

无填土和高填土道路上会车荷载对顶板结构的影响分析

景来发 郑振颀 王晨鑫

中建八局第三建设有限公司，江苏苏州，210000；

摘要：随着建筑行业的发展，地库顶板超载坍塌的事故案例屡见不鲜，人们对于顶板结构安全的重视程度越来越高。本文以杭州市富阳区某 TOD 超高层项目为例，统计施工阶段临时道路的各种车辆荷载数据，与现有结构的板跨情况进行组合，通过有限元分析，对无填土和高填土地下室顶板的承载能力进行分析，从而保证施工阶段的地库顶板结构安全。

关键词：回填土；会车荷载；顶板结构

DOI：10.69979/3029-2727.25.01.039

1 工程概况及应用背景

1.1 项目概况

富政储出【2019】17 号地块（AB 地块）为杭州富阳秦望“城市眼”地上综合体项目的重要组成部分，其地下空间为秦望隧道公铁合建及秦望广场地下综合体，二者之间以正负零作为施工界面的划分。工程总用地面积为 33659m²，A 地块用地面积 18373m²，B 地块用地面积 15286m²，地上总建筑面积 281530.6 m²，项目共由四栋地上超高层单体及裙房组成，涵盖了办公、商业、酒店、影院和地下车库等多种功能设施，其中最高塔楼建筑高度 221m，均为框架-核心筒结构。

1.2 应用背景

本工程地下结构与地上结构分属不同的综合体建设项目及不同的施工总承包单位，出于结构安全及渗漏质量责任划分的考虑，地上总包单位进场后，根据地上各个施工阶段的车辆交通需求，对地库顶板进行车辆荷载进行分析。现场在地库顶板设置一条 8m 宽临时道路，车辆荷载主要考虑各类施工车辆，以及车辆在地库顶板临时施工道路上的会车工况，且由于顶板与顶板、顶板与场外道路之间均存在高差，临时道路下部做法分为无填土、高填土两种，临时道路下部顶板结构板跨亦存在不同跨径组合。

综合考虑以上复杂的工况，本工程采用综合分析各类车辆荷载，选取代表性的车辆进行研究，利用 MIDAS GEN 建立有限元分析模型，计算不同工况下施工车辆会车时对地库顶板产生的最大弯矩，然后按照《建筑结构荷载规范》（以下简称《荷载规范》）中附录 C 的公式，将其等效折算为顶板均布荷载，与地库顶板相应恒载组合后，与设计允许最大荷载对比，即可得到验算结果。通过分析，在保证地库顶板结构安全的前提下，可以有效减少地库顶板回顶支撑的工程量，并降低对地下室施工穿插的影响。

2 计算参数

2.1 地库设计参数

临时施工道路范围内，地库顶板厚度为 300mm，板跨从 2.7m~5.9m 不等，框梁截面为 500mm×1000mm、600mm×1000mm，柱网间距 7.4m×8.3m、8.9m×8.3m。

2.2 施工荷载参数

2.2.1 车辆荷载分析

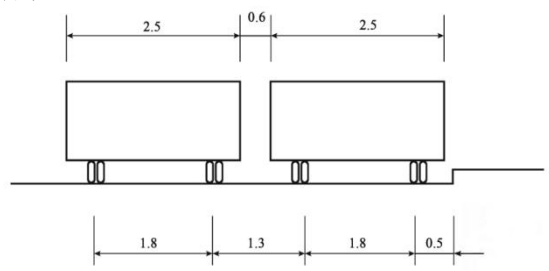
施工过程中，临时道路主要有混凝土罐车、钢筋（钢结构）材料运输车、各类货运卡车、汽车泵、180T 汽车吊（钢结构吊装）等车辆通行，经调查，常用卡车满载后重量约为 55t，相关常用车辆荷载见下表。

表 1 代表性施工车辆荷载统计

序号	类型	总重	前轮荷载 (单轮)	单轴单侧 轮胎数量	后轮荷载 (单轮)	单轴单侧 轮胎数量
1	混凝土罐车	55t	15KN	1	65KN	2
2	17.5m 半挂钢筋车	60t	20KN	1	25KN/30KN	2
3	180T 汽车吊	60t	60KN	1	60KN	1

