

国外专题情报资料

7302总003

膨胀水泥混凝土的研究与应用之一

江西省水泥制品科学研究所

1973年12月

目 录

一、概 论

1. 膨胀水泥混凝土的现状.....(1)
2. 膨胀水泥.....(23)
3. 膨胀水泥.....(31)
4. 生成钙矾石时产生膨胀的机理.....(39)

二、制造工艺

5. 自应力值大的自应力水泥的制造方法.....(41)
6. C S A膨胀水泥的制备过程及其特性.....(45)

三、性能研究

7. 膨胀水泥混凝土性能的研究.....(49)
8. 膨胀水泥混凝土的徐变性能.....(55)
9. 养护对膨胀水泥混凝土的膨胀及力学性能的影响.....(60)
10. 钢筋与受限制膨胀混凝土握裹力的研究.....(69)
11. 用自应力消除钢筋混凝土的收缩裂缝.....(77)
12. 钢筋在自应力水泥、砂浆和混凝土中的锈蚀.....(80)
13. 掺明矾石的自应力水泥.....(82)

四、在制管中的应用

14. 自应力混凝土管.....(84)
15. 自应力混凝土管的制作方法.....(89)
16. 双层高强自应力钢筋混凝土管.....(92)
17. 膨胀混凝土管的试验研究.....(95)
18. 承插式自应力钢筋混凝土管的制造方法.....(102)
19. 膨胀水泥外加剂在混凝土制品中的应用.....(104)

膨胀水泥混凝土的现状

美国混凝土协会 223 委员会报告

一、前言

1. 历史背景

膨胀水泥混凝土的出现,可以说起源于对水泥中钙矾石的研究。1890年,康德洛〔1〕报导了铝酸三钙与硫酸钙的反应生成物。1892年,米哈依里斯〔2〕提出,钙矾石是造成波特兰水泥混凝土在含硫酸盐介质中产生破坏性膨胀的原因。

亨利·洛塞尔是最早认识到钙矾石具有消除收缩和产生预应力的能力的人之一〔3〕。从三十年代中期开始,洛塞尔连续进行了二十多年的研究。他所提出的水泥是由波特兰水泥、一种膨胀组份和高炉矿渣组成的。膨胀剂是由矾土、石膏和石堇磨成生料,再将混合物煅烧成熟料而制得的。掺加矿渣是为了控制膨胀率。此后,拉富马〔4〕对洛塞尔提出的水泥组份进行了鉴定,并认为该水泥是由硫酸钙、铝酸钙和 γ -硅酸二钙所组成的。拉富马认为,洛塞尔制造膨胀组份的方法并不重要,因为在波特兰水泥、无水石膏和石膏混合物水化过程中就能生成钙矾石。

苏联在膨胀水泥方面的研究工作,是沿着制造自应力水泥和修补、防水用膨胀水泥这样两个方向进行的。米哈依洛夫〔5〕研究的修补用水泥,是由高铝水泥、石膏和水化铝酸四钙共同粉磨制得的。水化铝酸四钙即人造单斜水铝钙石,是由高铝水泥和加速生

成钙矾石的石灰混合物经过水化、干燥和粉磨制得的。自应力水泥是由波特兰水泥、高铝水泥和石膏按一定的配比共同粉磨制成的混合物。控制石膏含量和养护过程就可得到所需的膨胀率。

美国加利福尼亚大学克莱因〔6〕等人最近的研究,是根据矾土、白垩和石膏混合物在 $2,400^{\circ}\text{F}$ 下进行热处理会生成稳定的无水硫铝酸钙化合物这一原理进行的。虽然其组份与洛塞尔水泥十分相似,但是材料的选择和煅烧条件可能促使无水硫铝酸钙化合物的生成。无水硫铝酸钙、硫酸钙和石灰组成的膨胀组份与波特兰水泥混合而成的水泥,可按普通水泥的使用方法使用,并可加以调节,以补偿收缩和产生高的净膨胀率。

2. 膨胀水泥混凝土名词解释

①膨胀水泥:水泥与水拌合后形成水泥浆,它在凝固及硬化过程中或在这些过程之后体积大大增加。

②K型膨胀水泥:是波特兰水泥、无水硫铝酸钙($4\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{SO}_3$)、硫酸钙(CaSO_4)和石灰(CaO)的一种混合物。无水硫铝酸钙是一种单独煅烧的熟料,可与波特兰水泥熟料共同粉磨或与波特兰水泥一起拌合;它也可以在煅烧过程中与波特兰水泥熟料同时制得。

③M型膨胀水泥:是波特兰水泥、铝酸钙水泥和硫酸钙的混合物,或由波特兰水泥熟料、铝酸钙熟料和硫酸钙共同粉磨而成。

④ S型膨胀水泥：是一种C₃A含量大并用过量硫酸钙改性的一种波特兰水泥。

⑤ 膨胀水泥混凝土^①：用K型、M型或S型膨胀水泥制成的混凝土。

⑥ 无收缩混凝土^②：亦称作“收缩补偿混凝土”。系一种膨胀水泥混凝土。如限制其膨胀，就产生压应力，并能大致抵消干燥收缩引起的混凝土的拉应力。

⑦ 自应力混凝土^③：是一种膨胀水泥混凝土，如限制其膨胀，所产生的压应力，足以使干燥收缩后的混凝土产生较大的压缩。

⑧ 膨胀组份：是为了获得K型膨胀水泥而与波特兰水泥熟料共同粉磨的一种材料。它是由无水硫铝酸钙、硫酸钙、游离石灰及其它波特兰水泥组份制成的。

⑨ 钙矾石 (3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O)：是膨胀水泥水化期间所形成的相。它是膨胀力的来源。它可以和同名的天然矿物相媲美。硫酸盐腐蚀砂浆和混凝土，生成硫酸盐含量高的硫铝酸钙。其他文献中称作“水泥杆菌”。

3. 美国膨胀水泥的现状

美国对膨胀水泥混凝土、砂浆和水泥浆试件进行了大量的实验室研究。对用膨胀水泥制得的自应力混凝土和无收缩混凝土都进行了研究。本文包括许多有关的研究成果。

目前，美国大量使用的膨胀水泥只有K型和S型。应用方面限于制造无收缩混凝土。干燥收缩裂缝减少，是由于混凝土在水化初期具有膨胀能力。当限制膨胀时，就补偿了以后的干燥收缩。

对防止收缩裂缝来说，采用无收缩混凝土很有希望成为一种比当前所采用的其他方法更为普遍实用。自应力混凝土的生产有限，并且对其实验性构筑物的使用性能尚未

作出结论性的评价。

二、膨胀水泥的水化化学

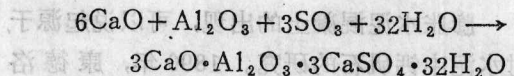
1. 前言

膨胀水泥的水化化学尚未被充分掌握。

一般认为，钙矾石的生成是产生膨胀力的根源，它是本文涉及的所有膨胀水泥的一个共同因素。

2. 钙矾石生成的基本条件

如分子式所示，钙矾石是由CaO、Al₂O₃、SO₃和水四种组份组成的。该相的反应式为：



除水以外，其他三种组份可来源于各种反应物。材料必须是可溶的或至少是微溶的；或者能生成可溶或微溶的水化产物。第二个要求是液相（拌和水与材料开始反应时生成的溶液）中CaO、SO₃和Al₂O₃的含量应足以稳定钙矾石。只要溶液中SO₃的含量等于或超过钙矾石的溶解度，则膨胀水泥就具备了第二个条件。

