

装配式组合加宽公路路基稳定性研究

李芬^{1,2}, 刘惠¹, 王作君³

(1. 武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063; 2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室;
3. 武汉市坦达工程项目管理有限公司)

摘要: 交通量迅速增长使得高速公路加宽改扩建工作势在必行。该文针对目前传统公路加宽方式用土量大、污染严重、施工周期长等不足, 将装配式组合结构运用到公路加宽中, 并结合工程实际, 利用 Abaqus 结合强度折减法对装配式公路加宽结构的路基稳定性进行分析。结果表明: 采用此加宽方式后路基稳定性得到提高; 加宽下部结构中位于坡上的预制桩较坡下的桩需要更高的单桩承载力; 通过适当增大桩长、桩径和桩土间的摩擦系数可以提高路基的稳定性, 其中增加桩长带来的效果最明显。

关键词: 公路加宽; 装配式; 强度折减法; 路基稳定性; 桩承载力

1 前言

随着国民经济的迅速增长, 一些已建好的高速公路因车道数量较少、通行能力有限, 不能满足日渐增长的交通运输和社会发展的需求, 急需进行改扩建。广佛高速公路是中国首个高速公路改扩建工程, 其后沪杭甬、沈大、沪宁等高速公路也都进行了改扩建, 21 世纪高速公路改扩建已成为公路建设中的重点。但传统的公路加宽方式大多是在原有公路的单侧或双侧直接进行填土, 需要大量的填土量; 扩建时, 新老路基的沉降差异给路面带来的变形、开裂问题一直是亟待解决的难题。为此, 相关领域学者做了许多研究。王鹏等通过数值模拟发现新老路基模量相等时, 加宽路面开裂的可能性最小; 杨林、沈国印等使用有限元软件对加宽路基进行模拟并对路基稳定性及沉降差异的影响因素进行了分析; 齐明芹等对高速公路加宽中软土路基的不同处理方式进行了比较; 杨涛、梁勇旗研究了加宽过程中路基的变形特性; 司晓炜结合工程实例利用有限元验证了土工格栅加筋技术的优势并给出施工建议; 于恒等基于实际工程的现场勘察及数值模拟计算, 分析了旧路软基处治不佳情况下进行道路扩建工程施工后地基的变形机理; 赖军等利用 Geo-Studio 软件,

建立拓宽路基的数值计算模型, 分析了不同拓宽方式及宽度、填料物理力学参数和土工格栅及桩加固参数对拓宽路基稳定性及变形特性的影响; 刘涛等利用 Abaqus 对比了采用挖台阶与铺设土工格栅处理的路基与未采取处治方法的路基竖向与水平位移随时间变化的趋势; 孟学清、刘光明对高速公路加宽差异沉降机理及控制措施进行了研究和总结。

而实际上传统公路加宽方式还存在着用土量大、尘土污染严重、工期长等问题, 部分路段在扩建的同时还需维持通行, 施工较不便, 同时, 中国公路建设也逐渐进入了资源缺乏的阶段, 存在着缺土、缺地等问题。将装配式组合结构应用于公路加宽能更好地响应国家推行的绿色公路建设要求。装配式组合加宽结构上部采取混凝土预制板与工字梁组成的钢混结构, 下部采用高强度混凝土预制桩, 结构中所有构件都可在工厂进行预制, 在施工现场再装配, 可适用于加宽时公路边坡较高、填土不便或边坡底部土层较软弱等情况。合肥省绕城高速公路陇西段采用了一种新型的桩板式无土路基技术就属于装配式组合结构的一种。合安高速公路扩建项目中也采用装配式结构进行路基加宽。经工程实践验证, 采用装配式结构进行公路加宽可减少用土量和征地面积, 减少污染, 缩短工期, 且通过将预制桩打入持力层也可减少工后沉降。

收稿日期: 2020-11-12(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(编号: 51609192); 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金资助项目(编号: LP1717)

