

高强混凝土结构的特性分析

陆 龙 文

(建 工 系)

摘 要

本文从高强混凝土结构的优越性和高强混凝土制作的可能性出发,论述高强混凝土制作方法和在结构上应用的工况。通过一系列试验,对高强混凝土结构的特性进行分析:从收缩与徐变性质分析高强混凝土的收缩工况、徐变工况;从短期荷载和长期荷载,分别研究了短期结构工况和长期结构工况,分析了裂缝、挠度、应力—应变和极限强度等方面变化情况。

一、高强混凝土等级

高强混凝土常被认为是一种比较新的材料,但究竟什么样的混凝土强度算是高强混凝土,理解并不一致。我们知道,混凝土强度是随着水泥生产、混合物研究和材料工艺、施工工艺的不断发展而不断提高的。早期混凝土的强度只用到100号(立方抗压强度 100kg/cm^2),随后逐步用到200号、300号、400号、以至500号、600号(TJ10—74规范使用到600号)。近年来在美国用于现场浇注的钢筋混凝土结构和预应力混凝土构件的强度最高已达1600号,在美国一般钢筋混凝土结构的房屋使用混凝土强度常在400~800号。我们国内用于房屋结构上的混凝土强度仍处于较低系列,一般使用为150~400号,个别构件如预应力混凝土轨枕用到600号,国防上有些特殊构件,近来用到1000号,一般很少用高强混凝土。当然,随着科学的发展,用于房屋结构或其他结构上的混凝土强度还会提高,那么当今混凝土强度是怎样分等级的呢?美国ACI(美国混凝土协会)建议:混凝土轴压强度 $<6000\text{lb/in}^2$ (相当于我国混凝土立方抗压强度 $<500\text{kg/cm}^2$)为一般强度; $6000\sim12000\text{lb/in}^2$ 为较高强度(约为我国500~1000号); $>12000\text{lb/in}^2$ 为高强度(约为我国 >1000 号)。而我们国内没有明确分类,一般认为400号以上就是高强混凝土了。

本文于1988年6月15日收到

二、使用高强混凝土结构的优越性

在生产实际条件许可情况下，而且经实践证明是安全、经济的，那么理所当然，在设计中就会采用较高的混凝土强度，因为混凝土强度的提高有下列优点：

1、在相同荷载下，与低强混凝土结构比较，可以减小构件的截面尺寸。这样就可减轻结构自重。对钢筋混凝土结构来说，自重大一直是一个主要缺陷，因此能减轻一些结构自重是非常有利的；

2、对荷载大的高层民用房屋结构和多层工业厂房结构，使用高强钢筋混凝土结构有可能胜于钢结构，不致因用低强钢筋混凝土形成肥梁胖柱，大大减少房屋有效使用面积和有效使用空间；

3、在框架柱或排架柱中，用高强混凝土较之低强有显著效益。如建筑上对柱子截面尺寸有一定限制，需要钢筋加强时，用高强混凝土就能明显地减少钢筋用量。据统计，一般每增加50号混凝土强度就可减少钢筋用量1%；

4、在予应力钢筋混凝土构件中，使用高强混凝土能更好地发挥予应力作用，因为在传递所需予应力时，承载能力的增加是和混凝土强度的增加成正比的；

5、对于主要是受压的拱和壳体结构等，使用高强混凝土就能更好地发挥它的结构性能，提高强度与重量比，增加承载能力。实际上，高强混凝土还能创造结构的新型式提供有利条件。

三、高强混凝土制作的可能性

混凝土的强度决定于最初组成材料的性质、它们的配合比以及施工方法，浇注、捣实和养护等。增加强度的可能性在于提高材料本身强度或通过制作具有专门特性混合物的先进技术等都可以达到产生高强混凝土的效果。

1、使用高强度的水泥

如我们在美国堪萨斯州立大学（Kansas State University）作试验使用细度高的火山灰波特兰水泥、早强水泥、高铝水泥等高强度水泥来制作高强度混凝土。火山灰波特兰水泥具有每公斤700~900m²表面积，早强水泥具有每公斤450m²表面积。高铝水泥具有每公斤不少于225m²表面积。它们各有特点，火山灰波特兰水泥具有化学成份稳定和较低吸水性，而早强水泥若与炉渣粗骨料配制成，在24小时具有12%孔隙率和较低密度；高铝水泥则含有约38.5%石灰，10.7%氧化铁粉和40%铝，它与碎花岗石和天然砂合成后很硬，密实和很少吸水，具有3.25至3.50比重，有很强的化学亲合力。目前，我国一般能生产的水泥标号最高为600号，有的水泥厂正试验生产800号水泥。

