

文章编号: 1000-0887(2004) 02-0128-07

固体介质中力学参数传递 观念及其工程应用*

赵晓兵¹, 薛大为², 赵玉祥³, 周丰峻³

(1. 解放军工程兵工程学院, 南京 210007;

2. 澳门大学, 3001 澳门;

3. 洛阳水利工程技术研究所, 洛阳 471023)

(我刊编委薛大为来稿)

摘要: 通过定性的力学分析、原理性的模型试验、工程动载试验、数值计算分析 4 个方面的研究, 论述了在地层介质中应力、加速度的传递与介质的相对刚度密切相关, 提出固体介质中应力、加速度传递的观念, 及其相应的广义复合结构体系; 在地下工程、防护工程建设中, 若能正确的运用这种观念, 就能大幅度提高工程的生存能力。

关键词: 应力传递; 相对刚度; 复合结构; 软回填层

中图分类号: TD315.1 **文献标识码:** A

引 言

平行于地表面无限大的均匀弹塑性岩体, 在同一水平深度上由于岩体自重产生的垂直岩体压力是相同的。在岩体中开挖一条平行地表面的水平坑道, 由于坑道上方一定厚度的岩体向下产生变形使其刚度相对变小, 坑道上方的岩体压力大部分沿着刚度大的坑道两侧岩体向下传递, 当传递压力超过岩体的承载力时, 坑道两侧的岩体发生破坏^[1, 2]。岩体压力在传递方向上的量值与介质的刚度相关, 刚度大压力值也大, 刚度小压力值也小。同样, 在爆炸荷载作用下, 介质中压缩波峰值压力的传播也与地层介质的刚度密切相关^[3, 4]。地层介质的刚度相等时, 压缩波以均匀的形态向四周传播, 波阵面上的峰值压力是等强的; 若压缩波在传播过程中, 遇到刚度不相等的地层介质时, 波阵面上的峰值压力将产生不均匀的变化, 峰值压力的集度不再相同, 刚度大的地层介质承受的压力大, 刚度小的地层介质承受的压力小。以上宏观定性的力学分析结果, 称为固体介质中力学参数传递观念, 简称传递观念。下面以原理性模型试验、工程爆炸动荷载试验、数值计算分析几个方面的研究成果证明这种传递观念的正确性, 同时提出如何利用这种传递观念进行工程设计, 达到大幅度提高岩体中工程结构承载能力的目的。

* 收稿日期: 2002_10_26; 修订日期: 2003_09_10

作者简介: 赵晓兵(1976—), 男, 辽宁昌图人, 博士研究生, 从事防护工程与工程力学;

赵玉祥(联系人, Tel: 86_379_5981429; Fax: 86_379_5981191)。

1 传递观念的原理性模型试验研究

利用 PYD_50 地质力学模型静力加载设备,对洞室围岩的稳定性问题进行了二次平面应变条件下的加载试验研究,验证了应力传递观念的客观现象。

1.1 均匀弹塑性体中洞室破坏特性^[5]

在均质材料做成的弹塑性体中开挖一圆形洞体,并对试验块体施加非静水压力。圆形洞体在上、下方向上的荷载作用下,产生上、下相对变形,使其相对刚度变小,洞体上、下方向上施加的外荷载沿着刚度大的两侧传递,当应力超过块体材料的允许应力时,洞体两侧发生破坏;两侧破坏的形状呈楔形,滑移体起点和洞体中心 O 的连线与洞体中心垂线的夹角 θ 是随着外荷载的增加逐渐缩小的,如图 1。

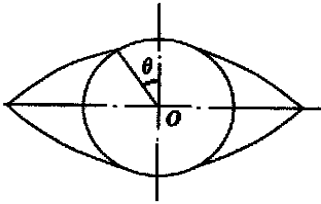
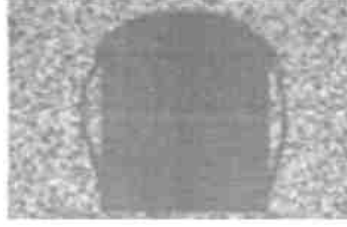
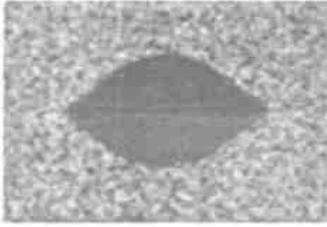


