



岩体施工过程力学的进一步发展和时空效应的某些工程实例

朱维申等

山东大学 岩土与结构工程研究中心

中国科学院 武汉岩土力学所

问题背景



中国可认为是当今世界上地下工程最多的国家之一，仅中国大陆每年修建的各类隧道超过200公里。地铁约数十公里。矿山方面仅煤炭行业开掘的巷道就超过6000公里。水电地下洞室近年来刚建成的二滩电站、小浪底电站等都有复杂的大型地下洞群，刚进入施工的则有龙滩电站、小湾电站和水布垭电站等大型地下洞室。即将兴建的还有汐洛渡、向家坝地下电站等。



◆复杂条件下的岩体工程

工程复杂 如深埋、大断面、洞室群体、矿山中多层开采、高边坡等；

地质环境复杂 如高地应力、节理岩体、软岩、地下水活动等；

- ◆ 施工周期长
- ◆ 围岩具**非线性**特性
- ◆ 围岩稳定受到工程**施工过程**和**施工方案**的强烈影响

岩体施工过程力学—岩石力 学研究新方向的提出

位于四川雅砻江上的大型水电站——二滩电站，在前期科研工作中，曾对地下洞群稳定做过有限元分析。由于初始地应力较高，（在正长岩中可达 25 Mpa；在玄武岩中可达 35Mpa），二维分析表明洞周塑性区很大。



