

水泥混凝土路面脱空与传荷相互作用机理分析

元 松

(上海市市政公路工程检测有限公司, 上海市 200031)

摘 要: 为了解水泥混凝土路面脱空与传荷相互作用机理,建立了四层体系三维有限元模型,依据现行水泥混凝土路面设计规范设置模型参数的变化范围,分析了不同脱空位置和脱空尺寸下,路面结构参数、层间接触状态对弯沉和传荷系数的影响,在理论上验证了脱空评价方法的适用性。结果表明:层间接触状态对弯沉影响较大,但对传荷系数影响很小;只要传力杆存在,脱空对接缝的传荷能力影响很小;采用板角/板中判定脱空的方法更可靠;面层厚度和土基模量对传荷系数影响最大。综合而言,传力杆的设置对保持水泥混凝土路面的整体性、防止路面开裂起着关键性作用。

关键词: 水泥混凝土路面;脱空;传力杆;层间接触状态;弯沉;传荷系数

中图分类号: U416.2;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0023-05

Analysis on Interaction Mechanism between Void and Load Transfer in Cement Concrete Pavement

YUAN Song

(Shanghai Municipal Highway Engineering Testing Co., Ltd., Shanghai 200031, China)

Abstract: A three-dimensional finite element model of a four-layer system is established to understand the interaction mechanism between void and load transfer in cement concrete pavement. Based on the current design specifications for cement concrete pavement, the range of model parameter changes is set, and the influence of pavement structural parameters and interlayer contact state on deflection and load transfer coefficient is analyzed under different void positions and void sizes. The applicability of void evaluation method is theoretically verified. The results indicate that the interlayer contact state has a significant impact on deflection, but has little effect on the load transfer coefficient. As long as the transmission rod exists, the impact of void on the load-bearing capacity of the joint is minimal. The method of using board corner/board center to judge voids is more reliable. The thickness of the surface layer and the modulus of the soil foundation have the greatest impact on the load transfer coefficient. Overall, the installation of transmission rods plays a crucial role in maintaining the integrity of cement concrete pavement and preventing the pavement cracking.

Keywords: cement concrete pavement; void; transmission rod; interlayer contact state; deflection; load transfer coefficient

0 引 言

水泥混凝土路面由于具有强度高、耐久性强、造价便宜、施工方便^[1-3]等优点,早期在我国高速公路和城镇道路有着广泛的应用。随着使用年限不断增加,水泥混凝土路面出现各种不同程度的损害,如角隅、断板、脱空等^[4-6]。特别是脱空的病害,混凝土板底局部缺乏支撑,很容易引起局部应力过大,出现结

构性损坏。接缝是水泥混凝土的重要部位,其起着传递应力、增强整体性的作用,但是随着交通荷载的反复作用和雨水冲刷,填缝料逐渐剥落,也容易导致板底出现脱空,并进一步影响传荷能力的大小。因此,水泥混凝土路面脱空与传荷相互作用机理比较复杂,相互影响,有必要对此展开深入的研究,理解关键影响因素,对掌握水泥混凝土路面的结构分析和破坏特性有着重要的意义。

目前,国内外研究学者对水泥混凝土路面脱空和传荷系数的评价也进行过大量的研究,张驰等^[7]对水泥混凝土路面传力杆布设方式进行了仿真模拟,凌建明等^[8]采用总弯沉比对机场刚性道面板底

收稿日期: 2026-01-22

基金项目: 上海市国资委课题(2024016)

作者简介: 元松(1977—),男,博士,正高级工程师,从事道路、桥梁、隧道检测与研究工作。

脱空进行了判定,戴轩等^[9]分析了脱空尺寸对机场刚性道面的影响及其使用寿命,乔明等^[10]对水泥板底脱空与接缝传荷能力影响因素及评价指标进行了分析,袁捷等^[11]分析了传力杆参数对杆周混凝土的力学响应。上述研究,有的仿真模型过于简单,如采用填缝料的模量或弹簧单元来模拟接缝传荷系数;有的未考虑层间接触状态或者未考虑脱空位置、尺寸对弯沉及传荷系数的影响,导致分析结果存在一定局限性。