为了保证计算结果可靠，偏安全的全部按会车工况对地库顶板结构进行复核验算，其中汽车吊类车辆荷载，本文仅考虑其行驶状态下自重，工作状态下对地库顶板的荷载在相关专项施工方案中单独验算，本文不做赘述。

车辆荷载计算时按单轮荷载进行复核，故偏安全地选择《公路桥涵通用设计规范》（以下简称《通规》）中 4.3.1 的标准车作为车辆荷载，标准车总重 55t，每个车轮荷载 70kN，轮距 1.8m，着地尺寸 0.6m×0.2m，会车时车辆横向布置参照《通规》中图 4.3.1-3，如下图所示。



顶板分类	顶板标高	路面构造做法	等效附加均布荷载 (kN/m²)
B1	-1.650	70mm 防水保护层+100mm 细砂+200mm 面层厚度	8.55
B2	-2.150	70mm 防水保护层+ (600-880mm 回填土) +200mm 面层厚度	17.55-22.59
B3	-2.150	70mm 防水保护层+ (880-1680mm 回填土) +200mm 面层厚度	22.59-36.99

2.3 设计允许荷载的确定

地库顶板设计承载力的确定方式一般有以下几种：

- ①根据结构混凝土强度及配筋情况，采用相关设计软件计算其承载力；
- ②根据地库顶板设计的覆土厚度以及消防车荷载，等效计算出顶板的承载力；
- ③咨询设计单位，由设计单位给定本项目地库顶板所允许的最大均布荷载。

本项目采用第三种，由地下结构设计单位给出地库顶板的设计荷载平面图，施工单位根据项目自身的车辆荷载进行分析对比，不超过设计允许荷载的部位，可不

图 1 会车工况下车轮横向布置图

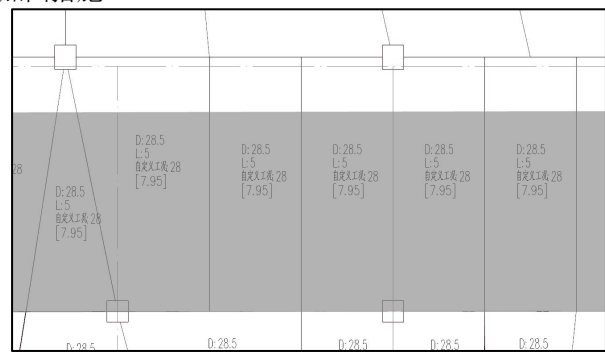
2.2.2 车辆动力系数

由于《荷载规范》表 5.1.1 中第 8 项规定的汽车荷载是一种直接作用在楼板上的等效均布荷载，已考虑了动力系数，因此在设计时可以直接采用，无需再额外考虑动力系数。同时参考《通规》中 4.3.2 条的要求，当临时道路构造厚度大于等于 0.5m 时，不考虑其冲击力，小于 0.5m 时，冲击系数取 1.3。

2.2.3 道路恒载

临时道路的恒载主要包含地库顶板防水保护层、回填土、细砂垫层、混凝土面层等构造自重，施工道路的构造做法厚度不同，其对地库顶板的均布荷载也不同，统计如下，

采取加固措施。超出设计允许荷载的部位，则采取回顶加固措施。



根据荷载平面图，对不同板跨的设计允许荷载统计如下

序号	顶板结构标高	原结构设计荷载 (kN/m²)			
		附加恒载	活荷载	自定义工况	最大荷载限值 (基本组合)
S1	标高-2.65	47.5	10	28	47.5×1.3+28×1.5=103.75
S2	标高-2.15	38	10	人防荷载 70	(38×1.2+70)/1.5=77.07
S3	标高-2.15	37/38	5/10	25	37×1.3+25×1.5=85.6
S4	标高-1.65	28.5	5	25	28.5×1.3+25×1.5=74.55

