 \le M \le m_i + \Delta m/2 \,|T\right)$$
$$= \frac{N\left(T, m_i - \Delta m/2, m_i + \Delta m/2\right)}{N\left(T, M_{min} - \Delta m/2, M_{max} + \Delta m/2\right)} \qquad (9)$$

以上の方法で余震ハザード評価を行う．

(5) ハザード評価手法の妥当性

表-1の地震パラメータ[3]は本震発生から7日間の記録をもとに作成されたものであるため，その期間での平均余震発生数と観測値の比較を行う．**図-4**に式(2)によって求めた平均余震発生数と，K-NET[8]で観測されたデータとの比較を示す．図中の±σは式(5)の距離減衰式の標準偏差を計算式に加えて算出した結果である．加速度が小さくなる程誤差が大きくなるが，これに関しては二つほど理由が考えられる．一つは，本震直後や加速度が小さな地震に関して特に検知率が下がること，[9]もう一つは，本質的に断層がGR則に従って動いていないことである．加速度が大きい部分では標準偏差の間には収まっているが，発生回数自体が少ないため正確な妥当性の評価は難しい．

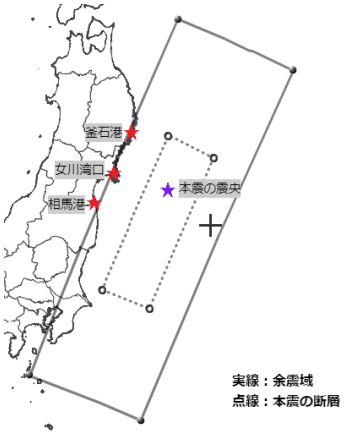
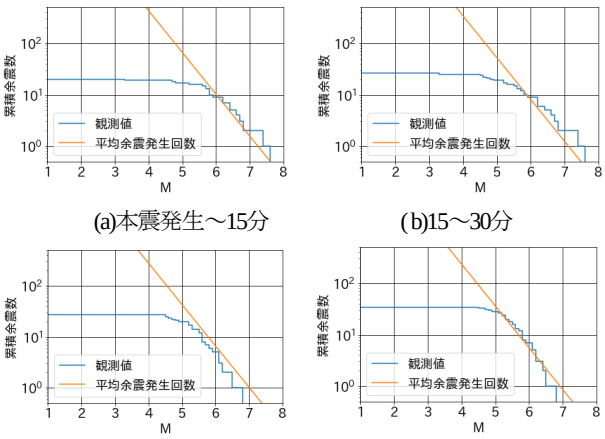


図-1　東北地方太平洋沖地震の余震域と対象防波堤



(a)本震発生～15分　(b)15～30分

(c)30～60分　(d)45～75分

図-2　GR則の適用

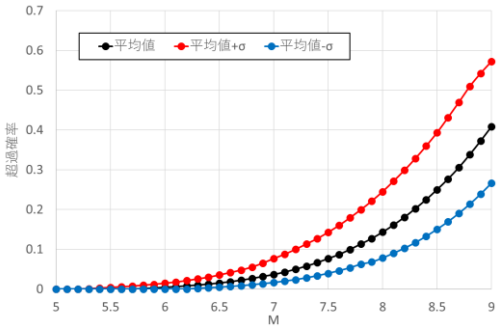
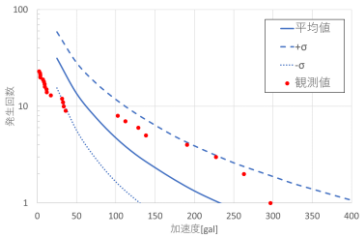
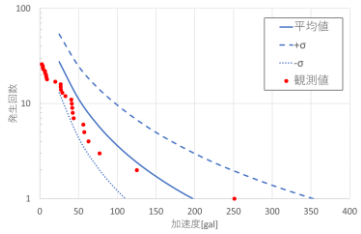


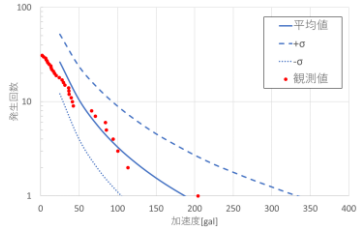
図-3　加速度200gal以上の超過確率(釜石港)



(a)釜石港近辺(IWT007)



(b)女川湾近辺(MYG010)



(c)相馬港近辺(FKS001)

図-4　平均余震発生数と観測値の比較

4. 重畳現象の信頼性評価

河合ら[10]は，東北地方太平洋沖地震による津波の第一波は，岩手中部沖において約30分間潮位の上昇をもたらしたことを報告している．これを参考にし，本震からの経過時間t～(t＋30分)の間に津波が防波堤に作用するとし，tを15分，30分，45分と変化させたときの重畳現象発生確率の変化を確認する． この場合での重畳現象の発生確率を求めた結果を**図-5**に示す．今回は距離減衰式が平均値の場合のみを算出した．これらのグラフの意味合いは生存関数とも呼ばれる，1から累積分布関数を引いた値である．時間を経ると余震確率が下がることが確認できる．

