文章编号:1000-8608(2011)02-0255-08

不同保护层厚度下钢筋混凝土板受力性能试验研究

王清湘*1,孙兴全^{1,2},王 刚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.同济大学 建筑设计研究院,上海 200092)

摘要:在实际施工过程中,混凝土板负弯矩钢筋的保护层厚度容易偏大,这将导致板(特别 是悬臂板)的承载力降低.对钢筋混凝土悬臂板和两端约束板进行了试验研究,重点研究了保 护层厚度变化对板的承载力及正常使用性能的影响.对两端约束板分别按线弹性理论和塑性 内力重分布理论进行了计算;利用 ANSYS 进行了有限元数值模拟,并与试验结果进行了对 比分析.研究结果表明,板的保护层厚度对悬臂板的受力性能有较大的影响,对两端约束板的 受力性能虽有影响但并没有对悬臂板的影响那样明显.研究成果对于丰富板的计算理论及保 护层施工与验收标准的制定均有一定的积极意义.

关键词:钢筋混凝土单向板;混凝土保护层厚度;内力重分布;正常使用阶段; ANSYS

中图分类号: TU375.2 文献标志码: A

0 引 言

混凝土保护层在钢筋混凝土结构中起着重要 作用.合适的保护层厚度既能保证混凝土有良好 的粘结性、耐久性、耐火性,又可以充分发挥钢筋 的力学性能.然而浇筑过程中振捣棒的振捣,施工 人员对钢筋的踩踏等行为都会影响到构件的保护 层厚度,尤其是钢筋混凝土板的负弯矩钢筋的绑 扎位置往往不能保证与设计位置相一致,时有钢 筋保护层厚度过大现象,轻则降低构件的承载能 力,重则会发生重大事故.据统计,在对板类构件 的保护层厚度检测中,有 95%的楼板会出现支座 处负弯矩钢筋保护层厚度过大现象^[1],而目前国 内还缺少关于此方面的相关试验研究.为此,本文 对 11 块不同保护层厚度情况下的钢筋混凝土单 向板进行试验,并利用 ANSYS 有限元分析软件 对板进行有限元分析.

1 研究内容及试件设计

1.1 研究内容

(1)研究保护层厚度变化对钢筋混凝土悬臂

板受力性能的影响;

(2)研究保护层厚度变化对两端约束钢筋混 凝土单向板受力性能的影响;

(3)通过调整两端约束板支座配筋,实现弯矩 调幅,调幅系数为15%,进行塑性内力重分布理 论分析及试验研究;

(4)比较钢筋类型对构件受力性能的影响;

(5)利用 ANSYS 软件进行数值模拟.

1.2 试件设计

共制作 11 块混凝土板. 混凝土采用 C30 商 品混凝土, A 板、X 板钢筋采用 HPB235 钢筋, B 板钢筋采用冷轧带肋钢筋. 各板配筋及应变片布 置见图 1,板尺寸见表 1.

1.3 试验设计

结合实验室的具体情况,两端约束板利用分 配梁进行4集中力加载,悬臂板利用分配梁进行 2集中力加载(见图2).加载制度按《混凝土结构 试验方法标准》制定,试验前进行预加载.各加载 点的竖向荷载自零开始逐级增加直至板的破坏. 两端约束板采用油泵控制液压千斤顶加载,悬臂 板采用手动液压千斤顶加载.加载装置图见图3.

作者简介: 王清湘*(1945-),男,教授,博士生导师,E-mail:wangqx7885@yahoo.cn.



