

文章编号:0253-9993(2013)S2-0337-06

# 氯氧镁水泥钢筋混凝土轴压构件力学性能

乔宏霞<sup>1</sup>, 刘尧<sup>2</sup>, 周茗如<sup>1</sup>, 余红发<sup>3,4</sup>, 董金美<sup>3</sup>, 冯坚<sup>5</sup>

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 东风设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 3. 中国科学院 青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008; 4. 南京航空航天大学 航空宇航学院 土木工程系, 江苏 南京 210016; 5. 青海省建筑建材科学研究院, 青海 西宁 810008)

**摘要:**基于近年来氯氧镁水泥基材改性研究的进展,在当前已解决镁水泥吸潮返卤、腐蚀钢筋等问题的前提下,制作氯氧镁水泥钢筋混凝土轴心受压构件并实验测定承载力及力学曲线。依据实验数据,采用现有混凝土结构规范方法推定混凝土各项力学指标(如弹性模量、抗压强度标准值等),进一步得出构件承载力理论值,并与实测构件承载力对比。同时,依据测得的基本力学指标,采用有限元软件 ADINA,选用规范给出的应力-应变关系建立有限元模型,模拟构件加载-破坏全过程。结果表明,采用规范公式计算的构件承载力与实验数据吻合,且有限元模拟的构件力学行为与实验结果拟合良好,模拟极限承载力数据亦与实验数据吻合。这些事实充分证明,运用现有规范预测氯氧镁水泥钢筋混凝土构件力学性能是可行的。

**关键词:**氯氧镁水泥;钢筋混凝土;结构构件;承载力;有限元法

**中图分类号:**TU528 **文献标志码:**A

## Mechanical performance of axially loaded structural components made of magnesium oxychloride cement concrete

QIAO Hong-xia<sup>1</sup>, LIU Yao<sup>2</sup>, ZHOU Ming-ru<sup>1</sup>, YU Hong-fa<sup>3,4</sup>, DONG Jin-mei<sup>3</sup>, FENG Jian<sup>5</sup>

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Dongfeng Design Institute Co., Ltd. (Group), Wuhan 430056, China; 3. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 4. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 5. Qinghai Scientific Institute of Architectural and Build Materials, Xining 810008, China)

**Abstract:** Based on the modification research of Magnesium Oxychloride Cement (MOC) in recent years, and the fact of successfully overcoming the problems of durability, scumming and corrosion on rebar recently, this study made the reinforced MOC structural component and conducted testing on its mechanical performance under axially loading. The experiments were designed to test the bearing capacity and mechanical behavior. According to the test results, the parameters (Young's modulus, axial compressive strength, etc.) of MOC concrete were estimated using the method described in the Code for Design of Concrete Structures, and also the bearing capacity was calculated and compared with the experimental results. In addition, based on the parameters obtained and the constitution relation given in the Code, a finite element modeling was performed using ADINA software. The comparison of all the results demonstrates a high consistency, which verifies the feasibility of predicting the mechanical properties of MOC structural components with the current Code.

**Key words:** magnesium oxychloride cement; reinforced concrete; structural component; bearing capacity; finite element analysis

青海盐湖地区作为我国传统的钾镁盐矿资源开发区,其提纯钾制造钾肥产业发达,年产量达

收稿日期:2012-03-15 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51168031);青海省中小企业技术创新补助资金资助项目(2011-G-C04);甘肃省高校基本科研业务费专项资金项目

作者简介:乔宏霞(1977—),女,山西应县人,副教授,博士后。E-mail: qiaohx7706@163.com。通讯作者:刘尧(1986—),男,硕士研究生。E-mail: lyfut86@gmail.com

到 200 万 t,为我国最大的钾肥生产基地。在工业生产中大量产生的富含氯化镁的废料未能有效回收利用,排放到环境中,对该地区生态环境造成了危害,俗称“镁害”<sup>[1]</sup>。我国煤炭行业从 1993 年开始研究并广泛应用镁水泥制品,其中最具代表性的是各种代木支护构件,如矿山用菱镁混凝土背板、沟盖板和井下带式输送机用挡煤板,取得良好的社会与经济效益<sup>[2]</sup>,并已出台行业标准<sup>[3]</sup>;樊文熙等<sup>[4]</sup>在焦作矿务局焦西矿进行了镁水泥喷射混凝土的现场试验,证明在矿区应用镁水泥喷射混凝土不但强度高,而且回弹率低,粉尘小。科研人员希望利用氯化镁和氧化镁水化反应得到轻质高强的氯氧镁水泥,并对其进行一系列的改性研究,通过消耗含镁废料来解决“镁害”带来的环保问题,同时为煤炭工业生产和基础设施建设创造价值。

