

新老混凝土粘结面的抗冻剪切性能试验研究

李平先^{1,2}, 张雷顺², 赵国藩¹

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 郑州大学 环境与水利学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 本文通过162块新老混凝土粘结Z形剪切试件的试验, 研究了冻融循环对新老混凝土粘结面剪切性能的影响。试件在温度-18 ~ 8 范围内经受了0、5、10、15、20和30次的冻融循环。分析了新老混凝土粘结面冻融损伤破坏的机理和冻融循环次数、界面处理方法、界面剂的类型以及新老混凝土的强度等对粘结面粘结剪切强度的影响。研究表明, 在冻融循环作用下, 新老混凝土粘结剪切强度随冻融循环次数的增加急剧下降, 冻融30次时, 所试验的试件几乎全部从粘结面冻融破坏。粘结剪切强度的下降是由于新老混凝土本身强度的下降和粘结剂强度的下降以及粘结面的损伤等共同作用的结果。

关键词: 新老混凝土粘结; 冻融循环; 剪切强度; 界面处理; 界面剂

中图分类号: TV431 **文献标识码:** A

冻融破坏是混凝土结构在运行过程中产生的主要病害之一。文献[1]对全国、大中型水工混凝土建筑物的病害调查表明, 在三北(东北、华北和西北)地区水工混凝土的冻融破坏占100%, 一些大型混凝土工程运行30年左右, 有的甚至不到20年就出现冻融剥蚀破坏。国家每年投入大量的资金对病害大坝进行维修和加固, 然而, 由于对新老混凝土粘结面的受冻融损伤机理缺乏研究, 造成年年修、年年坏的被动局面。国内外众多学者对常温下新老混凝土粘结的宏观力学性能和微观分子结构进行了一系列研究^[2-6], 结果表明, 新老混凝土之间的粘结主要由机械咬合力和范德华力组成。文献[2]针对高速公路快速修补材料与混凝土的粘结在冻融情况下的劈拉强度进行了试验^[2], 结果显示, 快凝修补材料与老混凝土的粘结面在冻融300次情况下的劈拉强度相当于未冻融情况下7d的劈拉强度。作者曾对受冻融损伤混凝土与新混凝土的粘结剪切性能进行了试验研究^[7], 本文则针对新老混凝土粘结之后, 粘结面经受冻融循环作用的性能, 用Z形试件直剪试验方法进行评价, 同时考察了老混凝土界面的不同处理方法(不同粗糙度)和不同界面剂的类型等对粘结性能的影响。

1 试验设计

1.1 试件设计 为研究粘结面的剪切性能, 同时考虑到粘结面的受剪状态与实际情况相符合, 并使试件的制作方便、加载简单易行, 采用了如图1所示的Z形试件, 处在两缺口之间的新老混凝土粘结面在两端均匀压力作用下主要处于受剪状态。

1.1.1 试件尺寸 Z形剪切试件的尺寸如图1所示, 其中粘结面为 100mm × 100mm, 浇筑混凝土时保证粘结面在Z形试模两缺口之间的连线上。测试相对动弹性模量和质量损失的试件尺寸为100mm × 100mm × 400mm, 测试新老混凝土粘结的试件的尺寸为100mm × 100mm × 100mm。

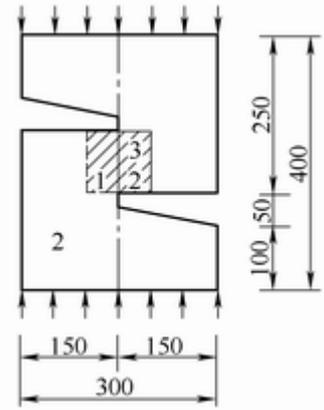
收稿日期: 2003-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59778045); 河南省科技攻关资助项目(0124150)

作者简介: 李平先(1962-), 男, 河南巩义人, 博士, 教授, 主要从事水工混凝土结构基本理论与耐久性的研究。

1.1.2 材料及配合比 新、老混凝土均采用32.5普通硅酸盐水泥、中粗河砂(细度模数2.93)、碎石(5~20mm)配制而成。参照混凝土结构加固技术规程,混凝土结构加固时所用混凝土的强度等级应比原结构混凝土的强度等级提高一级,且不应低于C20的规定,新、老混凝土强度设计等级分别为C30和C25,其材料配比见表1。新、老混凝土的强度值由试验确定。

