

# 堆载滑动对桥墩与桩基础的影响分析

张玺彦, 雷胜友

(长安大学公路学院, 西安 710000)

**摘要:**针对处于陡坡地段的某公路大桥桥梁桩基偏位问题,通过数值计算结果与现场实测偏位值的对比分析,用位移法计算得到堆载滑动前后桥梁桩基的侧向偏位与内力(弯矩和剪力)分布情况,并提出了合理的治理措施。研究表明,堆载滑动是影响桥梁安全性的主要因素,滑动后桥墩偏位和内力显著增加;堆载大小对桩身偏位和内力分布影响较大,位移和内力随堆载增加而增大且呈非线性增大;桩基在系梁处存在受力不利区域,桩身内力均在系梁处发生较大突变;实际中,应避免对桥梁桩基的大面积堆载,以免堆载滑动对桥梁产生破坏。

**关键词:**桥墩;桩基;堆载滑动;堆载大小;侧向偏位;内力

**中图分类号:**U441

**文献标志码:**A

## 引言

在山区修建铁路和公路时,为避免对山体过度削切,保护现有的自然环境,往往采用高架桥穿越河岸、峡谷等特殊地区。但在这种地区修建桥梁时,桥墩桩基础难免会建立在山体边坡地段。在桥墩桩基础施工完成后,由于受到地形的限制,钻孔挖取的土体很难运输到堆土场堆放,而选择就近在桥梁墩台周围<sup>[1]</sup>。此时,堆积在桥墩周围的土体就变成施加在桥墩桩基础上的外荷载<sup>[2-4]</sup>。

堆土荷载会对桥梁墩台基础产生两个方面的影响:一是堆土荷载作为施加在桥墩桩基础上的外荷载,会对桥墩桩基础产生侧向压力,致使桥墩桩基础产生内力与变形,当桩体所受侧向压力大于桩侧土体抗力时,桩侧土体受到破坏,导致桥墩桩基础倾斜,从而影响桥梁上部结构的安全使用;二是由于堆填土较为松散,在受到雨水,河流冲刷之后,在山坡地段上堆积的填土容易产生滑坡,堆载

滑动产生的滑坡推力作用在桥墩桩基础上,加大了桥墩桩基础的受力与变形,轻则造成桥墩桩基础倾斜,重则造成桥墩桩基础开裂,影响其正常使用<sup>[5]</sup>。

针对堆载所引发的桥梁桩基偏位,国内外诸多学者进行了较为深入地研究。Cai F<sup>[6]</sup>等学者通过有限元法剪切强度计算理论,运用无厚度弹塑性边界条件,建立了桩-土作用的三维弹塑性模型,通过模型验算斜坡抗滑桩对工程治理的稳定性效果。周德泉<sup>[7]</sup>、黄珏鑫<sup>[8]</sup>通过室内模型试验研究了不同堆载面积、堆载距离、桩顶荷载等因素对模型桩的影响,并分析了其受力变形规律。魏焕卫<sup>[9]</sup>等通过有限元分析方法,编制了大面积堆载对邻近桩基影响的计算分析程序,计算出了桩顶水平位移,并分析了地面堆载大小等因素对桩顶位移的影响。代恒军<sup>[10]</sup>等采用三维有限元分析方法,对地面堆载作用下邻近桩基变形性状进行了模拟分析,分别研究了浅层土体弹性模量和桩身刚度对各排桩基侧向变形的影响。

本文针对某公路大桥桥梁偏位的实际工程问题,将

收稿日期:2016-12-19

基金项目:国家自然科学基金(59479017)

作者简介:张玺彦(1990-),女,山东潍坊人,硕士生,主要从事岩土工程方面的研究,(E-mail)332446071@qq.com;

雷胜友(1965-),男,陕西渭南人,教授,博士,主要从事土力学、岩石力学、加筋土高挡墙等方面的研究,(E-mail)rongrong11085310@sina.com

