体外预应力混凝土简支梁的非线性分析

罗小华 陈扬骥 刘永明
(同济大学,上海 200092)

奉龙成 杨家玉
(重庆交能科研设计院,重庆 400067)

提 要 通过对六片体外预应力混凝土简支梁的试验,分析了非预应力筋的配筋率对结构受力性能的影响,同时建立了体外预应力混凝土简支梁的几何非线性与材料非线性的耦合分析的有限元分析计算方法,并利用按该方法所编的非线性程序对六根体外预应力简支梁进行了非线性分析,结果表明该方法是相当精确的。

关键词 体外预应力,非线性,极限承载力

Nonlinear Analysis of Simple2Supported Concrete Beams with Post2Tensioned External Tendons

LUO Xiaohua① CHEN Yangji① LIU Yongming① FENG Longcheng② YANG Jiayu②
(①Tongji University, Shanghai 200092; ②Chongqing Highway Science Research Institute, Chongqing 400067)

Abstract According to the experiment informations of 6 simple2supported conerete beams with post2tensioned external tendons, the effects of non2prestressed bars on the structures are inves2tigated. The FE method to this kind of the structure considering both geometric nonlinear and material nonlinear is also presented in this paper. A finite element program is compiled to carry out the structural analysis. By comparing the numerical results with the results of the experi2ment, it is showed that the method in this paper is feasible and accurate.

Keywords post2tensioned external tendons, nonlinear analysis, ultimate bearing capacity

1 引 言

随着力筋的各种防腐措施逐渐完善,力筋的严密防腐已不十分困难,结构的安全性和耐久性得到保证,体外预应力混凝土桥梁得到了较大规模的发展,几乎在世界各地形成了一种发展趋势。体外预应力作为后张预应力体系的重要分支之一,在工程建筑中得到广泛的应用,开成为旧桥加固最积极有效的方法之一,近年来正在成为预应力技术研究的热门课题。利用体外预应力技术修建了各种各样结构形式的桥,按结构形式分类有[1]:

(1) 节段预制的 PC 桥;(2) 采用波形钢板或桁架构件作腹板的组合式 PC 桥梁;(3) 桥带桥;(4) 其他 PC 桥。

本文建立了体外预应力简支梁的几何非线性与材料非线性的耦合分析的有限元计算方法,并利用按该方法所编的非线性程

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

序对六根体外预应力混凝土简支梁进行了非线性分析。

2 试验简介

首先按汽车 - 超 20 级荷载等级,依照无粘结部分预应力结构设计方法设计两片不同预应力度的 40m 体外预应力箱形简支梁,它们的预应力筋的极限内力与总拉力的比值分别为 0135 和)659,跨中截面的有效预应力作用分别为 374kN 和 713kN,非预应力筋的配筋率分别为 210 %和 114 %。以初步设计的两片 40m 体外预应力箱形简支梁为原型梁,按相似原理设计模型梁,几何尺寸相似比为 1∶5,设计试验梁 A1 和 B2。在所设计的试验梁 A1 和 B2 的基础上,设计两组抗弯试验梁分为 A 和 B 两组和两片抗剪梁。两组抗弯试验每组三片梁,A 组中三片梁施加的有效预应力与 A1 相同,而体内非预应力筋的配筋率不同,A 组三片梁号分别为 A1,A2,A3。B 组中三片梁施加的有效预应力与 B2 相同,而体内非预应力筋的配筋率不同。而且两组抗弯试验梁之中,一组中三片梁的非预应力筋的配筋率与另一组之中三片梁的对应相等。其中,梁 A1、梁 B2,用来模拟原型梁静力受力行为。试验梁主要考虑非预应力配筋配筋率的不同对其受力性能的影响。试件尺寸及测试如图所示。截面配筋情况见表 1,材料参数见表 2。