3. 基本组份的一般来源

化合作用所需的石灰，如Ca(OH)₂，来源于阿利特 (3CaO·SiO₂)、贝利特 (2CaO·SiO₂) 的水解，以及膨胀组份和波特兰水泥中游离CaO的水化。如果存在硫酸钙，就能提供与SO₃化合的CaO。从铝酸钙水泥的CA和C₁₂A₇、波特兰水泥的C₃A、C₄AF和K型水泥的C₄A₃S中可获得Al₂O₃。实验时还使用了其它含Al₂O₃的材料，如矾土、煅烧的高岭土、矿渣等作为Al₂O₃的来源。SO₃实际上是由石膏或无水石膏制取的，或者当存在C₄A₃S时，一部份由C₄A₃S制取。根据主要的化学要求，上述材料的许多化合作用是用以生成钙矾石的。实际选择时则受到材

①如不是混凝土，而是砂浆或水泥净浆，此定义也适用。

料的化合作用所限制,而这些材料又必须在恰当的时期内能够产生所需的膨胀率。

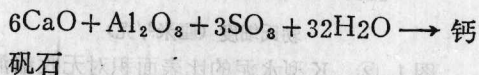
4. 与膨胀组份配比有关的主要因素

不同水泥中膨胀组份的配比不是根据 C_3A 、 S 理论比所表示的总数。在选择材料配比时应满足一个重要条件,即: CaO 、 SO_3 , 尤其是 Al_2O_3 在恰当的时期内能生成钙矾石。钙矾石在拌合过程中开始生成,并在以后的水养护过程中继续生成,直至 SO_3 或 Al_2O_3 化合在钙矾石中为止。绝大部分钙矾石必须在达到一定强度之后生成,否则膨胀力就会消耗在塑性或半塑性状态的混凝土的变形中,即使加以限制,也不会产生应力。另一方面,如果通过水泥水化已达到大部份强度的一个很长的时期内,钙矾石继续迅速生成,就会使硬化的混凝土产生破坏性膨胀。

因此,在通过水化达到高强度之前,钙矾石引起的大部份膨胀反应就必须停止。实验表明,有些膨胀力可继续发展到超过“钙矾石的生成期”,但对强度不会产生大的有害作用。该时期包括水泥继续水化及强度大量增长的时期。继续膨胀会使水泥浆产生显微裂缝,但只要水份充足,新的水化产物就会不断地使显微裂缝愈合。阿罗尼[11]提出了包括膨胀——内部限制——局部破损——重新膨胀等一系列循环的多阶段膨胀理论。

5. 除生成钙矾石以外的 SO_3 的反应

如果水化水泥理论比中的全部 Al_2O_3 和 SO_3 都按反应式



而生成钙矾石的话,就比较容易控制。但有些 SO_3 会和正在水化的硅酸盐化合[12~14],有些 Al_2O_3 也如此[12、13],因此,应特别注意钙矾石和水化硅酸钙的 SO_3 和 Al_2O_3 的比例。所谓控制,是通过仔细控制实验室试验所确定的水泥混合物配比来保证在预定的时间内达到所需的膨胀率。

6. 引起膨胀的反应物

含 C_4A 、 S 、 CA 或含有过量 C_3A 的水泥浆的膨胀机理往往归因于钙矾石的生成,偶而也归因于单硫铝酸钙的生成。汉森[15]、施维特、路德维希和叶格[16]认为,钙矾石晶体是在 C_3A 颗粒未进入溶解时直接在其表面上生成的。在正常水化过程中,剩余的 C_3A 颗粒会全部被水化产物所包围,并且在这些地方生成的钙矾石晶体的增长会产生膨胀应力。类似的反应机理也适用于 C_4A 、 S 和 CA 。梅塔[19]和克莱因[17~18]详细地论述了在钙矾石生成中与 C_4A 、 S 有关的反应。梅塔断定,膨胀相是钙矾石,而不是单硫酸盐。

查特吉和杰弗里[20]认为, C_4AH_{13} 是 C_3A 的最初反应产物,以后通过与 CS 的固-液相反应,晶体尺寸增大,并产生膨胀应力。米哈依洛夫[21]发现,在铝酸钙水泥、石膏和石灰的含水混合物中存在单硫铝酸钙。在后一篇报告中[5]米哈依洛夫还提到,后来转变成钙矾石的单硫酸盐使波特兰水泥—铝酸钙—石膏浆产生了膨胀。

有关产生膨胀力的膨胀相的生成机理,尚未获得确凿的证据。然而当钙矾石晶体在受反应产物包围和限制时,其尺寸可能增长,引起应力发展。

7. 水化热

用溶解热法(美国材料与试验协会标准 ASTM C186—68)难以获得膨胀水泥水化热的数据,而且这些数据也不宜作为定量分析。有关水化物性能的现有资料表明,各种膨胀水泥的早期水化热都大大高于波特兰水泥,后期水化热也略高一些。

三、影响膨胀速度和膨胀率的因素

1. 前言

K型、M型和S型膨胀水泥混凝土的膨

胀性能,是膨胀混凝土和普通混凝土最显著的区别之一。膨胀既是一个重要性能,又是一个影响其它性能,尤其是强度的因素。当以获取预定的总膨胀速度和膨胀率作为研究这些膨胀混凝土的目的时,本节所列的实验数据[22~28]就能表明,膨胀性能受许多因素的影响。研究表明,有必要将实验室测得的某一种膨胀水泥的膨胀率和实际膨胀率严格地区别开来,后者取决于本节所提到的许多使用条件。

对同一类水泥制备的膨胀混凝土来说,不论膨胀率大小如何,影响膨胀率的因素通常是相同的。

本节和下列各节用附图所列的膨胀率,多数是线性测量结果,体积测量结果很少。

2. 化学成份和细度

文献[4、6]指出,膨胀性能与所用水泥的化学成份有关。除 Al_2O_3 和 SO_3 含量较高外,K型、M型和S型水泥的各种氧化物与波特兰水泥相似。相组成则与波特兰水泥不同,它含有 $C_4A_3\bar{S}$ 或CA,或者含有CA或 C_6A_3 (高铝水泥)[29]。

N. R. 格里宁在1966年指出,不同配比的膨胀水泥的膨胀性能是相似的。他发现:

①膨胀速度似乎取决于易水化的铝酸盐含量,并且只要 $CaSO_4$ 仍起作用,则与其含量成正比。铝酸盐可以是 $C_4A_3\bar{S}$ (K型)、铝酸钙水泥(M型)或 C_3A (S型);②当铝酸盐含量一定时,膨胀时间的长短取决于所存在的硫酸钙含量。勒奇[28]指出,当普通波特兰水泥中的硫酸盐(石膏)完全化合时,膨胀便停止。图1①表明,当 C_3A 含量固定时,S型砂浆的膨胀率随硫酸盐含量的提高而增大。一旦硫酸盐含量超过膨胀所需的最低限度,就会产生膨胀,而硫酸盐/铝酸盐比将决定混凝土膨胀时间的长短。普通波特兰水泥具有不同的有效硫酸盐/铝酸盐比。将不同的波特兰水泥和膨胀组份加以混合,就会

使混凝土具有不同的膨胀速度和膨胀率。(以上观察结果未考虑残余的游离CaO在后期对养护不当的试件的影响。)

