岩土工程

三维状态下复合地基桩土应力比的数值分析研究

薛林华[1] , 李小青[2]
(1. 通宇工程有限责任公司 ,北京　100081 ;2. 华中科技大学土木工程与力学学院 ,武汉　430074)

[摘　要]采用三维有限元法进行复合地基桩土应力比的数值分析研究 ,对各种影响因素诸如桩体刚度、荷载水平、面积置换率、桩体长径比、垫层厚度及地基土的物性参数等进行探讨 ,系统深入地研究分析桩土应力比的变化规律。

[关键词]复合地基　桩土应力比　数值分析
[中图分类号]TU473. 1　[文献标识码]A　[文章编号]0495 - 5331(2003)01 - 0081 - 05

桩土应力比 ,即桩顶应力与桩间土应力之比 ,它在一定程度上反映复合地基的工作状况 ,是影响复合地基承载力的重要因素。桩土应力比实质上是指作用在桩体上的荷载密度与作用在桩间土上的荷载密度之比。桩土应力比是复合地基设计的重要参数之一 ,然而桩土应力比的精确计算非常困难 ,到目前为止 ,国内外学者结合具体的地基处理形式 ,根据各自的假定条件提出一些桩土应力比的计算公式 ,本质上说 ,桩土应力比应与桩土模量比、应力水平、面积置换率、原地基土的土性、桩长、桩径以及固结时间等因素有关 ,但从目前的诸多计算公式看 ,要么与应力水平无关 ,要么与置换率或桩长、桩径无关 ,这些都有与实际情况不符 ,它们只在特定的假设条件下才适用。由于土体和桩体的实际应力应变关系较复杂 ,至今尚无一个被工程界接受的较完善的计算模式。本课题就是要通过计算机模拟分析来揭示桩土应力比与这些影响因素之间的关系 ,为设计计算提供理论依据。

1　复合地基桩土应力比模拟分析的基本思路

1) 本课题采用三维有限元法 ,并根据对称性取 1/ 4 分析。

2) 复合地基的根本特点是桩体和桩间土共同承担外部荷载。桩体的材料、强度、刚度、尺寸以及型式是影响复合地基承载特性及工作机理的重要因素。大量实践经验与研究成果所揭示的复合地基工作的一系列特性规律 ,成为对复合地基进行计算机模拟分析的基础 ,也是检验计算分析合理性的依据。

3) 为了尽可能地模拟真实体系 ,在桩体、桩间土、下卧层土体、垫层及砼基础各部分分别划分实体单元 ,在桩土界面处设置摩擦—接触单元模拟相对滑移和摩阻力的发挥 ;各单元服从 Mohr - Colomb 破坏准则 ;各单元间用位移协调联系 ,以反映桩土材料的不同、置换效应和垫层效应、以及桩体的遮拦作用与加强作用的影响。

4) 在工作荷载作用下 ,桩体和砼基础是在弹性范围内工作 ,因此 ,在模拟分析中对桩体和基础材料按线性材料处理(散体材料桩除外) ,对桩间土、垫层材料则按非线性材料进行非线性处理 ,同时还考虑接触面的非线性性能 ,并采用中点增量法进行非线性分析。

5) 散体材料桩、柔性桩及刚性桩的根本差异通过桩体材料的特性常数来反映。为考虑散体桩的挤密效应 ,可用桩体施工后的尺寸和地基处理后的土性指标。

6) 水泥土桩在施工过程中对桩径外土体的胶结作用和散体材料桩实际桩径的不规则变化 ,可以做为承载力的安全设备 ,暂且不予考虑。

7) 桩体破坏的侧向鼓胀、竖向刺入以及整体破坏等不同型式 ,不作为预先模拟的条件 ,而是检验计算结果合理性的依据。

2　土体非线性力学性能的考虑

土的非线性是十分明显的 ,尤以软土为最。土的性状很大程度上取决于土的矿物组成和土的结构。而土的结构状况反映了过去曾经作用的应力历

[收稿日期]2001 - 09 - 27 ;[修订日期]2002 - 11 - 06 ;[责任编辑]李石梦。
[第一作者简介]薛林华(1967 年 -) ,男 ,1991 年毕业于中国地质大学工程学院 ,获学士学位 ,工程师 ,现主要从事岩土工程的设计与施工工作。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