图 1 圆形洞体破坏形态

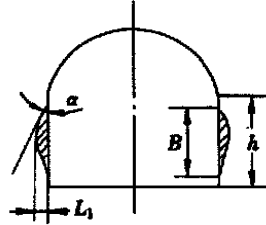


图 2 直墙拱顶洞体破坏形态

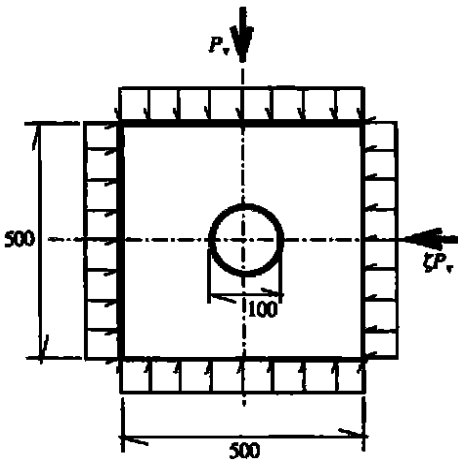


图 3 模型尺寸与边界荷载图

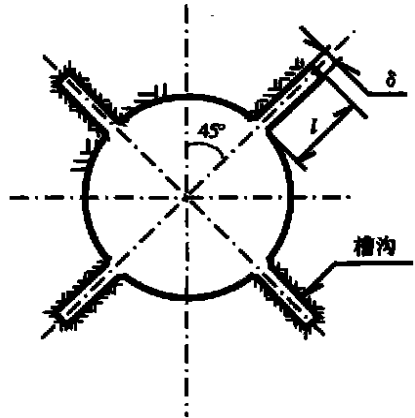


图 4 洞体周边开槽

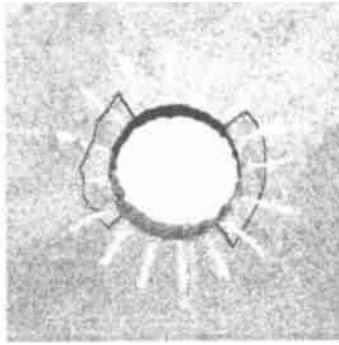
直墙拱顶洞体模型破坏形态与荷载的组成有关,设侧向荷载与垂直荷载的比值为 ζ ,当 $\zeta = 1$,即荷载为静水压力时,破坏沿整个洞体边沿进行; $\zeta < 1$ 时,首先在侧墙的上、下两处出现

裂缝,接着是楔体块与洞体分离脱落,称此楔体为初始楔体,继而与圆形洞体破坏相同,逐步向里剥落,直墙变成曲墙。初始楔体的长边 B 比墙高 h 略小, $B \approx (0.8 \sim 0.9)h$; 其尖角大致等于岩石剪切角 α , 初始楔体深度 $L_1 = (B/2)\tan\alpha$, 如图 2。

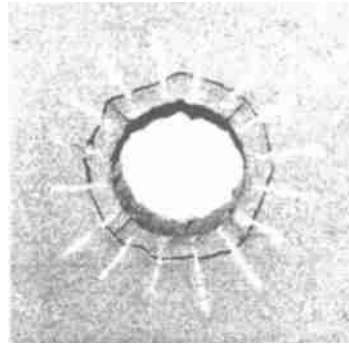
1.2 周围开槽圆形洞体与无槽圆形洞体破坏特征^[6]

在 PYD_50 设备上进行了多块模型试验, 试验尺寸与边界载荷如图 3 所示; 在圆形洞体四周介质中进行开槽, 如图 4。图中: l 为锚杆长度, P_v 为垂向加载集度, ζ 为侧向加载系数, 典型模型破坏对比见图 5。