本文采用涂层材料对钢筋进行了保护处理,拟在氯氧镁水泥混凝土研究的基础上<sup>[5-6]</sup>,参考混凝土结构的理论,研究氯氧镁水泥钢筋混凝土结构构件的力学性能,以期制作性能更加稳定、承载力更佳的镁水泥混凝土构件,进一步扩大镁水泥制品在生产建设中的应用范围。

## 1 原材料及试验方案

### 1.1 试验原材料

工业氯化镁,主要成分为氯化镁晶体,化学式为  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ,由青海格尔木铁源钾镁有限公司生产,主要成分见表 1。轻烧氧化镁,产自河北邢台市兴达环保科技有限公司,主要成分为氧化镁 ( $MgO$ ),主要成分见表 2。

表 1 工业氯化镁化学成分

$MgCl_2$	$SO_4^{2-}$	K+Na	$CaCl_2$	其他
98	0.2	0.7	0.2	0.9

表 2 轻烧氧化镁化学成分

MgO	CaO	Fe	盐酸不溶物	其他
90	2.5	1.0	2.0	2.0

矿物掺合料,分为粉煤灰、硅灰、矿粉 3 种,主要用于改善镁水泥混凝土的力学性能及耐久性<sup>[7]</sup>。化学组分见表 3。

表 3 矿物掺合料化学成分

名称	$Fe_2O_3$	$SiO_2$	$Al_2O_3$	CaO	$TiO_2$	$SO_3$	MgO
粉煤灰	12.64	44.36	25.13	11.94		1.23	0.82
硅灰	0.52	92.8	0.76	0.31			0.53
矿粉	2.48	32.60	12.78	43.53	0.48		8.36

实验使用文献[8]中所采用的复合抗水外加剂,代号为 MP。减水剂采用由庆阳科盾公司生产的萘系减水剂。砂子采用甘肃兰州市黄河河砂,细度模量为 2.6,石子采用碎石石。

### 1.2 试验方案

试验中首先称取定量的各原材料混合并干拌 1 min,然后加入配制好的氯化镁溶液 (MCS) 拌制混凝土,控制溶液浓度和用量使  $MgO/MgCl_2$  摩尔比在 10 左右,试验配合比见表 4。

表 4 构件试验混凝土配合比设计

Table 4 Mixture proportions for MOC concrete of structural components

类别	掺合料/%							MCS/L
	氧化镁	复合抗水剂	粉煤灰	硅粉	矿粉	砂子	石子	
FMOC	14	2.6	2.6			32	48	2.0
SMOC	14	2.6		2.6		32	48	2.0
SGMOC	14	2.6			2.6	32	48	2.0

试验所作构件为短柱尺寸为  $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 900\text{ mm}$ 。钢筋保护层取 10 mm,钢筋分别用静电喷涂环氧树脂 (Epoxy)<sup>[9]</sup>、达克罗涂料 (Dacromet)<sup>[10]</sup> 和磷酸盐 (Phosphate)<sup>[11]</sup> 进行表面防腐蚀处理。梁柱截面如图 1 所示。混凝土拌制完毕后,按照所选用矿物掺合料不同,分别注入构件模具中和标准试块模具 ( $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ ) 中振捣密实并同期养护。

构件和标准试块均养护 1 d 后拆模。养护至 28 d 后,取出标准试块,测定同期抗压强度。同时,在已成型的构件表面中部黏贴电阻应变片,应变片位置如图 2 所示。将应变片用导线连接到 xl3403b6 型应变仪,构件置于 30 t 压力机下进行轴向加载,以 5 kN 为一荷载步,每荷载步稳定 2 min,直至破坏。记录每个荷载步内的应变仪数据并测定最终构件承载力。