3 复核算方法

3.1 计算方法

将临时道路定位与地库顶板结构图叠图，选取具有

代表性的结构板跨，利用 MIDAS GEN 建立有限元分析模型，分不同会车工况将车轮荷载施加在模型上进行受力分析，根据得到的板跨最大弯矩，按照《建筑结构荷载

规范》GB50009-2012中附录C的公式,将其等效折算为顶板均布荷载,与道路构造做法产生的附加恒荷载进行基本组合后,与设计允许荷载限值进行对比,从而得到验算结果。

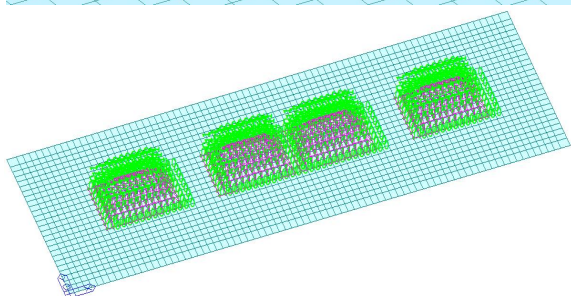
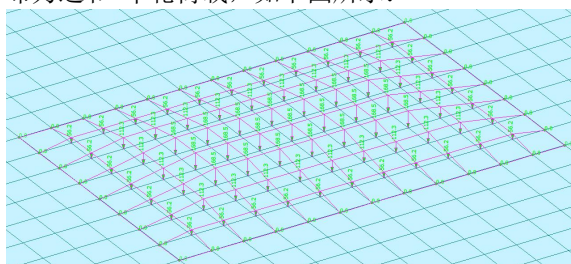
3.2 计算工况及模型与参数选取

(1) 工况一

板最小跨度2.7m,临时道路构造做法为B1,计算长度方向同时行走两辆车的情况,即跨度方向布置1组车轴、长度方向布置4个车轮,横向轮距为1.8+1.3+1.8m。按照《荷载规范》中附录C.0.5中公式计算如下:

$b_{tx}=200\text{mm}$, $b_{ty}=600\text{mm}$, $b_{cx}=200+2\times370+300=1240\text{mm}$, $b_{cy}=600+2\times370+300=1640\text{mm}$, $b=2/3\times1640+0.73\times2700=3064\text{mm}$ 。同一辆车左右轮距 $e_1=1800$,横向两辆车相邻轮距 $e_2=1300$, $b>e$,对外侧车轮 $b=3064/2+1800/2=2432\text{mm}$,对内侧车轮 $b=1800/2+1300/2=1550\text{mm}$ 。

采用midas gen建立顶板基本模型,板支座为简支,路面构造厚度 $s=370\text{mm}<500\text{mm}$,需要考虑动力放大系数1.3,跨中布置横向两辆车4个车轮 $4\times1.3\times70\text{kN}$ 的车轮荷载。规范中荷载分布宽度 b_{cy} 、 b_{cx} 是从作用面沿 45° 扩散到板厚中间的范围, midas软件中荷载是加在板顶面,且板为厚板,本身已考虑板厚,加之100mm厚砂垫层弹性模量小于混凝土,扩散效应不如混凝土,实际扩散宽度近似取 $b_{cx}=200+2\times300=800\text{mm}$, $b_{cy}=600+2\times300=1200\text{mm}$,作用面正下方荷载均布,四周均匀减小,分布力之和=车轮荷载,如下图所示:



计算出最大弯矩出现在内侧车轮下, $M_{\max}=31.3\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

