

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.013

苏晓栋,陈灿明,郭壮,等.混凝土双轴弹模-徐变试件垫层效果试验分析[J].水利水运工程学报,2019(3):103-111. (SU Xiaodong, CHEN Canming, GUO Zhuang, et al. Test analysis of effects of cushion on concrete specimen's elastic modulus and creep under biaxial compression[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(3): 103-111. (in Chinese))

混凝土双轴弹模-徐变试件垫层效果试验分析

苏晓栋^{1, 2}, 陈灿明^{1, 2}, 郭壮^{1, 2}, 何建新^{1, 2}, 徐静文^{1, 3}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 水利部水科学与水工程重点实验室, 江苏南京 210029;
3. 河海大学, 港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098)

摘要: 混凝土双轴受压弹模和徐变试验加载应力控制在相应龄期棱柱体强度的30%~40%,相比混凝土抗压强度试验,试件表面轻微不平整和倾斜以及钢承压板与试件承压面的摩阻对混凝土双轴弹模和徐变试验结果的影响更大。为减小混凝土试件承压面轻微不平整和倾斜以及钢压板与混凝土试件间的摩阻对混凝土双轴弹模和徐变试验结果的影响,提出适用于混凝土双轴弹模和徐变试验、能使混凝土试件在弹性变形阶段整体应力应变均匀性好的垫层。通过棱柱体混凝土试件单轴受压时不同材料和组合的垫层对应变偏差率、应变曲线及弹性特征影响的比较,筛选3种组合垫层进行双轴弹模验证试验。结果表明聚四氟乙烯薄膜(PTFE)夹土工布的组合垫层能在双轴受压弹模试验中有效降低试件竖向和横向应变偏差率,使混凝土试件应力分布均匀,2层1.0 mm PTFE 夹1.2 mm 土工布的组合垫层总体效果最好。

关键词: 混凝土; 双轴徐变; 组合垫层; 降偏; 减摩

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2019)03-0103-09

混凝土抗压强度试验中,标准立方体试件并不处于均匀受压应力状态,所测强度值也绝非理想的单轴抗压强度^[1]。混凝土多轴抗压强度试验时试件各承压面上的约束作用相互影响,可使混凝土试验强度提高1倍、甚至更多^[2]。为了减小钢压板与承压面间摩阻力影响,一般设置减摩垫层,使试验抗压强度值接近于无摩擦约束的抗压强度^[3-4]。混凝土双轴受压弹模和徐变试件一般为边长100~200 mm的立方体试件,加载应力控制在相应龄期棱柱体强度 f_{pr} 的30%~40%。混凝土试件表面轻微不平整和倾斜以及钢承压板与试件承压面的摩阻对混凝土双轴弹模和徐变试验结果的影响更大,因此需要在借鉴双轴抗压强度试验减摩垫层的基础上,研究出适用于混凝土双轴弹模和徐变试验、使混凝土试件在弹性变形阶段整体应力应变均匀性好的垫层^[5]。

选择不同聚四氟乙烯膜(PTFE)厚度、层数以及与其他材料的组合垫层,通过棱柱体混凝土试件单轴受压弹模试验比较分析其效果,筛选出3种效果相对较好的组合垫层进行双轴弹模验证试验,最终提出能有效减小混凝土试件表面轻微不平整和倾斜以及钢承压板与试件端面摩阻等因素对双轴弹模和徐变试验结果影响的垫层。

1 试验概况

1.1 试验设备

试验采用YXB-1000混凝土双轴徐变仪,该设备由加压与恒荷、力值和变形测量、控制与分析三部分组

收稿日期: 2018-08-30

基金项目: 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(重大)项目(Y414006)

作者简介: 苏晓栋(1993—),男,福建泉州人,硕士研究生,主要从事水工结构研究。E-mail:xd_su@foxmail.com

通信作者: 陈灿明(E-mail:ccm9640@126.com)

成,可进行混凝土和岩石的双轴弹模与徐变试验。主要性能参数为:最大试验力 1 000 kN(竖向、活塞式油缸加载)和 500 kN(水平向、伺服电机机械加载),最小分辨力值 0.005 kN(竖向)和 0.002 5 kN(水平向);变形最大量程 10 mm,变形分辨力 0.001 mm。加载方式为单独加载或两轴同时加载,加载速率 2~200 kN/min,控制方式为力或位移,连续工作不少于 1 年。加载过程中混凝土试件各部位竖向和横向应变由电阻应变片和电子动态应变仪测量。

1.2 试件制作及应变片布置

试验选用 C30, C50 和 C60 混凝土分别制作棱柱体试件(150 mm×150 mm×300 mm)和立方体试件(200 mm×200 mm×200 mm)。混凝土骨料最大粒径不大于 25 mm。为减小试件表面不平整和倾斜,用特制铁模具卧式成型。

根据圣维南原理,试件加压端面的不均匀垂直压应力和合力为零的水平约束力只对端面附近应力状态产生影响。标准棱柱体试件中间部分接近于均匀的单轴受压应力状态。因此用标准棱柱体试件端面附近的横向应变与中部应变相比较以判别垫层效果。试验中棱柱体和立方体应变片布置见图 1。由于混凝土骨料最大粒径不大于 25 mm,选用标距 80 mm 应变片。

