

文章编号:1671-6833(2004) 01-0022-06

厚承台受力机理研究

郭宏磊^{1,2}, 丁大钧³, 王元汉¹

(1. 华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 江汉大学机电与建工学院, 湖北 武汉 430056; 3. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 为揭示厚承台的传力机理和破坏形式,通过对 4 个 1:5 比例的六桩厚承台的模型试验研究与三维非线性有限元 ADINA 的后处理研究,指出中国建筑桩基技术规范 JGJ 94-94 与美国钢筋砼房屋建筑规范 ACI 318-02 规范中,承台以弯曲强度进行配筋计算的设计方法之不足,揭示出厚承台的破坏模式是冲切破坏,传力机理是以带有主要单向压应力的砼区域作斜压杆,桩顶区域的纵筋作拉杆的空间桁架。

关键词: 承台; 冲切破坏; 空间桁架; 传力机理

中图分类号: TU 473.1 **文献标识码:** A

0 引言

当前,高层建筑中的承台与桩筏基础中筏板的厚度往往在 1.5 m 以上,个别的竟达 5 m 之厚,使得其冲跨比(冲跨比为柱边至桩中心的距离与承台有效高度的比值)一般均<1,即所谓文献中习称的厚承台,造成它们破坏的形式基本上是冲切破坏,且冲切破坏时,各桩几乎都落在 45°冲切破坏锥体内.对于这类承台的设计,一些国家的规范,如中国建筑桩基技术规范 JGJ 94-94^[1](下称“中国规范”)、美国规范 ACI 318-02^[2](下称“美国规范”)与苏联规范 СНИП 2.03.01-84^[3]等,不尽适用.有关此类承台的研究也较少有文献报道.为此,笔者对其进行了试验与非线性有限元后处理的研究.

1 试验设计

试件分为 4 块,第 1 块 S1,见图 1(c),依“中国规范”设计,也符合“美国规范”的设计思想,即:底部纵筋布成均匀网格状;第 2 块 S2,见图 1(d),纵筋数量同于 S1,但集中布置于桩顶区域;第 3 块 S3,见图 1(e)、(f),除底部纵筋完全同于第 2 块外,承台腹部还配有三层水平钢筋网;第 4 块 S4 见图 1(g),承台中心部位的腹部区域布有钢桁架,水平钢筋网点焊在底层钢桁架上,总的用钢重

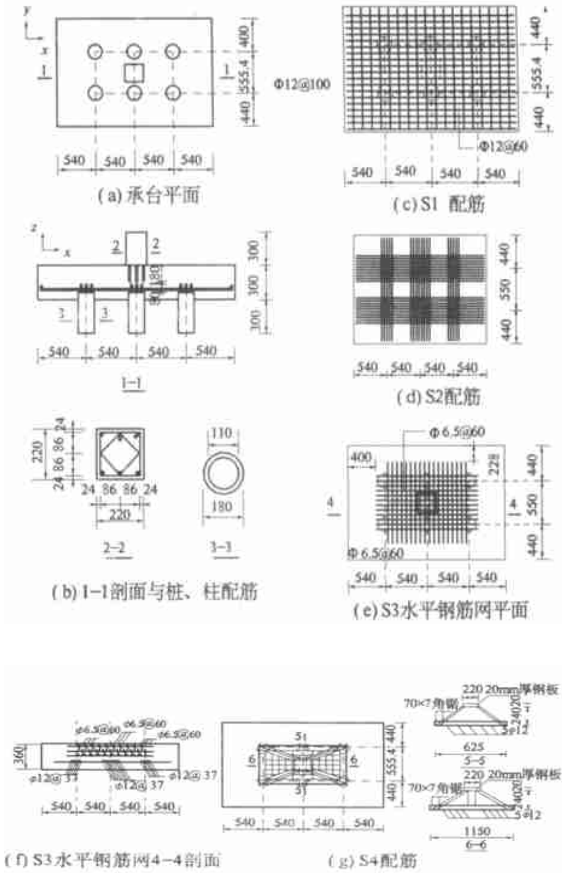


图 1 六桩厚承台的试件设计

Fig. 1 Test specimen design of thick pile caps with six piles

收稿日期:2003-09-06;修订日期:2003-12-20

基金项目:江苏省科技厅应用基础基金资助项目(BJ 97024);湖北省自然科学基金资助项目(2003ABB 025)

作者简介:郭宏磊(1964-),男,辽宁省大连市人,高级工程师,博士,主要从事结构工程方面的研究.