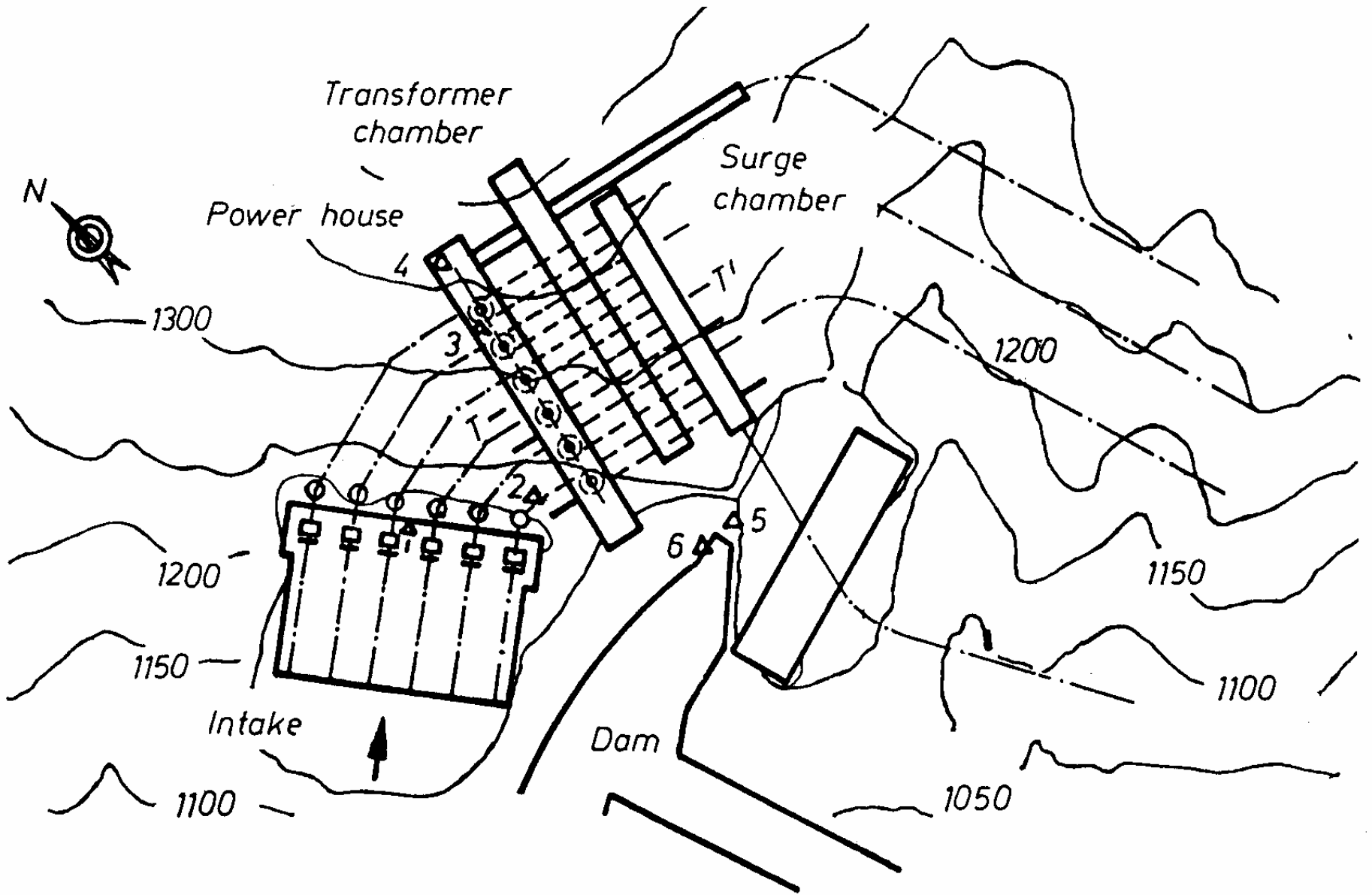
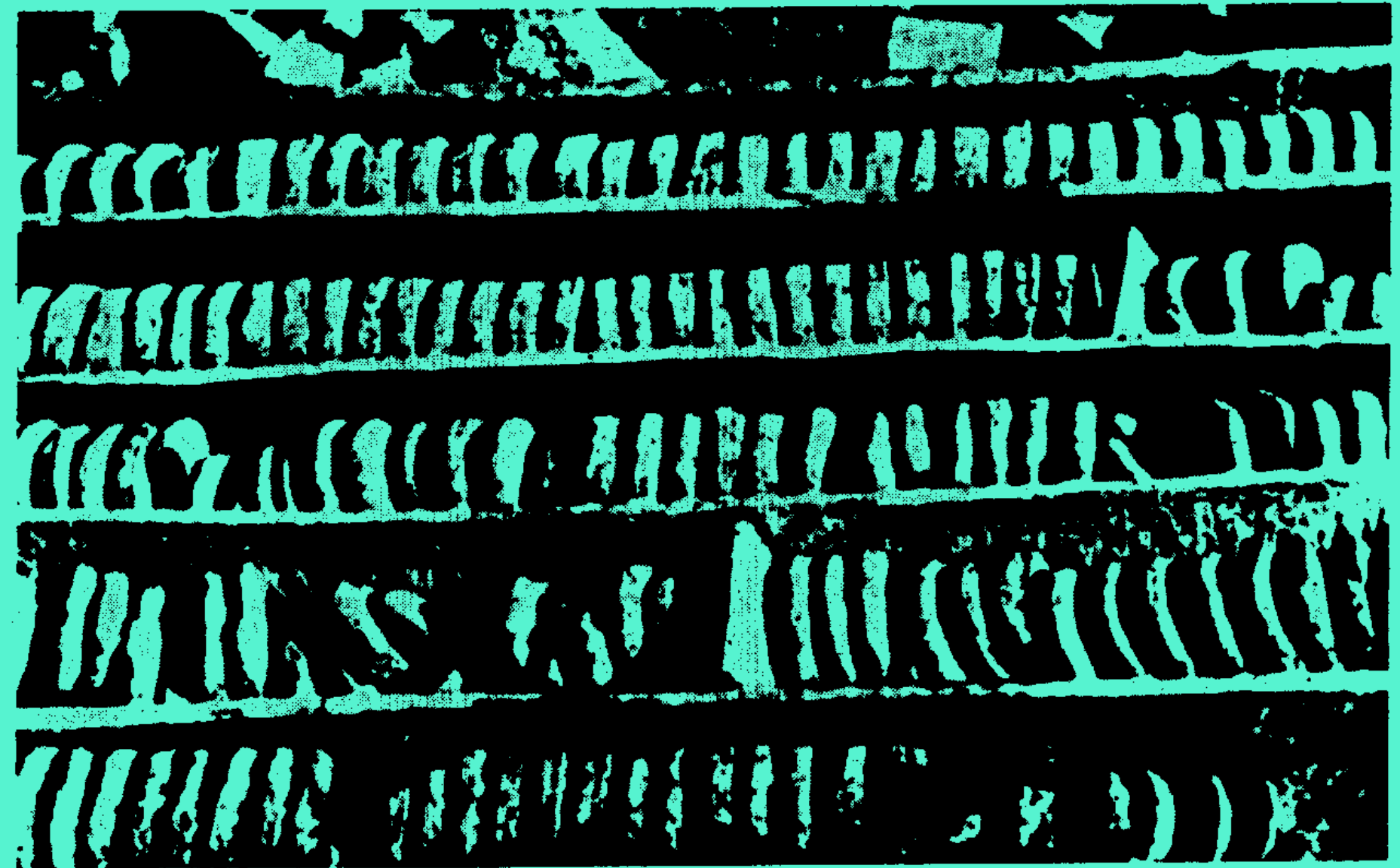