1.1.3 老混凝土粘结面处理 考虑到老混凝土自然光滑面的粘结效果较差,因而采用以下3种方法对老混凝土粘结面进行处理:(1)B型界面。对老混凝土的自然光滑面仅用钢丝刷刷毛后作为粘结面。清除表面的污物和浮浆。(2)C型界面。对老混凝土的粘结界面采用人工凿毛,凿去老混凝土表面的浮浆和部分水泥石,露出粗骨料,使表面形成凹凸不平状(即形成粗糙度),以增加粘结面的接触面积和机械咬合力。(3)S型界面。将老混凝土试块用压力试验机从中间劈开,用其断裂面作为粘结面。同时清除断裂面上松动和开裂部分,从而得到粗糙度较大的粘结面。



1-老混凝土;2-新混凝土;3-剪切面
图1 新老混凝土粘结面直剪试件

表1 混凝土配合比

设计强度等级	坍落度/cm	水灰比	砂率Sp(%)	混凝土材料用量/(kg/m ³)			
				水泥	砂	石子	水
C25	3~5	0.54	36	361	664	1180	195
C30	2~4	0.47	34	415	609	1181	195

1.1.4 老混凝土粘结面粗糙度的测定 采用上述方法处理的老混凝土粘结面,用灌砂法^[7]量测平均灌砂深度h(mm),作为粘结面的粗糙度指标。经测定:B型界面的 h=0.23~0.58mm;C型界面的 h=2.1~3.07mm;S型界面的 h=4.0~6.9mm。

1.1.5 界面粘结剂的选择 (1)水泥净浆。采用与新混凝土相同的水泥,水灰比为0.4;(2)水泥砂浆。与新混凝土相同的水泥砂浆,水泥 砂 水=1.0:1.0:0.4;(3)水泥膨浆。用10%UEA膨胀剂代替水泥净浆中相应重量水泥的水泥净浆(简称膨胀水泥浆)。

1.2 剪切试件成型 按图1所示Z形试件的形状和大小制作Z形钢质试模,对不同处理的粘结界面和不同的界面剂组合情况,均制作了3个试件。具体过程:(1)将预先浇筑的一批龄期在一年以上的100mm×100mm×100mm老混凝土立方体试块在试验机上劈裂成两半,一方面测其劈裂抗拉强度,另一方面得到尺寸为100mm×100mm×50mm的试块,清除表面松动和开裂部分,用其100mm×100mm的一面作为老混凝土的粘结面,按前述界面处理方法对粘结面进行处理;(2)将处理过的老混凝土试块放入水中浸泡12h以上,取出清洗干净,放在通风处干燥;(3)将粘结面涂抹界面剂,置于100mm×100mm×100mm试模中,侧向浇筑新混凝土成型;(4)试件成型24h后拆模,覆盖塑料薄膜洒水养护28d;(5)将新老混凝土粘结后的100mm×100mm×100mm的立方体试块和100mm×100mm×400mm的新老混凝土棱柱体试件(与老混凝土立方体试件同时浇筑)放入水中浸泡4d以上,取出后擦去棱柱体试件表面的明水,称其初始质量,并量测其初始横向自振频率;(6)将上述试件装入试件盒中,注入自来水,使试件淹没于水中。然后放入冻融试验机中试验,达到规定冻融循环次数后,取出并再次量测棱柱体的质量和横向自振频率,计算质量损失率和相对动弹性模量的下

降；(7)将冻融后的新老混凝土立方体粘结试件(表面用钢丝刷刷毛并清洗干净)放入Z形钢质试模中，再次浇筑混凝土使其成为Z形剪切试件，并注意使粘结面处于Z形试模两缺口之间连线的剪切位置上。经 48h后拆模，洒水养护28d。

1.3 试验 冻融试验按《水工混凝土试验规程》(DL/T5150—2001)^[8]的方法，在国产TDRI型混凝土自动快速冻融试验设备上进行。全部试件的强度试验均在WE-300型万能试验机上进行。

