

文章编号:1673-2049(2018)02-0071-08

复合道面结构抗冲击性能试验与数值模拟

吴俊^{1,2},李亮²,杜修力²

(1. 上海工程技术大学 城市轨道交通学院,上海 201620; 2. 北京工业大学 建筑工程学院,北京 100124)

摘要:采用大型落锤冲击机对一种新型复合道面板进行了冲击荷载作用下的动态响应试验,该新型复合道面板自上而下依次为:土工格栅加固的沥青混凝土(AC)层、高强度混凝土(HSC)层及复合水泥基(ECC)层。通过落锤冲击试验获得道面层结构的损伤形式及变形特征,随后采用混凝土损伤材料模型模拟复合道面体系中混凝土类材料的动力特性。对材料模型的主要参数进行验证和确定,包括界面特性和各层材料的动力增长因数。根据新型复合道面体系的实验室落锤冲击试验结果,通过比较其破坏形式、损坏直径及位移值对数值模型进行了校核和验证。结果表明:提出的考虑界面性能和动力增长因数的三维数值模型能够较准确地模拟该复合道面体系在冲击荷载作用下的真实特性,且验证后的模型可进一步应用于研究不同因素(材料强度、断裂能及层间界面)对新型复合道面体系在不同冲击荷载作用下抗冲击性能的影响。

关键词:落锤冲击;本构模型;界面模型;复合道面

中图分类号:U416.2 文献标志码:A

Experiment and Numerical Simulation on Impact Resistance of Composite Pavement Slab

WU Jun^{1,2}, LI Liang², DU Xiu-li²

(1. School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2. College of Architecture Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The experiment on dynamic response of a new composite pavement slab under impact load was evaluated. The new composite pavement structure consisted of asphalt concrete (AC) layer reinforced with geogrid, followed by high strength concrete (HSC) layer and then engineered cementitious composites (ECC) layer. The damage forms and deformations of the composite pavement structure were gained by drop weight test, and the dynamic behavior of concrete materials in composite pavement structure system was simulated by concrete damage material model. The main parameters of the material model were verified and determined, including the interface characteristics and the dynamic growth factor of the materials in each layer. According to the test results of the laboratory impact drop hammer of the new composite pavement system, the numerical model was checked and verified by comparing the failure form, damage diameter and displacement value. The results show that the 3D numerical model considering interfacial properties and dynamic growth factor can accurately simulate the real behavior of composite pavement system under impact load, and the model can be used to study

收稿日期:2017-08-07

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2015CB058003);北京市自然科学基金项目(8172010)

作者简介:吴俊(1980-),男,江苏建湖人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:cuvwujun@163.com。

通讯作者:李亮(1975-),男,山西太谷人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:liliang@bjut.edu.cn。

the effects of different factors (materials strength, fracture energy and interlayer interface) on the impact resistance of new composite pavement system under different impact loads.

Key words: drop weight impact; constitutive model; interface model; composite pavement slab

0 引言

土木工程结构或基础设施在极端荷载条件下的力学行为是土木工程和材料工程界的重要课题。机场道面作为重要的军用或民用基础设施,主要用于飞机的正常起飞和降落,但其通常不足以抵抗冲击、爆炸等极端荷载。实际上现有机场跑道体系不仅承受飞机降落引起的直接冲击,同时还可能受到飞机失事等带来的附加冲击。现有研究表明^[1],传统道面结构无法有效抵抗高强度冲击荷载。近年来一些土木工程材料如高强度混凝土(High Strength Concrete, HSC)^[2-3]、复合水泥基(Engineering Cementitious Composite, ECC)^[4-8]以及土工合成材料^[9]等在动荷载下分别具有高硬度、高韧性、高抗拉强度等特性。然而,每种材料在抗冲击性能方面有着各自的优缺点,只用一种材料难以充分满足机场道面抗冲击的需求,因此,最为合理的方案是采用复合道面结构。Wu 等^[1]提出了一种用于抵抗爆炸荷载的新型复合道面体系,该体系中软质材料(沥青混凝土)作为第 1 层可吸收部分爆炸产生的能量,从而减少传递到下层的能量。由于沥青混凝土层包含土工格栅,其抗拉强度随之增大,从而减少沥青混凝土层在受荷时产生的裂缝及局部破坏程度。沥青混凝土层下面是高强度混凝土层,它具有较高的抗压强度,是承受动荷载的主体,在动荷载作用下,高强度混凝土层顶部受压,底部产生反射拉力。由于高强度混凝土具有较低的抗拉强度,底部容易出现裂纹,这就需要在其底部加入另一种高延性(韧性)材料以吸收拉伸能量。复合水泥基就是符合这一条件的延性材料,这种材料通过产生细微裂纹来缓解拉应力,同时保持结构完整。