2、选择合适的骨料和配合比

骨料的强度对混凝土强度影响甚大，而同样的材料若选择不同的配合比，也会产生不同的混凝土强度，这需要大量的试验进行分析。骨料的选择，特别是粗骨料最影响强度，经试验粗骨料宜用碎石，要求石质强度较高（一般在1000kg/cm²左右），用花岗岩、绿辉岩或石灰岩；细骨料宜用中粗砂，要求比重在2.50以上。下面列出使用前述三种水泥结合选用的

骨料经大量配合比试验, 综合得出较有代表性的混凝土强度和弹性性质, 如表1和表2所示:

表 1 抗压强度性能

混合物 编 号	配合比 水泥 : 石 : 砂	水灰比 w/c	龄期(天)抗压强度 kg/cm ²				
			1	3	7	28	90
细度高的波特兰水泥与花岗石骨料							
A ₁	1 : 1.40 : 0.60	0.03	785	—	816	898	—
A ₂	1 : 1.87 : 0.63	0.35	632	—	714	826	—
⋮			至 816	⋮	至 867	至 908	⋮ —
A ₃	1 : 2.25 : 0.75	0.30	775	—	816	877	—
早强水泥与磨细炉渣粗骨料							
B ₁	1 : 2.13 : 1.48	0.58	245	428	500	541	561
B ₂	1 : 1.23 : 0.58	0.37	449	541	621	673	694

表 2 强度和弹性性能

性 能	龄 期 (天) kg/cm ²					
	1	3	7	28	360	640
细度高的波特兰水泥与花岗石骨料*						
抗压强度	439	—	663	816	—	847
抗弯强度	60	—	61	77	—	82
抗裂强度	41	—	44	48	—	51
弹性模量	3.57×10^5	—	3.98×10^5	4.28×10^5	—	4.49×10^5
细度高的波特兰水泥与轻骨料+						
抗压强度	388	510	571	643	632	—
抗弯强度	49	51	49	55	56	—
抗裂强度	34	40	36	37	33	—

[注] *配合比: 1 (水泥) : 1.875 (石) : 0.625 (砂) : 0.34 (水)
(水泥 631kg/m³, 水 44kg/m³)

+配合比: 1 : 1.12 : 0.88 : 0.44 (细骨料中67%细砂)

表3 强度与弹性性能

性 能	龄 期 (天) kg/cm^2			
	1	3	7	28
早强水泥与磨碎炉渣粗骨料*				
抗压强度	394	503	—	664
抗弯强度	31	45	—	49
弹性模量	1.81×10^5	2.05×10^5	—	2.07×10^5
高铝水泥与花岗石料 ⁺				
抗压强度 ^a ^b	857	898	949	1040
	949	1000	1051	1122
抗弯强度	—	90	—	102
抗裂强度	—	55	—	57
弹性模量	—	4.39×10^5	—	4.90×10^5

〔注〕 *配合比：520（水泥）：696（石）：440（砂）：190（火）按 kg/m^3 计

养护：三天浇水+室内环境控制

⁺配合比：1：3：2：0.43 （细骨料中30%细砂）

a——热、湿养护三天+室内环境控制

b——湿养护三天+室内环境控制

3、使用合适的掺加剂

如果在传统的混凝土配合料中，加入掺加剂，可显著提高混凝土强度，计有：

1) 减水剂

如使用国产NF或MF高效能减水剂（1%~1.5%）或是正常凝结度的减水剂（将提供强度的增长而不改变硬化速度）。高效减水剂提供高强度性能较显著，尤其是早期（24小时），由于掺加外加剂后，坍落度损失可能很快出现，故高效减水剂应在施工现场加入。

2) 聚合物浸渍剂

在普通混凝土中浸入液态的有机单体，如苯乙烯、丙烯腈等，这些浸渍剂使混凝土内部孔隙聚合成固体物质。由于聚合物浸渍作用，使混凝土强度显著提高，并且因不透水性好，还有很好抗冻结、抗腐蚀性能。

