

津波による地盤の液状化に関する 1次元解析

奥村 与志弘¹・加藤 亮輔²・岡 二三生³

¹阪神・淡路大震災記念 人と防災未来センター主任研究員
(〒651-0073 兵庫県神戸市中央区脇浜海岸通1-5-2)

E-mail:okumuray@dri.ne.jp

²株式会社 日建設計シビル (〒541-8528 大阪府中央区高麗橋4-6-2)

E-mail:ryousuke.katou@nikken.co.jp

³京都大学大学院工学研究科教授 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂C1-4棟)

E-mail: oka.fusao.2s@kyoto-u.ac.jp

津波による地盤の液状化は、津波来襲時の様々な地盤被害に影響している可能性があるにも関わらず、これまで十分に評価されてこなかった。この津波液状化現象は、飽和地盤内の間隙水の圧縮性が原因で、間隙水の水圧変動が地盤上の水圧変動と連動しないために有効応力が増減し生じると考えられる。本研究では、間隙水の圧縮性を考慮した有効応力解析コード（LIQCA2D）を用いて津波による地盤の液状化に関する1次元解析を実施した。その結果、津波水位の上昇時は有効応力が増大し、津波水位の降下時に有効応力が減少し地盤が劣化するという津波来襲時の地盤の応答特性が明らかになった。また、地盤と津波の条件によっては、深さ3mから4m程度にまでその影響が及ぶことが明らかになった。

Key Words : *Tsunami, Liquefaction, Degradation of Ground, liquefaction analysis*

1. はじめに

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（災害名は、東日本大震災）は、最大震度7の揺れに加え、最大で40mを超える高さの津波（遡上高）を引き起こした。中でも、震源域に近い岩手県、宮城県、福島県の津波被害は甚大であり、宮城県女川町では、鉄筋コンクリート構造物が杭基礎ごと引き抜かれ流されるという、世界でも過去に例のない被災形態が確認された。

鉄筋コンクリート構造物は、2m程度の浸水深で全壊・流出する可能性がある木造家屋に比べれば津波に対して強い。高台まで避難するのに十分な時間的猶予がないと想定される地域の市民にとって、こうした構造物が早期に「タテへの避難」を行う唯一の手段となる。そのため、こうした構造物は、将来の津波災害に備え、緊急の津波避難場所に指定される場合がある。また、指定がなくても結果的に市民の緊急避難場所となるケースも少なくない。西日本に甚大な被害をもたらすと想定され

ている東海、東南海・南海地震津波は、今世紀前半の発生が確実視されており、安全な津波緊急避難によって人的被害を軽減するために、女川町における鉄筋コンクリート構造物の被害発生メカニズムは早急に解明されなければならない。

鉄筋コンクリート構造物が杭基礎ごと引き抜かれるという被害は、津波による地盤洗掘や地震動による液状化など複数の要因が複合的に作用して発生したと考えられる。著者らは、それらの要因の1つとして、津波による地盤の液状化に注目したい。

類似の現象として、波浪による地盤の液状化があり、例えば、北海道奔幌戸漁港の事例（岡ら¹）がよく知られている。波浪による地盤の液状化は、飽和地盤内の間隙水の圧縮性が原因で、間隙水の水圧変動が地盤上の水圧変動と連動しないために有効応力が増減し生じると考えられる（図-1）。一方で、波浪よりも長周期である津波に関しては、津波による地盤上の水圧変動が地盤に及ぼす影響はこれまで十分に検討されていない。

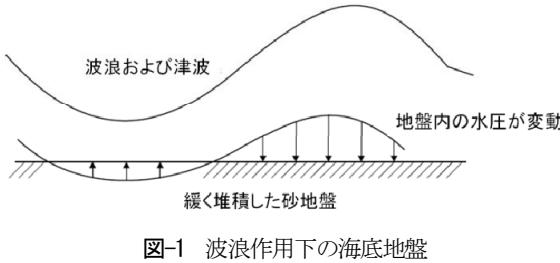


図-1 波浪作用下の海底地盤

そこで本研究では、(1) 津波による地盤上の水圧変動が地盤内の有効応力にどのような影響を及ぼすのかを明らかにしたい。著者らは、津波による砂質地盤の液状化シミュレーションを実施し、時々刻々と変化する地盤内の挙動を計算する。有効応力がゼロになれば、津波によって液状化が起きたということになる。(2) また、津波の浸水深や周期を変数に感度分析を行い、同一の地盤条件下で、地盤内の有効応力に顕著な影響を与える津波の条件とはどのようなものなのかを明らかにしたい。

