

水泥混凝土路面抗折强度 非破损检测法

——超声回弹综合法

王延伟 李心平 王宇云

(湖北省公路局科研所)

提要 本文详细论述了超声回弹综合法检测水泥混凝土路面抗折强度的理论依据、实际意义和使用方法。实践证明, 这种方法是可行的, 能满足实际需要, 使用方便。

关键词 超声回弹综合法 超声波声速 回弹值 测强曲线 抗折强度

Non-Destructive Testing of Flexural Strength of Concrete Pavement

——The Combination of Rebound Testing and Ultrasonic Testing

Wang Yanwei Li Xinping Wang Yuyun

(Research Institute of Highway Bureau in Hubei)

Abstract

In this paper, the theoretical basis, methods of application and the significance of the flexural strength non-destructive testing for concrete pavement based on the combination of rebound testing and ultrasonic testing are discussed in detail.

As it turned out that this non-destructive testing is satisfactory in both theory and practice, and convenient in operation.

Key words Combination of rebound testing and ultrasonic testing Speed of ultrasonic wave Rebound value Curve for testing strength Flexural strength

1 前言

硬化混凝土的质量受材料、成型、养护工艺和施工技术水平的影响而差异较大, 如何全面地及时地掌握混凝土的施工质量, 已成为混凝土施工控制和检测人员面临的重要问题。

路面水泥混凝土的受力不同于一般结构混凝土, 它主要承受弯拉应力, 其物理力学指标为抗折强度并非抗压强度。其次, 路面工程施工点多线长, 应用抗折试块 (15cm×15cm×55cm) 则十分笨重, 其试验又需试验室, 从而给施工质量控制和检测带来诸多不便, 影响其及时性和可靠性。

目前,在工程实践中采用的预留试块、钻芯取样和无破损检测法等(表1)均是测定混凝土的抗压强度。而抗折强度与抗压强度间虽有确定的关系,但目前尚缺乏一致通用的关系数据,所以从理论和实际上来讲,有必要寻找一种适合路面工程需要的、能在混凝土路面上快速无损检测抗折强度的方法。笔者认为“超声回弹综合法”能满足这些要求,为此,对这种方法进行了研究。

各国标准一览表 表1

国 别	标 准 名 称	检测目的
国际标准草案	ISO/DIS 8045 硬化后的混凝土——用回弹仪测定回弹值	抗压强度
国际标准草案	ISO/DIS 8046 硬化后的混凝土——拔出强度的测定	抗压强度
国际标准草案	ISO/DIS 8046 硬化后的混凝土——超声波脉冲速度的测定	抗压强度
英 国	BS4408P4 表面硬度法	抗压强度
东 德	TGL 33437/01 用回弹法或刻痕法测定混凝土的抗压强度	抗压强度
日 本	M ₃ 混凝土抗压强度——回弹值	抗压强度
捷克斯洛伐克	73 2411 混凝土结构的非破损检测	用声速和回弹值估计混凝土性能
罗马尼亚	STAS 6658/1—8 应用“超声脉冲速度—回弹值”综合测定混凝土强度的方法	抗压强度
中 国	GBJ 204—83 钢筋混凝土施工和验收规范	允许采用各种非破损方法对结构进行检查
中 国 (城 建 部)	JBj 23—85 回弹法评定混凝土抗压强度技术规范	抗压强度
中 国 (工程建筑标准化委员会)	CECS 02:88 超声回弹综合法检测混凝土技术规范	抗压强度

2 超声回弹综合法原理简述

2.1 回弹法

回弹法是用回弹仪以一定的冲击能量让钢锤冲击混凝土表面,任其回弹,其回弹距离 L' 与冲击前锤距混凝土表面的距离 L 之比,即为回弹值, $N = L' / L \times 100$ 。回弹值的大小取决于与冲击能量有关的回弹能量,而回弹能量主要取决于被测混凝土的弹塑性性能。混凝土的塑性变形越大,消耗于塑性变形的能量越大,弹击锤所获得的回弹能量就越小,回弹值越低。回弹值反映的是混凝土的表面硬度,而表面硬度又与混凝土本身的强度有一定的相关关系。所以通过预先建立的回弹值(N)与抗折强度(R_f)之间的关系,就可以推定混凝土抗折强度,即所谓“回弹法”。这种方法设备简单,操作容易,但精度较差。

