文章编号：1000－7598 (2011) 02－0429－06

高饱和度饱和土中爆炸波与结构的相互作用

穆朝民[1,2]，齐 娟[3]，辛 凯[4]

（1.安徽理工大学 能源与安全学院，安徽 淮南 232001；2. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室，安徽 淮南 232001；
3. 安徽理工大学现代教育技术中心，安徽 淮南 232001；4.总参工程兵科研三所，河南 洛阳 471023）

摘 要：利用改进的ϕ2.5 mm×5 m 的模拟爆炸装置进行了一系列爆炸波与结构相互作用的实验，得出了爆炸波作用下结构上的表面压力、动量、应变的实测波形。实验结果表明，由于结构刚度较小，在相同爆心距离条件下结构的荷载与自由场的压力值相差不大；荷载在顶板的分布较为均匀，结构在爆炸载荷作用下发生整体变形，可以用中心荷载代替整体荷载；结构对爆炸波的反射，无论是弹性波还是冲击波，反射规律基本一致。随着饱和度的增大，结构上的反射系数和爆炸冲击波波速也随之增大。

关 键 词：爆炸力学；饱和土；爆炸波；实验研究
中图分类号：O 383$^+$.1 **文献标识码：**A

Interaction between blast wave and structure in highly saturated soil

MU Chao-min[1,2], QI Juan[3], XIN Kai[4]

(1. School of Energy Resources and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;
2. Key Lab of Mining Coal Safety and Efficiently Constructed by Anhui Province and Ministry of Education, Huainan, Anhui 232001, China;
3. Center of Modern Educational Technology; Anhui University of Science and Technology; Huainan, Anhui 232001, China;
4. The Third Engineer Scientific Research Institute of the Headquarters of the General Staff, Luoyang, Henan 470123, China)

Abstract: Using ϕ2.5 mm×5 m pothole, the experimental study of the interaction between blast wave and structure in highly saturated soils is accomplished systematically. According to recorded waveforms of stress, strain and momentum, the experimental results are interpreted. The experimental results indicate that blast loads on structure are not much more than value of pressure in free field; loads on roof of structure are more uniform than expected value; the overall deformation of structure is generated under blast loads, central loads are used to take place the entire loads; whether or not there is the shock wave, the law of reflection is the same; blast wave velocity and the reflection coefficient of structure increase with saturation degree.

Key words: mechanics of explosion; highly saturated soil; blast wave; experiment study

1 引 言

由空气、水和土骨架组成的饱和土表现出的介质性质不同于空气、水和土骨架中的任意一种成分。高饱和度饱和土中爆炸波在传播时，因其含气量极少，气泡呈封闭状态导致爆炸波保持波阵面陡峻特征。当爆炸波作用于饱和土中的结构时，极易导致结构的破坏和产生强烈的震动。因此，研究结构在爆炸波作用下的荷载分布特征具有十分重要的意义。

20 世纪 70 年代以前苏联 ляхов[1]、俄罗斯 Dontsov[2−4]、美国 Drake 与 Enery[4−6]进行了大量爆炸波在饱和土/砂传播规律的实验与理论研究，并取得了丰富的成果。国内学者赵跃堂[7]、王明洋[8]、国胜兵[9]、孙美凤[10]、杨海杰[11]、刘建新[12]等对爆炸载荷作用下饱和土/砂的动力学问题进行了研究；尤红兵[13]、陆建飞[14]、夏唐代[15]、李立云[16]、蔡袁强[17]、徐平[18]等对饱和土的波动问题进行了研究。以上研究促进了饱和土波动力学的发展。

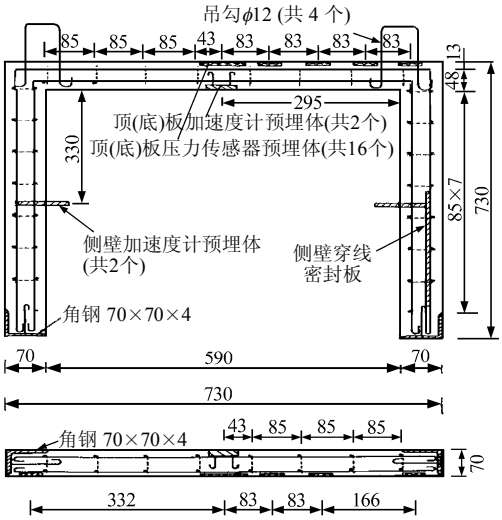
本文考虑结构处于遮弹层以下，由于遮弹层的保护结构所受荷载不是很高，饱和度在 97.5%以上