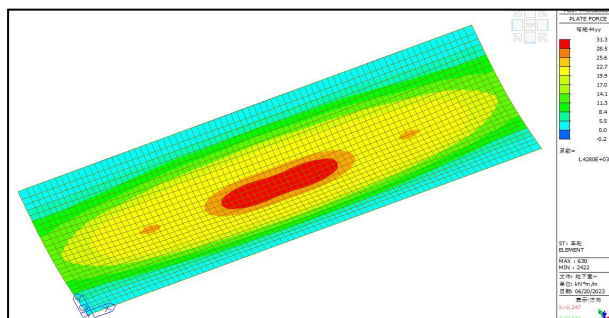
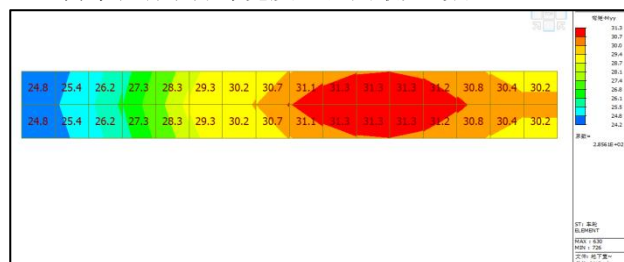


图3-4 内车轮有效分布宽度 b 范围最大弯矩:



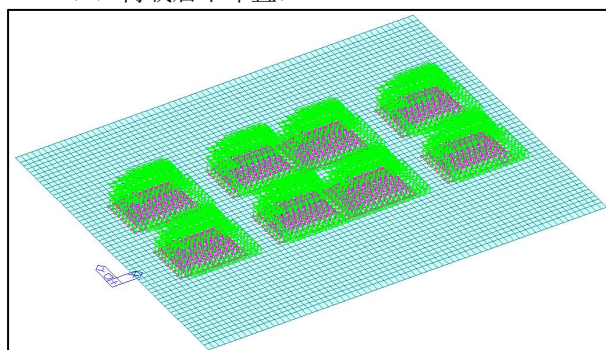
$$M_{\max}=(24.8+25.4+26.2+27.3+28.3+29.3+30.2+30.7+31.1+31.3+31.3+31.3+31.2+30.8+30.4+30.2+31.1+31.3+31.3+31.3+31.2+30.8+30.4+30.2)\times0.1+30.2\times0.05\text{ kN}\cdot\text{m}/(\text{b})=45.5\text{ kN}\cdot\text{m}/(\text{b})$$

依据式C.0.4-1,等效均布活荷载:

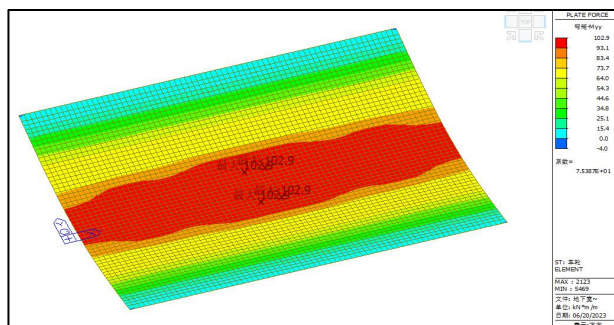
$$q_e=\frac{8M_{\max}}{bl^2}=\frac{8\times45.5}{1.55\times2.7^2}=32.2\text{kPa}$$

工况二:板最大跨度5.9m,临时道路构造做法为B1,计算长度方向同时行走两辆车的情况,即跨度方向布置2组车轴,轴距1.4m、长度方向布置4个车轮,横向轮距为1.8+1.3+1.8m。

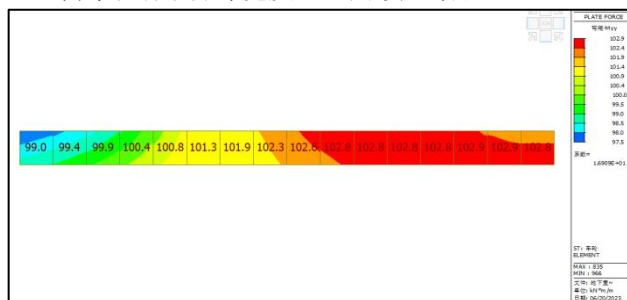
(1) 荷载居中布置:



计算出最大弯矩出现在内侧车轮附近(非车轮正下方), $M_{\max}=102.9\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ 。



内车轮有效分布宽度 b 范围最大弯矩:

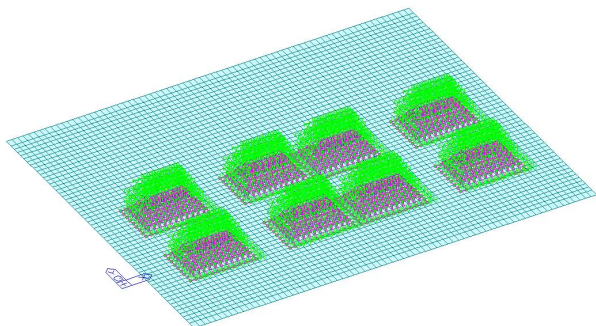


$$M_{\max} = (99 + 99.4 + 99.9 + 100.4 + 100.8 + 101.3 + 101.9 + 102.3 + 102.6 + 102.8 + 102.8 + 102.8 + 102.8 + 102.9 + 102.9) \times 0.1 + 102.8 \times 0.05 \text{ kN/m}(\text{b}) = 157.6 \text{ kN/m}(\text{b})$$

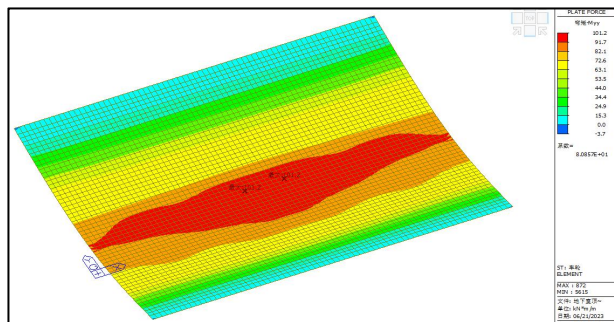
依据式 C.0.4-1, 等效均布活荷载:

$$q_e = \frac{8M_{\max}}{bl^2} = \frac{8 \times 157.6}{1.55 \times 5.9^2} = 23.4 \text{ kPa}$$

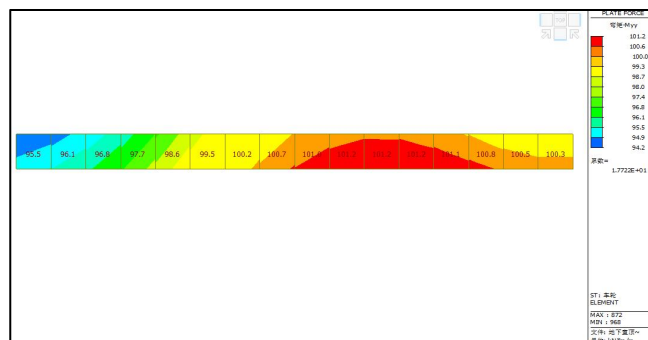
(2) 荷载偏心布置:



计算出最大弯矩出现在内侧车轮附近, $M_{\max} = 101.2 \text{ kN} \times \text{m/m}$.



内车轮有效分布宽度 b 范围最大弯矩:



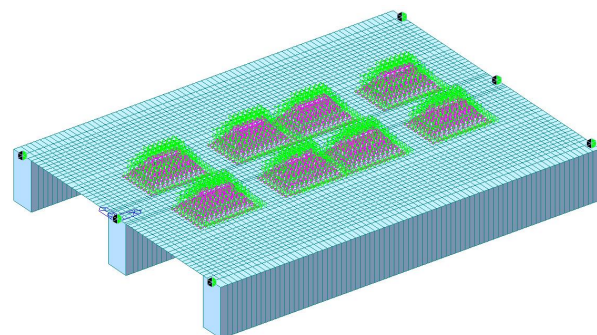
$$M_{\max} = (95.5 + 96.1 + 96.8 + 97.7 + 98.6 + 99.5 + 100.2 + 100.7 + 101.1 + 101.2 + 101.2 + 101.1 + 100.8 + 100.5) \times 0.1 + 100.3 \times 0.05 \text{ kN/m}(\text{b}) = 154.2 \text{ kN/m}(\text{b})$$

依据式 C.0.4-1, 等效均布活荷载:

$$q_e = \frac{8M_{\max}}{bl^2} = \frac{8 \times 154.2}{1.55 \times 5.9^2} = 22.9 \text{ kPa}$$