(3) さらに、それらの解析結果を用いて、津波による地盤内の有効応力への影響はどの程度の深さにまで及ぶのかについても考察を行う。ただし、数値解析は、簡易のため1次元問題を取り扱う。

2. 解析手法

波浪による地盤の液状化は、間隙水の圧縮性が原因で、地盤上の水圧変化に間隙水圧が連動しないために起こる現象である。津波の場合も同様であると考えられるため、本研究では間隙水の圧縮性を考慮できる砂の弾塑性構式を組み込んだ液状化解析コードLIQCA2D（液状化解析手法LIQCA開発グループ²⁾）を用いて解析を実施した。LIQCA2DはBiot³⁾の飽和多孔質体理論に基づいた*u-p formulation*を用いており、支配方程式を以下に示す。なお、津波波形は、第3章では強制入力したsin波を陸上に遡上させ、代表地点における浸水深の時刻歴を用いた。第4章では単純に様々なsin波の時刻歴を用いた。津波氾濫計算は、非線形長波理論をstaggered格子を用いたleap-frogスキームで解いた。

(1) 混合体の応力

多孔質体理論において全応力と有効応力の関係は、間隙水圧を用いて以下のように表現できる。

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - p\delta_{ij} \quad (1)$$

ここに、 σ_{ij} は全応力テンソル、 σ'_{ij} は有効応力テンソル、 p は間隙水圧、 δ_{ij} はクロネッカーデルタである。

(2) 固相および液相の構成式

砂の構成式にはOkaら⁴⁾の繰返し弾塑性モデルを用いている。固相の応力とひずみの関係は、弾塑性モデルにおいて、次式の有効応力増分テンソルと固相のひずみ増分テンソルの関係で定義される。

$$d\sigma'_{ij} = D_{ijkl}^{EP} d\varepsilon_{kl}^s \quad (2)$$

ここに、 $d\sigma'_{ijkl}$ は有効応力増分テンソル、 D_{ijkl}^{EP} は弾塑性テンソル、 $d\varepsilon_{kl}^s$ は固相のひずみ増分テンソルである。

液相については粘性抵抗を考慮しないとし、次式のように定義する。

$$p = -K^f \varepsilon_{ii}^f \quad (3)$$

ここに、 K^f は間隙流体の体積弾性係数、 ε_{ii}^f は液相のひずみテンソルである。

(3) 運動方程式および連続式

運動方程式および連続式は、運動量保存則および質量保存則からそれぞれ以下のように表せる。

$$\text{運動方程式} \quad \rho \ddot{u}_{ij}^s = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (4)$$

$$\text{連続式} \quad \frac{k}{\gamma_w} \left(-\rho^f \ddot{\varepsilon}_{ii}^s - \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} \right) + \dot{\varepsilon}_{ii}^s + \frac{n}{K^f} \dot{p} = 0 \quad (5)$$

ここに、ドット(・)は物質時間微分を表し、 ρ は混合体の密度、 u_{ij}^s は固相の変位ベクトル、 b_i は物体力である。また、 k は透水係数、 γ_w は間隙水の単位体積重量、 ρ^f は液相の密度、 $\dot{\varepsilon}_{ii}^s$ は固相の体積ひずみテンソル、 n は間隙率である。

(4) 水の体積弾性係数と飽和度の関係

間隙流体の圧縮性を考慮するために、以下に示すOkusaの提案式⁵⁾における飽和度と水の体積弾性係数の関係を用いる。本研究では飽和度98%時の水の体積弾性係数の値として、 $K^f = 5880$ (kPa)を用いた。

$$m_w = m_{w0} S_r + \frac{1 - S_r}{P_{mg}} = \frac{1}{K^f} \quad (6)$$

ここに、 m_w は気泡の存在を加味した水の見かけの圧縮率、 m_{w0} は飽和度100%時の水の圧縮率、 S_r は飽和度、 P_{mg} は絶対圧力で表した間隙水圧である。

3. 津波氾濫時における地盤の応答特性

(1) はじめに

波浪によって海底地盤が液状化する現象は、海底なので現象が目に見えないということ、海底なので被害を受ける構造物が少ないということ、この2点が理由で地震による液状化に比べると知名度は低い。しかし、北海道奔幌戸漁港において、防波堤が最大で1.4m沈下した際に、防波堤の基礎地盤（沖積砂質層）が波浪によって液状化したことが被害の主要因であると岡ら¹⁾が結論付けた例にあるように、波浪による海底地盤の液状化は、海洋構造物の基礎の支持力、洗屈などと密接に関係して、その発生は稀ではないと考えられる。