收稿日期：2010-03-23
基金项目：国家自然基金（No. 50874005）；中国博士后科学基金面上资助（No. 20090461418）。
第一作者简介：穆朝民，男，1977 年生，博士，在读博士后，主要从事工程安全与防护技术方面的研究。E-mail: chmmu@mail.ustc.edu.cn
通讯作者：齐娟，女，1981 年生，硕士，主要从事实验量测、计算机仿真方面研究。E-mail: jqi@aust.edu.cn

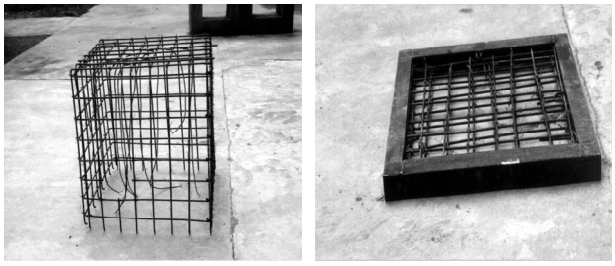
的高饱和土样，利用改进的ϕ2.5 mm×5 m 的模拟爆炸装置进行了一系列爆炸波与结构相互作用的实验，得出了爆炸波作用下结构上的荷载分布规律。

2 试验方案

本次试验设计的结构为ϕ6.5 mm 的钢筋制成的正方体整体结构，结构外形及结构配筋如图 1(a)所示。4 个侧墙与结构顶板（双向受力板）为一次性浇筑，并使用角钢焊接密封底板与侧墙之间的缝隙，如图 1 所示。



(a) 结构配筋图 (单位：mm)

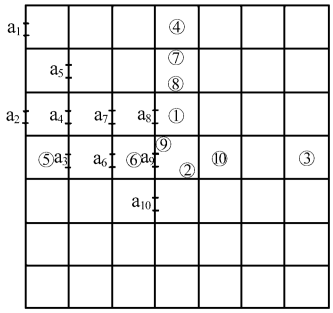


(b) 结构施工钢筋图

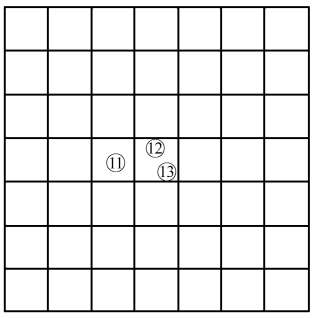
图 1 结构设计图

Fig.1 Schematic of structure

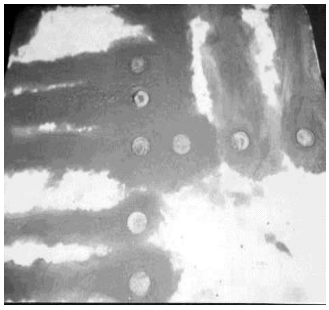
炸药位于结构中心的正上方，如图 2 所示，压力传感器布置见图 2(a)～2(c)。结构上表面与传感器上表面平齐，用水泥将传感器下表面与结构顶板粘牢。把 3 个压力传感器水平放置在结构底板中心上，见图 2(b)。将 10×3 的 120 Ω 的应变片粘贴于结构的纵向拉筋处并密封。由于正方形双向受力板的对称性，在板的对角线（屈服线）上贴应变片，见图 2(a)、2(c)。



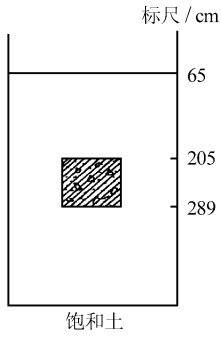
(a) 顶板表面压力传感器与应变测点布置



(b) 顶板表面压力传感器测点布置



(c) 平面布置



(d) 纵向布置

图 2 试验布置图

Fig.2 Schematic of test

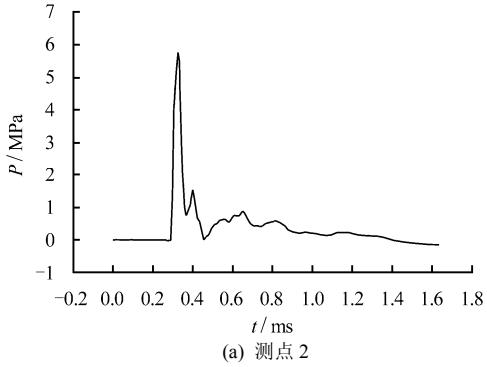
3 试验结果和分析

对饱和土施加(50～200)g 的 TNT 块状装药爆炸，测得压力参数见表 1。图 3 为 50g TNT 爆炸下饱和土中结构中心测点 2、9 的压力波形，由图 3 可见，布置在同一点的传感器的压力波形在峰值大小与时间上大体一致，测试结果基本可信。

