

弹性地基上混凝土大板 承载力试验研究

孙 家 乐

(土木工程系)

摘 要

通过系统模拟试验揭示了在极限状态下混凝土大板承载力得以提高的主要原因——板内横推力产生与发展规律。给出横推力分布函数,为新的理论研究提供了坚实的试验基础。

An Experimental Study on the Ultimate Bearing Capacity of the Concrete Large Plate Resting on An Elastic Subgrade

Sun Jia-le

Abstract

Through a series of simulation tests, the main reason for the increased bearing capacity of the concrete large plate under ultimate state was brought to light - the occurrence and law of development of the transverse-push force, giving out the distribution function of the transversepush force, providing the new theory study with a strong experimental basis.

一、引 言

我国“工业建筑地面设计规范”TJ 37-79^[1]的试行,标志了工业建筑地面设计实践与理论研究取得了重大成果。其中所采用的承载力公式比国外规范及一九六五年国家规范在相同承载力条件下,地坪厚度减少19%,混凝土用量约减少16-22%,取得显著经济效益。但

对公式基本假设及地坪混凝土大板破坏机理,特别是对板内横推力的产生与分布规律,尚缺乏系统试验和理论上的深刻分析。因此,对横推力问题的研究已成为弹性地基上混凝土大板承载力理论的重要课题。本文从中心圆形加荷条件下系统的模拟试验中,揭示了横推力的存在、分布规律及产生的条件。证明横推力沿径、环向分布呈非线性。横推力存在与发展使板在外荷作用下的抵抗弯矩显著提高,但提高的幅度有赖于板的箍束作用和地基支承能力。进一步阐明了混凝土大板与地基相互作用机理,为理论研究提供了试验基础。

二、试验研究途径与方法综述

为揭示混凝土大板与地基相互作用机理,得到有关横推力产生与分布规律。模拟试验采用在板中心用小圆压盘加荷的方法。在相同的弹性地基条件下,用不同压盘直径及不同板平面尺寸的等厚度板做系统试验。混凝土板在满足 l (板边长)大于 $14L$ (L 为刚性半径)时,则可近似为无限大板分析。试验基本情况见表1。为获得板变形、地基反力、板内应变等实测数值,量测手段分别采用百分表测板面弯沉;土反力测定采用弦式压力盒;板底开裂用自制开裂计与声波测试仪测定;板内应变用自制微型传感器设置在板截面的不同高度上测得截面应变分布;通过微型传感器在平面上的布置来测定沿板径、环向应变值的变化。

表1 弹性地基上小圆加荷素混凝土板承载力试验基本数据一览表

板号	板尺寸 平面 cm	板厚 cm	混标 凝 土号	压半 盘径 cm	地形 基模 变量 kg/cm ²	环裂直径 cm			荷 载 kg			备 注
						长 向	短 向	平 均 值	初 荷 裂 载	破 坏 荷 载		
										环 裂	冲 切	
1	285×285	5	300	6	220	70	52	61	2042	5042		
2	285×285	5	350	6	220				2043		5294	
3	285×285	5	350	7.5	220	70	42	56	1900	5544		板底放塑料薄膜
4	285×285	5	250	7.5	220	55	50	53	1437.5	5350		板底放塑料薄膜
5	285×285	5	300	7.5	220	57	53	55	1950	5500		板底放塑料薄膜
6	285×285	5	300	7.5	220	54	49	52	1044~ 1550	6300		板底放塑料薄膜
7	285×285	5	250	12	220	80	76	78	1250~ 2250	6250		板底放塑料薄膜
8	285×285	5	300	15	220	84	84	84	1360~ 1860	6560		板底放塑料薄膜
9	100×100	5	300	7.5	220	15	15	15	1350	2850		板底放塑料薄膜
10	200×200	5	300	7.5	220	52	45	47	1000	2810		板底放塑料薄膜
11	150×150	5	300	7.5	220	41	33	37	900	2700		板底放塑料薄膜
12	285×285	5	300	7.5	220	13	10	11.5	700~ 1000	2800		板底放塑料薄膜
13	100×100	5	350	7.5	220	62	52	57	1550~ 2050	5650		板底放塑料薄膜
14	200×200	5	350	7.5	220	42	40	41	1230	3600		板底放塑料薄膜
19	285×285	5	300	7.5	220	49	46	48	1420	6000		