目前,针对复合道面体系的抗爆性能已开展了现场爆炸试验和数值模拟研究^[1,10]。然而,冲击荷载与爆炸荷载在许多方面存在差异,如力的作用方式与传递路径、材料损伤面积、能级和加载速率等。复合道面体系在爆炸荷载与冲击荷载作用下将具有不同的动力响应特性。特别是随着国际航运业的高速发展,越来越重的民航大飞机对民用机场跑道建设提出了更高要求。面对飞机粗暴降落或飞机失事时的冲击荷载,机场道面的抗冲击性能直接影响着

机场跑道结构的完整性,因此有必要对其在冲击荷载下的动态特性进行研究。本文首先通过大型落锤冲击试验研究上述新型复合道面体系在高强冲击荷载作用下的破坏模式及抗冲击特性。然后,采用有限元软件 LSDYNA^[11]对冲击荷载作用下复合道面体系进行三维数值模拟,通过试验测试(动态和静态)对所选材料模型的参数进行确定,获得材料在不同应变率条件下的动力增长因数曲线,最后通过实验室落锤冲击试验对建立的三维数值模型进行验证。验证后的模型可进一步进行参数敏感性分析以探究在不同冲击能量下该新型复合道面体系的动态响应,获取能够提高复合道面体系抗冲击性能的关键参数,进而提出一套该新型复合道面体系在不同冲击荷载下的损伤评估准则。

1 大型落锤冲击试验

大型落锤冲击试验中采用的新型复合面板的材料如图 1 所示。由图 1 可知,该复合面板由 3 层材料构成,从上到下依次为:沥青混凝土层(Asphalt Concrete, AC)、高强混凝土层和复合水泥基层,各层的厚度分别为 75,100,100 mm。高强混凝土层和复合水泥基层材料的配比见表 1,沥青混凝土层中的矿料级配如表 2 所示,黏合剂的质量占混合物总质量的 5%。高强混凝土、复合水泥基以及沥青混凝土的静态力学参数如表 3 所示。沥青混凝土加入了 1 层 PolyfeltMicrogrid MG-100 土工格栅,网孔边长为 7 mm,通过室内拉伸试验确定其双向抗拉强度均为 100 kN·m⁻¹。

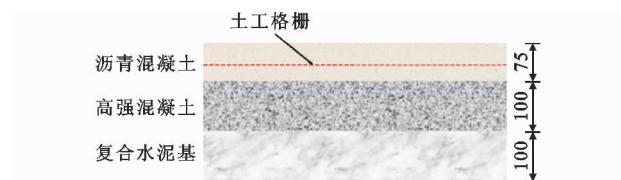


图 1 新型复合道面板的组成(单位:mm)

Fig. 1 Constitution of Now Composite

Pavement Slab (Unit:mm)

试验在新加坡国立大学高性能混凝土材料实验室进行。试验采用的大型落锤冲击试验机的落锤头为直径 100 mm 的刚性半球体,上部配重质量为 1 181 kg。试验中采用 1.5 m 的落距对复合道面板

表 1 高强混凝土和复合水泥基材料混合配比

Tab. 1 Composition of HSC and ECC Materials

材料	材料用量/(kg·m ⁻³)	
	高强混凝土	复合水泥基
水泥	428	1 400
硅粉(非致密)	48	154
强塑剂(SP/B)(DARACEM 100)	8.5	20.2
水	162	424
天然砂	750	
粗粒料(最大直径 20 mm)	1 000	
钢纤维		39.1
PE 纤维		14.5