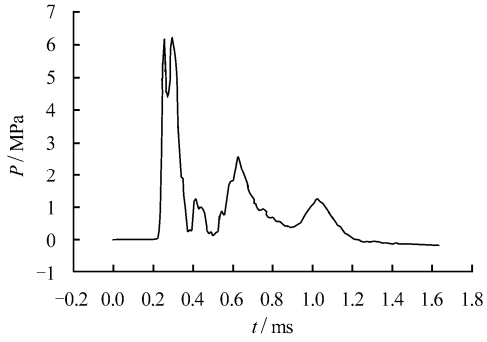
表 1　饱和土中结构各测点压力参数

Table 1　Parameters of pressure on structure on in saturated soils

药量 / g	中心距 / cm	到达时间 / ms	上升时间 / μs	峰值时间 / ms	正压时间 / μs	冲量 / MPa	压力值 / MPa
50	0	0.828	28.0	0.856	104.8	394.9	4.29
		0.829	20.0	0.857	97.6	383.7	4.51
	11.43	0.828	14.4	0.843	120.8	402.6	4.23
		0.840	20.0	0.862	128.8	803	11.36
		0.825	13.6	0.84	116.8	430.7	4.31
	22.86	0.832	16.0	0.849	94.4	385.2	4.53
		0.824	14.4	0.841	112.8	400.8	4.43
	34.29	0.828	14.4	0.844	116.0	465.5	4.40
	底板 0	1.414	128.0	1.414	92.8	86.39	1.19
		1.405	115.0	1.405	71.2	75.23	1.19
50	0	0.889	51.2	0.94	118.4	245.7	5.62
	11.43	0.882	20.8	0.903	76.0	214.4	5.55
		0.856	27.2	0.883	125.6	256.4	7.73
		0.830	17.6	0.849	138.4	361.3	7.13
	22.86	0.830	24.0	0.853	145.6	415.8	5.92
		0.818	28.8	0.847	140.8	273.0	4.37
	34.29	0.920	8.8	0.928	34.4	142.2	8.84
	底板 0	1.475	89.6	1.565		21.83	0.37
		1.475	131.2	1.606		18.21	0.37
100	0	0.972	44.8	1.016	123.2	263.2	3.57
	11.43	0.948	34.4	0.982	79.2	241.8	6.48
		0.91	55.2	0.965	73.6	180.2	5.80
		0.868	44.0	0.912	100.0	383.0	5.03
	22.86	0.876	28.0	0.904	327.2	206.2	3.37
		0.869	43.0	0.964	264.8	512.4	2.48
	34.29	1.026	9.6	1.036	31.2	343.5	17.85
	底板 0	1.528	94.4	1.622	281.6	19.47	0.22
		1.549	152.0	1.701	254.4	23.75	0.22
150	0	1.020	46.4	1.066	144.8	383.99	3.490
	11.43	1.037	17.6	1.037	42.4	193.70	8.570
		0.951	22.4	0.973	70.4	231.23	4.540
		0.913	83.2	0.996		752.39	4.740
	22.86	0.900	32.0	0.932	107.2	364.45	4.750
		0.946	24.8	0.970	77.6	141.42	3.190
	34.29	1.077	12.0	1.089	34.4	456.58	35.960
	底板 0	1.264	142.4	1.406	305.0	15.34	−0.195
		1.302	147.2	1.468	444.0	21.58	−0.181
200	0	0.776	1.457	23.2	108.0	579.96	23.55
	11.43	0.771	1.455	20.8	45.6	444.91	18.06
		0.742	1.398	48.8	71.2	296.79	15.56
		1.009	1.087	78.4		346.40	4.64
	22.86	0.665	1.338	36.8	203.2	552.90	4.50
		0.623	1.336	30.4	232.8	669.43	1.13
	34.29	0.720	1.411	53.6	120.8	492.51	8.80
	底板 0	1.018	1.856	838.4		60.54	0.39
		1.075	1.824	748.8		61.01	0.36



