

Seismic Response Analysis of Deep Saturated Soil Covering Layers on Fluid-Solid Coupling Element

Wei Zhang

Shanghai Tunnel Engineering and Rail Transit Design & Research Institute, Shanghai
Email: zhweizi@126.com

Received: Jul. 6th, 2017; accepted: Jul. 20th, 2017; published: Jul. 24th, 2017

Abstract

Based on fluid-solid coupling element, long-period seismic waves and common waves were selected for seismic responses analysis of typical deep saturated soil covering layers, and dynamic transient responses of fluid-saturated two-phase porous media were discussed. The result shows that, comparing with common waves excitation, the acceleration and displacement response were increased when under long-period seismic waves excitation. The shallower buried depth may lead in the higher pore water pressure ratio, which was also affected by the magnitude of excitation, duration time and seismic energy distribution.

Keywords

Saturated Soil Layers, Deep Deposit Site, Fluid-Solid Coupling Element, Seismic Response Analysis, Long-Period Seismic Waves

基于流固耦合单元的深覆盖饱和土层场地地震分析

张 巍

上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海
Email: zhweizi@126.com

收稿日期: 2017年7月6日; 录用日期: 2017年7月20日; 发布日期: 2017年7月24日

摘 要

基于流固耦合单元, 对典型深覆盖饱和软土场地进行了不同频率成份地震波作用下的响应分析, 研究了

基于饱和介质理论的深软场地地震瞬态响应问题。计算结果表明，长周期地震动作用下的场地地表地震加速度和位移反应均大于普通地震波，土层的孔压比与埋深成反比，并受到地震动强度、持时和能量分布的影响。

关键词

饱和土层，深覆盖场地，流固耦合单元，地震反应分析，长周期地震动

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

两相饱和土介质的动力特性远比单项固体介质复杂，因此对土体动力特性的研究往往都视其为简单的单相介质。显然，采用两相饱和土介质模型，即有效应力方法比采用单相固体介质来研究饱和土体的动力响应更为合理，更具有实际意义[1] [2] [3]。与总应力方法相比，有效应力方法不但提高了计算精度，更加合理地考虑了动力作用过程中土体动力性质的变化，而且还可以预测动力作用过程中孔隙水压力的变化过程、土体液化的可能性及土层软化对场地自振周期及地面振动反应的影响。

本文利用流固耦合单元，分别采用普通地震波和长周期地震波，对某典型深覆盖饱和和软土场地进行地震响应分析，研究了基于饱和介质理论的深软场地的地震瞬态响应问题，得出了一些有意义的结论。

2. 分析方法

Biot 固结理论于 1941 年首次提出，是可以准确反映孔隙压力消散与土骨架变形之间耦合作用的真三维固结理论[4]。Biot 固结方程可表示为：

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma}' - \alpha p \boldsymbol{I}) + \boldsymbol{f} = 0 \\ \alpha \varepsilon_v^e + \frac{1}{K_m} \dot{p} + \nabla \cdot \boldsymbol{q} = s \end{cases} \quad (1)$$

式中， $\nabla \cdot$ 为向量或二阶张量散度算子， $\boldsymbol{\sigma}'$ 为有效应力张量， α 为 Biot 系数， p 为孔隙压力， \boldsymbol{I} 为二阶恒等张量， \boldsymbol{f} 为体力， ε_v^e 为弹性体积应变， K_m 为 Biot 模量， \boldsymbol{q} 为流量矢量， s 为流源。流量与孔压的关系符合达西定律： $\boldsymbol{q} = -k \nabla p$ ，其中 k 为二阶渗透系数张量， ∇ 为梯度算子。

3. 场地土层模型与地震波选取

3.1. 场地土层

选取某典型深覆盖土层场地[5] (表 1)，利用流固耦合单元建立有限元模型[6]，研究饱和两相介质在地震作用下的响应结果。饱和土体的抗液化强度和振动孔隙水压力与振前应力状态有关，应首先计算初始应力场，得到各个单元的初始应力水平。地震动时程作用持续时间很短，可认为地表位置的孔隙水来不及排出，在分析中采用不排水边界。