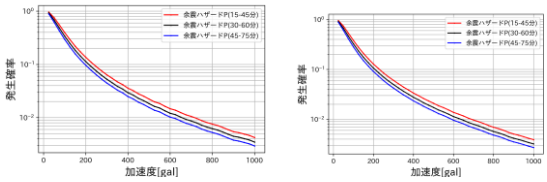
続いて先述の手法を用いて，南海トラフ巨大地震の発生を想定し，高知港に関して重畳現象に関する信頼性評価を行う．本震の断層位置を中央防災会議で検討されているケース4のすべり域[11]を参考をとし，M=9.0と仮定した上で余震域を図-6の通り設定する．また，巨大津波を発生させる地震において，地震計による地震記録が残っているものは東北地方太平洋沖地震のみであるため，地震パラメータは**表-1**のものを流用する．図中の高知港三里地区の防波堤を対象とし，余震ハザード評価を行った結果を**図-7**に示す．また，性能関数を破壊点まわりでテーラー展開することで近似する一次ガウス近似法による信頼性評価[12]を行う．この方法では確率変数の分布形を必要とするため，非線形最小二乗法を用いて余震ハザード評価を対数正規分布に近似させた結果も図-7に示す．この際，先述の通り200gal以上での重畳現象の発生に注目するため，200gal以上の結果のみに近似し，対数正規分布のパラメータを表-2に示す．

今回の信頼性評価は滑動破壊モードを対象とし，本震発生後t～(t＋30分)の間に津波が作用する条件付きの限界状態関数gは，港湾局のガイドライン[13]を参考に以下のように設定する．

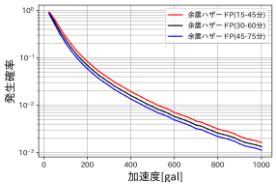
$$g = f(W - P_B - P_U) + P_R - (P_H + P_{wes} + P_{iner}) \quad (10)$$

ここに，fは壁体底面と基礎の摩擦係数，Wは堤体の重量，P_Bは浮力，P_Uは揚圧力，P_Rは補強した割石あるいは方塊の滑動抵抗力，P_Hは津波の水平波力，P_{wes}は地震による動水圧，P_{iner}は地震による慣性力とする．

断面は東第一のNo.650.0～992.6とし，**表-3**に設計に用いられている津波水位を示す．津波高さは対数正規分布に従うとし，土木学会[14]で示された1946年の南海地震の対数標準偏差0.47を参照し，**表-3**の値に対数を取ったものを対数平均値として設定する．本来は考慮すべき消波ブロックによる抵抗力の増分は定量的な効果を見積もることが難しいため無視した．



(a)釜石港　(b)女川湾



(c)相馬港

図-5　余震ハザード結果

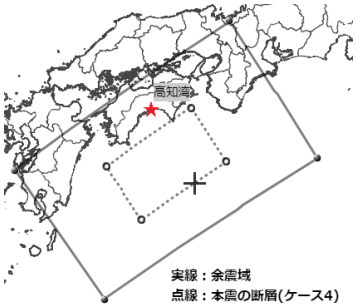
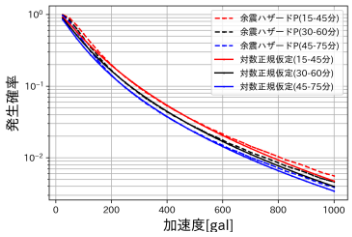
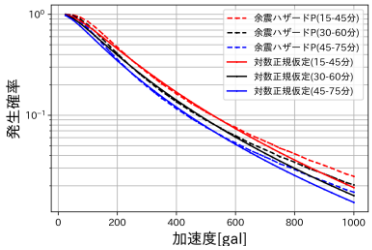


図-6　南海トラフ巨大地震の余震域と対象防波堤



(a)距離減衰式の平均値で算出



(b)距離減衰式の平均値+標準偏差で算出

図-7　余震ハザードの対数正規分布への近似

表-2　余震の対数正規分布パラメータ

時間[min]	距離減衰式	対数正規分布のパラメータ λ	対数正規分布のパラメータ ζ	平均値[gal]	標準偏差[gal]
15-45	平均	4.50	0.928	138	162
	平均+σ	5.21	0.822	256	251
30-60	平均	4.35	0.962	124	153
	平均+σ	5.07	0.857	230	239
45-75	平均	4.23	0.991	112	145
	平均+σ	4.95	0.887	209	229

津波の水平波力P_Hは静水圧差により算出し，前面の静水圧には1.05倍，背面の静水圧には0.9倍の補正係数をかける．揚圧力については考慮しない．[13]

