第 35 卷 第 1 期
2013 年 3 月

地 震 工 程 学 报
CHINA EARTHQUAKE ENGINEERING JOURNAL

Vol. 35 No. 1
March, 2013

施工过程中隔震层钢筋砼梁变形初步分析①

杜永峰[1,2]，魏仲彬[1]

（1. 防震减灾研究所，兰州理工大学，甘肃 兰州 730050；
2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心，兰州理工大学，甘肃 兰州 730050）

摘 要：以某隔震工程隔震层梁出现裂缝为研究背景，运用有限元分析软件 SAP2000 对隔震结构和非隔震结构进行了施工过程模拟，分析对比了两种结构在施工过程中隔震层钢筋砼梁的内力和变形规律，对隔震层梁裂缝形成的原因进行了分析，并运用有限元分析软件 ANSYS 对该原因下梁的裂缝进行了数值模拟。结果表明隔震层梁出现的裂缝是由施工荷载、温度变化和混凝土收缩共同作用引起的：建筑物施工期间结构刚度尚处在成长阶段，受到支撑变形、温度变化和混凝土收缩等不利作用对结构长期性能和耐久性产生负面影响。对于两种结构，常规算法由于不考虑框架的生成和加载历史，算得的内力值均偏小；而隔震结构偏小的幅度更大，因而更危险。计算同时表明，在结构施工过程中，各层梁当拆除其支撑、模板和浇筑其上一层时，其内力达到最大值；其中隔震层梁内力最大，为隔震结构在施工中的薄弱部位。给出了对其加强保护的施工建议。

关键词：隔震结构；钢筋砼梁；阶段施工；变形分析；裂缝模拟；MPC

中图分类号：TU352.1+2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－0844(2013)01－0029－06

DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2013.01.0029

Preliminary Analysis on Deformation of Reinforced Concrete Beam of Isolation Layer during Construction Process

DU Yong-feng[1,2], WEI Zhong-bin[1]

(1. *Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou, Gansu* 730050, *China*;
2. *Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou, Gansu* 730050, *China*)

Abstract: This paper simulated the construction process of isolated and traditional seismic-resistant structures. The internal force and deformation law of the girder in the isolation layers were analyzed in the two types of structures during construction. In addition, the reason for girder cracking in the isolation layers was examined by using the finite element method (FEM) to simulate cracking. The results show that girder cracking in the isolation layers is caused by construction loads, temperature fluctuation, and concrete shrinkage. During the period of construction, structural stiffness develops, which causes adverse reactions of shore deformation, temperature fluctuation, and concrete shrinkage to produce negative effects on long-term performance and durability of the structure. Such factors significantly affect both isolated and traditional seismic resistant structures. Compared with the traditional seismic resistant structure, the isolated structure, which has larger load effects, is more likely to encounter safety issues during the construction period. Each floor's internal forces reach the maximum when the templates of the floor beam are removed and concrete is poured on the structure. The isolation layers are the weakest parts

① 收稿日期：2013-03-20
基金项目：国家自然科学基金(51178211)
作者简介：杜永峰(1962－)，男(汉族)，甘肃正宁人，教授，博士，博士生导师，主要从事结构抗震和减灾控制研究.

and should therefore be given sufficient attention.

Key words: Isolated structure; Reinforced concrete beam; Stage construction; Deformation analysis; Crack simulation; Multipoint constraist(MPC)

0 引言

施工过程中结构是逐层增加的，结构自重只作用于已施工完成的结构上，对上层结构内力并没有影响。而常规设计方法是以整体结构为计算模型，一次性施加荷载，算得的结果偏于不安全。研究表明，建筑施工期间时变结构承担的施工荷载效应有时会超过正常设计荷载效应，由此导致建筑施工期间的混凝土质量问题和安全事故高发。而近些年发展起来的隔震建筑由于结构体系相对较新，加上人们对其特点的认识还有待进一步深化，近年来在隔震结构施工中频频出现一些质量问题。本文以某隔震工程隔震层梁开裂为例，利用有限元数值模拟，并考虑结构体系的时变特性，对其开裂原因进行分析，提出了隔震结构在施工过程中需要注意的问题。