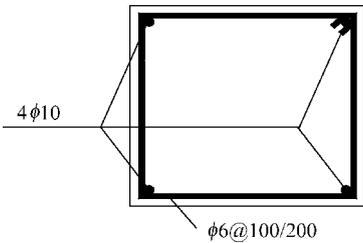


图 1 构件截面

Fig. 1 Diagram of cross-section

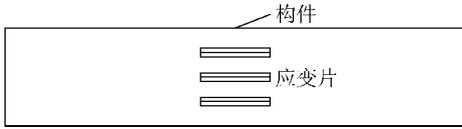


图 2 构件侧面

Fig. 2 Overview of the column

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 基本力学参数计算

在进行基本参数的计算时,查阅了相关的资料以及氯氧镁水泥混凝土制品的相关行业规范,如 CECS 95—97《玻璃纤维氯氧镁水泥通风管道技术规程》、JC/T 568—2007《氯氧镁水泥板块》等。可以看出,目前菱镁制品行业的规范、规程不太完善,现有规程大多是对某一种已经广泛使用的产品(如板、管道等)进行基本的配方、耐水性改性提出规范,极少涉及基本力学性能,或者仅仅涉及到具体构件在特定条件下的力学性能,对于材料本身的基础研究并无普遍意义;另外,作为一种混凝土材料,氯氧镁水泥混凝土的基本力学参数若能用现有混凝土规范的相关内

容进行推导,并与实验所得的数据进行对比分析,给出可行性,则意味着镁水泥混凝土引入建筑结构的过程可以借鉴现有混凝土结构的完整、成套理论体系成果,必将大大推动这一进程。基于以上设想,笔者选用《混凝土结构设计规范》中的相关理论,对氯氧镁水泥的各项参数进行推导计算,以供后续的试验、分析研究。

汇总试验数据并按照矿物掺合料种类分为粉煤灰混凝土(FMOC)、硅粉混凝土(SMOC)和矿粉混凝土(SGMOC)。根据《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010 第 4.1.1 条<sup>[12]</sup>,混凝土强度等级应按照立方体抗压强度标准值确定,具体指按标准方法制作并养护的具有 95% 保证率的 28 d 抗压强度。按照规范公式,计算得混凝土强度各项参数,见表 5。对比普通波特兰混凝土抗拉强度标准值和设计值,实测混凝土强度值均达到 C35 以上,最高达到了 C55。弹性模量值接近 C30 混凝土( $3.00 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ )。根据文献[13],测得的氯氧镁水泥混凝土实测弹性模量值为  $2.56 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ,小于本文理论计算值和 C30 混凝土数据,而混凝土极限强度数据均优于 C30 混凝土,说明氯氧镁水泥混凝土比普通混凝土具有更好的韧性,且用规范公式估算的镁水泥混凝土强度略偏于保守,是可行的。按照混凝土基本应力-应变关系的理论,这一结论意味着在达到混凝土极限强度之前,镁水泥混凝土在绝大多数弹性工作状态将表现出与普通混凝土相近或更佳性质,为在一般结构设计中采用普通混凝土基本理论描述氯氧镁水泥混凝土提供了可靠保证。

表 5 氯氧镁水泥混凝土应力-应变关系曲线参数计算

Table 5 Calculated parameters for strain-stress curve of MOC concrete

类别	标准差/( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ )	$f_{cu,m}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	$\varepsilon_u$	$\sigma_u$	$\varepsilon_0$	$n$	$f_{ck}$	$f_{tk}$	$E_c$
FMOC	6.74	29.69	0.003 6	6.49	0.001 8	2.33	19.03	2.21	24 856.88
SMOC	5.70	31.31	0.003 5	8.24	0.001 9	2.31	24.95	2.56	27 849.01
SGMOC	2.59	30.71	0.003 5	10.85	0.001 9	2.32	29.14	2.79	29 493.18

### 2.2 混凝土及钢筋应变发展

构件加载过程中应变仪记录的数据按通道和应变片位置(Zone)分类记录并绘制荷载-应变曲线。各种配比的混凝土典型荷载-应变曲线如图 3 所示。掺加各种矿物掺合料的氯氧镁水泥混凝土的荷载-应变曲线呈现出与典型混凝土基本相同的趋势。典型的混凝土应力-应变曲线包括上升段和下降段 2 个部分。在上升阶段应力较小时,一般可以视作线弹性体,超过这一阶段后开始呈现非线性特点,表现为