史。土的应力—应变关系是土性状的重要标志之一,不同的土类,不同的物理状态,不同的土组结构,不同的应变条件,不同的加荷条件以及不同的应力环境保护都会影响土的应力应变关系。因此,确切地模拟真实状况土的应力—应变关系并不是一件简单的事。在相当长的一段历史时期内,实用上较粗糙地用弹性关系来处理土的变形问题,或者用塑性关系来处理强度问题。计算机发展以后,土的应力—应变非线性关系的应用成为可能,有关土的各种非线性关系表达式,以及与这些非线性关系或相对应的分析方法,不断有人提出。其中 Duncan - Chang Et - Kt 本构模型[1]较为实用,一方面由于其模型参数只需常规三轴试验便可获得,另一方面该模型已经积累了广泛的工程经验,在我国得到了较为广泛的应用。

E_t - K_t 模型试验基础是三轴压缩试验,在试验期间侧向应力 σ_3 保持常数,每一条 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线都对应一个特定的侧向应力 σ_3。在以往的分析中,人们基于这一点提出 E_t - K_t 模型仅适用于最小主应力 σ_3 不变的情况,然而,在增量迭代法中,由于某级荷载作用 σ_3 也要发生相应变化,故其求本级荷载作用下初始模量的点应在新的 σ_3 下的曲线上重新确定。为此,假设本级初始点与上级迭代末点的应力水平相同,求出新的剪应力,而在本级曲线上确定出初始点,从而进行本级迭代。

3 桩土接触面性能的模拟

桩土接触面具有特殊的性质,在荷载作用下,桩土在接触面上发生相互作用,这种相互作用与接触面的受压闭合、受剪滑动及受拉张开等接触条件相关。事实上,这几种形态是耦合的,需进行耦合分析。在以往的相互作用分析中,采取如下两个假定:一是接触面十分粗糙,桩土之间不发生相对位移;二是认为接触面十分光滑,接触面之间不产生剪应力,从而可自由滑动。这两种假设都与实际作用情况有出入,使得相互作用分析不够精确。为了解决这一问题,本课题中采用界面元法作接触分析,在桩土之间设置无厚度 Goodman 界面元[2],这样处理的最大优点就是容许了桩土之间的非协调变形,可很好地模拟桩在土体中随荷载增大而逐渐产生滑移的情况。

Goodman 单元是由两片接触面组成。每片接触面有四个接触点,一个单元有 8 个结点。两接触面之间假想为无数微小的弹簧所连接。在受力前两接触面完全吻合,即单元没有厚度,是一种二维单元。接触单元受力后产生变形,如图 1 所示,图 a 表示接触单元法向受拉应力 $\sigma_n < 0$,使两边单元在接触面上相互脱开;图 b 表示 $\sigma_n > 0$,接触应力为压应力,则两边单元互相嵌入;图 c 表示接触面 $\tau \neq 0$,使两边单元错开;图 d 表示 σ_n 和 τ 共同作用的结果。由此可见接触单元可用于模拟接触面的开裂和错动滑移等现象。

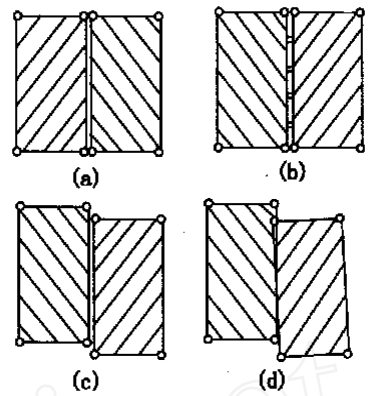

图 1 接触面的拉开、重叠、错位

接触单元与相邻接触单元或三维单元之间,只在结点处有力的联系。在节点力 $\{F\}^e$ 作用下,两片接触面间的弹簧内应力为 $\{\sigma\} = \{\tau_x\ \sigma_n\ \tau_z\}^T$,其中 τ_x、τ_z 分别为沿 X、Z 方向的剪应力,σ_n 为 Y 方向的正应力。相应地两片接触面之间产生相对位移 $\{w\} = [\Delta u\quad \Delta v\quad \Delta w]^T$。在线性弹性假定下,应力 $\{\sigma\}$ 与 $\{w\}$ 成正比关系:

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_n & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \cdot \{w\} \tag{1}$$

式中 k_x、k_z、k_n 分别为切向(X 向、Z 向) 和法向(Y 向) 的单位劲度系数。

对于法向刚度系数 kn,当接触面受压时,为了模拟两边单元不会在接触面处重叠,如图 c 所示,应取一极大的数值,如 ,可使相互嵌入的相对位移小到可以略去不计。但若计算出的法向应力为拉,而又认为接触面不能承受拉应力,则应令 kn 为很小的值,如取 10 kN/ m^3,以使算出的拉应力可忽略不计。

至于切向刚度系数 ks,Clough 和 Duncan 对土与其它材料接触面上的摩擦试验表明,剪应力 τ 与相对剪切位移 W_s 呈非线性(近似双曲线) 关系,从而推得切线切向刚度系数切线切向刚度系数 k_s(k_1、R_f、τ_f 为与土性有关的系数):

$$k_s = k_1 \cdot \frac{1}{(1 + k_1 \cdot \Delta w_s \cdot R_f / \tau_f)^2} \tag{2}$$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4　计算结果

为了方便起见,在模拟分析过程中,分别按散体材料桩、柔性桩和刚性桩选取 3 种不同桩体刚度的复合地基,采用碎石垫层进行桩土应力比的数值分析。计算参数如下:

群桩复合地基:桩数 9 根、桩径 0.5 m、承台厚度 0.5 m、地下水位 1.0 m、下卧层计算深度 10 m,分级加载,每级荷载为 50 kPa。实体单元 2036 个,接触单元 120 个,节点数 2760。数值模拟计算参数如表 1 所示,将计算结果点绘成曲线,如图 2～8 所示。

表 1　复合地基数值模拟计算指标

名　称	c (kPa)	ϕ (°)	k	n	R_f	μ
桩间土、下卧土层	15.0	25.0	350	0.7	0.85	0.35
砂砾(碎石)垫层	1.0	38.0	900	0.7	0.85	0.30
承台(C30 砼)			30000	0.0	0.0	0.20
桩体　散体材料桩	1.0	38.0	1000	0.7	0.85	0.30
柔性桩			3000	0.0	0.0	0.35
刚性桩			30000	0.0	0.0	0.20

5　分析与讨论

1) 图 2 为复合地基桩土应力比 n 随桩体模量 E_p 变化的有限元法计算结果。从图示结果可以看出,桩土应力比 n 随 E_p 的增大而增大,但增长率却在下降。这说明:在一定范围内,桩体刚度对桩土应力比影响较大,是影响复合地基承载特性的重要因素;但桩体刚度过大时,桩体表现出刚性桩基础的承载特性,荷载基本上由桩体承担,桩间土分担的荷载很小,此时,即使桩的刚度再增加,桩土应力比也不会增加许多,即桩土应力比的增长率很小。

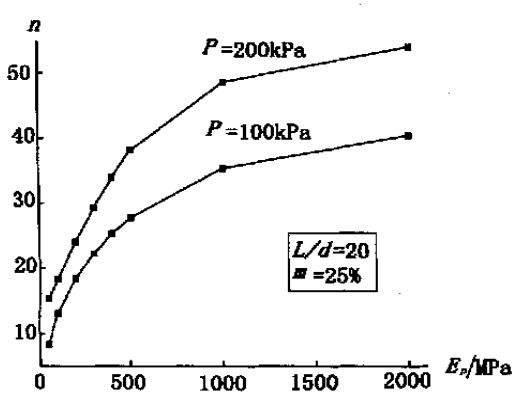

图 2　桩土应力比与桩体模量的关系

2) 图 3 曲线 1、2、3 分别表散体材料桩、柔性桩、刚性桩复合地基桩土应力比随荷载变化的有限元法计算结果。桩土应力比 n 值随荷载 P 变化而变化的形式与复合地基类型有关:刚性桩复合地基桩土应力比 n 值大,变化范围大,并有极值产生,即桩土应力比出现一峰值;柔性桩复合地基桩土应力比则随荷载的增大而减小;而散体材料桩的桩土应力比 n 值较小,变化范围小。