图 1 板的配筋及应变片布置

Fig. 1 The reinforcements and strain-gages arrangement of slabs

表 1 板尺寸

Tab.1 The	dimensions	of	the	slabs
-----------	------------	----	-----	-------

板早	析	ī尺寸/m	m		保护层厚度/	
102 5	长	宽	厚	的朋天室	mm	
A1	2 400	600	120	光圆	15	
A2	2 400	600	120	光圆	25	
A3	2 400	600	120	光圆	35	
A4	2 400	600	120	光圆	45	
A5	2 400	600	120	光圆	60	
B1	2 400	600	120	冷轧	35	
X1	1 200	900	120	光圆	15	
X2	1 200	900	120	光圆	25	
X3	1 200	900	120	光圆	40	
X4	1 200	900	120	光圆	45	
X 5	1 200	900	120	光圆	55	



图 2 板加载位置

Fig. 2 The loading position of slabs

(a) 悬臂板



(b) 两端约束板 图 3 板加载装置 Fig. 3 Loading frame of slabs

1.4 材料参数

分析计算时板各材料参数均采用实测值,如 表 2 所示.其中混凝土轴心抗压强度 f。= 0.76 $f_{cu,m}$,混凝土轴心抗拉强度 $f_t = 0.23 f_{cu,m}^{2/3}$, 混凝土弹性模量 $E_c = 10^5 / (2.2 + 34.7 / f_{cu,m})$. B 板的冷轧带肋钢筋按硬钢考虑,分析计算时取 0.85fu作为条件屈服强度.

MPa

Tab. 2 The main parameters of concrete and steel bars

混凝土和钢筋主要参数

表 2

_			-				
		混凝土	光国	冷轧带肋钢			
	立方体抗压强度	轴心抗压	轴心抗拉	弹性模量	屈服强度	极限强度	筋极限强度
	平均值 f _{cu,m}	强度 f _c	强度 f_t	$E_{ m c}$	f_{y}	$f_{\rm u1}$	$f_{ m u2}$
	38	28.88	2.60	32 154	290	370	600

2 主要试验结果及分析

2.1 悬臂板的开裂荷载、极限荷载

悬臂板的开裂荷载和极限荷载列于表 3 中. 开裂荷载计算公式为 $M_{er}^{cal} = \gamma f_t W_o$,其中 γ 取值 为 1. 55. 极限荷载计算公式为 $M_u^{cal} = f_y A_s \left(h_o - 0.5 \frac{f_y A_s}{f_c b} \right)$. 试验值取传感器实测值,未包含板的 自重及加载设备的重量. 试验板承载力极限值取 千斤顶无法继续加载时的读数. 对于悬臂板,在极 限荷载之前的一个加载级左右,试验板最大裂缝 宽度已经大于等于 1.5 mm,达到文献[3]中所规 定的承载力极限破坏标准.

由表 3 对悬臂板的开裂荷载、极限荷载结果 作如下分析:

(1)从计算公式中可以看出,悬臂板的开裂荷载应该与钢筋位置无关,而试验中除 X5 板外,板的开裂荷载随保护层厚度增大而略有增加的趋势.

(2)随着保护层厚度增大,悬臂板极限荷载的 计算值呈比较平缓的下降趋势,而极限荷载的试 验值减小幅度比计算值的大.说明保护层厚度的 变化,对板实际承载能力的影响可能会大于对理 论计算的影响.

Tab. 3

(3)由于在实际工程中板的保护层厚度一般 取为15~25 mm,将5块悬臂板的实际承载力与 X1板的计算承载力做了对比.对比发现,X1、X2 板的实际承载力大于 X1板的计算值;当保护层 厚度增大到40 mm时,板的实际承载力开始小于 X1板的计算值;当钢筋置于接近中和轴位置时 (X5板),板的开裂荷载即是板的极限承载力,板 开裂后的最终承载力将下降到X1板计算值的 60%.这说明保护层厚度的变化对悬臂板的承载 力有显著的影响.

(4)X3 板的极限荷载试验值与 X1、X2 板的 极限荷载试验值相比,下降较为明显,且非常接近 于极限荷载计算值.分析悬臂板钢筋应变及悬臂 板裂缝开展形式发现,由于 X1、X2 板的裂缝是缓 慢发展,在板顶局部先形成裂缝,但并未迅速形成 贯穿裂缝,板内钢筋是逐根分段屈服,先屈服的钢 筋在荷载继续增加、变形不断增大的过程中可能 进入了应变强化阶段,钢筋的应力提高,从而提高 了板的承载能力; X3 板一开裂板顶就几乎形成 了贯穿裂缝,板内钢筋几乎没有进入强化阶段,板 的承载力近似等于理论计算值.