作者简介: 李芬, 女, 博士, 副教授, E-mail: jessilifen@126.com

但实际中对装配式组合加宽结构的研究较少,为探讨加宽结构路基的稳定性,该文利用有限元软件Abaqus结合广西某高速公路加宽工程进行建模分析。该公路由原先的双向四车道改扩建为双向八车道,公路加宽方式采用装配式组合结构加宽体系,在原有的道路两侧分别进行拓宽。下部桩基一排在既有的高速公路边坡上,另一排位于高速公路路底,预制桥面板的一端置于边坡的垫块上。采用装配式组合结构加宽的结构体系示意图可简化为如图1所示。

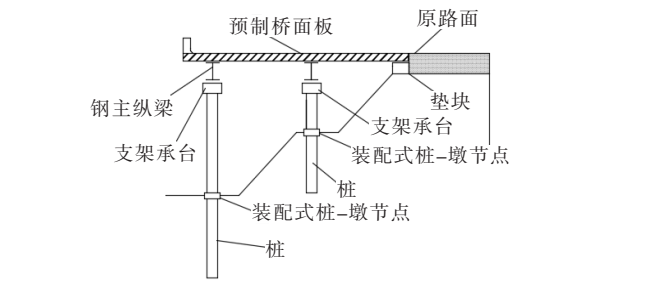


图1 装配式组合结构公路加宽体系示意图

2 计算模型及参数

建模时对土体均采用Mohr Coulomb弹塑性模型。因主要研究路基的力学性能,将上部结构当做传力构件来进行适当简化,作为线弹性材料处理。模型中荷载包括整体结构的重力、桥面板的二期铺装以及汽车荷载三部分,其中二期恒载按照10 cm厚混凝土换算成均布荷载加载到整个桥面板区域,汽车荷载的作用按车道荷载进行施加。根据JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》规定,均布荷载标准值取 $q_k=10.5\text{ kN/m}$;集中荷载标准值按线性内插法取 $P_k=192\text{ kN}$ 。路基土从上到下大致分为4层,桩及各土层材料参数如表1所示。对模型底面约束 x 、 y 、 z 三个方向的位移,前后、左右四面约束法向位移。为在确保计算精度的前提下减少计算时间,对桩附近土划分较密网格,而对离桩较远的土(对桩的影响可忽略不计)划分较疏的网格。单元类型选择C3D8R三维实体单元,划分网格后的模型如图2所示。

3 加宽前后公路路基边坡稳定性

利用初应力提取法分别对加宽前后的路基进行地应力平衡,再施加荷载,并使用强度折减法进行稳定性计算,得到计算不收敛时加宽前后的等效塑性应变云

图如图3所示。

表1 模型材料参数表

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	c / kPa	φ / ($^\circ$)	E / MPa	摩擦 系数
A	2 300	60	35	1 200	0.30
B	1 820	15	25	5	0.35
C	1 780	14	22	45	0.35
D	1 760	12	20	40	0.40
E	7 850	—	—	206 000	0.30
F	2 400	—	—	34 500	0.20
G	2 500	—	—	38 000	0.20

注:A为路面材料;B为路堤回填土;C为粉质黏土;D为淤泥质黏土;E为钢梁;F为桥面板;G为桩。

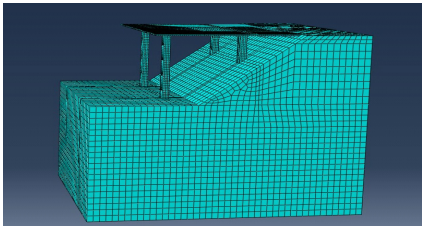


图2 划分网格后的模型实体图

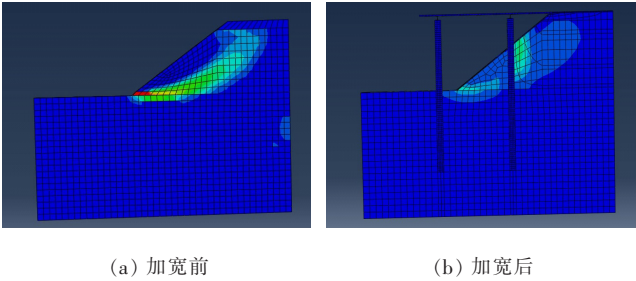


图3 加宽前后路基边坡等效塑性应变云图

由图3可得:加宽结构下部预制桩插入土层中起到了抗滑作用,阻止了塑性变形区的贯通。加宽前后路基稳定系数随坡顶水平位移变化曲线如图4所示。以水平位移出现拐点为边坡发生破坏的判据,得加宽

