

文章编号: 1000-7598-(2005) 08-1184-05

填充沟屏障远场被动隔振三维分析

高广运¹, 李志毅¹, 邱 畅²

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海浦东工程建设管理有限公司, 上海 201201)

摘 要: 把填充沟看作存在于弹性半空间的异质体, 运用瑞利波散射的积分方程, 对填充沟连续屏障远场被动隔振进行了三维分析, 详细讨论了影响隔振效果的几个主要参数。研究表明, 刚性材料比柔性材料具有更好的隔振效果, 在隔振设计时应选择刚性屏障材料; 填充沟的深度在一倍瑞利波波长内对隔振效果有较大影响, 并且与宽度一起决定其隔振效果, 但当屏障深度超过一倍瑞利波波长后, 屏障深度对隔振效果的影响很小。

关 键 词: 填充沟; 远场被动隔振; 瑞利波散射; 连续屏障; 积分方程

中图分类号: TU 352

文献标识码: A

Three-dimensional analysis of in-filled trench as barriers for isolating vibration in far field

GAO Guang-yun¹, LI Zhi-yi¹, QIU Chang²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Pudong Construction Project Management Ltd, Shanghai 201201, China)

Abstract: In-filled trench is equivalent to an obstacle in half-space when it was used for isolating vibration. Based on the integral equation of Rayleigh wave scattering, the paper studied the passive isolating vibration in far field by in-filled trench barrier in 3-D, and discussed some key factors affecting effectiveness of barriers. The results show that rigid material has a better effect than flexible one in isolating vibration, so the former should be selected as barrier material in engineering. The effect of isolating vibration is due to the depth and thickness of the trench. When the depth of barriers is more than a Rayleigh wave length, the effectiveness of isolating vibration increases for a little with the barrier depth increase.

Key words: in-filled trench; far-field passive isolating vibration; Rayleigh wave scattering; continuous barrier; integral equation

1 引 言

填充沟是广泛应用的屏障隔振形式, 它的远场隔振效果主要取决于 3 个因素: 屏障材料、屏障尺寸和屏蔽区大小。在讨论屏障材料对隔振效果影响时, Dasgupta 等^[1]认为柔性材料屏障的隔振效果与刚性材料屏障的隔振效果相当, 而 Haupt^[2]则认为刚性材料屏障的隔振效果更好。对于屏障尺寸, Haupt^[2]通过二维有限元的计算认为, 当屏障横截面积相同时屏障的隔振效果相同, 屏障的形状并不影响隔振的效果, 而 Al-Hussaini 和 Ahmad^[3-6]根据大量边界元法计算结果认为屏障形状对隔振效果也有一定的影响。对于屏蔽区大小的确定, Woods^[7]曾把连续屏障远场被动隔振的有效区定为屏障后的一个半圆内, 但 Ahmad 等^[8]证明了隔振最佳区域并非

紧靠屏障, 而是距屏障一定距离处。

可以看出, 关于屏障隔振的研究, 无论在理论上还是在试验上都存在一些不足之处, 对隔振的基本原理也存在一些模糊不清的认识。人工振源产生的波场中瑞利波的衰减速度远比纵波和横波慢, 近振源处的波场由 3 种波 (P 波、S 波、Rayleigh 波) 共同作用, 而远场隔振只需考虑瑞利波的影响。根据文献[9], 对泊松比不小于 0.35 的场地, 以 2.5 倍瑞利波波长 λ_R 为近场与远场的界线, 当泊松比不大于 0.30 时, 则以 $5\lambda_R$ 为界线。在远场, 屏障被动隔振相当于异质体 (屏障) 对瑞利波的散射问题。本文以瑞利波散射的积分方程为基础^[10], 把屏障作为弹性半空间的异质体, 首次对填充沟连续屏障的远场被动隔振效果进行了三维分析。结果表明, 柔性材料屏障隔振效果差, 且不稳定, 实际工程中应采