(5)从图 4 的 X1 和 X5 板的实测荷载位移曲 线中可以清楚地看出保护层厚度的变化对悬臂板

板号	$M_{ m cr}^{ m cal}/(m kN {f \cdot} m m)$	$M_{ m cr}^{ m t}/(m kN \cdot m m)$	$M_{\rm u}^{\rm cal}/({\rm kN} \cdot {\rm m})$	$M_{\rm u}^{\rm t}/({ m kN} \cdot { m m})$	$M_{\mathrm{u},\mathrm{Xn}}^{\mathrm{cal}}/M_{\mathrm{u},\mathrm{X1}}^{\mathrm{cal}}$	$M^{\mathrm{t}}_{\mathrm{u},\mathrm{X}n}/M^{\mathrm{t}}_{\mathrm{u},\mathrm{X}1}$	$M^{ m t}_{{ m u},{ m X}n}/M^{ m cal}_{{ m u},{ m X}1}$
X1	9.83	7.09	12.81	16.88	1.00	1.00	1.32
X2	9.83	7.85	11.49	14.60	0.90	0.86	1.14
X3	9.83	8.01	9.65	10.20	0.75	0.60	0.80
$\mathbf{X4}$	9.83	10.30	8.86	10.30	0.69	0.61	0.80
X5	9.83	7.85	7.42	7.85	0.58	0.46	0.61

表 3 悬臂板的开裂荷载和极限荷载

The cracking load and ultimate load of the cantilever slabs



Fig. 4 The test load-displacement curves of X1 and X5 slabs

刚度、极限承载力和延性的影响,保护层厚度较小 的板(X1板)能够较好地反映出适筋板的受力特 征,板在开裂后有比较长的屈服过程,体现了较好 的延性,板破坏时属于塑性破坏:保护层厚度较大 的板(X5板)开裂后荷载急剧下降,目破坏时板内 钢筋实测的应变平均值为1239.4×10⁻⁶,钢筋的 应力很小,尚未屈服,钢筋并未充分发挥作用,说 明当钢筋保护层过厚时,钢筋的作用大大降低,从 甘的板"一裂即 而导致板的 坏",带有-

2.2 悬臂

正常使用状态下的荷载按 $M_{sl}^{cal} = M_{u}^{cal}/1.25$ 计算,其相应的裂缝宽度和挠度的计算值与实测 值列于表 4. 对于悬臂构件, 挠度规范限值为 8 mm(l_o/125)^[3],最大裂缝宽度限值为 0.2 mm^[3], 已经扣除荷载长期效应影响.

- 正常使用荷载作用下最大裂缝宽度及 表 4 相应挠度值
- Tab. 4 The deflection and maximal crack width at service load

板号	$M_{ m sl}^{ m cal}$ /	挠度	/mm	最大裂缝宽度/mm		
	(kN • m)	实测值	计算值	实测值	计算值	
X1	10.24	7.4	2.5	0.15	0.10	
X2	9.19	4.3	2.9	0.10	0.08	
X3	7.72	1.9	3.6	0.10	0.09	
X4	7.09	1.3	3.6	—	0.10	
$\mathbf{X5}$	5.94	1.2	4.2	—	0.10	

注:"一"表示未开裂

悬臂板正常使用性能结果分析如下: (1)保护层厚度较小的 X1、X2 板挠度实测值

= F

和最大裂缝实测值均略大于计算值,但小于规范 允许值,说明在正常保护层厚度下板具有较好的 刚度,能够满足正常使用阶段要求.

(2)如果按照不同保护层厚度时各自截面的 承载力来计算正常使用荷载,所有板均将满足正 常使用阶段要求,目X4、X5板在达到各自的正常 使用荷载时,板均尚未开裂.

(3)实际工程中板的保护层厚度取为 15~25 mm,所以对各板在 X1 板正常使用荷载作用下的 正常使用性能也做了分析,研究中发现除 X1、X2 板外,其余板均不能满足规范要求的正常使用极 限状态标准,可见,当保护层厚度增大到一定数值 时,会对悬臂板的正常使用性能造成显著影响,将 导致其在正常使用阶段产生过大的裂缝宽度和挠 度,板无法满足正常使用极限状态的要求.

