

# 地下车库顶板消防车活荷载的合理取值研究

戴冠民, 田 堃

(中国海诚工程科技股份有限公司, 上海 200031)

[摘要] 根据消防车活荷载的作用特征分析指出, 该项活荷载应取荷载的偶然组合参与结构构件的承载能力极限状态验算; 应取荷载的频遇组合参与结构构件的正常使用极限状态验算。以常用的柱网尺寸为  $8.4\text{m} \times 8.4\text{m}$  的全埋式地下车库为例, 讨论了地下室顶板分别采用单向板、双向板和无梁楼盖方案时消防车轮压的最不利布置方式。并采用 SAP2000 有限元软件中的薄板单元模型分析推导出相应的消防车活荷载的等效均布荷载值。与规范将消防车活荷载视为一般活荷载而提供的建议值相比, 本文提供的意见无论在荷载组合概念上, 还是在消防车等效均布荷载取值上更显科学合理, 且其在工程上的应用具有较大的经济效益与社会效益。

[关键词] 作用特征; 偶然组合; 频遇组合; 消防车活荷载

中图分类号: TU312<sup>+</sup>.1 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2013)01-0044-04

## Research on reasonable value of live load for fire engine on all buried underground garage roof

Dai Guanmin, Tian Kun

(China Haisum Engineering Co., Ltd., Shanghai 200031, China)

**Abstract:** By the acting characteristic analysis of fire engine's live load effect, it is indicated that fire engine's live load effect should be combined in accidental combination for ultimate limit status computation, or combined in frequent combination for serviceability limit status computation. The worst disposals of fire engine tire acting on the roof were discussed when the roof structure is one-way slab, two-way slab or non-beam slab for the example of the common column span  $8.4\text{m} \times 8.4\text{m}$  of all buried underground garage. The equivalent uniform fire engine's live load value was given by finite element software SAP2000 using thin-plate element. The recommendation is more reasonable and has better economic and social benefits whether considering the concept of load combination or comparing with the fire engine load recommended by the code which considers fire engine's live load as general live load.

**Keywords:** acting characteristic; accidental combination; frequent combination; fire engine's live load

## 0 引言

目前住宅小区建设中常见若干高层住宅围合一大片集中绿地, 而在集中绿地之下便是大型全埋式地下车库, 与高层住宅地下室连在一起。消防车道和消防登高面往往压在地下车库顶板之上。在结构设计中, 通常将消防车活荷载视同一般活荷载, 按《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)<sup>[1]</sup> (简称荷载规范) 表 5.1.1, 消防车活荷载标准值根据地下室顶板的结构形式, 单向板取  $35\text{kN/m}^2$ , 双向板或无梁楼盖取  $20\text{kN/m}^2$ ; 参与荷载的基本组合, 进行结构构件的强度验算; 参与荷载的标准组合, 进行结构构件的挠度和裂缝宽度验算。这样处理虽简单, 但没有考虑消防车活荷载的特征, 无论是在荷载组合概念上还是在活荷载具体取值上都是有问题的, 从而对地下车库顶板设计的经济性产生明显影响。

## 1 消防车活荷载的作用特征

### 1.1 偶然性

建筑物失火是偶然事件, 本身发生的概率很小。消防站接警后, 消防车才会疾驰至火灾现场实施扑救。对地下车库顶板而言, 消防车活荷载可视为偶

然荷载。另外还有一种可称为偶然荷载的伴随荷载, 如雪荷载、路面维修荷载、上部结构构件因着火而局部跌落甚至坍塌对地下车库顶板造成的撞击荷载, 或因着火引起局部爆炸所产生的冲击波作用等, 这些荷载都是可能发生、也可能不发生的。

### 1.2 短暂性

消防车施救过程通常只有几十分钟, 最多几小时, 故消防车活荷载作用在地下车库顶板上的持续时间短暂, 其占地下室整个设计基准期 (一般取 50 年) 总持续时间的比例极小。

### 1.3 移动性

行驶在消防车道上的消防车活荷载是一个移动荷载, 对地下车库顶板的某个特定区域 (跨间) 而言, 荷载的作用位置和作用力大小是随时间变化的。荷载的到来与离开, 可能是一瞬间的事, 如消防车在行驶途中; 也可能持续几小时, 如消防车停在消防登高面或合适的扑救位置。

作者简介: 戴冠民, 教授级高级工程师, 一级注册结构工程师, 结构专业总监, Email: dgm@haisum.com。

1.4 局部性

消防车活荷载包括消防车自重和充水重,其对地下车库顶板并不是一个满铺的均布荷载,是通过轮压(作用面积很小),或再经上覆土层应力扩散后作用于顶板上局部区域的局部均布荷载。