3.2. 地震波选取

地震动的选取对计算结果的影响不容忽视，深覆盖软土场地通常对长周期地震动亦有放大作用。本

Table 1. Material parameters of deep soil layer site
表 1. 典型深覆盖场地土层的力学参数

编号	土层名称	层顶埋深 /m	厚度 /m	密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	剪切波速 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	c /kPa	φ ($^{\circ}$)	ν	k / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
1	黏性土	0	3	1900	110	10	23.8	0.33	1.5×10^{-8}
2	淤泥质粉质黏土	3	7	1750	190	15.6	14	0.35	1.5×10^{-9}
3	淤泥质黏土	10	10	1750	170	13.4	12	0.38	1.5×10^{-9}
4	黏性土	20	5	1820	160	10	23.8	0.30	5.8×10^{-7}
5	黏性土	25	5	2000	180	26	22.3	0.30	1.2×10^{-8}
6	粉细砂	30	15	1920	250	0	34	0.28	1.2×10^{-5}
7	粉质黏土夹粉砂	45	30	1900	230	10	25	0.33	5.8×10^{-7}
8	细、中、粗砂	75	20	1950	320	0	32	0.28	6.0×10^{-5}
9	黏性土	95	15	2000	388	10	23.8	0.33	5.8×10^{-7}
10	含砾中、粗砂	110	30	2020	350	0	35	0.28	2.3×10^{-4}
11	黏土	140	30	2040	380	26	28	0.35	1.2×10^{-8}
12	含砾中、粗砂	170	60	2060	400	0	35	0.28	1.8×10^{-4}
13	黏土	230	30	2080	430	26	28	0.35	1.2×10^{-8}
14	中、粗砂	260	20	2100	520	0	33	0.28	2.3×10^{-8}
15	基岩	280	—	—	—	—	—	—	—

文从太平洋地震工程研究中心和日本地球科学与防灾研究中心的强震记录库中选取 5 条不同频率成分的地震波(见表 2)，并将峰值统一调整为 100 gal，其中普通地震动时程记录包括 El Centro 波和 Taft 波，长周期分量丰富的地震动时程记录包括 Loma Prieta 波、Chi-Chi 波和 Tokachi-oki (十胜冲)波。图 1 中分别列出了 5 条地震波的加速度反应谱，从图中可以看出，普通地震波反应谱谱值主要集中在 0~2 s 之间，2 s 后谱值迅速下降；长周期地震波反应谱谱值分布则更为宽泛，2 s 后长周期部分依然具有较大的谱值，Tokachi-oki 波的谱值长周期特征更为明显，周期到达 4 s 后谱值仍然保持在 0.5 左右。

4. 深覆盖饱和土层场地地震响应分析

图 2 中列出了单相介质自由场和饱和两相介质自由场在不同地震动作用下场地沿深度方向的加速度幅值。可以看出，两种介质得到的曲线规律基本一致，但加速度幅值结果不尽相同。这可能是由于振动过程中孔隙水压力变化对计算体系刚度的影响造成的。为明显起见，将两种分析方法得到的地表水平向加速度反应幅值和位移反应幅值列入表 3 中。可以看出，饱和两相介质自由场的地表响应幅值均大于单相介质自由场。相差最大的是 Taft 波作用下的结果，加速度幅值和位移幅值分别达到了单相介质场地的 1.21 倍和 1.09 倍。但无论是基于单相介质还是饱和两相介质，长周期地震动作用下的加速度和位移反应均大于普通地震波，而且长周期对于地表位移反应的放大效应也强于加速度反应，深覆盖土层的滤波效应明显。

流固耦合单元随着地震作用产生的孔压比是影响场地地震响应结果的重要指标，图 3 中列出了场地不同土层的孔压比结果曲线。限于篇幅，图中仅列出了第 3 层淤泥质黏土、第 4 层黏性土和第 6 层粉细砂中点位置处的孔压时程曲线。由图 3 可知，埋深越浅的位置孔压比越大，由于场地土层有效应力随着观测点位置埋深增大而增大，而土层的地震响应又随着埋深的增大而减小，这与实际的地震震害调查经验相一致。