一方で、津波によって地盤が液状化することはないとどうか。津波が波浪と大きく異なるのは、津波の周期は数十分と非常に長く、陸上を遡上して氾濫流となることである。そのため、津波による地盤の液状化は、海域で発生するならば緩い砂層を有する陸域でも発生する可能性がある。過去の津波災害で盛土堤防が大規模に決壊した例があるが（図-2）、津波によって地盤が液状化するのであれば、それが津波来襲時の様々な地盤被害に影響している可能性がある。しかし、これまでそのような分析は行われてこなかった。

そこで本章では、津波による地盤上の水圧変動に対して、地盤がどのような応答をするのかを明らかにする。ここでは、津波による砂質地盤の液状化シミュレーションを実施し、時々刻々と変化する地盤内の挙動を分析する方法をとる。そして、津波によって地盤が液状化する可能性があるのかを検討する。

具体的な手法としては、津波による海底面での水圧変化のみを入力条件として（つまり、せん断応力は考慮しない），第2章で説明した間隙水の圧縮性を考慮できる砂の弾塑性構成式を組み込んだ液状化解析を実施する。ちなみに、北海道奔幌戸漁港の事例は、岡ら³⁾が、周期5sec、波長35m、波高2mの重複波を想定した弾塑性有限要素法を用いた液状化解析によって1.4mの地盤の沈下は概ね説明できたと述べている。彼らの解析では、重複波が5回連続して作用した段階で、防波堤の基盤および消波ブロックの基部を含む広い範囲で、液状化するのに十分なだけ間隙水圧が増大している。この波浪に比べると津波は周期が数十分と非常に長く、本章ではまずこの周期の長さに注目することとし、津波が繰り返すことの影響は次章で検討することとする。

(2) 解析条件

本章では、地盤や津波はまったくの仮想モデルとするのではなく、和歌山県御坊市の代表地点における実地



図-2 1960年チリ津波による盛土堤防の決壊の様子（北海道厚岸郡浜中町）

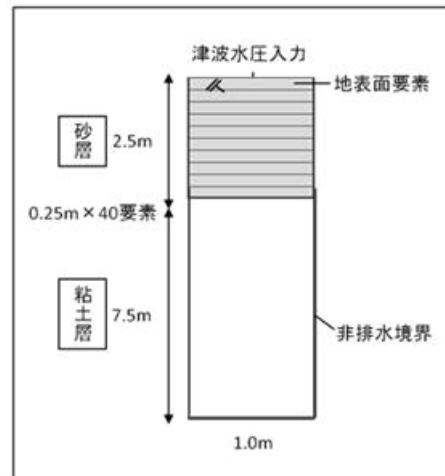


図-3 第3章で用いる地盤モデル

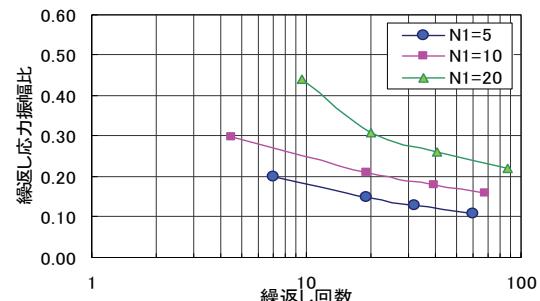


図-4 要素シミュレーション結果

盤を模擬した地盤モデルと同様に来襲することが想定される東海・東南海・南海地震津波を模擬した津波波形を用いる。

すなわち、地盤モデルは、図-3に示すような深度2.5mまでが緩い砂層で、それ以深が不透水の粘土層とする。砂層にはN1（有効上載圧100kPaに対するN値）が5, 10, 15の3ケースを仮定してパラメータを設定し、それぞれに対する検討を実施する。具体的なパラメータの設定としては、道路橋示方書⁴⁾および鉄道構造物等設計標準・