1.5 冲击性

消防车活荷载同其他汽车活荷载一样,因在消防车道上行驶,要考虑车辆启动和刹车时的冲击。

2 消防车活荷载的合理取值

2.1 荷载的偶然组合

考虑到消防车活荷载的偶然性,对于承载能力极限状态,消防车活荷载不应参与荷载的基本组合,而应参与荷载的偶然组合。荷载规范第 3.2.6 条条文说明指出“偶然荷载效应组合的表达式内不再考虑荷载分项系数,也不必同时考虑两种或两种以上偶然荷载”。显然,作为偶然组合内唯一的偶然荷载,消防车活荷载应取标准值。上述的所谓偶然荷载的“伴随荷载”可能有可能无,情况复杂,按荷载规范规定不与消防车活荷载同时考虑。荷载规范公式(3.2.6-1)将荷载的偶然组合写为:

$$S_d = \sum_{j=1}^m S_{G,jk} + S_{A,d} + \psi_{f_1} S_{Q_{1k}} + \sum_{i=2}^n \psi_{q_i} S_{Q_{ik}} \quad (1)$$

式中:  $S_{G,jk}$  为按永久荷载标准值  $G_{jk}$  计算的荷载效应值;  $S_{Q_{ik}}$  为按第  $i$  个可变荷载标准值  $Q_{ik}$  计算的荷载效应值,其中  $S_{Q_{1k}}$  为诸可变荷载效应中起控制作用者;  $S_{A,d}$  为按偶然荷载标准值  $A_d$  计算的荷载效应值;  $\psi_{f_1}$  为第 1 个可变荷载的频遇值系数;  $\psi_{q_i}$  为第  $i$  个可变荷载的准永久值系数。

2.2 荷载的频遇组合

考虑到消防车活荷载的短暂性,对于正常使用极限状态,消防车活荷载不应参与荷载的标准组合,而应参与荷载的频遇组合。荷载规范第 3.2.7 ~ 3.2.10 条条文说明“在正常使用的极限状态设计时,与状态有关的荷载水平,不一定非以设计基准期内的最大荷载为准,应根据所考虑的正常使用具体条件来考虑”。考虑到消防车活荷载的短暂性,对于正常使用极限状态,若参与标准组合,实际上反映的仍是设计基准期内最大荷载效应组合,是一个极值效应,只是在可靠度水平上略有降低。将它作为正常使用条件下验算具有短暂特征的荷载水平,在逻辑概念上是有欠缺的。对此,笔者认为对于正常使用极限状态,消防车活荷载应参与频遇组合。具体可参见荷载规范式(3.2.9),写为:

$$S_d = \sum_{j=1}^m S_{G,jk} + \psi_{f_1} S_{Q_{1k}} + \sum_{i=2}^n \psi_{q_i} S_{Q_{ik}} \quad (2)$$

式中:第 1 项为地下室顶板永久荷载产生的效应值,应取标准值;第 2 项为消防车活荷载产生的效应值,作为偶然荷载应取频遇值;第 3 项指与偶然荷载同时出现的其他活荷载产生的效应值,可能有可能无,至于哪一项参与荷载组合,规范没作具体规定,设计时可视具体情况而定,如需要考虑,应取准永久值。这样考虑恰好体现了消防车活荷载的短暂特征。

考虑到消防车和普通小客车在小区消防车道(地下车库顶板)上通过的持续时间占整个设计基准期总持续时间的比例大不相同,故荷载规范表 5.1.1 对两者取不同的频遇值系数是合乎情理的。

2.3 消防车轮压的最不利布置

考虑到消防车活荷载的移动性,显然在研究消防车活荷载取值时,首先要确定消防车轮压的最不利布置。常用 300kN 级消防车平面尺寸与排列间距见图 1<sup>[2]</sup>。一台消防车总重(包括消防车自重+满水重) 300kN,共有 2 个前轮,4 个后轮,每个前轮重 30kN,每个后轮重 60kN,每个轮子作用面积 0.2m × 0.6m。

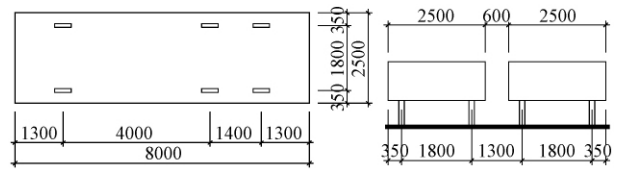


图 1 300kN 级消防车的平面尺寸与排列间距

全埋式地下车库的常用柱网尺寸为 8.1m × 8.1m ~ 8.4m × 8.4m,现以 8.4m × 8.4m 区格板为例。常用的结构布置方案有 3 种,见图 2。消防车轮压的最不利布置方式共有 8 种,见图 3。