关于施工期钢筋混凝土结构特性的计算研究，刘西拉和陈宇钧[1]对现浇钢筋混凝土框架结构按照施工过程进行了内力分析；李瑞礼和曹志远[2]采用超级有限元偶合法来模拟高层结构的施工过程；方东平等[3]提出了新的钢筋混凝土板柱结构、框架结构和剪力墙结构在施工期的结构模型和分析方法；赵挺生等[4]将现浇钢筋混凝土结构施工阶段简化为新楼层混凝土浇筑和时变结构体系的底层模板支撑拆除 2 道工序；薛娜等[5]利用施工过程时变有限元分析方法对结构施工内力进行几何非线性分析；徐蓉和贺明华[6]应用数值分析软件对一三层板柱混凝土结构的施工全过程进行了模拟分析；赵军和杨绿峰[7]利用离散型时间冻结的方法，建立了施工期结构分析模型，提出了施工期结构内力分析的相应算法。

本文结合实际工程，采用先整体后局部的分析方法，先对隔震结构和非隔震结构施工过程进行计算，分析两种工况下隔震层梁的内力、变形规律，并进行对比；然后将隔震层梁作为子结构分离出来，将整体分析所得隔震层梁端内力反向施加于隔震层梁的端部，作为子结构边界端部的外力；对隔震层梁的裂缝进行数值模拟，并与现场测得的裂缝形态进行对比。

1 数值分析方法

1.1 施工的力学原理[8]

施工期的钢筋混凝土结构是结构模型、材料特性、边界条件、荷载状况等都随着时间不断变化的时变结构。

采用离散性时间冻结法近似处理，将时变结构视为一序列时不变结构组成，对每一时不变结构进行静力分析，然后将获得的内力场和位移场进行累加，即可获得结构的全过程分析结果。根据框架结构施工期特点，本文采用层为时变单位，n 层时具有 n 个时变结构模型。

框架结构第 i 层施工完成时，形成第 i 个时变结构模型，其在第 i 层梁、柱、板等荷载作用下的有限元格式为

$$[\boldsymbol{K}]_i\{\boldsymbol{a}\}_i = \{\boldsymbol{F}\}_i \tag{1}$$

$$[\boldsymbol{K}]_i = \int_v [\boldsymbol{B}]_i^T[\boldsymbol{D}]_i[\boldsymbol{B}]_i \mathrm{d}v \tag{2}$$

式(1)、(2)中，$[\boldsymbol{K}]_i$ 为第 i 时变结构整体弹性刚度矩阵；$\{\boldsymbol{a}\}_i$ 为第 i 时变结构位移向量；$\{\boldsymbol{F}\}_i$ 为第 i 时变结构力向量；$[\boldsymbol{D}]_i$ 为第 i 时变结构弹性矩阵；$[\boldsymbol{B}]_i$ 为第 i 时变结构几何矩阵。

对每一时不变结构求得的位移场、应变场合内力场，进行累加即可获得结构的全程分析结果：

$$\{\boldsymbol{a}\} = \sum^n \{\boldsymbol{a}\}_i$$

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \sum^n \{\boldsymbol{\varepsilon}\}_i$$

$$\{\boldsymbol{\sigma}\} = \sum^n \{\boldsymbol{\sigma}\}_i \tag{3}$$

1.2 基本假定

为简化计算，施工期结构分析采用如下基本假定：(1)结构处于线弹性工作阶段；(2)楼板在自身平面内刚度无限大；(3)临时支撑与上层模板和下层楼板间的连接视为铰接；(4)将钢支柱简化为链杆。

1.3 温度及收缩应力当量

将混凝土的收缩变形转化为当量温差施加到模型中进行计算。混凝土温差自由应变为

$$\varepsilon_{\Delta T} = \alpha\Delta T \tag{4}$$

式中，$\alpha=1\times10^{-5}$℃为混凝土线膨胀系数；混凝土收缩当量温差为 $\Delta T=\varepsilon_y/\alpha$(℃)。

考虑水泥成分、细度、骨料材质、级配、水泥含量、水灰比等多种影响因素的混凝土收缩应变值为：

$$\varepsilon_y(t) = \varepsilon_y^0 \cdot M_1 \cdot M_2 \cdots M_n(1-\mathrm{e}^{-bt}) \tag{5}$$