2 试验结果

表2为新、老混凝土本体经受冻融循环前后的相应强度，为100mm×100mm×100mm试件直接测试结果。混凝土的抗冻性不仅与混凝土的强度有关，而且主要取决于混凝土内部毛细孔的结构和性质，从表2可以看出，由于混凝土强度的差异，使得冻融后的相对动弹性模量和强度的下降存在较大差异。

表2 新、老混凝土本体经受冻融循环前后的性能变化

冻融循环数 n(次)	自振频率和相对动弹性模量				抗压强度/MPa				抗拉强度/MPa			
	老混凝土		新混凝土		老混凝土		新混凝土		老混凝土		新混凝土	
	f/Hz	p(%)	f/Hz	p(%)	冻前	冻后	冻前	冻后	冻前	冻后	冻前	冻后
0		100.0		100.00	43.71		46.39		3.840		3.890	
5	2299	94.8	1813	78.07	45.18	40.76	30.28	25.48	3.693	3.226	2.859	2.175
10	2305	91.7	2010	78.00	54.58	44.60	43.63	36.29	4.032	3.928	3.575	2.615
15	2200	93.3	1209	54.90	45.18	39.92	28.59	18.21	3.693	3.392	3.030	1.906
20	2125	88.7	1816	66.18	45.97	39.26	34.04	25.46	4.093	3.328	3.396	1.948
30	2084	84.0	1601	58.90	46.05	39.83	33.36	22.18	3.907	3.233	3.346	1.719

注：f为新、老混凝土棱柱体试件经受n次冻融循环后的横向自振频率；p为与未冻融时相比较的相对动弹性模量。

粘结面剪切强度按下式计算：

$$\tau = P/A \tag{1}$$

式中： τ 为新老混凝土粘结剪切强度；P为破坏荷载；A为粘结面面积。

由于新、老混凝土经冻融后的力学性能和微观结构均发生了变化，粘结面的影响因素更加复杂，为便于比较，采用以下三种指标进行比较。

(1)新老混凝土粘结面经过n次冻融循环后的平均粘结剪切强度 τ_n 与没有经受冻融时的平均粘结剪切强度 τ_0 之比

$$\tau_1 = \tau_n / \tau_0 \tag{2}$$

(2)新老混凝土粘结面经过n次冻融循环后的平均粘结剪切强度 τ_n 与相应新、老混凝土平均立方体抗压强度之比

$$\tau_2 = 2 \tau_n / (f_{cu}^n + f_{cu}^0) \tag{3}$$

式中： f_{cu}^n 和 f_{cu}^0 分别为新、老混凝土经过n次冻融循环后的立方体抗压强度。

(3)新老混凝土粘结面经过n次冻融循环后的平均粘结剪切强度 τ_n 与相应新、老混凝土平均劈裂抗拉强

度之比

$$f_{ts}^n / (f_{ts}^n + f_{ts}^o) \quad (4)$$

式中： f_{ts}^n 和 f_{ts}^o 分别为新、老混凝土经过n次冻融循环后的劈裂抗拉强度。

在粘结面处理方法和界面剂相同时，式(2)适用于同一批浇筑的新、老混凝土试件之间的比较，而式(3)和式(4)适用于不同新、老混凝土之间抗冻粘结性能的比较。

新、老混凝土粘结面剪切试验结果见表3。

从试验结果可以看出，在冻融循环作用下，新、老混凝土的粘结剪切强度明显低于新、老混凝土未经受冻融时的相应粘结剪切强度和新、老混凝土劈裂抗拉强度的平均值。

3 试验结果分析

3.1 破坏现象 所有Z形试件的剪切破坏面均发生在新、老混凝土的粘结面。对不同的界面处理方法、不同的界面剂类型以及冻融循环次数的不同，其破坏后粘结面的平直程度、粘结面上界面剂和凸出的粗骨料被剪断程度有所不同。当冻融循环次数较少时，剪切破坏面上填充在老混凝土中的界面剂、水泥石被剪断较多，对C型界面尤为突出，破坏后可以看到粘结面上被剪断石子的新鲜断面，破坏前无预兆，破坏荷载较大。随着冻融循环次数的增加，剪切破坏面中被剪断的界面剂和水泥石越来越少，破坏面基本是沿着原来的新、老混凝土粘结面发生，破坏时，有的在剪切面的一端首先出现一小裂缝，而后很快破坏，有的根本没有裂缝出现，突然剪断，属于脆性破坏。

