

混凝土多维本构关系试验方法研究

吉泽森 陈倩

江苏省海安县建设工程施工图审查室

DOI: 10.18686/bd.v1i7.559

[摘要] 本文主要介绍了混凝土多维本构关系试验设备的组成,对真三轴试验仪的几种类型进行了系统的介绍,给出了混凝土多轴强度与变形特性试验的基本操作过程,对试验技术难点提出了相应的技术措施。

[关键词] 混凝土;多维本构关系;真三轴试验仪

1 概述

混凝土是被广泛应用的建筑材料,在建设工程中发挥巨大的作用。在实际的 RC 结构中,混凝土各点几乎不可能仅处于受拉、单轴受压或纯剪应力的状态。例如,最一般的梁、柱构件,截面上有弯矩和剪力的共同作用,支座和荷载处有横向应力,梁-柱、梁-梁节点部位以及预应力筋的锚固区等等,都使混凝土实际上处于二轴和三轴应力状态。就算仅在一个方向对用来测定混凝土抗压强度的立方体试块施加荷载,也会因为试件端面受到钢承压板的横向约束,使得其内部各点处于复杂的多轴应力状态。结构工程中常见的墙板、剪力墙、双向板、壳体结构和折板,甚至一些重大的特种结构,比如电视塔、重型水压机、水坝、海洋平台、设备基础、核反应堆的压力容器和安全壳等,这些结构都是典型的二维或三维体系,大部分混凝土结构处于明显的多轴应力状态。

针对混凝土的多轴强度和变形性能,早在 20 世纪之初就开始了试验研究。如美国人 Richart 混凝土圆柱体常规三轴受压试验和德国 Foppl [1](1900 年)的砂浆二轴受压试验。之后因为试验技术条件的限制和实际工程中的需求不大,这项研究被迫终止。60 年代正值核电工业的兴起,为建设核反应堆的大型 PC 压力容器与安全壳,对混凝土的多轴性能研究得到巨大发展。

与此同时,有限元分析方法日益完善,电子计算机技术发展迅速。两者的结合促使结构工程的理论分析,无论在计算能力、速度和精确度上,都有了飞跃的进步。与此相适应,要求建立起更合理、准确的混凝土多轴本构关系。同时,控制仪器、试验技术及电子量测的发展,为制造混凝土多轴试验设备提供了物质条件。所以,在 70 年代形成研究混凝土多轴性能的一个高潮^[2]。

各国的学者开展了广泛、系统的试验研究,取得了许多研究成果。如今混凝土的多轴强度与本构关系已被美、日、英、德、法等诸多发达国家纳入相关规范条款。它们在工程实践中的应用,已经取得很好的技术以及经济效益。

2 试验设备

不同的应力状态会使混凝土的多轴强度和变形产生极大差异。所以几乎不可能得到一种可以精确的从混凝土原

材料的性质和组成推算其多轴力学性能的理论方法。因而,最现实和合理的办法是进行试验,直接测定。

由于混凝土多轴试验的加载设备和量测技术的复杂性,且需求不一,至今试验机工厂不生产通用的整机设备。一般都是由各研究单位自行设计研制,或委托加工。另一方面,各研究单位的塑性混凝土多轴试验方法,包括设备原理和加载方法、应力和应变的测量手段、试件的外形和尺寸、以及减小表面摩擦约束的方式等差异很大,导致试验结果有很大的离散度,说明了试验方法和技术能力在很大程度上影响试验结果^[3]。

现今,世界各国中具有混凝土多轴试验专用设备的大学和研究院约二十所,已有数十台开发成功、投入使用并取得理想试验结果的设备^[4]。它们的试验方法和构造原理各异^[5],从设备所能施加的应力状态可将试验方法分作两大类,即普通三轴试验设备和真三轴试验设备。

2.1 常规三轴试验设备

一台普通的液压材料试验机,配置一个带活塞的高压油缸和独立的油路、油泵系统,如图 1 所示。试验方法:把试件放进油缸内,活塞下面;在油泵向油缸注油时,试件侧向承受油压($\sigma_1 = \sigma_2$);试验机通过活塞在其竖向施加压力 σ_3 (为防止高压油渗进混凝土的缝隙,降低试件强度,先用橡胶薄膜包裹试件,再放进油缸)。