收稿日期: 2004-05-09

修改稿收到日期: 2005-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50178056)。

作者简介: 高广运, 男, 1961 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程教学和研究工作。E-mail: gaoguangyun@263.net

用刚性材料屏障。填充沟厚度对隔振效果影响大, 填充沟越厚隔振效果越好, 填充沟的深度在一倍 λ_R 内对隔振效果有较大影响, 但当深度超过一倍 λ_R 后, 对隔振效果的影响很小。

2 弹性半空间多个不规则异质体引起的瑞利波散射场

假设半空间各向同性弹性体 Ω 内含有 N 个沿 z' 方向的不规则弹性异质体, 在 $x'y'$ 平面上该弹性体由边界 C 来界定, 则瑞利波散射的积分方程为^[10]

$$\phi_R^{(p)} = \iint K_{RR}(x, y; x', y') \phi_R^{(p-1)}(x', y') dx' dy' \quad (1)$$

式中 x, y 为观察点位置坐标; x', y' 为散射点位置坐标; $\phi_R^{(p)}, \phi_R^{(p-1)}$ 分别为第 $p, p-1$ 次散射波场的势; $K_{RR}(x, y; x', y')$ 为积分核:

$$K_{RR}(x, y; x', y') = -\frac{i}{8J_1^1 c c^g} \cdot [H_0^{(2)}(kR)(-\Delta\lambda R_{\lambda 0} + \Delta\rho R_{\rho 0} - \Delta\mu R_{\mu 0}) - iH_1^{(2)}(kR)\cos\varphi(\Delta\rho R_{\rho 1} - \Delta\mu R_{\mu 1}) - H_2^{(2)}(kR)\cos 2\varphi(-\Delta\mu R_{\mu 2})] \quad (2)$$

式中 $\Delta\rho$ 为弹性半空间的质量密度变化量; φ 的意义见图 1; J_1^1 为弹性半空间中瑞利波的归一化积分值; c, c^g 分别为弹性半空间瑞利波的相速度和群速度; k 为瑞利波的波数; $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\mu$ 为异质体拉梅常数的变化量; R 为荷载作用点与观察点之间的距离, $H_0^{(2)}$ 为第 2 类 0 阶汉克尔函数; $H_1^{(2)}, H_2^{(2)}$ 分别为第 2 类 1 阶和 2 阶汉克尔函数; $R_{\lambda 0}, R_{\rho 0}, R_{\mu 0}, R_{\rho 1}, R_{\mu 1}$ 和 $R_{\mu 2}$ 的表达式见式 (3)。

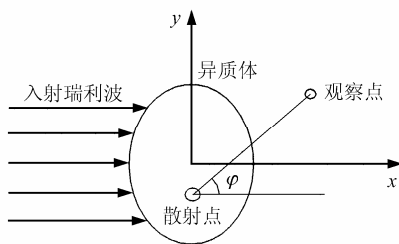


图 1 散射角 φ 的示意图

Fig.1 Determination of scattering angle

式 (1) 的详细推导参见文献[10]。它表明, 对于不同形状和大小的异质体, 只需改变式中的积分核 $K_{RR}(x, y; x', y')$, 就能求出瑞利波的散射波场。同时也说明, 当入射瑞利波遇到异质体时, 异质体内的每一点都相当于一个次生振源, 产生的散射波场为 $K_{RR}\phi_R^{(p-1)}$, 如果对整个异质体进行积分就可以求

得瑞利散射波的位移场。另外, 式 (1) 是一个不断迭代的过程, 不像 Born 近似只迭代一次, 因此适用于散射波场与入射波场相比变化较大的情况。

$$\left. \begin{aligned} R_{\lambda 0} &= \int \left(\frac{dU}{dz'} + kV \right)^2 dz'; & R_{\rho 0} &= \int \omega^2 U^2 dz'; \\ R_{\rho 1} &= \int \omega^2 V^2 dz'; & R_{\mu 0} &= \int \left[2 \left(\frac{dU}{dz'} \right)^2 + k^2 V^2 \right] dz'; \\ R_{\mu 1} &= \int \left(kU - \frac{dV}{dz'} \right)^2 dz'; & R_{\mu 2} &= \int k^2 V^2 dz' \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 V, U 为瑞利波所产生的水平方向位移和竖向位移; ω 为圆频率。