量与S1S2接近.4块试件的尺寸保持一致,其具体数值可见于图 1(a)、(b),它由有代表性的实际承台尺寸,以 1:5 比例缩小而成.砼设计强度等级,对承台为C20,其实测数值见表 1 所列.为保证桩与柱不先于承台冲切破坏之前发生非正常性破坏,桩与柱的强度等级采用C60 砼.承台中的钢筋采用HPB235 级钢.S4 中的钢桁架采用角钢L70×7,其实测材性见表 2. 试验中承台的 6 个桩下放有压力传感器,传感器支承在可调支座上.加荷等级为 50~100kN.

表 1 承台混凝土的材料性能

Tab.1 Material property of pile caps concrete MPa			
承台	弹性模量	立方体强度	抗拉强度
S1	2.56×10 ⁴	19.7	1.59
S2	2.52×10 ⁴	20.4	1.53
S3	2.42×10 ⁴	20.2	1.56

表 2 承台钢筋的材料性能

Tab.1 Material property of pile caps steel MPa			
类别	弹性模量	屈服应力	极限应力
Φ6.5	2.16×10 ⁵	349.5	515
Φ12	1.93×10 ⁵	318.6	460
L70×7	1.99×10 ⁵	357.1	451

表 3 试验结果汇总

承台		柱荷载 /kN	中心点挠度 /mm	柱荷分配		最大的钢筋应变 $\mu\epsilon$		破坏类型
				两边桩/%	其它桩/%	两边桩间	其它桩间	
开裂	S1	500	1.04	45.8	54.2	376	223	
	S2	500	0.79	44.6	55.4	126	95	
	S3	500	0.77	52.7	47.3			
	S4	600	0.78	52.1	47.9			
破坏	S1	1 250	5.70	57.7	42.3	2 980	1 502	冲切
	S2	1 500	7.80	41.4	58.6	12 687	1 388	冲切
	S3	1 900	8.40	61.5	38.5			冲切
	S4	1 700	9.20	59.8	40.2			弯冲



(a)S2 的冲切锥体



(b)S3 的冲切锥体

图 2 冲切锥体

Fig.2 Punching cone

2 试验结果与分析

(1) 从表 3 所示可知.S1S2S3 发生的均为冲切破坏.图 2 是S2S3 破坏后,沿裂缝处灌入红墨水,再沿墨迹逐层剥离砼所得的内部破坏形态,从中可以显见S2S3 的冲切破坏形态.由表 4 可知,对S1S2,它们的承载力不仅明显高于“中国规范”与“美国规范”的预测值,而且这两者在配筋量相同,而只是布筋方式不同的情况下,承载力也不相同,纵筋布于桩顶区域的S2 承载力是均匀布筋的S1 的 1.2 倍.

据此可知:①“中国规范”与“美国规范”的承台配筋以弯曲强度考虑,配成的是均匀网格状,并且认为纵筋对冲切承载力没有影响,这一认识与实际不符.此外,“中国规范”中的冲切公式的理论基础是认为承台冲切破坏时,存在柱头下陷的错动性机构,然而在试验中也没有发现这种现象.因此,这一认识也不符合厚承台的冲切实际.②纵筋集中于桩顶区域的S2 比均匀布筋的S1 承载力高,此非偶然,同样的现象也见诸于文献[4,5]中,这表明厚承台的拉杆作用明显,拱作用显著,从而初步得出其受力体系为空间桁架.