1.3 试验方法

选用 C30, C50 和 C60 混凝土进行试验,由于垫层效果试验结果与混凝土强度等级基本无关,仅列出 C50 混凝土试件的试验结果。

单轴加载试验参照混凝土受压弹模和徐变试验方法^[6-7],仅在混凝土弹性阶段(0.3~0.4) f_{pr} 分级加载,棱柱体试件每级荷载增量 50 kN,立方体试件每级荷载增量 100 kN,加载速率 2 kN/s。正式加载前,将垫层置于加载板与试件承压面之间,预压 5 kN 荷载后检查加载板、垫层与试件对中情况,如偏差较大则卸荷重新调整。每种垫层进行 3 次试验,选择相同试件在不同垫层时压板附近与棱柱体中部横向应变的偏差率和两侧竖向偏差率进行比较;每种垫层对 3 个不同试件进行适用性试验,筛选 3 种效果相对较好的垫层进行双轴弹模试验验证,最终提出具有适应试件表面轻微不平整和倾斜、减小压板与混凝土试件间摩擦、用于混凝土双轴弹模和徐变试验的垫层。

2 垫层效果试验与分析

2.1 垫层效果评判指标与标准

垫层降偏和减摩效果的判别参数包括试件在加载应力小于(0.3~0.4) f_{pr} 时不同位置的应变偏差率 e 、应变曲线以及试验结果计算所得弹性模量 E 和泊松比 μ 。

(1) 偏差率 混凝土试件竖向和横向应变均匀性采用偏差率 e 表示, e 按下式计算:

$$e_{d,mn} = \left| \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_n}{\varepsilon_m + \varepsilon_n} \right| \times 100\% \quad (1)$$

式中: $e_{d,mn}$ 为试件某方向某位置应变片的应变偏差率, d 为应变方向, 竖向为 V, 横向为 H; $\varepsilon_m, \varepsilon_n$ 为竖向或横向不同位置应变值; m, n 表示对应的竖向或横向应变片编号(见图 1); 试件前后两侧竖向应变偏差率为 e_{V_f, V_b} ; 对于棱柱体试件采用试件两侧中心应变片 V1 和 V2 应变值总和计算, 立方体试件采用试件两侧中心应变片 V2 应变值计算; \bar{e}_d 表示试件应变偏差率平均值。

试件竖向两侧应变偏差率和横向不同位置应变偏差率越低说明垫层适应混凝土试件表面轻微不平整和倾斜的能力越强,钢压板与试件间减摩效果越好,试件应力分布越均匀。

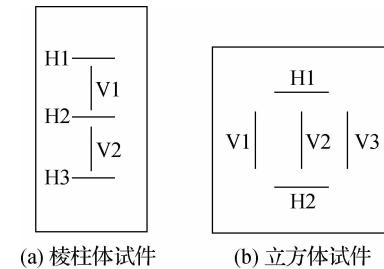


图 1 应变片布置

Fig. 1 Strain gages layout

(2) 加载级的弹模和泊松比

① 双向先后加载 竖向荷载 P_V 先逐级施加至最大值, 水平荷载 $P_H = 0$, 由第一级荷载到最大一级荷载的应力增量为 σ_V , 应变增量为 ε_V 和 ε_H , 无侧压力 ($\sigma_H = 0$) 的弹性模量 E_V 、泊松比 μ_V 计算式为:

$$E_V = \sigma_V / \varepsilon_V, \mu_V = -\varepsilon_H / \varepsilon_V \quad (2)$$

之后水平荷载 P_H 逐级施加至最大值, 竖向荷载 P_V 保持不变, 水平向和竖向应变增量分别为 $\Delta \varepsilon_H$ 和 $\Delta \varepsilon_V$, 有侧压力 σ_V 下的弹性模量 E_H 和泊松比 μ_H 计算式为:

$$E_H = \sigma_H / \Delta \varepsilon_H, \mu_H = -\Delta \varepsilon_V / \Delta \varepsilon_H \quad (3)$$

② 双向交替加载 试验荷载分 8 级施加, 单级 1, 3, 5, 7 级加竖向荷载 ΔP_V , 双级 2, 4, 6, 8 级加水平荷载 ΔP_H ; 加竖向荷载时保持上一级水平荷载不变, 加水平荷载时保持上一级竖向荷载不变。弹性特征计算式为:

$$E_V = \frac{4\Delta \sigma_V}{\Delta \varepsilon_{V_2} + \Delta \varepsilon_{V_3} + \Delta \varepsilon_{V_5} + \Delta \varepsilon_{V_7}}, \mu_V = -\frac{\Delta \varepsilon_{H_1} + \Delta \varepsilon_{H_3} + \Delta \varepsilon_{H_5} + \Delta \varepsilon_{H_7}}{\Delta \varepsilon_{V_1} + \Delta \varepsilon_{V_3} + \Delta \varepsilon_{V_5} + \Delta \varepsilon_{V_7}} \quad (4)$$

$$E_H = \frac{4\Delta \sigma_H}{\Delta \varepsilon_{H_2} + \Delta \varepsilon_{H_4} + \Delta \varepsilon_{H_6} + \Delta \varepsilon_{H_8}}, \mu_H = -\frac{\Delta \varepsilon_{V_2} + \Delta \varepsilon_{V_4} + \Delta \varepsilon_{V_6} + \Delta \varepsilon_{V_8}}{\Delta \varepsilon_{H_2} + \Delta \varepsilon_{H_4} + \Delta \varepsilon_{H_6} + \Delta \varepsilon_{H_8}} \quad (5)$$