实际情况加以等效,把桩柱式桥墩桩基看作受主动、被动土压力、桩间土作用及滑坡推力的刚架,用位移法求得在堆载作用下和堆载滑动作用下桥墩与桩基的内力和位移,并与现场实测结果进行对比,从而进一步对堆载滑动后堆载大小对桥梁桩基础的力学行为的影响进行深入剖析,同时提出了有效的防治措施。

## 1 工程概况

### 1.1 桥梁概况

某公路大桥修建于山谷河流地区,在 K58 + 160 (1<sup>#</sup>) ~ K58 + 340 (9<sup>#</sup>) 区段沿斜坡展开,5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup> 桥墩均处于斜坡坡肩部位,在线路横向上呈 35° ~ 40° 的陡坡地形(图 1)。

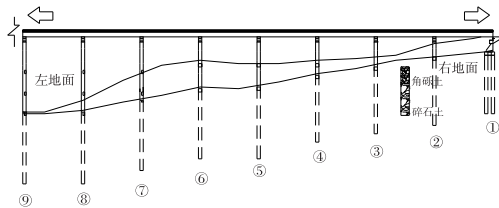


图 1 某大桥局部示意图

由于后期桥墩施工过程中在该区段堆积了大面积回填土,导致填土堆积坡度达 45° ~ 50°,在纵桥上填土堆积高度达 3 m ~ 16 m,在横桥上填土堆积高度达 3 m ~ 20 m,在纵横方向上填土厚度变化很大。7<sup>#</sup> 桥墩桩基础横断面及堆载示意图如图 2 所示。5<sup>#</sup> ~ 7<sup>#</sup> 墩的详细尺寸与填土情况见表 1。

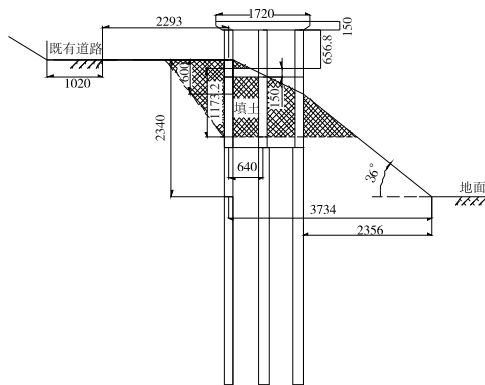


图 2 7<sup>#</sup> 桥墩桩基础横断面及堆载示意图(单位:cm)

表 1 桥墩、桩基尺寸与堆土情况

桥墩编号	桥墩长 /cm	桥墩直径 /cm	桩基长 /cm	桩基直径 /cm	堆载宽 /m
5 <sup>#</sup>	1800	180	4000	200	5.31
6 <sup>#</sup>	1800	180	4000	200	6.78
7 <sup>#</sup>	1800	180	4200	200	11.47

现场监测发现 5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup> 桥墩发生了偏移,7<sup>#</sup> 桥墩向右侧偏移了 11 cm,向后侧偏移了 4 cm;6<sup>#</sup> 桥墩向右侧偏

移了 6 cm,向后侧偏移了 3 cm,5<sup>#</sup> 桥墩仅是向右侧偏移了 3 cm。桥墩附近堆填土发生了明显的滑坡现象,填土边坡坡肩线位置处有数道张拉裂缝,坡肩侧可见明显下沉现象,斜坡中部、下部可见鼓胀裂缝和剪出特征,坡脚处可见局部垮塌。根据现场调查发现,主要是由于斜坡上堆载、降雨导致堆载滑动,进而作用在桥梁桩基上,导致桥梁桩基发生偏位。

