

横跨层状场地中沟槽管线在 表面波作用下的响应

于国友

(天津大学海船系, 300072)

丁红岩

(天津大学土木系, 300072)

文 摘 提出一种在 Love 波和 Rayleigh 波作用下分析频域内横跨沟槽管线的横向与纵向反应方法, 分析管线刚度与场地阻尼对其反应的影响。还提出一种计算沟槽附近场地动力格林函数的近似方法, 并就其对精度的影响进行研究。分析结果说明, 横跨沟槽的管线在地震时的响应可能比无沟槽时大得多, 应引起注意。

关键词 沟槽, 管线, 表面波。

1 研究方法概述

地下管线的研究起步较晚, 到目前为止, 从已发表的文献来看仅有关于层状均匀介质中的管线及关于管线横穿两个具有竖直界面介质的情况, 如图 1 所示^[1, 2]。对于横跨沟槽的管线(图 2)需用到二、三维动力格林函数解^[5], 问题比较复杂, 尚未见详细报导。

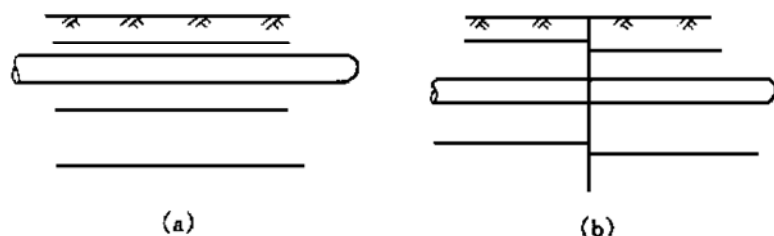


图 1 不同场地中的管线

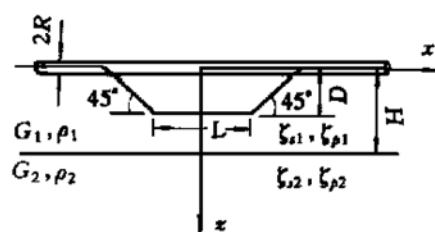


图 2 横跨沟槽管线

管线与土相互作用的处理方法有 Mindlin 解法^[3]、半无限空间动力问题基本解法^[1]和边界元法^[4]。其中前两种方法有一定的误差, 后一种方法较精确, 但非常复杂。本文采用离散土层法计算动力格林函数, 在频域内进行研究。采用分布荷载的动力格林函数, 不但精度高, 且较省时^[6]。

频域内研究横向均匀层状场地中管线的稳态响应一般采用的公式^[1]为

$$(-\omega^2[M] + [K_P] + [K_s])\{U\} = [K_s]\{U_s\}$$

其中 $[M]$, $[K_P]$ 为管线的质量矩阵和刚度矩阵; $\{U\}$ 为管线的位移; $\{U_s\}$ 为无管线存在时入射波引起的自由场位移; $[K_s]$ 为土与管线动力相互作用刚度矩阵, 系动力柔度矩阵 $[F_s]$ 的逆阵, 与频率有关。

上式对带有沟槽的层状场地仍然适用, 但有两点应注意: 第一点沟槽附近 $\{U_s\}$ 与无沟槽时不同; 第二点沟槽的存在使得 $[K_s]$ 与无沟槽时有所不同。对于第一个问题的考虑方法见文献^[6], 而第二个问题本文近似假设: ①沟槽表面一边的作用力在另一边表面产生的响应较小, 可以忽略; ②在任一侧表面作用力产生的同侧沟边附近各点位移是无沟槽时产生位移的 $1/A_i$;

倍($A_i \leq 1.0$), 其中 A_i 的选取对结果的影响将在后面研究。

2 表面波引起的管线响应

2.1 Rayleigh 波引起的管线纵向响应

【例 1】 分析图 2 所示场地, 管线外径 $2R = 0.5\text{m}$, 壁厚 $\delta = 2\text{cm}$, $E = 2.1 \times 10^7 \text{T/m}^2$, 场地 $G_1 = 1600 \text{T/m}^2$, $G_2 = 6G_1$, $\rho_1 = 1.6 \text{T/m}^3$, $\rho_2 = 2.4 \text{T/m}^3$, $L = 10\text{m}$, $D = 5\text{m}$, $H = 10\text{m}$, 阻尼均为 0, 管线半埋于土中, 并假设土与管线之间无相对滑动。分析所得在 $\omega = 15.7 \text{rad/s}$ 的 Rayleigh 波作用下, 沟槽附近管线各点轴向响应如图 3(a) 所示, 图 3(b) 所示为无沟槽时, 有无线存在时, 场地各点反应。比较图 3(a) 与 3(b) 可以看出: 沟槽对管线反应的影响较大。图 4 所示为有无沟槽存在时, 管线各点应变幅值。从中可以看出: 沟槽对管线轴向应变的影响较大, 对应力的影响也必然较大, 所以横跨沟槽管线地震反应分析是十分必要的。

