

真空联合堆载预压在杭宁高速公路软基处理中的应用

李善祥

(中铁十四局集团第四工程有限公司 山东临沂 276003)

摘 要 详细介绍了真空联合堆载预压加固软土地基在杭宁高速公路工程中的应用情况。工程实践表明,该法加固软土地基具有工期短、工艺简单、造价低、工后沉降小等优点,是排水固结加固软土地基较理想的方法,值得推广应用。

关键词 软土地基 真空 堆载预压 塑料排水板

1 引言

随着高等级公路的飞速发展,在软土地基上修建高速公路已很普遍。软土地基强度低,含水量高,排水固结慢,预压期长,地基易失稳。因此探索一种加荷时间短、工艺简单、造价低、施工安全方便、地基不易失稳的软土地基加固方法是非常必要的,真空联合堆载预压法具有上述优点,在杭宁高速公路部分软土地基路段进行了试验应用,效果十分显著。

2 工程概况

杭宁高速公路二期工程全长 63.7 km,其中软基路段长 29.2 km,占线路总长的 45.8 %。工程中不少路段软土厚 10 ~ 22 m,呈流塑状,含水量高,渗透

性低,粘度重,抗剪强度低,设计预压周期长,原设计基本采用超载预压和粉喷桩方法予以加固。其中 K80 + 406 ~ K80 + 507 段原设计采用塑料排水板加超载预压处理,加固深度 18 m,填土高度 5 m 以上,预压期为 12 个月。考虑到工期紧,经研究决定在该段打塑料排水板后,采用真空联合堆载预压进行软基加固处理试验。

试验段长 101 m,宽 57 m,塑料排水板穿透软土层,间距 1.2 m,呈梅花形布置。

南京水利科学研究院钻探表明,该试验段软土层厚 19 ~ 22 m,属淤泥和淤泥质粘土,含水量高,粘性大,具有压缩性高和强度低等特点。据土性指标,把该土层划分为 3 层,即(1)淤泥,厚 2 m;(2)淤泥质粘土(),厚 8 m;(3)淤泥质粘土(),厚 9 ~ 12 m,

表 1 试验段土层物理力学指标

土层名称	含水量 / %	湿密度 /(g·cm ⁻³)	天然孔隙比 e	相对密度 G _s	液限 W _L / %	塑限 W _p / %	塑性指数	先期固结压力 P _c / kPa	压缩指数 C _c	固结系数 /(×10 ⁻⁴ cm ² ·s ⁻¹)		强度指标						无侧限抗压强度 q _u / kPa	十字板强度 s _u / kPa
										C _v	C _h	不固结快剪		直接快剪		固结快剪			
												C _u /kPa	φ/(°)	C _q /kPa	q/(°)	C _{cu} /kPa	c _u /(°)		
淤泥	68.1	16.0	1.880	2.75	54.0	31.6	22.9	44	0.72	2.26	3.32	6	5.1	6	2.1	4.6	10.0	21.2	12.2
淤泥质粘土()	51.8	17.2	1.400	2.72	44.1	29.1	15.1	58	0.41	3.47	4.86	9	5.3	9	1.1	3.9	13.0	22.0	20.7
淤泥质粘土()	42.9	17.7	1.192	2.72	37.1	23.9	13.2	68	0.33	7.32	10.25	9	2.9	8	2.2	0	13.9	27.5	25.8

各土层主要物理力学指标见表 1。

收稿日期:2001 - 09 - 24
作者简介:李善祥(1964 —),男,高级工程师。1988 年毕业于石家庄铁道学院铁道工程专业

3 软基加固施工

3.1 排水系统

利用塑料排水板作为竖向排水体,间距 1.2 m,板长 19~22 m,砂砾垫层和中粗砂作为水平向排水体。

在软基加固区周围开挖临时排水边沟,排干地表水,清除腐殖物,用砂性土找平,形成路拱并碾压,铺设 40 cm 厚砂砾垫层,再铺 15 cm 厚中粗砂,并在四周挖密封沟至不透水土层下 50 cm,沟内塑料排水板不剪断,沿沟边向上插入到砂砾垫层中至少 20 cm 长。