(a) 测点 2



(b) 测点 9

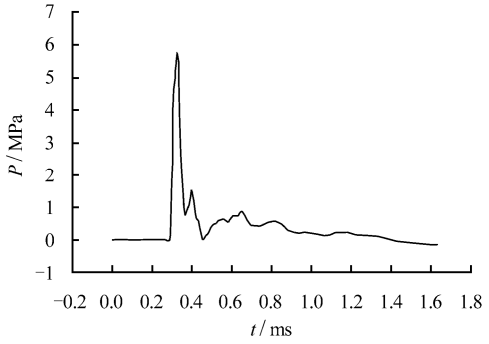
图 3　50*g* TNT 爆炸载荷作用下结构顶板中心压力

Fig.3　Pressure in center of structure's roof (50*g* TNT)

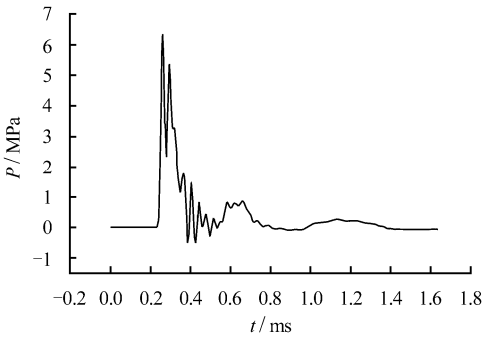
图 4 为 50*g* TNT 爆炸下饱和土中结构测点 2、1、6、5 的压力波形，测点布置是由中心到结构的边缘。由图 4 可以看出，爆炸的压力和时间基本相同，可以说明压力在结构的表面分布近似相同。爆炸的波形表现出的是冲击波的特点，结构上的荷载较大。压力波形中都存在第 2 个波峰，这是由于结构反射引起的。荷载在结构顶板的分布较为均匀，在结构顶板压力大小与时间处于同一量级上，主要是由于饱和土的本构关系决定的。饱和土在爆炸荷载作用下发生液化，这时饱和土的剪切模量和剪切应力等于 0，饱和土介质表现为流体的性质，在介质微单元上各个方向主应力相同，剪应力为 0，即发生各向同性的传递压应力，因此结构上由于位置不同造成与爆心夹角不同的影响已经没有。另外，由于饱和土的波速较快，由于传播距离不同造成的荷载衰减的影响也不明显，因此结构上的荷载分布相差不大，可以用结构中心的荷载来代表整体的荷载分布。

由表 2 和图 5 可知，在相同爆心距条件下，结构的荷载与自由场的压力值相差不大（部分正反射系数在 0.5～1.0 之间），但结构上的冲量却比自由场大 2 倍，如表 1 所列（对压力进行时域积分得出冲量），这主要是由于饱和土在高频与高压作用下出现了同步液化造成的[10]。由于埋设结构的刚度较小和饱和土的变形模量的同步升高，致使在相同动力变形条件下，结构和饱和土模量的差别减小，但当

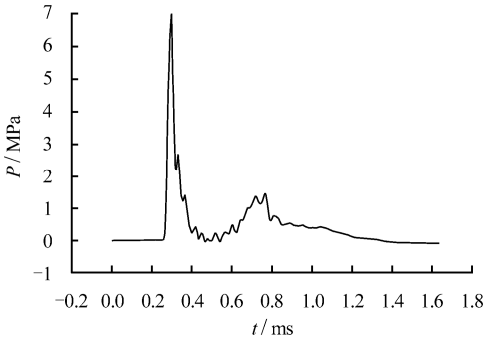
爆炸波在刚体障碍物表面发生反射时，随着爆炸荷载增大反射系数可能大于 2（由文献[6]可知，应力-应变关系变化越剧烈，反射系数就越大）。虽然结构上的压力增加有限，但随着冲量的增加致使结构上的总荷载迅速增加，此时若结构模量远大于饱和土那么结构将处于更加不利的条件。