弹性阶段各加载级应变增量越均匀则垫层效果越好, 表现为各加载级弹模 E 和泊松比 μ 的标准差大小, 标准差越小垫层效果越好。

(3) 适用性 混凝土试件制作过程中表面不可避免存在轻微的不平整和倾斜, 表面的粗糙程度也不相同, 而且这些缺陷是随机的。混凝土立方体抗压强度试验时规范规定试件承压面不平整度不应大于试件边长的 0.05%, 承压面与相邻面的不垂直度不应大于 $\pm 1^\circ$ 。相同垫层不同试件的试验结果越接近, 说明垫层的适用性越好。

2.2 垫层材料选择

针对混凝土受压弹模-徐变试验加载应力较小、承压面不平整和倾斜以及试件表面粗糙度对试验结果影响大的特点, 应选择既能适应承压面不平整和倾斜, 又具有减摩功能的垫层。根据相关研究成果^[8], 选用聚四氟乙烯薄膜(PTFE)、氯丁橡胶薄板、瓦楞纸板和土工布等作为垫层主要材料或辅助材料进行试验。

国内外采用最多的减摩垫层材料是 PTFE^[9-12], 它是典型的软而弱聚合物, 大分子间的相互引力较小, 刚度、硬度、强度都较小, 在应力长期作用下会出现蠕变, 摩阻系数小(约为 0.01 ~ 0.10); 氯丁橡胶也是常用垫层材料, 具有良好拉伸强度、伸长率, 且变形可逆; 瓦楞纸板是一个多层的黏合体, 弹性小, 易变形, 缓冲作用好, 可根据需要制成各种形状, 或大或小, 但重复性较差, 且不宜在湿度较大的环境中长期使用; 土工布(无纺)又称土工织物, 抗拉强度高, 与其他材料组合使用, 可起到加筋作用, 减少其他软体的延伸变形, 对试件表面的不平整和倾斜适应性高。

2.3 单一材料垫层效果

以 PTFE 为垫层材料, 分析不同厚度 PTFE 垫层对棱柱体单轴受压试件应变偏差率、应变曲线及弹性特征计算结果的影响。

表 1 和 2 为不同厚度 PTFE 垫层混凝土试件总应变偏差率和试件不同荷载级应变增量计算的弹模 E 与泊松比 μ 结果; 图 2 为不同厚度垫层混凝土试件应变偏差率 e 随荷载的变化曲线; 图 3 为无垫层、0.3 mm PTFE 和 1.0 mm PTFE 垫层混凝土试件应变随荷载增长曲线。

表 1 不同厚度 PTFE 垫层混凝土试件竖向和横向总应变偏差率

Tab. 1 Vertical and lateral total strain deviation rates of concrete specimens with different-thickness PTFE cushions %

编号	垫层厚度/mm	e_{V_f, V_b}	$e_{H1, H2}$	$e_{H2, H3}$	\bar{e}_H
A1	0(无垫层)	9.31	14.17	31.48	22.83
A2	0.1	8.12	10.43	31.28	20.86
A3	0.2	13.14	18.06	17.04	17.55
A4	0.3	15.23	11.78	20.31	16.05
A5	0.5	5.53	7.96	26.47	17.21
A6	1.0	4.86	7.56	19.90	13.73

表 2 不同厚度 PTFE 垫层各荷载级弹模及泊松比试验结果

Tab. 2 Elastic modulus and Poisson's ratio test results for different-thickness PTFE cushions under all load levels

垫层编号	不同荷载级的 E/GPa 和 μ					平均值	标准差
	1	2	3	4	5		
A1	47.1(0.04)	40.9(0.07)	38.9(0.20)	39.9(0.17)	39.3(0.22)	41.2(0.14)	3.36(0.081)
A2	47.1(0.07)	40.7(0.09)	39.3(0.19)	41.9(0.25)	40.7(0.23)	41.9(0.17)	3.01(0.082)
A3	44.7(0.03)	38.2(0.15)	38.0(0.19)	37.9(0.17)	40.4(0.15)	39.9(0.14)	2.90(0.062)
A4	45.2(0.10)	40.2(0.31)	37.3(0.22)	38.7(0.14)	37.9(0.03)	39.9(0.16)	3.10(0.107)
A5	45.4(0.05)	38.9(0.29)	38.0(0.20)	37.1(0.03)	44.1(0.20)	40.7(0.15)	3.78(0.112)
A6	48.0(0.07)	38.6(0.04)	39.2(0.16)	40.8(0.20)	44.0(0.28)	42.1(0.15)	3.90(0.098)