3.2 抽气抽水系统

利用水平向布置的滤管、真空管路和真空泵作为抽气抽水系统。滤管用 $\varnothing 40$ mm 硬质塑料管,上钻滤水孔,真径 8 mm,孔距 50 cm,滤管间用胶管连接,并用铁丝扎紧,外包一层无纺土工布,捆扎结实。真空管路用 $\varnothing 10 \sim 15$ cm 钢管,管间用有筋胶管连接。真空泵用射流泵。滤管接真空管路并与真空泵连接,应密封不漏气。

将滤管埋入 15 cm 厚的中粗砂层中,间距 6 m,与加固区外围的真空管路连接,上铺一层土工布后,覆盖聚乙烯闭气薄膜 3 层,闭气薄膜边缘埋入密封沟内,沟内用粘土回填夯实,形成高出闭气薄膜 100 cm 的止水“围墙”,围墙以内的闭气膜上加 40~100 cm 深的水。

3.3 布设测试仪器

塑料排水板打完后,埋设孔隙水压力测头 6 只,测斜管 1 根,分层沉

降管 1 根,并进行加固前的原状土十字板剪切试验,在闭气膜下设真空度仪 7 套,膜面沉降板 9 只。仪器布置见图 1。

3.4 真空联合堆载预压

真空试抽 12 h 后,膜下真空度达到 40 kPa,说明闭气情况良好。第 2 天开始正式抽气,抽真空 30 d 后,排干膜上覆水,铺设一层土工布,上覆细粒宕渣过渡层,再上面进行正常路基填筑,边填土边抽真空,一直维持到考虑预留沉降的填土完成(填高 6.7 m),终止抽气,卸真空装置。该段路基填筑为期 108 d。