式中，$\varepsilon_y(t)$为龄期为 t 天时的收缩应变；b 为经验系数，一般取 0.01。养护较差时取 0.03；ε_y^0 为标准状态下的极限收缩；$M_1 \cdot M_2 \cdots M_n$ 为考虑各种非标准条件的修正系数。

1.4 MPC 法[10]

MPC 即 Multipoint Constraint 多点约束方程，它定义的是一种节点自由度的耦合关系，即以一个节点的某几个自由度为标准值，再令其他指定节点的某几个自由度与这个标准值建立某种关系：

$$u_i + \sum_{j=1}^{n} C_j u_j = C_0 (i \neq j) \tag{6}$$

u_i 为从自由度；u_j 为主自由度；C_j 为权系数；C_0 为常数项；i 为从节点的某个自由度的下标号；j 为主节点的某个自由度的下标号。

MPC 可连接不连续、自由度不协调的单元网格。用 MPC 连接 solid-beam，如图 1 所示，梁单元每个节点有 6 个自由度，实体单元每个节点有三个自由度。

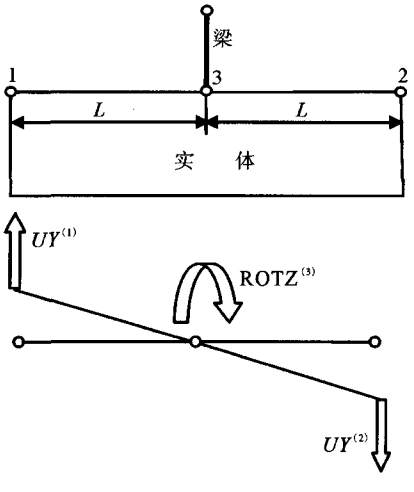

图 1　solid-beam 的连接

Fig. 1　The connection of solid-beam.

$$+UY^{(1)} = \sin(ROTZ^{(3)}) \cdot L \tag{7}$$

$$+UY^{(1)} = \sin(ROTZ^{(3)}) \cdot L \tag{8}$$

式(7)+式(8)得到下式：

$$0 = UY^{(1)} - UY^{(2)} - 2L \cdot \sin(ROTZ^{(3)}) \tag{9}$$

将节点自由度的关系转化为节点位移之间的函数关系如式(7)、(8)、(9)所示。

2　工程实例分析

2.1　工程概况

某隔震结构主体 7 层，分为 1#、2#，3# 三个塔楼，塔楼间设置变形缝。三个塔楼的隔震层梁板均连成一体，形成所谓“大底板”。三个塔楼均为框架结构，楼盖为梁板体系。板混凝土强度等级为 C30；柱混凝土强度等级为 C35。建筑第一层层高 3.9 m；第二层至第五层层高 3.6 m；第六层层高4.2 m；第七层层高 3.3 m。梁隔震层楼板厚 150 mm，其它层楼板厚 120 mm。隔震层梁 1 截面尺寸为 300 mm × 850 mm，受拉区配 4Φ25，受压区配 6Φ25，构造筋 6Φ12，箍筋 Φ12@100/200。施工中采用 Φ48×3.5 mm 钢管支撑，支撑间距为 1 m。施工为二层支模。

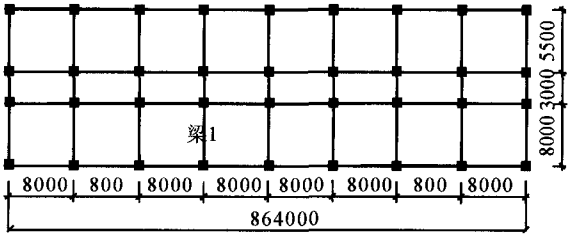

图 2　大楼中部平面图示意图

Fig. 2　Plane layout in the middle of building.

