地盤改良を考慮した軟弱粘性土地盤上の河川堤防の液状化解析

京都大学大学	学院 学生会員	○松岡	浩志
京都大学大学	幹院 正会員	木元	小百合
京都大学大学	学院 学生会員	赤木	俊文

研究の背景と目的

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では, 東北地方から関東地方の広範囲にわたり2,000箇所以上の 河川堤防で甚大な被害が生じた.特に,堤体内部の地下 水面以下の砂質土が長時間継続地震動によって液状化す ることにより,天端の沈下とともに堤体内部が大きく変 状する被害が注目された.本研究では,このような堤体 の液状化対策工法として,既設構造物直下を直接地盤改 良できる,溶液型薬液注入工法の適用性について検討し た.

2. 数值解析手法

本解析では、空気-水-土の三相混合体について有限変形 理論に基づく定式化を行い、不飽和領域を考慮してモデ ル化した¹⁾.砂質土には繰返し弾塑性構成式²⁾,不飽和領 域については、構成式中の応力変数として骨格応力テン ソルを用い、サクションの変化による硬化・軟化、内部 構造変化による軟化の影響を考慮できるよう拡張した構 成式を使用した.粘土の構成式として繰返し弾粘塑性モ デル³⁾を用いた.また、改良砂については砂質土の構成式 を拡張した繰返し弾塑性構成式⁴⁾を導入した.以下にその 概要を示す.

特殊シリカによる浸透注入改良砂は、1) 破壊条件とし て粘着力成分を有する、2) 繰返し載荷に伴い変相線が応 力径路で初期の変相線より内側に移動するため、正のダ イレイタンシーが発揮される領域が拡大し変形が抑制さ れる、などの特徴を有する⁵⁾. そこで、過圧密境界面、降 伏関数、塑性ポテンシャル関数を以下のように与える. ・過圧密境界面

$$f_{b} = \overline{\eta}_{(0)}^{*} + M_{m}^{*} \ln\{(\sigma_{m} + b)/(\sigma_{mb} + b)\}$$
(1)

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{mbi} \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa}v^p\right) \left[1+S_i \exp\left\{-s_d\left(\frac{P_i^c}{P^c}-1\right)\right\}\right]$$
(2)

・降伏関数

$$f = \left\{ (\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*) (\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*) \right\}^{\frac{1}{2}} - k = 0, \ \eta_{ij}^* = S_{ij} / (\sigma_m' + b)$$
(3)

•	塑性ポテ	ン	シ	ヤ	ル	関数	2
---	------	---	---	---	---	----	---

$$g = \overline{\eta}_{\chi}^* + \widetilde{M}^* \ln\left\{ (\sigma_m' + b) / (\sigma_{ma}') \right\}$$
(4)

$$\tilde{M}^{*} = \begin{cases} \frac{M_{m}^{*}}{1 + \left(\frac{M_{m}^{*}}{\tilde{M}_{(n)}^{*}} - 1\right)} \exp\left(-\alpha_{1}\gamma_{ap}^{P^{*}}\right) \\ -\frac{\eta^{*}}{\ln\left(\sigma_{m}^{'} + b\right)/\left(\sigma_{mc}^{'} + b\right)} \dots \dots (f_{b} < 0) \end{cases}$$
(5)

$$\widetilde{M}_{(n)}^{*} = -\frac{\eta^{*}}{\ln\{(\sigma_{m}^{'} + b)/(\sigma_{mc}^{'} + b)\}}$$

$$b = b_{0} \exp\left(-\alpha_{2} \gamma_{ap}^{p^{*}}\right)$$
(6)
(7)

(1)式中のbは改良砂の粘着成分を表現するパラメータで ある. (2)式中の P^{c} は現在のサクション、 P_{i}^{c} は初期サク ション、 $S_{I}, S_{IB}, s_{d}, s_{db}$ はサクションパラメータである. b_{0} はbの初期値、 α_{1}, α_{2} は改良砂パラメータである.