本文表面波大小的选取为在无沟槽无管线自由场地中, 使 $x = z = 0$ 处产生水平位移 (Rayleigh 波为 U , Love 波为 V) = 1.0 的表面波。本文各例均是研究此波产生的各种场地中管线响应。

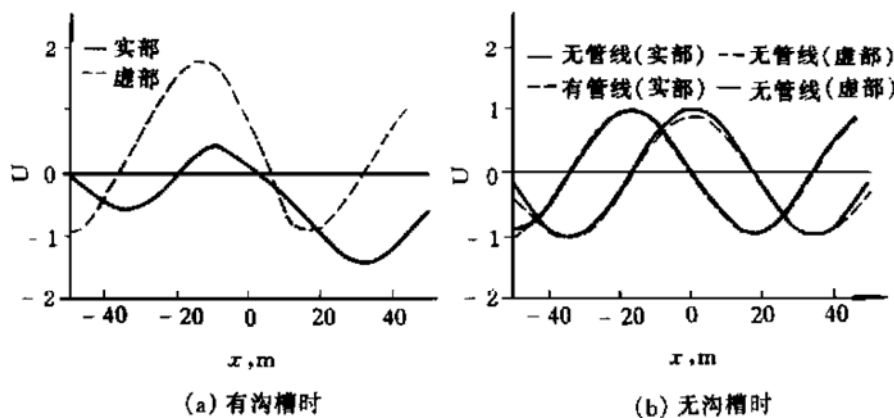


图 3 Rayleigh 波引起的管线纵向位移

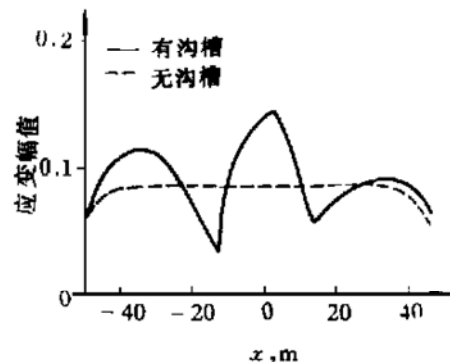


图 4 Rayleigh 波引起的管线应变幅值

【例 2】 取图 2 所示模型其它值不变, 而阻尼 $\xi_{s1} = \xi_{p1} = 0.05$, $\xi_{s2} = \xi_{p2} = 0$, 所得沟槽附近管线反应如图 5(a), (b) 所示。比较图 3(a) 和图 5 可以看出阻尼对沟槽附近管线反应有一些影响, 但不是很大。(其前题是两种情况下, 表面波在无沟槽场地 $x = z = 0$ 处位移均为 $u_0 = 1.0$)。

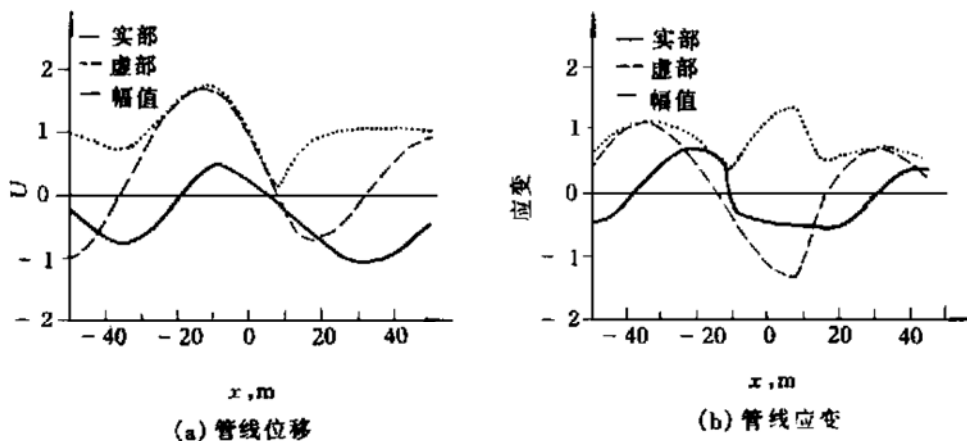


图 5 Rayleigh 波引起的有阻尼场地中管线纵向响应

上面分析带有沟槽的场地反应时, 计算沟槽附近各点柔性系数时, 引入了两个系数: A_1, A_2 。

如图 6 所示, 同侧单位力作用下, 1, 2 点位移(即柔度系数)