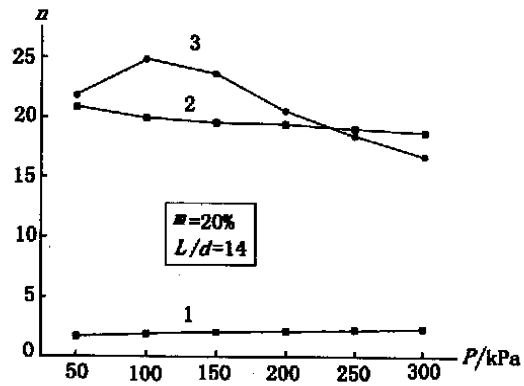

图 3　桩土应力比与荷载水平的关系

桩土应力比随荷载的增加而变化,其变化形式与桩材和桩间土应力应变的特点有关。通常桩材与桩间土的应力应变关系相差很大,桩体材料在很小的变形下即达到峰值强度,过峰值后其强度迅速降低,表现为应变软化。而桩间土一般为粘性土,常表现为应变硬化。这种应力应变特性的差异表现在加荷初期,桩身应力增加很快,桩土应力比迅速增大,当桩身材料达到峰值强度(对应于桩身较长、桩侧总摩阻力大于桩身强度的情况),或者桩刺入破坏时(对应于桩身较短、桩侧总摩阻力小于桩身强度的情况),沉降很快增加,桩身应力下降,桩间土承担的应力增加,桩土应力比减小。对于桩体强度较高(如 CFG 桩、水泥掺加量超过 15 %的水泥土桩)的复合地基,在通常情况下,桩土应力比是一个先升后降的变化过程。而桩身强度偏低的复合地基,桩土应力比表现为随外荷载的增大而减小。

3) 桩土应力比随着荷载的增大而减小,意味着刚一加载就会出现明显的应力集中,桩身应力较大而桩间土应力很小,桩间土对桩身提供的围压也很小,使桩近似为无侧限受压状态,这就容易使桩身首先破坏,恶化桩与土之间的共同作用关系,这对于散体材料桩来说,情况更为严重,因为散体材料桩需要桩周土的围箍作用才能维持桩体形状,仅仅依靠自身不能形成桩体。因此,在加载初期调节基底变形,降低桩土应力比,不但能更好发挥桩间土的作用,而且增大桩间土对桩体提供的围压,有利于提高桩体强度,使桩、土的强度接近同时发挥,达到最终提高

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

复合地基承载力的目的,这可以通过在基底铺设垫层来实现。另一方面,增强桩的韧性和塑性,减小桩材应变软化的趋势,也能提高复合地基的承载力和可靠度,这可以通过在桩头部适当位置加筋来实现。

4)桩土应力比随荷载的增加而变化,不同的荷载对应不同的桩土应力比,因而在实际应用中,可根据使用荷载的大小,选用相对应的桩土应力比计算,确定桩体承载力,进而确定合适的桩材及相应的复合地基设计参数。

5)桩土应力比 n 随置换率 m 的增大而增大,随桩体长度 L 的增加而增大(如图 4、图 5 所示)。但当桩体长度超过一定范围后,n 值不再增大,并趋于稳定。也就是说,增加桩长可增加复合地基的承载能力,但并不改变桩、土分担的荷载比例,继续增加荷载,桩、土分担的荷载值都增大,相对而言,桩体率先进入极限状态,因而复合地基的破坏常常是桩体先发生破坏,进而引起复合地基的全面破坏。