应力-应变曲线逐渐开始弯曲,斜率开始变小。当荷载加至峰值,混凝土应力达到峰值,曲线开始下降,在下降段,曲线渐渐趋于平缓,并存在一个反弯点。在这个过程中,应变始终随荷载呈现上升趋势,但是加载后期上升逐渐减缓。

根据应变仪记录的数据,钢筋典型荷载-应变曲线如图 4 所示,按达克罗(Dacromet)、环氧树脂(Epoxy)和磷酸盐(Phosphate)钢筋涂层分类。可见钢筋的应变随着荷载变化基本呈现线性趋势。由于钢筋

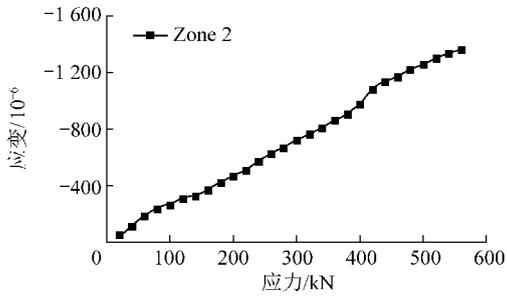


图3 混凝土荷载-应变曲线

Fig. 3 Load-strain curve of concrete

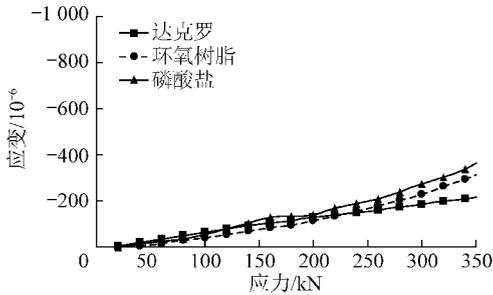


图4 钢筋典型荷载-应变曲线

Fig. 4 Typical load-strain curves of rebars

的极限应变要大于混凝土,因而在钢筋与混凝土共同作用的轴心受压构件中,钢筋的抗压承载力并未完全发挥,较低的应变导致钢筋尚处在应力-应变曲线中的弹性上升段。在图4中,分别以3种符号表示了3种涂层钢筋(达克罗、环氧树脂、磷酸盐涂层钢筋)在同一种镁水泥混凝土材料中(粉煤灰氯氧镁水泥,即FMOC)的荷载-应变曲线。可以看出,3种涂层钢筋的曲线在加载历程80%以内趋势几乎重合,这说明钢筋涂层的种类并未对钢筋的受力状况产生显著影响,因而涂层法改善钢筋耐腐蚀性能在力学上是可行的。

### 2.3 构件极限承载力

根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》6.2.15条,对于轴心受压构件,有

$$N \leq 0.9\varphi(f_c A + f'_y A'_s) \quad (1)$$

式中, $N$ 为轴向压力设计值; $\varphi$ 为钢筋混凝土构件的稳定系数; $f_c$ 为混凝土轴心抗压强度设计值; $A$ 为构件截面积; $A'_s$ 为全部纵向钢筋的截面积。

实验研究中,为了研究构件的实际工作性能,如承载力极限值的测定,一般将构件加载至破坏,此时构件中混凝土应力一般将会达到强度极限值,而不会留有任何强度储备。所以本文计算将会采用混凝土抗压强度标准值 $f_{ck}$ 代替规范中混凝土抗压强度设计值 $f_c$ 。根据式(1),分别代入镁水泥混凝土强度设计值、标准值,计算各配合比镁水泥钢筋混凝土轴心受压构件极限承载力,同时与试验结果进行对比,见表

6。可以看到,各类镁水泥混凝土轴心受压构件承载力理论计算值与试验值均较为接近,而承载力理论计算值是基于本文2.1节计算的混凝土参数得出,这从侧面印证混凝土结构规范规定的混凝土材料基本理论及轴心受压构件承载力理论适用于氯氧镁水泥混凝土。

表6 氯氧镁水泥钢筋混凝土短柱承载力计算值

Table 6 Theoretic bearing capacity of MOC concrete short column

类别	FMOC		SMOC		SGMOC	
	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值
$N_{ck}$	451.86	480	556.59	560	571.65	522