Table 2. Seismic wave records selected
表 2. 文中所选的典型地震动记录

地震名称	时间	测站信息	PGA (gal)	持时(s)
Imperial Valley	1940/5/18	El Centro #9	341.695	53.73
Kern Country	1952/7/21	Taft, Lincoln School	175.9	54.40
Loma Prieta	1989/10/18	Upper Crystal Springs Res	84.782	40.00
Chi-Chi,Taiwan	1999/9/21	Taichung, TCU085	63	75.00
Tokachi-oki	2003/9/26	Asahi, HKD031	33.84	132.00

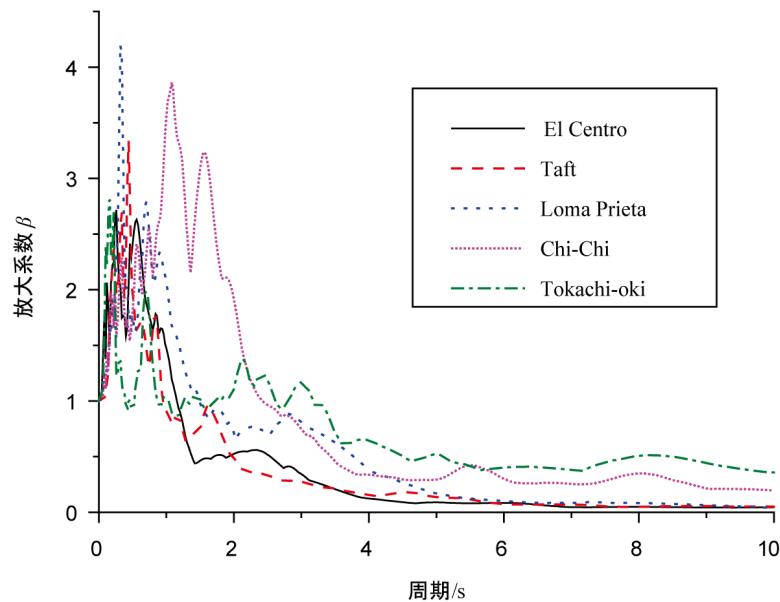


Figure 1. Acceleration response spectrum of seismic wave records selected
图 1. 选取地震动的加速度反应谱

地震动持时也对孔压比有明显的影响，Tokachi-oki 波由于持时是其它地震波的两倍(80 s)，流固耦合单元的孔压比也相比其它地震动时程有明显的积累。孔压比增长的速率，与地震波能量在整个时间历程内的分布也有直接关系，幅值出现得晚，孔压比增加得也较缓。

将输入的地震动幅值统一调整为 220 gal，得到的场地土层的孔压比时程曲线列于图 4 中。可以看出随着地震输入能量的增大，孔压比也明显增加。Tokachi-oki 地震时程结束后，淤泥质黏土层的孔压比达到了 0.56。

5. 结论

- 1) 饱和土体场地地震反应分析时，基于流固耦合单元的两相饱和土介质模型可以考虑孔隙水的影响，比采用单相固体介质来研究饱和土体的动力反应更为合理，更具有实际意义；
- 2) 输入地震动时程的频率特性对结果有明显影响，长周期地震动作用下的场地地震加速度和位移反应均大于普通地震波；
- 3) 孔压比时程曲线受土层埋深与地震动强度、持时和能量分布的影响。埋深较浅的土层孔压比较大，在强震作用下的饱和土场地地震响应分析时，应充分考虑地震动特性综合分析；