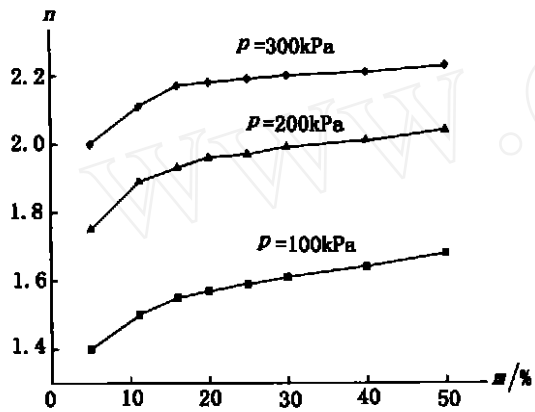

图 4 桩土应力比 n 与置换率 m 的关系

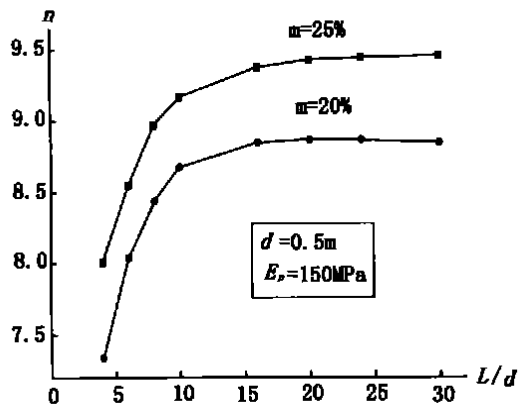

图 5 桩土应力比 n 与桩体长径比 L/d 的关系

6)对于同一类桩,不同的地基土,有不同的桩土应力比,天然地基土的物性参数明显地影响着桩土应力比的变化。在本课题中,主要研究 c 值对桩土应力比的影响,计算结果如图 6、7 所示:随着地基土 c 值的增大,在一定范围内,桩土应力比 n 减小,随后逐渐趋于稳定,n 值不再降低。c 值的增大,意味着地基土强度增加、桩土相对刚度(桩土模量比)减小,桩土应力比 n 值减小。因此,在软弱地基土中进行地基处理时,桩体会承受较大的荷载,桩体必须满足一定的强度要求;当承载力要求更高时,桩体必须承受更大的荷载,必须有更高的强度和刚度,桩体渐渐呈刚性桩基础的承载特性,亦即在特别软弱的地基土层中宜采用刚性桩基础的方式进行处理,从而满足上部承载要求。

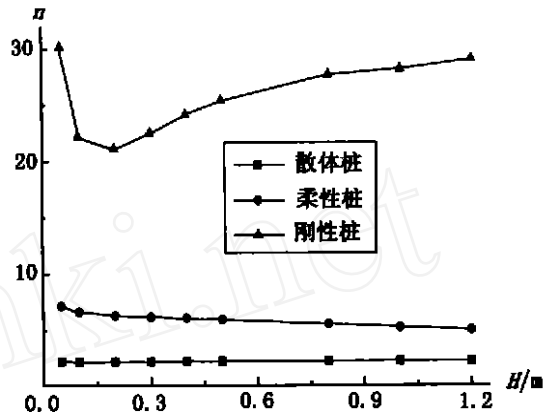

图 6 桩土应力比 n 与垫层厚度 H 的关系

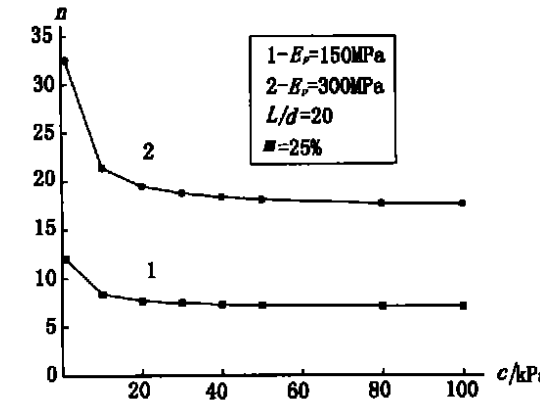

图 7 桩土应力比与粘聚力的关系

7)垫层有明显的调整桩土应力比的作用,如图 8 所示,桩土应力比 n 随垫层厚度 H 的变化而变化,对于不同桩体刚度的复合地基,其变化规律不同。散体材料桩复合地基桩土应力比 n 值随 H 的增大而迅速降低并很快趋于稳定;柔性桩复合地基的 n 值随 H 的增大而减小;刚性桩复合地基 n 值在一定范围内,随 H 的增大而减小,但 H 超过一定值后又随随 H 的增大而增大,即垫层存在一个合理厚度 H 值。