表-1 砂層の解析パラメータ一覧

材料パラメータ	N1=5	N1=10	N1=20
初期間隙比 e_0	0.800	0.800	0.800
圧縮係数 λ	0.025	0.025	0.025
膨潤指数 K	0.0025	0.0025	0.0025
初期せん断係数比 G_0/σ'_{m0}	374.0	594.0	943.0
透水係数 k (m/s)	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
密度 ρ (t/m ³)	2.0	2.0	2.0
変相応力比 M_m^*	0.91	0.91	0.91
破壊応力比 M_f^*	1.13	1.13	1.34
硬化関数中のパラメータ B_0^*	2000	2500	5000
硬化関数中のパラメータ B_1^*	110	59	46
硬化関数中のパラメータ C_f	0	0	0
水の体積弾性係数 K_F (kPa)	5880	5880	5880
擬似過圧密比 OCR^*	1.0	1.2	1.5
ダイレイタンシー係数 D_0^*, n	1.0, 2.0	1.0, 3.0	1.0, 3.0
塑性基準ひずみ γ_{ref}^{P*}	0.0035	0.0035	0.0035
弾性基準ひずみ γ_{ref}^{E*}	0.005	0.005	0.005

同解説から液状化強度曲線を推定し、要素シミュレーションを実施することにより液状化強度曲線にフィッティングするパラメータを求めた。推定した液状化強度曲線にて実施した要素シミュレーション結果およびパラメータ一覧を図-4と表-1に示す。

一方、津波の波形は、振幅5.0m、周期20分のsin波を図-5に示すモデル地形（同市の代表的な地形断面）の海側境界から入力し、同図における1,000m地点の津波氾濫流の水位変化（図-6）を用いる。ただし、防潮施設はないものとする。sin波の振幅は、和歌山県⁷⁾が想定している

津波（東海、東南海、南海地震の同時発生シナリオ）が御坊市で5.0mを超えていることを考慮して設定した。入力波形は、水位が上昇し始めて約3分で最大値5.8mに達し、その後6分程度で最大値の半分程度の水位まで低下した後は、緩やかに水位が低下している。なお、本研究では地下水位は地表面、水の体積弾性係数 $K_F=5880$ (kPa)、透水係数を 1.0×10^{-5} (m/s)とした。解析時間は5000秒である。

③ 解析結果

津波による砂質地盤の液状化シミュレーションの結果、N1=5地盤における地表面要素、GL-1.0m、GL-2.5m位置の要素の相対有効応力減少比の時刻歴を得た（図-6）。相対有効応力減少比とは、ある時点における有効応力を初期有効応力で割った値を1.0から引くことによって算出される値であり、次のような特徴がある。すなわち、この数値は、有効応力に変化がなければ0.0、有効応力がゼロになれば1.0（つまり、完全な液状化）、有効応力が増加すればマイナス値となる。従って、ここでは、津波による浸水深の上下によって相対有効応力減少比が1.0に達するのか、また、その影響は津波がどのような状況にあるときに大きくなるのか、さらに、どのくらいの深さにまで達するのかが注目される。