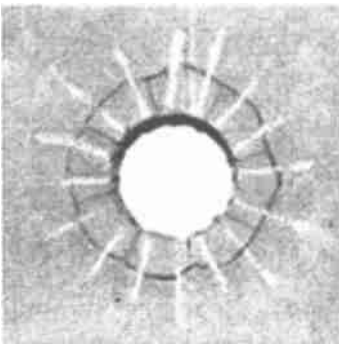
由于在圆形洞体四周介质中开槽, 减小了洞体周边的相对刚度, 在外界静荷载作用下, 开槽部位介质变形较大, 相对刚度变小, 外荷载在介质中产生的应力, 大部分沿着刚度大的方向传递, 把大应力引向洞体周围介质中的深层部位。随着变形的增加, 槽沟逐渐变窄、消失, 相邻的块体之间压紧; 在槽沟底部由于介质超过了变形允许值而发生破坏, 形成了一条沿槽沟底部破坏的多边形介质圈, 介质圈在角点处的厚度等于所开槽沟的深度。当模型周边荷载继续增加时, 所形成的多边形介质圈不发生变化, 直至模型介质整体破坏。



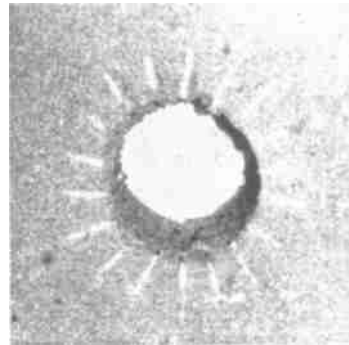
$\zeta = 1/2$ 4 槽 $20\text{mm} \times 2\text{mm}$
(a) 开槽模型



$\zeta = 1$ 4 槽 $30\text{mm} \times 4\text{mm}$
(b) 开槽模型



$\zeta = 1$ 8 槽 $30\text{mm} \times 2\text{mm}$
(c) 开槽模型



$\zeta = 1$
(d) 无槽模型

图 5 典型模型试验破坏形态对比

从试验测得的结果中进行综合分析, 得到下面一些结论:

1) 洞体四周开槽后, 在距离开槽根部约 1~2 倍开槽宽度的外边缘处, 沿环向方向产生屈服带, 槽与槽之间的介质块体闭合后形成一个多边形的介质圈; 随着边界外荷载的继续增加, 所形成的介质圈依然保持完好, 直到模型整体破坏。在模型边界继续加载时, 大应力沿着模型

介质中刚度大的方向传递,绕过了介质块体所形成的介质圈。

2) 在相同条件下,开槽模型的破坏荷载普遍比无槽模型大:

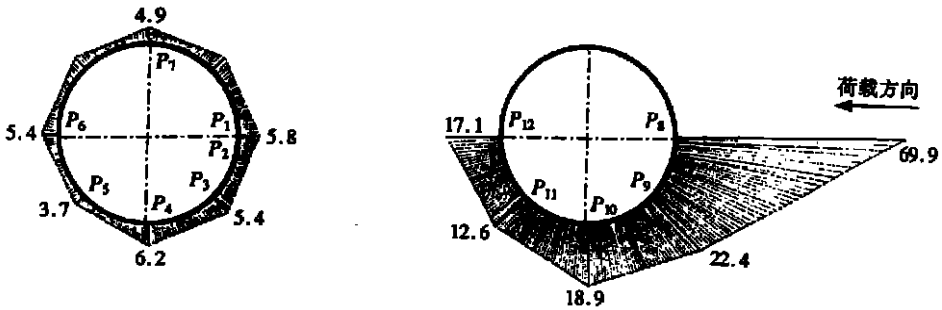
a. 在 $\zeta = 1/2$ 时,开槽模型的破坏荷载为无槽模型的 2 倍;为采用锚杆支护模型的 1.7 倍。

b. 在 $\zeta = 1$ 时,开槽模型的破坏荷载为无槽模型的 1.3~1.8 倍;为采用锚杆支护模型的 1.1~1.5 倍。

3) 开槽数量多、开槽宽度小的模型,其破坏荷载比开槽数量少、开槽宽度大的模型大。

2 传递观念的工程动载试验研究^[7]

我们在中等坚硬的地层介质中进行了一次大比例尺的工程结构爆炸试验研究。结构为屈服锚杆围岩加固层、软回填料层和钢筋砼支承结构 3 部分组成的圆形复合式结构体系,钢筋砼结构内直径为 2 m,普通 TNT 装药。试验中测试了自由场中的压力、围岩加固层中的压力、钢筋砼结构表面的压力,屈服锚杆围岩加固层中的加速度和结构内表面的加速度。由于软回填料层的可压缩性,允许围岩加固层受到入射荷载后产生较大的变形,产生较大变形的这部分围岩刚度变小,入射荷载的大部分能量沿着变形小的围岩向刚度大的岩体深层传递。试验测试结果表明:由于锚杆加固层围岩的变形,将自由场中入射压缩波的峰值压力平均减少 66%;通过软回填料层又将剩余的压缩波峰值压力平均减少 80%,同时,软回填料层大大改善了作用在钢筋砼结构表面上荷载的不均匀分布;爆炸试验中实测岩体自由场中最大的压缩波峰值压力为 83.1 MPa,洞体围岩加固层周边压力分布和结构周边压力分布实测值见图 6。径向垂直加速度实测值见图 7。