3.2 新、老混凝土冻融损伤机理 从混凝土冻融损伤机理可知，在冻融循环作用下，新老混凝土中的水泥石和骨料—水泥石粘结面之间会产生微裂缝，导致粘结面上化学胶着力和机械咬合力下降，同时界面剂将由密实状态变得疏松多孔，并伴有裂缝的产生和发展，直接导致新、老混凝土粘结面的性能劣化；另一方面，新混凝土在硬化过程中，体积收缩受到已硬化老混凝土的限制产生应力，在冻融循环过程中，由于温度变化产生交替出现的拉压应力与收缩产生的拉压应力相叠加，当达到粘结面的抗拉强度时，导致粘结面开裂，粘结强度下降；在融化过程中水分又会进入这些开裂的缝隙，当再次冻结时，由于结冰产生体积膨胀，又导致开裂面产生拉应力，粘结面进一步受到损伤，如此反复，形成恶性循环并最终导致粘结面失效，产生冻融破坏，失去承载能力。对经受冻融的混凝土的微观分析表明^[9, 10]，冻融循环将导致混凝土水化产物的结构由密实状态转变到疏松状态，并随冻融循环次数的增加，在水泥石和骨料-水泥石接触面伴有微裂缝的产生和微裂缝的发展，并最终导致骨料与水泥石逐渐分离，形成豆腐渣状的破坏。而新、老混凝土的粘结性能除与新、老混凝土本体的损伤有关外，还与粘结剂强度的降低和粘结面的损伤程度有关。

3.3 冻融循环对新、老混凝土粘结面剪切强度的影响 表2列出了新老混凝土本体经受冻融循环前后的性能变化，表3为新老混凝土粘结面剪切强度试验结果。从中可以看出，在其它条件相同的情况下，粘结面剪切强度随冻融循环次数的增加而急剧下降，冻融循环30次后，除水泥砂浆的C型界面外，其余新老混凝土粘结面均失去粘结强度，发生冻融破坏。

表3 新、老混凝土粘结面剪切试验结果

试件编号	粘结面情况	剪切强度 τ^a /MPa	η_1 (%)	η_2 (%)	η_3 (%)	试件编号	粘结面情况	剪切强度 τ^a /MPa	η_1 (%)	η_2 (%)	η_3 (%)
BPO		2.763	100.00	6.133	71.49	CU0		3.247	100.00	7.377	84.23
FBP5		1.265	45.78	3.819	46.84	FCU5		1.520	46.81	4.589	56.29
FBP10	B型界面	1.470	53.20	3.635	44.93	FCU10	C型界面	1.617	49.80	3.998	49.43
FBP15	水泥净浆					CU15	膨胀水泥浆	0.497	15.31	1.710	18.76
FBP20		0.270	9.78	0.834	10.24	FCU20		0.610	18.79	1.885	23.12
FBP30						FCU30					
BMO		2.760	100.00	6.126	69.24	SPO		3.383	100.00	7.686	87.76
FBM5		2.060	74.64	6.220	76.28	FSP5		1.600	47.30	4.831	59.25
FBM10	B型界面	2.173	78.73	5.373	66.42	FSP10	S型界面	1.907	56.37	4.715	58.29
FBM15	水泥砂浆					FSP15	水泥净浆	0.550	16.26	1.892	20.76
FBM20		1.11	40.2	3.430	42.08	FSP20		0.485	14.34	1.499	18.39
FBM30						FSP30					
BU0		2.777	100.00	6.164	69.67	SM0		3.487	100.00	7.922	90.45
FBU5		1.090	39.25	3.291	40.36	FSM5		2.110	60.51	6.371	78.13
FBU10	B型界面	1.060	38.17	2.621	32.40	FSM10	S型界面	2.390	68.54	5.909	73.06
FBU15	膨胀水泥浆					FSM15	水泥砂浆	1.395	40.01	4.799	52.66
FBU20		1.025	36.91	3.167	38.86	FSM20		1.230	35.27	3.801	46.63
FBU30						FSM30					
CP0		4.380	100.00	9.723	109.88	SU0		3.490	100.00	7.948	90.76
FCP5		1.603	36.53	4.831	59.25	FSU5		1.260	36.10	3.804	46.66
FCP10	C型界面	1.627	37.15	4.023	49.73	FSU10	S型界面	1.710	49.00	4.228	52.27
FCP15	水泥净浆	0.983	22.44	3.382	37.11	FSU15	膨胀水泥浆	0.767	21.98	2.639	28.95
FCP20		0.615	14.04	1.900	23.31	FSU20		0.380	10.89	1.174	14.40
FCP30						FSU30					
CM0		4.027	100.00	9.149	104.16						
FCM5		2.200	54.63	6.643	81.47						
FCM10	C型界面	2.480	61.58	6.132	75.81						
FCM15	水泥砂浆	1.650	40.97	5.677	62.29						
FCM20		1.620	40.40	5.028	61.68						
FCM30		0.970	24.09	3.129	39.18						