ではまず、津波による地盤上の水圧変動に対する地盤の応答特性を図-6を用いて分析する。地盤の応答は、津波の水位の変化に合わせて、以下に示す3段階に分けて

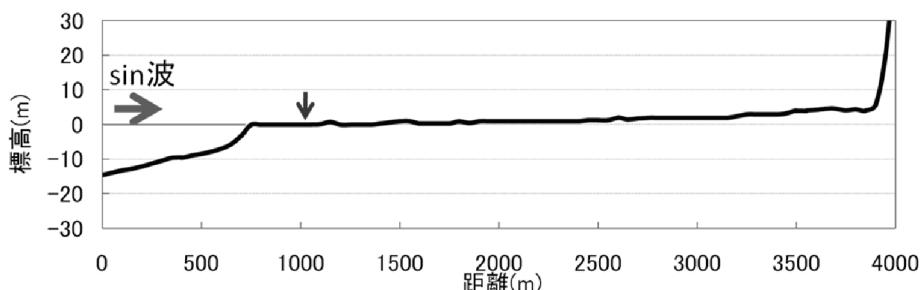


図-5 御坊市の断面2次元モデル地形

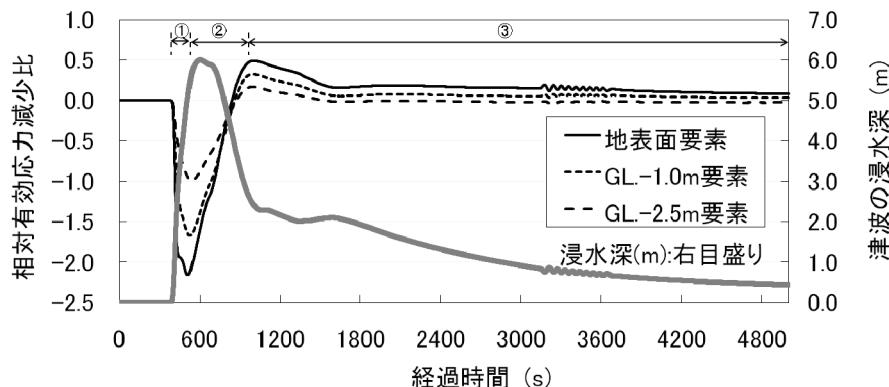


図-6 N1=5 地盤での相対有効応力減少比

表-2 N1値の異なる地盤での相対有効応力減少比の最大値

材料パラメータ	N1=5	N1=10	N1=20
地表面要素	0.44	0.44	0.29
GL-1.0m要素	0.36	0.33	0.22
GL-2.5m要素	0.23	0.20	0.15

捉えることができる。すなわち、(1) 第一段階は、浸水深の増加に伴い有効応力が増加する段階である。全応力は水位上昇に伴って増加するが、間隙水の圧縮性により全応力の増分の間隙水圧への伝搬が遅れ、その分が有効応力の増分となって表れている。(2) 第二段階は、浸水深の減少に伴い有効応力が減少する段階である。水の圧縮性により地盤面での水位の低下が瞬時に地盤内に伝播せず、間隙水圧の低下に遅れに伴う上向き浸透流によって有効応力が減少する。この段階で地表面要素の有効応力は初期有効応力に比して半分程度にまで低下しているが液状化するまでではない。深い要素ほど有効応力の低下は小さいが、GL-2.5m要素でも有効応力の低下がみられる。この段階は、図-6の②であり、引潮時である。

(3) 第三段階は、急激な水位低下に伴って減少した有効応力が回復する段階である。ここでも間隙水の圧縮性により、有効応力は瞬時に初期有効応力に回復することができていないことが分かる。

次に、津波によって地盤が液状化する可能性があるのかを検討する。図-6からは、最も影響が顕著に表れる地表面要素でさえ相対有効応力減少比は1.0に達せず、この解析条件では液状化は起きていないことが分かる。しかし、有効応力の減少率は大きく、地表面要素では対初期値で約5割低下していることが分かる。また、その影響は深くなるにつれて小さくなるもののGL-1.0m要素でも4割程度の有効応力の低下が見られる。この結果から、地盤は津波によって深度1.0mを超えるオーダーで劣化していることが確認できた。

また、N1=10地盤とN1=20地盤における計算結果として、地表面、GL-1.0m、GL-2.5mの各要素における相対有効応力減少比の最大値を表-2に示す。N1=10の場合は、N1=5の場合と比べて大きな変化はないが、N1=20のケースでは全体的に地盤の劣化の程度が小さく、地盤強度の高さが津波による地盤劣化を抑制していると言える。

従って、本解析条件では、津波によって地盤が液状化することはなかったが、入力する津波の条件によっては、少なくともN1=10よりも強度の低い地盤においては、深度1.0mを超えるオーダーで大きく地盤が劣化し液状化する可能性がある。

(4) まとめ

本章では、和歌山県御坊市の代表地点における実地盤を模擬した地盤モデルと同市に来襲することが想定され

る東海・東南海・南海地震津波を模擬した津波波形を用いて、津波による地盤上の水圧変動に対して、地盤がどのような応答をするのか、また、津波によって地盤が液状化する可能性があるのかを検討した。

その結果、市街地に津波が押し寄せ浸水深が上昇している段階では有効応力は増大し地盤は強くなり、逆に、市街地から津波が引き浸水深が低下している段階で有効応力が減少し地盤が弱くなることが分かった。このことは、津波による盛土堤防の決壊や盛土道路などの地盤被害は、押し波時よりも引き波時に発生しやすいということを示唆している。

また、本解析条件下において地盤の液状化は発生しなかった。しかし、地盤の地表面要素で有効応力が対初期値で約44%低下するなどの地盤劣化が確認され、また、GL-1.0m要素でも同36%低下と、その影響は深さ約1.0mの地点にまで達していることが分かった。そして、こうした現象は地盤強度が高くなるほど抑制される傾向にあるものの、N1=10の場合は、N1=5の場合と同程度の影響が現れることが分かった。