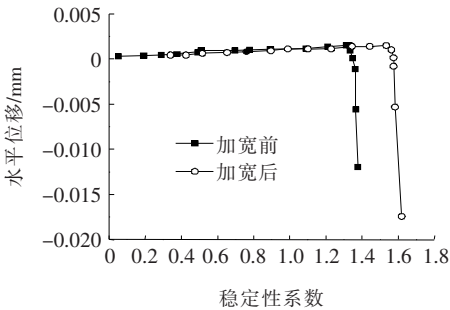


图4 路基加宽前后水平位移随稳定性系数变化曲线

前的稳定性系数为 1.32,加宽后的稳定性系数为 1.58,说明通过加宽,路基稳定性得到了较大提高。

4 桩基受力特性分析

预制桩基承受着上部荷载的作用,并通过桩土相互作用将力传递给路基土,为了解不同位置处桩的内力变化,选取位于路基边坡同一侧的坡底和坡上桩进行对比分析,桩基位置如图 5 所示。图 5 中桩 A、桩 B 剪力随桩长变化曲线如图 6 所示。

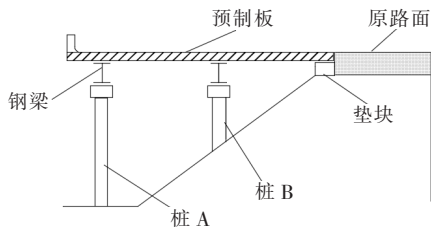


图 5 下部预制桩基的位置示意图

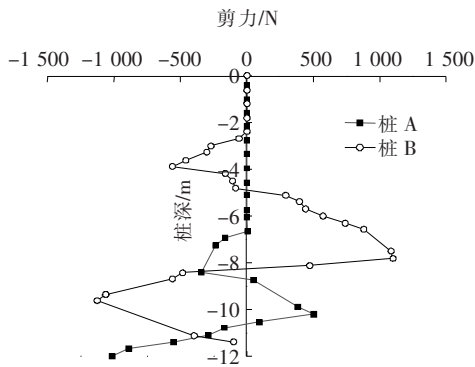


图 6 桩 A、B 剪力变化曲线图

由图 6 可知:在桩入土后,剪力呈正负交替式变化,与桩 A 相比,桩 B 在较大范围内承受着更大的剪力。得到两桩沿桩身变化的水平、竖向位移如图 7、8 所示。

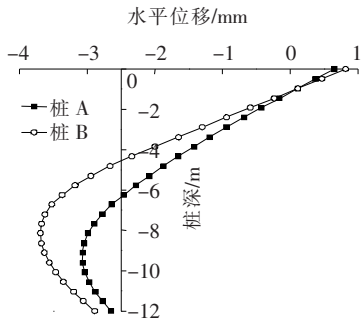


图 7 水平位移随桩深变化曲线

由图 7、8 可见:两桩竖向位移变化速度大致相同,

桩 A、B 的竖向位移最大值分别为 3.47 和 4.11 mm,桩 B 竖向位移比 A 大 18.4%。因桩 B 承受着边坡土体横向下滑力的作用,水平位移桩 B 比桩 A 变化得更快,桩 B 最大水平位移较桩 A 大 0.62 mm。综合剪力、位移图可得:桩 B 的剪力值和位移值均大于桩 A,故在工程实际中,在设计时应尽量提高桩 B 的单桩承载力。