3. 数值解析条件

図-1 に入力地震動,図-2 に堤防モデル例(堤体部を拡大),表-1 に解析ケースを示す.入力地震動は東北地方太 平洋沖地震の観測地震動(宮城県田尻,Kik-net,MYGH06)で ある.堤防モデルは,天端高さ6m,天端幅6mとし,堤 体および基盤上部は砂層,基盤下部は粘土層とし,基盤 の地表面下1.5mに地下水位を設定している.堤体内には 地下水面と基盤への沈み込み部分に挟まれた層厚2.5mの レンズ状の飽和砂層領域が存在するとしている.Case 1-1 は未改良ケース,Case C-1~Case C-3 は改良幅の影響につ いて検討するため,改良高さを2mとし改良幅をそれぞれ 24m,18m,9mとしたケースである.

解析に用いたパラメータを表-2,表-3 に示す.また, 砂層,薬液注入による改良砂,粘土層の液状化強度曲線 を図-3,砂層の水分特性曲線を図-4 に示す.改良砂のパ ラメータは特殊シリカ液による改良豊浦砂の非排水中空 ねじりせん断試験結果を参考に決定した.

液状化, 地震応答解析, 構成式 〒572-0867 大阪府寝屋川市高宮あさひ丘 41-1 TEL080-5340-4038 matsuokahiroshi 1223@gmail.com



parameter	Sanu(Er),	Clay(LVI)	8
	Improved sand(EP)		a °
Van Genuchten parameter α (1/kPa)	0.4	0.033	Ϋ́Υ
Van Genuchten parameter n'	3.0	1.083	
Minimum saturation smin	0.99	0.99	ig 4
Maximum saturation smax	0.00	0.00	Suc
Shape parameter of water permeability a	3.0	3.0	2
Shape parameter of gas permeability b	1.0	2.3	
Suction parameter S ₁	0.2	0.50	
Suction parameter s _d	0.1	0.25	Saturation
Suction parameter SIB	0.2	-	図 / 功屋の水八柱桝曲媜
Suction parameter S _{db}	0.1		凶-4 砂層の水力特性曲線

4. 数值解析結果

解析結果を図-5~図-7に示す.まず Case C-1, Case C-2, Case C-3 と Case 1-1の骨格応力減少比分布図(図-5)を 比較する.骨格応力減少比は(8)式で表される.ここで, σ_{m0} は初期状態での平均骨格応力, σ_m は現在の平均骨格 応力, b は改良砂の粘着成分を表現するパラメータであ る.完全に液状化すると平均骨格応力が-bになり,骨格 応力減少比は 1 になる.すべてのケースで飽和砂層およ び改良砂において液状化しており,改良幅を狭くした Case C-2, Case C-3においては改良域と未改良の飽和砂層 の間に応力が残存している部分が見られた.図-6の天端 中央の鉛直変位時刻歴を比較すると,Case C-1, Case C-2 では大きな改良効果が見られ,天端の沈下が約半分にま で抑制された.改良幅を9 m とした Case C-3 においても, 未改良の Case 1-1 と比べて 6 割程度にまで沈下が抑制さ れている. 図-7 に蓄積塑性偏差ひずみ分布図を示す. 蓄 積塑性偏差ひずみは(9)式で表される. 改良した領域では ひずみの発生が抑えられ, Case C-2, Case C-3 では堤体内 部のひずみも抑えられている.

(平均骨格応力減少比) =
$$\frac{\sigma'_{m0} - \sigma'_m}{\sigma'_{m0} + b}$$
 (8)



5. 結論

飽和砂層領域を有する河川堤防の液状化対策として, 薬液注入工法を適用したモデルの動的解析を行い,改良 幅の影響について検討した.その結果,改良幅を天堤端 幅の3倍以上に取ったケースでは堤体内の変形が抑えら れ,天端の沈下量も約半分に抑制された.

参考文献

1) 由井洋和, 木元小百合, 岡二三生: 第 50 回地盤工学研究発表 会, No.923, 2015. 2) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: *Geotechnique*, **49** (5), pp. 661-680, 1999. 3) Oka, F. and Kimoto, S.: Qing Yang et al. eds., Advances and New applications, Springer, pp.215-221, 2012. 4) 大野康年: 京都大学博士論文, 2006. 5) 岡二三生, 小高猛司, 大野康年: 土木学会論文集 C, **64** (3), pp.571-584, 2008.