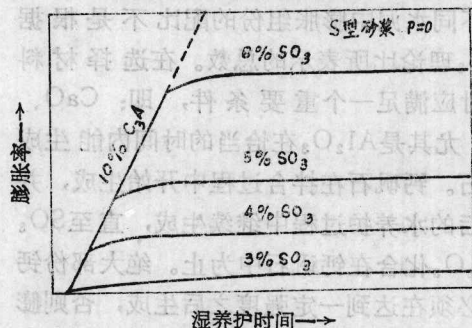


图1① 硫酸盐含量对由铝酸盐含量不变的水泥所制得的S型砂浆的理想膨胀—时间的影响

注: P = 限制钢筋的百分率 (As/Ag)

膨胀水泥的比表面积对膨胀性能影响较大。如果比表面积随着给定的硫酸盐含量而增大,则膨胀率下降。比表面积增大,加速了塑性混合物中钙矾石的过早生成。细度对K型膨胀水泥的影响示于图1②。将该水泥的勃氏细度提高到4,500厘米²/克,可使膨胀率降至接近于零。

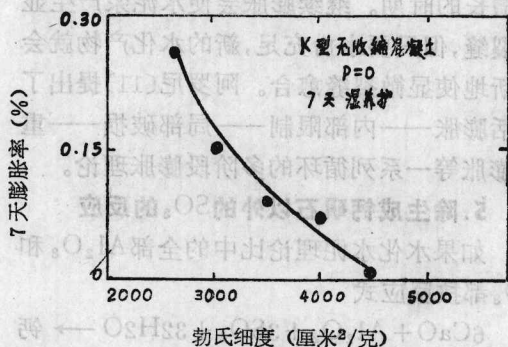


图1② K型水泥的比表面积对无收缩混凝土7天自由膨胀率的影响

3. 膨胀组份含量

膨胀率与膨胀组份含量及水泥的化学成份密切相关。所有水泥的膨胀速度和膨胀率都受各组份配比的影响。图2①[29]的数据说明了M型水泥的膨胀速度与铝酸钙水泥含量的关系以及膨胀时间与铝酸钙水泥含量的

关系。

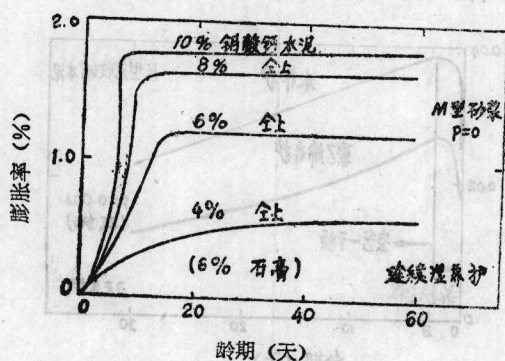


图 2 ① M型水泥的铝酸盐含量对膨胀速度和膨胀率的影响

波特兰水泥 (C_3A 10.7%)	2.5% SO_3
铝酸钙水泥	0.6% SO_3
石膏	46.5% SO_3

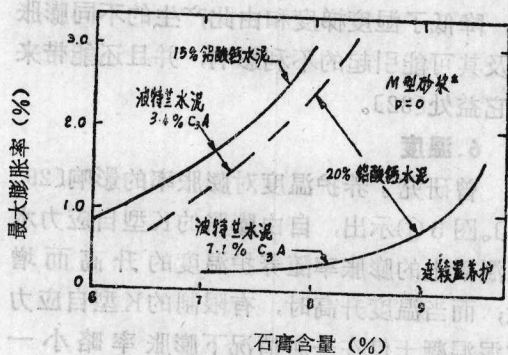


图 2 ② 铝酸盐、硫酸盐和 C_3A 含量对M型砂浆试件最大膨胀率的影响

波特兰水泥 (C_3A 7.1%)	2.1% SO_3
(C_3A 3.4%)	1.4% SO_3
铝酸钙水泥	0.4% SO_3
石膏	46.8% SO_3

图 2 ②〔25〕表示M型水泥的最大膨胀率、铝酸盐及硫酸盐总含量和 C_3A 含量的关系。此图所示的最大膨胀率要求少则一天、多至一周的不同湿养护时间。

配制各类膨胀水泥时，主要膨胀组份的含量应使膨胀率达到对膨胀水泥所要求的膨胀范围。

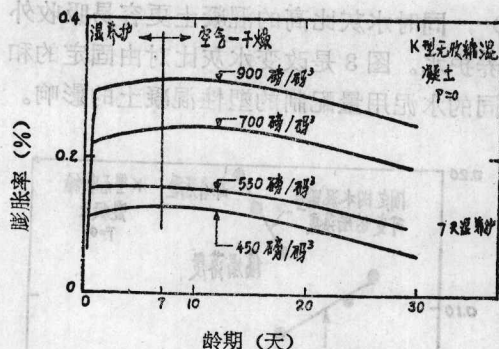


图 2 ③ 水泥用量对K型无收缩水泥混凝土膨胀率的影响

在K型和S型水泥中，膨胀组份的配比和膨胀率通常都是预定的。大量生产的K型和S型水泥经配比后，可以使无收缩混凝土产生较低的膨胀率。K型水泥约含有10~15%的膨胀组份，其中 C_4A_3S 占25~50%。当混凝土中的水泥用量在标准范围内时，提高混合物中水泥总用量就可提高膨胀率，如图 2 ③所示。

自应力混凝土用的K型水泥，也可以根据膨胀组份与波特兰水泥的预定配比制得。实验室用含有10~50%膨胀组份的K型水泥进行研究。自由膨胀试件的膨胀率与膨胀组份含量有关，但不成正比。膨胀组份含量对限制的自应力混凝土膨胀率的影响更为复杂。限制量和方向以及膨胀组份含量都会影响膨胀率。波利夫卡和伯特罗〔30〕建议，用某种混凝土及其试件来评定自应力混凝土膨胀组份含量的影响。

4. 水灰比

资料表明，膨胀率随着水灰比的减小而提高。但控制水灰比会影响混凝土中各组份的配比。水灰比低的混凝土，其膨胀组份的含量比同样稠度的、水灰比高的混凝土高，因其含水量大致相同。另一方面，混凝土中水泥用量相同时，就可采用不同的水灰比。在这种情况下，除了渗透性较大、塌落度较高外，混凝土的膨胀率相同（水泥用量不

变)，同时水灰比高的混凝土更容易吸收外部养护水。图3是改变水灰比对由固定的和不同的水泥用量配制的塑性混凝土的影响。

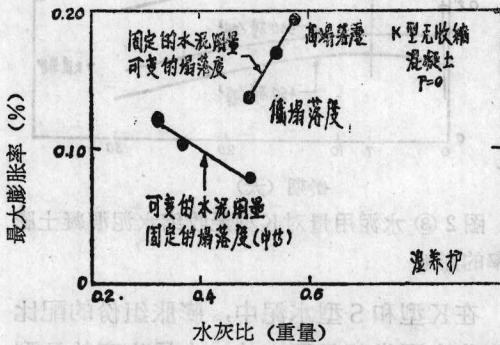


图3 水泥用量固定和不同时K型无收缩水泥混凝土的膨胀率与水灰比的关系

5. 养护

对波特兰水泥混凝土必须加以适当的养护。对膨胀水泥混凝土适当养护的要求就更严格了。采用膨胀混凝土时，应考虑两种水化反应。养护温度和养护水量对产生强度的水化硅酸钙的形成和对引起膨胀的钙矾石的形成影响各不相同。养护制度不当会大大降低膨胀率。