2.2 超声波法

超声波能定向传播,穿透能力强,在液、固体中传播时衰减很小。它在介质中的传播特

性与介质（混凝土）的宏观物理量如弹性模量、密度等有关。超声波在水泥混凝土中传播，实质上是高频机械波在水泥混凝土中的传播。超声波通过水泥混凝土，使水泥混凝土每个微小区域都产生拉伸、压缩或剪切等应力应变过程。因此，超声波在水泥混凝土中的传播速度就是其应力应变性质的反映，它能直接反映混凝土的弹性模量和密度，而这两个指标又都与强度有关。混凝土强度越高，声速就越快；密度小而孔隙率大的混凝土，声速就慢。根据超声脉冲（纵波）在混凝土中的传播速度(v)与抗折强度(R_f)之间的相关关系，确定混凝土抗折强度的方法，就是超声波法。这种方法虽然较为先进，但其固有的不足。

2.3 超声回弹综合法

- 以声速(v)或回弹值(N)单一指标建立的相关关系，即 $N \sim R_f$ 或 $v \sim R_f$ 都有一定局限性。
- ①影响 $v \sim R_f$ 曲线的因素较多，尤其是混凝土中骨料的影响（品种、粒径、含量）。
 - ②混凝土属弹-粘-塑性体，这类材料的强度不仅与声速有关，而且与声衰减系数有关，仅仅以声速来反映强度不够全面。
 - ③混凝土湿度对两个指标都有影响，湿度大，回弹值小，声速大，反之亦然。
 - ④低标号混凝土，强度与回弹值相关性差；高标号混凝土，声速又不能灵敏地反映其强度变化。

上述缺陷，是“回弹法”、“超声波法”所固有的，单靠那一个方法都难以克服。采用超声回弹综合法——以 $N, v \sim R_f$ 行二元回归，建立 $R_f = f(N, v)$ 方程，则可取两种方法之长补各自之短，从而提高测试精度和可靠性。例如：湿度大的混凝土，一方面声速高，另一方面回弹值低。两者的影响可互相抵消一部分。又如，对高标号或低标号混凝土采用综合法，两者的效应可以相互弥补，使检测能力提高。

3 测试仪器和测试方法

3.1 测试仪器

- ①回弹仪
- 冲击能量为2.267J (2.25N·m) 以上，凡经有关部门正式鉴定的N型回弹仪都可使用。标定值应在布氏硬度HB=500 (洛氏硬度HRC=58±2) 的标准钢砧上为80±2。仪器有下列情况之一时，应在钢砧上进行率定试验：(a)进行测试前后；(b)测试过程中对回弹值有怀疑。

②超声波检测仪

同济大学通过测试表明：在相同的测试技术条件下，各种型号超声波仪的声速有不同程度的差异，其中CTS-25型和SYC-2 型测试值较接近，JC-2 型和英国PUNDIT的测试值较接近，如以CTS-25型值为1，其它型号超声波仪的相对修正系数如表2所示。

他们的研究还发现，对仪器作相同技术条件声速量测对比试验，确定系统差异系数后，在1m测距内，可以互换使用。

仪器声时范围应为0.5~9999μs，测读精度应为0.1μs，应具有良好的稳定性，声时显示在20~30μs范围内时，2小时内声时显示的漂移不得大于±0.2μs。

此外，换能器频率应为50~100kHz，应采用黄腊油为耦合剂。

不同型号超声波仪相对修正系数表 表2

修正系数 仪器型号	混凝土 龄期(天)	
	48	65
JC-2型	1.024	1.043
PUNDIT	1.015	1.022
CTS-25	1.000	1.000
SYC-2	1.006	1.009

3.2 测试方法

以15cm×15cm×55cm标准抗折试块进行率定测试,试件应保持表面干燥状态,声速测试采用平测法,这是因为实际中不可能在大面积混凝土路面上进行对测;另一方面,平测法可以反映表面以下厚度($h=6.5\sim 8.5\text{cm}$)内混凝土的情况,如图1所示。虽然探测深度较浅,但有一定的代表性,能够在较大程度上反映30cm厚度以内的混凝土的实际情况。