### 1.2 场地地质条件

桥墩所在斜坡毗邻黄河左岸,呈坡洪积地貌,斜坡整体呈“凸”线型形态特征。根据现场勘察,并对所挖填土取样,测得下层土样的容重  $\lambda = 21.2 \text{ kN/m}^3$ ,天然含水率  $W = 12\%$ ;上层土样的容重  $\lambda = 21 \text{ kN/m}^3$ ,天然含水率  $W = 18\%$ ,粘聚力  $C = 18 \text{ kPa}$ ,内摩擦角  $\varphi = 15^\circ$ 。地基土以角砾土、碎石土、卵石土为主,表层为少量的耕植土,耕植土下为碎石,碎石之下为卵石。其桩侧摩阻力标准值  $q_k$  和地基土承载力基本容许值  $[f_{a0}]$  见表 2。

表 2 地基土承载力参数

地基土名称	$q_k / \text{kPa}$	$[f_{a0}] / \text{kPa}$
角砾土	120	350
碎石土	160	550
卵石土	170	650
粉土	30	150

## 2 分析步骤

### 2.1 计算工况

桥墩施工作业过程中在该区段堆积了大面积回填土,此时桥墩与桩基并未发生严重偏位。随着雨季来临,黄河水位上涨,填土上部受降雨侵蚀,加上松散填土的自重沉降,填土边坡发生了滑坡,导致个别桥墩发生了偏移。从实际情况分析,桥墩发生偏位主要经历了两个阶段:

(1) 堆土荷载产生的主动土压力使桥墩内力发生变化,但未发生严重偏位,处于弹性变形阶段。

(2) 雨季来临及黄河水位上涨使斜坡上堆土产生滑坡,桥墩在滑坡推力作用下发生了严重偏位。

从上述两个阶段进行分析、比较在填土荷载作用下和堆载滑动作用下桥墩与桩基的内力和变形。

### 2.2 模拟计算

由于桩间设置连接梁,桩的内力分布都发生变化,沿桩体弯矩方向的变化规律不同于悬臂桩内力分布形式,因此不能将桩柱式桥墩桩基看作组合梁,而是将其作为受主动、被动土压力、桩间土作用及滑坡推力的刚架更合适。

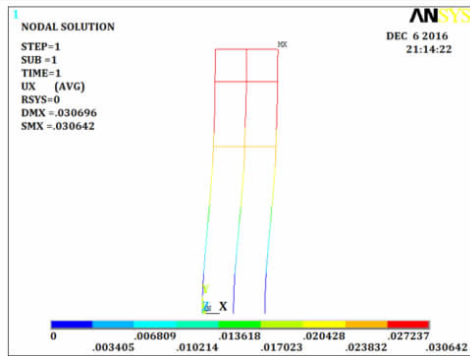
为了解堆载滑动前后桥墩桩基础的受力变形问题,

利用平面有限元对上述工况进行模拟分析。将堆载滑动前的桥墩桩基础受力看作在堆载土压力作用下刚架的内力与变形分析,将堆载滑动后的桥墩桩基础受力看作在滑坡推力作用下的刚架内力与变形分析。采用简化的 Bishop 法对坡体稳定性进行分析,根据现场地质条件,坡体稳定性系数不小于 1.35,运用 Slope/W 程序得到合理的条分结果,再采用滑坡推力传递系数法算得滑坡推力。分别将土压力、滑坡推力作用在与实际桥墩桩基础等效的刚架上,得出堆载滑动前后桥墩桩基的变形与受力。