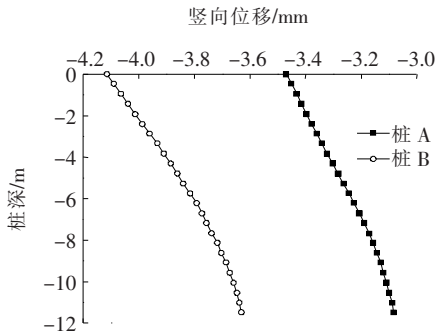


图 8 竖向位移随桩深变化曲线

5 预制桩参数对路基稳定性影响分析

因加宽结构所处土层情况复杂,当预制桩参数变化时,桩侧摩阻力和桩端摩阻力发生改变,必然引起桩内力的变化,同时通过桩土间的相互作用影响路基的稳定性。选取桩长、桩径、桩土间摩擦系数 3 个参数对路基稳定性进行分析。当研究某一参数的影响效果时,其他参数均不变,桩顶施加的外部荷载恒为 520 kN,选择受力较复杂的桩 B 进行分析。

5.1 桩长

取桩长为 9、10、11、12 m 4 组模型进行分析,得到不同桩长的桩轴力、桩侧摩阻力变化如图 9、10 所示。

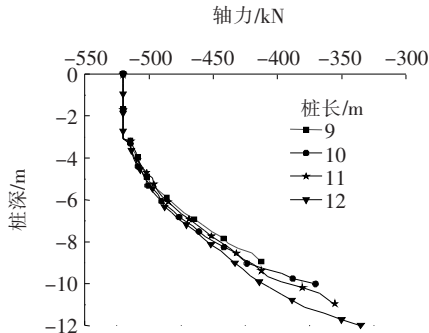


图 9 不同桩长轴力随深度变化曲线图

由图 9 可知:桩入土前(0~3 m),桩轴力几乎保持不变。桩入土后,桩轴力沿桩身向下逐渐减小,桩长越长,桩轴力减小得越多,桩长由 9 m 增加到 12 m,桩

底轴力减小了约 18.4%。这与图 10 中桩侧摩阻力的变化是吻合的。桩入土后,沿着桩身向下,桩侧摩阻力增大,桩长 12 m 时桩侧摩阻力最大,即随桩长的增加,桩侧摩阻力发挥得越多,预制桩的竖向承载力得到提高。需要指出的是:在采用 Abaqus 中点对点离散接触分析时,桩端底部节点的摩阻力无法精确模拟,因为在基于连续介质力学的有限元分析中,桩端并不能真正发生刺入土体的变形,在桩侧面与桩底面交接点桩和土有脱开的趋势,因此图 10 中接近桩底处的桩侧摩阻力会出现急剧减小到 0 的现象。经计算得到不同桩长下路基的稳定性系数和桩头水平位移如表 2 所示,由表 2 可得:随着桩长的增加,稳定性系数变大,桩头水平位移减小,路基稳定性提高。