养护方法对不同类别的膨胀水泥有不同的影响。业已证实，所有膨胀水泥混凝土在水养护或湿养护时的膨胀率都显著大于干燥介质中养护的混凝土。伯特罗[22]、斯莱特和马瑟斯[31]指出，游离水的存在是引起膨胀所必须的。图4示出水养护和聚乙烯养护的K型无收缩水泥钢筋混凝土的区别。文献[22、25]还指出，聚乙烯养护的K型和M型水泥混凝土，再进行水养护时，会进一步膨胀。有限的实验室数据指出，K型无收缩水泥钢筋混凝土在66℃的养护室中蒸汽养护15小时后，其膨胀率约为水养护钢筋混凝土的80%。相应的数据表明，聚乙烯养护的钢筋混凝土的膨胀率约为水养护的65%。从无收缩轻质钢筋混凝土所得数据表明，尽管聚乙

烯养护和水养护的轻质混凝土在特性上非常不一样，但养护一膨胀性能都是相似的。

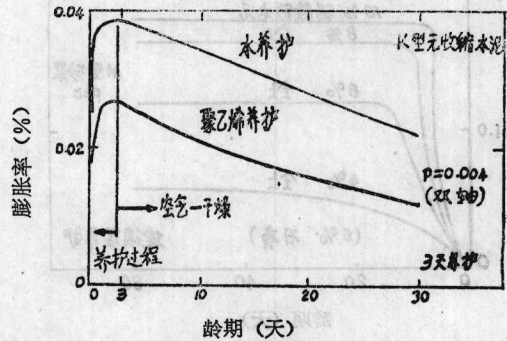


图4 水养护与聚乙烯养护对K型无收缩水泥混凝土膨胀率的影响

湿养护和聚乙烯养护的轻质混凝土[32]的膨胀性能得到改善，是由于轻集料中的水引起了进一步的内部养护。这种内部水的补充，降低了湿度梯度和由此产生的不同膨胀率及其可能引起的不利影响，并且还能带来其它益处[32]。

6. 温度

曾研究了养护温度对膨胀率的影响[29、33]。图5①示出，自由膨胀的K型自应力水泥混凝土的膨胀率随养护温度的升高而增大；而当温度升高时，有限制的K型自应力水泥混凝土仅在一种情况下膨胀率略小一些。图5①所示混凝土需要湿养护12~200天，才能达到最大膨胀率。

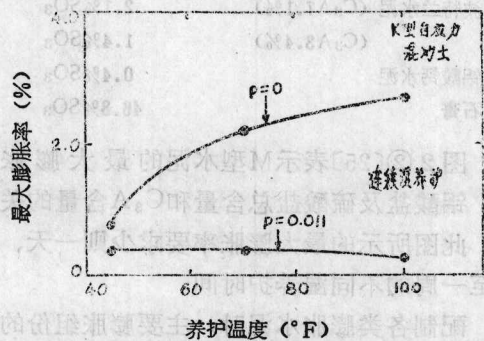


图5① 养护温度对限制膨胀和自由膨胀的K型自应力水泥混凝土最大膨胀率的影响

图5②示出,自由膨胀的K型无收缩水泥混凝土的膨胀率随温度的升高而增大,以及相对湿度低时,膨胀率显著下降。但最近发现[27],某些膨胀水泥混凝土的膨胀率随着养护温度的升高而下降。这些资料互相矛盾,范围狭窄,今后的研究应弄清楚温度的影响。

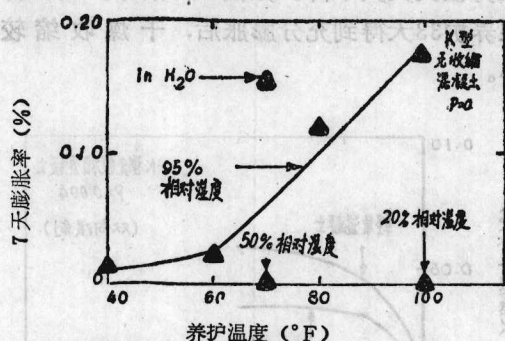


图5② 养护温度和相对湿度对K型无收缩水泥混凝土膨胀率的影响

7. 试件尺寸和形状

资料表明[25、29],膨胀率随试件尺寸的增大而下降。此外还发现,湿养护的大试件的外部膨胀速度与内部不同。有关单向限制的自应力混凝土试件的有限试验表明[34],尺寸越大,局部横向弯曲应力的梯度和值就越大,从而损害了力学性能。多孔轻集料造成的内部养护和三向限制可以减轻这些有害影响。试件的形状也有影响,但还没有得到结论性的资料。

8. 限制

内部配筋或外部采取措施都可限制膨胀,实验室即采用这两种方法进行试验。多半采用单向或双向限制,只有少数试验是采用三向限制[7、32、33]。

限制量对测得的膨胀率有显著影响。混凝土的自由膨胀比有限制的大好多倍。图6示出水养护和聚乙烯养护的轻质自应力混凝土最大膨胀率和双向限制量的关系。

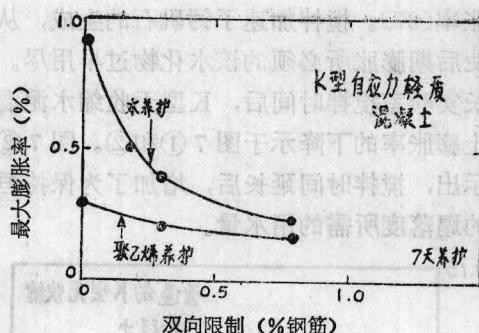


图6 限制量和养护条件对K型自应力轻质水泥混凝土膨胀率的影响

文献[22]指出,从单向限制的试件所获得的数据[32]表明,对于轻质混凝土来说,尽管自应力混凝土的有害的侧向膨胀比较小,但是自应力混凝土仍应采用双向或三向限制,然而,这种混凝土毕竟还是实验性的。

图6是根据对称限制的混凝土绘制的。美国一资料指出,非对称限制的自应力混凝土会产生过大的差示膨胀,并由此造成翘曲。对于非对称限制的钢筋混凝土构件有必要进一步研究。

为了使无收缩混凝土承受压应力,必须加以限制。可通过内部钢筋、地基摩擦力之类的不定力、模板或附近的结构物来限制,摩擦力和模板产生的限制尚未作出定量测定。采用内部钢筋时,钢筋应力约达到3.5~11公斤/厘米²,可使混凝土产生2~7公斤/厘米²的压应力。采用这类混凝土的目的在于使干缩引起的裂缝减到最少,实验室和现场研究(见第5节)都曾试图对所需的限制形式和限制量加以确定。多数无收缩混凝土在现场浇灌时都是按普通混凝土进行设计的。显然,含筋率、钢筋类别和位置都必须足以对无收缩混凝土的膨胀加以适当的限制。

9. 搅拌时间

延长搅拌时间,会降低所有膨胀水泥的

膨胀率[27]。搅拌加速了钙矾石的生成,从而使后期膨胀所必须的该水化物过早用尽。延长实验室搅拌时间后,K型无收缩水泥混凝土膨胀率的下降示于图7①和②。图7②也示出,搅拌时间延长后,增加了为保持恒定的塌落度所需的用水量。