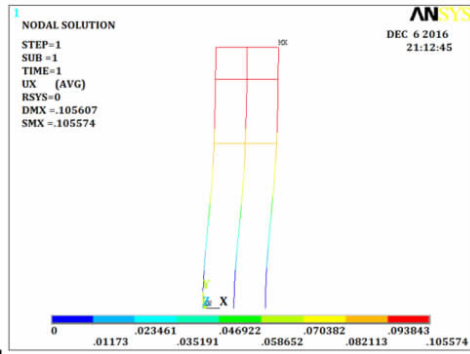
### 3 桥墩桩基计算结果分析

#### 3.1 堆载滑动前后 7# 桥墩计算结果分析

图 3 是 7# 桥墩桩基础堆载滑动前后位移云图。



(a) 堆载滑动前位移云图



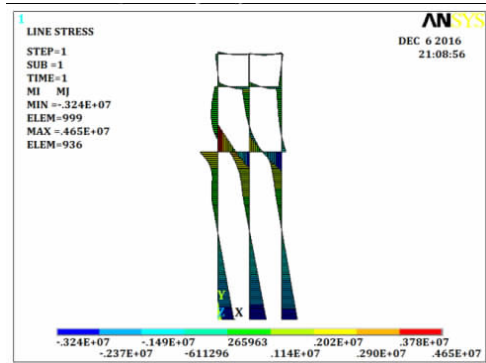
(b) 堆载滑动后位移云图

图 3 7#墩堆载滑动前后位移云图

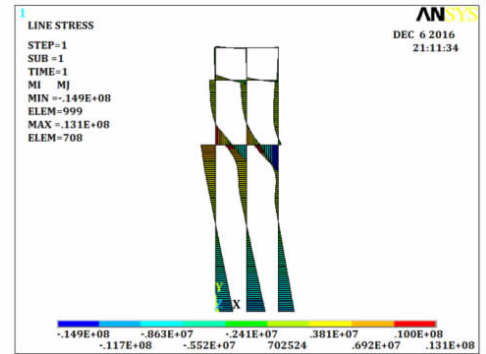
由图 3 可知,在堆土荷载作用下,7#桥墩桩基础发生了横桥向偏移,此时偏位值为 30.6 mm,桥墩与基桩处于弹性变形范围内。堆填土在受到雨水,河流冲刷之后产生滑坡,堆载滑动产生的滑坡推力会作用在桥墩桩基础上,此时偏位值为 105.6 mm,比堆载滑动前偏位值增大了 2.45 倍,与偏位实测值 110 mm 基本相符。

图 4、图 5 为 7# 桥墩堆载滑动前后弯矩剪力图,表 3 为堆载滑动前后墩柱的最大弯矩值和最大剪力值及出

现的相应位置。

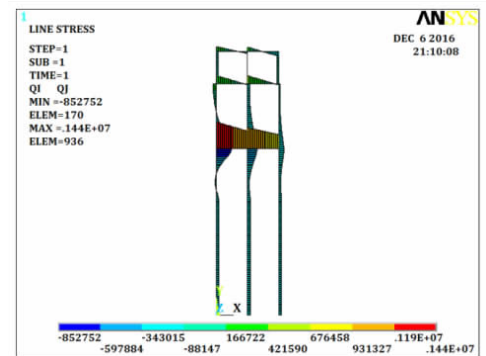


(a) 堆载滑动前弯矩云图

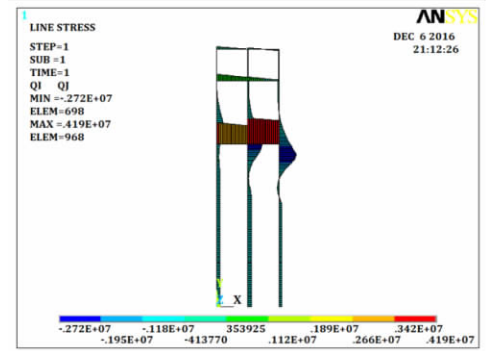


(b) 堆载滑动后弯矩云图

图 4 7#墩堆载滑动前后弯矩云图



(a) 堆载滑动前剪力云图



(b) 堆载滑动后剪力云图

图 5 7#墩堆载滑动前后剪力云图

由图 4 和表 3 可知,7# - 1 墩柱堆载滑动前的最大

弯矩为 3046.2 kN,堆载滑动后为 8147.7 kN,增大了约 1.68 倍,出现在地面下 13.2 m(系梁处),之后弯矩急剧减小;7<sup>#</sup>-2 与 7<sup>#</sup>-3 墩柱堆载滑动后的最大弯矩较堆载滑动前分别增大了 2.51 倍和 4.29 倍,同样出现在地面下 13.2 m(系梁处)的位置。其中 7<sup>#</sup>-1 墩柱弯矩值增长最小,7<sup>#</sup>-3 墩柱弯矩值增长最大。