表 2 沥青混凝土材料的矿料级配

Tab. 2 Ore Material Grade Composition of AC Material

粒径/mm	筛余率/%
19.000	100
13.200	95
9.500	
6.300	68
3.150	50
2.360	
1.180	31
0.300	17
0.212	
0.075	8

表 3 落锤冲击试验中的材料参数

Tab. 3 Material Parameters in Drop Impact Test

材料	抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	极限应变/%
高强混凝土	90.0	4.35	40.0	0.20	0.02
复合水泥基	80.0	5.00	18.0	0.24	6.00
沥青混凝土	4.6	0.70	0.6	0.35	0.1

进行 2 次高度相同的冲击加载,用于研究道面体系在多次冲击条件下的动态性能及损伤模式。本次试验中,为模拟实际道面体系中的基层,道面试样均放置在含有密实砂的刚性试验箱上。在密实砂上层采用 MirCell MC-100 土工格栅加固以提高土层强度,形成坚实基层,从而能更真实地模拟现场实际状况。在刚性试验箱里放置总质量为 1 t 的密实砂,用 10 kg 的重锤分层压实,压实后砂的密度约为 1 600 kg·m⁻³,为最大干密度的 96%。落锤冲击试验的试样布置如图 2 所示。

在试样表面安装 3 个位移传感器 P1,P2,P3,用以记录试样在落锤冲击作用下的位移,其放置位置如图 3 所示。本次试验的数据采集系统包括 2 组垂直间距为 100 mm 的激光发射器和光电接收装置

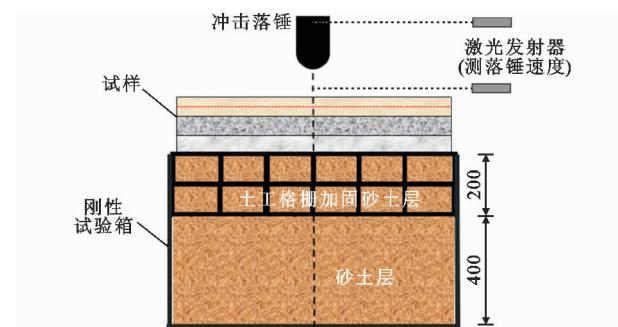


图 2 落锤冲击试验的试样布置(单位:mm)

Fig. 2 Sample Arrangement in Drop Impact Test (Unit:mm)

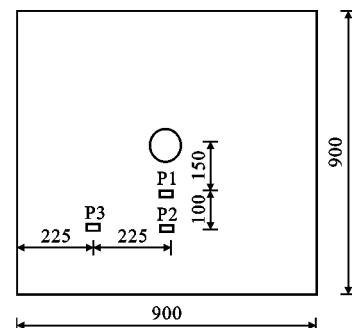


图 3 位移传感器布置(单位:mm)

Fig. 3 Arrangement of Displacement Sensors (Unit:mm)

(图 2),用于记录落锤的下落速度^[12]。当落锤下落挡住激光发射器时,光电接收装置产生脉冲信号^[10],DL750 数字示波器开始进行数据采集。采用高速摄像机记录整个试验过程,包括落锤的运动和道面试样的整体变形。图 4 为复合道面板在第 1 次落锤冲击试验前的布置图。



图 4 落锤冲击试验

Fig. 4 Drop Weight Impact Test

2 计算模型

本文拟使用 LSDYNA 对该复合道面体系的抗冲击特性进行数值模拟。模型中将复合道面板、土体及冲击落锤离散为实体单元。考虑到道面板结构对称性,取其四分之一进行计算,因此,数值模型中道面板的尺寸为 450 mm × 450 mm × 275 mm(落锤冲击试验中道面板尺寸为 900 mm × 900 mm × 275 mm)。道面板下的土体尺寸为 500 mm × 500 mm × 600 mm,冲击落锤和上部配重简化为直径 100 mm、长 1 292 mm 的圆柱体,并进行质量等效。模型中土工格栅离散为壳单元,同时假定土工格栅完全黏结在沥青混凝土层中(在落锤冲击试验中,土工格栅布置在沥青混凝土层)。采用面对面接触算法(AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE)用以模拟道面板与土体的相互作用。土体底部采用固定边界条件,土体侧边采用固定侧向位移边界。在动力计算模型中,将道面板的有限元网格纵横比设置为 1,以便模拟道面板中波的传播。根据网格尺寸收敛性研究可知,当网格尺寸取 5 mm × 5 mm 时模型具有足够稳定和精确的响应。冲击荷载下复合道面板的数值模型如图 5 所示。