(a) 结构周边压力分布

(b) 围岩加固层周边压力分布

图 6 工程结构爆炸试验实测压力(MPa)

工程动载试验研究的测试结果,同样证明:

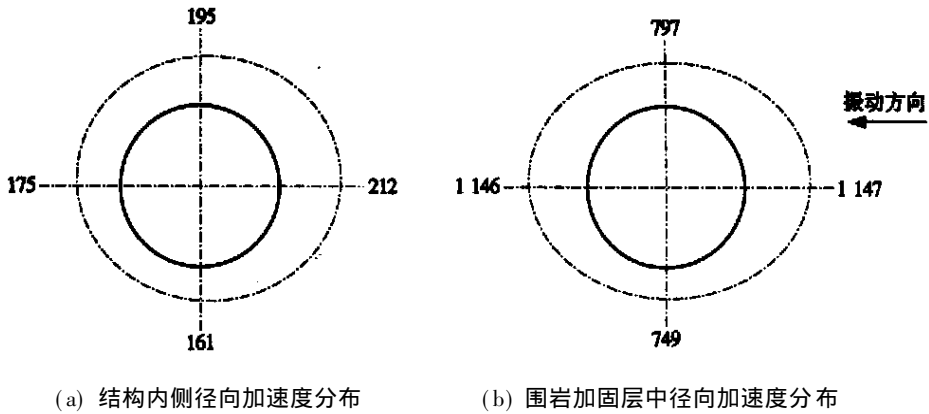
1) 压缩波在地层介质中传播时,峰值压力能量的绝大部分是沿着介质中刚度大的方向传递,在刚度不同的介质中,波阵面上的峰值压力是不等强的。

2) 同样,由于软回填料层刚度小,爆炸产生的加速度大部分沿着刚度大的围岩加固层向围岩深层传递,只有少部分加速度传递到钢筋砼结构内侧。

3 传递观念的数值计算研究

本节通过数值计算结果,给出在 II 类围岩的地层介质中大应力区域的分布情况,从计算角度说明固体介质中应力传递观念。

3.1 马蹄形结构

图7 工程爆炸试验实测加速度(g)

计算中将钢筋砼结构与围岩之间加设软回填层和不加设软回填层两种情况进行比较, 计算简图如图8。

岩体介质为II类围岩, 钢筋砼结构、软回填层和岩体介质3种材料的动弹性模量比值为:

$$E_{\text{str}} : E_{\text{sof}} : E_{\text{rok}} = 1 : 0.02 : 1.57;$$

三种材料的 C 、 φ 值之比分别为:

$$C_{\text{str}} : C_{\text{sof}} : C_{\text{rok}} = 1 : 0.076 : 0.70,$$

$$\varphi_{\text{str}} : \varphi_{\text{sof}} : \varphi_{\text{rok}} = 1 : 0.67 : 0.87;$$

3种材料的地基弹性压缩系数和弹性波速之比为:

$$K_{\text{str}} : K_{\text{sof}} : K_{\text{rok}} = 1 : 0.11 : 0.83,$$

$$C_{\text{str}}^e : C_{\text{sof}}^e : C_{\text{rok}}^e = 1 : 0.26 : 1.37;$$

钢筋砼结构的计算跨度为 $L_0 = 2.7\text{m}$, 材料的

厚度与跨度比为:

$$L_0 : h : \delta = 1 : 0.15 : 0.15.$$

压缩波形简化为有上升时间的三角形荷载, 上升时间取 7ms , 正压作用时间取 46ms 。计算中在压力较低时采用 Drucker-Prager 计算模型; 在压力较大时, 采用 Mises 计算模型。