由图 5 和表 3 可知,堆载滑动前最大剪力出现在左侧系梁上,为 1440.0 kN,堆载滑动后最大剪力出现在右

侧系梁上,为 4190.0 kN,增大了约 1.91 倍。7<sup>#</sup>-1 墩柱剪力有所减小,变化最大的为 7<sup>#</sup>-3 墩柱,剪力最大增大了 7.82 倍。堆载滑动后墩柱上剪力最大值均出现在滑动后的地面处。

综上所述,当发生实测偏位时,7<sup>#</sup>墩将产生显著的附加弯矩,剪力变化明显,显然这将会威胁到桥梁桩基的安全。

表 3 7<sup>#</sup>墩堆载滑动前后桩身弯矩剪力

桥墩名称	弯矩			剪力			备注
	堆载滑动前最大值/(kN·m)	滑动后最大值增量/(kN·m)	增加百分比/%	堆载滑动前最大值/kN	滑动后最大值增量/kN	增加百分比/%	
7 <sup>#</sup> -1	3046.2	5101.5	167.5	-852.75	260.22	30.5	堆载滑动前后弯矩、剪力最大值均出现在地面下 13.2 m(系梁处)
7 <sup>#</sup> -2	3394.2	8531.8	251.4	-584.67	-1911.13	326.9	
7 <sup>#</sup> -3	2523.5	10819.5	428.7	-306.88	-2400.72	782.3	

3.2 堆载滑动前后 5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>桥墩计算结果分析

对 5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>桥墩桩基偏位结果进行简略分析。5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>

桥墩桩基堆载滑动前后偏位值与最大弯矩值、剪力值见表 4。

表 4 5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>墩堆载滑动前后墩柱桩身偏位、弯矩、剪力

桥墩名称	弯矩			剪力			位移			备注
	堆载滑动前最大值/(kN·m)	滑动后最大值增量/(kN·m)	增加百分比/%	堆载滑动前最大值/kN	滑动后最大值增量/kN	增加百分比/%	滑动前/mm	滑动后/mm	滑动后实测值/mm	
5 <sup>#</sup> -1	1762.2	150.3	8.5	-259.22	1.14	-0.44				堆载滑动前后弯矩、剪力最大值均出现在地面下 13.2m(系梁处)
5 <sup>#</sup> -2	1915.7	893.5	46.6	-273.15	-447.77	163.9	19.0	27.1	30.0	
5 <sup>#</sup> -3	1627.8	3270.4	200.9	-206.48	-1343.72	650.8				
6 <sup>#</sup> -1	2312.6	2964.2	128.2	-377.89	-378.75	100.2				
6 <sup>#</sup> -2	2509.6	3706.7	147.7	-353.89	-1339.51	378.5	24.9	63.4	60.0	
6 <sup>#</sup> -3	2129.3	7528.5	353.6	-243.44	-1318.86	541.8				

由表 4 可知,5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>墩堆载滑动前后偏位值分别增大了 0.43 倍和 1.55 倍,与滑动后实测值接近。所得弯矩图剪力图与 7<sup>#</sup>墩变化规律相似,验证了上述模型和分析结果是合理的。5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>墩最大弯矩、最大剪力对比规律与 7<sup>#</sup>墩基本相同,当达到实测的偏位值时,桩身将产生显著的附加弯矩,剪力变化明显,威胁到桥梁桩基的安全。