4 软基加固观测结果分析

4.1 真空度和预压荷载

4.1.1 膜下真空度

在闭气膜下 7 个不同位置实测的真空度平均值:抽气 12 h 达到 40 kPa,2 d 后为 80 kPa,到第 5 d

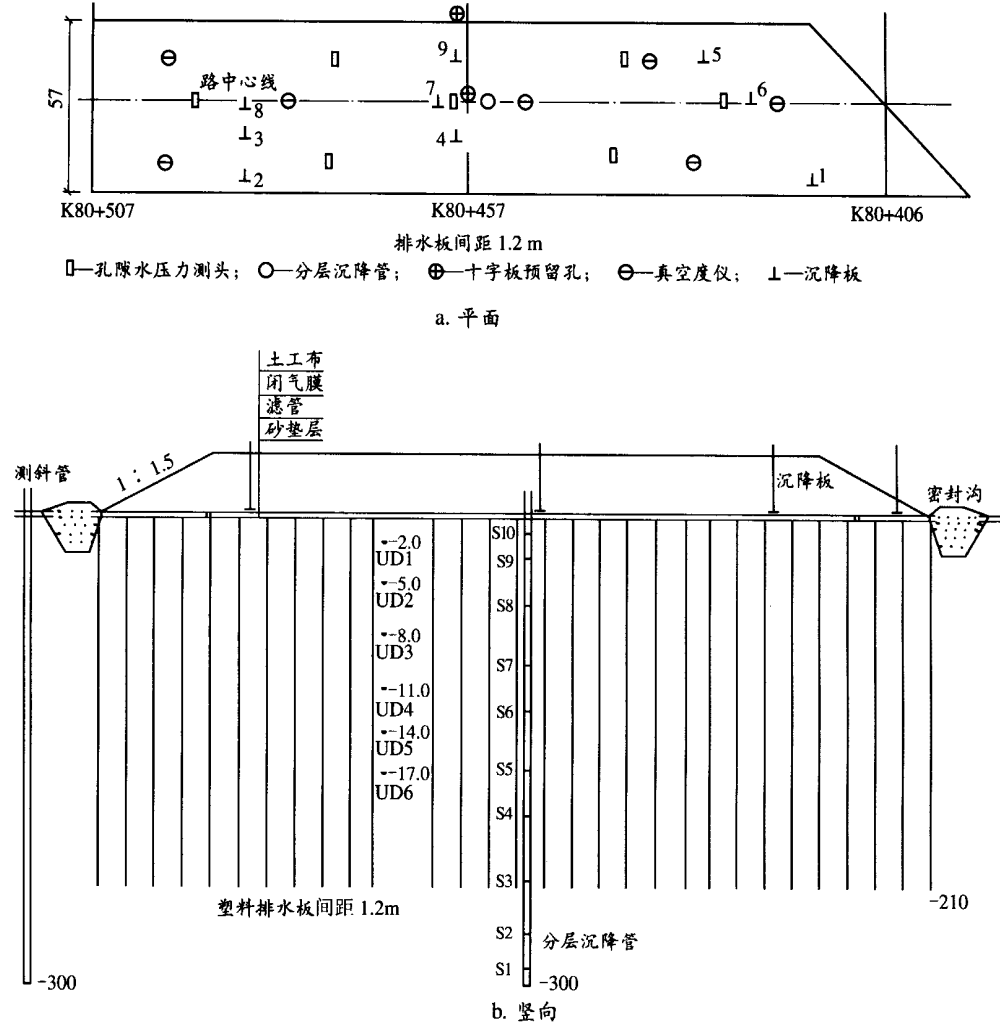


图 1 真空联合堆载试验段仪器布置

达到 85 kPa 以上,维持 30 d,排出膜上覆水、铺设土工布、上细粒岩渣过渡层后,按一般路基填筑要求进行边填土边抽真空。

4.1.2 预压荷载的推算

在膜上覆水 40 ~ 100 cm 后,相当于加上平均 6 kPa 的均布荷载。因此膜面处的预压荷载为 $P = P_a + P_w$ 90 kPa, P_a 为真空荷载, P_w 为水荷载;在上岩渣后,其预压荷载即为 $P = P_a + P$, P 为实际的填筑荷载。