3) 缓凝剂

由于高强混凝土配合比设计中，有普通混凝土中不常用的高水泥含量，加入缓凝剂在控制早期硬化中有好处，并为浇注过程提供较大灵活性。

4) 复合外加剂

将高效减水剂与正常凝结速度的减水剂或缓凝剂的复合物作为掺加剂，可得到优良的性能而成本较低。这种复合外加剂使用正日益增多。

5) 超细矿物外加剂

主要有粉煤灰组成的超细矿物外加剂,加入后可显著提高混凝土强度。磨细的炉渣或矿渣水泥,由于其化学成份主要由硅酸铝钙和铁的氧化物组成,故可提高混凝土强度。此外,还有硅尘以及含有硅尘的外加剂在国外也已用于生产高强混凝土,它具有高的抗压强度和低的渗透性。

4、使用先进的施工技术

施工技术水平与混凝土的质量关系至为密切。一般情况下,用传统材料,通过不同施工方法,在下列四个方面来生产高强混凝土:①提高密度性;②提高混合物粘结性;③降低孔隙率;④通过外部作用如热或压力,提高混合物聚合力。在施工工艺上考虑使用先进施工设备和技术如:搅拌用强制式混凝土搅拌机,施工中严格控制水灰比,混凝土振捣用高频振动棒,振点加密,成型后用蒸汽养护或高压釜养护以及使用真空作业法,排出混凝土中多余水份等。这些对提高混凝土强度都有效果。

四、高强混凝土在结构上应用的工况

高强混凝土在结构上应用,虽然有很多优点,如强度高,截面尺寸设计可小,在最大应力时的应变值较之低强混凝土稍高,有利于节约钢筋,它的徐变值较小,徐变系数仅为低强混凝土的30%,有利于使用预应力构件等。但是任何事物都有两重性,在我们从承载能力极限强度来考虑时,同时得考虑刚度、变形和裂缝是否允许?因此也不是混凝土标号越高越好、越高越省。若增加混凝土强度,使截面模量降低时,就有可能挠度和裂缝宽度成为危险因素。对于柱子要保证弹性稳定,也必须有一定的最小尺寸。另外,若大量地降低配筋率,就要考虑收缩、徐变问题以及预应力结构中荷载从混凝土至钢筋的传递问题,用较高工作应力导致更大的预应力损失问题等。而且从应力—应变曲线来看(见图1),混凝土标号越高,其应力—应变曲线就越陡,说明变脆,延性降低,抗冲击差。

总之,使用高强混凝土也有其不利一面,这些实际存在问题,就需要对高强混凝土结构的工况进行大量的试验,累积大量试验资料,以此来对高强混凝土结构设计提出可靠依据,解决设计和施工中所存在的问题。

在美国堪萨斯州立大学进行研究时,曾与Swartz教授和Nikaeen、Refai等博士研究生进行了有关高强混凝土结构工况部分试验和数据收集,现分述于下:

1、收缩与徐变性质

在钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计,收缩和徐变两者是很重要的。我们在不同养护条件下,进行了 $100 \times 100 \times 500$ mm棱柱体的收缩试验。徐变试验是在控制温度 $15.7 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 和相对湿度 $50 \pm 2\%$ 条件下进行。试件 $100 \times 100 \times 500$ mm承受各种不同荷载和应力—强度比

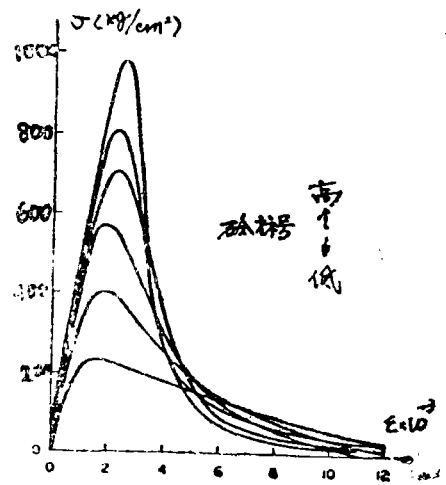


图1 不同标号混凝土应力—应变情况

来读数。收缩的测量通常在浇注后约 6~10 小时进行。有些试件事先埋放了测试应变片, 这样在浇注后, 即可读出内部收缩情况的读数。

1) 高强混凝土的收缩工况, 有代表性数据如表 4 中所列。

表 4 高强混凝土的收缩工况

水泥种类	700 天后的总收缩 $\times 10^{-6}$	总收缩的百分率			
		1 天	7 天	28 天	1 年
高铝水泥	385~455*	33~43	50~70	60~80	90
细度高的波特兰水泥 *	665~715*	15	25~50	60~65	95
细度高的波特兰水泥 ⁺	700~800 ⁺	4~10	20~30	40~55	65~75
早强水泥* *	400~500* *	5~10	20~30	50~60	—