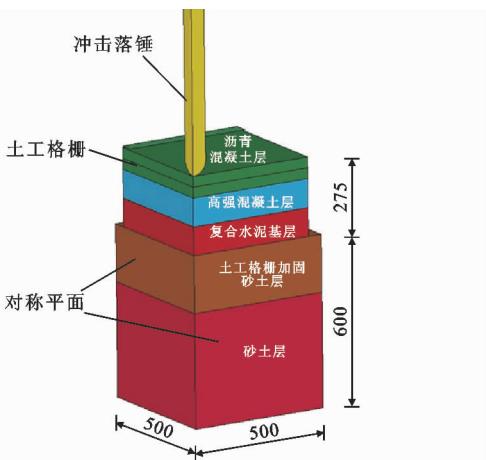


图 5 冲击荷载下复合道面板的数值模型(单位:mm)

Fig. 5 Numerical Model of Composite Pavement

Slab Under Impact Load (Unit:mm)

数值模拟中,落锤安置于道面板的正上方,通过设置冲击速度模拟冲击荷载。在第 1 次落距为 1.5 m 的冲击试验中,落锤的初始速度为 $5.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于第 1 次冲击造成沥青混凝土层的凹陷,导致道面板与激光发射器之间的距离增大,因此,第 2 次冲击的初始速度就设置为试验速度与由重力引起的速度增长的总和,即第 2 次冲击的速度为 $5.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

其中模型重力加速度取 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。在落锤冲击试验中,落锤的变形相较于道面板的变形可以忽略不计,故本文拟把落锤看作一个刚体,其参数如表 4 所示。考虑到落锤冲击会穿透沥青混凝土层,故在数值模拟中通过侵蚀算法(MAT_ADD_EROSION)设置失效主应变,即当材料中应变大于预设值时便删除该单元。通过多次数值试算,沥青混凝土的失效应变设置为 0.2。

表 4 落锤参数

Tab. 4 Parameters of Impactor

参数	参数值
弹性模量 E/MPa	207
屈服强度 f_y/MPa	500
泊松比 ν	0.3
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	118 000

3 材料模型及参数

本文数值模型中,需建立 5 种材料模型:沥青混凝土层、高强混凝土层、复合水泥基层、土工格栅及地基土。前 3 种材料(沥青混凝土、高强混凝土和复合水泥基)可视为混凝土类材料。

3.1 混凝土类材料

当受到高应变速率的冲击荷载时,混凝土类材料具有高度非线性响应。同时混凝土类材料在静载作用下具有围压硬化、应变硬化的特性,在动拉及动压作用下具有应变速率硬化的特性。在近年的研究中,学者们提出了许多混凝土类材料模型^[13-16]。LSDYNA 中 MAT72R3 材料模型^[1,16]能够模拟这种混凝土类材料在动态荷载作用下的特性。本文拟采用 MAT72R3 材料模型模拟混凝土类材料(沥青混凝土、高强混凝土和复合水泥基)。MAT72R3 模型有 3 个独立强度面:峰值强度面、屈服面以及残余强度面。3 个强度面参数根据材料的静态单轴压缩、劈裂试验及三轴条件下应力-应变曲线拟合得出,本文中混凝土类材料的强度参数确定方法可参见文献[10], [17]。同时本文研究中拟引入一个损伤指标 δ 来描述材料的损伤程度,根据塑性有效应变, δ 的取值在 0~2 之间变化,相应地表示材料在受荷时,强度面在峰值强度面、屈服面及残余强度面之间变化。本文着重研究混凝土类材料在承受冲击荷载后的损伤程度,因而材料受荷后的特性研究具有十分重要的意义。在绘制有限元计算结果时,给出 δ 取 1~2 时材料的峰后破坏行为, δ 值越高表示损伤程度越高。通过与实验室静态抗拉、抗压试验