2.3 两端约束板的开裂荷载、极限荷载

两端约束板的开裂荷载和极限荷载列于表 5 中,未包含板的自重及加载设备的重量.试验板承 载力极限值取千斤顶无法继续加载时的读数.类 似于悬臂板,大概在极限荷载之前的一个加载级 左右,试验板最大裂缝宽度已经大于等于1.5 mm,达到文献[3]中所规定的承载力极限破坏标 准.表5中:P^{ctl}。为板端开裂荷载计算值:P^t_{ct}。为 板端开裂荷载试验值:Parm为跨中第一批裂缝开 裂荷载计算值;Pt,...为跨中第一批裂缝开裂荷载 试验值; $P_{u}^{cal,e}$ 为按线弹性理论计算的极限荷载; $P_{\rm cal,p}^{\rm cal,p}$ 为按塑性内力重分布理论,考虑 15% 弯矩调 幅时计算的极限荷载; P: 为极限荷载试验值. A1 板由于失误在预加载过程中跨中出现裂缝,部分 数据空缺.

	AX J	内细约为		衣的节	K TH WK M	们我	
Tab. 5	The cracking	g load and	ultimate	load of	the slab	with two	fixed ends

西 # 約 由 板 的 **正** 刻 莅 载 和 极 阻 莅 载

拓旦	$P_{ m cr,e}^{ m cal}/ m kN$	$P_{\rm cr,e}^{\rm t}/{ m kN}$	$P_{ m cr,m}^{ m cal}/ m kN$	$P_{\rm cr,m}^{\rm t}/{ m kN}$	$P_{\rm u}^{\rm cal,e}/{ m kN}$	$P_{ m u}^{ m cal,p}/ m kN$	$P_{\rm u}^{\rm t}/{ m kN}$	${P}_{ m u,An}^{ m cal,e}/$	${P}_{\mathrm{u,A}n}^{\mathrm{cal,p}}/$	$P_{\mathrm{u,A}n}^{\mathrm{t}}/$	$P^{ m t}_{ m u,An}/$	$P_{\mathrm{u,A}n}^{\mathrm{t}}/$
似与								$P_{\rm u,A1}^{\rm cal,e}$	$P_{\mathrm{u,A1}}^{\mathrm{cal,p}}$	$P_{\mathrm{u,A1}}^{\mathrm{t}}$	$P_{\mathrm{u,A1}}^{\mathrm{cal,e}}$	$P_{\mathrm{u,A}n}^{\mathrm{cal,p}}$
A1	34.9	_	76.78	_	61.34	62.68	80	1.00	1.00	1.00	1.30	1.28
A2	34.9	29.5	76.78	43.0	56.19	58.66	75	0.92	0.94	0.94	1.22	1.20
A3	34.9	31.4	76.78	31.4	48.77	55.53	68	0.80	0.89	0.85	1.11	1.08
A4	34.9	48.6	76.78	32.0	42.48	54.80	66	0.69	0.87	0.83	1.08	1.05
A5	34.9	50.0	76.78	42.0	35.57	47.64	58	0.58	0.76	0.73	0.95	0.93
B1	34.9	34.0	76.78	34.0	49.17	54.48	66					

的承载力明显下降,此	」时
一定的脆性.	
板的正常使用性能	
使用业太下的若裁论	14

由表5数据可以做出如下分析:

(1)板端和跨中截面的开裂荷载计算值应该 与保护层厚度变化无关,而试验中发现板端开裂 荷载随保护层厚度的增加有增加趋势.

(2)按线弹性理论分析,板应该支座处先开 裂,跨中处后开裂,而试验中当保护层厚度较大 时,跨中将会比支座提前出现裂缝.这是因为对于 静定结构,支座的转角并不会引起结构内力的变 化.但是对于超静定结构,支座的转角则会引起结 构内力的变化.因此,当支座产生转角时,支座弯 矩与跨中弯矩的比值就不再是线弹性理论计算 值,而将随着支座转角的变化而变化,根据短期试 验刚度的计算公式和数据分析,随着保护层厚度 的增大,板的刚度减小,则板的转角将增大.因此 随着保护层厚度的增大,板端承受的弯矩有不断 减小趋势,跨中承受的弯矩有不断增大趋势,表现 在试验现象上就是板裂缝出现顺序会有所改变.