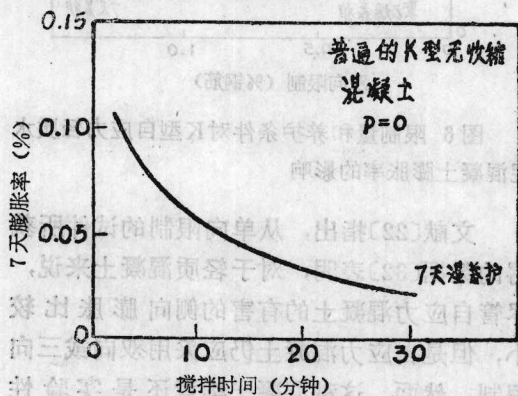


图7① 实验室搅拌时间对自由膨胀K型无收缩水泥混凝土膨胀率的影响

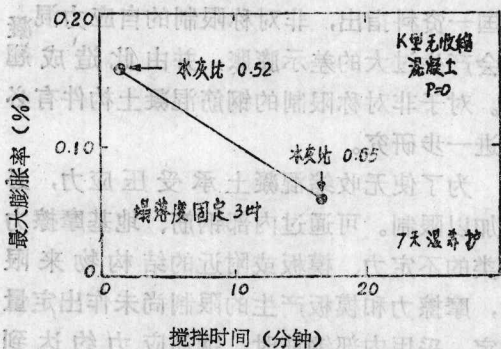


图7② 搅拌时间和拌和水对K型无收缩水泥混凝土膨胀率的影响

10. 外加剂

关于外加剂对膨胀率的影响仅进行了有限的研究。文献[25]指出,外加剂降低了膨胀率,而文献[30]则提出,外加剂作用很小,或者不起作用。本文第5节第1(3)部分将介绍利用外加剂的现场经验。

11. 集料种类和粒径

集料种类和粒径会影响膨胀速度和膨胀率。图8(1)示出,轻质结构混凝土的膨胀率

大大高于同样级配和粒径的普通集料混凝土。

K型自应力水泥混凝土用了三种集料[32]。结果列于图8(2)和(3)。图中差别是由于轻集料所含水份引起的早期膨胀大于两种普通集料。在早期干燥阶段,轻质混凝土继续膨胀,使干燥收缩及由其引起的自应力损失大大下降。如图8(3)所示,当试件湿养护33天得到充分膨胀后,干燥收缩较小。

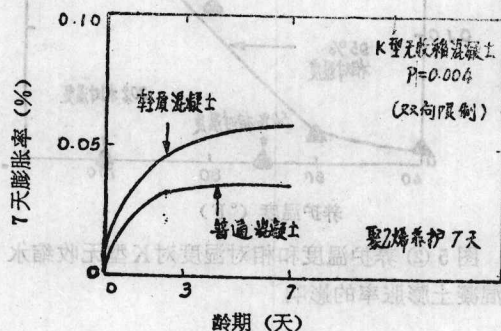


图8(1) 轻集料和普通集料对K型无收缩水泥混凝土膨胀率的影响

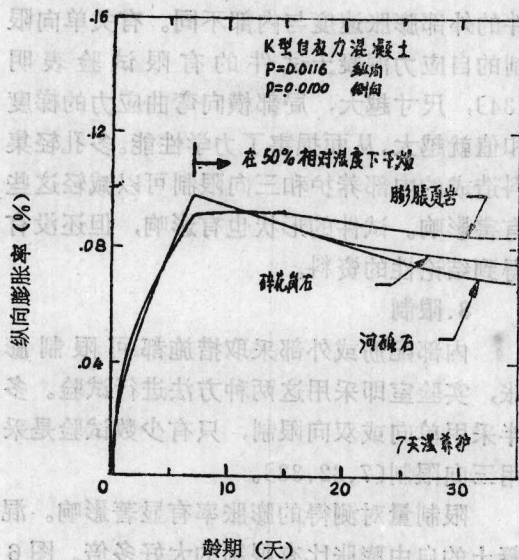


图8(2) 集料种类对养护7天的三向限制混凝土纵向膨胀率的影响

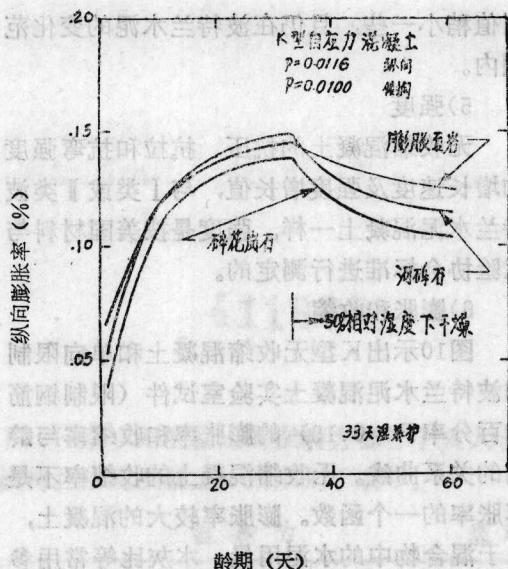


图8(3) 集料种类对湿养护33天的三向限制混凝土纵向膨胀率的影响

有关集料粒径对膨胀率的影响的资料较少。事实上，采用不同集料粒径时，为保持和易性和体积比而改变级配时，其影响要比仅改变粒径为大。例如，对于一定的和易性、体积比和水灰比来说，水泥用量的减少伴随着粒径的增大。改变水泥用量所引起的膨胀性能的变化，要比改变粒径所引起的变化大。今后有必要对此作进一步研究。

12. 膨胀水泥的龄期

所有膨胀水泥制成后的贮存期对膨胀率也有影响[4, 22]。K型无收缩混凝土的代表性数据示于图9。龄期过长会降低自由膨胀率，而限制的膨胀率不会下降到同样的程度。龄期显然与碳化作用和水化作用有关。采用K型水泥时，颗粒分散是由于比表面积较高的膨胀组份所生成的CaO的水化而引起的。最近发现，当K型膨胀组份中游离CaO很少或没有时，龄期的作用就会大大减小。

还发现[6]，K型、M型和S型水泥都会受到空气中的CO₂和水份的影响，所以存放在空气中时，膨胀率就会下降。

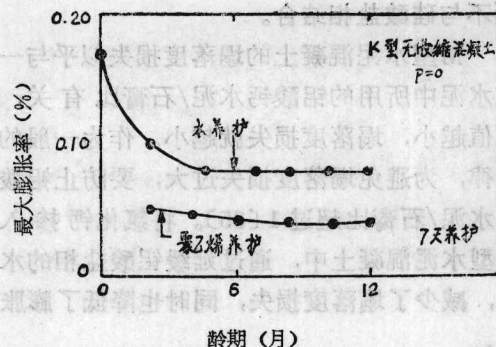


图9 K型水泥的龄期对自由膨胀无收缩混凝土膨胀率的影响

四、膨胀水泥混凝土的性能

1. 前言

本节仅报导无收缩混凝土和自应力混凝土的性能。第一部份介绍无收缩混凝土，第二部份介绍自应力混凝土。

K型和S型无收缩水泥混凝土的数据得自工业生产的水泥，而M型水泥混凝土和K型自应力水泥混凝土的结果得自试验性生产的水泥，因而，这些数据对今后的工业生产来说，可能有代表性，也可能没有代表性。

有关M型水泥混凝土的资料非常少。所以，在下述的某个特殊性能中，如果没有提到它，那就是因为缺乏资料。

2. 无收缩混凝土

1) 和易性

K型、S型和M型水泥混凝土的和易性与塌落度相同的波特兰水泥混凝土一样。

通常，K型水泥混凝土随着搅拌期间或搅拌后的时间的延长而损失的塌落度要比波特兰水泥混凝土大。因此，对于K型水泥混凝土来说，如要延长搅拌时间并保持一定的塌落度，就得提高水灰比。增加含水量会影响K型水泥混凝土的其它性能，但不致达到像波特兰水泥那样大的程度。其原因是掺入的大部份水实际上很早就与膨胀组份结合，