表 4 “中国规范”与“美国规范”的理论预测值与试验结果的对比

Tab.4 The contrast on test results and theoretical predictive value of ‘China code’ and ‘American code’

承台	“中国规范”预测值 /kN	“美国规范”预测值 /kN	试验结果 /kN	试验值/ “中国规范”预测值	试验值/ “美国规范”预测值
S1	757.6	508.3	1 250	1.65	2.46
S2	731.7	517.2	1 500	2.05	2.90

说明:此处“美国规范”的预测值是用其中的CRSI手册建议的公式计算的.

(2) 由图 3、图 4 可知,临近破坏时,不论 S1 是位于角桩、边桩、角桩之间的长向纵筋,还是 S2 中两边桩之间的纵筋,其最大应力点并不在两桩之间的中心部位,而在桩头处.到破坏时,桩头处的应力已达屈服,而两桩之间的中心部位的应力仍未屈服,这也与“中国规范”与“美国规范”不符.在两国规范中,将承台视为厚板,配筋是以板的理论,用塑性铰线法来配置,这样,最大的应力点及最早屈服的地方应位于板底中心和角、边桩之间,而这是与本次试验的结论所不相符的.除此之外,试件破坏时,纵筋上的最小应力值约占最大应力值的 75%.值得注意的是,在文献 [9] 中,承台 C 与承台 D 的最小冲跨比均为 0.582,也为厚承台范围,需要说明的是,在它们破坏时,无论是位于桩顶区域附近的短向纵筋还是长向纵筋,其最小应力值也约占最大应力值的 75%,与本次试验的结论一致.至此,连同前述的最大应力点始终在桩头部这一事实,可以认为位于桩顶区域附近的纵筋是一个拉杆.至于拉杆的范围,不同的拉杆区域情况不同,其中最小范围约为 2 倍桩径.

(3) 按弹性理论,柱头处的荷载在柱头与板连接处集中后向桩基传递,这其中必经过由扩散到再度集中的过程,主压应力流应如同灯笼状,这也就是所谓的斜压杆.如果此种说法成立,那么斜

压杆的起始破坏形式必然是劈裂破坏.

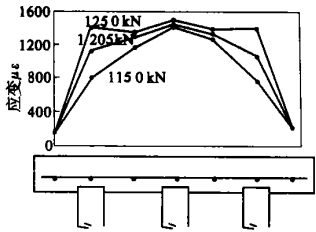


图 3 S1 的长向拉杆应变

Fig.3 S1 tension tie strain in long ri m direction

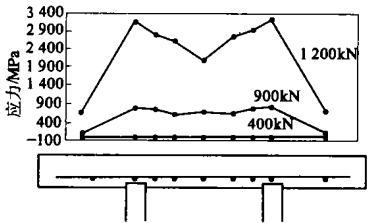
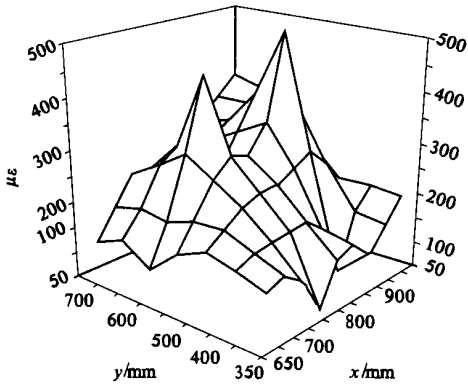


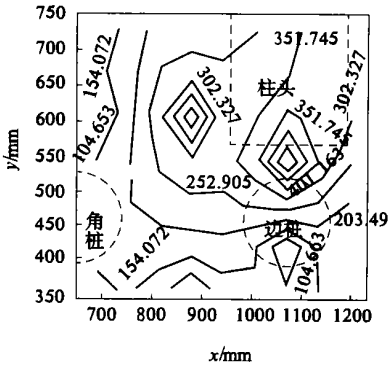
图 4 S2 的边桩短边向拉杆应力

Fig.4 S2 tension tie stress in short ri m direction of edge pile

图 5 显示,至 1 400 kN 时,S3 的第二层水平钢筋网上有两个应变峰值,其位置恰在角、边桩斜压杆的中腹部处;同时由图 6 知,此时位于角桩斜压杆中腹部位置的钢筋网处的应变要比其上、下钢筋网上的相应点的应变大.