迎爆面自由场入射压力峰值为 30MPa 和 50MPa 的数值计算结果表示在图9和图10中。从图9中可以看到: 具有软回填层的结构体系, 钢筋砼结构只有很少一部分出现塑性区, 大部分的荷载转嫁到岩体中, 大大减轻了钢筋砼结构的负担, 大幅度提高了工程结构的承载能力。

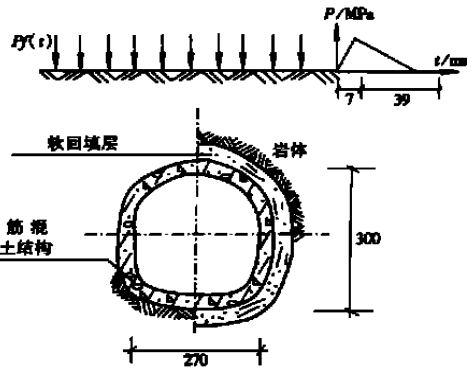
图10中的结果与图9的结果是一致的。

3.2 圆形结构

圆形结构计算简图如图11, 围岩分类为II类, 钢筋砼结构、软回填层和岩体介质3种材料的力学参数之比同3.1节。计算中, 压力较低时采用 Drucker-Prager 模型; 在压力较大时, 采用 Mises 模型。几何尺寸单位为 cm 。为了研究应力传递规律, 在双层圆形结构外侧增加一排岩孔。数值计算结果见图12, 大应力沿着介质中刚度大的方向传递趋势是明显的。

4 结 论

本文提出了固体介质中力学参数传递的观念和相应的工程结构体系:

图8 计算简图(单位 cm)

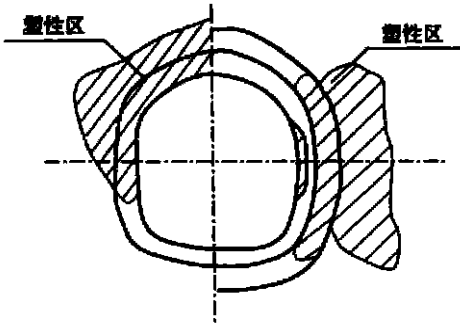


图9 30 MPa时塑性区范围对比 ($t = 22 \text{ ms}$)

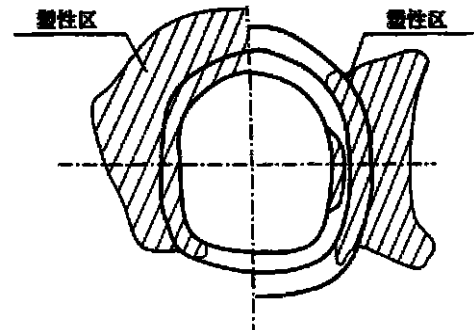


图10 50 MPa时塑性区范围对比 ($t = 24 \text{ ms}$)

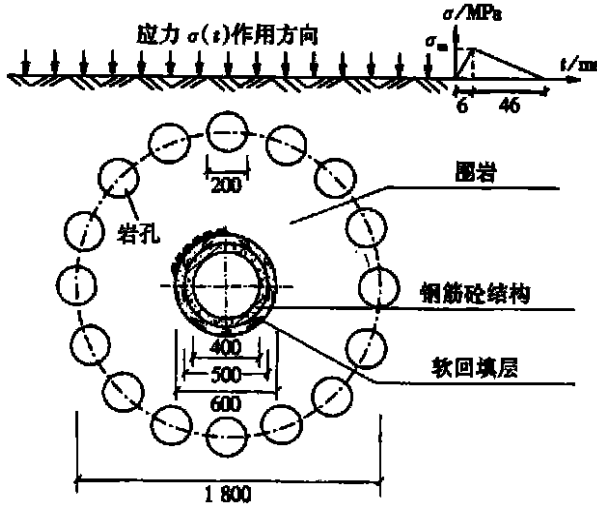
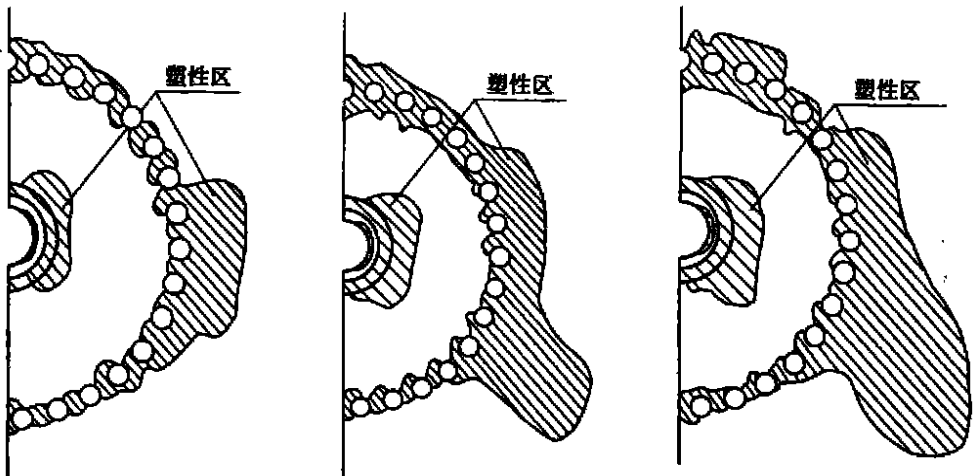