[注] *——花岗石骨料; +——轻骨料 (在 500 天收缩)

* *——磨细炉渣粗骨料 (在 100 天收缩)

从收缩试验中可知高铝水泥制的混凝土显示收缩发展很快, 而细度高的波特兰水泥和早强水泥显示收缩发生较慢。总的来讲, 高强混凝土的早期收缩是远远高于一般低强混凝土出现的收缩, 从而在设计中要注意收缩产生的裂缝和予应力损失。

2) 高强混凝土的徐变工况

高强混凝土的徐变发展测试数据和徐变系数值如表 5 和表 6 所示。

表 5 高强混凝土徐变发展

水泥种类	骨 料	对 650 天的徐变应变百分率				
		1 天	7 天	28 天	6 月	1 年
高铝水泥*	花岗石	10~17	19~35	28~44	45~56	65~70
细度高的波特兰水泥	花岗石	14~22	28~40	50~60	80~93	90~95
细度高的波特兰水泥 ⁺	膨胀岩	13~17	28~36	44~54	—	90~95

[注] * 热、湿养护; + 在 500 天的徐变应变百分率

表 6 徐变系数

水泥种类	骨 料	承载期 (天)	应力/强度	徐变应变 $\times 10^{-6}$ m/m	徐变系数
高铝水泥*	花岗石	1~28	33~47	1475~3090	2.2~3.0
细度高的波特兰水泥	花岗石	1~28	40~54	1670~2280	2.1~2.9
细度高的波特兰水泥 ⁺	膨胀岩	1~28	38~56	1600~2600	1.3~2.5

[注] * 热、湿养护; + 500 天膨胀岩的徐变应变值

试验中显示,不管混凝土类型、承载龄期、应力水平或骨料类型,水泥迅速水化特性致使总的徐变的大部分在早期完成。承载以后,在一开始24小时完成650天(或500天)徐变的10~20%,在第一个月内完成最终的徐变的30~60%,在一年后完成最终徐变的90%以上。但不管最初变形率多高,徐变系数在早期强度发展时是低的,图2说明徐变和弹性应变关系。

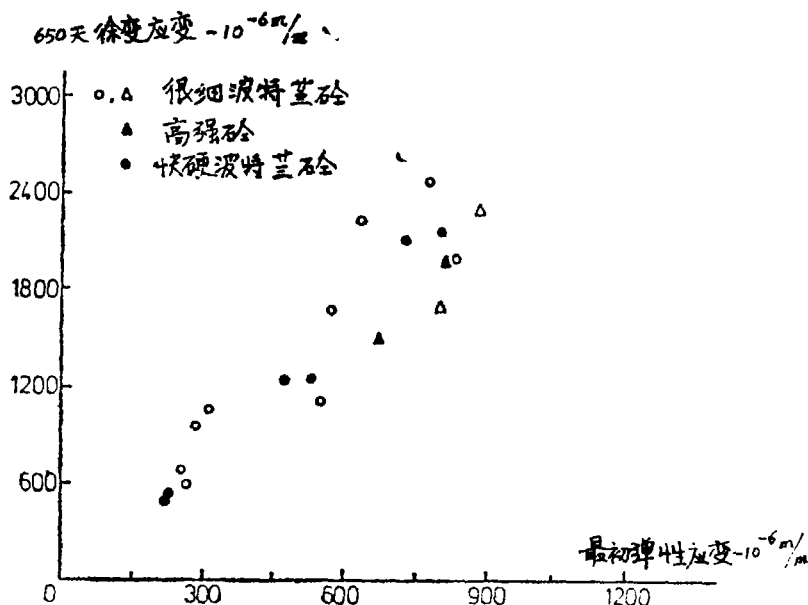


图2 徐变与弹性应变关系

这证实了高强度对长期工作的高强混凝土构件的结构工况是有利的。

另外用花岗石和膨胀岩骨料与细度高的波特兰水泥制成混凝土在未承载时显示很好弹性恢复,但徐变恢复甚少,在一年后仅占约12~15%。

2、短期结构工况

由于在小尺寸的标准试件中取得高强度及其它特性,并不能完全反映用这种混凝土制成的构件的结构工况。为了清楚高强混凝土在构件中裂缝、挠度和极限强度等方面情况,需要进行一系列结构构件工况试验,以供设计中参考。如作高强混凝土梁和柱的试验。如图3所示Π形梁和图4所示矩形截面平梁。(图见8、9页)