注: $N_{ck}$ 为承载力。

## 3 有限元模拟与分析

### 3.1 有限元模型的建立与求解

采用有限元软件 ADINA<sup>[14]</sup>建立混凝土柱的模型,分析其加载的全过程,并验证全过程中规范公式描述氯氧镁水泥混凝土的精确性。采用前文规范公式推导得来的基本力学参数,用 ADINA 软件建立混凝土和钢筋的材料本构模型。这里混凝土的破坏准则采用 Kupfer<sup>[15]</sup>建议的空间曲面模型。输入材料参数后,用 ADINA 生成混凝土应力-应变曲线。该曲线即《混凝土结构规范》给出的公式所描述的氯氧镁水泥混凝土应力-应变关系。由于3种配比材料的氯氧镁水泥混凝土参数并不相同,因此分别有3种混凝土应力-应变关系,曲线基本趋势不变,但是其混凝土极限拉压应力、弹性模量等值存在差异。钢筋参考《混凝土结构设计规范》提供的参数建立模型,根据规范,HPB235级钢筋采用弹性模量为 $2.1 \times 10^5$  MPa。

模型底面施加轴向位移约束,顶面施加荷载。该模型将会模拟构件从加载到破坏的过程,是非线性分析,因此采用大位移/小应变设置。求解时采用 Sparse 求解器,开启自动时间步,采用 Full Newton 迭代方法,忽略3个转动自由度,进行求解。

### 3.2 后处理

运算完成后,利用 ADINA 后处理界面生成应变云图进行查看,如图5所示。可以观察到柱应变在端部最大,且在轴向力作用面中部集中最多。应变由端部向跨中逐渐减小。通过后处理的数据统计,最大压应变发生在模型的单元353,位于构件加载面上,应变大小为-0.002 448,大于混凝土达到最大压应力时的应变值-0.002,即已经进入非线性;最大压应变小于材料设定的极限压应变-0.003 3,表示材料尚在规定的应力-应变曲线以内。

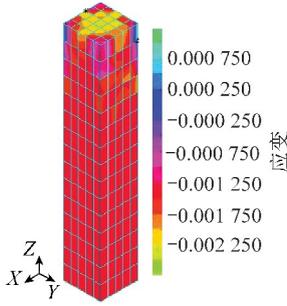


图 5 柱应变云图

Fig. 5 Band plot of column

3.3 模拟结果与分析

用 ADINA 软件定义不同荷载以寻求使得构件发生破坏的极限荷载,并与试验数据、规范公式理论计算数据进行拟合、对比,按混凝土种类分类列于表 7。

表 7 氯氧镁水泥钢筋混凝土短柱承载力

Table 7 Bearing capacity of MOC RC short column

kN			
项目	理论计算值	试验数据	ADINA 模拟值
FMOC	451.86	480.00	427.00
SMOC	556.59	560.00	562.00
SGMOC	571.65	560.00	505.00

从表 7 可以看到,各数值之间差异最大值为 12%,为粉煤灰氯氧镁水泥混凝土实验数据与有限元模拟数据差值。大部分数据之间浮动率在 5% 左右,在允许误差范围内。理论计算值与实验数据接近程度较高。柱构件理论计算值、实测数据与有限元模拟结果具有较高的一致性。这主要是因为试验中荷载步控制得当,试验数据较为接近材料及构件的理论值;构件设计合理,受压钢筋、箍筋均能有效发挥其作用;按照试验数据选取有限元分析的参数,使得软件在较大程度上有效模拟构件中混凝土的真实工作状态,使得最终破坏时混凝土构件承载力基本与实验数据和理论计算值一致。

加载过程轴心受压构件混凝土、钢筋荷载-应变曲线分别进行了拟合。由于轴心受压构件中各部分混凝土均受压,选取各部分混凝土有限元分析与试验数据的平均值进行对比。

粉煤灰氯氧镁水泥混凝土的应变数据拟合曲线如图 6(a) 所示。

其中,Concrete 1, Concrete 2 分别代表柱前后两侧面应变片测得的应变值。从图中可以看出,在荷载为 200 kN 以下时,应变曲线几乎完全吻合,表示有限元模拟的应变发展完全符合试验事实。随着荷载加大,2 条试验曲线逐渐偏离 ADINA 模拟曲线,但是可