而不与硅酸盐相结合。

M型水泥混凝土的塌落度损失似乎与一定水泥中所用的铝酸钙水泥/石膏比有关；比值越小，塌落度损失就越小。作为一般的规律，为避免塌落度损失过大，要防止铝酸钙水泥/石膏比超过1[35]。将氯化钙掺入M型水泥混凝土中，通过延缓铝酸盐相的水化，减少了塌落度损失，同时也降低了膨胀率。

S型水泥混凝土的塌落度损失与波特兰水泥混凝土相似。

2) 泌水性

K型、S型和M型水泥混凝土的泌水量都一致下降，在某些情况下，则完全没有泌水。因而在制作板材时，就可以对混凝土早一些进行抹面，但也须细心，以免表面过快干燥。

3) 凝固时间

按美国材料与试验协会标准 ASTM C 403进行试验时，K型和S型水泥混凝土的初凝时间基本上和I类波特兰水泥混凝土一样。

采用对波特兰水泥混凝土有效的外加剂，可以改变K型和S型水泥混凝土的初凝和终凝时间。外加剂须和所用的水泥一起进行试验。因为，如同波特兰水泥一样，有些外加剂和不同品种的水泥一起使用时，所起的作用就不一样。

对M型水泥混凝土的凝固时间尚未作过试验，但按照ASTM C191和C266分别用维卡仪和吉尔摩仪 (Gilmore) 对M型水泥进行试验，结果可与I类波特兰水泥相比。

4) 容重和体积比

计算配比时通常所采用的波特兰水泥的平均比重为3.15，K型和S型水泥也可以利用该值而不致影响无收缩混凝土的容重和体积比。而对K型和S型水泥的有限试验表明，其比重约为3.10，仅比波特兰水泥的惯

用值稍小一些，且仍在波特兰水泥的变化范围内。

5) 强度

无收缩混凝土的抗压、抗拉和抗弯强度的增长速度及强度增长值，与I类或II类波特兰水泥混凝土一样。强度是按美国材料与试验协会标准进行测定的。

6) 膨胀和收缩

图10示出K型无收缩混凝土和单向限制的波特兰水泥混凝土实验室试件的（限制钢筋的百分率 $P=0.16$ ）的膨胀率和收缩率与龄期的关系曲线。无收缩混凝土的收缩率不是膨胀率的一个函数。膨胀率较大的混凝土，由于混合物中的水泥用量、水灰比等常用参数的不同，其收缩率不一定也较大。

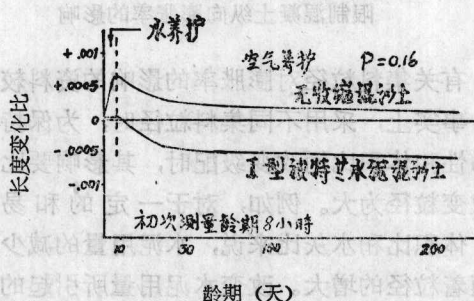


图10 限制膨胀的K型和I类水泥混凝土实验室试件的膨胀率、收缩率和龄期

7) 弹性模量

测定了以天然集料和轻集料制得的K型、S型和M型水泥混凝土的静弹模量和动弹模量[25]。所得结果可以与波特兰水泥混凝土相比。

8) 握裹力

对K型水泥混凝土和I类波特兰水泥混凝土的握裹力作过对比试验。在一批试验中，将6毫米的光面钢筋从双向配筋的试验板中拉出；另一批则按照ASTM C234采用规律变形的钢筋进行试验。在以上两种情况

下, K型水泥混凝土的握裹力都等于或大于波特兰水泥混凝土。结果列于表 1。

	握 裹 力		表 1
	握裹力 (公斤/厘米 ²)		
	光面钢筋	规律变形的钢筋	
K型水泥混凝土	24	58	
波特兰水泥混凝土	17	57	

9) 热膨胀系数

据报导, 曾经对307公斤/米³的K型水泥混凝土取4~70℃温度范围内的四个区间进行试验。实验测得的系数为 9×10^{-6} 厘米/厘米/℃, 与相应的波特兰水泥混凝土相符[36]。

10) 抗冻融性能

用双向配筋($P=0.007, 0.009$ 和 0.018)的K型、S型和M型水泥混凝土板材所作的试验[25]表明, 如同波特兰水泥混凝土一样, 其抗冻融性能取决于含气量。在同样的存放条件下, K型、S型和M型水泥混凝土的最佳含气量与波特兰水泥混凝土的相同。

11) 抗冰冻剥落强度

用含气量与抗冻融试验相同的试体, 对限制膨胀的K型、S型水泥混凝土与波特兰水泥混凝土作了对比试验[25、27]。将试验结果作直接对比时, K型和S型水泥混凝土总显出相同的或更高的抗冰冻剥落强度。同一批试验中的M型水泥混凝土的性能与波特兰水泥混凝土相同。

12) 抗硫酸盐强度

混凝土的抗硫酸盐强度一般受混合物中水泥的铝酸盐含量的影响。膨胀水泥是通过硫酸盐与铝酸盐的反应来达到早期膨胀的。这些铝酸盐与混凝土介质中硫酸盐的反应速度以及水泥中的硫酸盐含量, 决定膨胀水泥能否制出抗硫酸盐混凝土。假如反应很快, 不到几天就完成, 并且假如提供的硫酸盐足以使全部铝酸盐生成钙矾石, 就能得到

抗硫酸盐混凝土。

混凝土抗硫酸盐强度的试验结果难于再现, 并且在缺乏标准方法的情况下, 往往是按不同方法进行试验的。对于膨胀水泥混凝土来说, 另一个问题是: 试验结果无疑也是一个膨胀率和限制量的函数。

在一次持续一年的实验中, 对15.24厘米的双向限制混凝土立方体进行了试验。试体是由307和418公斤/米³混凝土的Ⅱ类、V类水泥和K型水泥作成三份。用307公斤/米³混凝土制得的试体, 用0.17%的钢筋限制; 用418公斤/米³混凝土制得的试体, 含筋率为0.82%。试体水养护28天后, 浸泡在每100克水含有5克MgSO₄和5克Na₂SO₄的溶液中, 并对试体定期观察和称重。

试验末期, 所有试体仅受轻微侵蚀, 边和角有少量的损坏现象。所有立方体上都有一些表面空鼓。试验期间所有试体都出现重量连续增加的现象。水泥用量高的混凝土性能比贫混凝土稍好一些, 而三类水泥之间没有显著差别。

加利福尼亚公路局对K型水泥混凝土进行了试验。将自由膨胀试体放在人造的硫酸盐土壤内, 并定期用硫酸盐溶液饱和, 试体呈现的抗硫酸盐强度很差。这可能是水泥自由膨胀或水泥中硫酸盐含量不足所引起的。

在另一批试验中[27], 单向限制($P=0.003$)的K型、S型和M型水泥混凝土的抗硫酸盐强度大大小于Ⅱ类和V类波特兰水泥混凝土。

13) 抗裂性

无收缩混凝土是为改善限制膨胀混凝土的抗干缩裂缝能力而设计的。引起混凝土裂缝的其它机理对无收缩混凝土仍然有效, 因此, 在设计这种混凝土建筑物时, 必须包括预防和控制这些裂缝的标准方法。

14) 泊松比

D、W、法伊弗的初步有限的资料说

明, 波特兰水泥混凝土和无收缩混凝土的泊松比即使有差别, 也是很小的。

15) 耐磨强度

按ASTM C418—64T进行试验时, K型水泥混凝土的耐磨强度大于I类水泥混凝土。试验结果列于表2。

耐磨强度 表2

	I 类	K 型
水灰比	0.56	0.59
抗压强度 (15×30厘米圆柱体试件) (公斤/厘米 ²)	392	418
磨损系数 (厘米 ³ /厘米 ²)	0.20	0.14