中材料损伤特征的比较可知^[8],当 δ 取1.8时,材料即发生严重破坏。

本文研究中,不同应变率下沥青混凝土、高强混凝土及复合水泥基材料的拉、压动力增长因数(Dynamic Increase Factor,DIF)通过在液压伺服试验机和霍普金森压杆上进行动态压缩和劈裂试验测得。液压伺服试验机产生的应变率为 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \text{ s}^{-1}$,更高的应变率由霍普金森压杆试验确定。本文数值模拟中对以上3种混凝土类材料采用的动力增长因数曲线可参见文献[17]。在目前的研究中,由于该复合道面体系结构包含3层材料,导致很难测出每层材料在落锤试验冲击下的应变率,但每一层的应变率可以在数值模型中的“时间-应变”结果中得出。结果表明在落锤冲击下的沥青混凝土、高强混凝土及复合水泥基材料的最大应变率逐层减少,分别为 $80,32,30 \text{ s}^{-1}$,表示应力波从上到下逐层减少。同时也可知该道面层承受的应变率大于普通交通荷载所引起的应变率。

3.2 土工格栅

本文拟采用塑性随动模型(Plastic-Kinematic)^[18]模拟土工格栅。根据试验^[19]发现土工格栅在拉力作用下的应力-应变关系表现为双线性曲线,在最初的屈服点后将产生一定的硬化现象。本文将采用塑性随动模型模拟土工格栅的行为,其中数值模拟中土工格栅的参数值见表5。

表5 土工格栅的参数

Tab. 5 Parameters of Geogrid

参数	参数值
弹性模量 E/MPa	500
屈服强度 f_y/MPa	7.5
泊松比 ν	0.3
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 030

3.3 砂土材料

砂土拟采用Drucker-Prager模型^[16]。对于采用土工格栅加固的砂土层,其强度参数将提高。本文数值模型中,未单独模拟砂土层中的土工格栅,拟把土工格栅加固砂土层视作一整体。通过经验公式及室内压缩试验^[17]可计算加固条件下砂土层的压缩模量、剪切模量及内摩擦角。采用Drucker-Prager模型模拟加固砂土层和未加固砂土层的参数如表6所示。

3.4 接触面模型

在新型复合道面体系中,假定高强混凝土与复合水泥基之间是完全黏结的,而高强混凝土层与沥

表6 地基土的参数

Tab. 6 Parameters of Foundation Soil

砂土层	加固砂土层	未加固砂土层
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 600	1 600
弹性模量 E/MPa	103.5	40.0
剪切模量 G/MPa	39.8	15.4
泊松比 ν	0.3	0.3
黏聚力 c/MPa	0.089	0.001
内摩擦角/(°)	40	40

青混凝土之间黏结的牢固程度低于高强混凝土与复合水泥基之间的黏结,这是由于沥青混凝土层是在高强混凝土层硬化后再放置于上面的。为了确定高强混凝土层与沥青混凝土层接触面的剪切强度和静摩擦因数,进行了直剪试验。同时采用倾斜台试验以确定高强混凝土与沥青混凝土层之间的动摩擦因数。直剪试验以及倾斜台试验的详细信息可参考文献[8]。直剪试验所得的静摩擦因数为0.71,倾斜台试验所得的动摩擦因数为0.56。本文拟采用LSDYNA中的TIEBREAK接触算法^[11]模拟高强混凝土与沥青混凝土层间的接触面行为。

4 计算结果

4.1 损伤形式

对于落锤冲击试验和有限元计算模型,第1次落锤冲击下新型复合道面结构的损伤形式如图6所示。根据数值计算结果可知,落锤穿透了沥青混凝土层,但由于高强混凝土具有较高的抗压强度,落锤头停在高强混凝土层,该现象与落锤冲击试验结果一致。同时从图6中也可以看出,第1次落锤冲击试验中复合道面的侧面未见严重的裂缝产生,且复合水泥基层中也没有发现严重的破损,这也与有限元计算结果相一致。因此,在第1次冲击下,高强混凝土层和复合水泥基层未破坏。