(3)板保护层厚度的变化对板的极限荷载试验值的影响小于对按线弹性分析方法得到的计算值的影响,比较接近对按内力重分布分析方法得到的计算值的影响.

(4)与悬臂板相比,两端约束板负弯矩钢筋保 护层厚度的变化对板的极限承载力影响有限.当 钢筋置于接近中和轴位置时,板的实际承载力与 A1板按线弹性理论计算值相比下降约5%,与 A1板按内力重分布计算值相比下降约7%,大于 A5板按内力重分布计算值22%,大于A5板按线 弹性理论计算值63%.

(5)图 5 的 A1 和 A5 板的实测荷载位移曲线 可以清楚地表示出负弯矩钢筋保护层厚度的变化 对两端约束板刚度、极限承载力和延性的影响.虽 然板的负弯矩钢筋保护层厚度不断增大,但不同 于悬臂板,即使是负弯矩钢筋已经放置于接近中 和轴的 A5 板,板仍然体现出很好的延性,破坏仍 属于塑性破坏.

2.4 两端约束板的正常使用性能

正常使用状态下的荷载按 $P = P_u^{\text{cal.e}}/1.25$ 计算,其相应的裂缝宽度计算值、实测值以及挠度实测值列于表 6.A 板挠度规范限值为 12 mm ($l_o/200$),B 板挠度规范限值为 $l_o/300$.A、B 板最大裂缝宽度限值均为 0.2 mm,已经扣除荷载长期效

应影响. 从表 6 中可以看出,两端约束板全部满足 正常使用性能的要求;实际工程中的混凝土保护 层厚度取为 15~25 mm,所以对各板在 A1 板正 常使用荷载作用下的正常使用性能也做了分析. 不同于悬臂板,即使是负弯矩钢筋置于接近中和 轴的 A5 板,在 A1 板正常使用荷载 49.07 kN 作 用下,其跨中挠度为 7.27 mm,最大裂缝宽度为 0.15 mm,均小于规范限值. 说明两端约束板具有 很好的刚度,能够满足正常使用极限状态的要求. 负弯矩钢筋混凝土保护层厚度的变化对板的正常 使用性能影响不大.



图 5 A1、A5 板的实测荷载位移曲线

Fig. 5 The test load-displacement curves of A1 and A5 slabs

表 6 两端约束板正常使用荷载作用下最大 裂缝宽度及相应挠度值

Tab. 6The deflection and maximal crack width atservice load of the slab with two fixed ends

板号	P/kN	挠度/	/mm	最大裂缝宽度/mm			
		实际值	限值	实测值	计算值	限值	
A1	49.07	1.85	12	0.1	0.086	0.2	
A2	44.95	3.01	12	0.1	0.093	0.2	
A3	39.01	2.55	12	0.05	0.107	0.2	
A4	33.98	1.28	12	_	0.126	0.2	
A5	28.46	1.19	12	_	0.139	0.2	
B1	39.34	2.31	8	_	0.186	0.2	