所以要设计成Π形试验梁,是由于KSU试验机只能承压3000千磅(相当于136t)。P₁用液压操纵加载最多到136t, P₂用手动液压千斤顶加载直至破坏,有10只应变片,由应变仪进行量测。加载至破坏约13分钟。试验程序是:先逐级加载P₁至最大值,然后保持此值,加载P₂,并检测在“受拉面”上的两个应变片,到读至0(平均值),保持荷载P₂,读出其他应变片读数,最后至破坏。

矩形截面试验平梁在位移控制试验机上简支试验,两个集中荷载作用在 $\frac{1}{3}$ 跨处通过分配梁加载,荷载是逐级时加,每增加一次量测应变和裂缝成长情况直至破坏。自动记录数据系统读出电阻应变仪中数据。

对于短期荷载的结构工况，用10根钢筋混凝土梁进行试验，使用了三种级别的钢筋：
 ①高强热轧变形钢筋，屈服强度为 $4406 \sim 4437 \text{ kg/cm}^2$ ；②高强热处理钢筋，屈服强度为 7211 kg/cm^2 ；③三线的钢绞线，屈服强度 8782 kg/cm^2 。在这些梁中，钢筋工作应力在变形钢筋中设计取值为 2346 kg/cm^2 ，对其它两种钢筋设计取值为 3519 kg/cm^2 。这些梁在发生挠曲破坏时，抗剪钢筋是足够的。试验说明，所有梁在破坏前有充分预兆，显示了足够的延性和相当大的挠曲，且荷载卸下后，挠曲恢复很好，甚至在广泛裂缝以后，总计还有70~85%可恢复。当然挠曲和梁的承载能力取决于钢筋的屈服强度（如图5所示）。从耐久性来看，使用荷载下裂缝宽度也是在允许裂缝宽度范围内。高强混凝土在最大荷载情况下，挠曲是显示了足够的应变能力。破坏前测得的最大压应变从 2.60×10^{-6} 至 35×10^{-6} 不等，这是因为破坏时，应变增加非常快，说明高强混凝土破坏通常趋向较剧烈。如果使用含有纤维材料的高强混凝土，对阻止崩裂会有显著成效。（图见10页）

3、长期荷载结构工况

对于高强混凝土结构设计，在长期持续荷载作用下的结构工况尤为重要，因为：第一，混凝土强度的增加，常常不是与它的弹性模量成比例增加；第二，如果充分利用高强度的优越性，那么就有较高工作应力，这将导致较大应变和较大挠度，裂缝也更严重。对于长期荷载结构工况，在堪萨州立大学试验了四根钢筋混凝土梁。试验梁的力学性能、挠曲情况和徐变效应数据，如下列表7、表8、表9、表10所示。