为: $f_{1i} = f_{N1i} / A_1, f_{2i} = f_{N2i} / A_2, f_{1i}, f_{2i}$ 分别为有沟槽存在时, 在同侧各点力作用下 1, 2 点处的位移, f_{N1i}, f_{N2i} 为无沟槽存在时, 在各点力作用下, 1, 2 点产生的位移。其它各点在同侧力下的响应近似取无沟槽时的值。在异侧力作用下, 表面各点反应均为 0。

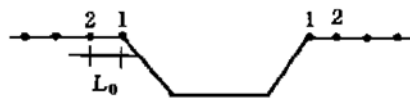


图 6

显然, 上述方法肯定会带来一定的误差。为分析这一误差的

大小, 分别取 ① $A_1 = 1.0, A_2 = 1.0$; ② $A_1 = 0.866, A_2 = 0.9$ (本文其它各例中均取此值); ③ $A_1 = 0.5, A_2 = 0.8$ 。并将所得管线各点位移列于表 1 所示。表中可以看出: A_1, A_2 的取值对所有管线各点响应有一定影响, 但不是很大, 这主要是由于管线刚度相对场地很小, 管线与场地间作用力相对较小, 对场地位移的影响也就很小造成的。

表 1 A_1, A_2 取不同值时对管线响应的影响

X (m)	位 移					
	$A_1 = A_2 = 1.0$		$A_1 = 0.866, A_2 = 0.9$		$A_1 = 0.5, A_2 = 0.8$	
	实 部	虚 部	实 部	虚 部	实 部	虚 部
- 50	- 0.0661	- 1.0015	- .0664	- 0.9974	- 0.0663	- 0.9891
- 45	- 0.2835	- 0.7928	- 0.2838	- 0.7884	- 0.2837	- 0.7796
- 40	- 0.4865	- 0.3777	- 0.4869	- 0.3732	- 0.4868	- 0.3635
- 35	- 0.5705	0.1621	- 0.5708	0.1671	- 0.5706	0.177
- 30	- 0.5010	0.7319	- 0.5012	0.7372	- 0.5006	0.7476
- 26	- 0.3436	1.1426	- 0.3432	1.1483	- 0.3419	1.1590
- 22	- 0.1813	1.3973	- 0.1799	1.4034	- 0.1772	1.4143
- 18	0.004	1.5912	0.0041	1.5981	0.0102	1.6090
- 16	0.1791	1.7133	0.1879	1.7218	0.2012	1.7323
- 14	0.3286	1.7559	0.3483	1.7678	0.3779	1.7774
- 12	0.3923	1.7347	0.4295	1.7512	0.4804	1.7588
- 10	0.4112	1.6642	0.4646	1.6915	0.5709	1.6986
- 3	0.1519	1.0223	0.1786	1.1047	0.2483	1.2415
3	- 0.1049	0.2396	- 0.1072	0.3505	- 0.0846	0.5674
10	- 0.3767	- 0.7371	- 0.4122	- 0.6225	- 0.4506	- 0.3696
12	- 0.4670	- 0.8668	- 0.4970	- 0.7842	- 0.5272	- 0.6120
14	- 0.5746	- 0.9237	- 0.5893	- 0.8777	- 0.6033	- 0.7820
16	- 0.7600	- 0.9183	- 0.7661	- 0.8951	- 0.7705	- 0.8480
18	- 0.9525	- 0.8336	- 0.9546	- 0.8210	- 0.9546	- 0.7964
22	- 1.1313	- 0.6824	- 1.1315	- 0.6747	- 1.1296	- 0.6603
26	- 1.2769	- 0.4765	- 1.2763	- 0.4710	- 1.2737	- 0.4613
30	- 1.3932	- 0.1404	- 1.3922	- 0.1361	- 1.3892	- 0.1289
35	- 1.3818	0.3215	- 1.3807	0.3252	- 1.3776	0.3311
40	- 1.1953	0.7478	- 1.1942	0.7512	- 1.1912	0.7563
45	- 0.8854	1.0596	- 0.8844	1.0628	- 0.8816	1.0678
50	- 0.5769	1.1934	- 0.5760	1.1964	- 0.5734	1.2011