2.2　隔震层钢筋砼梁裂缝现场勘察情况

现场测得梁 1 裂缝形态分布如图 3 示：

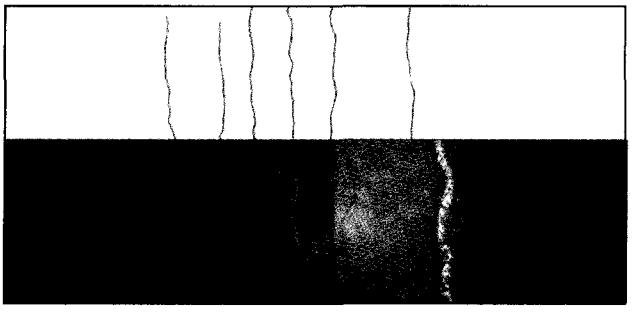

图 3　实测裂缝形态图

Fig. 3　Surveyed fracture shape.

3　施工期结构分析

3.1　施工分析模型及参数

计算对施工安全起控制作用的两个工序，即：浇捣新一层梁、板混凝土的工序；拆除最下面一层支撑的工序。

取大楼中部进行施工过程分析。本文只考虑梁板自重和施工活荷载。根据相关文献，施工期活荷载取值为：浇捣混凝土阶段 2.5 kN/m²，拆除模板阶段 3.0 kN/m²。隔震结构施工过程分析模型如图 4 所示。隔震结构施工过程分析的有限元模型如图 5 所示。

3.2　各工况下梁 1 的变形、内力计算结果

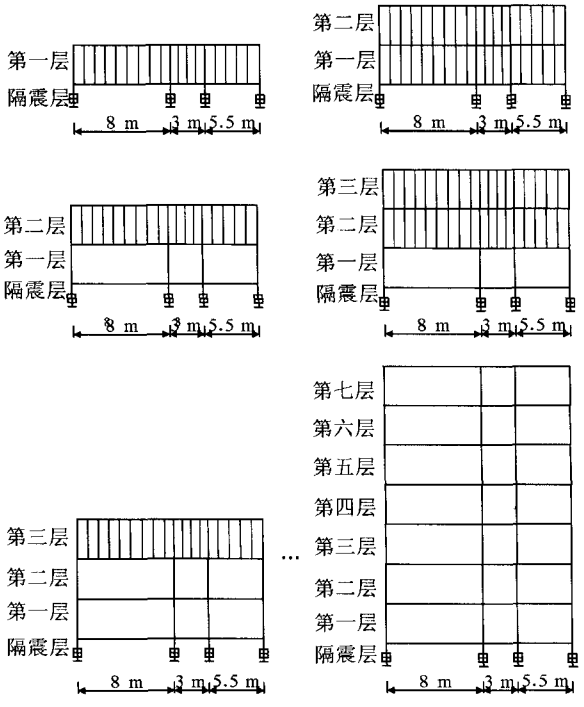

图 4 隔震结构施工过程分析模型

Fig. 4 Analysis model of isolated structure during construction.

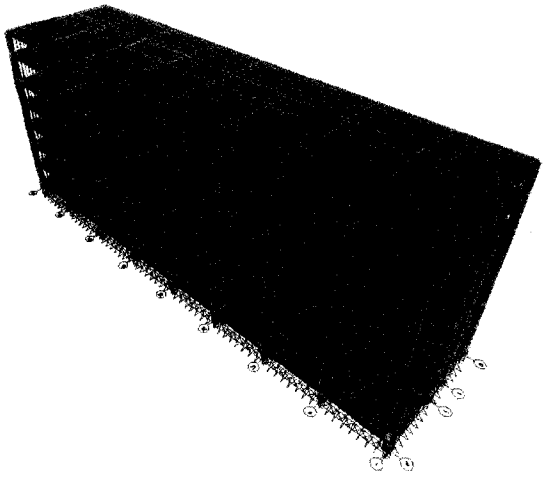

图 5 隔震结构施工分析有限元模型

Fig. 5 Finite element model of isolated structure during construction.