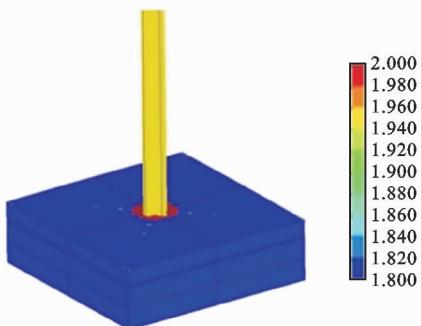
第2次落锤冲击下复合道面结构的损伤形式如图7所示。从图7(a)中可以发现,第2次落锤冲击试验中,冲击锤头未穿透高强混凝土层,这与数值计算结果相一致。从图7(b)中可以发现,复合道面结构在侧面有一系列的裂缝产生,裂缝从复合水泥基层底部开始向上发展但并没有穿透该层,该情况也在数值计算结果中得以体现[图7(c)]。在数值计算结果中,除了在复合水泥基层产生裂缝,在高强混凝土层与复合水泥基层的界面上也产生了一定数量的裂缝,这是由于高强混凝土层在冲击荷载作用下产生弯曲,以及应力波在其底面发生反射。数值模



(a) 第1次落锤冲击后的道面板表面损伤



(b) 第1次落锤冲击后的道面板侧面损伤



(c) 数值模拟中第1次落锤冲击后的道面板损伤

图 6 第1次冲击后的复合道面板损伤形式

Fig. 6 Damage Forms of Composite Pavement

Slab After the 1st Impact

型中假定高强混凝土层与复合水泥基层的接触面为完全黏结,而复合水泥基材料的弹性模量与高强混凝土材料不同,因此当二者协同变形时会在高强混凝土层底面产生拉应力,同时,冲击面的压力波将在高强混凝土层中传播,在接触面反射成拉应力,也就是所谓的剥落现象。因此,根据数值模拟结果分析,高强混凝土层底部将会有损伤。

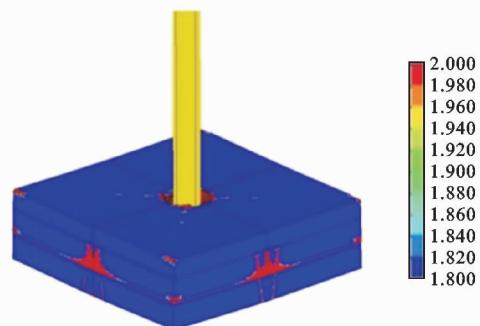
图 8 对比了在第 2 次冲击下复合水泥基层底部的损伤形式,试验结果表明在复合水泥基层底部呈现少许裂缝,未完全破坏。该结果与数值模拟中显示的裂缝形式十分吻合。这是由于复合水泥基作为一种高延性(韧性)材料,可以通过产生细微裂纹来缓解拉应力,同时保持结构完整。总之,根据损伤形



(a) 第2次落锤冲击后的道面板表面损伤



(b) 第2次落锤冲击后的道面板侧面损伤



(c) 数值模拟中第2次落锤冲击后的道面板损伤

图 7 第2次冲击后的复合道面板损伤形式

Fig. 7 Damage Forms of Composite Pavement

Slab After the 2nd Impact

式分析,数值模型能够较好地预测复合道面体系在冲击荷载下的动态响应。

4.2 道面板位移

表 7 对比了试验与数值模拟中 2 次冲击落锤时的道面板位移值。在第 1 次落锤冲击的数值模拟中,P2 的读数接近于实测数据,但 P3 的位移值有较大的偏差。这是由于在试验中 P3 的位置发生偏移,从而导致了记录结果的偏差。同时在数值模拟中,P1 的位置更接近于落锤冲击点,故其值应该大于 P2 的位移值,但数值计算中 P1 位移值要略低于 P2 的位移值。该现象可能是数值模拟中采用侵蚀算法所造成的。在沥青混凝土层被冲击落锤穿透后,由于冲击点处单元能量释放(冲击点处单元应变