注:"一"表示未开裂

2.5 不同类型钢筋对板受力性能的影响

冷轧带肋钢筋是对低碳热轧盘圆进行冷轧减 径并在其表面轧出横肋的钢筋,在实际工程中主 要应用干钢筋混凝土楼板结构,图6为A3、B1板 的实测荷载位移曲线图,从中可以清楚地看出不 同类型的钢筋对板受力性能的影响. 与 A3 板相 比,B1 板的支座钢筋截面面积减少了 43%,跨中 钢筋截面面积减少了 45%,但无论是极限荷载还 是开裂荷载与A3板均相差不多:A3板支座板顶 一开裂即形成一道贯穿裂缝,B1 板则经过 2 个荷 载级后才出现贯穿裂缝,说明冷轧带肋钢筋对裂 缝开展控制要强于普通钢筋:A3 和 B1 板的开裂 形式基本相同,都是跨中和支座几平同时开裂,但 开裂时 B1 板的钢筋应变要普遍大于 A3 板的钢 筋应变,说明冷轧带肋钢筋与混凝土的黏结作用 比较强,在弹性工作阶段,钢筋已经同混凝土共同 工作:A3 和 B1 板均能满足正常使用阶段的要 求;B1 板的塑性变形过程比较短,钢筋在达到其 极限强度后被拉断,并伴有脆响,板的承载能力急 剧下降,挠度急剧增大,相比之下,A3 板的塑性变 形过程则比较明显,体现了较好的延性.



图 6 A3、B1 板的实测荷载位移曲线

Fig. 6 The test load-displacement curves of A3 and B1 slabs

3 ANSYS 数值模拟

3.1 单元、材料的选择

参考文献「4、5〕中的方法和理念,结合本试验 具体情况,模拟采用钢筋离散的方法,即SOLID65 单元模拟混凝土, LINK8 单元模拟钢筋, SOLID45单元模拟垫块.把体分割,将 SOLID65 单元属性赋给体,将LINK8单元属性赋给其交 线,然后进行网格划分,在试验加载位置和支座处 放置垫块,以便尽可能接近真实试验条件模拟,材 料属性全部为实测值. 混凝土材料模型考虑受拉 开裂,受压本构关系采用多线性等向强化模型 (Miso),它适用于按比例加载的情况和大应变分 析, 混凝土单轴受压应力应变关系采用文献[3]中 建议公式,上升段为二次抛物线,之后为一水平直 线, 混凝土破坏准则采用 ANSYS 程序中默认的 William-Warnke 五参数破坏准则,其中张开裂缝 剪力传递系数取 0.35,闭合裂缝剪力传递系数取 1.0,关闭压碎开关^[6].钢筋的材料模型采用线弹 性和双线形弹塑性材料模型,为节约计算机资源, 同时为了提高计算精度,本文对模型做了一定的 简化,根据对称性,悬臂板有限元模型只建立实际 模型的 1/2.

3.2 有限元计算

悬臂板荷载位移曲线如图 7 所示,图中各板 均考虑了支座转角的影响.对比试验值与模拟值 发现,ANSYS 对板弹性阶段模拟较好,能得到近 似的开裂荷载,但无法体现板随着保护层厚度的 增加,开裂荷载增加这一试验现象,其开裂荷载几 乎不变,保持在 8 kN•m 左右;试验中除 X1 板 外,其余板在开裂瞬间,有比较明显的荷载下降现 象,而 ANSYS 并未体现这点变化,只能形成一个 屈服台阶;ANSYS 能够得到比较理想的屈服荷 载值,但是从开裂点到屈服点这个阶段,有限元计 算的刚度略大;ANSYS 对从屈服点到极值点这 一阶段模拟的不是都很理想,特别是对保护层厚 度很大的 X5 板,模拟结果与试验值吻合较差.



图 7 悬臂板的荷载位移曲线

Fig. 7 The load-displacement curves of cantilever slabs

4 结 论

(1)保护层厚度的变化对悬臂板的正常使用 性能有显著的影响.试验中发现当板的保护层厚 度增大至 40 mm 时,板就已经无法满足规范对于 正常使用极限状态要求.

(2)保护层厚度的变化对两端约束板的正常 使用性能影响不大.试验中发现尽管负弯矩钢筋 的保护层厚度不断增大,但板的正常使用性能几 乎不受影响.即使当钢筋置于 1/2 板厚位置时,板 依然可以满足正常使用极限状态要求.

(3)保护层厚度的变化对悬臂板的承载力有 显著的影响.本次试验中发现,随着保护层厚度的 增加,悬臂板实测的承载力降低比计算值大.因此 对于悬臂构件,在施工过程中应采取可靠措施控 制保护层厚度,以保证其承载力不明显降低;在验 收过程中应严格检查其保护层厚度,避免引起工 程事故和留下工程隐患.