注：试件编号中的F表示冻融；B、C、S表示粘结面的糙化方法；P表示水泥净浆，M表示水泥砂浆，U表示膨胀水泥浆；数字表示冻融循环次数。

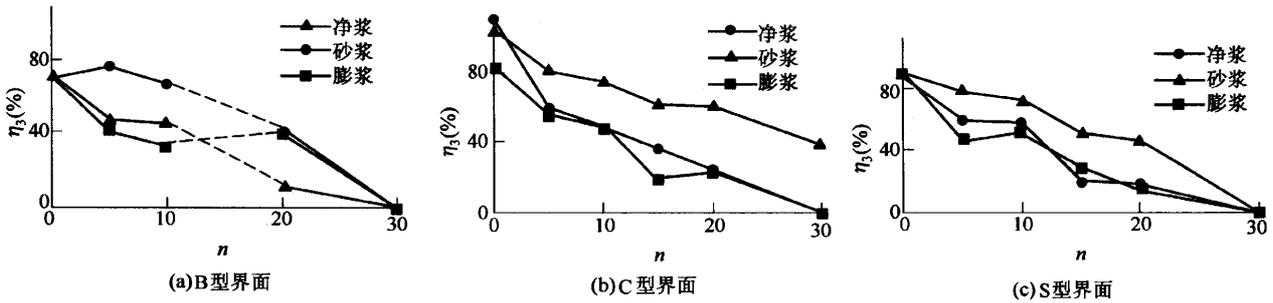


图2 粘结面剪切强度随冻融循环次数的变化

图2为不同界面处理方式下粘结面剪切强度随冻融循环次数的变化。从图中可以看出：(1)在其它条件相同的情况下，新老混凝土粘结剪切强度随冻融循环次数的增加而急剧下降。当冻融循环次数30次时，除以水泥砂浆为界面剂的C型界面外，其余粘结面均发生冻融破坏，说明冻融循环对新老混凝土粘结面的损伤比新老混凝土本体的损伤要严重得多；(2)在所选用的界面剂和界面处理方式中，以C型界面与水泥砂浆界面剂组合状况为最好。一方面由于粘结剪切强度在同等条件下随冻融循环次数增加下降较缓，另一方面在冻融30次后，仅剩C型界面和水泥砂浆组合的试件未冻融破坏，但粘结剪切强度均明显低于没有经受冻融循环情况下的相应粘结剪切强度；(3)C型界面优于B型和S型界面。一般来说，在其它条件相同情况下，C型界面的粘结剪切强度高于B型和S型界面同条件下的粘结剪切强度。S型界面的粗糙度最大，但其粘结效果并非最好，说明粗糙度并非越大越好^[2,3,6]，另外，在进行试件劈拉时老混凝土本身可能受到了损伤。B型界面粘结效果最差，在n=15时，所有B型界面均发生冻融破坏，其原因除B型界面粗糙度较小外，新混凝土经冻融后其强度降低较多。后来发现，在新混凝土中含有胶泥，从相对动弹性模量测试来看，试件的自振频率明显低于其它试件(如表2所示)；(4)在相同冻融循环次数下，新老混凝土的粘结剪切强度，随界面剂类型的不同而有所变化，水泥砂浆的粘结效果最好，水泥净浆和膨胀水泥浆的粘结效果无显著差异。这是由于在三种界面剂中所采用的水灰比均相同，加入干砂后，砂子吸收一部分水分，使砂浆稠度增加，塑性降低，硬化后的弹性模量增大，线胀系数减小的缘故；(5)以水泥砂浆为界面剂的新老混凝土粘结面，其粘结剪切强度随冻融循环次数的增加而下降的趋势缓于水泥净浆和膨胀水泥浆的情况。