津波来襲時の水中の気泡の多さを踏まえて、水の圧縮率がさらに大きくなる可能性があることや、津波氾濫流に含まれる土砂を考慮すると、海底面上に作用する圧力が静水圧以上に大きくなる可能性があることを踏まえれば、本解析結果以上に大きな地盤の劣化が発生する可能性がある。従って、入力する津波の条件によっては、少なくともN1=10よりも強度の低い地盤においては、深度1.0mを超えるオーダーで大きく地盤が劣化し液状化する可能性がある。

4. 津波の浸水深と周期による感度分析

(1) はじめに

本章では、津波の浸水深や周期を変数に感度分析を行い、同一の地盤条件下で、地盤内の有効応力に顕著な影響を与える津波の条件とはどのようなものなのかを明らかにしたい。さらに、それらの解析結果を用いて、津波による地盤内の有効応力への影響はどの程度の深さにまで及ぶのかについても考察を行う。

(2) 解析条件

地盤条件については、概ね前章と同一のパラメータを用いるが、地盤モデルは深度10mまでN1=5.0の一様な砂層とする(図-7)。一方、津波条件については、簡単のためにモデル地盤上の水位をsin波状に上下させることとする。本章では、津波の浸水深 H 、周期 T を変数に感度分析を行う。また、津波の連續性の影響についても検討

する。

津波による砂質地盤の液状化解析は次の14通りの津波波形を用いて実施した。すなわち、まずはsin波の正の半周期分の波形として、いずれも周期20minで浸水深が5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0mの6通り、いずれも浸水深が5.0mで周期が5, 10, 20, 30, 40, 50, 60minの7通り、次に周期20minで浸水深が5mのsin波の正の半周期分が連続する波形の1通りである。

(3) 感度分析の結果

a) 津波の浸水深

図-8は、GL-1.0m, GL-2.0m, GL-3.0m, GL-4.0m, GL-5.0m, GL-6.0mの各要素における相対有効応力減少比の最大値と津波の浸水深の関係をまとめたものである。この図から、相対有効応力減少比の最大値は、地盤の深さによらず、津波の浸水深に比例して増大することが分かった（ただし、相対有効応力減少比の最大値が0.8以上になると浸水深による増加傾向は鈍化する傾向がみられる）。その増加傾向は、地下の深い要素ほど顕著であり、例えば、GL-4.0要素とGL-6.0要素における比例係数の値を比較すると、それぞれ0.025, 0.008と3倍以上の差があることが分かった。換言すると、地下深くの要素であるほど、入力する津波の浸水深を変えても、相対有効応力減少比の最大値は大きく変化しない。

b) 津波の周期

図-9は、GL-2.0m要素における相対有効応力減少比の最大値と津波の周期の関係をまとめたものである。ただし、津波の浸水深Hは5mである。この図から、周期による影響は浸水深に比べると小さいこと、津波の周期が増加するほど相対有効応力減少比の最大値は増加するものの、周期20minを上限にほぼ頭打ちになることが分かる。周期が短い（10分未満）と、間隙水圧が十分に上がらない状態で水位が低下し始めるため、地盤劣化の程度は小さくなることが分かった。

c) 津波の連続性

図-10は、繰り返し来襲する津波に対する地盤の応答の様子である。繰り返し津波が来襲すると地盤の劣化の程度が次第に大きくなることが分かる。

(4) まとめ

津波の周期を変化させない条件の下では、大きな浸水深の津波ほど、地下深くまで津波により地盤が劣化する特徴があることが分かった。しかし、どれくらいの深さにまでその影響を与えることができるのかは、与えられた津波周期と地盤の特徴によって決定められる「限界」があると考えられる。

図-8を基に、津波による地盤の劣化を生じさせるのに

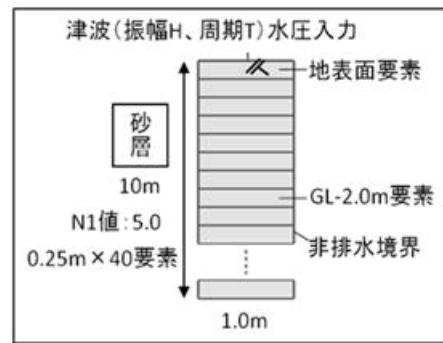


図-7 第4章で用いる地盤モデル

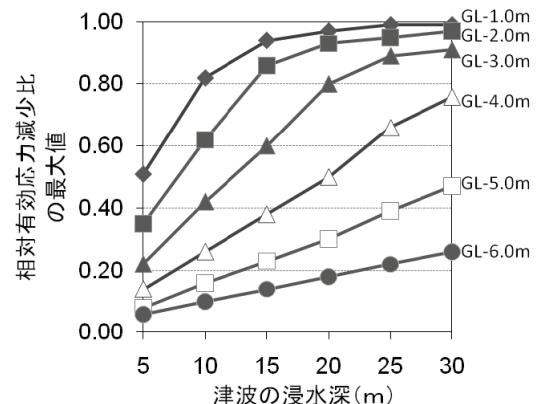


図-8 相対有効応力減少比の最大値と津波の浸水深の関係
(T=20min, N1=5.0)