3 填充沟隔振的三维分析

为了下文叙述方便, 这里集中列出了一些字母的物理含义: c_{sb} 为屏障横波波速; c_{ss} 为土介质横波波速; ν_b 为屏障的泊松比; ν_s 为土介质泊松比; G_b 为屏障的剪切模量; G_s 为土介质的剪切模量; γ_b 为屏障密度; γ_s 为土介质密度; t 为屏障厚度; l 为屏障长度; h 为屏障深度; $x^* = x/\lambda_R, y^* = y/\lambda_R, t^* = t/\lambda_R, l^* = l/\lambda_R, h^* = h/\lambda_R$ 。并以振幅衰减系数 A_{RF} ^[7] 衡量屏障的隔振效果, A_{RF} 定义为设置屏障后屏蔽区内的竖向振幅与无屏障时竖向振幅之比。

3.1 屏障材料对屏障隔振效果的影响

屏障材料对隔振效果的影响, 主要考虑材料的弹性常数—— G_b 和 ν_b 以及 γ_b 的影响, ν_b 对隔振效果的影响非常小^[11], 在这里不予讨论。而横波波速比 $r_c = c_{sb}/c_{ss}$ 综合反映了 G_b 和 γ_b 对隔振效果的影响以及屏障与土介质间的差异, 通常把 r_c 作为影响隔振效果的材料参数进行讨论。

在分析 r_c 对隔振效果的影响时, 屏障的尺寸取为: $t^* = 0.10, l^* = 1.0, h^* = 1.0$ 。因 ν_b 对隔振效果的影响非常小, 根据一般材料的性质取刚性屏障的 $\nu_b = 0.25$ ($r_c > 1$), 柔性屏障的 $\nu_b = 0.45$ ($r_c < 1$), $\nu_s = 0.35$, 计算简图见图 2。

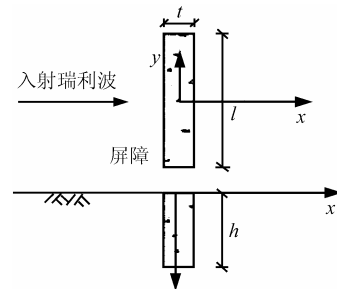


图 2 填充沟连续屏障远场隔振

Fig. 2 In-filled trench for isolating vibration in far field

图 3 为刚性材料屏障的 A_{RF} 等值线图。可以看出刚性屏障隔振与空沟隔振相似^[4], 在屏障前出现一定的振幅放大现象, 并且随着 r_c 增大, 振幅的放大现象 ($A_{RF} > 1$) 也越明显。屏蔽区的位置并非紧靠屏障, 而是距屏障一定距离处, 且当 r_c 增大时屏蔽区的面积也相应增大, 可见 r_c 越大隔振效果越好。为了获得较好的隔振效果, 笔者建议选择屏障材料时 r_c 一般应大于 5。

图 4 为 r_c 分别等于 0.75, 0.50, 0.15 时柔性材料屏障隔振 A_{RF} 的等值线图。可以看出柔性屏障隔振也出现屏障前振幅放大的现象, 但与刚性屏障相