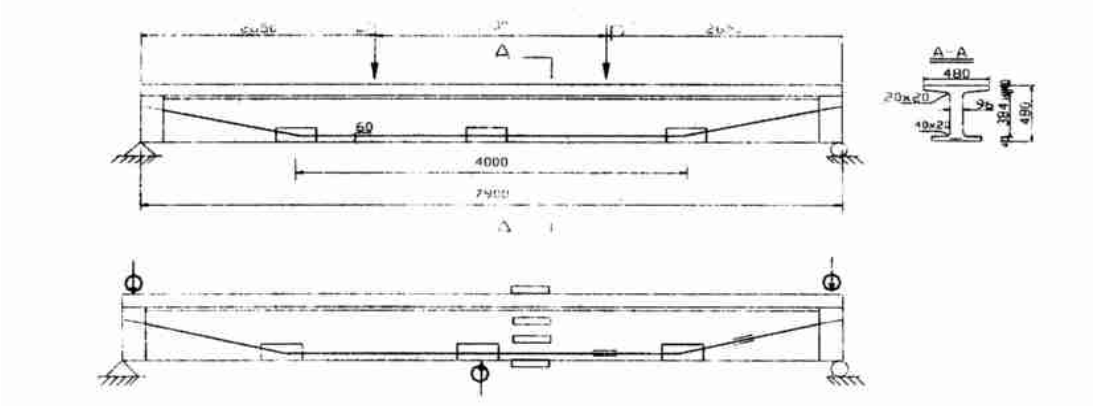


图 1 外预应力试验梁装置图

试验梁跨中截面的设计参数 表 1

试验梁 / 配筋情况	A1(A11)	A2	A3	B1	B2	B3
普通钢筋面积(m^2)	1.02×10^{-2}	7.85×10^{-3}	3.52×10^{-3}	1.02×10^{-2}	7.85×10^{-3}	3.52×10^{-3}
预应力钢筋面积(m^2)	2.8×10^{-4} (两束钢绞线)	2.8×10^{-4}	2.8×10^{-4}	2.8×10^{-4} (两束钢绞线)	2.8×10^{-4}	2.8×10^{-4}
普通钢筋配筋率	2.3 %	1.8 %	0.8 %	2.3 %	1.8 %	0.8 %
预应力筋配筋率	0.64 %	0.64 %	0.64 %	0.64 %	0.64 %	0.64 %
作用在纯弯段的有效预应力作用(kN)	126	126	126	220	220	220
h_g(m)	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454
h_y(m)	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

试验梁的材料实测参数 表 2

试验参数 \ 试验梁		A1	A2	A3	B1	B2	B3
混凝土	R	47	47.6	43.4	44	45	37.2
	R_1	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
	E_h	2.76×10^4	2.76×10^4	2.76×10^4	2.76×10^4	2.76×10^4	2.76×10^4
普通钢筋	屈服强度 R_y	386	424.4	285.1	386	424.4	285.1
	极限强度 R_y^j	489.2	494.2	477.4	489.2	494.2	477.4

3 试验结果分析

试验结果发明,荷载挠度关系曲线有明显的三个阶段:线弹性阶级、开裂阶段、塑性阶段。六根梁的裂缝首先集中在跨中两加载点之间,裂缝分布均匀,加载到一定的值,在加载点下面出现斜裂缝,随着荷载增加,体内非预应力筋开始屈服,在梁体跨中出现一条主裂缝,此裂缝迅速开展,结构不再能抵抗荷载增量,梁体发生受弯破坏。斜向预应力筋的应力增量远小于水平预应力筋的应力增量。极限荷载与开裂荷载的比值,A1 梁和 A3 梁分别是 2175,2131,1188,说明只要体外预应力混凝土结构有适当的非预应力配筋率,结构将具有较好的延性。

图 2 和图 3 分别给出 A 组和 B 组梁的荷载挠度曲线比较图,可以看到预应力作用和预应力筋面积相同的试验梁,虽然非应力筋的配筋率不同,但是开裂荷载几乎一样,在开裂之前,结构刚度相同,然而开裂后,结构的刚度与非预应力筋的配筋率有关,随配筋率的增加而增加,延性也相应增加;另外,从图 3 可以看到,如果预应力的作用加大,开裂前后结构的刚度受非预应力筋的配筋率的影响减小,而且开裂前后刚度的变化减小。图 4、图 5 和图 6 分别给出两组试验梁中相对应的非预应力筋的配筋率和体外预应力配筋率相同,施加不同的有效预应力作用的试验梁的荷载 - 挠度关系曲线比较图,从图中可看到非预应力筋配筋率相同的情况下,如果预应力作用越大,结构的开裂荷载越大,延性也有所增加;开裂后的刚度越在且随着非预应力筋配筋率的减小,更加明显。