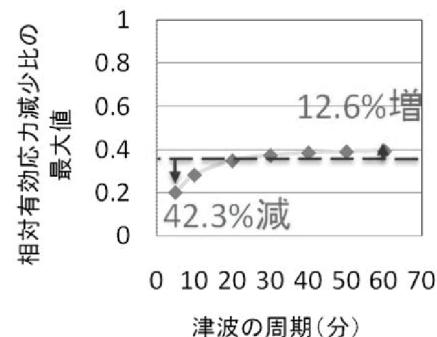


図-9 相対有効応力減少比の最大値と津波の周期の関係
(H=5m, GL-2.0m要素)

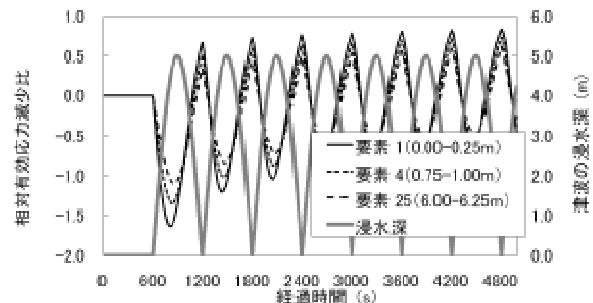


図-10 繰り返し来襲する津波に対する地盤応答 (H=5min, GL-2.0m要素)

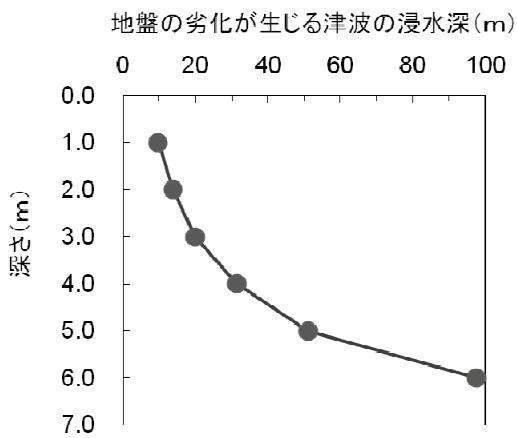


図-11 津波による地盤の劣化を生じさせるのに必要な津波の浸水深 (m) と地盤の深さの関係 ($T=20\text{min}$, $Nl=5.0$)

必要な津波の浸水深 (m) と地盤の深さの関係について、グラフを作成した (図-11)。ただし、ここでは相対有効応力減少比が0.80よりも大きくなつた状態を「地盤が劣化した」と呼ぶことにする。

地盤の深さが深くなるほど、その地点の地盤まで劣化させるのに必要な津波の浸水深は、著しく大きくなることが分かる。また、津波の周期を20minよりも短くすると地盤の劣化は発生しにくくなるので、図-11のグラフは右上へスライドすると考えられる。

5. 結論

津波による地盤上の水圧変動が地盤内の有効応力にどのような影響を及ぼすのかを明らかにするために、将来の東海・東南海・南海地震による津波を模擬して津波による砂質地盤の液状化シミュレーションを実施した。また、津波の浸水深や周期を変数に感度分析を行い、同一の地盤条件下で、地盤内の有効応力に顕著な影響を与える津波の条件とはどのようなものなのかを検討した。さらに、それらの解析結果を用いて、津波による地盤内の有効応力への影響はどの程度の深さにまで及ぶのかについても考察を行った。本研究における主要な結論を以下に列挙する。

(1) 津波来襲時の地盤の応答特性を明らかにした。すなわち、津波水位の上昇時には地盤の有効応力は増大し、一方で津波水位の降下時に地盤の有効応力は減少する。間隙水の圧縮性により、地盤上の水圧変動が間隙水圧に連動しないためにこうした有効応力の増減が生じ、地盤の劣化を生むと考えられる。