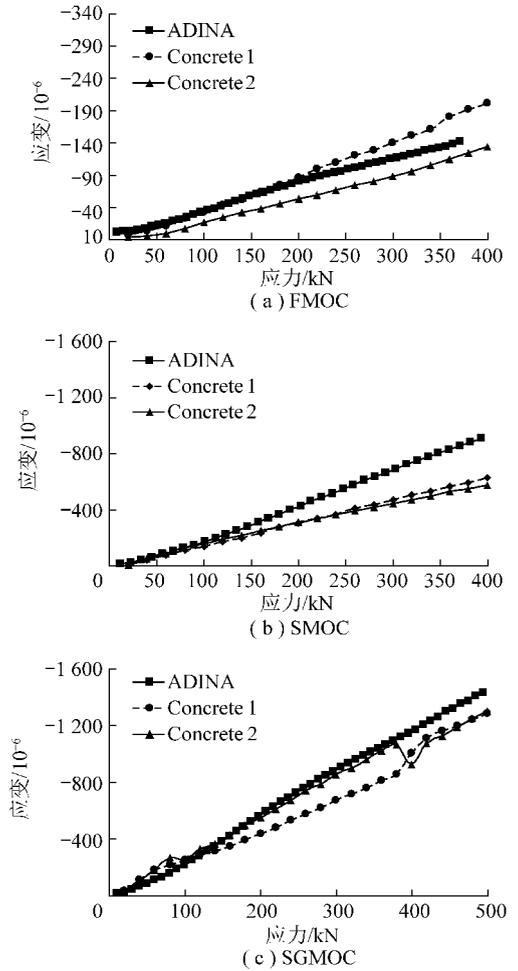


图 6 矿粉氯氧镁水泥混凝土柱荷载-应变拟合曲线  
Fig. 6 Load-strain fitting curves of MOC concrete column

以看到,加载后期模拟曲线在两条试验曲线中间部位,表示模拟曲线基本与后期全截面混凝土平均应变相同。3 条曲线的应变发展趋势都以线性为主,且早期应变发展很慢、后期应变增速加大,符合一般的混凝土应变发展趋势。

硅粉氯氧镁水泥混凝土轴心受压构件混凝土应变数据拟合曲线如图 6(b) 所示。图线表明,混凝土早期应变发展依然以较高精确度拟合,到加载中期,有限元模拟的曲线即与试验数据的 2 条曲线开始偏离,而试验曲线仍以较高精确度相互拟合。各曲线应变发展为近似线性规律,曲线斜率有微小的增量。到加载末期,混凝土的最终应变为 0.001,试验部位混凝土未达到混凝土的理论极限压应变。

矿粉氯氧镁水泥混凝土轴心受压构件混凝土应变数据拟合曲线如图 6(c) 所示。由图中数据可以看到,由于显著的构件承载力提升,加载时间步延长,应变值相应增大,最终应变达到了 0.012。曲线标号 Concrete 2 与 ADINA 模拟曲线在加载时程超过 75% 的范围内均保持了高度的拟合。曲线 Concrete 1 虽

未达到其拟合程度,但是在加载初期仍然可见较高的拟合度。

综合以上,根据本节构件试验数据与 ADINA 有限元模拟结果的对比拟合,可以看到,2 组数据曲线总体上经历了相同的发展趋势,ADINA 能较好地模拟出试件混凝土从加载到破坏全过程中所经历的应变发展过程。

## 4 结 论

(1)有限元软件中选取的混凝土参数可以较好地模拟镁水泥混凝土构件的试验事实,模拟的构件极限承载力、加载各阶段的受力情况均有较高的实际应用价值。规范公式所描述的普通混凝土力学性能的数学模型对氯氧镁水泥混凝土仍然具有适用性。

(2)氯氧镁水泥混凝土作为一种建筑材料,符合规范的基本材料规定,在受压承载力方面表现出良好的特性,且在受荷过程中的表现与普通混凝土具有较高一致性。氯氧镁水泥钢筋混凝土构件在结构中的表现仍然在普通混凝土结构工程实际的可控范围内,现有的混凝土结构类似构件的工程经验、实验事实均可以用来对照、预测氯氧镁水泥混凝土结构的力学行为。

## 参考文献:

[1] 陈颖林,吕丹桂,陈洪江.青海盐湖镁资源的综合利用[J].浙江化工,2011(6):21-24.  
Chen Yinglin, Lü Dangui, Cheng Hongjiang. Comprehensive utilization of the Qinghai salt lake's magnesium resources[J]. Zhejiang Chemical Industry, 2011(6):21-24.