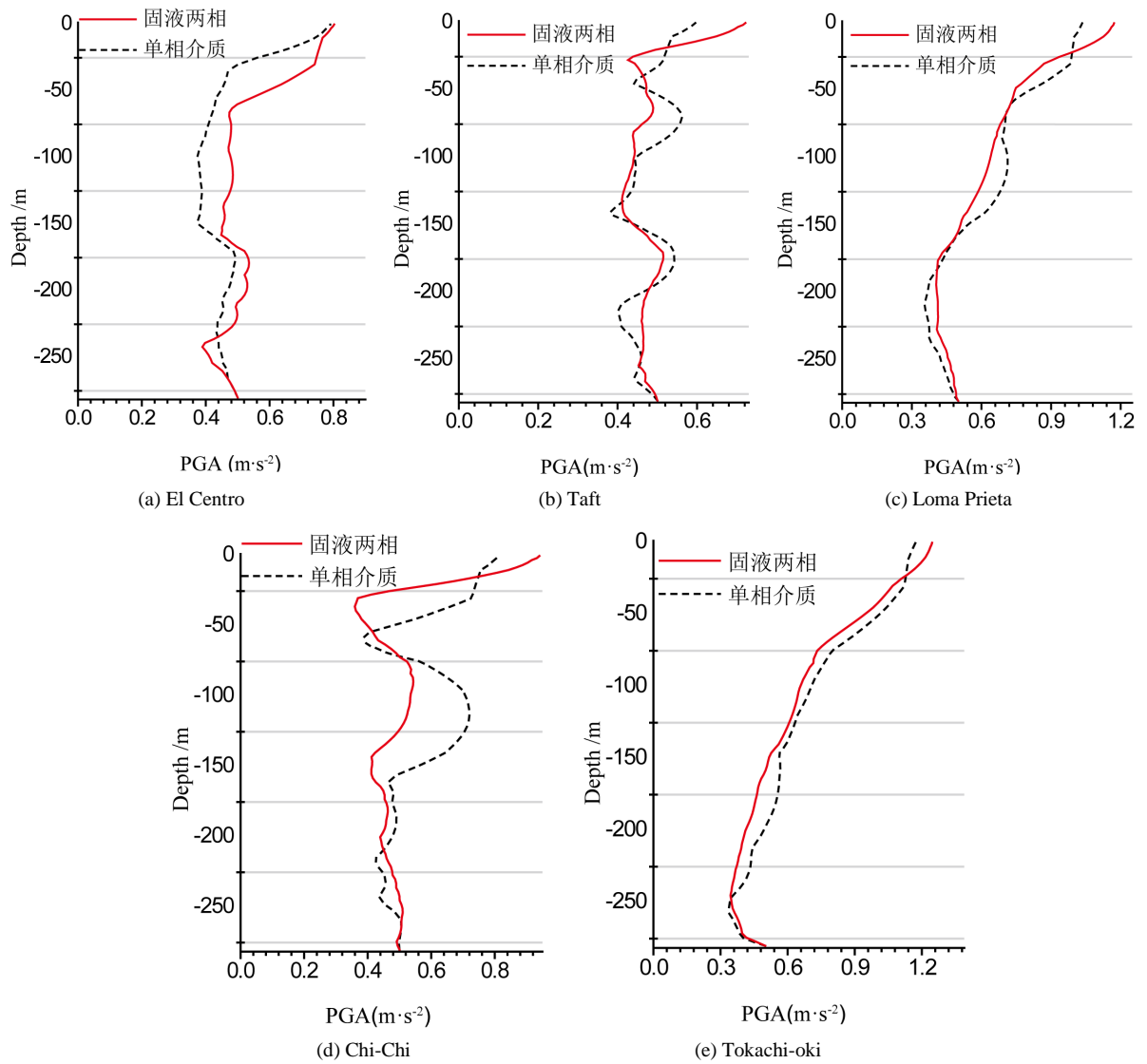


Figure 2. Comparison result of PGA

图 2. 场地地震加速度响应幅值对比结果

Table 3. Amplitude of seismic responses of site surface

表 3. 二维场地地震反应地表结果幅值

地震波	水平向加速度(gal)		水平向位移(cm)	
	单相介质	两相饱和介质	单相介质	两相饱和介质
El Centro	78.98	80.20	6.64	7.06
Taft	59.58	72.18	4.68	5.12
Loma Prieta	103.44	117.17	15.69	16.56
Chi-Chi	81.16	94.06	14.75	15.76
Tokachi-oki	117.15	124.62	21.48	22.56