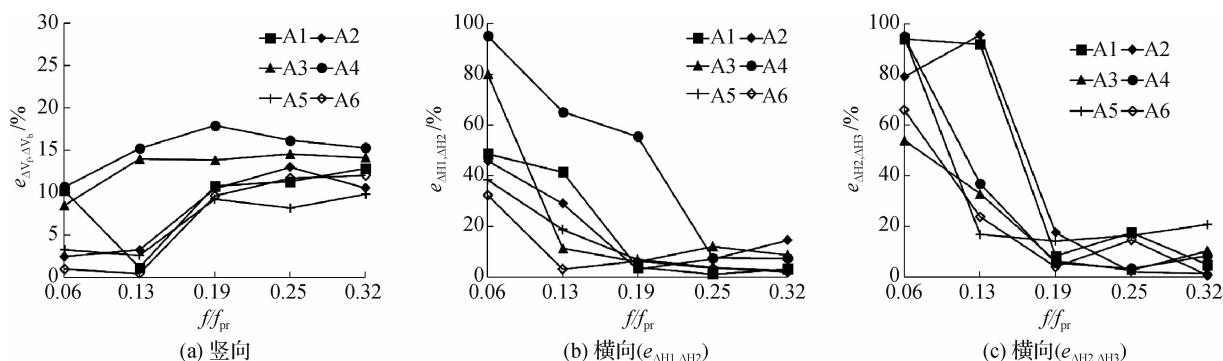


图 2 不同厚度 PTFE 垫层混凝土试件各荷载级应变增量偏差率

Fig. 2 Strain deviation rate of concrete specimens with different-thickness PTFE cushions under all load levels

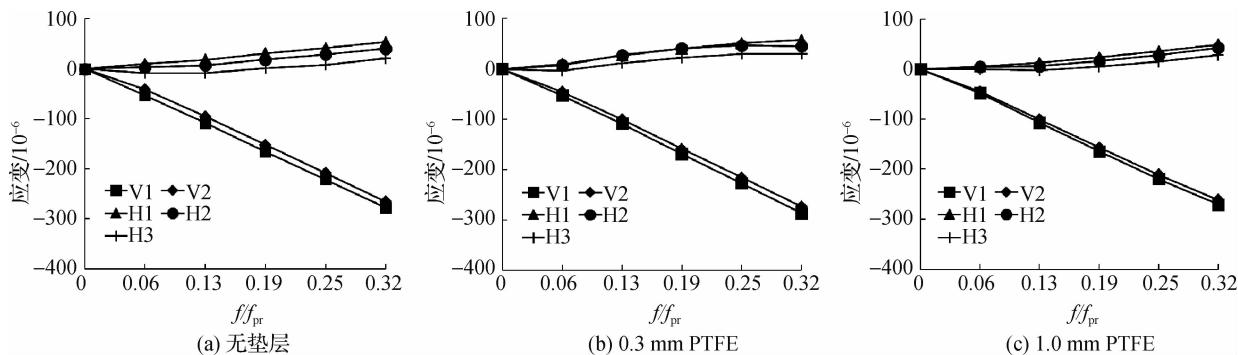


图 3 不同厚度 PTFE 垫层的混凝土试件应变曲线

Fig. 3 Strain curves of concrete specimens with different-thickness PTFE cushions

试验结果表明:

(1) 混凝土试件横向应变偏差率总体上随 PTFE 垫层厚度增加而降低,无垫层试件平均横向应变偏差率为 22.83%,使用 1.0 mm PTFE 垫层后试件平均横向应变偏差率下降至 13.73%。

(2) 横向应变偏差率随混凝土试件应力水平提高先期下降明显,应力大于 $0.25f_{pr}$ 后,混凝土试件横向应变偏差率逐渐趋于稳定。

(3) PTFE 垫层厚度对混凝土试件竖向应变偏差率的影响不明显,不同垫层时试件竖向应变偏差率 e_{V_f, V_b} 为 4.86% ~ 15.23%,其中 0.3 mm PTFE 垫层最高,1.0 mm PTFE 垫层最低,无垫层为 9.31%。

(4) 不同厚度 PTFE 垫层混凝土试件各荷载级计算的弹模为 39.9 ~ 42.1 GPa,标准差 2.90 ~ 3.90 GPa;泊松比 0.14 ~ 0.17,标准差 0.062 ~ 0.112。

(5) 虽然试件承压面设置单层 PTFE 垫层可一定程度降低试件竖向和横向应变偏差率,应力分布随荷载增长的曲线也逐渐趋于均匀,但其横向最大应变偏差率仍较高,弹性特征标准差也较大,难以满足弹模和徐变试验要求。

(6) 对于混凝土双轴弹模和徐变试验,受试件表面轻微不平整和倾斜影响,试件应力较小时应变偏差率较大,因此理想垫层应以调整试件表面轻微不平整和倾斜的功能为主,压板与试件间减摩为辅。

2.4 组合垫层效果

根据混凝土双轴弹模和徐变试验对垫层功能的要求,在不同厚度 PTFE 垫层试验基础上,进一步比较 PTFE 与其他材料的组合垫层对棱柱体和立方体试件应变偏差率、应变曲线及弹性特征的影响。

不同组合垫层混凝土试件应变偏差率见表 3,棱柱体和立方体试件应变随荷载增长曲线见图 4,不同组合垫层棱柱体和立方体试件弹模、泊松比与标准差试验结果见图 6。

表 3 组合垫层混凝土试件横竖向总应变偏差率

Tab. 3 Horizontal and vertical total strain deviation rates of concrete specimens with different composite cushions %