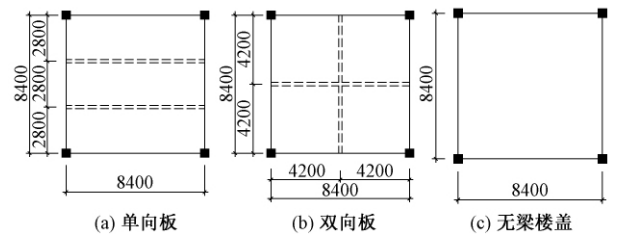


图 2 布置方案

2.4 消防车轮压作用下板的有限元计算

现采用 SAP2000 有限元软件中的薄板单元模型推导上述 8 种最不利布置方式下的消防车活荷载的等效均布荷载。

由文[3]第 2.7.14 条和第 3.2.11 条第 2 款可知,当考虑防水和种植要求时,全埋式地下室钢筋混凝土顶板厚度应不小于 250mm。当考虑防水与种植要求时,单向板及双向板板厚均取 250mm,无梁

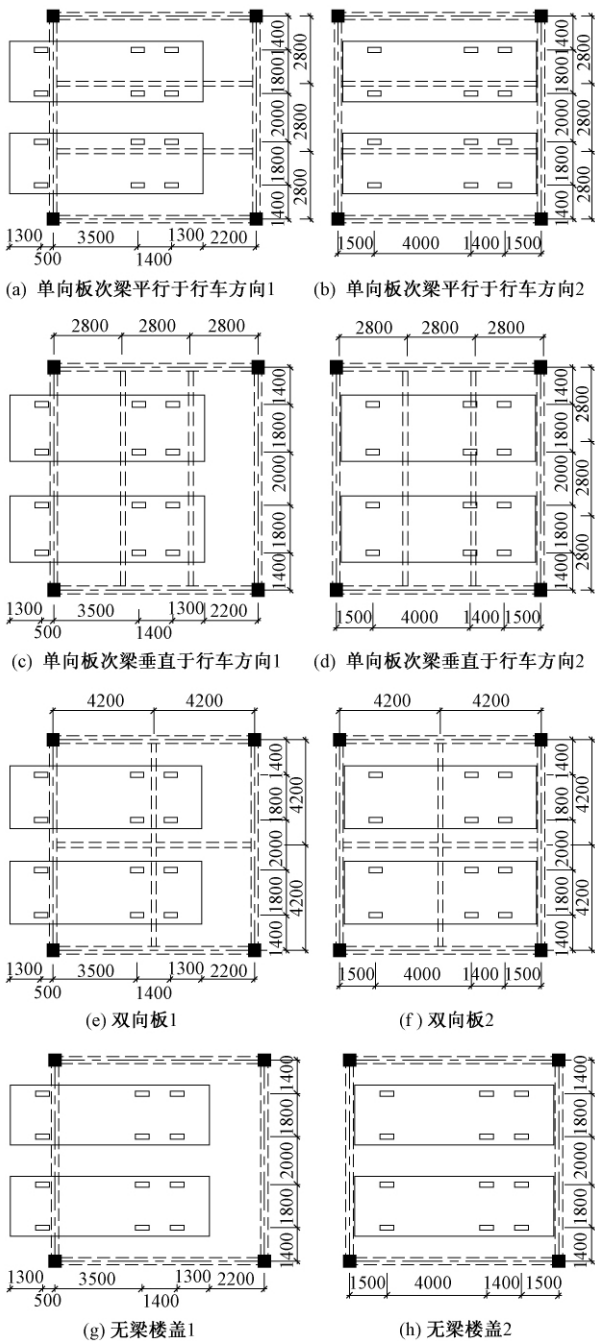


图3 消防车轮压的最不利布置方式

楼盖板厚取 300mm; 当不考虑防水与种植要求时, 板厚分别取: 单向板 100mm, 双向板 120mm, 无梁楼盖 300mm。单元网格划分尺寸为 0.5m × 0.5m; 梁采用空间梁单元模拟, 主梁截面采用 0.3m × 0.7m, 次梁采用 0.3m × 0.5m。柱子支座考虑 X, Y, Z 的平动约束; 不考虑板顶覆土影响, 轮压按集中力考虑。计算结果见表 1。