4 结论与建议

(1)在冻融循环作用下，水泥石和骨料-水泥石粘结面之间产生微裂缝，微裂缝逐渐发展导致性能逐渐劣化，主要表现在相对动弹性模量的下降、质量损失率增加和强度的降低，其中抗拉强度反应最为敏感。(2)新老混凝土的粘结剪切强度随冻融循环次数的增加急剧下降，其下降程度取决于新、老混凝土本体强度和粘结界面的特征(界面处理方法和界面剂的种类)。(3)粘结界面的粗糙度对新老混凝土粘结剪切强度有显著影响，以C型界面(凿毛面)为最好。(4)界面剂的使用有利于新老混凝土粘结质量的改善。(5)对表面已经产生冻融损伤的混凝土结构修补，原则上应剔除表层损伤的水泥石和砂石骨料，使表面的粗糙度适宜为止。(6)建议开展混凝土结构在冻融循环作用下的健康监测与损伤诊断研究工作，建立混凝土结构物的冻融损伤的评价指标体系。(7)建议对粘结剂的耐久性包括抗冻性、抗渗性等进行试验研究，提高新老混凝土的粘结性能。

参考文献：

[1] 水电部混凝土耐久性调查组. 全国水工混凝土建筑物耐久性病害处理调查报告[R]. 北京：水电部，1987.

- [2] Shigen E L, David G G, Gregory C F, Jack E S. Freeze-thaw bond durability of rapid-setting concrete repair materials[J]. *ACI Materials Journal*, 1999, 96(2): 242-249.
- [3] Shigen E L, Gregory C F, Jack E S. Bond performance of rapid-setting repair materials subjected to deicing salt and freezing-thawing cycles[J]. *ACI Materials Journal*, 1999, 96(6): 692-697.
- [4] 叶爱芳, 林毓梅. 新老混凝土结合层的强度与结构[J]. *水利学报*, 1990, (5): 51-56.
- [5] 李庚英, 谢慧才, 熊光晶. 新老混凝土的粘结模型及微观结构分析[J]. *混凝土*, 1999, (6): 13-18.
- [6] 赵志方, 赵国藩. 采用高压水射法处理新老混凝土粘结面的试验研究[J]. *大连理工大学学报*, 1999, 39(4): 558-561.
- [7] 李平先, 赵国藩, 张雷顺. 受冻融损伤混凝土与新混凝土的粘结剪切性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2004, 25(5): 111-117.
- [8] DL/T5150-2001. 水工混凝土试验规程[S].
- [9] 李金玉, 曹建国, 徐文雨, 林莉, 关遇时. 混凝土冻融破坏机理的研究[J]. *水利学报*, 1999, (1): 41-49.
- [10] 施士升. 冻融循环对混凝土力学性能的影响[J]. *土木工程学报*, 1997, 30(4): 35-42.

Experimental study on influence of cyclic freeze-thaw on shear strength of bonding interface between fresh and old concrete

LI Ping-xian^{1,2}, ZHANG Lei-shun², ZHAO Guo-fan¹

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The influence of cyclic freeze-thaw on shear strength of bonding interface between fresh and old concrete is studied experimentally. The specimens experience different freeze-thaw cycles with temperature variation from -18 to 8. It is found that the bonding shear strength decreases rapidly with the increase of freeze-thaw cycles. Failure takes place after 30 cycles. The bonding strength reduction is closely dependent on the strength of the concretes themselves and the characteristics of bonding interface including the adhesive agents adopted and procedure of surface cleaning.

Key words: bonding interface; fresh and old concrete; freeze-thaw cycles; shear strength; adhesive agent; surface cleaning