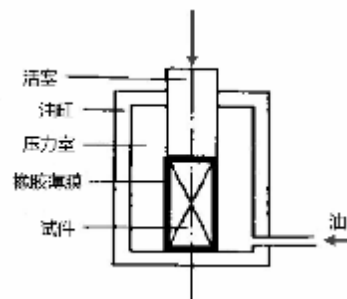
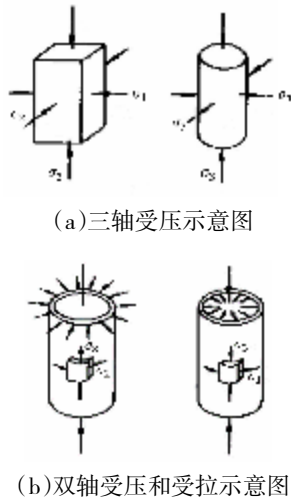


图 1 液压材料试验机

该仪器试件形状为棱柱或圆柱体,当必有二向应力相等,即 $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ 或 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 时,可做三轴受压试验,如图 2(a)所示,这就称为常规三轴试验。如果采用空心圆筒试件,则可进行二轴受压和拉压试验,如图 2(b)所示。



(a)三轴受压示意图

(b)双轴受压和受拉示意图

图2 常规试件形态

这类试验的主要优点是:可直接购置定型设备,经济快捷;侧向液压均匀,无摩擦;试验能力强。但是,其致命的缺点是不能做真三轴($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$)试验,也不能完成双轴受拉试验,更无法进行三轴拉压试验^[9]。

2.2 真三轴试验设备

混凝土实际的应力状态一般不对称,比如平面应变是三向应力状态。真三轴仪采用立方体试件,从三个主应力方向独立加载,能够研究混凝土在复杂应力状态下的力学特性^[9]。根据施加中主应力的不同方式,真三轴仪一般分为三种:柔性水平加压板真三轴仪、刚性水平加压板真三轴仪和刚柔复合加压真三轴仪。

此类设备的共同点是:在3个主应力方向都设置单独的承力架、液压缸与供油管路,可以独立施加三向主应力(拉或压)。由控制器给定试件3个方向的赢利何荷载的比例,因此可开展任意比例应力的二轴或三轴应力状态试验^[10],如图3所示。

按照真三轴仪的加荷方式,归纳起来主要有3种:应变控制的全部刚性的加荷方式,应力控制的全部柔性的加荷方式,复合控制的刚性和柔性的加荷方式,它们都有其优缺点。

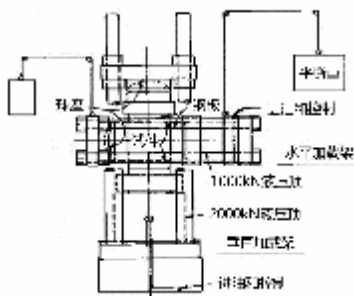


图3 真三轴试验装置示意图

2.2.1 全刚性加荷

刚性真三轴仪主要有英国 Pears 研制的剑桥真三轴仪

^[10]和瑞典 Kjellman 研制的真三轴仪^[11]。两片刚性板间可以相互错动而不顶托以适应土样变形,如图4所示是其二维示意图。

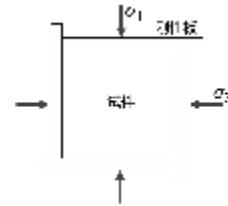


图4 全刚性加荷示意图

以全部刚性方法加荷时,试件应变各向均匀,能够产生较大轴向应变,可以精确测量应变,还能模拟复杂的应力应变路径,但它也有典型的缺点。如果某一方向有膨胀应变,则另两方向加荷板无法跟上,导致两相交刚性板间脱空; σ_1 向荷载由试件和 σ_3 方向的刚性板一起承受,而刚性板与试件间的摩擦力决定了 σ_3 方向的力,就难以精确地测定应力大小;刚性加荷板和试件间的摩擦力影响试件的变形;加荷板受力位移后,很难保证合力通过试件的中心。真三轴仪的三个方向都采用刚性板,受摩阻力影响较大。