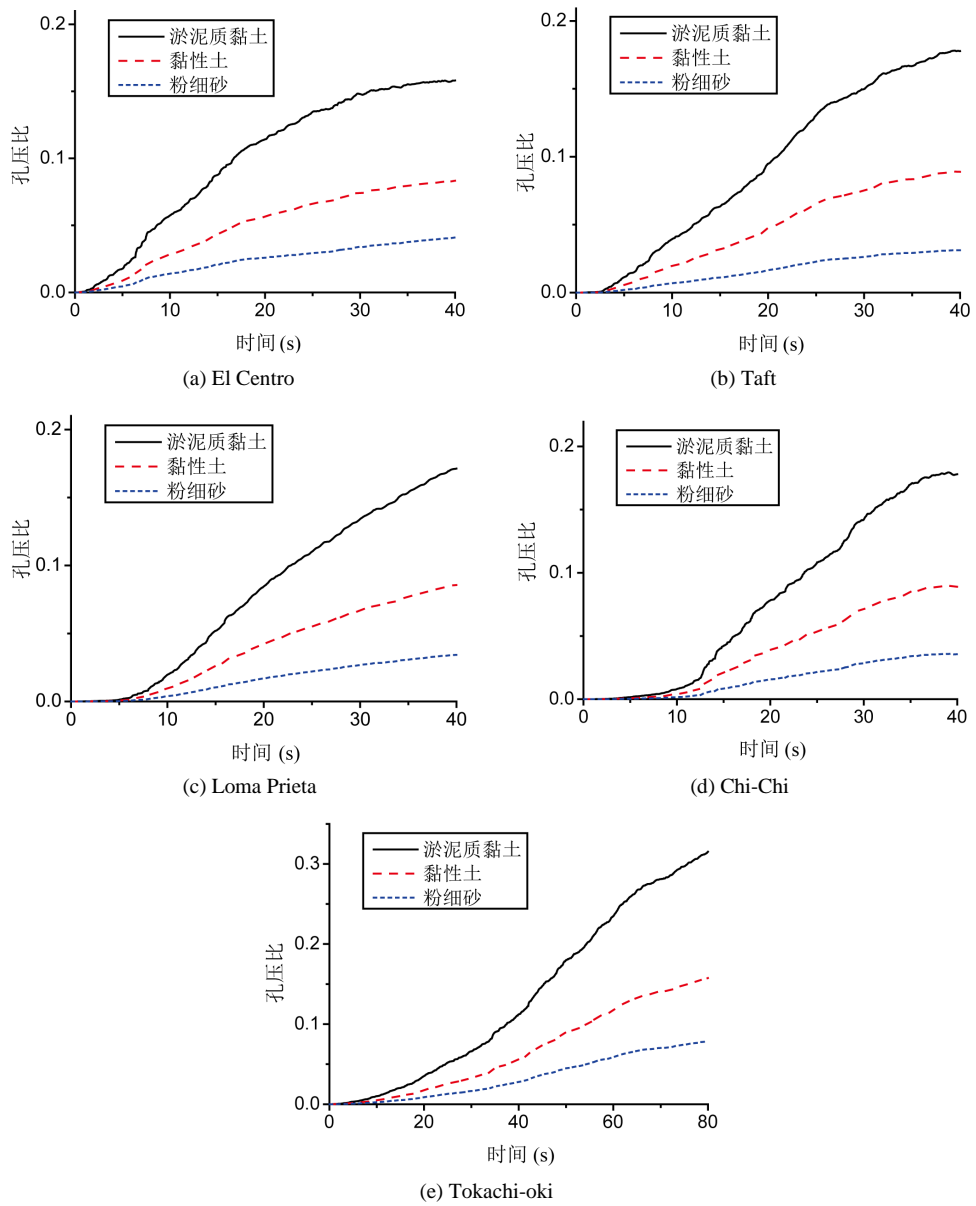
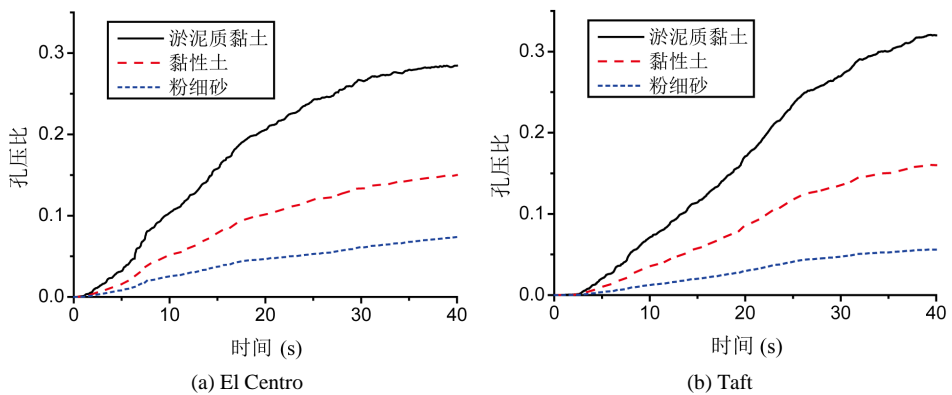