本文研究采用落锤式弯沉仪(FWD)荷载,对4层体系的水泥混凝土路面三维模型在不同脱空位置和脱空尺寸下,路面结构参数、层间接触状态对四个板角、板中、横缝两侧的弯沉影响,分析验证了目前规范上广泛采用的脱空评价方法适用性,为了解水泥混凝土路面脱空与传荷相互作用机理,准确评价水泥混凝土路面是否存在脱空提供

了参考依据。

1 模型的建立

1.1 基本假定

为便于分析,对理论分析模型作如下假定:

- (1)采用多层体系双面板模型代替温克勒地基模型,各层采用各向同性、线弹性材料;
- (2)采用四面体10节点进行离散,层间接触采用三维目标面与变形面之间的摩擦状态来模拟;
- (3)三维杆单元与混凝土板紧密接触;
- (4)三维模型侧面均采用水平约束,土路基底部采用竖向约束。

1.2 典型结构参数

依据《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)设置模型参数^[12],水泥混凝土路面结构三维实体模型各层材料参数取值见表1。

表1 水泥混凝土路面结构各层材料典型参数

结构层	长/m	宽/m	厚度/m		弹性模量/MPa		泊松比
			典型	区间范围	典型	区间范围	
混凝土板块	5	4	0.22	0.18~0.26	30 000	25 000~35 000	0.15
基层	10.01	4	0.30	0.20~0.40	3 000	2 000~4 000	0.25
垫层	10.01	4	0.30	0.20~0.40	250	200~300	0.35
土路基	10.01	4	—	—	60	40~80	0.40

另外,传力杆布置如下:杆长0.41 m,直径0.03 m,布置间距0.3 m,杆弹性模量210 000 MPa,泊松比0.30。FWD荷载作用圆直径0.3 m,压强0.7 MPa。典型路面结构实体模型见图1(以板中脱空、荷载作用在横缝中部为例)。

别为板中、4个板角和横缝中部)不同脱空位置(分别为板中、4个板角和横缝中部)的板中、四个板角和横缝中部两侧的弯沉值 w_i ($i=1\sim7$,分别代表板中、右下角、右上角、左上角、左下角、横缝左侧、横缝右侧计算弯沉值), w_i 与荷载作用中心点为同一位置。

接缝传荷系数LTE(load transfer efficiency)采用下式进行判定^[13-14]:

$$LTE = \frac{w_7}{w_6}$$
(1)

式中: w_7 为横缝右侧弯沉; w_6 为横缝左侧弯沉,0.001 mm。

利用FWD判定脱空(void identification)一般采用弯沉比法^[15-16],见式(2)、式(3)。

$$\lambda_1 = \frac{w_{2\sim5}}{w_1}$$
(2)

$$\lambda_2 = \frac{w_6}{w_1}$$
(3)

式中: w_1 为板中弯沉; $w_{2\sim5}$ 分别为右下角、右上角、左上角、左下角弯沉。

采用FWD分别测试同一板块板中、板边中点和板角位置的弯沉,当 $\lambda_1>3.0$ 且 $\lambda_2>2.0$ 时可判定为脱空。

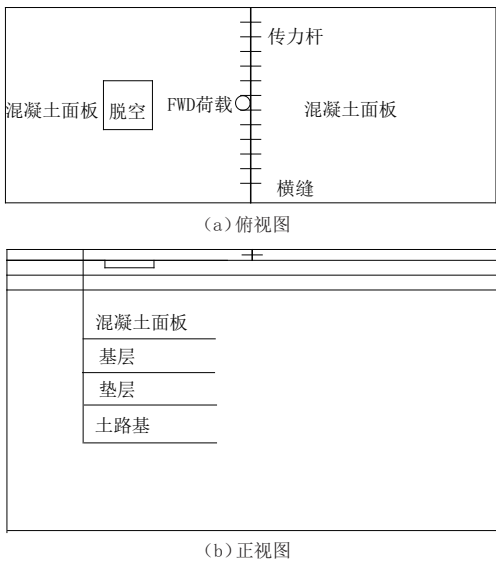


图1 水泥混凝土路面模型结构实体模型示例

1.3 表征指标

本文主要计算在FWD不同荷载位置作用下(分

2 计算分析

2.1 不同层间接触状态的影响

将层间接触状态分为三种:完全连续、完全滑动、介于连续与滑动之间(摩擦系数 $\mu=0.5$)分析板底未脱空时,不同层间接触状态对各点弯沉和传荷系数的影响,见表2。