声速和回弹值测试均在浇注面上进行,两者在同一测区。回弹值和声速测点分布如图2、图3所示。

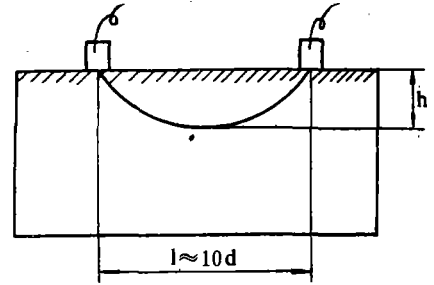


图1 平测法声波传播示意图 (cm)
(h 为探测深度, d 为骨料粒径, l 为测距)

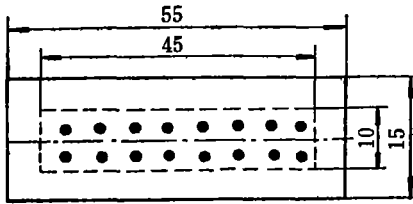


图2 回弹值测点平面分布图 (cm)

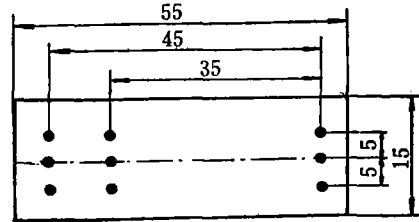


图3 超声测点平面分布图 (cm)

测试回弹值时,在图2所示45cm×10cm矩形范围内均匀地击打16个点,读数精确到1,去掉3个最大值和3个最小值,取剩下10个点的平均值。

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^{10} N_i}{10} \quad (\text{精确到} 0.1) \quad (1)$$

式中:

$\bar{N}$ ——测区回弹平均值;

N_i ——第*i*个测点的回弹值。

声速测试按图3所示测点分布进行。在测距选择方面要综合考虑两方面因素:一是探头间距不能太长,否则能量衰减太大,信号太弱;另一方面,由于混凝土是复杂的多相体系,如果探头间距太短,则由于材料局部不均匀性的影响,使声速不能准确地反映整个体系的特性。例如:若测距只有10cm,那么两个粒径为4cm骨料紧靠在一起,就会使声速过大,从而使计算的抗折强度偏高;若在10cm测距范围内骨料很少,则声速过小,使计算的抗折强度偏低。所以一般测距以10倍于骨料粒径为宜,在这里取40cm。图中所示以35cm和45cm两个测距进行声速测试,其目的是取平均值,进一步消除局部不均匀性的影响。同时,还可根据两个测距声速的差异大致判断是否存在内部缺陷,采用3次平行测试也是基于同样的目的。

测定声速时,声时值应精确到0.1μs,声速值应精确到0.01km/s,测距的量测误差应小于1mm,在每个测区内,平行布置3组测点,每组测点应分别测 l_1 和 l_2 距离内的声时,然后按下式计算平均声速。

$$v = \sum_{i=1}^3 v_i / 3 \quad (2)$$

$$v_i = (l_1/t_1 + l_2/t_2)/2$$

(3)

式中：

- v ——测区内平均声速(km/s)；
- v_i ——第*i*个测点两个测距的平均声速(km/s)；
- l_1, l_2 ——测距，分别为0.35m和0.45m；
- t_1, t_2 ——相应于*l*₁和*l*₂的声时(s)。

4 测强曲线的确定及精度要求

如前所述，目前国内外尚无快速无损检测水泥混凝土路面抗折强度的方法，所以，能否建立起*N, v ~ R_f*关系曲线以及确定相应的相关形式是我们的主要目的。

4.1 测强曲线的确定

试验条件：水泥选用道路工程中常用的425普通硅酸盐水泥和425矿渣水泥。考虑到水泥品种不同，水泥混凝土的强度和碳化深度亦不同，所以，对该两种水泥分别建立测强曲线。砂为中砂；骨料为石灰岩碎石，最大粒径30~50mm。两种混凝土及材料用量见表3和表4，龄期为28天、90天和180天。

普通硅酸盐水泥配合比及材料用量 (kg) 表3

编号	水灰比	水	水泥	砂率	砂	石
A	0.40	170	425	0.33	599	1253
B	0.45	170	378	0.34	630	1262
C	0.50	170	340	0.35	660	1264
D	0.55	170	310	0.36	688	1261
E	0.60	170	283	0.37	716	1256
F	0.65	170	262	0.38	742	1248