Fig. 2. Layout of underground power chambers at dam site





Diking cores from borehole

Great number of in-site tests performed using overcoring techniques

700 original data obtained from 45 testing boreholes in total

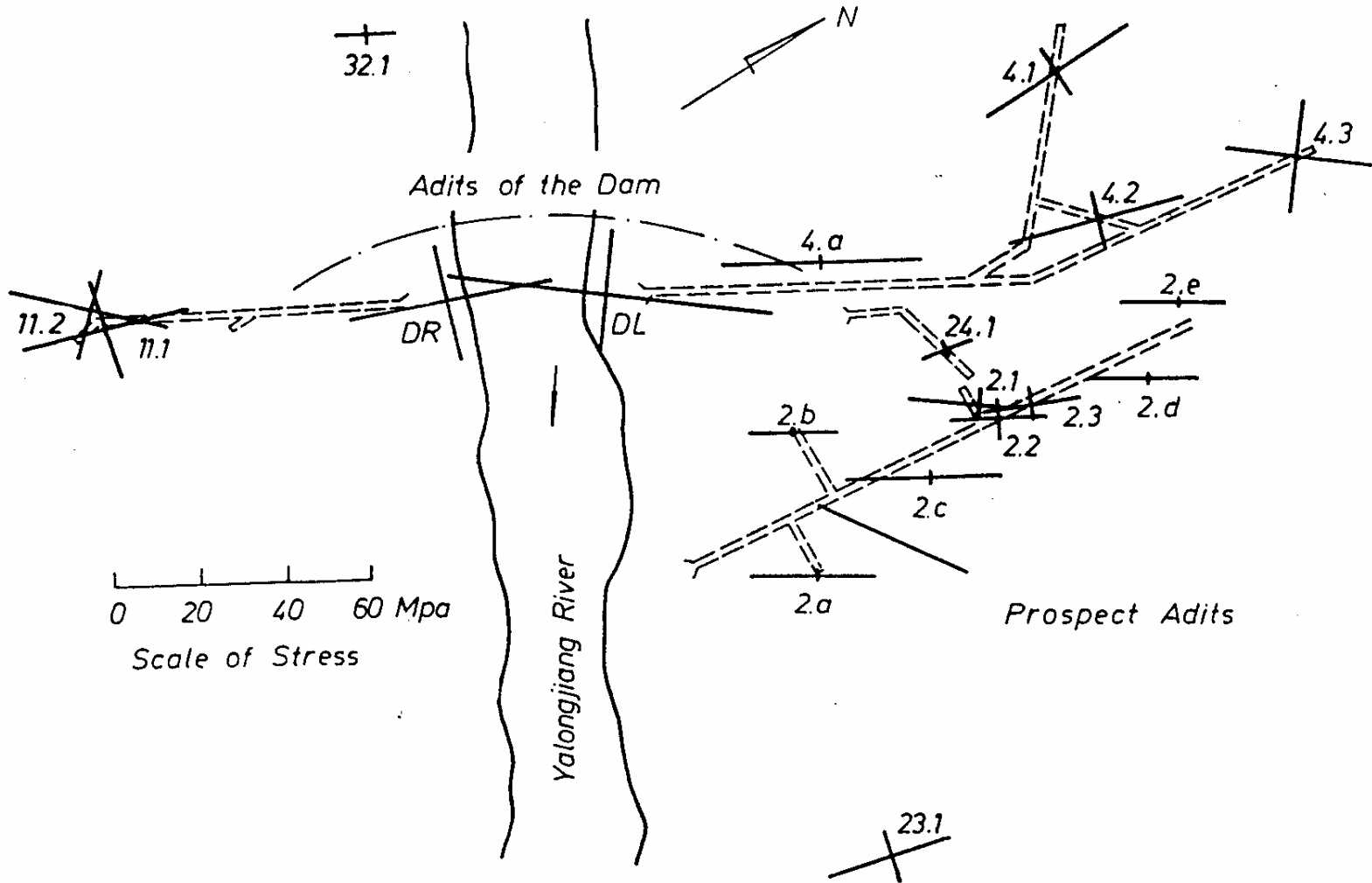
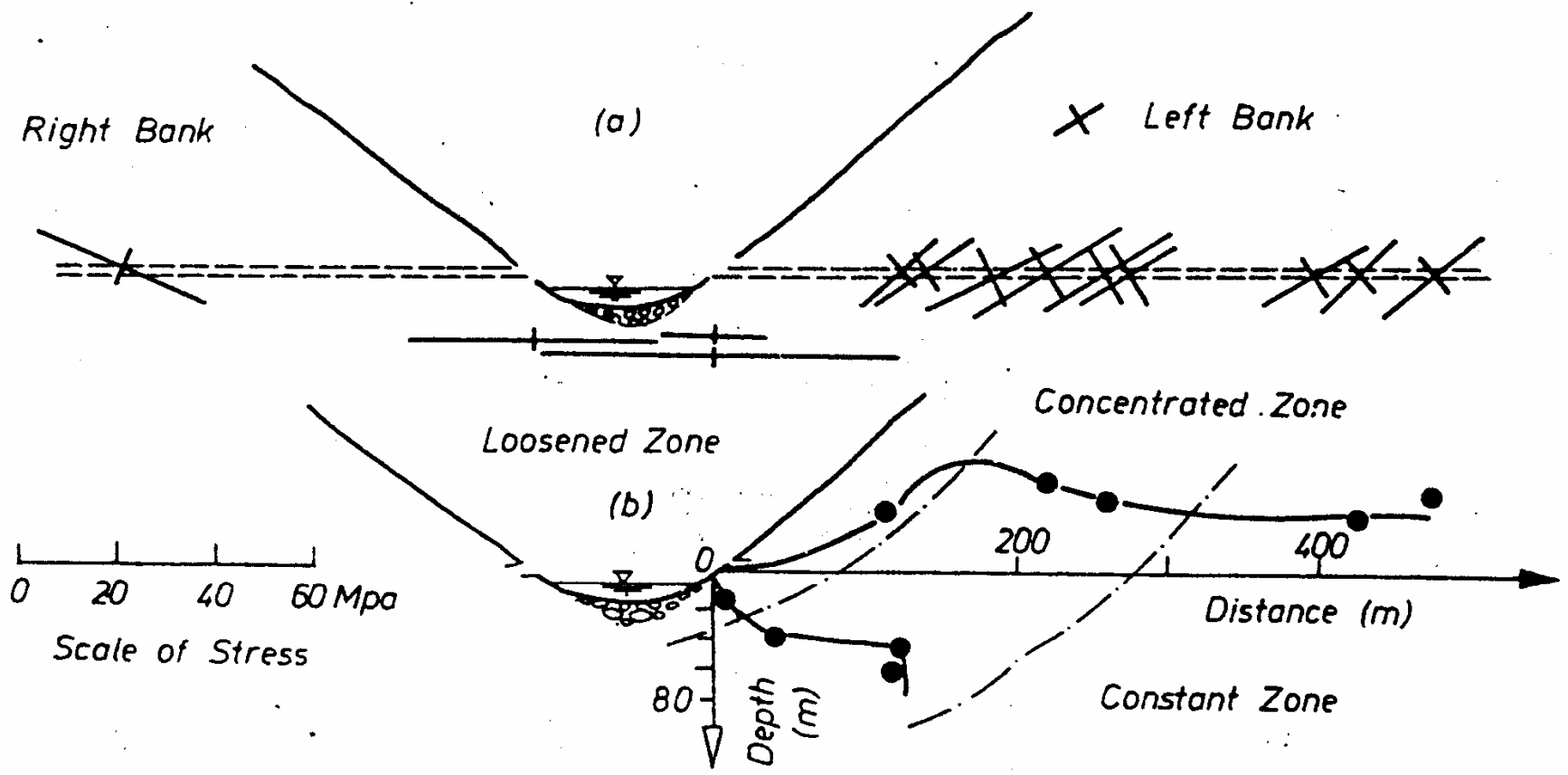