Figure 3. Comparison result of time-history curves of pore water pressure ratio

图 3. 孔压比时程曲线的对比结果



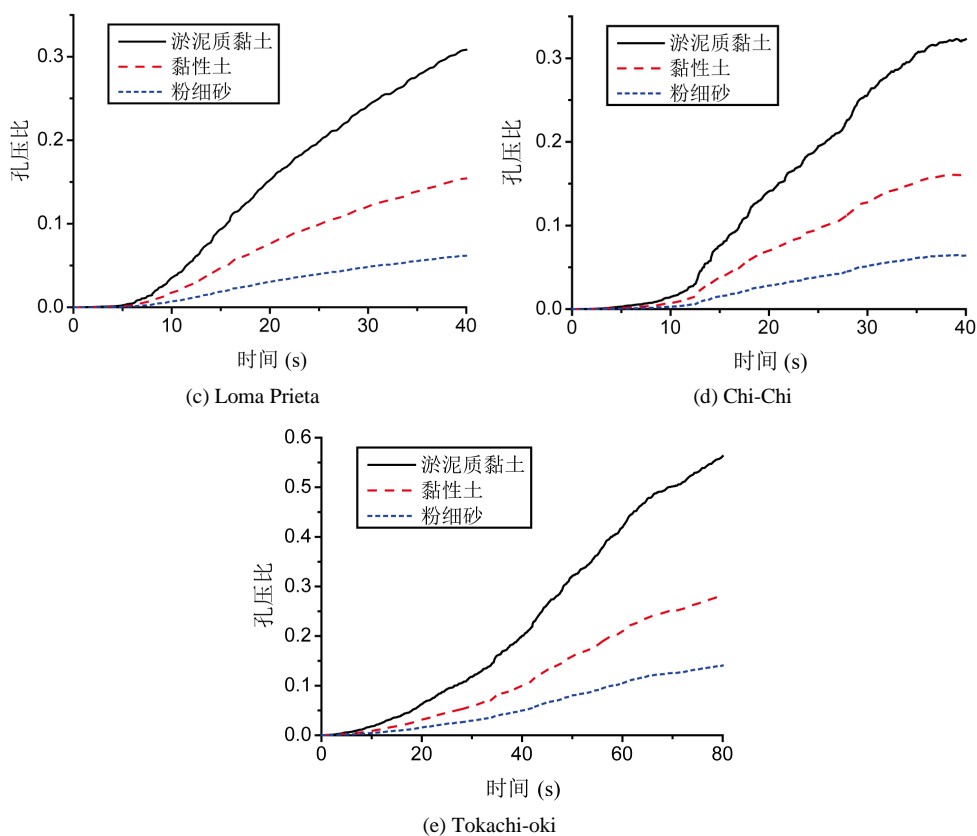


Figure 4. Comparison result of time-history curves of pore water pressure ratio

图 4. 孔压比时程曲线的对比结果

4) 由于采用了不可压缩的流固耦合单元, 饱和土体场地地震反应过程中无法考虑土体震陷和地震动峰值过后孔隙水的消散过程, 需要在后续工作中进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 徐志英, 沈珠江. 地震液化的有效应力二维动力分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1981(3): 1-14.
- [2] 董云, 楼梦麟. 基于饱和多孔介质的复杂自由场地地震响应分析[J]. 同济大学学报. 2014, 42(2): 198-202.
- [3] 张巍. 土-桩-桥梁结构非线性相互作用体系长周期地震反应的并行计算[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2013.
- [4] Biot, M.A. (1941) General Theory of Three Dimensional Consolidation. *Journal of Applied Physics*, **12**, 155-164. <https://doi.org/10.1063/1.1712886>
- [5] 黄雨, 叶为民, 唐益群, 等. 上海深厚饱和覆盖土层的动力耦合地震反应分析[J]. 岩土力学. 2002, 23(4): 411-416.
- [6] Schiffman, R.L. (1969) An Analysis of Consolidation Theories. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the ASCE*, **95**, 285-312.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org