表2 不同层间状态和荷载作用位置下各点弯沉值和传荷系数

层间接触状态	不同荷载作用位置点弯沉值 $w_i/0.001\text{ mm}$							传荷系数
	板中	右下	右上	左上	左下	受荷板	未受荷板	
完全连续	217	274	271	546	546	183	164	0.89
介于连续与滑动之间	262	432	426	754	754	260	228	0.88
完全滑动	267	438	433	774	774	262	230	0.88

从表2可以看出,完全滑动状态下,不同荷载作用位置下对应的最大弯沉值较滑动其它两种层间状态要大,为最不利状态。另外,采用横缝中部荷载检测横缝两侧的传荷系数与层间接触状态无关。为便于分析,从最不利角度考虑,以下结构模型层间接触状态均采用完全滑动状态。

2.2 不同脱空位置和大小影响

考虑混凝土板底板中、右下角、右上角、左上角、左下角、横缝等六种不同位置脱空,脱空面积为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$,脱空深度均按一半基层厚度考虑。不同脱空位置和荷载作用位置对各点弯沉、传荷系数的影响见表3。

表3 不同脱空和荷载作用位置下各点弯沉值和传荷系数

脱空位置	不同荷载作用位置点弯沉值 $w_i/0.001\text{ mm}$							传荷系数
	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	
板中脱空	278	435	429	773	773	259	228	0.88
右下脱空	266	558	424	771	771	260	229	0.88
右上脱空	266	432	503	772	771	261	230	0.88
左上脱空	266	435	425	926	775	262	230	0.88
左下脱空	266	431	431	775	926	260	228	0.88
横缝中部脱空	266	441	429	772	772	282	241	0.86

从表3可以看出,不同脱空和荷载作用位置下,板块弯沉值呈现一定的对称性,荷载作用在某脱空位置所产生的弯沉只影响该点的弯沉,对其它位置弯沉值几乎无影响。因此,可通过FWD测板块不同位置得到的弯沉大小来判定是否脱空。另外,传荷系数大小与脱空和荷载作用位置无关,这也说明,只要合理布设传力杆,脱空对接缝的传荷能力影响很小,水泥混凝土路面整体性能较好。

为节约篇幅,仅考虑横缝中部荷载作用位置,对横缝中部脱空按 $0.5\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ 、 $0.5\text{ m}\times 3.0\text{ m}$,其它脱空位置按 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 、 $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 两种大小考虑,不同脱空大小对弯沉和传荷系数的影响见表4。由于右上与右下脱空、左上与左下脱空所产生的弯沉值具有一定的对称性,不再重复列出。

表4 不同脱空范围和荷载作用位置下各点弯沉值和传荷系数

脱空位置	脱空面积	横缝中部荷载时不同点弯沉值					传荷 系数
		$w_i/0.001\text{ mm}$					
		w_1	w_2	w_5	w_6	w_7	
板中脱空	0.5 m×0.5 m	72	169	10	258	228	0.88
	1.5 m×1.5 m	72	169	9	258	227	0.88
右下脱空	0.5 m×0.5 m	72	174	10	260	228	0.88
	1.5 m×1.5 m	71	183	7	263	232	0.88
左下脱空	0.5 m×0.5 m	72	171	9	261	229	0.88
	1.5 m×1.5 m	72	171	10	260	228	0.88
横缝中部脱空	0.5 m×1.0 m	70	173	7	275	236	0.86
	0.5 m×3.0 m	67	180	1	287	244	0.85

从表4可以看出,脱空位置对弯沉值影响较大。同一脱空位置下,脱空面积对弯沉值几乎无影响;除了横缝中部脱空对传荷系数影响较大外,其它位置脱空对传荷系数几乎无影响。

为理论验证式(2)和式(3)对脱空判定的有效性,计算当 λ_1 和 λ_2 结果见表5。

表5 FWD弯沉比法判定脱空有效性验证

脱空位置	$\lambda_1>3.0$				$\lambda_2>2.0$
	w_2/w_1	w_3/w_1	w_4/w_1	w_5/w_1	w_6/w_1
板中脱空	1.6	1.5	3.0	3.0	0.9
右下脱空	2.1	1.6	3.1	3.0	1.0
右上脱空	1.6	1.9	3.1	3.0	1.0
左上脱空	1.6	1.6	3.5	3.0	1.0
左下脱空	1.6	1.6	3.1	3.5	1.0
横缝中部脱空	1.7	1.6	3.1	3.0	1.1