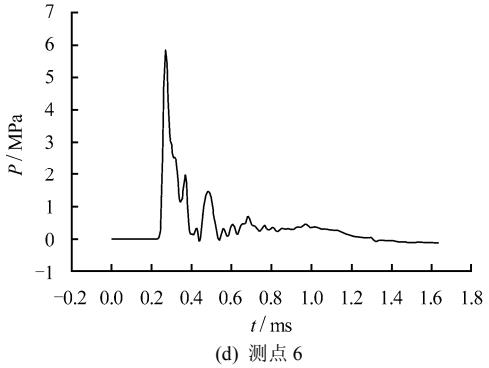
(a) 测点 1



(b) 测点 2



(c) 测点 5



(d) 测点 6

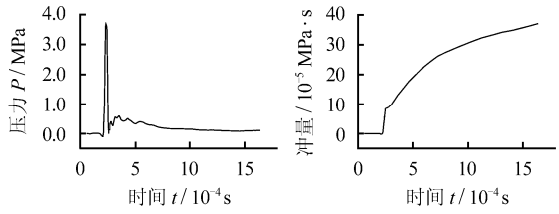
图 4 50*g* TNT 爆炸载荷作用下结构顶板中心压力

Fig.4 Pressure in center of structure's roof (50*g* TNT)

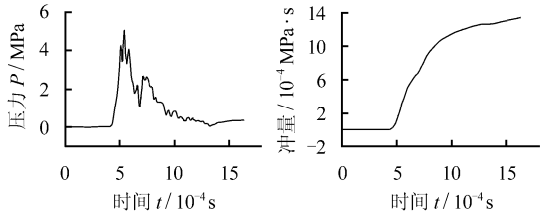
表 2 饱和土中结构正反射系数

Table 2 Coefficient reflection of structure

结构	装药量 / g	爆心距离 / m	平均压力 / MPa	饱和度 / %	波速 / (m/s)	自由场回归公式计算压力 / MPa	反射系数
顶板	50	1.30	4.3	99.1	1 577	4.7	0.91
	50	1.30	5.6	98.9	1 462	4.1	1.38
	100	1.27	3.6	98.4	1 360	7.2	0.50
	150	1.25	3.5	97.8	1 225	9.0	0.39
	200	1.24	23.6	99.3	1 600	20.4	1.15
底板	50	2.14	1.2		1 577	1.2	
	50	2.14	0.4		1 462	1.0	
	100	2.11	0.2		1 360	1.7	
	150	2.09	0.2		1 225	2.1	
	200	2.08	0.4		1 600	4.8	



(a) 自由场压力及冲量



(a) 与自由场同深度结构压力及冲量

图 5 同深度模型结构和自由场压力、冲量对比

Fig.5 Substructure model experiment vs. free-field experiment

顶底板的正反射系数由相同波速与爆心距代入自由场回归公式计算所得压力与结构顶板和底板的压力值相比得出，其值见表 1。

结构顶板内侧沿对角线附近的钢筋应变实测波形见图 6。从图中可看出，各点应变波形相位基本一致，说明顶板产生的是整体变形，如果荷载再增大，顶板将发生整体破坏。

结构顶板内侧钢筋应变实测数据见表 3。由表可见，压应变峰值时间与结构顶盖压力峰值时间基本接近，这是由于压应变是侧墙压力引起的；拉应变峰值时间比压应变峰值时间晚 0.2～0.6 ms，是由于拉应变是顶盖挠曲变形引起的，可见顶盖出现最大挠曲变形时间比顶盖压力峰值时间要迟 0.2～0.6 ms；顶盖实测应变一般都小于 1 000 με，说明结构在试验时处在弹性工作阶段。从试验后的宏观观察，结构没出现任何裂缝和残余挠度，这与实测应变结果相吻合。