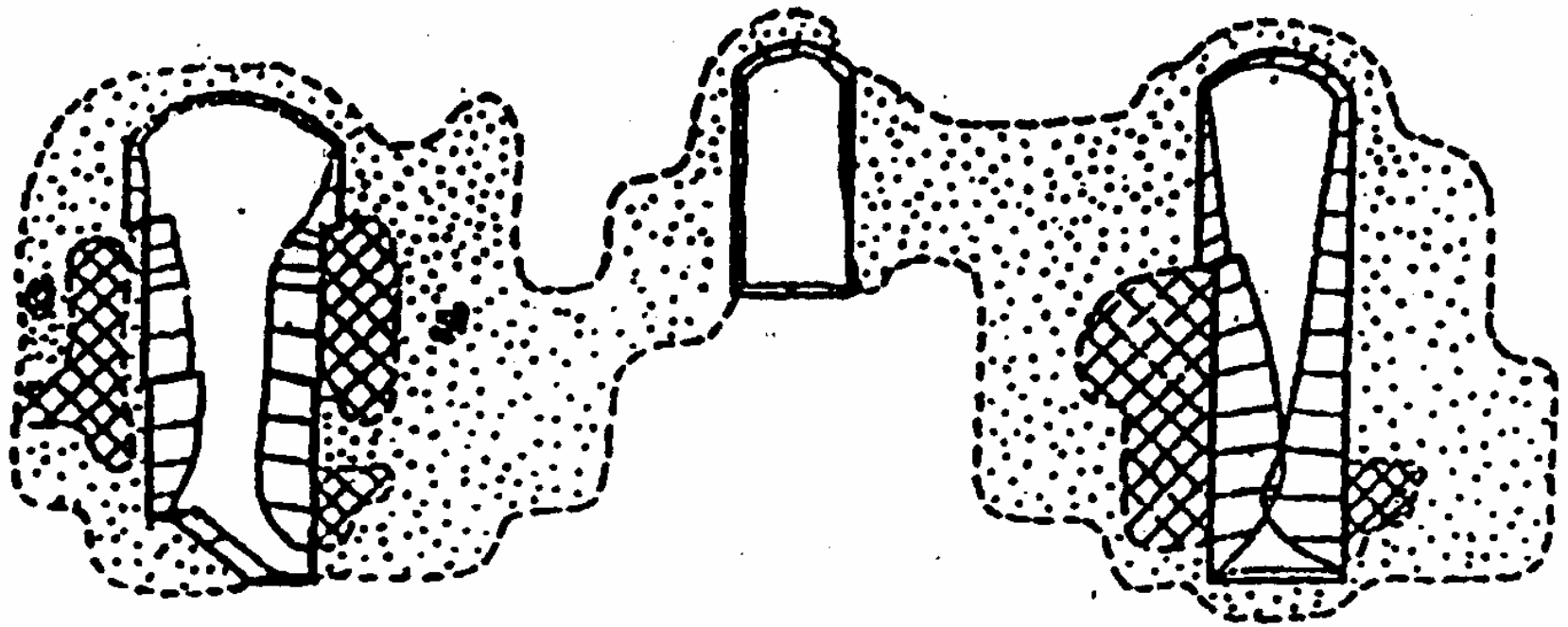
Fig. 3. Components of measured stresses in horizontal plane

Results — initial stress $\sigma_1 = \sigma_{max}$ are 19~24 Mpa for syenite and 29~34 Mpa for basalt. The ratio of $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$ is about 1 : 0.5 : 0.25