2.2 Rayleigh 波引起的管线横向响应

【例3】仍以图2所示模型为例, 取 $\xi_{s1} = \xi_{p1} = 0.05$, $\xi_{s2} = \xi_{p2} = 0.0$ 时, 所得在频率 $\omega = 15.7 \text{ rad/s}$ 的基础 Rayleigh 波作用下管线横向位移 w 与转角 θ_y 如图7所示, 图8给出了无沟槽时相应管线位移和转角图。比较图7和图8可见沟槽对管线横向响应的影响也较大, 尤其在横跨沟槽上的管线段。

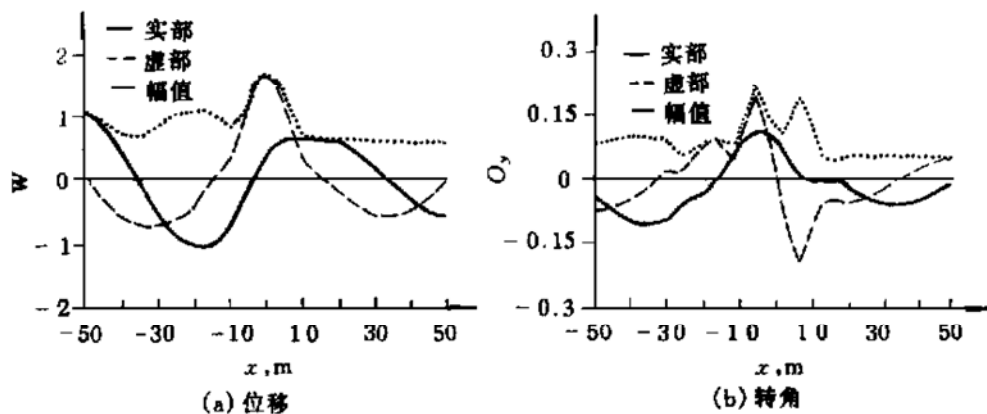


图7 Rayleigh 波引起的横跨沟槽管线横向响应

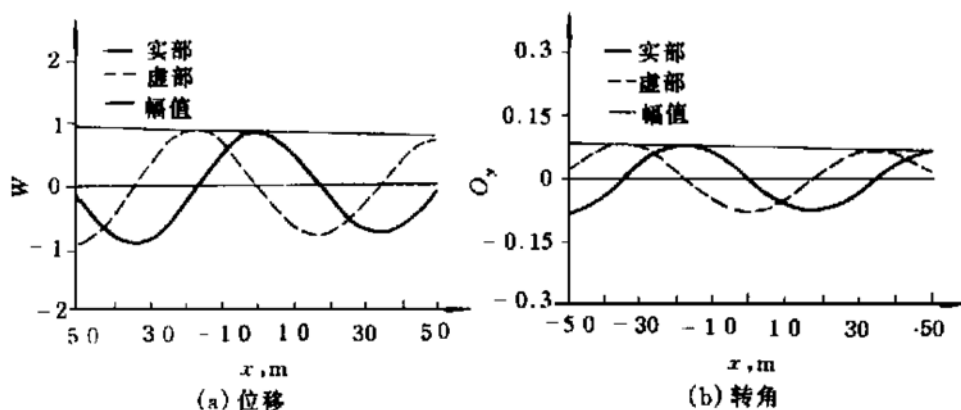


图8 无沟槽时 Rayleigh 波引起的管线横向响应

2.3 Love 波引起的管线横向反应

【例4】场地及管线同2.2节所述, 图9所示为频率 $\omega = 15.7 \text{ rad/s}$ 的 Love 波通过时, 管线各处的响应, 图10为无沟槽时管线各处的响应。比较两图可见, 有沟槽时管线各处位移与应变均比无沟槽时大, 尤其在横跨沟槽段(且主要体现在此段)。