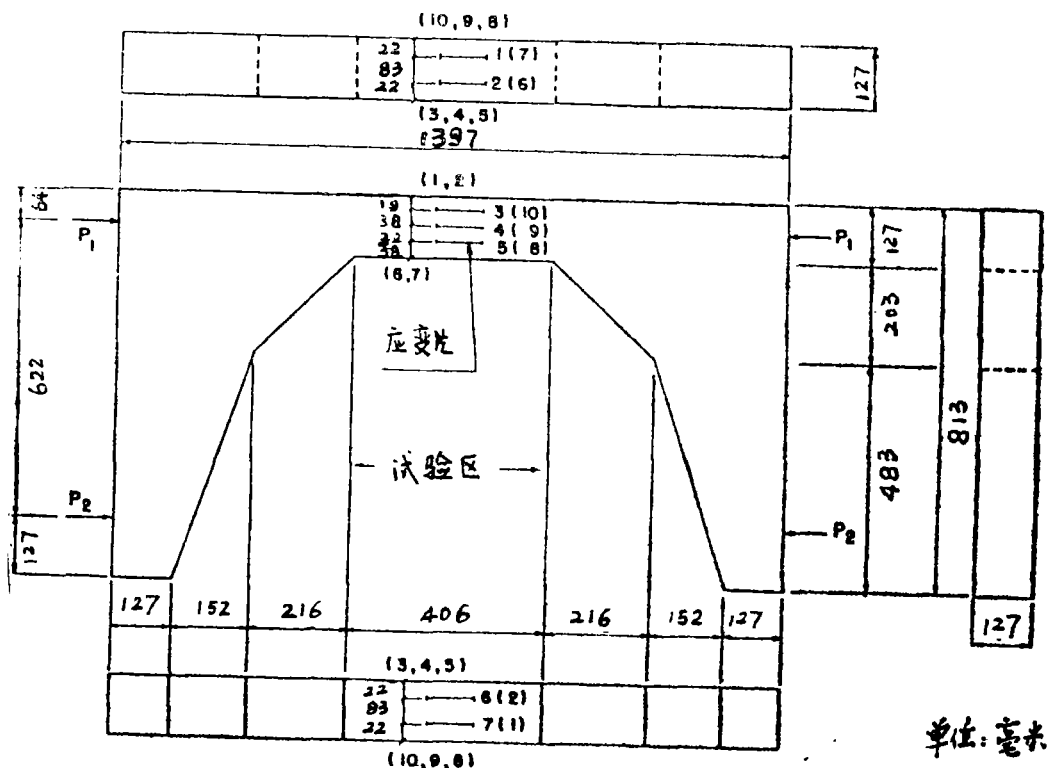


图3 II形试验梁

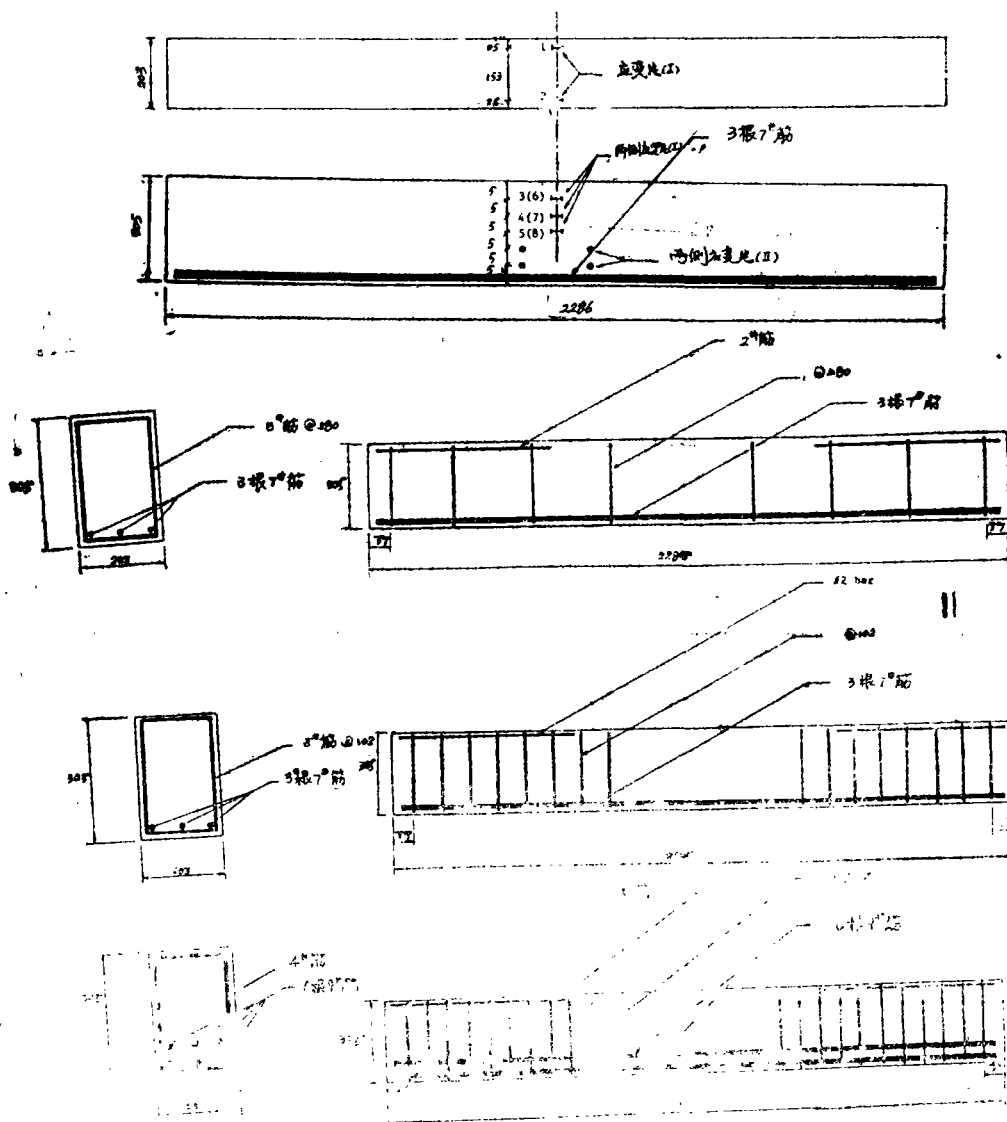


图4 矩形截面试验平梁

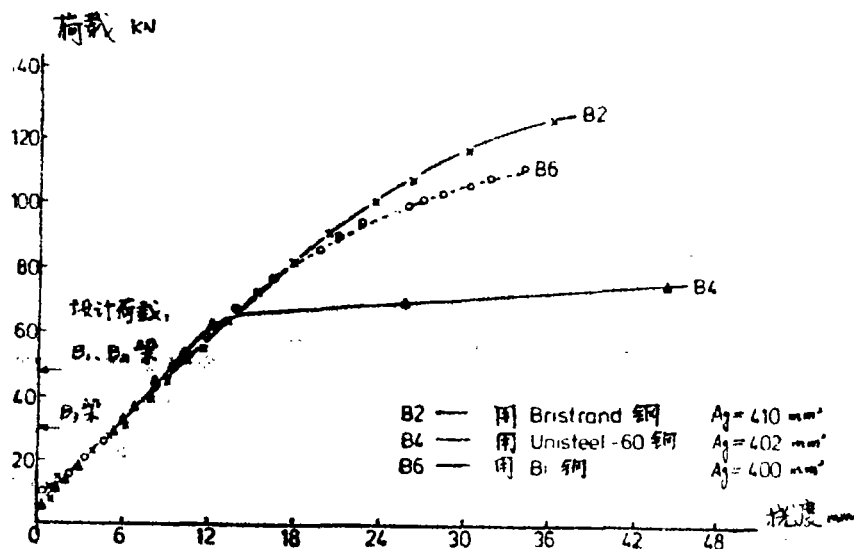


图5 不同钢筋品种的荷载挠度曲线

表7 长期荷载下试验梁的力学性能

梁号	混凝土混合料	钢 筋		梁		承载 龄期 (天)	立方抗 压强度 kg/cm^2	弹 性 模 量 kg/cm^2	设计 力矩 $\text{t}\cdot\text{m}$	工作 力矩 $\text{t}\cdot\text{m}$	比例 系数
		型号	面积 (mm^2)	宽度 mm	有效高 mm						
L ₁	高铝水泥		615	127	151	19	1007	5.09×10^5	2.48	2.48	1.00
L ₂	高铝水泥		1140	127	149	19	1035	5.08×10^5	2.48	2.51	1.01
L ₃	细度高的波特兰水泥		615	127	151	32	882	4.0×10^5	2.03	1.86	0.92
L ₄	细度高的波特兰水泥		1140	127	149	32	914	4.17×10^5	1.97	1.89	0.96

表8 长期荷载下的挠曲情况

梁号	测 得 挠 度		δ_r/δ_i	跨度/挠度 (δ_r)	1 年的平 均值 δ 计算*	δ/δ_r	最大挠度/弹性挠度		
	即时 δ_i mm	1年 δ_r mm					方法1 ⁺	方法2 ^{**}	方法3 ⁺⁺
L ₁	8.70	18.36	2.10	125	13.77	0.75	2.32	2.92	2.79
L ₂	6.29	11.43	1.82	200	9.80	0.86	2.50	2.83	2.80
L ₃	6.00	13.84	2.30	165	12.42	0.90	2.82	2.88	3.21
L ₄	5.13	10.62	2.07	215	9.10	0.86	2.53	2.44	2.64