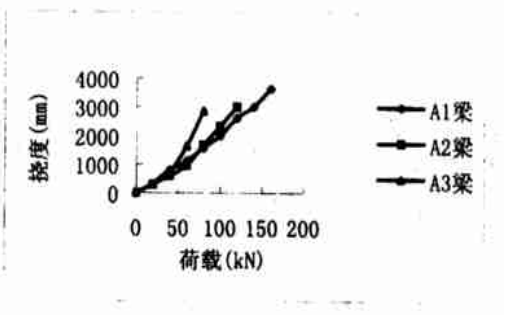


图 2 A 组试验梁荷载 - 挠度曲线图

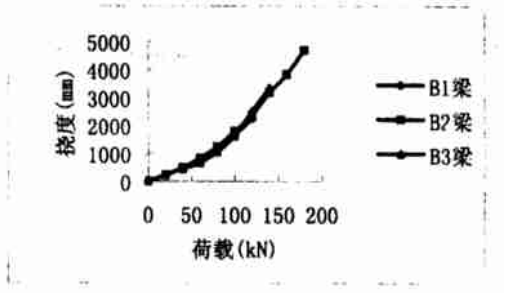


图 3 B 组试验梁荷载 - 挠度曲线图

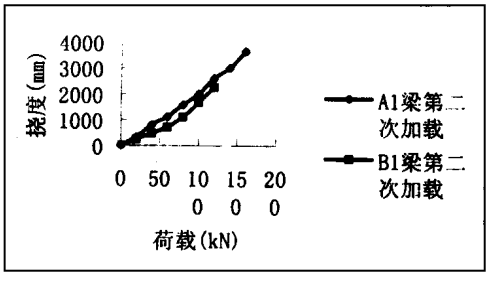


图 4 A1 与 B1 试验梁荷载 - 挠度曲线的比较

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

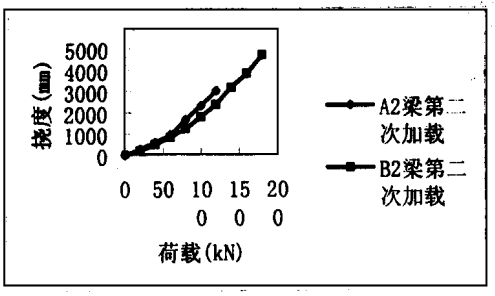


图5 A2与B2试验梁荷载-挠度曲线的比较

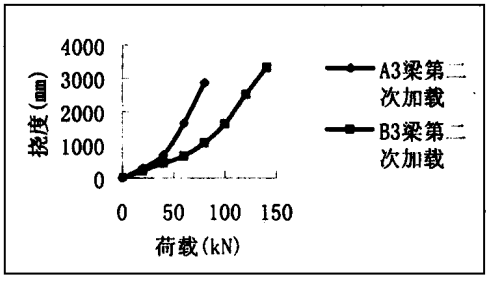


图6 A3与B3试验梁荷载-挠度曲线的比较

4 体外预应力结构的几何非线性和材料非线性耦合分析

411 几何非线性分析

几何非线性采用UL列式法,单元变形行为的描述建立在三个构形的基础上,三个构形分别表示为C_0(初始构形)、C_1(要求解的构形的上一次构形即参考构形)和C_2(要求解的构形)。

求解步骤:

(1) 建立在参考构形基础上的平衡方程

$$\{{}_2^1f\} = [k]\{u\} + \{{}_1^1f\} \qquad (1)$$

式中 $[k]$——单元切线刚度矩阵,$[k] = [k_e] + [k_g]$;

$\{{}_1^2f\}$,$\{{}_1^1f\}$——分别为构形C_2和C_1建立在参考构形基础上的单元荷载列车。

(2) 建立在参考构形C_2基础上的单元恢复力[2]

$$\{{}_2^2f\} = \{{}_1^1f\} + [k]\{u_n\}$$

式中 $\{{}_2^2f\}$——构形C_2建立在参考构形C_2基础上的单元荷载列阵;

$\{u_n\}$——纯变形。

(3) 平衡迭代[3]