三、主要试验成果

1. 板的破坏特征

试验中主要用 $285 \times 285 \times 5^m$ 混凝土板，地基为均匀砂土。在压盘直径 $\phi \leq 15^m$ 时，板底初裂荷载为 $1000\text{kg} \sim 1500\text{kg}$ ，破坏特征是板中底部沿径向出现微细裂缝，并随荷载增加，由一条增至 $4 \sim 5$ 条裂缝，裂缝宽度也有发展，但没有开裂至板面，也没有延伸至板边，此时为初裂状态。按弹性理论分析，此时板已开裂，承载力应丧失。但实际上因板的整体连续性并未破坏，随荷载继续增加，板抵抗外荷的能力也在增加，直至板面出现弧形裂缝，并进一步发展连成环状裂缝（见图 1）。此时，板弯沉猛增，板底径向裂缝逐渐发展至板面，延伸到板边，使整块大板分裂成若干楔块，板中突然下陷，压盘冲切板，形成冲切裂缝。这时，板抵抗能力才丧失殆尽，破坏荷值约为 $5000\text{kg} \sim 6500\text{kg}$ 。

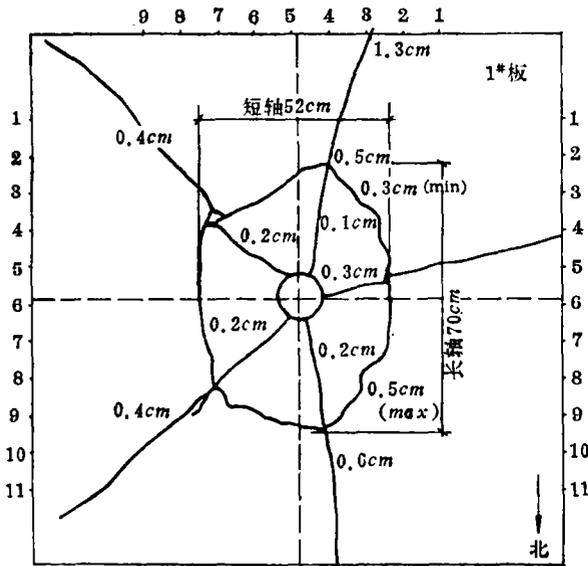


图 1 板面破坏特征图

2. 环裂半径 R_2 与压盘半径 R_1 及板尺寸的关系

环状裂缝的半径的大小是弹性地基上混凝土板抵抗外荷能力的综合反映。这与许多因素有密切关系。在板厚度、混凝土标号、地基模量相同的条件下，通过试验表明，环裂半径与压盘大小有如下规律

$$\frac{R_2}{L} = 1.0233 + 1.5822 \frac{R_1}{L} \quad (1)$$

式中： L —刚性半径

$$L = 0.33h^3 \sqrt{\frac{E_k}{E_0}};$$

h —混凝土板厚度； E_k —混凝土弹性模量； E_0 —地基变形模量。

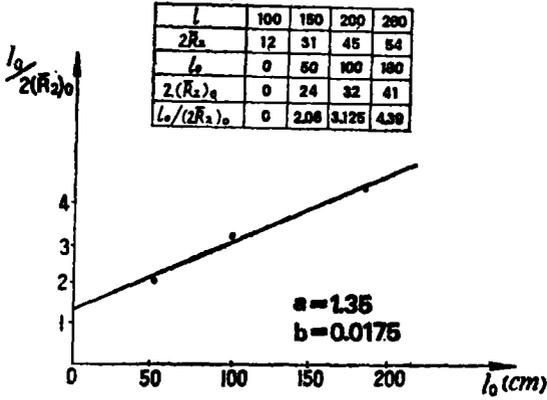
当压盘半径 $R_1 < 7.5\text{cm}$ 时，一般不会形成明显环裂，只是压盘下冲切破坏；当 $R_1 \geq 7.5\text{cm}$ 时，则有两种情况，板边长 $l < 150\text{cm}$ ，仅有局部环裂弧； $l \geq 150\text{cm}$ ，则发生明显的连续环形裂缝。板面尺寸效应对应于 R_2 为双曲线函数关系

$$\frac{l_0}{2R_2} = a + bl_0 \quad (2)$$

式中： $1/a$ —曲线初始斜率； $1/b$ —曲线渐近线值试验统计规律见图 2。

3. 破坏荷载 P_0

P_0 指发生环裂时的瞬时荷载 P_0 ，与板尺寸、混凝土强度、地基性质、压盘类型及尺寸有显著关系，见图 3、图 4。



$l_0 = l - 100\text{cm}$ $2(\bar{R}_2)_0 = 2\bar{R}_2 - 2R_2$ ($l = 100\text{cm}$)
 \bar{R}_2 : 为 R_2 的平均值