比放大的幅度较小。屏障后也能形成一定的隔振屏蔽区, 但面积较小, 隔振效果也较差。对于柔性屏障, r_c 越小隔振效果越好, 为到达一定隔振效果, r_c 一般要小于 0.25。但从图中可以看出, 柔性材料屏障隔振的效果并不稳定, 当距屏障一定距离后, A_{RF} 就趋近于 1.0 了, 这一现象也在现场试验中得到证实。钱菊生^[11]和冯卫^[12]曾对粉煤灰(柔性材料)连续屏障的隔振效果进行了大量的现场实测, 发现在大多数情况下粉煤灰屏障的隔振效果并不理想, 他们认为, 这是场地等其它不确定性因素造成的, 但这恰恰给出了柔性屏障隔振效果不佳的实例。

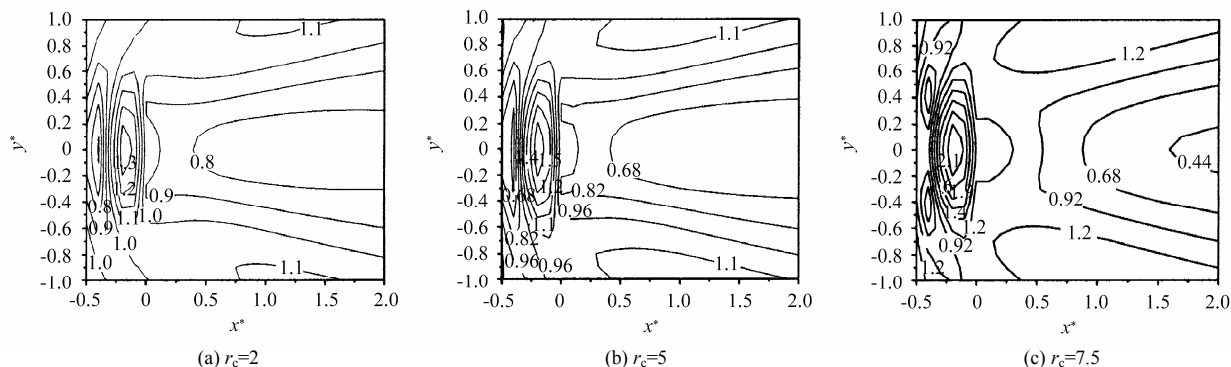


图 3 A_{RF} 的等值线
Fig.3 Isograph of A_{RF}

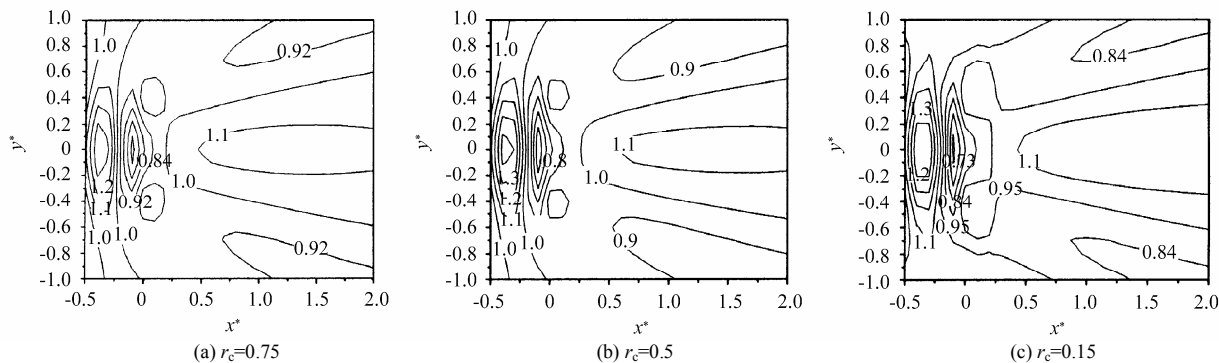


图 4 A_{RF} 的等值线
Fig.4 Isograph of A_{RF}

3.2 屏障尺寸对隔振效果的影响

屏障尺寸对隔振效果的影响非常显著, 但目前关于这一问题的研究还不充分, 常存在一些矛盾的结果, 造成因设计不当而使填充沟屏障失效。

填充沟屏障与空沟屏障不同, 其宽度 t^* , 深度 h^* 和长度 l^* 对隔振效果都将产生较大影响。由于 l^* 的影响与隔振范围密切相关, 本文只考虑屏障的 t^* 和 h^* 对隔振效果的影响。由以上论述可知, 刚性材料屏障的隔振效果较好。这里关于屏障尺寸的研究都是针对刚性材料屏障, 材料参数为: $r_c = 5$, $v_b = 0.25$, $v_s = 0.35$ 。