垫层组合	编号	棱柱体试件				立方体试件			
		e_{V_f, V_b}	$e_{H1, H2}$	$e_{H2, H3}$	\bar{e}_H	编号	e_{V_f, V_b}	$e_{V1, V3}$	$e_{H1, H2}$
无垫层	A1	9.31	14.17	31.48	22.83	/	/	/	/
2 层 1.0 mm PTFE	B1	7.12	7.39	17.51	12.45	C1	11.64	13.12	19.66
2 层 1.0 mm PTFE 夹氯丁橡胶	B2	4.52	17.41	30.43	23.92	C2	0.26	24.26	10.35
2 层 1.0 mm PTFE 夹瓦楞纸板	B3	16.46	21.40	34.33	27.86	C3	3.38	31.63	13.81
2 层 1.0 mm PTFE 夹 0.6 mm 土工布	B4	3.83	7.28	16.97	10.46	C4	0.91	11.96	4.30
2 层 1.0 mm PTFE 夹 1.2 mm 土工布	B5	12.46	8.20	11.65	12.59	C5	2.00	10.25	14.42
2 层 1.0 mm PTFE 夹(1.2+0.6)mm 土工布	B6	11.83	3.89	8.55	6.22	C6	2.53	14.87	5.64

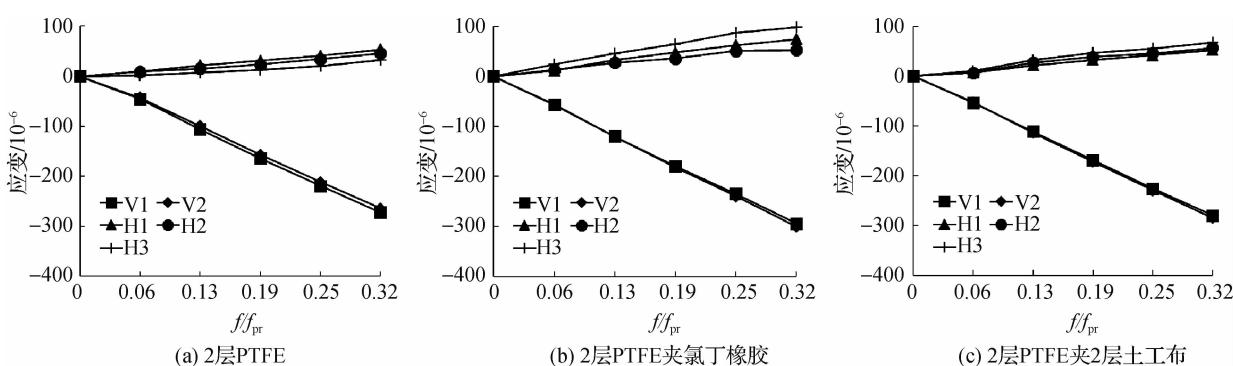


图 4 不同垫层组合棱柱体试件应变曲线

Fig. 4 Strain curves of prism specimens with different cushions

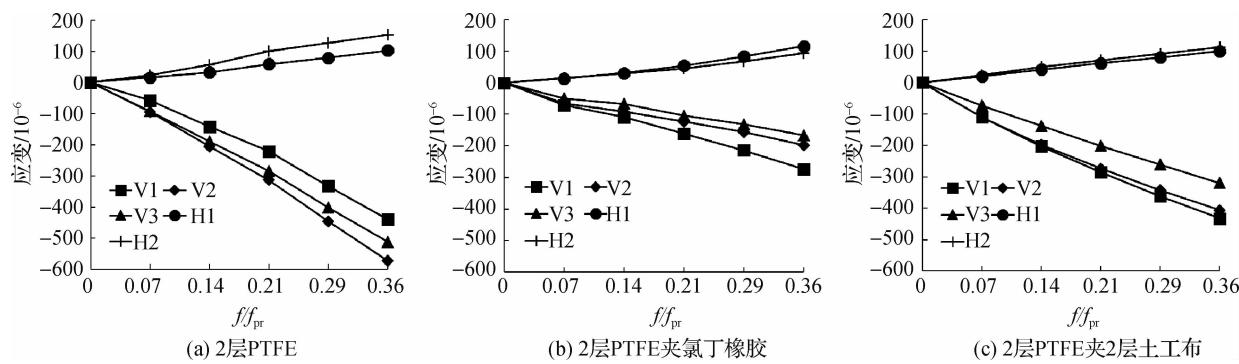


图5 不同垫层组合立方体试件应变曲线

Fig. 5 Strain curves of cubic specimens with different cushions

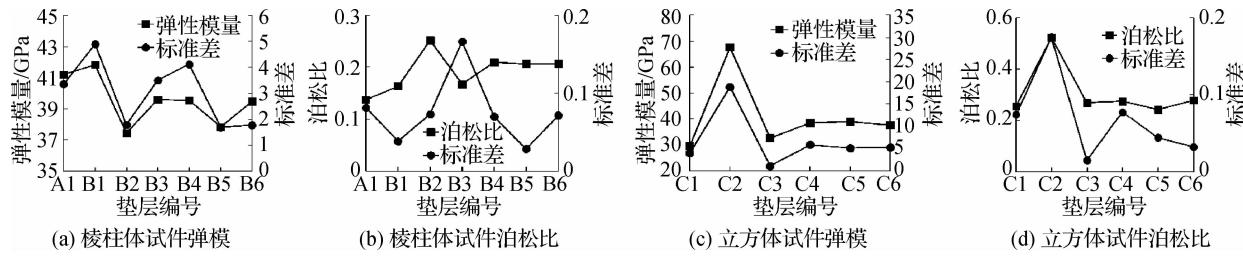


图6 不同垫层组合各荷载级弹模和泊松比及其标准差

Fig. 6 Standard deviation of elastic modulus and Poisson's ratio with different cushions under all load levels