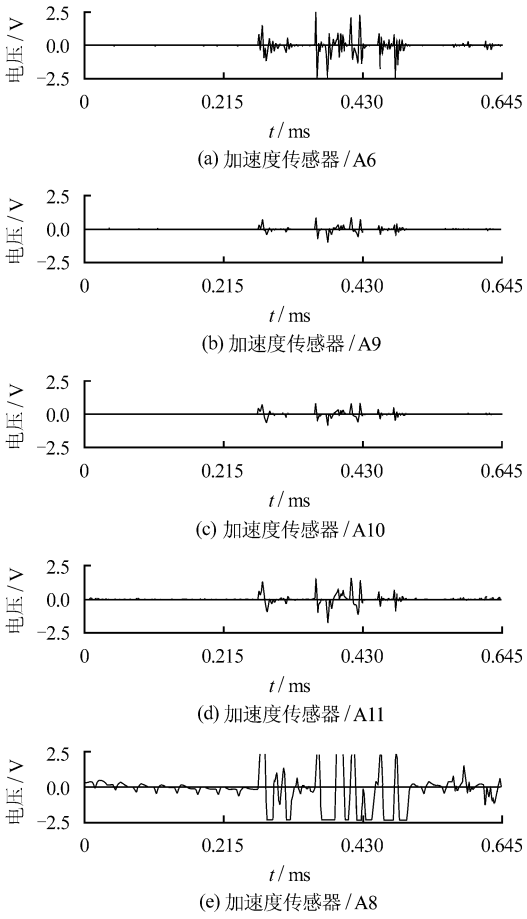


图 6　饱和土中 50*g* TNT 爆炸结构顶板内侧钢筋应变波形
Fig.6　Waveforms of strain of inner side of steel bar in roof of structure

表 3　饱和土中结构顶板内侧钢筋应变
Table 3　Strain of inner steel bar in roof of structure

药量	中心距 / cm	压应变				拉应变			
		*T*d1 / ms	*T*s1 / μs	*T*f1 / ms	ε_1	*T*d2 / ms	*T*s2 / μs	*T*f2 / ms	ε_2
50	5.71	0.892	28.0	0.920	−2.210	1.004	51.2	0.965	1.578
	12.78	0.874	64.0	0.897	−0.764	1.094	153.6	0.963	0.549
	17.14	0.934	19.2	1.364	−0.390	1.005	64.0		0.498
	29.14	0.881	115.2	0.942	−0.876	1.091	116.8	1.208	1.010
	28.57	0.859	236.8	0.932	−1.400	1.066	124.8	1.191	2.465
200	5.71	1.171	19.2	161.6	−1.105	1.216	38.4	198.4	1.201
	12.78	1.126	44.8	182.4	−2.181	1.222	230.4	249.6	1.838
	17.14	1.711	428.8	176.0	5.508	1.43	460.8		−6.780
	29.14	1.056	102.4	166.4	−11.185	1.254	19.2	286.4	8.350
	28.57	107.2	78.4	185.6	−0.635	235.2	60.8	296.0	0.671
	28.57	1.062	220.8	281.6	−3.647	1.318	96.0	427.2	4.242
150	5.71	0.915	25.6	1.136	−0.515	1.113	19.2	1.638	2.239
	12.78	0.972	70.0	1.043	−1.534	1.238	35.2	1.273	2.049
	29.14	0.940	83.2	1.020	−1.118	1.235	12.8		0.920
	28.57	0.924	102.4	1.027		1.072	67.2	1.139	
	28.57	0.924	236.8	0.979	−1.376	1.187	118.4	1.305	2.283

注：*T*d1 为压应变到达时间；*T*s1 为压应变上升时间；*T*f1 为压应变峰值时间；*T*d2 为拉应变到达时间；*T*s2 为拉应变上升时间；*T*f2 为拉应变峰值时间。

4　结　论

（1）在相同爆心距离条件下，结构的荷载与自由场的压力值相差不大（部分正反射系数在 0.5～1.0 之间），但结构上的冲量却比自由场大 2 倍，荷载在结构顶板的分布较为均匀，可以用结构中心的荷载来代表整体的荷载分布。

（2）结构对爆炸波的反射，无论是弹性波还是冲击波，反射规律基本一致。随着饱和度的增大，结构上的反射系数和爆炸冲击波波速也随之增大，但如果饱和度达到 100%，对应于不动障碍物反射系数应该逼近于 2.0。爆炸波载荷不大时，饱和土中结构发生整体变形，但如果荷载增大，顶板将发生整体破坏。

参 考 文 献

[1] LIANG JIAN-WEN, YOU HONG-BING. Dynamic stiffness matrix of a poroelastic mutli-layered site and its Green's functions[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2004, 3(2): 273－282.

[2] LIANG JIANWEN, YOU HONGBING. Green's functions for uniformly distributed loads acting on an inclined line in a poroelastic layered site[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2005, 4(2): 233－241.

[3] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid[J]. **Journal of Acoust**, 1956, 28(2): 168－191.

[4] DONTSOV V E, NAKORYAKOV V E. Enhancement of shock waves in a porous medium saturated with a liquid containing soluble-gas bubbles[J]. **International Journal of Multiphase Flow**, 2001, 27(11): 2023－2041.