(1) h^* 对隔振效果的影响

这里取 $l^* = 1.0$, $t^* = 0.1$ 。图 5(a)~图 5(c) 为 h^* 分别等于 0.2, 1.0 和 1.5 时 A_{RF} 的等值线图。可以看出, 随着 h^* 的增大屏障的隔振效果增加, 屏蔽区的面积也不断增大。图 5(d) 的沿 x 轴 A_{RF} 随 h^* 的变化规律也反映 h^* 越大隔振效果越好。但当 $h^* \geq 1$ 后 (即屏障深度超过 $1.0 \lambda_R$), 再增加 h^* 对隔振效果的影响就很小了。因此, 对于填充沟连续屏障远场被动隔振, 为获得好的隔振效果, 屏障深度应大于一倍 λ_R 。但过大的屏障深度也没有必要, 因为瑞利波在传播过程中其振动能量主要集中于距地表一个 λ_R 。

的深度范围内, 只要有效地减小近地表部分的瑞利波能量就能取得令人满意的隔振效果。但近场主动隔振体波起重要作用, 该区域的屏障深度要大一些。

(2) t^* 对隔振效果的影响

空沟屏障宽度对于隔振效果的影响非常小^[10], 但填充沟屏障的厚度 t^* 对隔振效果有较大影响。这里令 $l^* = 1.0$, $h^* = 1.0$ 。

图 6(a)~图 6(c) 为 t^* 分别为 0.05, 0.10 和 0.20 时 A_{RF} 的等值线图。各图表明, t^* 增大时, 屏障后的隔振效果增大, 屏蔽区面积也有一定增大, 但 A_{RF} 等值线的大致形状没有改变。图 6(d) 为沿 x 轴 A_{RF} 随 t^* 的变化规律, 可以看出随着 t^* 的增大, A_{RF} 迅速减小, 隔振效果增加, 但屏障前的振幅放大现象

也更加明显。这说明, 随着 t^* 的增加, 屏障系统的刚度也越大, 瑞利波入射时反射回去的波也越多, 造成了屏障前的振幅放大, 而屏障后则形成了有一定面积的隔振屏蔽区。因此增大屏障厚度对填充沟屏障隔振有利, 但实际工程中随着屏障厚度的增加, 施工难度大、且工程造价增加。结合本文的分析和已有工程实践, 为达到一定的隔振效果, 笔者认为, 远场隔振连续屏障厚度应不小于 0.1。