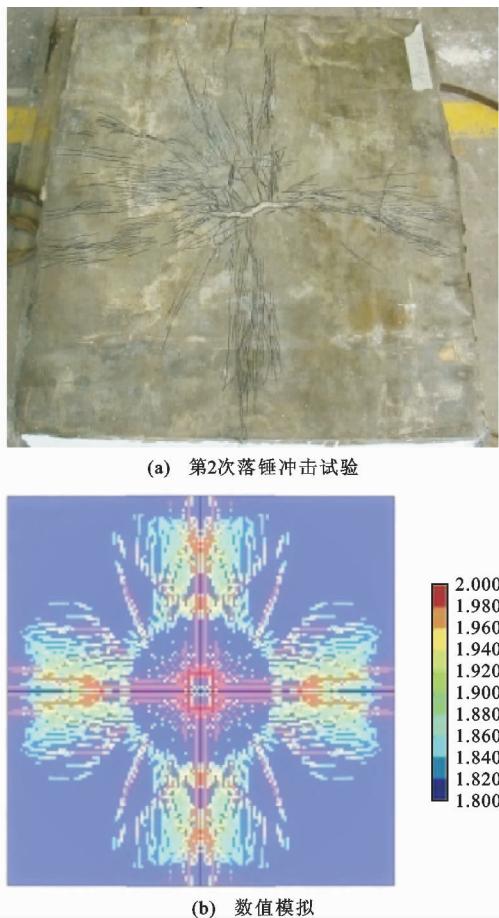


图8 第2次冲击后的复合水泥基底部损伤形式

Fig. 8 Damage Forms of Bottom of ECC Layer
After the 2nd Impact

表7 复合道面板的位移对比

Tab. 7 Comparison of Displacement of
Composite Pavement Slab

位移传感器编号	第1次冲击			第2次冲击		
	位移试验结果	位移有限元结果	x_1/x_2	位移试验结果	位移有限元结果	x_1/x_2
	x_1/mm	x_2/mm		x_1/mm	x_2/mm	
P1		-1.54		-3.62	-7.62	2.10
P2	-1.81	-1.70	0.94	-7.60	-6.63	0.87
P3	-5.27	-1.86	0.35	-5.58	-4.83	0.87
平均值			0.65			1.28

到达其失效应变而被删除),接近破坏凹坑的单元会朝落锤冲击方向反向移动,即靠近冲击凹坑附近的单元向上回弹,而离中心较远处的单元仍然向下移动,故造成了接近凹坑的P1点位移值较小。

在第2次落锤冲击的数值模拟中,由于高强混凝土层未采用侵蚀算法,其结果更接近实际。在数值模拟中,高强混凝土层未被穿透,仅仅有一些变形,并且没有使用侵蚀算法,不会引起能量释放现

象。因此,随着离冲击点距离的增加,道面板的位移逐渐减小,即显示该道面板在冲击荷载下产生弯曲。在第2次落锤冲击试验中,P1的位移要小于P2和P3。这是由于P1在读数上可能存在误差,按照理论分析,在冲击作用下,最大位移应该出现在冲击中心位置附近。尽管在数值计算与试验中道面板位移值有些偏差,但总的来说,数值计算模型还是可以合理地评估新型复合道面板在冲击荷载作用下,尤其是第2次冲击下的动力响应。

5 结语

本文采用大型落锤冲击试验机对新型复合道面体系的抗冲击性能进行了研究,获得其在冲击荷载作用下道面结构损伤形式及位移值,评估其抗冲击性能。然后建立冲击荷载作用下该复合道面体系的三维数值模型,并选择了适当的材料模型模拟冲击荷载下材料的动态特性。通过实验室动态及静态测试,对所选材料模型的主要参数进行确定和校正。根据实验室落锤冲击试验对本文建立的复合道面体系三维数值模型进行了验证,结果表明数值模拟结果与落锤冲击试验结果在损伤形式、凹坑直径及位移值方面吻合较好。本文研究结果表明:

(1) 所建立的三维数值模型能够模拟复合道面板在冲击荷载作用下的真实动力响应。

(2) 液压伺服试验机和霍普金森压杆试验得到材料在压缩及拉伸作用下的动力增长因数,以及界面行为的模拟适用于模拟复合道面体系在高应变率荷载下的动态响应。

(3) 对于建立的三维数值模型,未来可以进一步开展参数敏感性分析以探究在不同冲击能量下新型道面体系的动态响应,从而获取能够提高复合道面体系抗冲击性能的关键参数,进而提出一套新型复合道面体系在不同冲击能量下及不同参数下的损伤评估准则。

参考文献:

References:

- [1] WU J, CHEW S H. Field Performance and Numerical Modeling of Multi-layer Pavement System Subject to Blast Load[J]. Construction and Building Materials, 2014, 52: 177-188.
- [2] ZHANG M H, SHARIF M S H, LU G. Impact Resistance of High-strength Fibre-reinforced Concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2007, 59 (3): 199-210.