通过试验结果分析发现：

(1) 不同组合垫层棱柱体试件竖向应变偏差率 e_{v_f, v_b} 为 $3.83\% \sim 16.46\%$, 其中 2 层 1.0 mm PTFE 夹瓦楞纸板垫层最高, 2 层 1.0 mm PTFE 夹 0.6 mm 土工布垫层最低。

(2) 棱柱体试件在不同组合垫层时横向应变偏差率 e_h 为 $3.89\% \sim 34.33\%$, 2 层 1.0 mm PTFE 夹土工布垫层最大横向应变偏差率 $e_{h,max}$ 相对较小 ($8.55\% \sim 16.97\%$), 其中 2 层 1.0 mm PTFE 夹 1.2 mm 和 0.6 mm 土工布的垫层最低。

(3) 不同组合垫层立方体试件横向应变偏差率 $e_{h1, h2}$ 为 $4.30\% \sim 19.66\%$, 其中 2 层 1.0 mm PTFE 垫层最高, 2 层 1.0 mm PTFE 夹 0.6 mm 土工布垫层最低。

(4) 立方体试件在不同组合垫层时竖向应变偏差率 e_v 为 $0.26\% \sim 31.63\%$, 2 层 1.0 mm PTFE 垫层和 2 层 1.0 mm PTFE 夹土工布垫层最大竖向应变偏差率相对较小 ($10.25\% \sim 14.87\%$), 其中 2 层 1.0 mm PTFE 夹 1.2 mm 土工布最低。

(5) 不同组合垫层棱柱体试件各荷载级的计算弹模为 $37.5 \sim 41.8$ GPa, 标准差 $1.78 \sim 4.90$ GPa, 其中 2 层 PTFE 夹土工布垫层的弹模标准差相对较小; 泊松比为 $0.14 \sim 0.25$, 标准差为 $0.038 \sim 0.166$, 2 层 1.0 mm PTFE 垫层和 2 层 1.0 mm PTFE 夹土工布垫层的泊松比标准差相对较小。

(6) 不同组合垫层立方体试件各荷载级的计算弹模为 $29.6 \sim 67.7$ GPa, 标准差 $1.10 \sim 18.87$ GPa, 其中 2 层 1.0 mm PTFE 夹瓦楞纸板垫层弹模标准差相对较小; 泊松比为 $0.25 \sim 0.54$, 标准差为 $0.015 \sim 0.175$, 其中 2 层 1.0 mm PTFE 夹瓦楞纸板垫层、2 层 1.0 mm PTFE 夹 1.2 mm 土工布、2 层 1.0 mm PTFE 夹 1.2 mm 和 0.6 mm 垫层的泊松比标准差相对较小。

(7) 各组合垫层棱柱体和立方体试件随着荷载增加, 其竖向和横向应变偏差率逐渐减小, 应力分布趋于均匀, 试验结果推算的弹模、泊松比趋于稳定。

(8) 综合比较棱柱体和立方体试件竖向和横向应变偏差率、计算弹模和泊松比及标准差等参数, 结果表

明,2层1.0 mm PTFE 夹土工布的组合垫层效果明显优于 PTFE 夹氯丁橡胶和 PTFE 夹瓦楞纸板的组合垫层。

3 组合垫层在双轴弹模试验中的应用

对棱柱体和立方体单轴试验筛选效果相对较好的2层1.0 mm厚PTFE夹土工布(土工布厚度0.6,1.2,(0.6+1.2) mm)组合垫层进行双轴受压弹模试验验证。

试验时采用3种不同加载顺序分别对3个立方体试件进行双轴受压试验。试验分8级加载,每级荷载增量100 kN,最大应力控制在 $(0.3 \sim 0.4)f_{pr}$,每个试件每种垫层试验3次。同时把同一试件不同组合垫层竖向两侧偏差率 e_{v_f, v_b} 试验结果与同一组合垫层在3个不同试件的试验结果进行综合比较。

不同加载顺序双轴受压试验各试件应变偏差率及弹模和泊松比计算结果见表4,PTFE夹1.2 mm土工布垫层试件应变随荷载的变化曲线见图7。

(1) 不同加载顺序立方体试件3种组合垫层最大应变偏差率 e_{max} 为0.49%~10.13%,其中2层1.0 mm PTFE夹1.2 mm土工布垫层3个加载顺序试件的最大应变偏差率 e_{max} 均最低,分别为0.49%,2.80%和9.86%。

(2) 不同加载顺序立方体试件3种组合垫层竖向弹模 E_v 为32.1~38.5 GPa,横向弹模 E_h 为31.3~36.3 GPa, E_v 和 E_h 偏差率为0~10.32%。其中2层1.0 mm PTFE夹1.2 mm土工布垫层3个加载顺序试件 E_v 和 E_h 的偏差均最低,分别为0.2.06%和0.93%。