由表5可以看出,采用左上角和左下角的弯沉比 λ_1 判定脱空比 λ_2 有效性要高,如果采用两者合集来判定,很容易漏判。

2.3 不同结构参数的影响

以常见的板角、板边脱空为例,分析右下和横缝中部脱空状态下,不同路面结构参数变化对弯沉值和传荷系数的影响,见图2、图3和表6。

从图2、图3可以看出,不同脱空状态下,随着路面结构各层模量和厚度的增加,相应弯沉值均逐渐减小,其中土路基模量和基层厚度对弯沉影响最大。

从表6可以看出,传荷系数与面层模量和厚度成

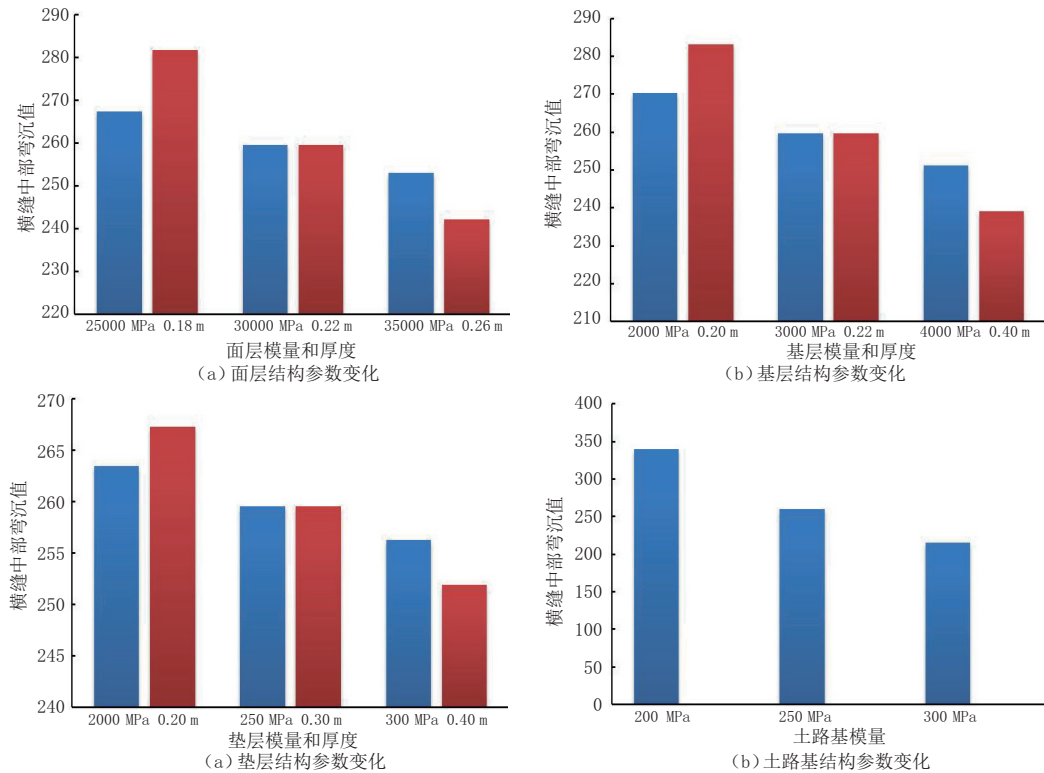


图2 路面结构参数变化对弯沉值影响(右下脱空)