- [3] 严少华,李志成,王明洋,等.高强钢纤维混凝土冲击压缩特性试验研究[J].爆炸与冲击,2002,22(3):237-241.
YAN Shao-hua, LI Zhi-cheng, WANG Ming-yang, et al. Dynamic Compressive Behaviour of High-strength Steel Fiber Reinforced Concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(3): 237-241.
- [4] LI V C, MAALEJ M. Toughening in Cement Based Composites. Part II : Fiber Reinforced Cementitious Composites [J]. Cement & Concrete Composites, 1996, 18(4): 239-249.
- [5] LI V C, MISHRA D K, NAAMAN A E, et al. On the Shear Behavior of Engineered Cementitious Composites [J]. Advanced Cement Based Materials, 1994, 1(3): 142-149.
- [6] MAALEJ M, QUEK S T, ZHANG J. Behavior of Hybrid-fiber Engineered Cementitious Composites Subjected to Dynamic Tensile Loading and Projectile Impact[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(2): 143-152.
- [7] 徐世烺,李贺东.超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J].土木工程学报,2008,41(6):45-60.
XU Shi-lang, LI He-dong. A Review on the Development of Research and Application of Ultra High Toughness Cementitious Composites[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 45-60.
- [8] ZHANG J, MAALEJ M, QUEK S T. Performance of Hybrid-fiber ECC Blast/Shelter Panels Subjected to Drop Weight Impact[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(10): 855-863.
- [9] KOERNER R M. Designing with Geosynthetics[M]. 4th ed. Eaglewood: Prentice-hall, 1998.
- [10] WU J, LIU X. Performance of Soft-hard-soft (SHS) Cement Based Composite Subjected to Blast Loading with Consideration of Interface Properties[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2015, 9(3): 323-340.
- [11] HALLQUIST J. LS-DYNA Keyword User's Manual [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2007.
- [12] ONG K C G, BASHEERKHAN M, PARAMASIVAM P. Resistance of Fibre Concrete Slabs to Low Velocity Projectile Impact [J]. Cement & Concrete Composites, 1999, 21(5/6): 391-401.
- [13] POLANCO-LORIA M, HOPPERSTAD O S, BORVIK T, et al. Numerical Predictions of Ballistic Limits for Concrete Slabs Using a Modified Version of the HJC Concrete Model[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(5): 290-303.
- [14] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A Computational Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Pressures[C]//JACKSON N, DICKERT S. The 14th International Symposium on Ballistics. Quebec: American Defense Preparedness Association, 1993: 591-600.
- [15] PARK D W, MARTIN A E, LEE H S, et al. Characterization of Permanent Deformation of an Asphalt Mixture Using a Mechanistic Approach [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2005, 9(3): 213-218.
- [16] MALVAR L J, CRAWFORD J E, WESEVICH J W. A New Concrete Material Model for DYNA3D Release II : Shear Dilation and Directional Rate Enhancements [R]. Alexandria: Defense Nuclear Agency, 1996.
- [17] 吴俊,李亮,杜修力.爆炸荷载作用下多层道面体系动力响应的三维数值模拟[J].北京工业大学学报,2016,42(9):1355-1362.
WU Jun, LI Liang, DU Xiu-li. Three-dimensional Numerical Simulation on the Dynamic Response of a Multi-layer Pavement System Subject to Blast Loading[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(9): 1355-1362.
- [18] CHEN W F. Constitutive Equations for Engineering Materials[M]. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- [19] LATHA G M, RAJAGOPAL K, KRISHNASWAMY N R. Experimental and Theoretical Investigations on Geocell-supported Embankments [J]. International Journal of Geomechanics, 2006, 6(1): 30-35.