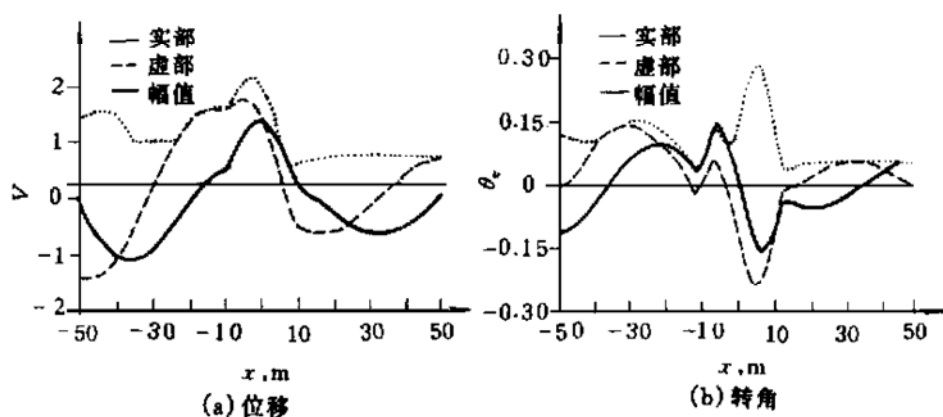


图9 有沟槽时 Love 波引起的管线各处响应

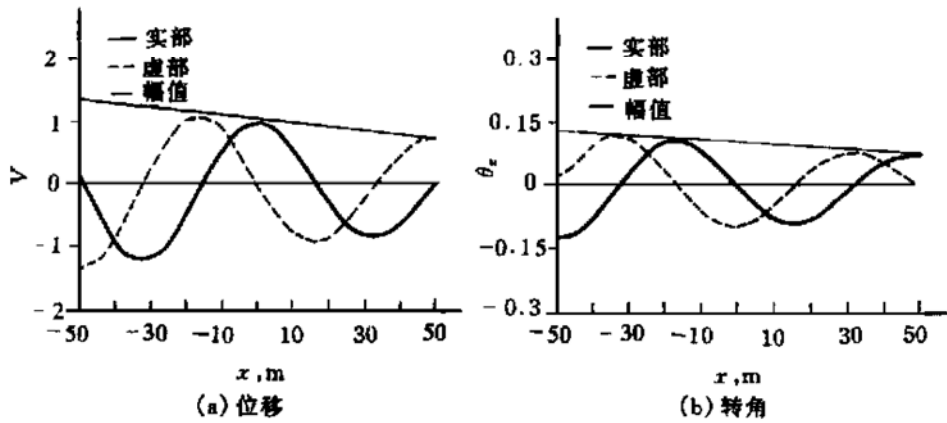
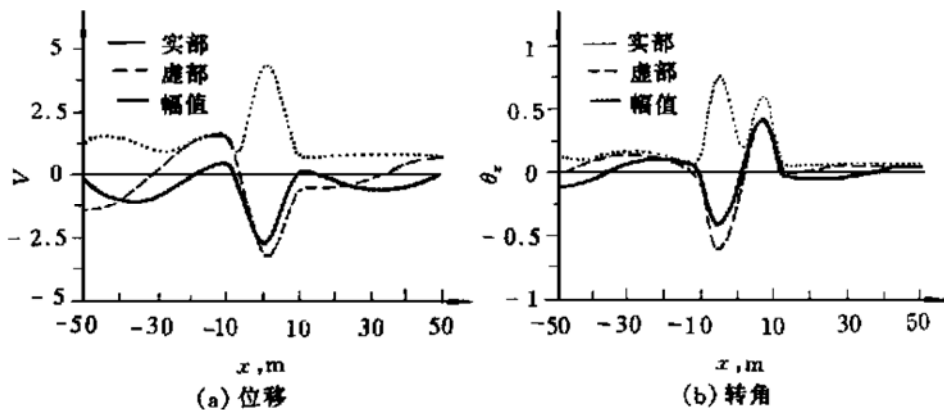
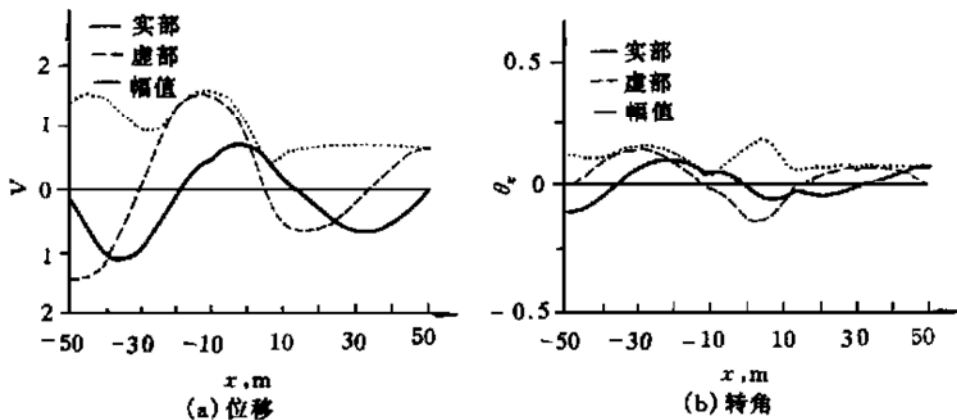