4.2 孔压

图 2 为真空联合堆载试验段孔压与荷载的变化时程线。

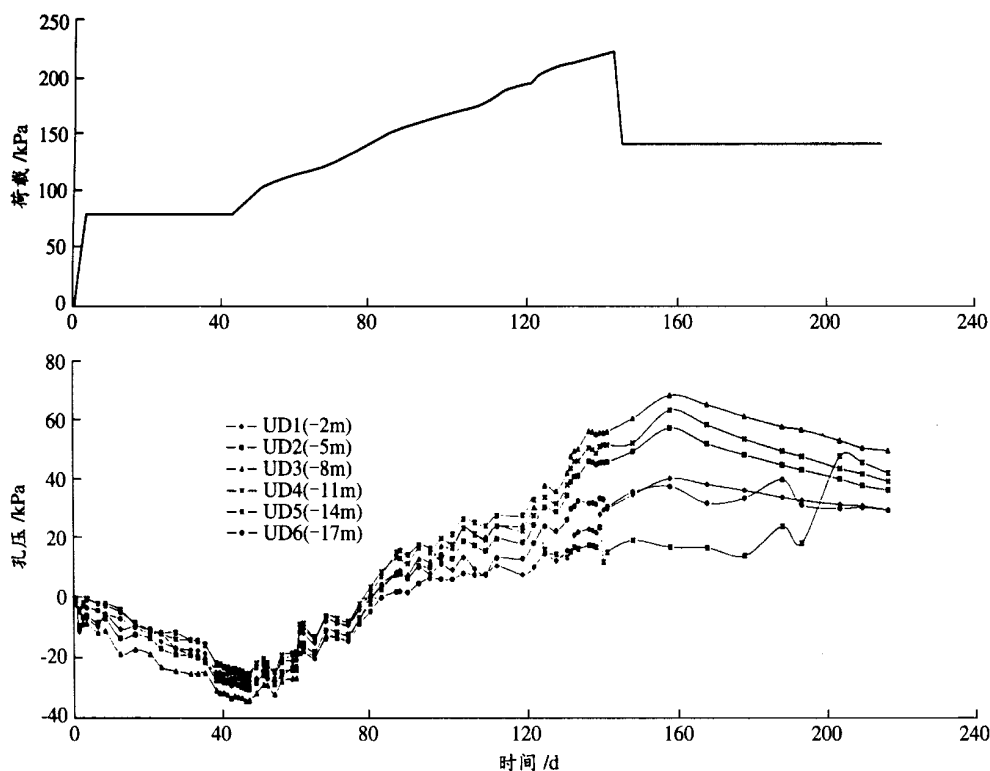


图 2 真空联合堆载预压试验段孔压与荷载变化时程线

从图中可以看出,抽真空初期,在膜下 85 kPa 的真空压力作用下,加固范围内不同深度的土体均不同程度地产生负的孔隙水压力。在抽真空 40 d 左右时,产生最大的负的孔压,为 - 25 ~ - 35 kPa。随着膜面排水和路堤荷载的增加,土体产生正的孔隙水压力,实测表现为负的孔隙水压力减小。当路堤填筑荷载达 145 kPa 时,土层各深度范围内的土体正、负孔隙水压力基本为零,说明 145 kPa 的路堤荷载在各土层中产生的正孔隙水压力恰好与膜内 85 kPa

的真空压力在土体中产生的负孔隙水压力抵消,路堤地基所承受的 75 kPa 的附加应力,基本由土体来承受。此时地基承受外荷作用并不产生超静孔隙水压力,根本就不存在地基失稳的问题,这对路基填筑十分有利。

当路堤进一步填高,地基土在真空压力和路堤荷载双重作用下开始产生正的孔隙水压力,但其增长速度较慢。当路堤填筑至 6.7 m(即相当于荷载 224 kPa)左右时,在真空压力作用下不同土层的超静孔隙水压力增长为 15 ~ 58 kPa,平均孔隙水压力系数 B 最大值为 0.38,远远小于 0.6 的安全值,经计算此时路基稳定安全系数达 1.8 以上,路堤填筑

是稳定的。路堤填筑至设计高度(考虑预留沉降量)后终止抽气,孔压再继续增长约 10 kPa、历时 2 星期左右后开始降低。孔压降低速率大致为 0.22 ~ 0.47 kPa/d,路基稳定安全系数计算值大于 1.5,路基是稳定的。

4.3 地面沉降与分层沉降

图 3 为真空联合堆载试验段实测的地面沉降和土体分层沉降时程线。在排水板打设范围内不同深度的土层在联合荷载作用下

产生不同程度的压缩变形,且在相同土层厚度时,浅层土的变形要比深层土的变形大,上部 11 m 土层的变形量是下部 11 m 土层的 2 倍。其最大的地面沉降在路堤填筑前为 50 cm 左右,边抽真空边填筑至终止抽气前已完成 178 cm 的沉降(此时已填至设计要求的高度)。路堤的平均填筑速率为 5.3 cm/d,路基平均沉降速度为 12 mm/d。停止抽气后,沉降曲线开始趋缓,最后 20 d 的沉降速率为 2.6 mm/d,比前一个 20 d 的沉降速率 3.2 mm/d 小 20% 左右。历时 220 d 后,