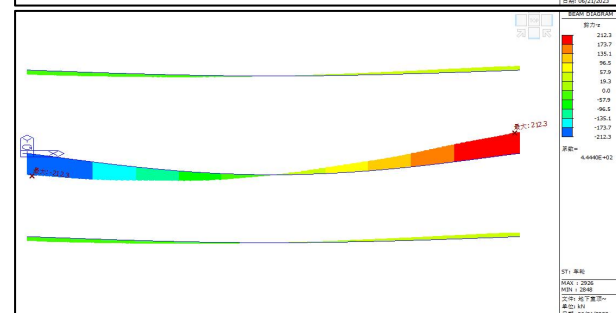
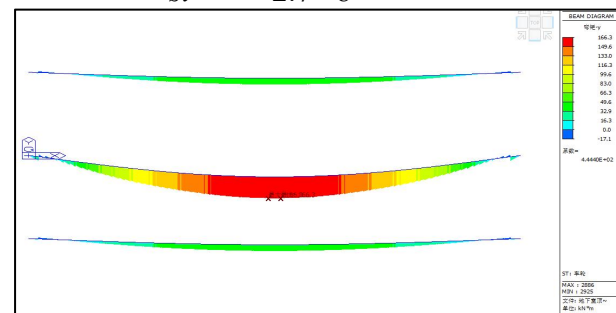
工况三: 次梁间距 2.7m, 长度 8m, 依据规范 C.0.7 计算次梁等效均布活荷载。

(1) 最大弯矩, 在次梁两侧对称布置车轮荷载。

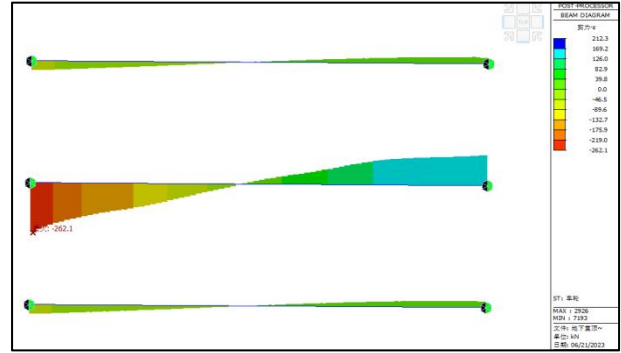
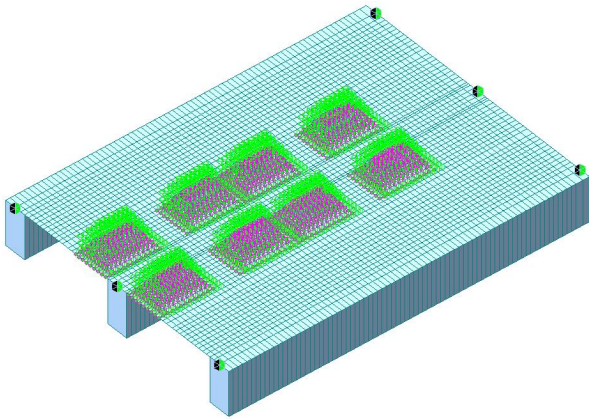


最大弯矩 $M_{\max} = 166.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$,

$$q_{eM} = \frac{8M_{\max}}{sl^2} = \frac{8 \times 166.3}{2.7 \times 8^2} = 7.7 \text{ kPa}$$



(2) 最大剪力，在次梁两侧对称布置车轮荷载，且靠近梁端。



最大剪力 $M_{\max}=262.1\text{ kN}\cdot\text{m}$,

$$q_{eV} = \frac{2V_{\max}}{sl} = \frac{2 \times 262.1}{2.7 \times 8} = 24.3\text{ kPa}$$