图 10 无沟槽时 Love 波引起的管线各处响应

3 管线刚度对其响应的影响

【例 5】仍取图 2 所示场地, 场地条件与管线性质同 2.2 节所述。当管线壁厚分别取 $\delta=1.0\text{cm}$ 和 4.0cm 时, Love 波通过场地时, 管线各处响应分别如图 11 和图 12 所示。

图 11 $\delta=1.0\text{cm}$ 时管线各处响应图 12 $\delta=4.0\text{cm}$ 时管线各处响应

比较图 9, 图 11 与图 12 可以看出: 横跨沟槽管线的响应除与沟槽及场地有关外, 还与管线的性质有较大关系, 但这一点主要体现在横跨沟槽的悬空段, 而在非悬空段表现得不那么明

显。出现这一现象的原因,是由于可以将悬空段近似看成建于沟槽两岸间的一段水平柔性建筑物,在两端施加荷载而引起的振动。虽然所施荷载大小、频率都相同,但不同刚度(具有不同的自振周期)的建筑物将产生不同的响应。

4 结 语

研究横跨沟槽的管线在地震波作用下的响应一般是比较困难的,它既要求得无管线时沟槽附近的响应,又要考虑管线与场地的动力相互作用。前者为二维问题(本文未考虑三维湖泊问题),后者为三维问题,有限元与边界元都不易做到。本文所给方法虽然具有一定的近似性,但最终使问题得到了圆满的解决。

通过实例分析可以看出:①在表面波作用下,由于沟槽两边不但位移较无沟槽时大,且相位差常常也较大,再加上横跨沟槽段失去了场地的约束,成为悬空段,所以使得横跨沟槽的这一段管线的响应也必然较大,因此对其动力特性进行分析十分必要;②管线的响应与其刚度有较大关系;③本文方法也可用于分析在沟内有多点支撑管线以及桥梁、大坝在表面波作用下的动力响应;④本文方法还可用于分析平面波作用下管线等横跨沟槽建筑物的动力响应。

参 考 文 献

- 1 梁建文. 地下管线的地震反应和动态稳定[博士学位论文]. 天津大学, 1991.
- 2 Xie X, He Y A. Calculation of Earthquake Reponse to the Embedded Pipeline Laid Through Different Media, Proc. of 9th WCEE, Japan, 1988.
- 3 Hindry A and Hovak M. Earthquake Response of underground Pipelines, Earthq. Eng. Struct. Dy., 1979, 7: 451~ 576.
- 4 王海涛, 林 皋. 半无限弹性介质中管线地震反应分析. 土木工程学报, 1988, 20(3).
- 5 于国友. 地形地貌及建筑物单体与群体对场地地震响应的影响[博士学位论文], 天津大学, 1993.
- 6 于国友, 何玉敖, 丁红岩. 二维横向非均匀层状场地对平面外地震波的放大作用. 地震工程与工程振动, 1995(增刊).

Response of Pipelines Over Canyons in Layered Site Induced by Surface Waves

Yu Guo-you

Ding Hong-yan

(Ocean Eng. Dept. of Tianjin University) (Civil Eng. Dept. of Tianjin University)

Abstract An approximate method has been used to calculate the Green function of the layered site with canyon, and further to analyze the lateral and transverse response of pipeline laid over the canyon induced by Love and Rayleigh waves. The adaptation of the method has also been discussed. From the results obtained we can see that seismic response of the pipeline laid over the canyon can be much larger than that without canyon.

Key words canyon, pipeline, surface wave.