[注] 挠度计算根据: ①曲率* ②双曲线模式⁺ ③英国标准规程** ④美国混凝土协会规程⁺⁺

表9 长期荷载下的徐变效应

梁号	一年测试数据		最大徐变数据		中和轴高度增加 %
	徐变应变 $\times 10^{-6} \text{m/m}$	徐变系数	徐变应变 $\times 10^{-6} \text{m/m}$	徐变系数	
L ₁	1623	1.54	2773	2.63	37
L ₂	1397	1.62	3417	3.97	34
L ₃	1275	1.67	1937	2.55	37
L ₄	1115	1.79	1730	2.79	37

表10 长期荷载下的裂缝情况

梁号	承 载 龄 期	最大裂缝宽度 $\times 10^{-2} \text{mm}$			
		即 瞬 测		定 时 测	
		钢 筋 面	混凝土受拉面	钢 筋 面	混凝土受拉面
L ₁	435	15	38	15	40
L ₂	435	7.6	18	9	25
L ₃	405	7.6	18	15	33
L ₄	405	5.4	8	7.6	7.6

从以上几个表中所列数据,可以看出:高强混凝土结构在长期荷载下,挠度是能满足要求的,最大的挠度是最初挠度2.3至3.2倍,若采取使用受压钢筋或其它措施还能改善这种情况。徐变效应中指出一年的徐变系数在1.54至1.79,最大徐变系数在2.55至3.97,这些值与一般混凝土差不多,甚至还低些,若有可靠箍筋和直通构件的纵向受力钢筋保证,徐变变形就可减小。徐变变形造成一个影响是梁中较高应力的松弛,从试验中知道高度增加了中和轴 $35 \pm 2\%$,这种变化,降低了混凝土应力,增加了钢筋应力。所有梁的试验,其裂缝宽度是随着龄期增加。梁中裂缝宽度超过0.3mm主要是用Bristand钢的情况,说明钢种与裂缝宽度有关。

从长期荷载下结构工况来看,高强混凝土仅在高工作应力可以被接受情况下才经济,而高工作应力是直接影响长期挠度、徐变和裂缝的。从试验梁的破坏情况来看,还是延性破坏,只是较普通钢筋混凝土构件剧烈些,破坏也快些。另外,在较高工作应力下,挠度和裂缝对使用上要求严些时,可能有些问题,要注意核算和采取相应措施。总之,用高强混凝土结构是完全可能的,考虑合适,是可以成为安全、经济、适用的很好结构设计。

参 考 文 献

- 〔1〕 高强混凝土科技发展现状——美国钢筋混凝土协会委员会报告 (1984)
- 〔2〕 高强混凝土的配制及工艺, 朱金铨、吴佩刚等, 清华大学 (1981)
- 〔3〕 High-Strength Concrete in Seattle. By Kingsley D. Drake (1985)
- 〔4〕 Structural Bending Properties of Higher Strength Concrete.
By S.E. Swartz et al (1986)
- 〔5〕 High-Strength Concrete—Material Properties and Structural Behavior.
By R.N. Swamy (1986)

科 技 信 息

※ 我校四星电子厂研制的被动红外防盗防火报警器已通过国家级检测。

※ 由我校谢木雯、彭三明同志设计的3GF柴油发电机组在新建县望城农机厂研制成功。经有关部门的测试和使用, 该机组的各项性能均达到国家标准。1989年3月26日省机械厅组织有关专家对机组进行验收鉴定, 一致认为该发电机组结构新颖、美观, 性能好, 使用范围广, 是解决当前能源紧缺的好产品。

※ 最近, 国家专利局又授予我校三项专利:

- (1) 第14459号实用新型专利: 由李枝同志设计的菱形电分段绝缘器。
- (2) 第18704号实用新型专利: 由林二明、谢晓芳同志设计的袖珍方波信号发生器。
- (3) 第19695号实用新型专利: 由李枝同志设计的断续导流板分相绝缘器。

※ 本期刊载的《机车车辆企业经济承包责任制研究》一文是铁道部工业普查领导小组以(87)工查字2号文件下达给我校的科研课题。

我校经济系副主任刘桂馨同志带领该系教师林斌、王火保二同志前往几个机车车辆工厂及铁道有关业务局进行了深入的调查研究, 收集了大量的资料, 进行了认真的分析研究。在此基础上, 根据经济体制改革的需要, 结合我国机车车辆工业企业的实际情况, 对企业承包责任制的原则内容和办法进行了科学探讨, 提出了合理可行的方案, 并建立了独立完整的经济计算体系。

鉴定认为, 该研究针对机辆工业一些特点提出的近、远期两个承包方案, 既合理又可行, 很有参考价值。