[2] 郭建明.矿用改性菱镁混凝土制品质量影响因素及质量保证措施[J].建井技术,1998,19(3):33-35.  
Guo Jianming. Mine modified magnesite concrete products quality impact factors and quality assurance measures[J]. Well Construction Technology, 1998, 19(3):33-35.

[3] MT/T 375.1—1994.矿用菱镁混凝土制品通用技术条件[S].  
MT/T 375.1—1994. Mining magnesite concrete products-general technical conditions[S].

[4] 樊文熙,李毓琼,申义青,等.氯氧镁水泥喷射混凝土研究[J].煤炭学报,1995,20(3):317-321.  
Fan Wenxi, Li Yuqiong, Shen Yiqing, et al. Magnesium oxychloride cement shotcrete[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(3):317-321.

[5] 刘尧,乔宏霞,周茗如,等.  $MgCl_2$  溶液浓度对镁水泥混凝土优选配比强度的影响[J].盐湖研究,2011,19(4):43-48.  
Liu Yao, Qiao Hongxia, Zhou Mingru, et al. Influence of MCS concentration on strength of magnesium oxychloride cement concrete with optimally designed mixture proportion[J]. Journal of Salt Lake

Research, 2011, 19(4):43-48.

- [6] 乔宏霞,刘尧,周茗如.改性氯氧镁水泥砂石混凝土强度的试验研究[J].硅酸盐通报,2012,31(3):636-640.  
Qiao Hongxia, Liu Yao, Zhou Mingru. Experimental investigation on strength development of modified magnesium oxychloride cement concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(3):636-640.
- [7] 李战发,陈凯,崔洪涛,等.含活性  $SiO_2$  物质对提高菱镁水泥制品耐水性能的研究[J].21世纪建筑材料,2010(5):14-16.  
Li Zhanfa, Chen Kai, Cui Hongtao, et al. Research on improving the water resistance of the magnesite cement products containing the active  $SiO_2$  substances[J]. 21 Century Building Materials, 2010(5):14-16.
- [8] 余红发,李生堂,何庆英,等.  $MgO-SF-FA-MgCl_2-H_2O$  胶凝材料体系的长期强度及耐久性研究[J].硅酸盐学报,2000,28(S1):33-37.  
Yu Hongfa, Li Shengtang, He Qingying, et al. Research on long-term strength and water-resistance of  $MgO-SF-FA-MgCl_2-H_2O$  system cementitious materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2000, 28(S1):33-37.
- [9] 孔爱平,王军.基于化工设备金属腐蚀及环氧防腐涂层的应用研究[J].辽宁化工,2007,36(5):330-333.  
Kong Aiping, Wang Jun. The metal corrosion of chemical equipments and application of epoxy corrosion coating[J]. Liaoning Chemical Industry, 2007, 36(5):330-333.
- [10] 毛刚红.新型无铬达克罗防腐材料的电化学行为[D].西安:西北大学,2009.  
Mao Ganghong. New chrome-free the Dacromet the electrochemical behavior of the anti-corrosion materials[D]. Xi'an: Northwestern University, 2009.
- [11] 赵强.磷酸盐涂层材料的改性和应用研究[D].天津:天津大学,2009.  
Zhao Qiang. Phosphate coating materials modified and applied research[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [12] GB 50010—2010.混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2010. Concrete structure design specification[S].
- [13] 黄宗宇.菱镁制品在建筑工业使用中的技术改进[J].无锡职业技术学院学报,2005,4(1):25-27.  
Huang Zongyu. Diamond magnesium product's technological improvement in architecture industry[J]. Journal of Wuxi Institute of Technology, 2005, 4(1):25-27.
- [14] 熊玉春,房营光. ADINA 有限元软件中材料本构的二次开发[J].岩土力学,2008,29(8):2221-2225,2240.  
Xiong Yuchun, Fang Yingguang. Secondary development of material constitutive model in ADINA software[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8):2221-2225, 2240.
- [15] 李杰,吴建营.混凝土弹塑性损伤本构模型研究 I:基本公式[J].土木工程学报,2005,38(9):14-20.  
Li Jie, Wu Jianying. Elastoplastic damage constitutive model for concrete based on damage energy release rates, part I: basic formulations[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(9):14-20.