矿渣水泥配合比及材料用量 (kg) 表4

编号	水灰比	水	水泥	砂率	砂	石
$\overline{A}$	0.35	170	485	0.28	495	1309
$\overline{B}$	0.40	170	425	0.30	544	1310
$\overline{C}$	0.45	170	378	0.31	575	1319
$\overline{D}$	0.50	170	340	0.32	604	1322
$\overline{E}$	0.55	170	309	0.33	631	1321
$\overline{F}$	0.60	170	283	0.34	658	1316

按前面所述的测试方法，在正常成型养护的小梁试块上进行*N, v*测定及破型试验，再用二元非线性回归进行率定。率定结果表明，两种水泥均可以用下式表征。

超声回弹综合法测定混凝土抗折强度的通用式：

$$R_f = av^b \exp(cN)$$

(4)

式中：

- R_f ——混凝土抗折强度(MPa)；
- v ——超声波声速(km/s)；
- N ——回弹值；
- a, b, c ——待定系数。

两种水泥实用回归方程如表5所示。表中同时给出了用超声波速和回弹值单一指标所率定的方程。

表中公式(5)、(6)的相关系数均>0.8，表明回归方程有较好的相关性，相对标准误差分别为8.74和8.58，远远低于CECS-02对综合法抗压强度测强曲线规定的要求，即专用测强曲线相对标准误差 $e_r \leq \pm 12\%$ ；地区测强曲线 $e_r \leq \pm 14\%$ 。而用单一指标率定的方程，无论是相关系数、标准差，还是相对标准误差都较综合法差，所以，这两个方程可用于符合上述条件的地方，当然事先要进行验证。对不同地区不同材料的混凝土，可以用公式(4)进行率

实用回归方程一览表

表5

水泥品种	试块个数	回 归 方 程	r	S	e_r	δ
普通硅酸盐水泥	130	$R_f = 1.07v^{0.3541}e^{0.02334N}$ (5)	0.8247	0.3098	8.74	5.70
		$R_f = 0.960v^{1.1031}$ (7)	0.7438	0.4928	13.02	10.58
		$R_f = 0.19N^{0.837N}$ (9)	0.7887	0.4415	12.64	10.29
矿渣硅酸盐水泥	179	$R_f = 1.39v^{0.2348}e^{0.02846N}$ (6)	0.8405	0.3131	8.58	5.48
		$R_f = 1.45v^{0.3308}$ (8)	0.7157	0.5233	12.98	10.72
		$R_f = 0.29N^{0.772}$ (10)	0.7421	0.4786	12.04	9.88

表中： r ——相关系数； S ——标准差 (MRa)； e_r ——相对标准误差 (%)； δ ——平均相对误差 (%)； N ——回弹值； v ——声速 (km/s)； R_f ——抗折强度 (MPa)。

定。以确定适合本地区的测强曲线。

碳化深度对回弹值影响较大，在平测法中影响更大。当然，这与龄期有关，一般28~60天龄期的碳化深度并不显著，因此，对已碳化的混凝土和磨掉碳化层的混凝土分别进行了回弹值测试，同时测碳化深度，得出碳化深度 H 对回弹值 N 的修正方程。

$$N = 0.8795N_{表} - 1.4443H + 4.4863 \quad (11)$$

式中：

N ——实际回弹值；

$N_{表}$ ——碳化后回弹值；

H ——碳化深度(mm)。

进行碳化深度修正时，应首先用 1 % 酚酞酒精溶液测出碳化深度 H (mm)，再用上式校正回弹值。

4.2 精度要求

由于我国幅员辽阔，混凝土品种多，材料复杂，所以，应根据实际情况选用有代表性的材料、成型养护工艺和龄期作为基本条件，制作一定数量的试块，进行超声、回弹和抗折试验，建立具体情况下的专用测强曲线。在这里，根据我们的经验并考虑 CECS-02 的要求，可认为 $e_r \leq 14\%$ 的专用测强曲线可供实际使用。这一要求也适于本文提供的实用方程，也就是说，取一定数量试块（至少10组30块）进行超声、回弹和抗折试验，若 $e_r \leq 14\%$ ，则可以直接使用表 5 中(5)、(6)式。否则，则按(4)式重新进行率定，确定 a 、 b 、 c 值。

相对标准误差(e_r)按下式计算：

$$e_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{R}_i}{R_i} - 1 \right)^2}{n-1}} \times 100\% \quad (12)$$