图2 $l_0/2(\bar{R}_2)_0$ 与 l_0 关系图

板底初裂荷载与 P_0 之比, 按实测统计约为 20%~35%, 此值随 R_1 及混凝土强度而变化。

4. 板面弯沉特征

板中加荷 P 与板中下沉量 S 基本上呈线性关系。 P 大于初裂荷载时, 曲线斜率略有增加, 一般在 P_0 范围内可视地基为弹性。

板与地基接触在一定范围外脱开, 存在一弯沉盆, 其半径为 R_3 , 与 R_1 和 R_2 关系为

$$R_3 = R_1 + 2.32R_2 \quad (3)$$

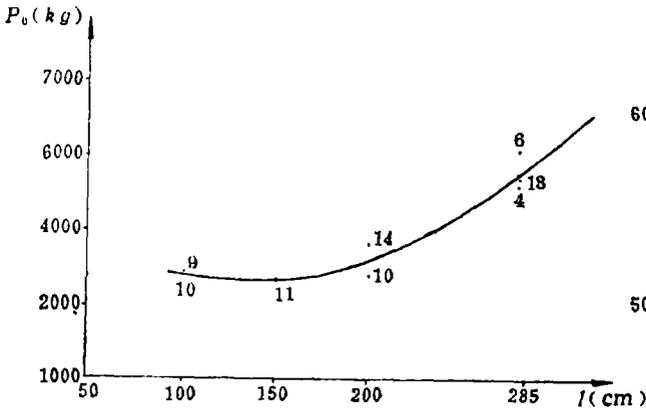


图3. 板尺寸与破坏荷载关系图 ($R_1 = 15\text{cm}$)

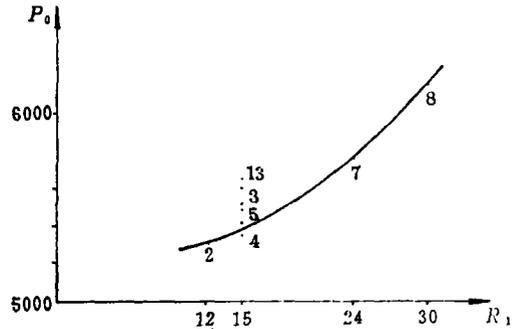


图4. 压盘半径与破坏荷载关系图

5. 板内应变变化规律

以 6# 板为例, 给出沿板厚度各截面的应变变化规律。图 5 表示出沿径、环向随荷载增加截面顶、底应变变化曲线图。基本规律为

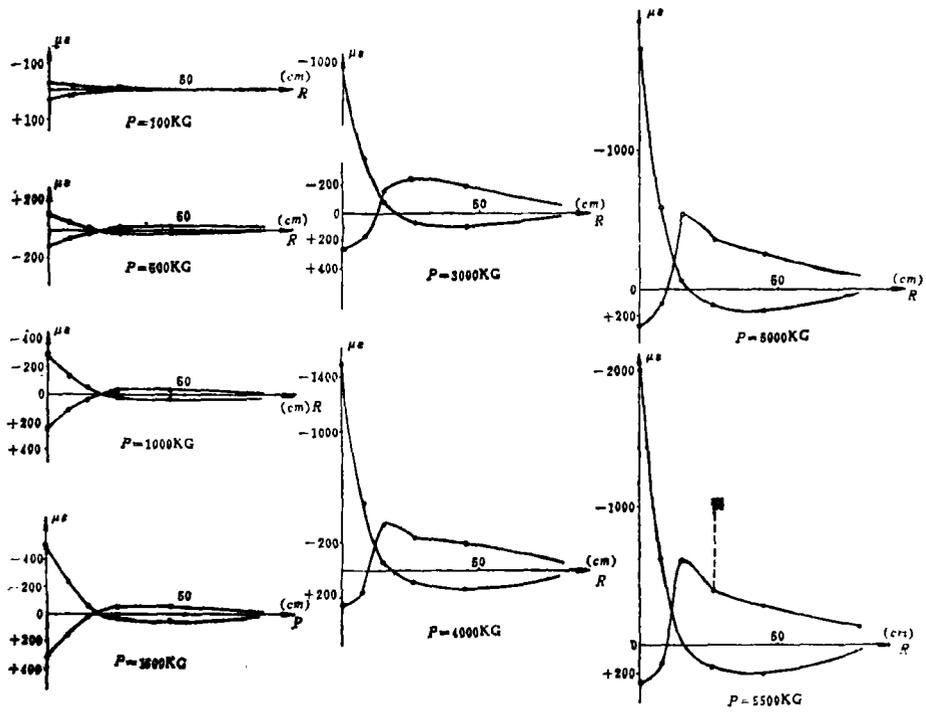
(1) 荷载 $P \leq 1000\text{kg}$ 时, 反映板处于弹性状态, 沿截面厚度拉、压正应变分布对称于中性轴, 呈线性分布。