(4)保护层厚度的变化对两端约束板承载力的影响没有其对悬臂板的影响那么明显.本次试验中发现,虽然随着负弯矩钢筋保护层厚度的增加,两端约束板的承载力也有降低趋势,但降低幅

度比较小.因此对于两端约束构件,在验收过程中 对板负弯矩钢筋的保护层厚度要求可适当放宽, 应与悬臂构件有所区别.

(5) 正常保护层厚度的悬臂板在破坏时体现 了比较好的塑性,在开裂后板有明显的屈服和塑 性变形过程,而对于保护层厚度较大的悬臂板,一 旦开裂,荷载迅速下降,裂缝宽度和挠度急剧增 加,板破坏时带有一定的脆性;保护层厚度的变化 对两端约束板延性的影响不大,所有的板在破坏 前都有一个明显的塑性变形过程,板在破坏时体 现了较好的延性,属于塑性破坏.

(6)在本试验中,冷轧带肋钢筋的使用性能良好,试验构件在标准荷载(使用状态短期试验荷载)作用下裂缝宽度及挠度均小于规范规定的允许值;但破坏时发生断筋破坏,内力重分布进行得不充分.

(7)对于两端约束板,保护层厚度的变化对其 内力重分布过程影响不大.所有两端约束板的内 力重分布过程明显,板的塑性铰转动较大.按塑性 内力重分布法进行设计更接近于构件的真实受力 性能. (8)有限元计算结果与正常保护层厚度时悬 臂板的试验数据相吻合,可代替部分试验工作.但 对于大保护层厚度的悬臂板,有限元计算结果与 试验数据相差较大,计算方法还需改进.

(9)本文的大保护层厚度板属于非正常设计, 过大的保护层厚度造成钢筋过于接近中和轴,钢 筋受力不合理.在实际施工中,应严格按照规范要 求施工,尽量避免这种非正常施工现象发生,以防 止其对构件整体性能造成不利影响.

参考文献:

- [1]刘 军,李向群.浅谈钢筋混凝土结构钢筋保护层作
 用及问题处理[J].广东建材,2006(8):84-85
- [2] 中国建筑科学研究会. GB 50152-92 混凝土结构试验 方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1992

- [3] 中华人民共和国建设部. GB 50010-2002 混凝土结构 设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002
- [4] DELHOMME F, MOMMESSIN M, MOUGIN J P. Simulation of a block impacting a reinforced concrete slab with a finite element model and a mass-spring system [J]. Engineering Structures, 2007, 29(11): 2844-2852
- [5] FAMIYESIN O O R, HOSSAIN K M A., CHIA Y H, et al. Numerical and analytical predictions of the limit load of rectangular two way slabs [J]. Computers & Structures, 2001, 79(1):43-52
- [6]张先进,李永春,吕曼曼.考虑薄膜效应钢筋混凝土
 矩形板的极限承载力[J].武汉理工大学学报,2007,
 29(6):58-61

Experimental research on behavior of reinforced concrete slabs with different concrete cover thicknesses

WANG Qing-xiang^{*1}, SUN Xing-quan^{1,2}, WANG Gang¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 2. Architectural Design & Research Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the construction site, the concrete cover thickness of the negative reinforcements of concrete slab is usually bigger than design value, which will lower the maximum bearing capacity of slab (especially for the cantilever slab). An experimental research on reinforced concrete slabs (cantilever slabs and slabs whose two ends are both fixed) with different concrete cover thicknesses was designed. The effect on bearing capacity and service performance of the reinforced concrete slabs caused by the concrete cover thickness change was studied. The slabs whose two ends are both fixed were calculated on the basis of linear elastic theory and plastic moment redistribution theory respectively. The software ANSYS was utilized for FE simulation and the simulation results were compared with experimental results. The test results indicate that the cantilever slab thickness has obvious impact on its performance, and the extent of impact on the slab with two fixed ends is not as obvious as that on cantilever slab. Through the analyses of the test data, some conclusions are deduced, which will be helpful to the construction check and related theory research.

Key words: one-way reinforced concrete slabs; concrete cover thickness; moment redistribution; serviceability; ANSYS