式中：

e_r ——相对标准误差(%)；

$\hat{R}_i$ ——实测抗折强度(MPa)；

R_i ——计算抗折强度(MPa)。

表 6，表 7 分别列出了普通硅酸盐水泥和矿渣水泥用公式(5)、(6)的计算值和实测值的对比结果。

对比数据表明，用超声回弹综合法检测的抗折强度与实际破型强度之间的误差在 $\pm 10\%$

普通硅酸盐水泥计算抗折强度与实测抗折强度对比 表6

序号	实测值(MPa)	计算值(MPa)	相对误差(%)
1	4.21	4.43	-4.97
2	3.53	3.40	3.82
3	3.50	3.57	-1.96
4	4.08	4.40	-7.27
5	2.55	2.41	5.81
6	2.92	2.69	8.55
7	2.79	2.85	-2.11
8	2.92	2.87	1.74
9	2.66	2.80	-5.00
10	2.62	2.82	-7.09
11	2.63	2.76	-4.71
12	2.93	3.19	-8.15
13	3.33	3.12	6.73
14	3.15	2.94	7.11
15	3.57	3.46	3.18
16	3.25	3.11	4.50
17	3.25	3.45	-5.80
18	3.40	3.28	3.65
19	3.85	3.57	7.84
20	3.95	3.63	8.82

矿渣水泥计算抗折强度与实测抗折强度对比 表7

序号	实测值(MPa)	计算值(MPa)	相对误差(%)
1	4.75	4.41	7.71
2	4.29	3.96	8.33
3	3.77	3.88	-2.84
4	4.08	4.33	-5.77
5	3.58	3.92	-8.67
6	3.95	4.11	-3.89
7	4.37	4.06	8.37
8	4.15	4.07	1.97
9	3.87	3.63	6.61
10	3.92	3.96	-1.01
11	4.02	4.02	-0.00
12	3.98	3.71	-7.28
13	3.73	4.02	-7.21
14	4.21	4.03	4.47
15	4.32	4.26	1.14
16	3.89	4.11	-6.04
17	4.18	4.14	0.97
18	4.32	4.04	6.93
19	4.06	3.80	6.84
20	4.70	4.97	-5.43

以内，这对于一般工程检测而言，精度已经够了，而且综合法较破型试验更具广泛的代表性。

5 强度评定

测强公式建立以后，另一个重要问题是如何进行强度评定。现行国家标准《水泥混凝土路面施工及验收规范》(GBJ97-87)规定，换算水泥混凝土路面强度是否达到设计标号，是以标准养护28天小梁(15cm×15cm×55cm)试块的抗折强度来确定的，而超声回弹综合法所评定的路面抗折强度是建立在同条件试块破损与非破损之间具有实验相关性基础上的，因此，可将综合法计算强度视为同条件试块强度。其数理统计评定条件如下：

$$\bar{R} - k \cdot S_n \geq 0.85 R_{\text{标}} \tag{13}$$

$$\bar{R} \geq 0.85 R_{\text{标}} \tag{14}$$

式中：

- $\bar{R}$ —— n 组试块的平均抗折强度(MPa)，精确至0.1MPa；
- $R_{\text{标}}$ ——混凝土标号(MPa)；
- k ——合格判定系数(见表8)；
- S_n ——标准差(MPa)，精确至0.01MPa。

套用公式(13)，(14)，得出综合评定抗折强度第一和第二条件值。

$$R_i = 1.18(\bar{R} - k \cdot S_n) \tag{15}$$

合格系数值 表8

n	10~14	15~24	≥25
k	1.70	1.65	1.60

$$R_2 = 1.18(R_i)_{\min} \quad (16)$$

式中:

R_1 ——第一条件值(MPa), 精确至0.1MPa;

R_2 ——第二条件值(MPa), 精确至0.1MPa。

确定试样混凝土强度评定值 R_N 时, 以第一条件值和第二条件值中的较小值为准。

需要指出的是, 上述强度评定值为实际龄期强度, 而不是标号。下面给出两个强度评定实例, 仅供参考。

实例1 107国道官塘驿水泥混凝土路面强度评定表

(普通硅酸盐水泥 骨料最大粒径50mm)