Three zones of different distribution of σ_1 in two banks



a) Principal stresses in syenite in cross section of the river. b) Three stress zones characterized by measured stresses



 shear
fracture

 tension
fracture

 tension-shear
fracture

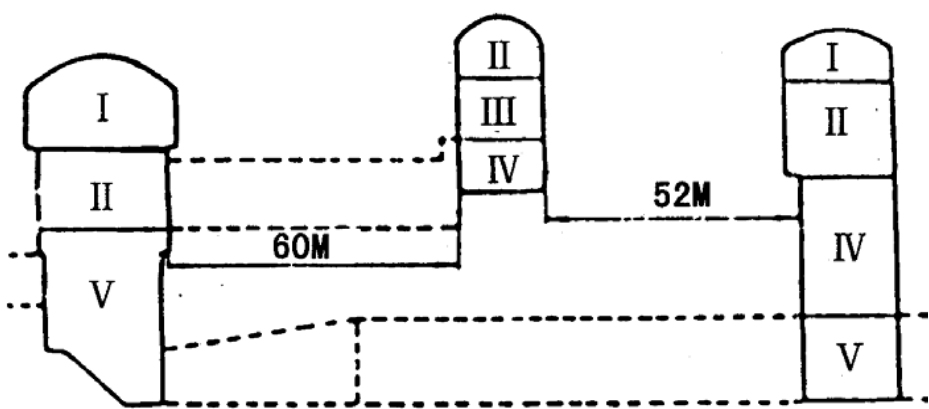
Fracture zone and displacement of no bolts on one go excavation

But if we simulate the excavation by more detail method—excavating the caverns **step by step** gradually, the results are very different for different excavation schemes

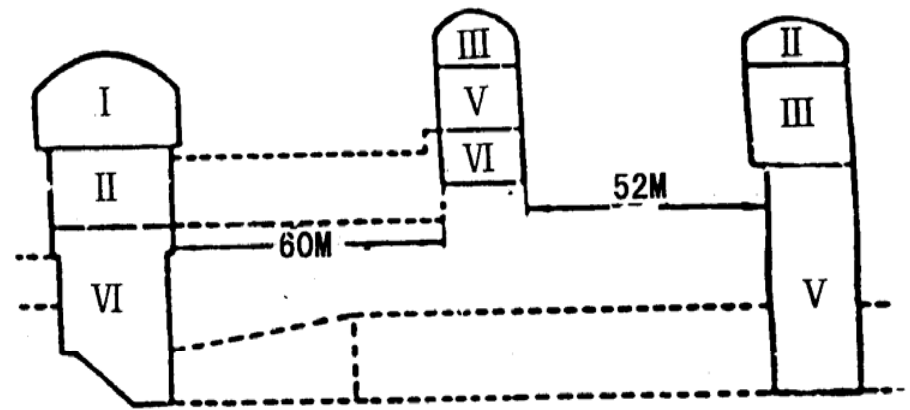


但在较细致的分步开挖计算模拟中，发现开挖步的多少和开挖次序对围岩破损区大小的影响很大。

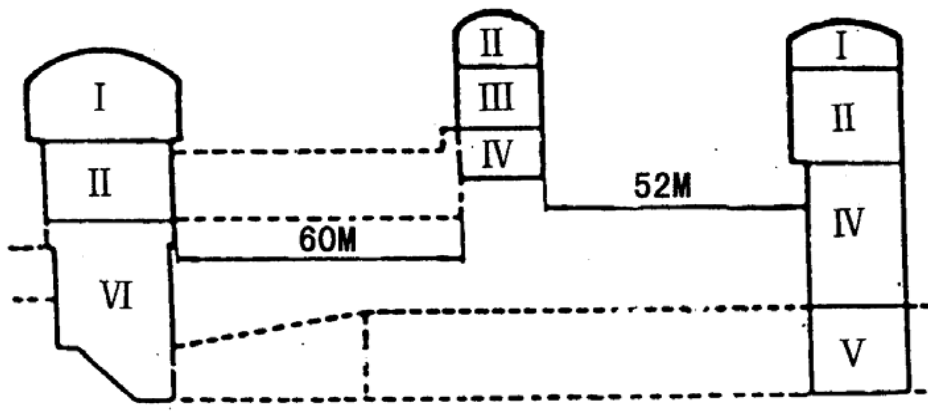
因此得到新的认识从而提出了“岩体施工过程力学”这一新的研究方向及其基本原理。即：