消防车等效均布荷载值/kN/m<sup>2</sup> 表 1

楼盖	单向板				双向板		无梁楼盖	
	图 3(a)	图 3(b)	图 3(c)	图 3(d)	图 3(e)	图 3(f)	图 3(g)	图 3(h)
考虑种植要求	14	11	15	13	15	13	15	12
不考虑种植要求	17	14	18	15	17	15	15	12

分析上述结果可知, 当消防车后轴轮处于板跨跨中时为最不利布置(图 3(a), (c), (e), (g)), 其等效均布荷载值单向板最大为 18kN/m<sup>2</sup>, 小于规范建议值 35kN/m<sup>2</sup>; 双向板最大为 17kN/m<sup>2</sup>, 无梁楼盖最大为 15kN/m<sup>2</sup>, 均小于荷载规范建议值 20kN/m<sup>2</sup>。

2.5 消防车轮压的应力扩散与交迭

通常情况下住宅小区全埋式地下车库之上均建有集中绿地, 这样地下车库顶板上必有覆土, 覆土厚度随绿化种植植物的种类而异。消防车轮压经消防车道路面与覆土层的应力扩散与交迭, 作用于地下车库顶板。

根据文[4], 当有一台消防车作用时, 若覆土厚度 ≤ 0.5m, 主要表现为应力扩散, 作用于地下室顶板上的轮压会显著减小(而文[4]假设的 2 台消防车同时作用, 车尾相对排列的工况, 实际上不可能发生, 在此不赘述); 若覆土厚度 > 0.5m, 除应力扩散外, 同侧 2 个后轮前后产生应力交迭; 若覆土厚度 > 1.07m, 除应力扩散外, 左、右侧前后共 4 个后轮产生应力交迭, 在 4 个后轮中间部位, 共交迭 4 次。文[4]分别研究了跨度为 2 ~ 4m 周边简支单向板和 3m × 3m ~ 6m × 6m 跨度四边简支板, 发现随着覆土厚度增加, 消防车等效均布荷载的变化为:

(1) 板跨较小的板, 等效均布荷载随覆土厚度的增加下降较快, 尤其是覆土厚度在 0 ~ 0.5m 范围内, 这完全是因为应力扩散的作用。

(2) 当覆土厚度 > 0.5m 以后, 无论板跨大小, 总体而言随着覆土厚度的增加, 等效均布荷载仍在下降, 但下降速率逐渐趋缓。说明应力扩散和应力交迭同时起作用, 局部区域消防车轮压出现部分增减相抵的情况, 总体而言扩散引起的减小大于交迭引起的增大。

文[4]得到的单向板和双向板楼面消防车等效活荷载覆土厚度折减系数见表 2, 3。

单向板楼面消防车等效均布活荷载覆土厚度折减系数 表 2

板上折算覆土厚度 S/m		0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
板跨/m	2	1	0.922	0.844	0.737	0.592	0.473	0.400
	3	1	0.958	0.895	0.825	0.736	0.633	0.499
	4	1	0.982	0.944	0.850	0.757	0.672	0.598

注:  $\bar{S} = S + (h - h_0) / (2tgQ)$ , 其中 S 为消防车路面面层及覆土厚度; h 为地下室顶板厚度; h<sub>0</sub> 为板标准厚度, 取 h<sub>0</sub> = 100mm; Q 为轮压在混凝土板中的扩散角, 取 45°。

双向板楼面消防车等效均布活荷载覆土厚度折减系数 表 3

板上折算覆土厚度 S/m		0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
区格尺寸	3m × 3m	1	0.899	0.801	0.687	0.547	0.474	0.390
	4m × 4m	1	0.925	0.851	0.747	0.635	0.544	0.471
	5m × 5m	1	0.950	0.800	0.827	0.718	0.614	0.537
	6m × 6m	1	0.971	0.943	0.866	0.799	0.677	0.580

## 2.6 消防车启动和刹车时的动力系数

考虑到消防车活荷载的冲击性,应按荷载规范第 5.6.2 条规定,考虑消防车启动和刹车时的动力系数。该系数的取值可参见文[5]第 4.2.5 条,见表 4。

不同覆土厚度下的动力系数 表 4

覆土厚度/m	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	≥0.7
动力系数	1.3	1.25	1.2	1.15	1.05	1.0