地表沉降累计 204.5 cm。最后 3 个 20 d 的日均沉降速率分别为 3.2、2.6 mm/d, 呈收敛态势。

形发生在地表, 达 15 cm 左右; 而最大的挤出位移发生在地表下 9~12 m, 最大亦达 12 cm 左右。

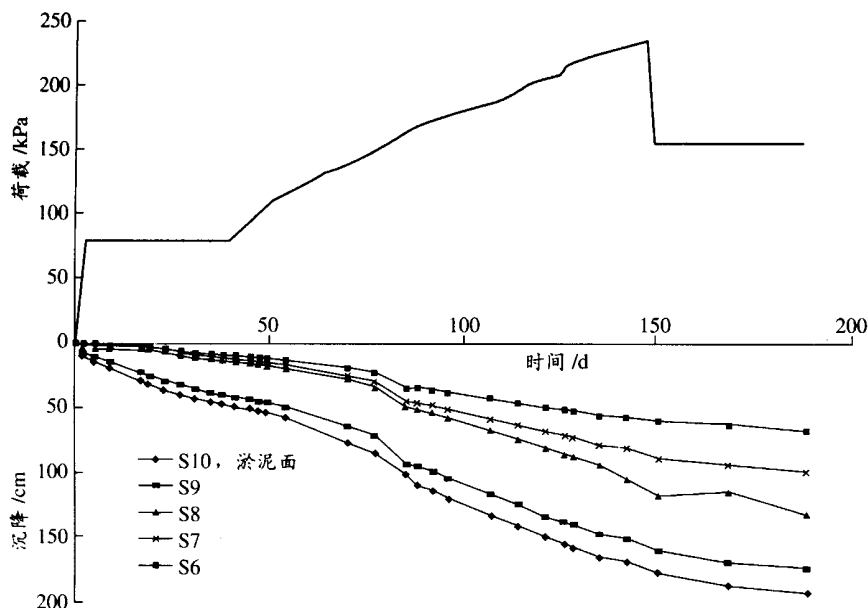


图3 真空联合堆载试验段分层沉降与荷载变化时程线

4.4 土体侧向位移

图4为真空联合堆载试验段土体水平位移实测曲线。从图中可以明显看出, 土体水平位移在排水板深度范围内均有发生, 但以浅层 15 m 范围为大。在真空荷载作用 1 个月时, 表层土体产生向路中心方向约 15 cm 的最大收缩变形。在真空联合堆载 2 周内, 土体继续发生向路中心方向的收缩变形, 其最大值约为 25 cm, 但深度位置却发生变化, 已从表面向地下 3~10 m 位置发展。在路堤填筑超过真空荷载后, 路堤坡脚土体从地表到深层均产生向坡脚外发展的水平位移, 至最大填筑高时其最大向外挤出量平均达 8.3 cm。抽气结束即填筑完毕, 地表下土体继续向外侧挤出, 但发展速率已有减缓。预压 65 d, 最大向外挤出量 6.3 cm, 水平位移速率小于 1.0 mm/d。

从图4可以看出, 路堤填筑基本完成时最大的收缩变

需 445 d, 即真空联合堆载的预压时间仅为纯堆载预压时间的 50% 左右。

5.2 地基沉降分析

从表2还可以看出, 要求加固后地基达到 96% 的固结度时, 真空联合堆载的沉降量为 204.5 cm, 由此反推纯堆载的沉降量为 226 cm 相比, 减少了 10%