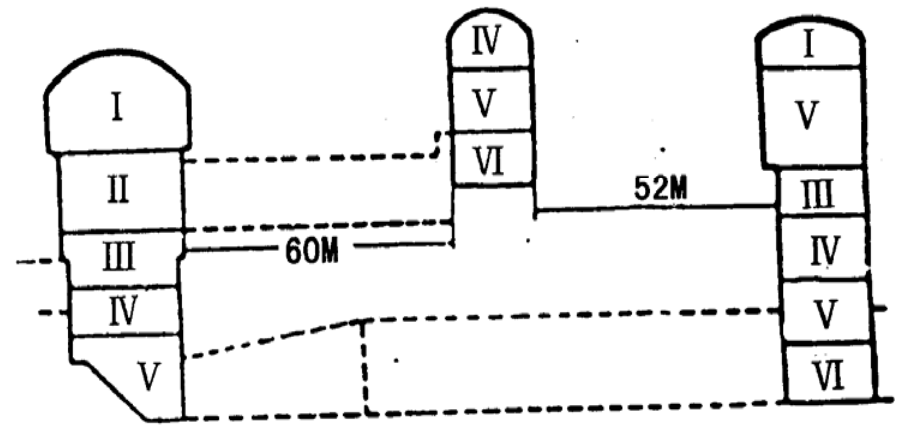
a. Scheme 5-I



b. Scheme 6-I

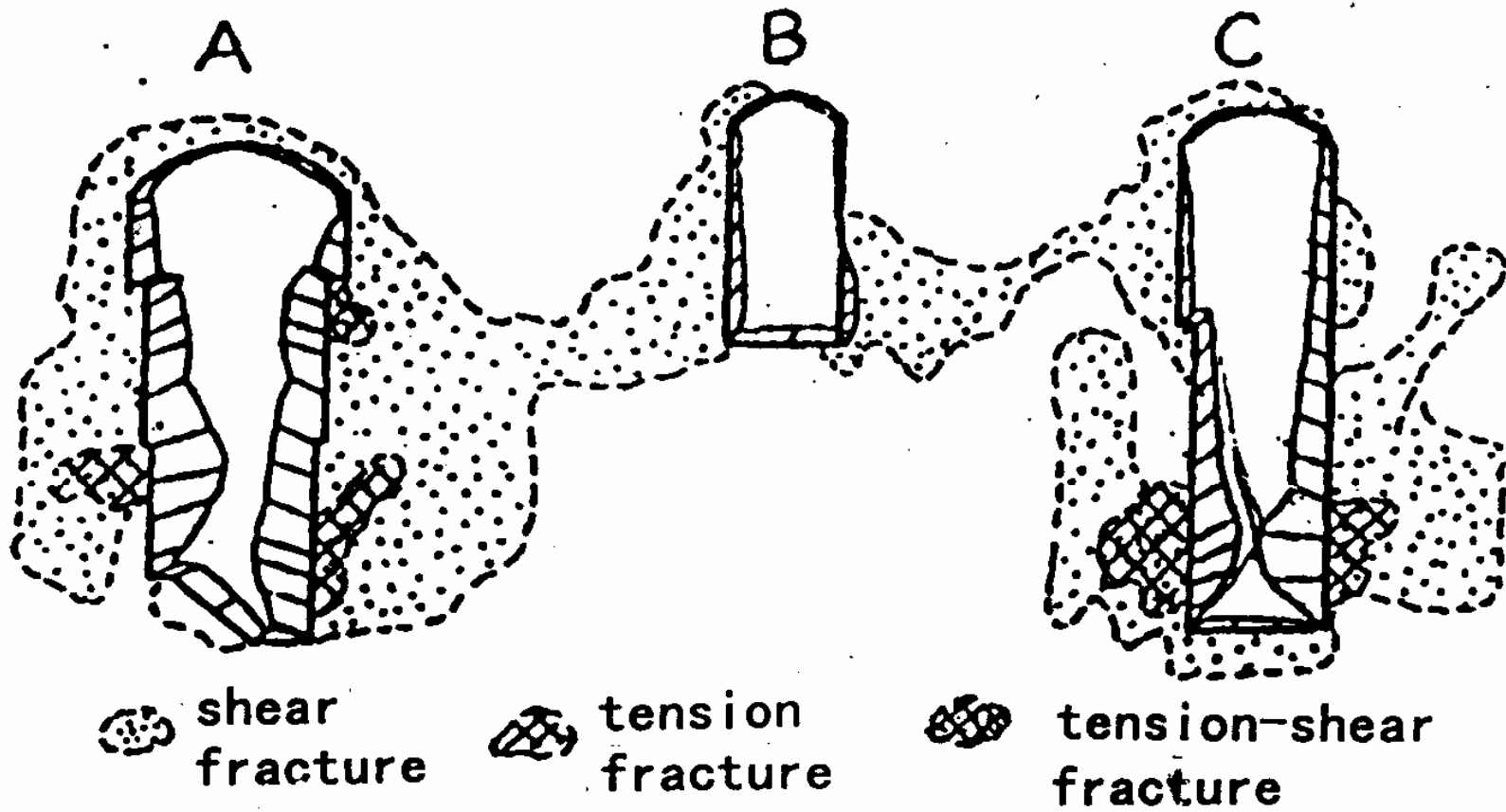