表 1 为施工过程中隔震结构梁 1 内力及挠度；表 2 为施工过程中非隔震结构梁 1 内力及挠度。图 6(a)、(b)、(c)分别为梁 1 跨中挠度、轴力和弯矩随施工过程的变化。

非隔震结构中，一次性加载后算得梁 1 跨中弯矩为 88.55 kN·m，挠度为 0.89 mm，轴力为－1.3 kN。

隔震结构中，一次性加载后算得梁 1 跨中弯矩

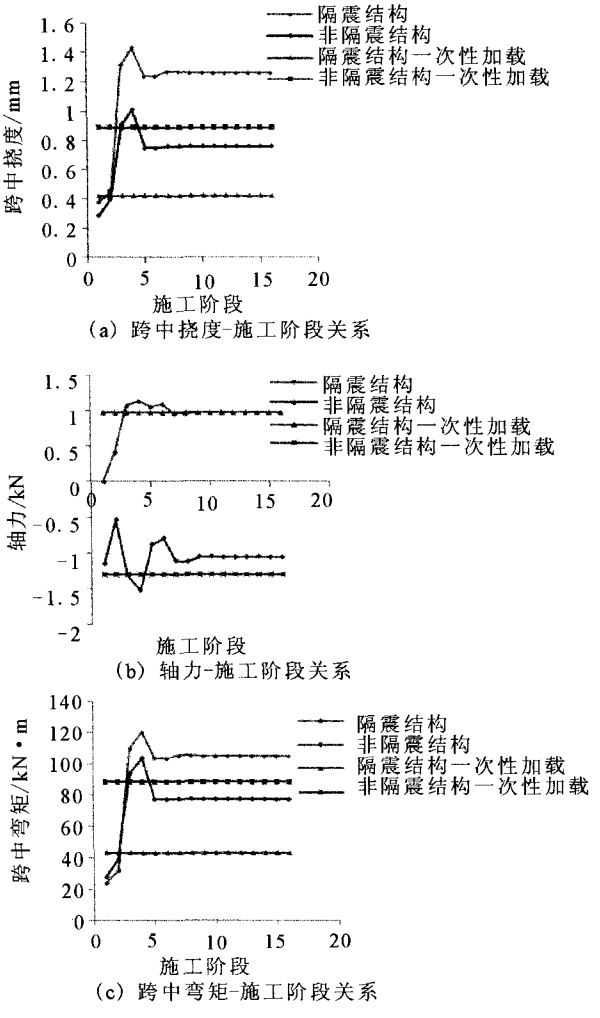

图 6 梁 1 的跨中挠度、跨中弯矩和轴力与施工阶段关系

Fig. 6 Relationship of the mid-span deflection, mid-span moment and axial force with construction stage graph of beam 1.

为 43.1 kN·m，挠度为 0.42 mm，轴力为 0.98 kN。

3.3 结果分析

分析图 6 可以得出以下结果：

(1) 第一施工阶段内，隔震层施工完毕，梁 1 内力及变形有一个较小初始值；在第一施工阶段到第二施工阶段内，对结构的第一层进行施工，施工荷载主要由隔震层承担，但由于两层模板和支撑均未拆除，考虑模板和支撑对钢筋混凝土结构的增强作用，其弯矩值及变形增加较小，该阶段较为安全。

(2) 在第三、四个施工阶段内，隔震层梁 1 内力及变形与前两个施工阶段相比增大比例很大。这个阶段正是隔震层梁拆除支撑和模板，浇筑第三层结构。施工初期拆除隔震层支撑，此时隔震层混凝土强度较低，荷载效应增长比例很大。到第四阶段，对

结构第三层进行施工,随着一层钢筋混凝土承载力的增长,荷载效应增长幅度减小,第四阶段末,隔震层梁 1 内力及变形达到最大值。这个阶段隔震层梁会产生较大的内力,可能导致梁的严重开裂甚至破坏。因此这个阶段必须引起我们的高度重视。

(3) 隔震层梁在第五个施工阶段时,由于施工均不在隔震层和首层,隔震层仅承受结构构件自重,故荷载效应趋于稳定,梁内力和变形趋于平稳。

(4) 与抗震结构相比,隔震结构在施工过程中更易产生较大的内力和变形,其中梁 1 的最大跨中弯矩比抗震结构大 15.8%,挠度大 41%。两种结构中梁 1 随施工过程的变化规律相似。