(2) 荷载 P 等于或大于初裂荷载 (6# 板为 1044kg), 中性轴上移, 在板中区域, 压应变增加, 拉应变区分为: 拉裂区应变①、塑性拉应变区②及弹性拉应变区③ (见图 6)。拉裂区应变由于板底开裂而减少至零, 不再随荷载增加。塑性应变区应变值大于弹性极限拉应变值。

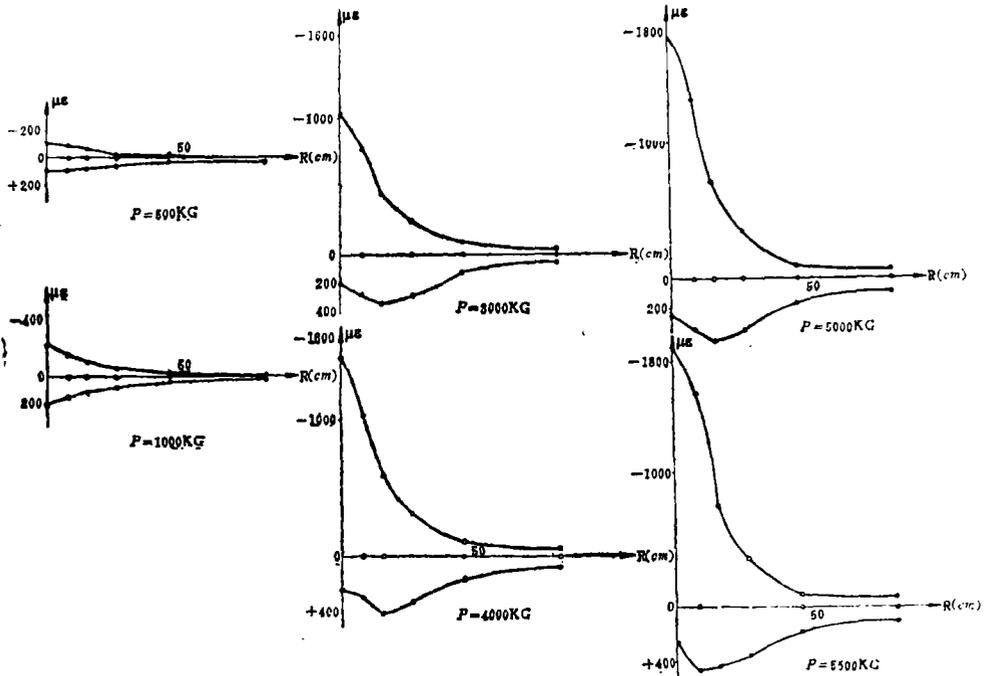
(3) 板初裂后, 截面顶、底应变沿径、环向分布的对称于中性轴的状况已消失, 愈接近破坏荷载愈显著。

(4) 径向与环向应变分布规律不同, 见图 5 a, b。

6. 地基反力分布规律



(a) 6# 板顶、底径向应变沿径向分布图



(b) 6# 板顶、底环向应变沿径向分布图

图5 板内应变图

据4*和19*板实测结果,图7表示出土反力呈倒锥形分布。由于小园面积加荷,使板中区土反力集中,向外很快衰减,环裂仍然存在土反力,但限于弯沉盆范围内。表2统计了环裂内土反力值占总土反力的百分比。