文献[13]的板桩现场隔振试验效果较差, 是由于板桩一般较薄、刚度不够, 不可能取得较好的隔振效果。这就是通常钢板桩和混凝土板桩隔振效果差甚至失败的主要原因。

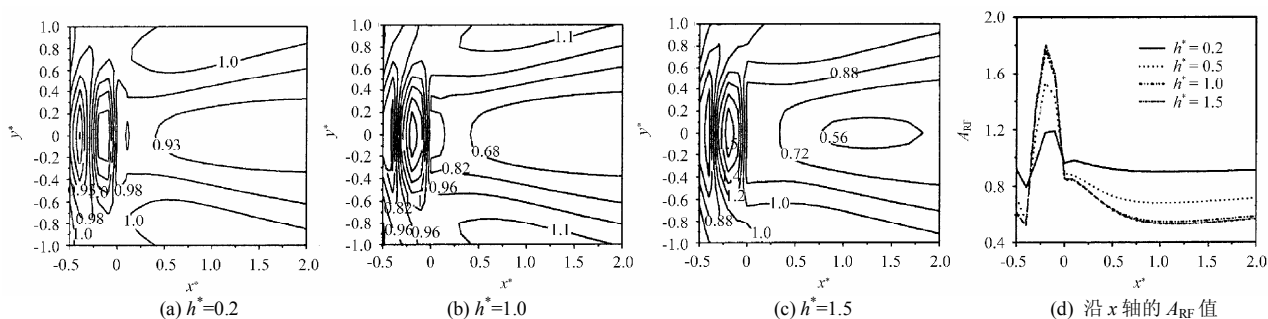


图5 A_{RF} 的等值线
Fig.5 Isograph of A_{RF}

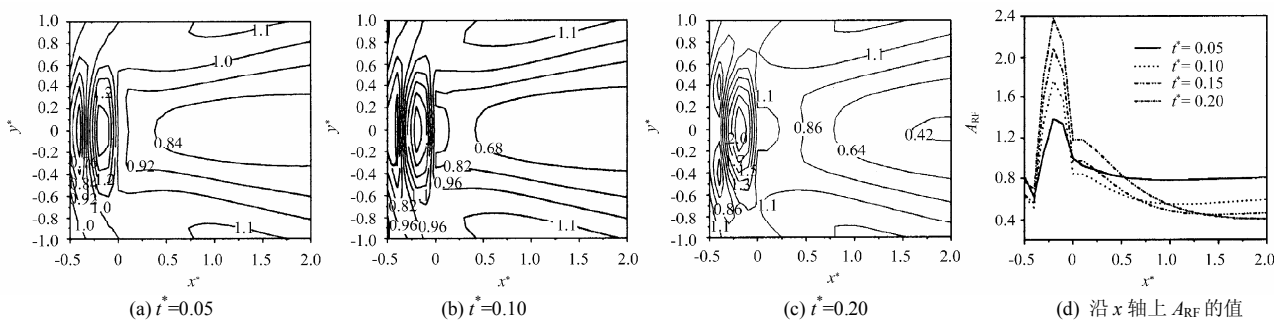


图6 A_{RF} 的等值线
Fig.6 Isograph of A_{RF}

4 结 论

屏障远场被动隔振属于瑞利波的散射问题, 本文将隔振屏障看作存在于弹性半空间的异质体对瑞利波散射, 利用瑞利波散射积分方程, 对填充沟连续屏障的远场被动隔振效果进行了分析。

(1) 隔振材料对于隔振效果有较大影响, 柔性材料的屏障隔振效果较差, 且不稳定。实际工程中应采用刚性材料屏障, 且 $r_c \geq 5$ 。

(2) 填充沟屏障厚度对于连续屏障远场被动隔振效果有较大影响, 实际工程中填充沟屏障的厚度应满足 $t \geq 0.10\lambda_R$, 填充沟深度应满足 $h \geq 1.0\lambda_R$ 。

参 考 文 献

- [1] Dasgupta B, Beskos D E, Vardoulakis I G. Vibration isolation using open or filled trenches part-2: 3-D homogeneous soil[J]. *Computational Mechanics*, 1990, (6): 129-142.
- [2] Haupt W A. Model tests on screening of surface waves[A]. *Proceedings of 10th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm: Balkema A A, Rotterdam, 1981. 215-222.
- [3] Al-Hussain T M, Ahmad S. Simple design methods for vibration isolation by wave barriers[A]. *Proceedings of Second International Conference on Recent Advances*