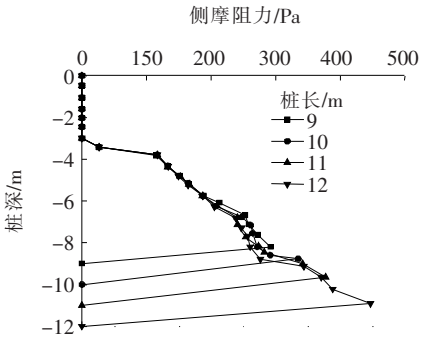


图 10 不同桩长桩侧摩阻力随深度变化曲线图

表 2 不同桩长的稳定性系数和桩顶水平位移

桩长/m	稳定性系数	桩顶水平位移/mm
9	1.49	2.09
10	1.53	1.81
11	1.59	1.78
12	1.61	1.63

5.2 桩径

设桩径为 400、500、600 mm,得到不同桩径下的桩轴力和桩侧摩阻力变化如图 11、12 所示。

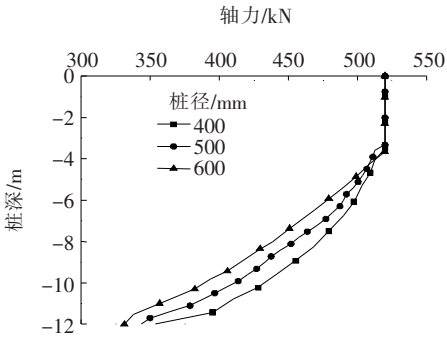


图 11 不同桩径下轴力随桩深变化曲线图

由图 11 可得:桩入土后,桩轴力随桩深度的增加而减小,桩径越大,桩轴力减小得越快,桩径由 400 mm 增加到 600 mm,桩底的轴力值减小了约 6.26%,即随着桩径增大,桩土间相互作用越充分,承担上部结构传递的荷载越多。由图 12 可得:随着桩径增大,侧摩阻力变大,说明桩径越大桩侧摩阻力发挥得越充分。不同桩径下稳定性系数和桩头水平位移如表 3 所示,由表 3 可知:随着桩径的增大,稳定性系数增加,桩头水平位移减小,路基的稳定性得到了提高。

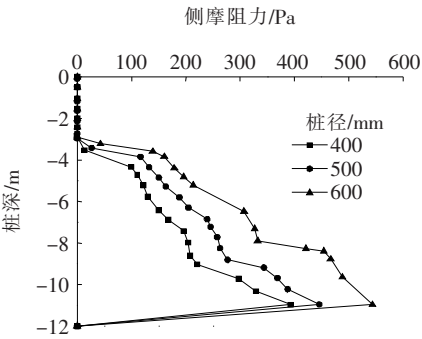


图 12 不同桩径下桩侧摩阻力随桩深变化曲线图

表 3 不同桩径下边坡的稳定系数和桩顶水平位移

桩径/mm	稳定性系数	桩顶水平位移/mm
400	1.53	1.85
500	1.61	1.63
600	1.63	1.34

5.3 摩擦系数

为研究摩擦系数对路基稳定性的影响情况,在 Abaqus 中将接触属性中的摩擦系数 μ 设为 0.2、0.3、0.4。在桩顶分级施加荷载,得到桩的荷载一位移曲线如图 13 所示。