迭代方法常用的有增量法、Newston2Raphson Method(N-R),Modified News2ton2Paphson Method(mN-R),以及将N2R法或nN2R法与增量法结合使用。笔者所写的程序中,平衡迭代采用将N2R法与增量法结合使用。

412 材料非线性

(1) 基本假设

对于梁单元,采用分层梁的计算模式,先将截面分成m等分,设第j分块的面积和其形心到整个截面的几何中心的距离分别为a_j和d_j,上下底钢筋截面的面积分别为a_{s1}和a_{s2},它们的中心到整个截面的几何中心的距离分别为h_{a1}和h_{a2}。

为了分析简化,作如下基本假设:

①梁单元长度足够短,对每一层,其应变均匀分布,近拟等于该层平均应变。

②体外预应力梁在预应力的作用下,可以看成小偏心受压构件,因而忽略梁单元中性轴的位置变化(其实中性轴位置是变化的,但是为了简化分析,直接利用几何非线性UL列式法的刚度矩阵和忽略由于梁单元中性轴的位置变化引起梁单元的坐标变化)。

③为简化计算,不考虑钢筋的滞回效应,不考虑混凝土拉应力作用。

④忽略剪应力和剪应变的影响。

⑤截面混凝土的应力应变关系曲线服从单轴轴压关系曲线;混凝土的应力应变关系采用三次曲线[4]:

$$\sigma(s) = a_0 + a_1\varepsilon + a_2\varepsilon^2 + a_3\varepsilon^3 \qquad (3)$$

式中,$a_0 = 0$,$a_1 = E^0$,$a_2 = 3\frac{f_c'}{\varepsilon_{co}^2} - 2\frac{E_0}{\varepsilon_{co}}$,

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

$a_3 = 3\frac{E_0}{\varepsilon_{c0}^2} - 2\frac{f_c'}{\varepsilon_{c0}}$, ε_{c0} 为混凝土的极限应变且 $\varepsilon_{c0} = 0.0035$, E_0 为混凝土的初始弹性模量,f_c' 为极限抗压强度。

(2) 材料非线性分析步骤

假设截面几何中心的应变和曲率为:ε_i, x_i,则由混凝土和钢筋的应力应变关系和基本假设可得到内力平衡方程[5]:

$$\left.\begin{aligned} N_e &= N(\varepsilon_i, x_i) \\ M_e &= M(\varepsilon_i, x_i) \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

对于给定的 M, N,求出满足内力平衡条件的 ε_i 和 x_i 就相当于求解二元非线性方程组。通过牛顿拉斐迭代法求出一定内力 N, M 作用下的 ε_i 和 x_i 的值后,如果将等效模量 E 取为 E_0,则可以得到等效面积 A,等效惯性矩 I。直接将等效面积 A 和等效惯性矩 I 代入几何非线性 UL 列式法的刚度矩阵 $[k]$ 中,就可以实现由考虑梁单元截面的等效刚度的变化计入材料非线性。

5 试验梁的计算单元模型的建立

如图 7 将体外预应力简支结构划为 15 个单元,预应力筋作为带初始应力的杆单元,混凝土梁划分为六个梁单元,①, ④, Ⅳ, Ⅷ, Ⅻ 为刚臂单元,在此程序中未设置刚臂用刚度比混凝土梁单元大 100 倍梁单元代替,可以满足精度要求。预应力筋在转向块和锚固点处与混凝土梁的联结作铰接处理。

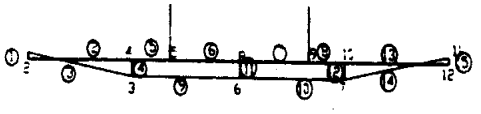


图 7 试验梁单元划分图

6 分析结果与试验结果比较

611 挠度分析

(1) 几何非线性

以 A1 梁为计算原型,不计混凝土梁刚度减小,考虑试验梁的按线弹性计算的挠度,以及在对混凝土梁施加不同的预应力作用下的按几何非线性计算的挠度。计算结果见表 3。

在外加荷载为 90kN 时混凝土梁跨中挠度(mm) 表 3

作用荷载	线弹性计算的跨中挠度	假设预应力筋不施加预应力时,作几何非线性计算的跨中挠度	对预应力筋施加 150kN 的预应力作用几何非线性计算的跨中挠度		对预应力筋施加 300kN 的预应力作用几何非线性计算的跨中挠度	
			有中间导向块	无中间导向块	有中间导向块	无中间导向块
使用荷载 2P = 90kN	2.762	12.764	12.772	12.804	12.779	12.832