表 1　隔震结构梁 1 内力及挠度

Table 1　Internal force and deflection of beam 1 in isolated structure

施工阶段	底层	第一层	底层拆模	第二层	一层拆模	第三层	二层拆模	第四层
跨中挠度/mm	0.38	0.45	1.31	1.43	1.24	1.24	1.27	1.27
跨中弯矩/kN·m	23.5	32.2	109.9	120.6	103.9	103.5	105.4	105.5
轴力/kN	−0.006	0.41	1.07	1.13	1.05	1.09	0.95	0.95
施工阶段	三层拆模	第五层	四层拆模	第六层	五层拆模	第七层	六层拆模	七层拆模
跨中挠度/mm	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
跨中弯矩/kN·m	105.2	105.1	105.2	105.2	105.2	105.1	105.1	105.1
轴力/kN	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97

表 2　非隔震结构梁 1 内力及挠度

Table 2　Internal force and deflection of beam 1 in seismic structure

施工阶段	底层	第一层	底层拆模	第二层	一层拆模	第三层	二层拆模	第四层
跨中挠度/mm	0.29	0.40	0.91	1.01	0.75	0.75	0.76	0.76
跨中弯矩/kN·m	27.6	39.1	93.9	104.1	77.3	77.3	77.7	77.7
轴力/kN	−1.15	−0.54	−1.31	−1.52	−0.88	−0.79	−1.11	−1.12
施工阶段	三层拆模	第五层	四层拆模	第六层	五层拆模	第七层	六层拆模	七层拆模
跨中挠度/mm	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
跨中弯矩/kN·m	77.6	77.6	77.6	77.6	77.6	77.6	77.3	77.3
轴力/kN	−1.05	−1.05	−1.06	−1.06	−1.06	−1.05	−1.06	−1.06

(5) 非隔震结构中,考虑施工过程分析得到梁 1 的跨中弯矩、挠度峰值分别比一次性加载结果大 17.6%,13%。

(6) 隔震结构中,考虑施工过程分析得到梁 1 跨中弯矩、挠度峰值分别为一次性加载结果的 2.8 倍、3.4 倍。可见,常规算法由于不考虑框架的生成与加载历史,得到的内力偏小,这样在施工中是危险的,有必要在该施工阶段给与足够的重视和适当的考虑。

4　隔震层梁裂缝模拟

4.1　钢筋混凝土结构有限元分析模型

钢筋混凝土有限元模型根据钢筋的处理方式主要分为三种,即分离式、整体式、和组合式。本文采用分离式模型,即把钢筋和混凝土作为不同的单元来处理。用 solid65 单元建立混凝土。solid65 单元是专门用于钢筋混凝土结构分析的一种八节点六面体单元,每个节点有三个自由度。可以模拟混凝土材料的开裂、压碎、塑性变形和蠕变。用 link8 杆单元建立钢筋,离散钢筋的 link8 单元与混凝土单元共用节点,以实现整体工作过程中自由度的耦合。用 combine14 单元建立隔震垫,假设隔震支座处于线弹性阶段。

MPC 可以用于 solid-beam 的连接。用 beam188 单元建立柱模型,MPC 算法将 solid65 单元和 beam188 单元连接起来建立了带隔震支座的有限元梁模型。

4.2　材料性能及相关参数

混凝土模型本构关系采用不带下降段的多折线随动强化模型。弹性模量 $E=3\times10^{10}$ N/m^2;泊松比 $v=0.2$;单轴抗拉强度 $f_t=1.8$;裂缝张开传递系数 0.6;裂缝闭合传递系数 1。关闭压碎开关。梁中

钢筋采用双线性弹塑性材料模型，弹性模量 2×10^{11} N/m^2，泊松比 0.3。

算得收缩当量温差为 25.17 ℃。计算时按最不利工况计算。收缩当量温差为 25.17 ℃，季节温差取 25 ℃。整体温差即两者相加，为 50.17 ℃。

用 MPC 法将 solid65 单元和 beam188 单元连接起来，建立了带隔震支座的有限元梁模型。选取隔震层梁 1 作为主要计算梁，该梁跨度为 8 m，截面为 300 mm×850 mm。其中隔震支座参数见表 3。

表 3 隔震支座参数

Table 3 The parameter of rubber bearing

型号	竖向刚度 /[kN·mm^{-1}]	水平刚度/[kN·m^{-1}]	
		$\gamma=50\%$	$\gamma=100\%$
GZY600	2680	2350	1800
GZY700	4200	3000	2380
GZY800	3400	3500	2720

4.3 隔震层梁 1 有限元模型

图 7 为隔震层钢筋砼梁的构造图，图 8 为隔震层钢筋砼梁有限元模型。

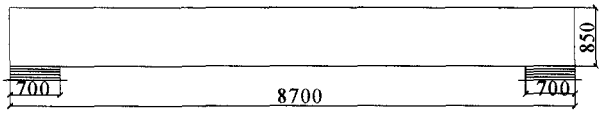

图 7 隔震层钢筋砼梁构造

Fig. 7 Structural graph of isolation layer concrete beam.