表2

板号	4*	19*	天坛1*	北京22*	天津1*	天津11*	平均值
%	77	78	83.8	84.8	77.5	88.5	81.6

注除:4*、19*外,为以前试验资料

四、在极限状态下板内应力分布规律

1. 弹性地基上板的极限状态

板的极限状态是考虑板与地基相互作用机理的不同工作阶段,板环裂前板面开始出现弧形塑性屈服带时的状态。此时荷载为极限荷载。考虑到实际加荷级差,以破坏荷载的前一级近似地做为极限荷载,据统计,285×285×5cm板的极限荷载与破坏荷载比为90%。

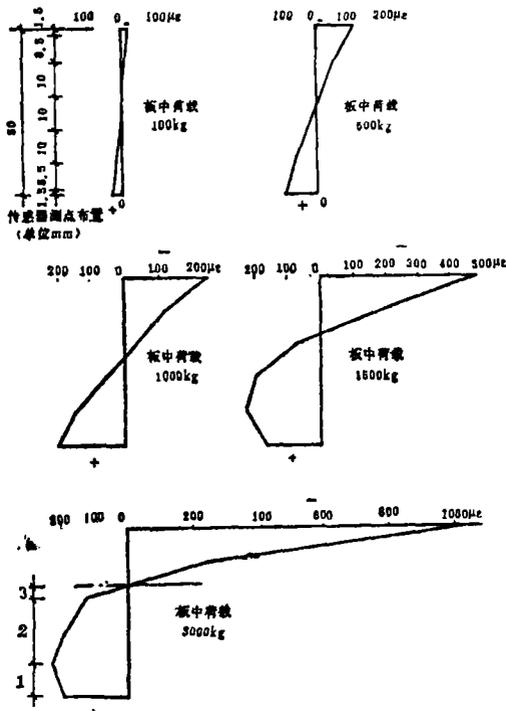


图6 6*平板环向弯矩应变图(57#传感器)

2. 板截面应力分布

由于板内埋设的微型传感器与混凝土能够同步工作,故可将测得的应变值按线性关系转换为应力值。在板进入塑性屈服状态时,板塑性屈服的最大拉应力等于混凝土极限抗拉强度 R_t 。而且,一般情况下,混凝土拉裂前瞬时最大拉应变 $\epsilon_{imax} = 2\epsilon_l$, ϵ_l 为弹性状态下混凝土极限拉应变,则有