[5] WANG Zhong-qi, HAO Hong, LU Yong. A three-phase soil model for simulating stress wave propagation due to blast loading[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2004, 28(1): 33－56.

[6] PRAPAHARAN S, CHAMEAU J L, HOLTZ R D. Effect of strain rate on undrained strength derived from pressure meter tests[J]. **Geotechnique**, 1989, 39(4): 615－624.

[7] 赵跃堂, 梁晖, 范斌. 饱和土中爆炸波传播问题的数值

模拟[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(4): 352－357.
ZHAO Yue-tang, LIANG Hui, FAN Bin. Numerical simulation of explosion wave propagation in the saturated soil[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2007, 27(4): 352－357.

[8] 王明洋, 赵跃堂, 钱七虎. 饱和砂土动力特性及数值方法研究[J]. 岩土工程程学报, 2002, 24(6): 723－729.
WANG Ming-yang, ZHAO Yue-tang, QIAN Qi-hu. Study of dynamic behaviour and numerical method for saturated sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(6): 732－729.

[9] 国胜兵, 高培正, 潘越峰, 等. 爆炸波在准饱和砂土中的传播规律[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1897－1902.
GUO Sheng-bing, GAO Pei-zheng, PAN Yue-feng, et al. Explosive wave propagation in quasi-saturated sandy soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1897－1902.

[10] 孙美凤. 爆炸荷载作用下饱和土中地下建筑结构的动力响应[J]. 华北水利水电学院学报, 2004, 25(2): 18－21.
SUN Mei-feng. The structure dynamical response in saturated soil to blasting loads[J]. **Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectic Power**, 2004, 25(2): 18－21.

[11] 杨海杰, 钱七虎, 赵跃堂, 等. 三相饱和土爆炸液化机理模型研究[J]. 解放军理工大学学报, 2001, 2(1): 70－73.
YANG Hai-jie, QIAN Qi-hu, ZHAO Yue-tang, et al. Study on blast induced liquefaction model for 3 phase saturated soil[J]. **Journal of PLA University of Science and Technology**, 2001, 2(1): 70－73.

[12] 刘建新, 宋华, 赵跃堂, 等. 准饱和砂土中平面压缩波传播[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(1): 86－92.
LIU Jian-xin, SONG Hua, ZHAO Yue-tang, et al. Propagation of plane compress wave in quasic saturated sandy soil[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2004, 24(1): 86－92.

[13] 尤红兵, 梁建文, 赵凤新. 含饱和土的层状场地的动力响应[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 679－684.
YOU Hong-bing, LIANG Jian-wen, ZHAO Feng-xin. Dynamic responses of a multilayered site with saturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(3): 679－684.

[14] 陆建飞, 聂卫东. 饱和土中单桩在瑞利波作用下的动力响应[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 225－232.
LU Jian-fei, NIE Wei-dong. Dynamic response of single pile embedded in half-space saturated soil subjected to rayleigh waves[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(2): 225－232.

[15] 夏唐代, 薛威, 颜可珍. 准饱和土中的瑞利波弥散特性[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2007, 6(1): 76－80.
XIA Tang-dai, XUE Wei, YAN Ke-zhen. Dispersion of rayleigh wave in a nearly saturated soil[J]. **Journal of Southern Yangtze University(Natural Science Edition)**, 2007, 6(1): 76－80.

[16] 李立云, 杜修力. 动载作用下饱和土壤液化的研究述评[J]. 世界地震工程, 2006, 22(2): 39－49.
LI Li-yun, DU Xiu-li. Review on the liquefaction research of saturated soils under dynamic load[J]. **World Earthquake Engineering**, 2006, 22(2): 39－49.

[17] 蔡袁强, 李保忠. 饱和度变化对弹性波在非饱和砂岩表面反射和透射的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 520－521.
CAI Yuan-qiang, LI Bao-zhong. Effect of water saturation on reflection and transmission of elastic waves at interface of partially saturated sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(3): 520－521.

[18] 徐平, 夏唐代. 饱和度对准饱和土体中瑞利波传播特性的影响[J]. 振动与冲击, 2008, 27(4): 10－13.
XU Ping, XIA Tang-dai. Influence of saturation degreeon propagation characteristics of Rayleighwaves in nearly saturated soils[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2008, 27(4): 10－13.