图11 计算简图



(a) 30 MPa时塑性区趋势 ($t = 25 \text{ ms}$)

(b) 50 MPa时塑性区趋势 ($t = 28 \text{ ms}$)

(c) 80 MPa时塑性区趋势 ($t = 33 \text{ ms}$)

图12 大应力传递趋势

1) 固体介质中应力、加速度的传递与介质的刚度密切相关, 介质刚度越大承受的应力、加

速度也越大,大应力和加速度绕过介质中刚度小的区域,沿着介质中刚度大的方向进行传递。

2) 根据上述观念,相应的提出了较坚硬地层中广义复合结构体系,即由围岩加固层、软回填层和支承结构组成的广义复合结构体系。由于在钢筋混凝土等起到稳定场所作用的支承结构周围设置软回填层,形成小刚度的介质区域,使大应力和加速度绕过支承结构,沿着岩体中刚度大的方向进行传递。大幅度减少了作用在支承结构上的应力和加速度峰值。

根据所提出的传递观念,在进行工程结构设计时,只需根据现场情况和需求,对广义复合结构的选型进行量化数值分析,即可达到大幅度提高支承结构承载能力的目的;在爆炸荷载作用下,这种结构形式可大大减少作用在支承结构周边的压力和加速度。

[参 考 文 献]

- [1] 薛大为,赵玉祥. 坑道高抗力复合结构讨论会会议纪要[R]. 洛阳水利工程技术研究所, 1987.
- [2] 赵玉祥. 400T 动材机模型试验研究及理论分析[R]. 洛阳水利工程技术研究所, 1992.
- [3] 赵玉祥. 爆炸模拟器高抗力复合结构动力试验研究及理论分析[R]. 洛阳水利工程技术研究所, 1996.
- [4] 赵玉祥. 坑道高抗力复合结构爆炸试验研究[R]. 洛阳水利工程技术研究所, 1987.
- [5] 梁炯均. 岩土工程技术与概念发展[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1998, 28—29.
- [6] 赵玉祥. PYD_50 加载设备上洞室模型试验研究[R]. 洛阳水利工程技术研究所, 1987.
- [7] 赵玉祥. 坑道高抗力复合结构设计计算方法[R]. 洛阳水利工程技术研究所, 1988.

Concepts of Mechanical Parameters Transfer in Solid Medium and Its Application in Engineerings

ZHAO Xiao_bing¹, XUE Da_wei², ZHAO Yu_xiang³, ZHOU Feng_jun³

(1. Engineering Institute of Engineering Corps of PLA,

Nanjing 210007, P. R. China;

2. University of Macau, C. Postal 3001, Macau, P. R. China;

3. Luoyang Hydraulic Engineering Technology Institute,

Luoyang 471023, P. R. China)

Abstract Based on investigation into four aspects of qualitative mechanical analysis, principle model experiments, engineering dynamic load tests and numerical calculation, it was discussed that the transfer of stresses and accelerations in stratum medium have a close relation with its relative rigidity. The concepts of stresses and accelerations transfer in solid medium and its corresponding generalized, composite structure system are presented. The survivability of underground engineerings and protective engineering will be greatly increased if these concepts are correctly used in construction.

Key words stress transfer; relative rigidity; composite structure; soft backfill