$$R_t = E_c \frac{\epsilon_{imax}}{2} \quad (4)$$

3. 板截面轴向力N与弯矩M计算

由应变值转换为应力值后,将截面应力分布划分为八种类型,图8。用归一化方法计算。设轴向力系数

$$\bar{N} = \frac{N}{R_t b h}$$

$$\text{抵抗弯矩系数} \quad \bar{M} = \frac{M}{R_t b h^2}$$

$$b \text{ 为截面宽度, 则有 } \bar{N} = \frac{n x}{2 x h} - a + \frac{x}{h} \quad (5)$$

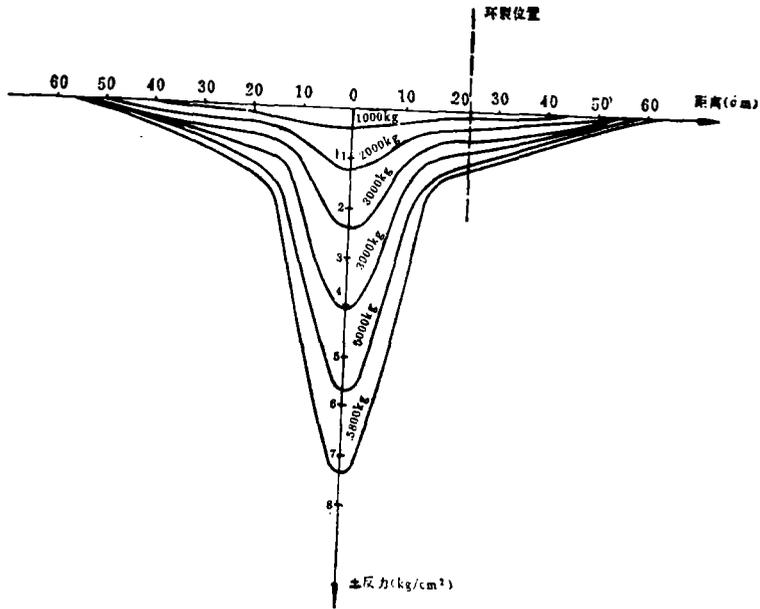
对新中性轴,截面抵抗弯矩为

$$\bar{M}_o = \frac{x}{h} \cdot \frac{n+2}{4} - \left(\frac{x}{h}\right)^2 \cdot \frac{n+3}{6} - \frac{1}{8} + \frac{1}{2h^2} \left(ah - \frac{h}{2}\right)^2 \quad (6)$$

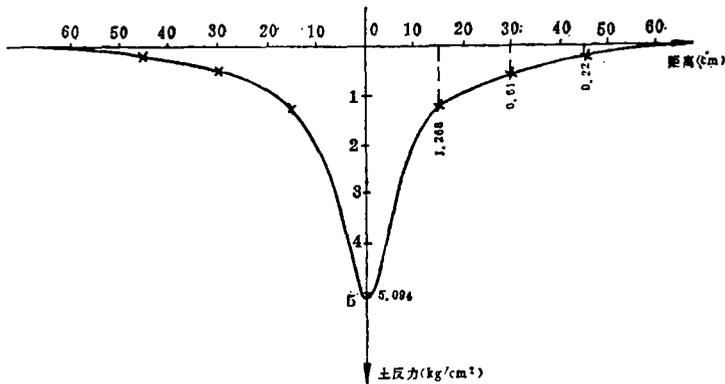
对原中性轴

$$\bar{M} = \bar{M}_0 + \bar{N} \left(\frac{h}{2} - x \right) \quad (7)$$

式中： $n = \frac{\sigma_p}{R_t}$ σ_p 、 x 、 a 见图8。(5)式实际上是假定截面上轴向应力均匀分布。



19# 板土反力分布图



19# 板土反力修正图 P = 5800kg

图7 土反力分布图

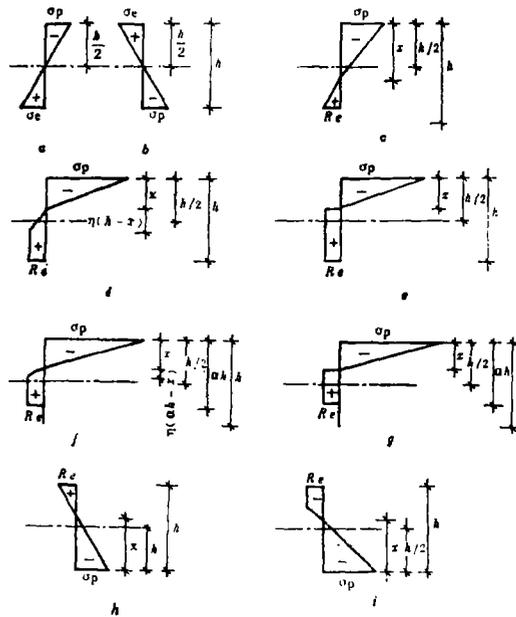


图8. 截面应力分布状态类型图

4. \bar{N}_r, \bar{M}_r 沿径向分布规律

根据 3*、4*、5*、6*、19* 板资料, 表 3、表 4 列出了板中及环裂处径向 \bar{N}_r 、 \bar{M}_r 和环向 \bar{N}_t 和 \bar{M}_t 值。

表 3

No.		3	4	5	6	19	平均值
$R \approx 0$	\bar{N}_r	2.171	2.256	2.457	2.379	2.5872	2.3700
	\bar{M}_r	0.8744	0.901	1.0876	0.9854	1.1620	1.002
$R \approx R_2$	\bar{N}_r	0.6345	0.3528	0.4883	0.7626	0.5810	0.5638
	\bar{M}_r	0.3542	0.2856	0.3444	0.3208	0.4143	0.3439

表 4

No.		3	4	5	6	19	平均值
$R \approx 0$	\bar{N}_t	3.275	2.630	2.783	2.458	2.00	2.6228
	\bar{M}_t	1.1117	1.0377	1.1887	1.0085	0.96	1.0613
$R \approx R_2$	\bar{N}_t	-0.022	0.1325	0.3296	0.0785	-0.0788	0.088
	\bar{M}_t	0.3817	0.3154	0.4137	0.3012	0.3616	0.3547