3.3 堆载滑动后堆载大小对桥墩的影响分析

由上述分析可知,堆载滑动对桥墩偏位、弯矩、剪力影响最大,因此针对滑动后桥墩的计算结果进行分析。5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>桥墩一侧堆载宽度分别为 5.31 m、6.78 m、11.47 m,因此研究三组桥墩的偏位、弯矩、剪力变化,可以得出在不同堆载宽度(堆载大小)条件下桥墩偏位、弯矩、剪力的变化规律。

(1) 堆载滑动后桥墩位移结果分析

图 6 为滑坡后 5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>桥墩三根墩柱位移随桩深变化的曲线图。

由图 6 可知,(1)在上述三种堆载大小情况下,桩身位移随着桩深的增加逐渐减小,最大值出现在墩顶处;(2)随着堆载大小的增加,桩身位移逐渐增大,当堆载大

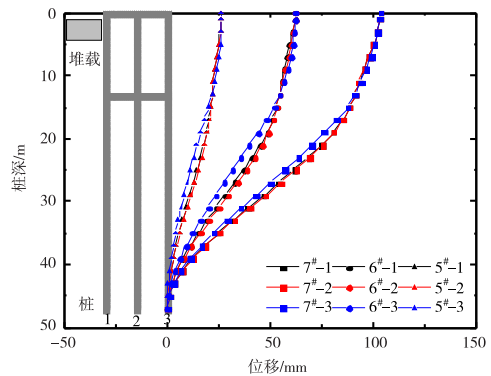


图 6 不同堆载大小下桩身位移图

小增大 1 倍时,桩身位移平均增大 1.85 倍;(3)在不同堆载大小作用下,最靠近堆载的桩 1 位移值最大,桩 2、桩 3 位移值较小,但三者相差不大。这是由于桥墩的两组系梁把三根墩柱联结成一个整体,相当于一个刚架,所以每组桥墩中的三根墩柱位移值相差不太大,不超过 30%。