(a) 短向应变 $\mu\epsilon$



(b) 短向应变 $\mu\epsilon$ 等值线

图 5 1 400 kN 时,S3 第二层钢筋网 1/4 区域短向应变

Fig.5 Short directional strain in 1/4 district of S3 second layer mesh reinforcement while 1 400 kN

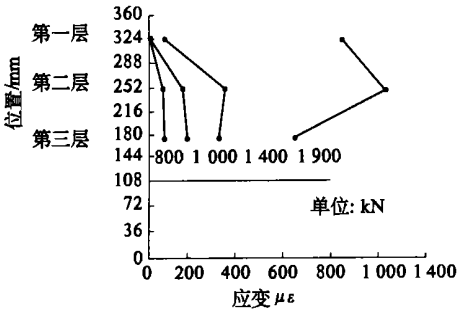


图 6 角桩斜压杆中腹部区域附近钢筋网上的应变

Fig. 6 Mesh reinforcement strain nearby middle district of corner pile strut

1 900 kN 时, 钢筋网上同样的应变分布也见诸于边桩斜压杆中部, 此可见于图 7, 这一切表明斜压杆的起始破坏为劈裂破坏.

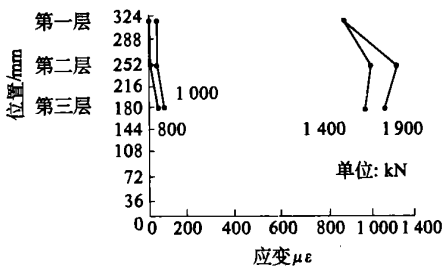


图 7 边桩斜压杆中腹部区域附近钢筋网上的应变

Fig. 7 Mesh reinforcement strain nearby middle district of corner pile strut

如表 5 所示, 为更深入地揭示斜压杆的破坏机理, 单独构造了与实际斜压杆相似的应力场. 它们为 7 组, 每组 3 个, 高度为 35 cm, 两头垂直受荷面直径恒为 9 cm, 外径为变化的圆柱体试块.

表 5 带小垫块的圆柱体试验结果

Tab. 5 Cylindric test results with small cushion block

直径 /mm	$\frac{D}{D_0}$	f_{ce}/MPa			f_{ce}/f_c			f_{ce}/f_c 的平均值
		试件 1	试件 2	试件 3	试件 1	试件 2	试件 3	
90	1.0	19.03	18.10	18.20	0.914	0.968	0.987	0.956
135	1.5	24.68	24.05	24.01	1.185	1.286	1.302	1.258
180	2.0	39.45	36.94	33.32	1.895	1.975	1.807	1.892
225	2.5	43.23	42.13	41.18	2.076	2.253	2.233	2.187
270	3.0	57.69	53.29	42.44	2.771	2.850	2.302	2.641
315	3.5	68.38	63.98	63.57	3.284	3.421	3.447	3.384
360	4.0	76.71	71.36	63.79	3.684	3.816	3.427	3.642

说明: D 是试件的外径, D_0 是小垫块的直径.

试验发现, 除了外径最小的发生的是轴压破坏之外, 其余凡外径比受荷面大的试件, 发生的均为劈裂破坏. 其中 $D/D_0=1.5\sim 2$ 的试件, 在承压板下发现了砼碎片. 此非偶然, 笔者在 S2S3 的斜压杆与纵筋相交处的上方, 即斜压杆的下端面处也发现了碎状砼.

承受台的破坏机理如图 8 所示. 从理论上讲, 沿斜压杆轴线, 在其中部是纵向受压、横向受拉, 此为劈裂区(Ⅱ区), 在它的两端, 承受着带有剪应力的三向压应力, 此为剪压区(Ⅰ、Ⅲ区). 在三区中, Ⅱ区较大, Ⅰ、Ⅲ区较小, 破坏应起自于Ⅱ区的劈裂, 而后纵向裂缝向两端发展, 此时, 如果 D/D_0 不是很大, 则会造成Ⅰ、Ⅲ区的剪压破坏, 此情形有些类似于深梁的斜压破坏. 以此理论联系前述试验现象, 可以得出: 厚承台中的斜压杆破坏是起自于劈裂, 终止于剪压的斜压破坏.