注:当预应力作用为 150kN,在有限元计算时,是采用在杆单元 3,14 上预加 140kN,在杆单元 9,10 上预加 126kN;当预应力作用为 300kN,在有限元计算时,是采用在杆单元 3,14 上预加 250kN,在杆单元 9,10 上预加 220kN。

从表 3 的计算结果可以看出体外预应力试验梁在使用荷载作用下几何非线性的影响很小,还可以看出,施加不同的预应力作用由于几何非线性的影响,结构的刚度略有降低,但是影响非常小。由此看来,在使用荷载范围内,由于预应力筋的偏心距的减小和预应力作用引起的结构的几何非线性影响非常小,在进行结构的一般力学分析中可以不予考虑。

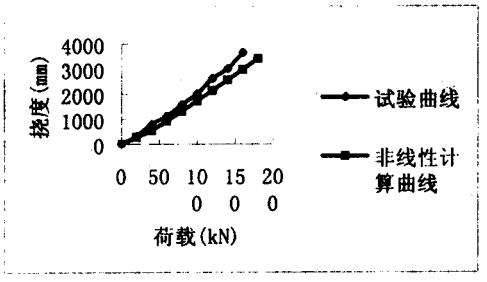
(2) 几何非线性和材料非线性耦合分析

图 8 给出六片试验梁的程序计算结果与试验结果的荷载挠度曲线的比较情况,可以看到非线性的计算曲线很好地模拟了混凝土梁体刚度随着荷载的增加而变化,结构受力行为从线弹阶段、稳定开裂阶段最后到

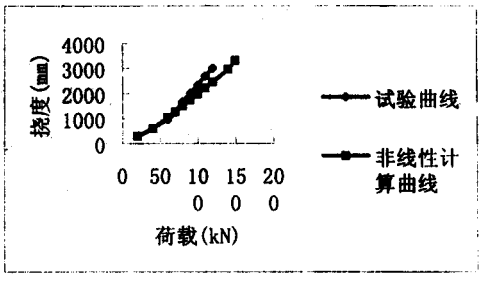
© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

屈服阶级的全过程,除 A3 梁外,其余的五片梁的计算曲线很好模拟了试验结果。A3 梁的计算结果与试验结果的挠度荷载曲线吻合程度较差,主要是因为混凝土的预应力作用较小,加之有粘结的普通钢筋的配置较小,其中性轴位置变化较大与假设中性轴位置不变有较大的差别,另外材料本构关系的选取与实际情况存在一定差别,所以计算结果与试验值有一定的误差。

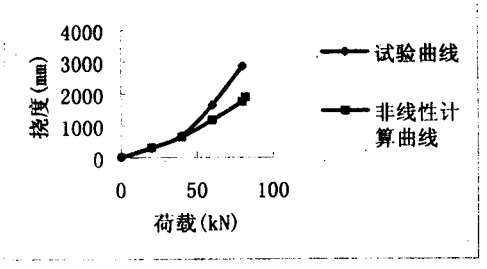
图 8 中试验所得挠度值均大小程序计算结果,主要是因为没有考虑中性轴位置变化,以梁单元混凝土未开裂的初始状态下换算截面的中性轴作为截面混凝土开裂后的中性轴位置。实际上截面混凝土开裂后,受拉混凝土退出工作,中性轴将靠近受压区,且荷载越大这种情况越明显。本文为了计算简化作了不考虑中性轴位置变化的假设,使程序中采用换算截面惯性矩较实际偏大,所以导致程序分析的计算结果比实测值小。