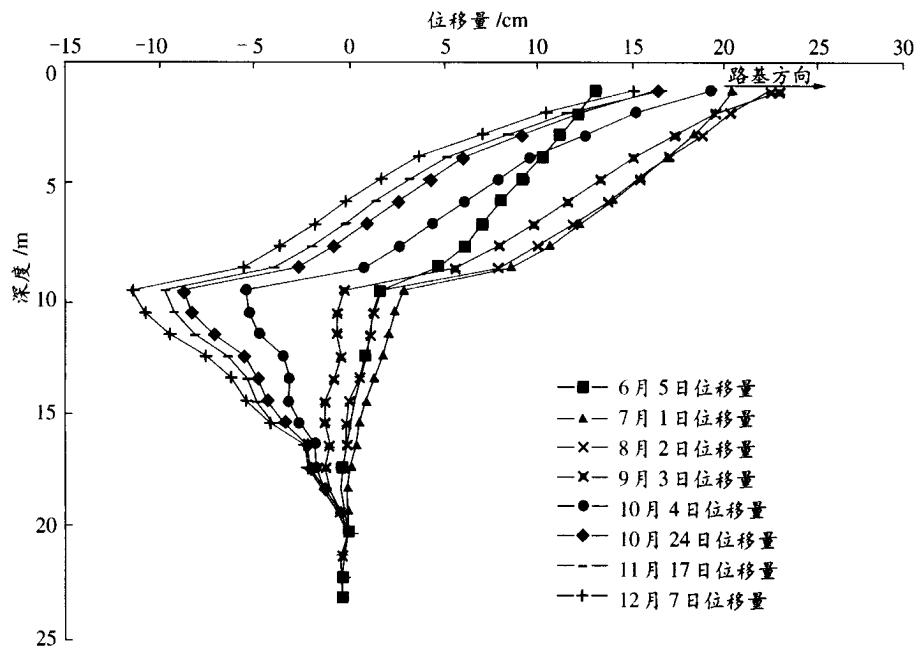


图4 真空联合堆载试验段水平位移曲线

表2 真空联合堆载与模拟堆载地基固结度对比

荷载方式	真空联合堆载	模拟堆载
填筑荷载/ kPa	154	154
加载及预压时间/ d	220	445
实测沉降/ cm	204.5	/
计算 S_v / cm	213.0	235.4
计入路面荷载时计算 S_v / cm	220.3	244.8
实测平均固结度/ %	96.0	/
计算平均固结度/ %	/	96.0
预估工后沉降/ cm	15.8	/

左右的沉降量,这样,减少了填方量,对节省工程造价十分有利。

预估工后沉降小于 20 cm,已满足设计要求。

真空联合堆载试验的实测沉降和计算沉降过程线比较吻合。

5.3 加固前后十字板强度检测

加固前后的十字板强度检测结果见表 3。

表3 加固前后的实测十字板强度提高率 %

土层名称	$S_{u后} / S_{u前}$	
	路中心	坡脚
淤泥(0~2 m)	517	209
淤泥质粘土() (2~10 m)	240	85
淤泥质粘土() (10~22 m)	311	120

(上接第 37 页)

4 应用

广深线某一双孔顶进涵就是依据库仑土压力理论按上述方法设计顶背的,其单孔顶背长度为 10.1 m,单孔的最大顶力设计值为 12 000 kN,顶背后土层参数 $\alpha = 10^\circ$, $\tan \alpha = 0.3$, $\beta = 16^\circ$, $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$, $i = 0$,初步取 $\delta = 20^\circ$,顶背为 M10 浆砌片石。

经计算, $H = 6.94 \text{ m}$,取 $H = 7.0 \text{ m}$;顶背其它尺寸 $b = 3.51 \text{ m}$, $\theta = 32.512^\circ$ 。用式(5)、(6)、(7)进行检算,证实顶背尺寸合适,设计的顶背是安全可靠的。

5 应用库仑理论与朗金理论计算结果的比较

用朗金土压力理论设计上述顶进涵顶背,结果

从表 3 可以看出,加固前后地基土的强度沿深度都有较大的提高,说明加固效果是十分理想的。

(1)路中心处的预压效果明显优于坡脚处,而且表层强度增长更为明显;(2)十字板强度加固后平均增长 2 倍之多。

地基土强度增长如果按照有效固结压力法计算,计算值明显低于实测值。这是由于理论计算中没有考虑到真空预压是等向固结,软土地基不会因土体剪应力增加而导致抗剪强度的衰减,从而使不排水强度比计算值高。因此在计算真空预压地基的土体强度增长值时必须考虑一个大于 1.0 的强度综合影响系数。本试验区得到的 $K = 1.4 \sim 1.6$ 。

6 结束语

(1)利用真空联合堆载预压法来加固杭宁高速公路高填方宕渣路堤的软土地基是完全可行的。虽然真空预压法在浙江省的高速公路建设中尚属首次应用,但意义较为重大,可以进一步推广应用。

(2)真空联合堆载预压最后 20 d 日均沉降速率为 2.6 mm/d,如果要满足 5 mm/月的沉降速率要求,建议填筑完毕后继续抽真空,预计在 1~2 个月内即能完成最终沉降,然后卸除抽真空装置进行下道工序的施工。

(3)采用真空预压法加固软土地基,有利于克服公路工程“三大质量通病”中的不均匀沉降难题。

(4)真空预压施工操作方便,作业效率高,适用于大规模、连片地基加固。

为: $H = 9.92 \text{ m}$, $b = 5.092 \text{ m}$,顶背断面积为 29.505 m^2 。

采用库仑理论设计单孔顶背减少浆砌片石 103.47 m^3 ;顶背高度减小了 2.92 m,方便了施工。

6 结语

广深线、蓝烟线顶涵过程中,当顶涵顶背承受最大顶力时,顶背未产生肉眼可见的位移及变形,顶涵顺利到位,实践证明应用库仑土压力理论设计的顶背能够满足要求,安全可靠。而且与朗金土压力理论计算结果相比,减少了顶背的工程量,节约了资金,收到了较好的经济效益。