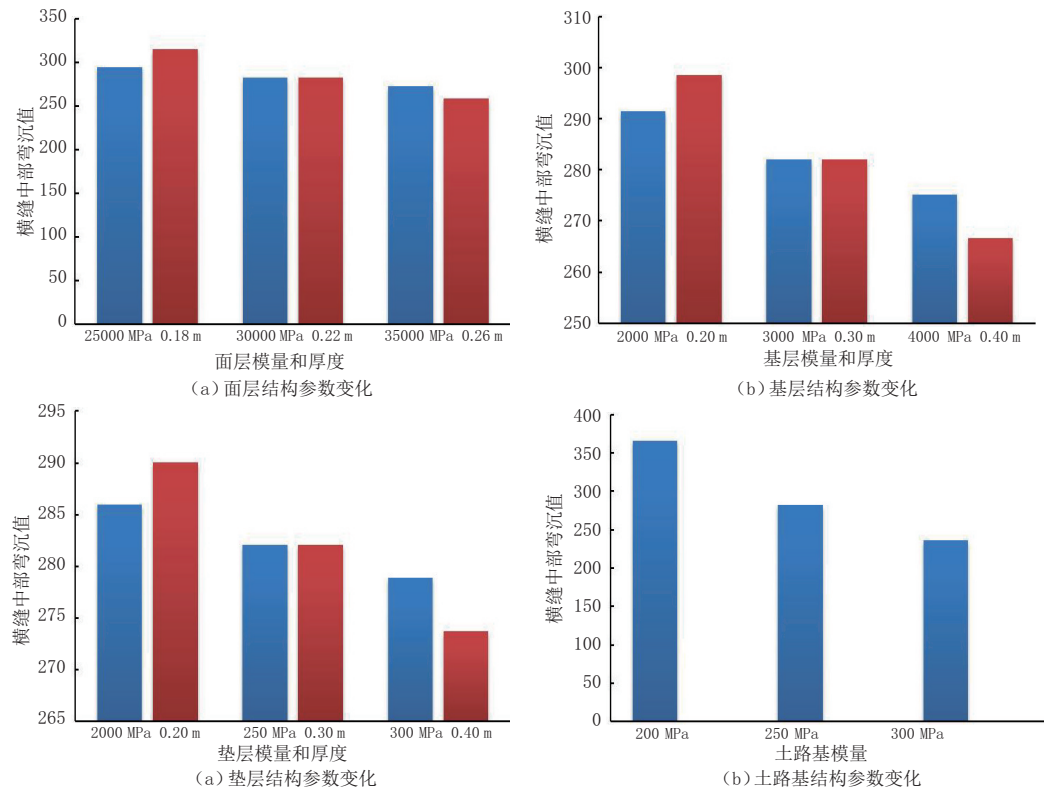


图3 路面结构参数变化对弯沉值影响(横缝中部脱空)

正比关系,与基层、垫层和土路基呈反比关系,其中面层厚度和土基模量对传荷系数影响最大。另外横缝中部脱空较右下脱空对传荷系数影响不利,但也基本都在0.8以上,属于优良状态,这说明设置传力杆后接缝一直具有较好的应力传递状态。

3 结 语

本文研究了FWD荷载作用下,水泥混凝土路面在不同脱空状况时,板块弯沉和接缝传荷系数的变化影响,得到结论如下:

表 6 路面结构参数对传荷系数的影响

结构层	结构参数	右下脱空			横缝中部脱空		
		受荷板	未受荷板	传荷系数	受荷板	未受荷板	传荷系数
面层模量/MPa	25 000	268	233	0.87	294	246	0.84
	30 000	260	229	0.88	282	241	0.85
	35 000	253	225	0.89	273	237	0.87
面层厚度/m	0.18	282	243	0.86	315	256	0.81
	0.22	260	229	0.88	282	241	0.85
	0.26	242	217	0.90	259	226	0.87
基层模量/MPa	2 000	270	238	0.88	291	249	0.86
	3 000	260	229	0.88	282	241	0.85
	4 000	251	222	0.88	275	235	0.85
基层厚度/m	0.20	283	250	0.88	299	257	0.86
	0.30	260	229	0.88	282	241	0.85
	0.40	239	209	0.88	267	224	0.84
垫层模量/MPa	200	263	233	0.88	286	245	0.86
	250	260	229	0.88	282	241	0.85
	300	256	226	0.88	279	238	0.85
垫层厚度/m	0.20	267	236	0.88	290	249	0.86
	0.30	260	229	0.88	282	241	0.85
	0.40	252	222	0.88	274	233	0.85
土基模量/MPa	40	340	307	0.90	366	323	0.88
	60	260	229	0.88	282	241	0.85
	80	216	186	0.86	237	195	0.83

(1)层间接触状态对弯沉影响较大,对传荷系数影响很小;

(2)只要传力杆存在,脱空对接缝的传荷能力影响很小;