16) 干湿交替作用

自由膨胀的K型、S型和M型水泥混凝土经过适当的湿养护或蒸汽养护之后, 对于干湿交替循环呈现极好的稳定性[27]。

17) 其它

没有资料的其它性能包括渗透性、钢筋的耐锈性、蠕变性及温度循环作用。

3. 自应力混凝土

1) 和易性

大多数试验报告都提到自应力混凝土混合物的快凝, 而忽视水泥品种。用这些水灰比低的水泥进行的试验表明, 和易性的损失要比波特兰水泥混凝土快。

2) 泌水性

K型和M型自应力混凝土没有泌水现象。

3) 凝结时间

K型自应力混凝土混合物的凝固速度较之相应的波特兰水泥混凝土快。表3是一批用普罗特仪针入法 (ASTM C403) 试验的结果[30]。这些数据也显示出了三种缓凝剂的作用效果。

据报导, 在同一试验中, 采用缓凝剂对这些混凝土的膨胀性能影响不大。其它一些文献[26]报导, 采用缓凝剂使膨胀率稍有下

不同水泥和缓凝剂的凝结时间 表3

水泥 品种	缓凝剂 (1.48厘米 ³ /公斤)	凝 固 时 间			
		初 凝		终 凝	
		小时	控制%	小时	控制%
II类	无	4.8	100	6.4	100
K型	无	3.5	73	4.6	72
K型	羧基酸类	4.9	102	6.5	101
K型	羧基酸类	5.5	115	7.2	113
K型	木质磺酸盐类	5.6	117	7.3	114

降。

一种特定的M型水泥浆, 当采用苏联标准方法进行试验时, 其初凝不少于2分钟, 终凝不少于6分钟。苏联文献提到, 在制作自应力混凝土管时, 由于水泥快凝, 故采用喷射法。试验表明, 对波特兰水泥和K型水泥有效的缓凝剂, 对M型水泥无效。氯化钙能使M型水泥缓凝, 但与预应力钢筋不相容。

用铝酸钙水泥含量比苏联制作的水泥少的M型水泥进行的试验表明, 该水泥具有更正常的凝固性能。同时, 对波特兰水泥有效的缓凝剂, 对这种M型水泥也有效。

4) 容重和体积比

K型自应力水泥的比重为3.0左右。此值与波特兰水泥通常采用的值3.15之间的差额是足够大的, 因此在混凝土混合物配比设计中计算容重与体积比时, 应加以考虑。

5) 抗压强度

许多研究者指出, 自应力混凝土的抗压强度与膨胀率成反比; 并且如第三节所述, 膨胀率与限制量成反比。因此, 在实际应用范围内, 以及其它参数都保持不变的情况下, 限制量越大, 强度就越高。图11示出特定的K型水泥混凝土的18天(28、24)强度与单向限制的关系。

任何一个自应力混凝土试体的强度都是应力变化的函数, 它受膨胀率和膨胀速度、限制量和限制方向 (无论是单向、双向或三

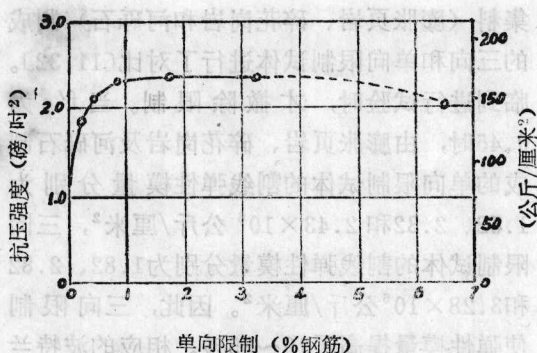


图11 限制量对K型水泥自应力混凝土
18天抗压强度的影响

每一限制量都是由4块 $15 \times 15 \times 49$ 厘米试件求出的平均值。抗压强度在纵向限制方向测出。

注：图11、12(1)和12(2)得自文献23。用6%以上钢筋限制的试体，其结构不同于其他试件，并且限制量缺乏3.25~6.5%区间的数据。作者在图11及12(2)中用虚线表示可能的关系。图12(1)中的虚线与其不同点仅仅是养护条件不同。

向)所影响，并且与决定强度的限制量直接有关。在一批用三向限制的自应力混凝土试验中，其抗压强度较之单向限制的试体高25%。

用K型水泥及不同集料制成的 15×48 厘米三向限制试体进行试验[11、32]。在试验前撤除限制的情况下，由膨胀页岩、河砾石和碎花岗岩制成的试体的28天强度分别为282、324及394公斤/厘米²。用相等的水泥用量及相同集料制成的相同尺寸的波特兰水泥混凝土试体，其28天强度分别为324、526及588公斤/厘米²。由吸水率大的膨胀页岩制成的试体的相对强度(K型水泥与波特兰水泥之比)比其它两种集料制成的高得多。这应部分地归因于较均匀的内部养护及较高的早期膨胀的有益作用。

当考虑到所包括的许多变数时，就可制得高强自应力混凝土。反之，如果不考虑这些因素，制得的混凝土强度就低。

6) 膨胀

膨胀水泥混凝土的膨胀能力取决于水泥

和所采用的混凝土混合物的组成。用给定的混合物所获得的实际膨胀率即为第三节所述诸因素的函数。

决定自应力混凝土性能的主要因素之一，就是所说的限制量。图12(1)是仅改变单向限制量的一次试验结果。

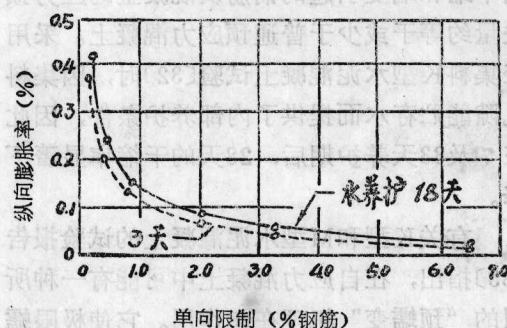


图12(1) 限制量对K型水泥混凝土试
体18天膨胀率的影响

每一限制量都是由4块 $15 \times 15 \times 49$ 厘米的混凝土试体求出的平均值

试验[11、30]指出了集料的硬度、粒径、形状及表面结构对膨胀率的影响，并指出了轻质集料是提供内部养护用水的源泉。

当将图12(1)的数据换算成混凝土中的自应力时，则获得图12(2)所示曲线[23]。

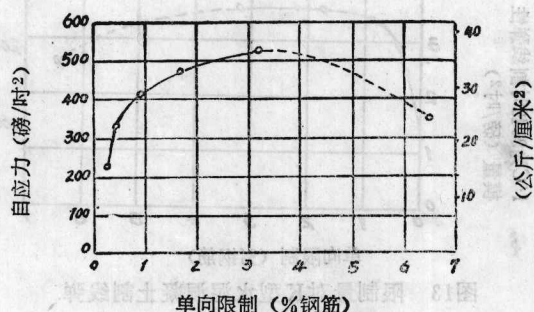


图12(2) 限制量对K型水泥混凝土18
天自应力值增长的影响

每一限制量都是由四块 $15 \times 15 \times 49$ 厘米试体求出的平均值

曲线表明，对所给定的水泥及混凝土配比进行设计能够提供最佳的单向限制量。双

向和三向限制量也有其最佳值,但未对其进行研究。

7) 收缩和蠕变

如采用机械预应力,则应考虑到由于收缩和蠕变而引起的预应力损失。有关K型水泥自应力混凝土构件的研究报告[38]指出,由干缩和蠕变引起的钢筋及混凝土的应力损失量约等于或少于普通预应力混凝土。采用轻集料K型水泥混凝土试验[32]时,因集料孔隙能贮存水而提供了内部养护条件,因此在7及33天养护期后,28天的干缩率显著下降。