垫层在复合地基中起着"褥垫"及"找平"的作

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

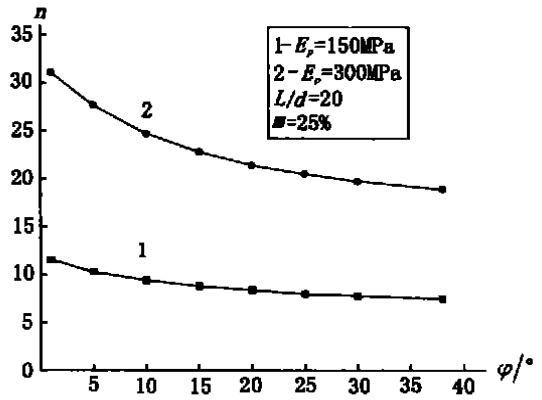

图 8　桩土应力比与内摩擦角 ϕ 的关系

用,其厚度对复合地基工作性状有很大影响。垫层越薄,桩体应力集中的现象越严重,桩土应力比越大,桩体对基础产生很显著的应力集中,尤其是刚度较大的桩体;同时,垫层厚度过小,桩间土承载力不能充分发挥,势必增加桩的数量或桩长。反之,垫层厚度过大,尽管对桩间土承载力发挥有利,但桩的承载力却不能有效发挥。对于刚度较小的碎石桩等,会导致桩土应力比接近或等于 1,不能充分发挥桩体作用。合理的垫层厚度,既要保证基础不产生过大的应力集中,又要合理的发挥桩体和桩间土的承载能力。因此,垫层厚度应根据复合地基承载力要求、桩土相对刚度等因素确定。此外,垫层的厚度要满足桩间软土受剪切破坏的区域大小及工程对剪切区深度的要求,一般情况下,垫层厚度 H 可取 20～40 cm。

[参考文献]

[1] Duncan J M,Chang C Y. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils[J]. Asce,1970,96(5).

[2] Wayne Clough G,Duncan M. Finite Element Analysis of Retaining Wall Behavior[J]. Asce,1971,97,12.

NUMERICAL ANALYZE ON THE STRESS RATIO OF PILE AND SOIL OF THE COMPOSITE FOUNDATION UNDER 3D CONDITION

XUE Lin - hua[1],LI Xiao - qing[2]

(1. *Tongyu Engineering Co., Ltd., Beijing* 100081;

2. *Civil Engineering and Mechanics Institute, Central China Science and Technology University, Wuhan* 430074)

Abstract: This paper makes a thoroughly study on the ratio of pile and soil of the composite foundation by using 3D - FEM. The influence of some factors such as pile rigid, bearing load, area replacement ratio, length - diameter ratio, pad cushion thickness and natural foundation soil strength has been simulated. Some conclusions relating to the inherent principle of the stress ratio of pile and soil are obtained.

Key words: composite foundation, stress ratio of pile and soil, numerical analyze

资源型企业与地质调查单位优势互补实施持续发展战略

——中铝公司、有色地调中心首度合作

中国铝业公司与有色金属矿产地质调查中心合作签字仪式,12 月 26 日在北京举行。中铝公司副总经理熊维平和地质调查中心主任孙肇均致词祝贺,中铝公司副总经理吴伟成和孙肇均代表合作双方在协议书上签了字。这标志着双方为迎接全球一体化经济条件下的国际挑战而在国内外矿产资源的勘查、开发和研究方面实现优势互补和共同发展的战略合作全面启动。出席签字仪式的双方高层管理人员还有中铝股份公司副总裁宋培凯、张程忠,有色地质调查中心副主任朱世戎、杨兵和总工程师朱谷昌等。

矿产资源是资源性产业赖以生存和发展的物质基础。纵观世界矿业,谁拥有资源,谁就拥有持续发展的先决条件。中国铝业公司对矿产资源的勘查、开发和保护非常重视。此次与有色金属矿产地质调查中心合作,旨在将自身铝业生产的技术、管理优势与有色金属矿产地质调查中心在有色金属矿产资源勘查方面的人才、技术优势融为一体,形成优势互补、共同发展的良好格局。协议商定,地质调查中心将根据中国铝业公司发展对矿产资源的要求,组织开展国内外矿产资源调查、可供性评价、资源发展战略研究,并为中国铝业公司提供地质勘查技术、资料、信息等方面的咨询服务,双方还将按照国家利用"两种资源、两个市场"的资源战略,合作勘查和开发国内外矿产资源。

据悉,这种与国际接轨的合作模式,符合国家对资源保护性开发的政策,避免了无序开采,同时还为资源型企业持续健康发展、提高抗风险能力和市场竞争能力开辟了一条新路。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net