(2) 津波によって地表面付近における有効応力が初期値に対して約44%低下するなどの地盤劣化が確認され、

深さ方向にもその影響が伝搬していることが分かった。

(3) 地盤強度 $Nl=5, 10, 20$ と大きくなるほど津波による地盤の応答は小さくなる。しかし、深さ2.5mよりも地盤の浅い部分に関しては、 $Nl=10$ の場合と $Nl=5$ の場合とで相対有効応力減少比の最大値はほぼ同程度であった。従って、本解析条件では、入力する津波の条件によっては、少なくとも $Nl=10$ よりも強度の低い地盤においては、深度1.0mを超えるオーダーで大きく地盤が劣化する可能性があることが分かった。

(4) 本解析は1次元であったが、2次元解析ではより不安定になることが知られており（加藤⁸⁾），今後2次元解析を行う必要がある。さらに、津波来襲時の水中の気泡の多さを踏まえると、水の圧縮率はさらに大きくなる可能性がある。また、津波氾濫流に含まれる土砂を踏まえると、海底面上に作用する圧力が静水圧以上に大きくなる可能性もある。これらの点を踏まえれば、津波による地盤の劣化は本解析結果以上に大きくなり、地盤によっては液状化が生じる可能性もある。

(5) 津波の振幅 (5~30m) に対してはほぼ比例の関係で地盤が劣化すること、津波の周期 (5~60分) に対しては周期が長くなるにつれて地盤の劣化も大きくなるが周期20分程度で頭打ちになることが分かった。さらに、繰り返し津波が来襲すると地盤の劣化の程度が次第に大きくなることが分かった。ただし、相対有効応力減少比の最大値が0.8以上になると、浸水深がさらに大きくなることによる相対有効応力減少比の最大値の増加傾向は鈍化する。

(5) 津波の浸水深の増加に伴う相対有効応力減少比の増加傾向は、地下の深い地盤要素ほど顕著であることが分かった。地下深くの要素であるほど、入力する津波の浸水深を変えて、相対有効応力減少比の最大値は大きく変化しない。

(6) 浸水深が大きい津波ほど、地下深くまで地盤を劣化させる傾向がある一方で、どのくらいの深さにまでその影響が及ぶのかには限界があると考えられる。津波による地盤劣化の地下の深さ方向への拡大は、津波の浸水深を大きくしても地下3m, 4m以深で鈍化することが分かった。

本研究は、あくまで基礎的な検討として限定的な条件下で実施したものであるが、今後、実際に東海、東南海・南海地震によって、どれだけの海岸堤防や河川堤防が決壊するのかを広域的に予測するためには、津波が来襲する前に地震による液状化が発生している可能性があることも併せて評価しなければならない。

参考文献

- 1) 岡二三生、大槻正紀、鎌田彰、八嶋厚、三浦均也：波浪によ

- る防波堤の沈下のケーススタディ——北海道東部、奔幌戸漁港における現地調査結果一、土質工学シンポジウム平成6年度発表論文集、Vol.39、pp.219-226、1994。
- 2) 液状化解析手法LIQCA開発グループ(代表京都大学 岡二三生)： LIQCA2D09(2009 年 公開版 <http://nakisuna2.kuciv.kyoto-u.ac.jp/liqca.htm>)、2009.
- 3) Biot, M.A.: Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.28, No.2, pp.168-191, 1956.
- 4) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, Geotechnique, Vol. 49, No. 5, pp. 661-680, 1999.
- 5) Okusa, S. : Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments, Geotechnique, Vol.32, No.3, pp.235-247, 1976.
- 6) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編, pp.120-125, 2002.
- 7) 和歌山県：津波避難困難地域の公開について、和歌山県の施策と案内，和歌山県のウェブサイト (<http://www.pref.wakayama.lg.jp/index.html>)所収, 2007.
- 8) 加藤 満, 多次元液状化解析法とその応用に関する研究, 岐阜大学工学博士申請論文, 1995.

LIQUEFACTION ANALYSIS IN ONE DIMENSION OF THE SOIL GROUND DUE TO TSUNAMI

Yoshihiro OKUMURA, Ryosuke KATO and Fusao OKA

It is expected that the inundation induced by Tsunamis will damage the soil structure such as embankment. Estimation of the damage of soils structure such as embankment is important for disaster reduction. In the present paper, we have numerically studied the degradation of the ground due to Tsunami. As for the numerical method, we have used the liquefaction analysis method developed by one of the authors called "LIQCA". From the numerical results, it has been found that the degradation occur during the lowing of the water level, and the degree of degradation became larger with the higher maximum inundation level, the longer duration of wave or the more numbers of waves.