有关K型和M型水泥混凝土的试验报告[33]指出,在自应力混凝土中可能有一种所谓的“预蠕变”机理在起作用。它使极限蠕变应变值低于在同一荷载龄期内持续应力与极限应力比相同的普通混凝土。究其原因,可能是当混凝土极限强度低时,通过自应力机理在早期对混凝土施加了荷载。

8) 抗压弹性模量

自应力混凝土的大部份性能与限制膨胀率及限制量有关。图13指出,单向限制量与割线弹性模量的关系为 $0.45f'c$ [23]。

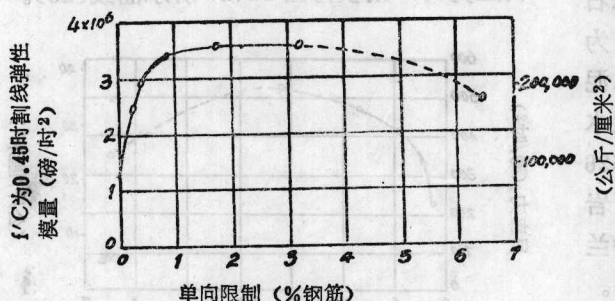


图13 限制量对K型水泥混凝土割线弹性模量的影响

每一限制量都是由4块 $15 \times 15 \times 49$ 厘米的混凝土试体求出的平均值

该模量随着混合物的龄期和配比中的水泥用量的增加而升高,随着膨胀率而下降。此关系类似于抗压强度。对K型水泥和三种

集料(膨胀页岩、碎花岗岩和河砾石)制成的三向和单向限制试体进行了对比[11、32]。临到进行试验时,才撤除限制。当 $f'c$ 为0.45时,由膨胀页岩、碎花岗岩及河砾石制成的单向限制试体的割线弹性模量分别为 1.52 、 2.32 和 2.43×10^6 公斤/厘米²,三向限制试体的割线弹性模量分别为 1.82 、 2.82 和 3.28×10^6 公斤/厘米²。因此,三向限制使弹性模量提高了19~35%。相应的波特兰水泥试体仍然具有较高的模量,分别为 1.93 、 3.44 和 3.85×10^6 公斤/厘米²,超过了三向限制值的6~22%。

在一批试验[25]中,对比了用K型水泥和波特兰水泥混凝土及河砾石作为集料的、每个方向含筋率为1.77%的双向限制试体。在31天时,波特兰水泥混凝土的动弹模量为 4.05×10^6 公斤/厘米²,相应的K型水泥混凝土则为 3.91×10^6 公斤/厘米²。

在同一实验中,自由膨胀的K型试体的动弹模量比自由膨胀的波特兰水泥试体低56.0%。这表明须加以限制以提高自应力混凝土的力学性能。

M型和S型水泥混凝土的有限试验表明,其弹性模量的降低与波特兰水泥混凝土相同。

9) 握裹力

文献[37、39]指出,当存在适当的侧向限制时,握裹力就大,尤其是在摩擦现象占优势的情况下。文献[40]报导,在试体仅有单向限制的试验中,握裹力减小。这可能是由于自由横向膨胀大所引起的。

10) 抗冻融强度

这是另一个与膨胀率及限制量有关的性能。在一批试验[25]中,用K型和M型水泥加气混凝土制成试体进行试验,并与V类波特兰水泥混凝土进行对比。限制量大的试体的抗冻融强度比限制量小的试体大,但在任

何情况下,均以V类波特兰水泥混凝土为最佳。当内部限制小时尤为明显。

11) 抗冰冻剥落强度

将K型及M型水泥混凝土与V类波特兰水泥进行对比试验[25]。不同的限制量所采用的含筋率分别为0、0.17、0.87及1.77。限制量大的试体性能优于限制量小的,这再次表明了限制量对自应力混凝土物理性能的重要作用。在该试验中,任何一种自应力混凝土都不同于波特兰水泥混凝土的性能。

12) 抗钢筋锈蚀

没有测定该性能,但须注意,在自应力混凝土中不应采用氯化钙。对机械预应力混凝土应同样注意,因为钢筋可能锈蚀。

13) 其他

对于任何自应力水泥混凝土来说,没有资料的有:抗硫酸盐强度、渗透性、耐磨性、热膨胀系数,温度循环作用,长期干湿交替作用或泊松比。

五、结构用膨胀水泥混凝土的性能

1. 无收缩混凝土概述

K型水泥混凝土自1963年以来已大量使用,绝大部份的膨胀水泥混凝土建筑物都采用这种水泥。S型水泥最早是在1968年使用的,从此就被用于各类构筑物中。

由于现场中出现的因素多种多样,因此很难预测现场的实际膨胀率,并且难与以前的实验室研究结果作比较。有些建筑装上了电阻仪和机械应变仪,但试验结果相关性很小。根据混凝土性能可评定早期建筑的优劣。主要问题是与波特兰水泥混凝土相比,裂缝减少了。

1) 限制

减少干缩裂缝取决于混凝土在早期水化阶段中通过膨胀补偿收缩的能力。必须通过限制将膨胀能储存起来,使之产生压应力,

以提高结构的抗裂强度。钢筋、模板或现成的楼板等之类的东西都能在膨胀期间提供这种限制。

图14的曲线表示钢筋对实验室试体膨胀的限制作用。由于曲线是在含筋率约0.15时才开始逐渐变化的,因此除了结构和温度要求更高以外,可将该值作为最小值。

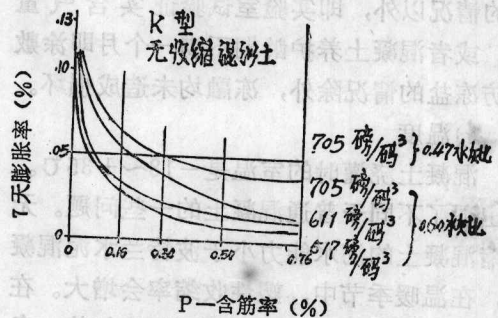


图14 限制量对7天膨胀率的影响

从理论上说来,混凝土的膨胀能力及其适当的限制是减少干缩裂缝的主要因素。但由于混凝土、模板及钢筋的限制量不固定,因此难以预测现场的实际膨胀率。

由引起裂缝的干缩所产生的拉应力,在波特兰水泥混凝土中发展得比通过适当限制(已约达到1.75~7公斤/厘米²压应力)的无收缩混凝土快。在干缩裂缝可能发生时,这一差别可使无收缩混凝土的抗拉强度得以提高,并消除早期的毛细裂缝或微裂缝。

2) 集料

轻集料和普通集料,不论是破碎的或天然的,都可以用于无收缩混凝土建筑中。膨胀页岩粗集料往往还和轻集料及普通集料混用。大家知道,不同的集料在混凝土中具有不同的收缩性能。如同在波特兰水泥混凝土中一样,它们对无收缩混凝土的最终性能也有影响。

3) 外加剂

掺入各种混凝土混合物中的外加剂品种繁多。其中大部份属于减水缓凝剂类。木质