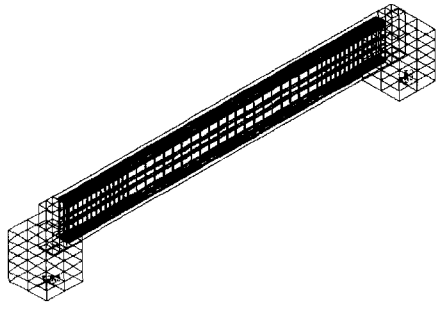

图 8 隔震层梁有限元模型

Fig. 8 Finite element model of isolation layer beam.

图 9 为施工荷载下的梁 1 裂缝形态图，图 10 为考虑施工荷载、温度变化和混凝土收缩作用的梁 1 裂缝形态图。

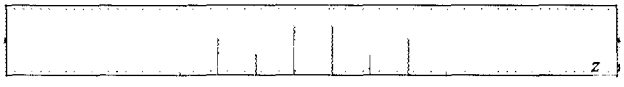

图 9 考虑施工荷载作用的隔震层钢筋砼梁 1 裂缝形态

Fig. 9 Fracture shape of isolation layer beam 1 considering construction loading.

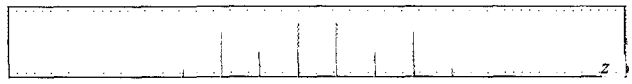

图 10 考虑施工荷载、温度变化、混凝土收缩共同作用的隔震层钢筋砼梁 1 裂缝形态

ig. 10 Fracture shape of isolation layer beam 1 considering construction loading, temperature fluctuation and concrete shrinkage.

图中均为混凝土单轴抗拉强度达设计强度的 81%时钢筋混凝土梁的裂缝形态。可以看出，考虑施工荷载、温度变化和混凝土收缩共同作用得到的结果较为符合实际。

5 结语

该工程隔震层梁出现裂缝是由施工荷载、温度变化和混凝土收缩共同作用引起的。建筑物施工期间，结构刚度尚处在成长阶段，受到支撑变形、温度变化和混凝土收缩等不利作用对结构长期性能和耐久性产生负面影响。对于隔震结构和非隔震结构，常规算法由于不考虑框架的生成和加载历史，算得的内力值均偏小；而隔震结构偏小的幅度更大，因而更危险。在结构施工过程中，各层梁当拆除其模板和浇筑其上一层时，其内力达到最大值，其中隔震层梁内力最大，为隔震结构在施工中的薄弱部位。建议在施工过程中，对隔震层构件有必要加强保护，如在其下设二次支撑，在混凝土浇筑后，做到充分的养护以保证其拆模时达到规定的强度。

[参考文献]

[1] 陈宇钧，刘西拉. 现浇钢筋混凝土框架结构考虑施工过程的内力分析[J]. 四川建筑科学研究，1992，(4)：7-11.
CHEN Yu-jun, LIU Xi-la. The internal force analysis of cast-in-situ reinforced concrete structure considering the construction process[J]. Sichuan Building Science, 1992, (4): 7-11.

[2] 李瑞礼，曹志远. 高层建筑结构施工力学分析[J]. 计算力学学报，1999，16(2)：157-161.
LI Rui-li, CAO Zhi-yuan. Construction mechanics analysis in tall buildings[J]. Chinese Journal of Computal mechanics, 1999, 16(2): 157-161.

[3] 方东平，耿川东，祝宏毅，等. 施工期钢筋混凝土结构特性的计算研究[J]. 土木工程学报，2000，33(6)：57-62.
FANG Dong-ping, GEN Chuan-dong, ZHU Hong-yi, et al. Analysis of reinforced concrete structure during construction [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 57-62.