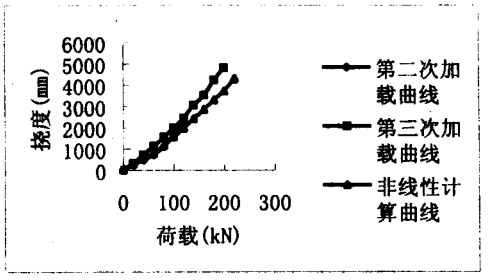
A1 梁荷载挠度曲线



A2 梁荷载挠度曲线

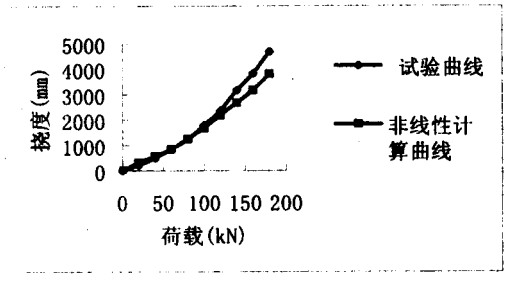


A3 梁荷载挠度曲线

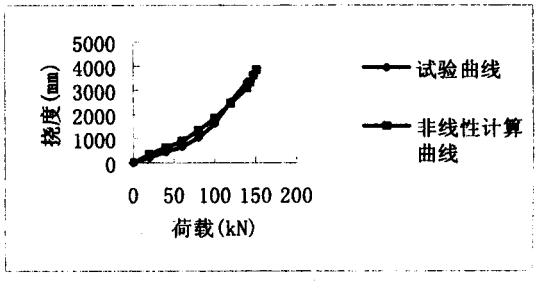


注:第三加载是在第二次加载卸载后的 12 天进行的

B1 梁荷载挠度曲线



B2 梁荷载挠度曲线



B3 梁荷载挠度曲线

图 8 试验梁的非线性分析与试验的荷载 - 挠度曲线比较图

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

612 体外预应力简支梁的极限承载力

从表 3 和表 4 中,可以看到由程序计算的体外预应力简支梁的极限承载力(荷载可以任意分级,当某荷载使计算结果的挠度开始异常或单元的刚度出现一设定的无穷小时,从而可以判断结构已达到极限破坏状态)。与试验结果的相对误差都在 011 以下,说明非线性程序所分析计算出的体外预应力简支梁的极限承载力是相当精确的。

A 组试验梁受弯极限承载力的试验和计算结果 表 4

试验梁 / 试验结果	A1		A2		A3	
	试验结果	非线性分析结果	试验结果	非线性分析结果	试验结果	非线性分析结果
破坏加载值 2 P(kN)	190	190	未做到破坏	150	90	82
非线性计算结果误差	010				01089	

B 组试验梁受弯极限承载力的试验和计算结果 表 5

试验梁 / 试验结果	B1		B2		B3	
	试验结果	非线性分析结果	试验结果	非线性分析结果	试验结果	非线性分析结果
破坏加载值 2 P(kN)	220	221	185	179	150	152
非线性计算结果误差	0.005		0.032		0.013	

注:由于自重的影响较小,试验结果和非线性计算结果都没有计入梁体自重。

7 结 语

从试验分析中,可以看到体外预应力结构在混凝土梁开裂后的刚度与非预应力筋的配筋率有关,其大小随配筋率的增加而增加,延性也相应增加;另外可看到在非预应力筋配筋率相同的情况下,如果预应力作用越大,开裂后的刚度越大,且随着非预应力筋配筋率的减小,更加明显。用本文建立的几何非线性与材料非线性耦合分析方法并对试验梁分析,发现在一般使用荷载作用下,由于预应力筋的偏心距的减小和预应力作用引起的结构的几何非线性影响非常小;另外极限承载力的分析结果很好地与试验结果相吻合。

参考文献

[1] 易圣涛,黄 凡 1 日本体外预应力索桥梁应用现状 1 公路交通技术,2000(1)

[2] Y. B. Yang. Nonliear theory & analysis of frame structure. Simon & Schuster(Asian) Pte. Itd 1994

[3] 肖汝诚 1 确定大跨径桥梁结构合理设计状态的理论与方法研究 1 同济大学博士论文,1996

[4] 李国豪等 1 桥梁结构稳定与振动 1 北京:中国铁道出版社,1992

[5] 奉成龙 1 大跨径钢筋混凝土拱桥受力行为的几何与材料非线性耦合分析 1 中国公路学会'2000 学术交流会论文集 1 北京:中国公路杂志出版社,2000

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.