显然，板中径、环向极限抵抗弯矩与环裂处极限抵抗弯矩在数值上相差很大，呈现非均匀分布规律：

$$\frac{\overline{M}_{r0}}{\overline{M}_{rR2}} = 2.9136 \quad ; \quad \frac{\overline{M}_{t0}}{\overline{M}_{tR2}} = 2.9921$$

五、横推力及截面极限抵抗弯矩分析

从上述试验结果得知，当板中底部因拉应力作用进入屈服状态并开裂时，板内应力重分布。在板中区，中性轴上移，截面轴压力增加，说明在板截面上产生了横向推力，使板处于偏压状态。在板截面内，除存在对原中性轴的抵抗弯矩外，增加了由横推力引起的附加抵抗弯矩，从而提高了对外荷载的抵抗能力。

横推力可以认为是截面偏压应力的合力，其大小可由极限状态下截面应力分布分解求出。即分解为板底或板顶达到屈服时，临界应力分布和偏压应力分布。径向与环向偏压应力均为非线性分布状态，而不是均匀的和线性的。

根据上述分析，图 9(a)、图 10(a) 给出了偏压应力分布规律。

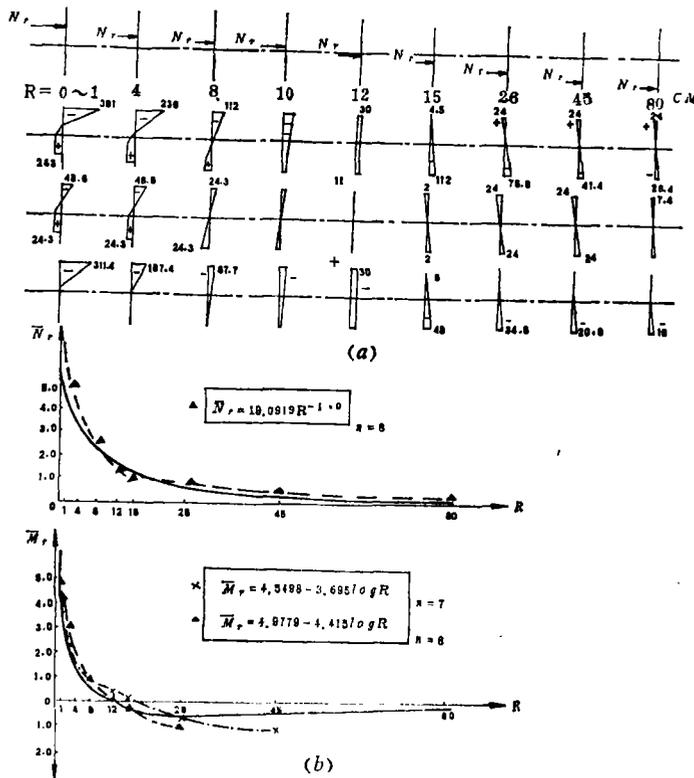


图9. 径向偏压应力分析

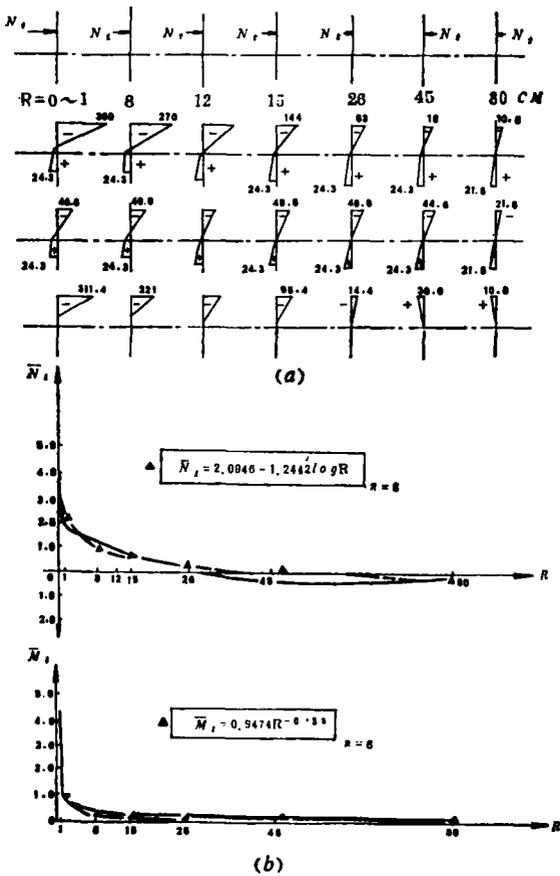


图10. 环向偏压应力分析

$$\bar{N}_r = 1.90919 R^{-1.0}; n(\text{样本数})=8; \text{相关系数 } r=0.996 r_{0.01}=0.834. \quad (8)$$