表9

项 目 \ 测 区	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\bar{N}$	40.8	38.9	40.0	40.4	36.2	37.3	35.2	33.5	31.8	35.2
$v(\text{km/s})$	3.33	3.29	3.18	3.54	3.32	3.21	3.14	3.15	3.07	3.20
计算强度(MPa)	4.168	3.886	4.252	4.382	3.771	4.210	3.771	3.623	3.552	3.965
强度计算 $n = 10$ $k = 1.7$	$\bar{R}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i = 3.958\text{MPa}$					$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i)^2 - n(\bar{R}_n)^2}{n-1}} = 0.284\text{MPa}$				
	$R_{n1} = 1.18(\bar{R}_n - k \cdot S_n) = 4.101\text{MPa}$					$R_{n2} = 1.18(R_i)_{\min} = 4.191\text{MPa}$				
评定强度值	$R_N = \min(R_{n1}, R_{n2}) = 4.101\text{MPa}$									
计算公式	$R_f = 1.07v^{0.3541}e^{0.02334N}$									

实例2 316国道安陆城关水泥混凝土路面强度评定表

(矿渣水泥 骨料最大粒径40mm)

表10

项 目 \ 测 区	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\bar{N}$	30.4	30.7	31.9	32.7	32.1	33.8	34.7	33.4	32.9	34.0
$v(\text{km/s})$	3.42	3.29	3.42	3.46	3.42	3.74	3.39	3.67	3.82	3.39
计算强度(MPa)	4.184	4.592	4.728	4.402	4.442	5.027	4.823	5.067	4.551	4.537
强度计算 $n = 10$ $k = 1.7$	$\bar{R}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{n1} = 4.636\text{MPa}$					$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i)^2 - n(\bar{R}_n)^2}{n-1}} = 0.265\text{MPa}$				
	$R_{n1} = 1.18(\bar{R}_n - k \cdot S_n) = 4.938\text{MPa}$					$R_{n2} = 1.18(R_i)_{\min} = 4.937\text{MPa}$				
评定强度值	$R_N = \min(R_{n1}, R_{n2}) = 4.937\text{MPa}$									
计算公式	$R_f = 1.39v^{0.2345}e^{0.02545N}$									

6 结语

①通过一系列研究探索, 可以认为, 超声回弹综合法具有简便、快速的特点, 能较准确地反映路面水泥混凝土的实际抗折强度。

②根据本地区实际情况建立的测强方程, 基本上可以满足精度要求。

③由于本法的测试仪器在国内均可以解决, 方法简便, 能大大降低检测费用和检测人员的劳动强度, 所以具有推广应用的可能性和现实性。另外, 这次研究的重点限于碎石混凝土, 砾石及砾碎石混用时的抗折强度还有待进一步研究。

参考文献

[1] [英]R·琼斯, [罗]I·费格瓦茨 《混凝土非破损试验法》 中国建工出版社 1982。
[2] 中国工程建设标准化委员会 《标准规范汇编》第一集 《超声、回弹综合法检测混凝土强度技术规范》
(CECS-02) 中国计划出版社1989。
[3] 罗骥先《水工建筑物混凝土的超声检测》 水利电力出版社 1986。
[4] 中华人民共和国国家标准 《钢筋混凝土工程施工及验收规范》 (GBJ204—83)。
[5] 中华人民共和国国家标准 《水泥混凝土路面施工及验收规范》 (GBJ97—87)。
[6] 城建部标准 《回弹法评定混凝土抗压强度技术规范》 (JGJ23—85)。
[7] 董德文等《试验研究的数理统计方法》 中国计量出版社 1987。

新书推荐消息

由交通部公路科学研究所副研究员沈金安编著的《高速公路》一书最近将由中国科学技术出版社出版, 书号 ISBN7-5046-0388-0/U·5。该书就国外高速公路的建设状况, 结合我国的实际, 全面系统地介绍了有关高速公路的基本知识。内容包括: 高速公路的起源、发展和社会效益; 高速公路的设计; 景观、交通安全及服务设施; 汽车司机行车时应注意的事项; 高速公路的交通控制及管理; 21世纪的高速公路等。交通部副部长郑光迪为该书作序并题写书名, 指出它是一本关于高速公路的教科书。

该书内容丰富, 文字浅显易懂, 文图并茂, 书中附有70多幅插图, 可供从事高速公路设计、建设、管理的专业人员和广大汽车司机学习和应用。全书14.4万字, 32开本, 199页, 压膜封面, 定价6.25元。有购者可与交通部公路科学研究所情报资料室联系, 也可在当地新华书店购买。

地址: 北京北三环中路48号
交通部公路科学研究所情报资料室
邮政编码: 100088