(2) 堆载滑动后桥墩弯矩结果分析

图 7 为滑坡后 5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>桥墩三根墩柱弯矩随桩深变

化的曲线图。

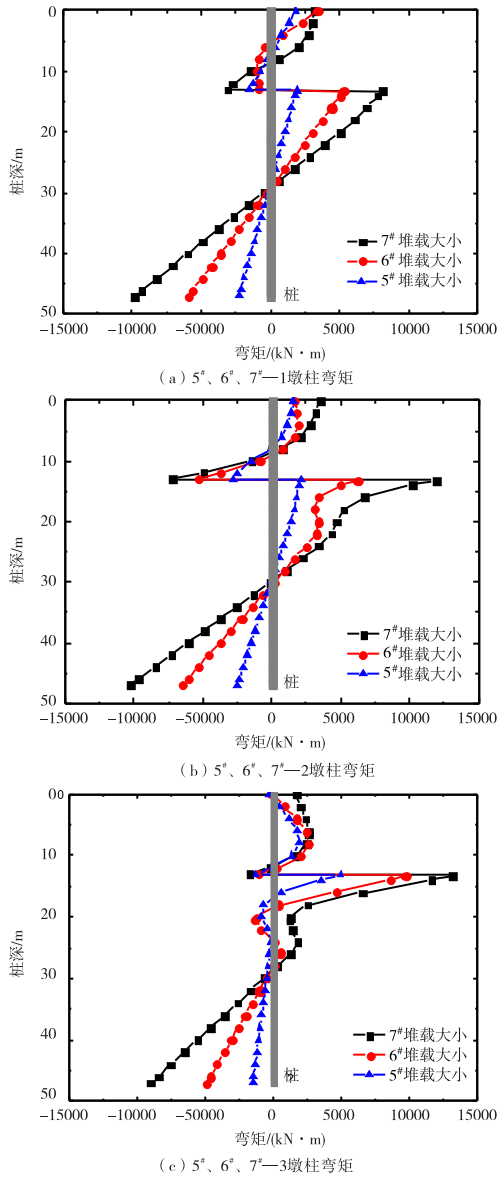


图7 不同堆载大小下桩身弯矩图

由图7可知,(1)5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>桥墩的三根墩柱的弯矩变化曲线随着堆载大小的增加而呈顺时针旋转,即随着堆载大小的增加,桩身各部分弯矩均增大,说明堆载大小对桩身所受弯矩影响较大;(2)三组桥墩的第一根墩柱弯矩变化幅度最小,第三根墩柱弯矩变化幅度最大;(3)桩身中上部出现了正弯矩,桩身下部出现负弯矩,均在地面下约13.2 m处(系梁处)发生较大突变。系梁处弯矩显著增加,说明系梁约束使得桩身弯矩向不利的方向发展。

由不同堆载大小下桩身剪力图可知(图8),(1)随着堆载大小的增加,桩身各部分剪力均增大;(2)三组桥墩的第一根墩柱剪力变化幅度最小,第二、三根墩柱剪力变化规律相似,且第三根墩柱变化幅度最大;(3)桩身

剪力基本为负,共发生两次突变,第一次较大突变发生在地面下约13.2 m处(系梁处),系梁约束使得桩身剪力显著增加,第二次发生在地面下约21 m处,从此处向下,剪力为常数。

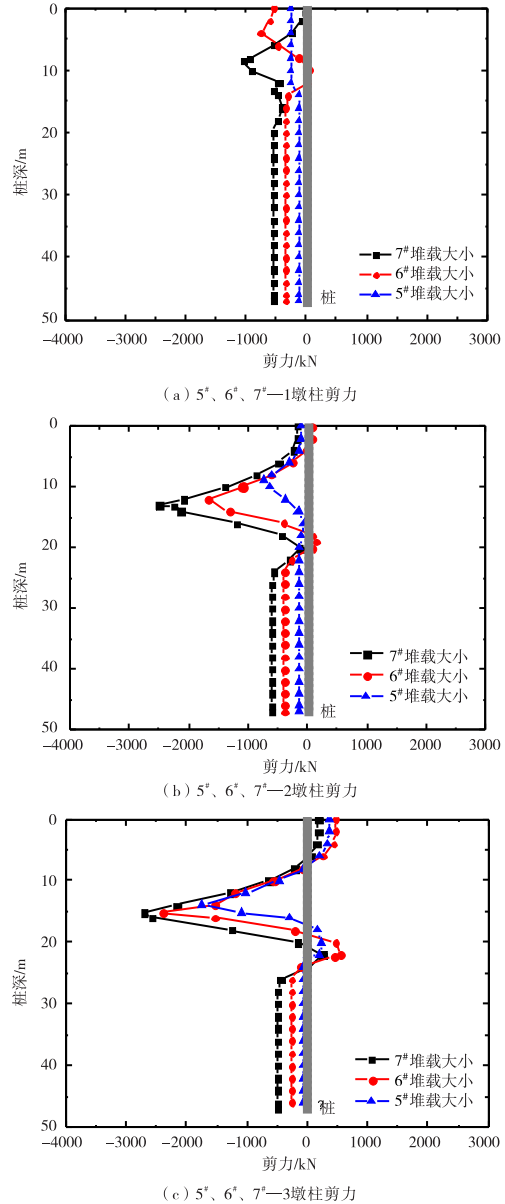


图8 不同堆载大小下桩身剪力图

### 4 治理措施

经过前期计算分析表明在堆载滑动前,墩柱和系梁剪力、弯矩都在破坏临界值之内,结构处于安全状态。由于堆载滑动使得结构的剪力、弯矩增加明显,剪力已超过抗剪极限值,弯矩也达到抗弯极限,桥墩处于不安全的状态。