(3) 不同加载顺序立方体试件3种组合垫层竖向泊松比 μ_v 为0.22~0.28,横向泊松比 μ_h 为0.32~0.45, μ_v 和 μ_h 偏差率为6.67%~32.31%。其中2层1.0 mm PTFE夹0.6 mm土工布垫层3个加载顺序试件 μ_v 和 μ_h 偏差均最低,分别为16.92%,11.11%和6.67%。

(4) 3个加载顺序立方体试件2层1.0 mm PTFE夹1.2 mm土工布垫层试件横竖向应变在整个加载过程中较为均匀。

(5) PTFE夹土工布的3种组合垫层均能在双轴受压弹模试验中有效降低试件竖向和横向应变偏差率,使混凝土试件应力分布均匀。经综合比较分析可见,2层1.0 mm PTFE夹1.2 mm土工布的组合垫层效果又优于夹0.6 mm和(0.6+1.2)mm土工布的组合垫层。

表4 PTFE夹土工布组合垫层双轴受压试验结果
Tab. 4 Biaxial compression test results of composite cushion with PTFE and geotextile

加载方式	组合垫层	$e_{v_f, v_b}/\%$	$e_{v_1, v_r}/\%$	$e_{h_1, h_2}/\%$	E_v/GPa	E_h/GPa	μ_v	μ_h
先竖向分4级加载至400 kN	PTFE夹0.6 mm土工布	1.83	3.66	0.90	36.2	36.3	0.27	0.38
	PTFE夹1.2 mm土工布	0.49	0.45	0.24	36.1	36.1	0.24	0.36
后横向分4级加载至400 kN	PTFE夹(0.6+1.2) mm土工布	0.31	4.99	3.16	40.7	35.9	0.25	0.39
	PTFE夹0.6 mm土工布	3.48	3.72	0.17	38.5	31.3	0.28	0.35
先横向分4级加载至400 kN	PTFE夹1.2 mm土工布	2.80	2.63	0.96	34.7	33.3	0.25	0.33
	PTFE夹(0.6+1.2) mm土工布	1.34	6.90	3.69	38.1	31.4	0.24	0.34
横竖向100 kN交替加载	PTFE夹0.6 mm土工布	10.13	9.57	3.02	38.0	32.5	0.28	0.32
	PTFE夹1.2 mm土工布	9.86	9.83	7.98	32.1	32.7	0.22	0.43
	PTFE夹(0.6+1.2) mm土工布	8.22	10.07	1.90	36.5	34.7	0.25	0.45

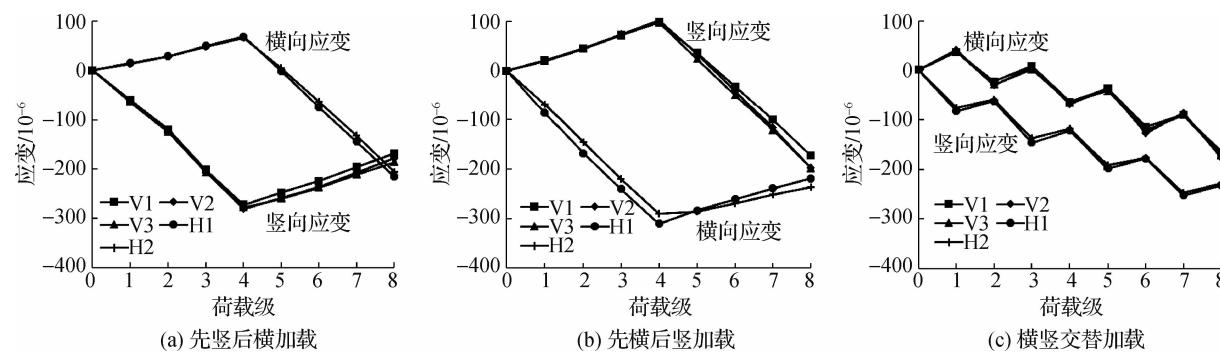


图 7 PTFE 夹 1.2 mm 土工布组合垫层应变曲线

Fig. 7 Strain curves of composite cushion with PTFE and 1.2 mm geotextile

4 结语

通过混凝土棱柱体和立方体试件单轴受压时单一垫层与组合垫层对应变偏差率、应变曲线及弹性特征影响的比较,筛选3种垫层进行双轴弹模试验验证,得出以下结论:

(1) 混凝土试件在应力水平较低时(小于 $0.25f_{pr}$),试件表面轻微不平整和倾斜对应力分布影响最为敏感,应变偏差率较大,因此混凝土双轴弹模和徐变试验的垫层应以调整试件表面轻微不平整和倾斜的功能为主,压板与试件间的减摩为辅。

(2) 试件承压面上设置单层PTFE垫层可一定程度降低试件竖向和横向应变偏差率,应力分布随荷载增长的曲线也更均匀,但其横向最大应变偏差率仍较高,且弹性特征标准差也较大,难以满足双轴弹模和徐变试验要求。

(3) 综合比较试件竖向和横向应变偏差率、计算弹模和泊松比及标准差等参数发现,2层1.0 mm PTFE夹土工布的组合垫层效果明显优于PTFE夹氯丁橡胶和PTFE夹瓦楞纸板的组合垫层。

(4) PTFE夹土工布的组合垫层能有效降低试件竖向和横向应变偏差率,使试件应力分布均匀。2层1.0 mm PTFE夹1.2 mm土工布的组合垫层效果总体优于2层1.0 mm PTFE夹0.6 mm和(0.6+1.2) mm土工布的组合垫层。