对以上工况分别建模计算，得到车轮分布宽度范围内最大弯矩后，通过计算得出梁板等效均布荷载取较大者为板上等效均布荷载，各个板跨会车时最不利条件均布荷载如下：

工况	车辆荷载序号	车轴数量	车轴位置	板跨 (mm)	最大弯矩 (kN×m/m)	等效均布荷载 (kPa)
工况一	S1	2 (会车)	居中	2700	45.5	32.2
工况二	S2	4 (会车)	居中	5925	157.6	23.4
	S3		偏心	5925	154.2	22.9
工况三	S4	4 (会车)	次梁两侧对称布置	2700×8000	最大剪力: 262.1	24.3
	S5				最大弯矩: 166.3	7.7

3.3 计算结果分析

通过计算可得，在不考虑土的重量的条件下，相同荷载，相同板跨，覆土越厚，等效均布荷载越小。覆土

越小，等效均布荷载越大。当车辆荷载及覆土荷载相同时，板跨越大，等效均布荷载越小。将道路构造与不同会车工况下的车辆荷载组合后，各个板跨施工荷载核算如下表：

序号	恒载和汽车活载组合方式	施工荷载 (kPa)	设计荷载 (kPa)	是否满足小于设计荷载
1	B1+S1	$32.2 \times 1.5 + 8.55 \times 1.3 = 59.4$	S4=74.55	满足
2	B1+S2	$23.4 \times 1.5 + 8.55 \times 1.3 = 46.2$	S3=85.6	满足
3	B1+S3	$22.9 \times 1.5 + 8.55 \times 1.3 = 45.5$	S3=85.6	满足
4	B2+S1 (88cm 覆土)	$23.4 \times 1.5 + 22.59 \times 1.3 = 64.5$	S2=77.07	满足
5	B3+S1 (168cm 覆土)	$23.4 \times 1.5 + 36.99 \times 1.3 = 83.2$	S1=103.75	满足

经复核，临时道路范围内地块顶板承载能力均满足施工车辆通行要求。

4 安全保障措施

1) 在地库顶板上的临时道路入口处悬挂限载、限速及行驶路线标识。

2) 大型运输车辆如钢结构运输车、钢筋运输车、混凝土搅拌车驶入地库顶板时，必须经地磅称重，确保驶入地库上临时道路的施工车辆总质量控制在 55t 以内，超重车辆严禁驶入。

3) 在主体结构施工过程中，现场施工车辆较多时，现场应配置临时调度或指挥人员。

4) 地库顶板行车后，定期对地库顶板变形及裂缝进行监测和记录，发现异常情况立即处置。

5) 地库顶板强度未达到 100%设计强度时，严禁车辆驶入。

5 结语与建议

本文旨在介绍一种针对填土和非填土工况下车轮会车荷载的分析方法。这种方法通过精确的计算和复核，

确保了在施工过程中,临时道路与消防车道共用时,地库顶板的承载能力能够满足施工车辆的通行荷载要求。这种分析方法的应用,不仅保障了施工阶段结构的安全性,而且避免了在地下室进行大面积的架体回顶作业,从而减少了对地下室穿插施工的干扰,为项目带来了显著的经济效益。

在施工过程中,车辆荷载的不确定性是一个不容忽视的问题,为了应对这一风险,在考虑车辆荷载及进行车辆荷载布置时,应充分考虑最不利条件下的各种组合。同时,建议在布置临时道路时,尽量避免特殊结构部位,如悬挑结构、后浇带以及超大板跨等,这些部位由于其结构特性,可能对车辆荷载的承受能力较低,且容易产生较大的渗漏风险。

此外,本文还强调了在施工过程中对地库顶板承载能力的持续监测的重要性。通过定期的检查和评估,可以及时发现潜在的结构问题,并采取相应的措施进行处理。这不仅有助于确保施工安全,还能够提高施工效率,减少不必要的成本支出。

参考文献

- [1] 建筑结构荷载规范: GB50009-2012[S].
- [2] 公路桥涵通用设计规范: JTG D60-2015[S].
- [3] 陈亮, 董超, 马明宇. 装配式住宅项目地库顶板运输通道方案研究[J]. 施工技术, 2020, 49(12): 1052-1054.
- [4] 茹文荣. 地下室顶板之上施工道路加固处理的验算[J]. 电力工程技术, 2014, 36(7): 806-807.