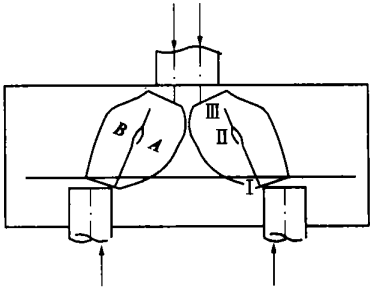


图 8 厚承台的破坏机理

Fig. 8 Failure mechanism of thick pile caps

至于斜压杆强度 f_{ce} , 由 $D/D_0=1.5\sim 2$ 的 f_{ce} 可推算出, 当砼强度等级约为 C30 时, 其值应在大于 f_c 小于 $1.9f_c$ 的范围内.

(4) 本次试验中, 纵筋只是伸过桩中心线一定距离后, 再在末端加了构造弯钩, 但从图 3、图 4 中可见, 锚固区的应力并不大, 这可从斜压杆对锚固区有着侧面限制作用来得到解释. 因此, 空间桁

架机理中的拉杆锚固虽有别于板钢筋,但也不必采用特别措施,本次试验的锚固方式是可行的.

(5) “中国规范”中,承台要进行抗弯、抗剪、抗冲切甚至局部承压的设计,但对配筋,却仍按双向板的均匀网络状配筋来布置.无独有偶,在“美国规范”中,承台虽分抗弯、抗剪两个方面进行设计,但对配筋也按普通受弯构件来计算纵筋用量.可见,两国规范实际上是认为,承台破坏以受弯为主.如果此观点成立,那么,平截面假定就成立;板顶在其长、短边向的应力也应该一致,如图 9、图 10 所示,这些认识也与本次试验结果不符.实际上,综合上述分析,已经可以得出:厚承台的冲跨比往往 <1 ,犹如小剪跨下的深梁发生的是剪切破坏一样,做为它的三维情况下的厚承台发生的将是冲切破坏.

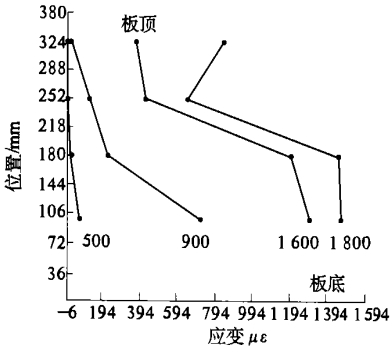


图 9 承台S3内柱角竖直线上短边方向应变

Fig. 9 Short directional strain along line on end in the column corner of S3 pile cap

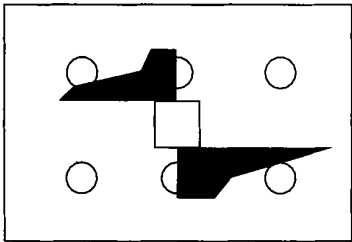


图 10 1100 kN 时承台S1板顶双向应变

Fig. 10 Two directional strain on the top of S1 pile cap while 1100 kN

(6) 由计算可知,弹性阶段的边桩、角桩反力分别占柱荷的 25%和 12.5%,对比表 3 可知,无论是开裂后,还是破坏时,桩反力重分布基本上没超过 5%.由此可知,对厚承台进行设计时,桩反力的比例可以采用弹性阶段的数值.

(7) 作为桩基承台空间桁架理论的一个运用,笔者以角钢压杆代替了砼斜压杆,以角钢拉杆代替了纵筋拉杆,从而以真实桁架代替了原本是

应力流的桁架,这就是承台S4.