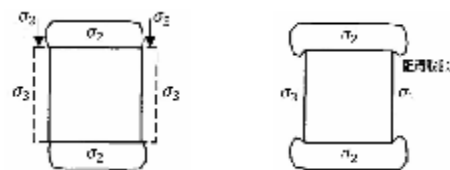
2.2.2 全柔性加荷

柔性的真三轴仪全由液体压力通过橡皮膜施加三个方向的荷载,主要有美国 Lo 研制的真三轴仪、墨西哥大学 Marsal 研制的真三轴仪和 Surrey 大学 Mengles 研制的真三轴仪等等^[11]。

全部柔性的加荷方式:加荷面上作用法向主应力,各面应力呈均匀分布状态,当没有较大边界干扰时三个方向均能产生最大应变,方便按预设的应力路径进行研究,可发生剪切挠曲,易量测变形。若不采取专门润滑措施,很难保证均匀应变,不进行特殊预防,就会存在边界干扰。

2.2.3 一个方向刚性加荷,两个方向柔性加荷

京都大学和同济大学的真三轴仪:在 σ_1 方向采用刚性板加荷,而 σ_2 和 σ_3 两个方向用液压或气压柔性加荷。这种仪器在 σ_3 方向加荷时,侧向无摩阻力;且各方向能自由变形,分布大体均匀。但其也存在一下几方面缺点:两个柔性面相交的棱角处于复杂受力状态;不能保证柔性荷载作用的面是平面。当 σ_2 向试样初始尺寸和加荷装置的宽度相等,在 σ_3 侧向产生膨胀时,试件在 σ_2 向多出加荷装置宽度的部分受力为 σ_3 ,下图5(a)所示;相反,如果 σ_2 向试样初始尺寸小于加荷装置的宽度, σ_3 向的膨胀变形会因为 σ_2 方向水囊的包裹而受阻,如图5(b)所示。



(a)水囊和试样宽度相等 (b)试样宽小于水囊宽

图5 σ_2 方向水囊存在的问题

2.2.4 两个方向刚性加荷, 一个方向柔性加荷

只在 σ_3 向用气压或水压柔性加荷, σ_1 和 σ_2 方向使用刚性加荷。采取这种加荷方式的真三轴仪有效避免了上几种仪器的不足, 但它存在的最大问题在于 σ_1 和 σ_2 方向的两刚性板会相互顶托。在加荷后, 试样的 σ_2 方向可能会膨胀变形, 此时在 σ_1 和 σ_2 方向的两个刚性板相接处可能分离, 但这部分面积实际很小, 影响几乎不计; 若试样的 σ_2 方向发生收缩变形, σ_1 和 σ_2 方向的两个刚性板就会相互顶托, 导致无法进行试验。目前有如下 2 个方法解决这一问题, 预留高度法和加可压缩力块法。

预留高度法: 使试样方向 σ_1 的高度比 σ_2 方向的刚性板尺寸大, 见下图 6, 并预留间隙, 这样在试样约束时, 两板就不会发生顶托。这种方法的主要问题在于 σ_2 不能加载在试件的全部受力面上, σ_3 作用在其上面缺失部位, 若试件受较大荷载, 会局部排出空隙部位。

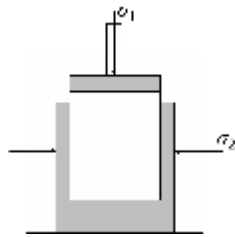


图 6 预留高度

加力块法: 加州大学把一种独特的软木加工成 σ_2 向的加力块。其垂直纤维方向较软, 压缩性高, 用于 σ_1 方向受荷; 而顺纤维方向的强度和模量高, 用于 σ_2 方向受荷。因此该加力块不但能适应 σ_1 向变形, 还能传递 σ_2 方向力, 和试样变形能基本同步。显然, 其 σ_1 方向也只能有限压缩, 同时需要承担部分竖向压力, 试样上部分 σ_1 减小。

以上 4 类真三轴仪互有优缺点, 综合考虑, 影响刚柔复合加压结构的试件受力变形因素小, 是最优方法。当然, 尚需进一步研究优化。

3 试验操作和相关技术措施

要进行混凝土多轴试验, 需要采取特殊措施解决一些试验技术难点, 以得到科学、精确的数据。混凝土多轴强度和变形试验基本按以下步骤进行^[4]:

3.1 消减试件表面摩擦和安装

试件表面受试验机钢承压板的横向摩擦约束, 可使混凝土的抗压强度提高, 试样各受力面的约束作用相互影响, 提高了混凝土试验强度。所以必须采取减摩措施来减小加载边界条件的影响来保证实验数据的准确。目前减摩措施主要有各种构造和材料的减摩垫层及利用刷形加载板两种。

若是受拉试件, 必须提前将加载板和受拉面粘贴好, 试件表面的清洁度直接决定了粘结质量的好坏。为防止试件受拉后在粘结缺陷处产生应力集中拉断试件, 必须要用粘

结胶全面覆盖试件。若是受压试件包括涂贴减摩材料, 安装试件等。在安装试件后, 调整加载板和试件的位置, 使试件居中。

3.2 施加初始压力(或拉力)

为保证试件受力均匀的要求, 试验前需要对试件机械磨面。当施加拉力时, 试件和加载板之间粘接胶的粘结强度要大于混凝土的抗拉强度。为使试件受力严合, 施加的初始力一般很小, 检查设备各部分是否运行正常。

3.3 记录初始读数

卸初始荷载为零, 将对荷载值和位移重新调零, 记下初始值。

3.4 正常加载

混凝土多轴试验中最主要的量测项目是试件 3 个方向的主应力值或荷载值。

完成初始准备工作后, 开始分级平稳等速加载, 记录应变值和荷载。

3.5 卸载

加载至试件破坏或者荷载加到仪器最大吨位时(这时试件可能尚未被破坏)卸载。为防止小比例向荷载由于卸得过快导致试件出现卸载裂缝, 甚至破坏, 卸载时大比例向荷载先卸载, 后视情况卸载小比例向荷载。

4 研究展望与结论

混凝土多维本构关系的试验与理论研究成果中, 有些比较成熟的结论已得到认同, 更多的还处于探索、深入阶段, 有待更多、更准确的试验和理论研究。真三轴仪虽然可以用来验证模型和总结规律等, 然而因为目前技术水平的限制, 还无法成为有效测定模型参数的方式。所以, 不论是检验调整既有模型, 还是建新模型, 都需要在真三轴试验基础上, 以常规试验测定参数为主, 才能充分发挥它的实用性。

参考文献:

- [1] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析 [M]. 清华大学出版社, 2003.
- [2] Shickert G. Design of an apparatus for short time testing of concrete under triaxial load [J]. Special Publication, 1972, 34: 1355-1376.
- [3] Ceb-Fip M C. Design Code [J]. Comite Euro International du Beton, 1990.
- [4] Gerstle K B, Zimmerman R M, Winkler H, et al. Behavior of concrete under multiaxial stress states [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1980, 106(6): 1383-1403.
- [5] 张坤勇, 殷宗泽, 徐志伟. 国内真三轴试验仪的发展及应用 [J]. 岩土工程技术, 2003 (5): 289-293.
- [6] Rosenthal I, Glucklich J. Strength of plain concrete under biaxial stress [C]//Journal Proceedings. 1970, 67(11): 903-914.

[7] Newman J B. Apparatus for testing concrete under multiaxial states of stress[J]. Magazine of Concrete Research, 1974, 26(89): 229-238.

[8] Bresler B, Pister K S. Strength of Concrete Under Combined Stresses* [C]//Journal Proceedings. 1958, 55(9): 321-345.

[9] Launay P, Gachon H. Strain and ultimate strength of concrete under triaxial stress [J]. Special publication, 1972, 34: 269-282.

[10] HUANG Wenxi. Engineering properties of soils [M]. Beijing: Water Resources and electric power Press,

1981.

[11] W. Kjellman, "Report on an Apparatus for Comprehensive Investigation of the Mechanical Properties of Soils," Proceedings, First International Conference on Soils Mechanics, Vol. II, 1936, pp. 16-20.

[12] Lade P V, Duncan J M. Cubical triaxial tests on cohesionless soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1975, 101(ASCE# 11269 Proceeding).

[13] 王旭虹, 汪基伟. 混凝土多轴强度与变形特性的试验方法[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(5): 16-17.