(3)横缝中部脱空对传荷系数影响较大,其它位置脱空对传荷系数几乎无影响;

(4)脱空位置对弯沉值影响较大,脱空大小对弯沉值几乎无影响;

(5)理论分析表明采用板角/板中判定脱空的方法比采用横缝中部/板中更可靠;

(6)不同脱空状态下,弯沉与路面结构各层模量和厚度呈反比关系,其中土路基模量和基层厚度对弯沉影响最大;传荷系数与面层模量和厚度成正比关系,但与基层、垫层和土路基呈反比关系,其中面层厚度和土基模量对传荷系数影响最大。

参考文献:

[1] 姚祖康.水泥混凝土路面涉及[M].合肥:安徽科学技术出版社,1999.

[2] 叶奋,胡诗园.考虑旧水泥路面接缝传荷能力的超薄罩面力学特性[J].吉林大学学报(工学版),2022,52(11):2636-2643.

[3] 周玉民,谈至明,刘伯莹.水泥混凝土路面脱空状态下的荷载应力[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(2):341-345.

[4] 王乾.基于板底脱空的水利混凝土路面检测、处治与力学行为研究[D].西安:长安大学,2009.

[5] 肖兴强.水泥混凝土路面板底脱空和接缝传荷能力的关系[D].成都:西南交通大学土木工程学院,2007.

[6] 赵军,唐伯明,谈至明,等.基于弯沉指数的水泥混凝土路面板角脱空识别[J].同济大学学报(自然科学版),2006,34(3):335-339.

[7] 张驰,王雪,崔卜心,等.水泥混凝土路面传力杆布设方式仿真模拟[J].长安大学学报(自然科学版),2014,34(4):1-7.

[8] 凌建明,刘海伦,马正好,等.总弯沉比及其在机场刚性道面板底脱空判定中的适用性[J].同济大学学报(自然科学版),2023,51(7):1085-1093.

[9] 戴轩,蔡靖,李香香,等.脱空尺寸对机场刚性道面的影响及其使用寿命分析[J].中外公路,2022,42(6):49-52.

[10] 乔明,史斌,陶卓辉,等.水泥板底脱空与接缝传荷能力影响因素及评价指标分析[J].公路交通科技,2023,40(5):75-83.

[11] 袁捷,孙陈,郑悦锋,等.传力杆参数对杆周混凝土力学响应的影响[J].公路交通科技,2018,46(4):484-490.

[12] JTG D40—2011 公路水泥混凝土路面设计规范[S].

[13] JTG 3450—2019 公路路基路面现场测试规程[S].

[14] 郭鑫鑫,赵旭东,王喆,等.机场水泥混凝土道面板脱空评价方法与应力影响分析[J].公路交通科技,2022,39(9):43-51.

[15] 王宇翔,袁捷.水泥混凝土路面传力杆接缝传荷数值模拟及实测分析[J].交通科技,2017(1):5-8.

[16] 刘丹.水泥混凝土路面接缝及结构优化研究[D].武汉:武汉理工大学交通学院,2003.

(上接第 11 页)

prediction on damaged reinforcement concrete (RC) bridge deck strengthened by ultra-high performance concrete (UHPC) layer[J]. Construction and Building Materials, 2019, 215: 347-359.

[15] Denarié E. SAMARIS D22—Full scale application of UHPFRC for the rehabilitation of bridges - from the lab to the field[R]. Samaris, 2005.

[16] Sritharan S, Doiron G, Bierwagen D, et al. First application of UHPC bridge deck overlay in North America[J]. Transportation Research Record, 2018, 2672(26):40-47.

[17] 王明法.UHPC在公路改扩建桥面板加固中的应用[J].中国水运,2021(2):159-160.

[18] 王春晖.采用超高性能混凝土加固槽型梁预制桥面板技术探讨[J].上海公路,2018(1):58-61.

[19] Zhu Y, Zhang Y, Hussein HH, et al. Experimental study and theoretical prediction on shrinkage-induced restrained stresses in UHPC-RC composites under normal curing and steam curing[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 110: 103602.

[20] Rath B, Deo S, Ramtekkar G. Modification of ACI209R-92 concrete shrinkage model for partial replacement of cement with fly ash and sand with pond ash[J]. Advances in Civil Engineering Materials, 2020, 9(1):602-620.