由表 3 并结合前述试验过程的描述知,S4 在与S1S2的配筋重量相同的情况下,其开裂荷载、破坏荷载和延性均超过后者,并且它的延性在配筋量比S3少的情况下,也优于S3,成为 4 块板中的最优者.此外,它的破坏属性也由前三块的脆性破坏转变为延性破坏.这一切均表明,S4 的配筋方式顺应了厚承台的空间桁架传力机理,从而再次表明桩基厚承台的受力体系就是空间桁架.承台冲切破坏的空间桁架传力机理如图 11 所示.

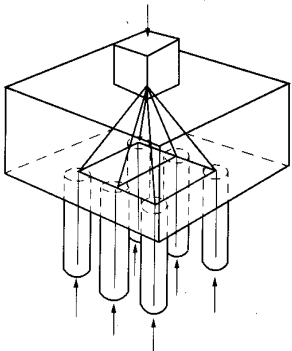


图 11 承台冲切破坏的空间桁架传力机理

Fig. 11 Load transfer mechanics punching failure of pile caps

3 非线性有限元后处理的研究

采用国际上在处理砼非线性问题上卓有成效的大型有限元程序ADINA.取文献[7]中所提供的冲切模型PC 453 进行了全过程有限元分析.见图 12,由于对称性,取试验模型的 1/4 作为计算模型,其中大部分为 8 结点 3-D 等参元,少量的三棱柱退化元作为过渡元.柱头施荷面采用竖向位移均等的主从约束加上均布荷载来模拟实际施荷时的应力与位移边界条件.采用CEB-FIP 90 样板规范中的OTTOSEN 准则做为强度准则.

由图 13(a) 可见,承台底部砼大部分已开裂,从而显示出较强的拉杆作用;两端面处的剪压破坏也现端倪;尤其是图 13(b) 已清楚地表明,斜压杆中部发生了劈裂破坏.

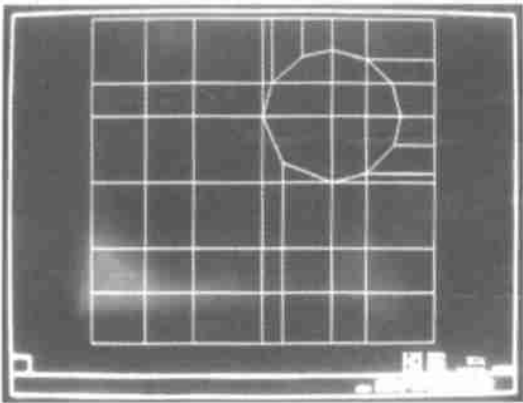
4 结论

- (1) 厚承台的破坏形态为冲切破坏;
- (2) 桩基承台冲切破坏的受力体系为带有主要单向压应力的砼区域作斜压杆,桩顶区域的纵筋作拉杆的空间桁架;
- (3) 承台冲切破坏或为斜压杆的斜压破坏,