$$\bar{M}_r = 4.5498 - 3.695 \log R; n=7; r=0.914; r_{0.01}=0.874 \quad (9)$$

$$\bar{M}_t = 4.9779 - 4.415 \log R; n=6; r=0.951; r_{0.01}=0.917 \quad (10)$$

$$\bar{N}_t = 2.0946 - 1.2442 \log R; n=6; r=0.948; r_{0.01}=0.917 \quad (11)$$

$$\bar{M}_t = 0.9474 R^{-0.35}; n=6; r=0.925; r_{0.01}=0.917 \quad (12)$$

若以环向 \bar{M}_t 沿径向分布规律,在环裂范围内的总量为

$$L = \int_0^{R_2} 0.9474 R^{-0.35} dR = \frac{0.9474}{0.65} R_2^{0.65} \quad (13)$$

将6*板 $R_2=26\text{cm}$ 代入,则有 $L=12.116$ 。

从(8)~(12)式可知, \bar{N}_r 与 \bar{M}_r 为幂函数方程,而 \bar{N}_t 与 \bar{M}_t 则为对数函数方程。

径向偏压应力沿径向逐渐减少,由上三角形经均匀分布过渡到下三角形分布。而环向偏压应力沿径向逐渐减少,并在环裂外变为偏拉应力。径向偏压应力在环裂范围内存在一纯压应力分布截面。6*板情况如下表。

试验结果所揭示的上述横推力发生、发展与分布规律,否定了目前极限承载力理论中,关于极限抵抗弯矩沿径、环向均匀分布的假定。验证了弹性地基上混凝土大板相互作用机

就径向偏压应力而言,沿板径向随距离增加,由三角形分布过渡到倒梯形,均匀分布,再过渡到梯形,三角形分布,形成一压力拱带。在板中发生应力集中现象,但由于传感器所测得结果是一小范围的平均值,故不能真实反映出板中一点处的应力状况。

由于横推力的发展,增加了截面上的偏压应力,减少了拉应力。这与混凝土材料的较高抗压强度的发挥相适应,从而有效地提高了素混凝土板的极限承载力。板中底部在中心加荷条件下,出现屈服状态以至开裂,是横推力发生与发展的必要条件。而无限大板(或有限板有足够的边界约束)的箍束作用和地基土的支承作用,则是横推力发生、发展的充分条件。

以图9、图10的应力分析为基础,分析 \bar{M} 、 \bar{N} 分布规律。以6*板为例,用回归分析方法,得出 \bar{M} 、 \bar{N} 沿径向分布曲线图9(b)、图10(b)。曲线方程为

表 5

P kg	1000	1500	3000	4000	5000	5500
R cm	21	18	14	12	12	12
σ_p kg/cm	0	4	20	25	27	30

理, 分析了中横推力作用的重要性。

六、结 论

根据板内应变分布试验结果, 提出了分析横推力的方法, 得出横推力分布规律, 为建立新的素混凝土大板承载力理论提供了可靠的试验基础。

应该指出, 横推力的发生与发展依赖于板中屈服与开裂的发生与发展, 以及地基土支承能力和板体的箍束作用。所以, 横推力作用的发挥是有条件的。必须充分重视上述因素的影响, 才能有效地提高混凝土大板承载能力和提高经济效益。

× × ×

参加研究工作有叶于政、徐贺文、刘之珩、黄玉田、吴观今、陈建平、韩翠华、钟霖珍、谭春萼、李平治、李建志及第一机械工业部芦煌, 研究工作得到第一机械工业部第二设计的协作。

参 考 文 献

- [1] “工业建筑地面设计规范” TJ37—79 (试行) 中国建筑工业出版社 1979年。