(5) 混凝土单、双轴弹模和徐变试验中推荐使用2层1.0 mm厚PTFE夹1.2 mm土工布的组合垫层,该组合垫层装置已取得国家知识产权局的实用新型专利授权^[13]。

参 考 文 献:

- [1] 过镇海. 混凝土的强度和变形: 试验基础和本构关系 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. (GUO Zhenhai. Strength and deformation of concrete: experimental basis and constitutive relationship [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese))
- [2] 王传志, 过镇海, 张秀琴. 二轴和三轴受压混凝土的强度试验 [J]. 土木工程学报, 1987(1): 15-27. (WANG Chuanzhi, GUO Zhenhai, ZHANG Xiuqin. Experimental investigation of concrete strength under biaxial and triaxial compressive stresses [J]. China Civil Engineering Journal, 1987(1): 15-27. (in Chinese))
- [3] 邓宗才, 阚德新, 杜修力, 等. 聚乙烯纤维布约束混凝土短柱轴压性能的试验 [J]. 工业建筑, 2007(10): 69-72. (DENG Zongcai, KAN Dexin, DU Xiuli, et al. Experiment on behavior of concrete short columns confined by polyethylene fiber sheet under axial compression [J]. Industrial Construction, 2007(10): 69-72. (in Chinese))
- [4] 曾莎洁, 李杰. 混凝土单轴受压动力全曲线试验研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013(1): 7-10. (ZENG Shajie, LI Jie. Experiment study on uniaxial compression behavior of concrete under dynamic loading [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013(1): 7-10. (in Chinese))

- [5] 陈灿明. 双向受力状态下混凝土受力特性与混凝土双轴徐变仪的开发应用研究[R]. 南京:南京水利科学研究院, 2015. (CHEN Canming. Study on concrete stress characteristics under two-way stress state and development of concrete biaxial creeper[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2015. (in Chinese))
- [6] GB-T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. (GB-T 50082—2009 Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete[S]. (in Chinese))
- [7] SL 352—2006 水工混凝土试验规程[S]. (SL 352—2006 Test code for hydraulic concrete[S]. (in Chinese))
- [8] 张秀琴, 王传志. 混凝土立方体试块表面摩擦对强度的影响及其减摩措施[R]. 北京:清华大学抗震抗爆工程研究室, 1983. (ZHANG Xiuqin, WANG Chuanzhi. Effect of surface friction on strength of cubed concrete and its anti-friction measures [R]. Beijing: Tsinghua University Earthquake Resistant Engineering Laboratory, 1983. (in Chinese))
- [9] LU X B, THOMAS C T T. Behavior of high strength concrete with and without steel fiber reinforcement in triaxial compression [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(9): 1679-1685.
- [10] LEE S K, SONG Y C, HAN S H. Biaxial behavior of plain concrete of nuclear containment building[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 227(2): 143-153.
- [11] 宋玉普, 何振军. 高强高性能混凝土在多轴压下强度与变形性能的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊2): 3575-3584. (SONG Yupu, HE Zhenjun. Experimental investigation on strength and deformation of plain high-strength high-performance concrete under multiaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (Suppl2): 3575-3584. (in Chinese))
- [12] 肖平成, 李奔奔, 江佳斐. 减摩擦垫层对混凝土轴压试验的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2015(1): 127-132. (XIAO Pingcheng, LI Benben, JIANG Jiafei. Effect of friction-reducing pads on concrete under compression[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2015(1): 127-132. (in Chinese))
- [13] 陈灿明. 混凝土双轴压缩试验的垫层组合装置:中国, ZL201620733232.2[P]. 2016-12-07. (CHEN Canming. Cushion combination device for concrete biaxial compression test: China, ZL201620733232.2[P]. 2016-12-07. (in Chinese))

Test analysis of effects of cushion on concrete specimen's elastic modulus and creep under biaxial compression

SU Xiaodong^{1, 2}, CHEN Canming^{1, 2}, GUO Zhuang^{1, 2}, HE Jianxin^{1, 2}, XU Jingwen^{1, 3}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Water Science and Water Engineering of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The stress of concrete in the biaxial compression elastic modulus and creep tests is controlled at 30% ~ 40% of the prism specimen's strength at the corresponding age. Compared with the concrete compressive strength testing, the slight unevenness and inclination on the concrete specimen surface as well as the friction between the steel load-bearing board and the concrete specimen have a greater influence on the concrete biaxial elastic modulus and creep tests. In order to reduce the above adverse effects and make the stress and strain of the concrete specimens uniform during the elastic deformation stage, proposing a suitable cushion for the concrete biaxial elastic modulus and creep tests is necessary. By comparing the effects of different materials and composite cushions on the strain deviation rates, strain curves and elastic characteristics when the prismatic concrete specimens are uniaxially compressed, three kinds of composite cushions are chosen and verified in the biaxial elastic modulus tests. The testing analysis results show that the composite cushion with PTFE and geotextile can effectively reduce the vertical and lateral strain deviation rates of the concrete specimen in the biaxial compression elastic modulus tests, uniforming the stress distribution of the concrete specimen. The overall effect of the composite cushion with two layers of 1.0 mm PTFE and 1.2 mm geotextile is optimal.

Key words: concrete; biaxial creep; composite cushion; deviation; antifriction