（下转 41 页）

XUE BAO,2003,10:19-25.

[14] 王炳龙,卢德生,等. 高速铁路路基填料改良离心试验研究[J]. 上海铁道大学学报,1999,20(10):22-26.
WANG Bing-long, LU De-sheng, et al. Centrifugal Model Test for Improvement of Subgrade Filled Soil in High Speed Railway[J]. Journal of Shanghai Tiedao University,1999,20(10):22-26.

[15] 蒋关鲁,房立凤,张俊兵,等. 高速水泥改良黄土路基填料填筑试验研究[J]. 中国铁道科学,2009,30(1):1-7.
JIANG Guan-lu, FANG Li-feng, ZHANG Jun-bing, et al. Test Study on Cement Improved Loess as the Filling Material for Subgrade Construction of Passenger Dedicated Line[J]. China Railway Science,2009,30(1):1-7.

[16] 许海勇,陈龙珠. 钢管水泥土围护墙等效弹性模量的有限元计算[J]. 西北地震学报,2011,33(3):261-264.
XU Hai-yong, CHAN Long-zhu. Finite Element Analysis on the Equivalent Elastic Modulus of Cemented Soil Retaining Wall Embedded with Steel Pipes [J]. Northwestern seismological journal, 2011,33(3):261-264.

[17] 周中,巢万里,刘宝琛,等. 岩石边坡生态种植基强度的正交试验[J],中南大学学报(自然科学版),2005,36(6):1112-1116.
ZHOU Zhong, CHAO Wan-li, LIU Baoshen, et al. Orthogonal test on strength of planting material for rock slope[J]. CENT. SOUTH UNIV. (Science and Technology), 2005, 36(6):1112-1116.

[18] 北京大学数学力学系数学专业概率统计组. 正交设计[M]. 北京:人民教育出版社,1976:180.

(上接 34 页)

[4] 赵挺生,方东平,张传敏. 施工阶段多(高)层建筑钢筋混凝土结构统一模型[J]. 清华大学学报(自然科学版),2004,44(12):1680-1683.
ZHAO Ting-sheng, FANG Dong-ping, ZHANG Chuan-min. Unified model of reinforced concrete structures of multi-story or high-rise buildings during construction[J]. J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.),2004,44(12):1680-1683.

[5] 薛娜,李鸿晶,伍小平. 结构施工时变内力分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2005,27(11):73-77.
XUE Na, LIU Hong-jing, WU Xiao-ping. Time-dependent analysis of construction internal forces of strucrures[J]. Journal of Nanjin University of Technology,2005,27(11):73-77.

[6] 徐蓉,贺明华. 混凝土结构施工过程的数值模拟分析[J]. 结构工程师,2011,27(1):144-148.
XU Rong, HE Ming-hua. Numerical analysis for construction process of RC structures[J]. Structural Engineers, 2011, 27(1):144-148.

[7] 赵军,杨绿峰. 钢筋混凝土框架结构施工力学分析[J]. 广西大学学报(自然科学版),2011,36(1):59-63.
ZHAO Jun, YANG Lu-feng. Mechanical analysis of the reinforced concrete frame structure during construction[J]. Journal of Guangxi University(Nat. Sci. Ed.),2011,36(1):59-63.

[8] 黄远中. 框架结构施工过程仿真分析[J]. 企业科技与发展,2010,(14):126-130.
HUANG Zhong-yuan. Simulation anslysis on the construction process of framework structure[J]. Enterprise science and technology & development, 2010,(14):126-130.

[9] 杜永峰,张尚荣,李慧. 多级串联非比例阻尼隔震结构地震响应分析[J]. 西北地震学报,2012,34(4):319-323.
DU Yong-feng, ZHANG Shang-rong, LI Hui. Seismic Response Analysis on Multistage Series Non-proportion Damping Isolated Structure[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012,34(4):319-323.

[10] 汤华涛,吴新跃. 体壳单元连接 MPC 法的计算精度分析[J]. 现代制造工程,2011,(7):62-65.
TANG Hua-tao, WU Xin-yue. Calculation precision of multipoint constraint technology used to solve combination model of solid element and shell element[J]. Modern Manufacturing Engineering,2011,(7):62-65.