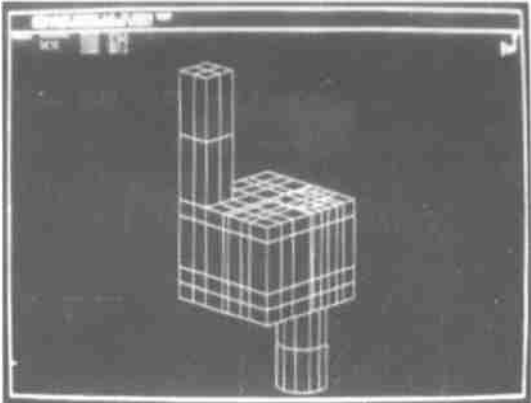
或为拉杆的屈服破坏；

(4) 桩基承台空间桁架的拉杆范围可统一取为 2 倍桩径；

(5) 对厚承台进行设计时，桩反力的比例可以采用弹性阶段的数值。



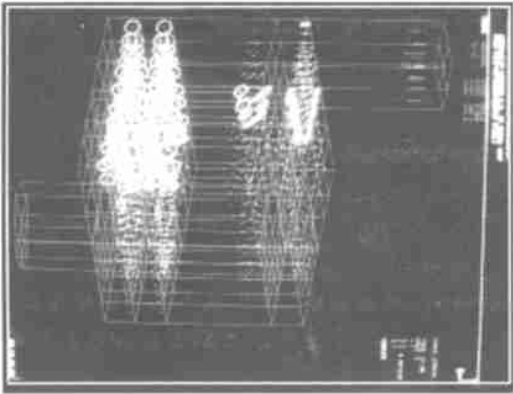
(a) 平面网络



(b) 立体网络

图 12 取试验模型的 1/4 作计算模型

Fig. 12 Take 1/4 test model as calculative model



(a) 破坏整体



(b) 斜压杆中部的劈裂破坏

图 13 300 kN 时的承台破坏形态

Fig. 13 Failure status of pile cap while 300 kN

参考文献：

[1] JGJ 94—94, 建筑桩基技术规范[S] .
[2] American country technology standard ACI 318—02. Build - ing code requirement for reinforced concrete[S] .
[3] CH112.03.01—84, 钢筋混凝土结构设计规范[S] .
[4] SUNG Gui hong .Strut and tie models and failure mecha - nism for bar development in tension compression nodal zone[J] .ACI Structural Journal , 2000,(Jan Feb) : 111~

121.
[5] YOUNG Mook Yun .Nonlinear strut tie model approach for structural concrete[J] .ACI Structural Journal , 2000,(July - August) : 581~590.
[6] PERRY A .Strut and tie models for the design of pile caps :An experi mental study[J] .ACI Structural Journal , 1990,(Jan . Feb) : 81~90.
[7] 庄冠民 . 桩基承台三维非线性有限元分析[D] . 上 海: 同济大学, 1988. 53~55.

(下转第 44 页)

[7] 刘方斌. 甲醇工业前途无量 [N] . 中国化工报, 2003—01—13(4) .

[8] 王乐意. 燃料甲醇推广应用蓄势待发 [N] . 中国化工报, 2003—03—27(4) .

[9] 赵加积. 山西甲醇汽车大面积推广难在何处 [N] . 中国化工报, 2003—09—15(2) .

[10] 杨岩辉. 二甲醚产业阳光灿烂 [N] . 中国化工报, 2003—01—28(3) .

[11] 孙俊波. 替代石油的新能源——二甲醚清洁燃料* 待字闺中 [N] . 中国化工报, 2002—01—31(4) .

Discussion on the Adjust ment of Energy Structure with the Emphasis
on the Development of Methanol and Ether Fuels

LI Yong -tao

(Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002,China)

Abstract : Energy plays a fundamental role in the development of national economy .This paper discusses China ’s energy policy and proposes that China ’s energy should be mainly self reliant and develop the clean energy out of coal and natural gas improve the energy structure by further processing the energy resources ,which should constitute a strategy for improving China ’s economic development .

Key words :improvement ;energy structure ;development ;methanol and ether fuel further processing

(上接第 27 页)

Study on Load Mechanism of Thick Pile Caps

GUO Hong -lei ^{1,2}, DING Da -jun ³, WANG Yuan -han ¹

(1.College of Civil Engineering & Mechanics ,Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074,China ; 2.College of Mechanism Power &Civil Engineering Jiangnan University , Wuhan 430056,China ;3.College of Civil Engineering ,Southeast University , Nanjing 210096,China)

Abstract :In order to reveal load mechanism and failure mode of thick pile caps ,by means of the test of 1/4scale models of thick pile caps with six piles and post handling study of 3dimensional non -linear finite element ADINA , this paper points out the shortage , which is that the design of pile caps is carried out by flexural strength in Chinese technical code for building pile foundations JGJ 94—94and American reinforcement concrete building construction code ACI 318—02, promulgates that the failure mode of thick pile caps is punching failure and load transfer mechanism is the strut and tie ,which is that zones of concrete with primarily unidirectional compressive stresses are modeled by compress struts ,while tension ties are used to model longitudinal reinforcement over pile .

Key words : pile cap ; punching failure ; strut -and -tie load ; transfer mechanism