- in **Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics**[C]. Missouri: University of Missouri-Rolla, 1991. 1 493—1 499.
- [4] Ahmad S, Al-Hussaini T M. Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1991, 117(1): 67—88.
- [5] Al-Hussaini T M, Ahmad S. Design of wave barriers for reduction of horizontal ground vibration[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1991, 117(4): 616—636.
- [6] Al-Hussaini T M, Ahmad S. Active isolation of machine foundations by in-filled trench barrier[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 122(4): 288—294.
- [7] Woods R D. Screening of surface waves in soils[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineering**, 1968, 94(4): 951—979.
- [8] Ahmad S, Baker J, Li J. Experimental and numerical investigation on vibration screening by in-filled trench[A]. **Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics**[C]. Missouri: University of Missouri-Rolla, 1995. 747—752.
- [9] 高广运, 邱畅, 吴世明. 动力荷载作用下地面近场和远场的波动性状[A]. 环境岩土工程理论与实践——首届全国环境岩土工程学术会议论文集[C]. 李永盛, 高广运主编. 上海: 同济大学出版社, 2002. 173—179.
- [10] 高广运, 李志毅, 邱畅. 弹性半空间不规则异质体引起的瑞利波散射[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 378—382.
- GAO Guang-yun, LI Zhi-yi, QIU Chang. Scattering of rayleigh wave from irregular obstacles in elastic half-space[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(4): 378—382.
- [11] 钱菊生. 屏障隔振的边界单元法分析及试验研究[硕士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 1988.
- [12] 冯卫. 边界元法研究基础振动及屏障隔振问题[硕士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 1991.
- [13] Barkan D D. **Dynamics of Bases and Foundations**[M]. New York: Mc Graco-Hill Book Company Incorporated, 1962.

长三角斥 500 亿建国内首条时速 200 公里快速铁路

2007 年年底长三角将出现首条时速 200 公里快速铁路, 上海市民 3 小时可到合肥、5 小时可到武汉。

袁家骥报道: 宁启铁路泰州站 7 月 1 日正式开通运营, 南京站站房、站场 8 月底竣工, 宣杭复线 8 月底全线建成投产……投资 500 多亿元的新一轮铁路建设高潮正在长三角地区蓬勃兴起。在不远的将来, 上海市民乘坐特快列车 3 个小时就可达合肥, 比目前最快的列车缩短 4 小时; 到达武汉仅需要 5 小时左右, 比现在要快 12 个小时。上海铁路局辖区内的安徽、江苏、浙江、上海三省一市铁路建设将呈“规模大、投入多、工期紧、标准高”的新特点。上海铁路局局长刘涟清介绍说, 华东铁路建设项目数量和投资总额均创历史之最。目前, 上海铁路局有 10 多个建设项目同时展开, 有数十个施工点在分头建设。

铁路上海南站预计在今年底竣工, 该建筑总面积达 60 万平方米, 现主站房主体结构、钢结构大梁吊装、售票楼基础及行包、邮政、东西旅客地道和行包联系地道结构已全部完成。

沪杭电气化改造是长三角地区第一条电气化建设项目。该线全长 202 公里, 是全国铁路规划“八纵八横”沪昆通道的组成部分, 北接上海枢纽, 与京沪铁路相通, 南连杭州枢纽, 与浙赣、萧甬、宣杭铁路相接, 承担着长三角地区三分之一客运和四分之一货运量。

浦东铁路目前 6 座特大桥、2 个制梁场、阮巷站新建等控制工程已全面动工。沿江铁路亦已开工建设, 宁西铁路合肥至南京段的铁路运行里程将由目前的 312 公里缩短至线路里程 166 公里, 施工期为 3 年, 去年底动工, 预计到 2007 年年底建成。沪汉蓉通道合肥至武汉段的铁路运行里程将由目前的 565 公里缩短至 351 公里, 上海局管内线路长 212.3 公里, 也在去年底开工。以上两条线均为国家一级双线铁路, 也是长三角第一条最高时速达 200 公里的快速铁路, 该线将采用全线铺设跨区间超长无缝线路, 即合肥至南京、合肥至武汉将分别由一根钢轨相连接, 取消钢轨接头, 并预留时速 250 公里条件。

(摘自中国岩土工程网)