为防止破坏进一步加剧,应立即清除边坡堆载,对受损系梁进行加固,确保桥梁安全运营。并应对桥墩周

围的边坡采取加固措施,以防止边坡滑动对桥墩产生下滑力,对桥墩不利;为防止坡脚受到黄河水流的冲刷,应增加桥墩防冲刷构筑物;为防止降雨加大对边坡的冲刷,应增加排水工程。

经现场详细勘察,后期卸载后墩柱已恢复部分偏位,并对系梁进行了修补加固,同时为防止滑坡加剧,从边坡土体特征考虑,选择重力式挡土墙对桥墩所在坡体进行防护。经勘察,治理效果显著。

## 5 结 论

(1)堆载使桥梁桩基产生一定的偏位、附加弯矩和剪力,但由于降雨、河水冲刷等原因发生了堆载滑动,此时桥墩偏位值、附加弯矩值、剪力值明显增大。因此在桥梁边坡中,堆载滑动对桥梁安全性影响显著。在实际工程中,应避免对桥梁桩基的大面积堆载,堆载滑动前出现异常情况应及时预防治理,以免发展到堆载滑动阶段。

(2)将5#、6#、7#墩位移、弯矩和剪力对比图视作堆载宽度(堆载大小)对桩身位移、桩身弯矩、桩身剪力的影响曲线。堆载大小是影响桩身偏位和内力(弯矩和剪力)分布的重要因素,位移和内力随堆载大小增大而增大。桩基在系梁处存在受力不利区域,桩身内力均在系梁处发生较大突变。

## 参 考 文 献:

- [1] 蔺鹏臻,武发辉,杨子江.考虑边坡效应的铁路桥墩桩基力学行为分析[J].铁道工程学报,2013(9):47-52.
- [2] 马远刚,王艳芬,陈晨.堆载作用下桥梁被动桩偏移受力分析及处理措施[J].桥梁建设,2014(4):22-26.
- [3] 黄清.地面堆载对既有桥梁结构的影响分析[J].桥梁建设,2014(5):39-44.
- [4] 尹平保.陡坡段桩柱式桥梁桩基设计计算方法及试验研究[D].长沙:湖南大学,2013.
- [5] 陈柯星.软土地堆载对邻近桩基影响的试验及数值研究[D].杭州:浙江大学,2015.
- [6] CA F,UGAI K.Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles[A].Japanese Geotechnical Society[C].Tokyo,JAPAN,2000,40(1):73-84.
- [7] 周德泉,颜超,邓超.堆载作用下桩体工程特性研究[J].中外公路,2015(1):5-9.
- [8] 黄珏鑫.邻近堆载对深厚软土地区高速铁路桥梁桩基内力与变位影响分析[D].长沙:中南大学,2014.
- [9] 魏焕卫,杨敏.大面积堆载情况下邻桩的有限元分析[J].工业建筑,2000(8):30-33.
- [10] 代恒军,梁志荣,赵军,等.地面堆载作用下邻近桩基变形的三维数值分析[J].岩土工程学报,2010(S2):220-223.

## The Impact Analysis of Surcharge Load Sliding Influence on the Bridge Pier and Pile Foundation

ZHANG Xiyan, LEI Shengyou

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** Based on a highway bridge project at the steep slope section of which the deflection of the pier and pile are caused by the load sliding, through the comparative analysis of the results of numerical calculation and field measurement, the lateral displacement around bridge pile foundation and the internal force (the bending moment and the shear force) distribution with the reasonable measures are carried out using displacement method. The load sliding is the main factor influencing the safety of bridges according to the results, significantly displacement and internal force of piers increased after sliding; the lateral displacement and internal force are increased nonlinearly with increasing loading when the magnitude of stack influencing deviation and internal force distribution of pile body; department of pile foundation near the beam where the bending moment and shear force are larger saltation appears adverse stress area. Consequently, it's necessary to avoid the large stack of bridge pile foundation to reduce bridge damages.

**Key words:** bridge pier; pile; load sliding; loading; lateral displacement; internal force