割石の滑動抵抗力P_Rは，腹付工の影響を考慮し，簡易的に求められる直線すべり面を仮定した方法で以下のように算出する．[15]

$$\boldsymbol{P_R = \frac{W_s\, tan(\theta + \emptyset)}{1 + tan\,\delta\, tan(\theta + \emptyset)}} \qquad (11)$$

ここで，W_sはすべり面より上側の割石の有効重量，θはすべり面の傾斜角20°とし，$\emptyset$は割石の内部摩擦角で38.66°とする．壁面摩擦角$\boldsymbol{\delta}$は-15°とする．

岡田[1]により，重畳時の防波堤にかかる水圧は，静水圧差による津波の水平波圧と，Westergaardの算定式[16]による動水圧の和で概算できることが確認されている．よって本研究でも動水圧P_{wes}の算出に以下のWestergaardの算定式を用いる．

$$P_{wes} = \frac{7}{8}\gamma_w \alpha \sqrt{H \cdot h} \qquad (12)$$

ここで，γ_wは水の単位体積重量，αは設計震度，Hは水深，hは任意の水深である．

加速度と津波高さは対数正規分布で与え，その他の設計因子の確率密度分布は長尾ら[17]を参考に，**表-4**の通り正規分布で与えた．W_{rc}は鉄筋コンクリート，W_{sand}は中詰砂，W_sは割石の単位体積重量を表し，潮位wlの特性値はH.W.LとL.W.Lを足して2で割った値を用いた．

津波のみで行った評価と重畳現象を考慮した評価，この二つの場合において，一次近似ガウス法[12]でβの収束計算を行い得られた値を**表-5**にまとめた．

5. まとめ

本研究では，防波堤の設計において重畳現象を考慮する簡易的な手順を構築した．

表-5の結果より，津波のみの場合はかなり安全側にあるが，余震も同時に考慮するとβは大きく減少することが確認できる．また，津波到達時間が短い場合，信頼性は下がる．

余震ハザードの検討手法は，距離減衰式や震源深さの不確実性や余震発生場所のばらつきの偏りが考慮されていない点や，より詳細な限界状態関数の設定が改善できる点として考えられる．

表-3　津波水位

	最大クラスの津波
前面津波水位[m]	10.07
背面津波水位[m]	4.00
前面と背面の差(固定値)[m]	6.07

表-4　他の設計因子の確率分布

確率変数	B(μ/特性値)	変動係数V	分布関数
f	1.06	0.15	正規分布
Wrc	0.98	0.02	正規分布
Wsand	1.02	0.04	正規分布
Ws	1.02	0.04	正規分布
wl	1.00	0.40	正規分布

表-5　信頼性指標β

(a)津波のみの場合

β	滑動確率
2.39	0.008

(b)重畳現象を考慮する場合

時間[min]	β	滑動確率
距離減衰式(平均値のみ)		
15-45	1.41	0.079
30-60	1.51	0.066
45-75	1.58	0.057
距離減衰式(平均値+σ)		
15-45	0.81	0.209
30-60	0.92	0.178
45-75	1.02	0.154

参考文献

1) 岡田克寛，地震と津波の重畳時における防波堤の安定性検討手法の構築，博士課程学位論文，2018.
2) 防災科学技術研究所研究資料，全国を対象とした確率論的地震動予測地図作成手法の検討，第 275 号
3) 地震調査研究推進本部，大地震後の地震活動の見通しに関する情報のあり方，pp.12-14，2016.
4) 司宏俊，翠川三郎，断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，1999.
5) 気象庁地震火山部．緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術堤参考資料，2016.
6) 崔炳賢，地震後復旧活動計画のための確率論的余震発生モデルと余震ハザード評価の提案，日本建築学会構造系論文集，第 78 巻，第 690 号，2013.
7) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019), NIED Hi-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0003.
8) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience(2019),NIED K-NET, KiK-net,National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0004
9) Takahiro Omi, Yosihiko Ogata, Yoshito Hirata and Kazuyuki Aihara, “Forecasting large aftershocks within one day after the main shock”. Scientific Reports. 2013.
10) 河合弘康，佐藤真，川口浩二，関克己．GPS 波浪計で捉えた平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.67.
11) 中央防災会議，南海トラフ巨大地震対策について(最終報告)別添資料 1，平成 25 年 5 月．
12) 星谷勝，石井清，構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，p75.
13) 国土交通省港湾局，防波堤の耐津波設計ガイドライン，p19，p26，平成 25 年 9 月．
14) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会，確率論的津波ハザード解析の方法 p27，平成 23 年 9 月．
15) 赤塚雄三，竹田英彰，蓮見隆，混成堤の堤体背後に設置したコンクリート方塊あるいは割石の滑動抵抗
16) Westergaard,H.M：Water pressure on dams during earthquake,Trans.ASCE98,pp.418-433,1933.
17) 長尾毅，ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計の適用．土木学会論文集，No.689，I-57，2001.