RAILWAY CONSTRUCTION TECHNOLOGY

No. 1, 2002

Abstracts and Keywords

Exploration and Innovation of the Engineering Management of Speed-Raise Project of Chinese Railways

Fu Zhihuan

Abstract The paper analyzes the background of implementation of speed-raise strategy of Chinese railways. In line with the Chinese reality, the status of Chinese railways and the technological and economic features of the railways, it puts forward that speed-raise is a huge systematic engineering. To win the success of speed-raise, China ought to rebuild the traffic organization mode, tap the potential of the capacity and implement the speed-raise of the existing lines to optimize the match of speed, density and loading capacity of the train. On the other hand, China should rely on its own efforts to develop technical equipment while importing and digesting the state-of-the-art technologies of foreign countries. The paper introduces the practice and the successful experience of MOR in management and technical innovations for the subsystems-organization and management of technical innovation engineering, transport organization and management innovation and safety and risk control management for speed-raise—under the guidance of the systematic engineering theory. Finally, the paper discusses the impact of speed-raise on social benefits, enterprises' economic profits of speed-raise and overall competitiveness of the railways industry.

Keywords railrage; speed-raise; management; innovation

Technical standards for the construction of ballast track bed on Qinhuangdao-Shenyang Passenger Special Line

Li Xiangguo, Kuang Yong, Yue Qude

Abstract Technical standards for the construction of ballast track bed on Qinhuangdao-Shenyang Passenger Special Line are introduced, and the construction process of this line is outlined.

Keywords passenger special line, ballast track bed, technical standard

The application of vacuumization plus pre-loading to the treatment of soft ground on Hangzhou-Ningbo expressway

Li Shanxiang

Abstract Construction practice indicates that vacuumization plus pre-loading has the following advantages in the treatment of soft ground: short construction period, simple construction technology, low cost and little settlement after completion.

Keywords soft ground, vacuum, pre-loading, application

The influence of superelevation design of small radius plane curved road surface on the pavement depth of simple girder bridge deck

Wang Junwen

Abstract A general equation for theoretical variation of pavement depth of bridge deck caused by superelevation design is derived. This equation is used for checking variation of pavement depth.

Keywords highway bridge, simple girder bridge, pavement depth, variation

The application of Coulomb's earth pressure theory to design of jacking base of a jacked culvert in soft ground

Lu Jianfeng

Abstract Construction practice proves that the jacking base of jacked culverts designed with Coulomb's earth pressure theory are safe and reliable, and its volume of work are reduced.

Keywords Coulomb's earth pressure, soft ground, jacked culvert, jacking base, design

The construction of long sleeper buried ballastless track over a bridge

Wu Jiuyi, Yang Jinhua

Abstract The paper introduces the construction technology of long sleeper buried ballastless track, and its quality control measures.

Keywords passenger special line, ballastless track, construction

A numerical analysis of the influence of a new tunnel construction on the safety of adjacent existing tunnel

Pan Xiaoma, Zhang Chengman, Wen Xiangdong, Wang Kaikang

Abstract A computation analysis shows that excavation of a new tunnel shall cause the re-distribution of surrounding rock stress, and influence the safety of lining structure of an existing adjacent tunnel. When distance between two tunnels is fixed, the lining structure close to the excavation side shall be influenced to a greater extent.

Keywords adjacent tunnel, stress, lining structure, numerical analysis

Assembly and disassembly of the bracket for the in-situ cast of a 220 m span arch bridge

Tang Yicheng, Yang Tongfu

Abstract The paper introduces assembly of arch-shaped stiff bracket, pre-loading test, and multipoint unloading arch technology.

Keywords arch bridge, bracket, assembly, unloading arch

An exploration of the coordinate computation of spiral curves

Xu Wanpeng

Abstract A general equation for computation of any curve coordinate is derived based on characteristics of spiral curves.

Keywords spiral curve, coordinate computation, general equation