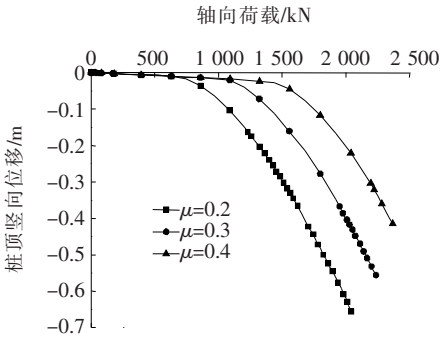


图 13 不同摩擦系数下桩的荷载一沉降曲线

由图 13 可知:摩擦系数 μ 从 0.2 增加到 0.4,桩的屈服荷载增加约 1 倍,说明提高摩擦系数可以显著增加桩的极限承载力。不同摩擦系数下桩轴力及桩侧

摩阻力随桩深变化曲线如图 14、15 所示。

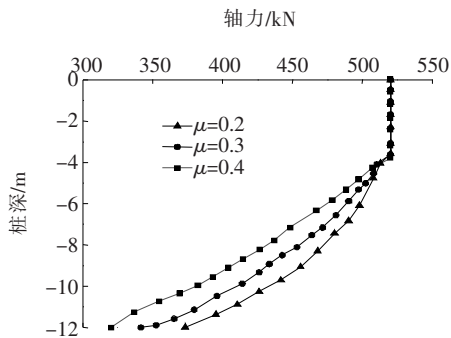


图 14 不同摩擦系数下桩身轴力随深度变化曲线

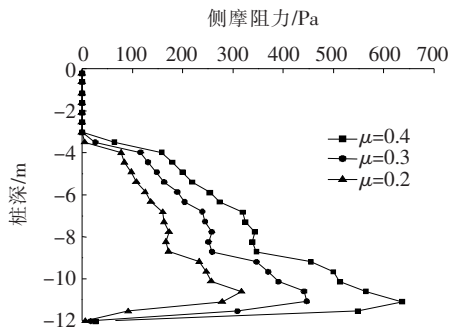


图 15 不同摩擦系数下桩侧摩阻力随深度变化曲线

由图 14、15 可见:随着摩擦系数的增大,桩轴力与桩侧摩阻力变化的速度均增大,摩擦系数由 0.2 增加到 0.4,桩底的轴力减小了约 14.2%,说明摩擦系数越大,通过桩土间相互作用承担的荷载就越多,所以桩轴力越小,桩侧摩阻力越大。综合可知,摩擦系数增大,桩的极限荷载增大,通过桩土间相互作用承载的上部荷载增多,从而使路基的稳定性得到提高。

6 结论

针对装配式组合公路加宽结构,利用 Abaqus 对路基的力学性能进行了研究,得出以下结论:

(1) 采用装配式组合结构进行公路加宽对提高路基稳定性系数效果明显。加宽结构下部预制桩插入土中后起到了抗滑桩的作用,使路基稳定性系数由加宽前的 1.32 提高到 1.58。因此,对于高陡边坡采用传统路基土加宽方法带来的边坡滑移、失稳等病害,可考虑采用装配式组合结构的加宽方案。

(2) 加宽结构中位于坡上桩比坡下桩需要更大的单桩承载力。对比路基边坡同侧的坡上和坡下桩的受力情况得到:由于坡上桩承受着来自坡土体的推力作用,桩身剪力值大范围均比坡下桩大,水平位移、竖向位移最大值较坡底桩增大 20.2% 和 18.4%,因此,对于坡上桩,在设计时应增大其单桩承载力。

(3) 增大桩长、桩径、提高桩与土间的摩擦系数可有效增大预制桩的竖向承载力,其中增大桩长产生的作用最明显,同时,增大桩长、桩径使得路基的稳定性得到提高。因此,在进行装配式组合公路加宽结构设计时,在满足经济性的条件下,可适当增大预制桩的桩长与桩径,并选择摩擦系数较大的土层作为持力层,其中桩长是影响桩承载力和路基稳定性的主要因素。

参考文献:

- [1] 王鹏,张军辉,黄晓明.加宽工程路面开裂影响因素的数值分析[J].东南大学学报(自然科学版),2007(4).
- [2] 杨林,郑立孝.加宽路堤稳定性数值模拟及影响因素的正交分析[J].中外公路,2014(1).
- [3] 沈国印.高速公路新老路基拼接的台阶开挖效果分析[J].公路,2012(7).
- [4] 齐明芹,杨明.高速公路加宽软土路基处理方式分析[J].山西建筑,2018(8).
- [5] 杨涛,阮一舟,张文彦,等.老路基抬高的公路拓宽工程变形特性数值分析[J].公路交通科技,2013(7).
- [6] 梁勇旗.高速公路加宽对路基变形影响研究[J].公路,2013(9).
- [7] 司晓炜.公路路基加宽施工中的土工格栅加筋优化技术应用[J].公路工程,2017(3).
- [8] 于恒,汪益敏,王兆阳.旧路软基处治欠佳道路扩建后路面裂缝形成机理研究[J].中外公路,2017(2).
- [9] 赖军,朱宏伟.拓宽路基稳定性及变形特性的影响因素分析[J].中外公路,2018(4).
- [10] 刘涛,张军,黄博.高液限粘土路基加宽的有限元分析[J].公路工程,2018(5).
- [11] 孟学清.高速公路加宽改建路基差异沉降机理分析及控制措施[J].公路,2014(7).
- [12] 刘光明.软土地基市政道路加宽工程路基差异沉降特性及处治措施综述[J].中外公路,2018(2).
- [13] 吴康宁.高速公路桩板式无土路基复合植桩施工技术[J].山西交通科技,2017(2).