3 本文方法与荷载规范对消防车活荷载取值比较  
以 8.4m × 8.4m 区格板作为研究对象,先按表 1 给出的消防车等效均布荷载值,按式(1)考虑荷载的偶然组合,按式(2)考虑荷载的频遇组合,分别算出验算结构构件强度、挠度、裂缝宽度时取用的消防车活荷载等效均布荷载值。再按荷载规范表 5.1.1 给出的消防车活荷载建议值,按荷载规范式(3.2.3-1)考虑荷载的基本组合,按荷载规范式(3.2.8)考虑荷载的标准组合,分别算出验算结构构件强度、挠度、裂缝宽度时取用的消防车等效均布荷载值。

在上述比较计算中,仅考虑种植要求,不考虑覆土的应力扩散与交迭作用,也不考虑消防车启动和刹车时的动力作用。各种楼板类型均取最不利布置方式,板厚取值见本文第 2.4 节,计算结果见表 5。

本文与文[1]消防车活荷载取值的比较/kN/m<sup>2</sup> 表 5

楼板类型		单向板	双向板	无梁楼盖
验算强度	本文	15 × 0.98 = 14.7	15 × 0.98 = 14.7	15 × 0.98 = 14.7
	文[1]	35 × 1.4 = 49	20 × 1.4 = 28	20 × 1.4 = 28
验算挠度与 裂缝宽度	本文	15 × 0.5 = 7.5	15 × 0.5 = 7.5	15 × 0.5 = 7.5
	文[1]	35	20	20

表 5 仅对消防车活荷载取值作了比较,未计算其他活荷载对荷载效应的影响。若要考虑此影响,在其他活荷载的荷载效应值项内还要乘一个远小于 1.0 的准永久值系数  $\psi_q$ ,使荷载效应组合值更小。

## 4 结论

(1) 考虑到消防车活荷载作用的偶然性和短暂性,提出消防车活荷载不应参与荷载的基本组合,而应参与荷载的偶然组合进行结构构件的承载能力极限状态验算;不应参与荷载的标准组合,而应参与荷载的频遇组合进行结构构件的正常使用极限状态验算。显然目前结构设计界包括荷载规范将消防车活荷载视同一般活荷载处理,在荷载组合概念上是欠妥当的。

(2) 考虑到消防车活荷载作用的移动性和局部性,以住宅小区最常用的柱网尺寸为 8.4m × 8.4m 的全埋式地下车库为例,根据地下室顶板分别采用

单向板、双向板和无梁楼盖方案的不同情况,提出消防车轮压可能出现的 8 种最不利布置方式,并采用 SAP2000 有限元软件的薄板模型,推导出上述每种布置方式的消防车活荷载的等效均布荷载值。其最不利布置方式更直观,计算模型更贴近真实情况,计算结果明显减小。

(3) 对于消防车轮压经地下室顶板上覆土层的应力扩散与交迭以及消防车启动或刹车时的动力作用对消防车等效均布荷载的影响,本文未作专门研究,而引用文[1],[5]提供的折减系数或放大系数。

(4) 由表 5 知,综合考虑上述第 1、2 条因素(不考虑第 3 条因素),将本文方法和荷载规范相比,计算所得消防车活荷载等效均布荷载所产生的荷载效应值,对于单向板、双向板和无梁楼盖,在验算结构构件强度时,前者只有后者的 30.0%,52.5%,52.5%;在验算结构构件挠度与裂缝宽度时前者只有后者的 21.4%,37.5%,37.5%。

## 参 考 文 献

- [1] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [2] 全国民用建筑工程设计技术措施(结构)[M].北京:中国建筑标准设计研究所,2003.
- [3] 全国民用建筑工程设计技术措施(规划·建筑·景观)[M].北京:中国建筑标准设计研究院,2009.
- [4] 范重,鞠红梅,彭中华.消防车等效均布活荷载取值研究[J].建筑结构,2011,41(3):1-6.
- [5] CECS 190:2005 给水排水工程埋地玻璃纤维增强塑料夹砂管管道结构设计规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2005.

(上接第 26 页)

## 6 结语

阳光 100 城市广场项目是烟台市的地标性建筑,立面新颖独特、设计难度高。地下室施工中,利用地下室底板为坡撑提供反力,进行基坑支护,增大了地下室使用面积,经济效益明显。S1、S2 塔楼西侧高约 27m 的跃层柱采用型钢混凝土柱,并对其进行了性能设计,在保证结构安全的同时,实现了建筑师要求的立面效果;标准层局部采用大板。T1 塔楼角部框架柱从裙房顶开始按 3°内收,局部跃层,并对其进行了性能设计,实现了立面效果。该项目已投入使用,使用效果良好。

致谢:本工程设计期间,得到了戴国莹、于海平等专家的悉心指导,特此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 宰金珉,宰金璋.高层建筑基础分析与设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1993.