c. Scheme 6-II

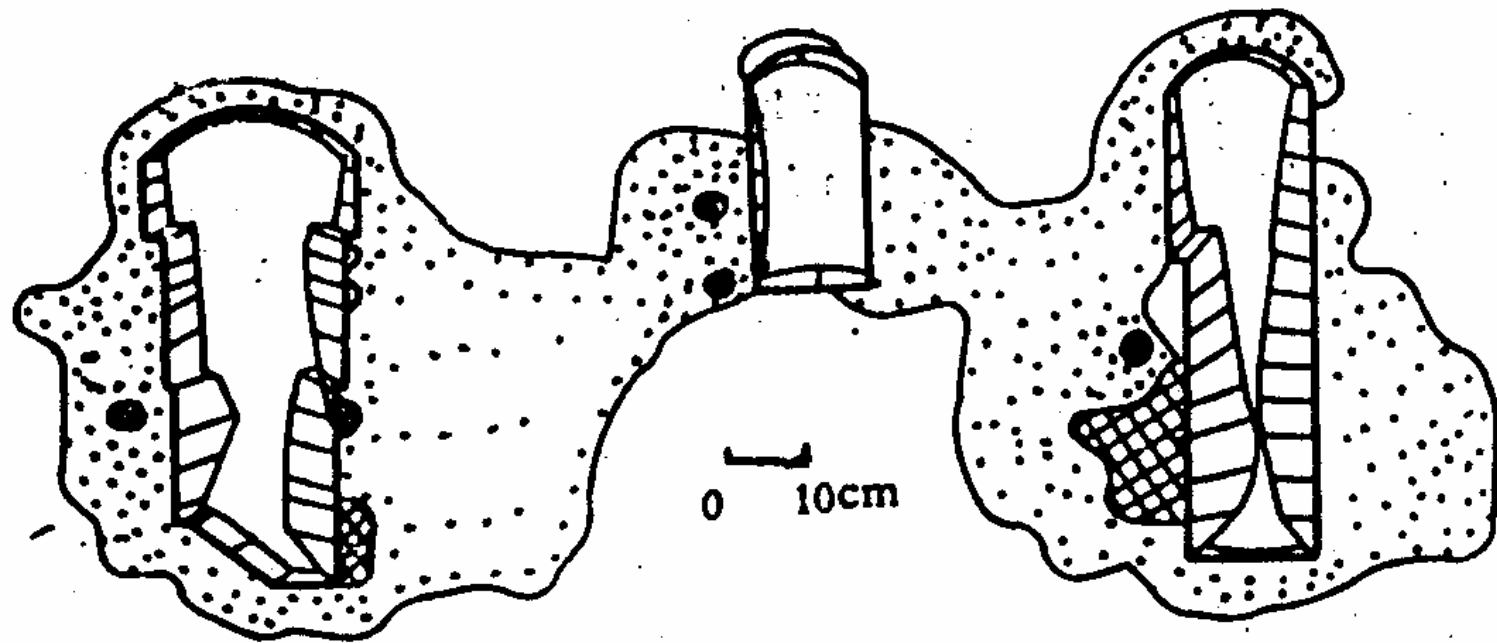


d. Scheme 6-III

The schemes for part-by-part excavation



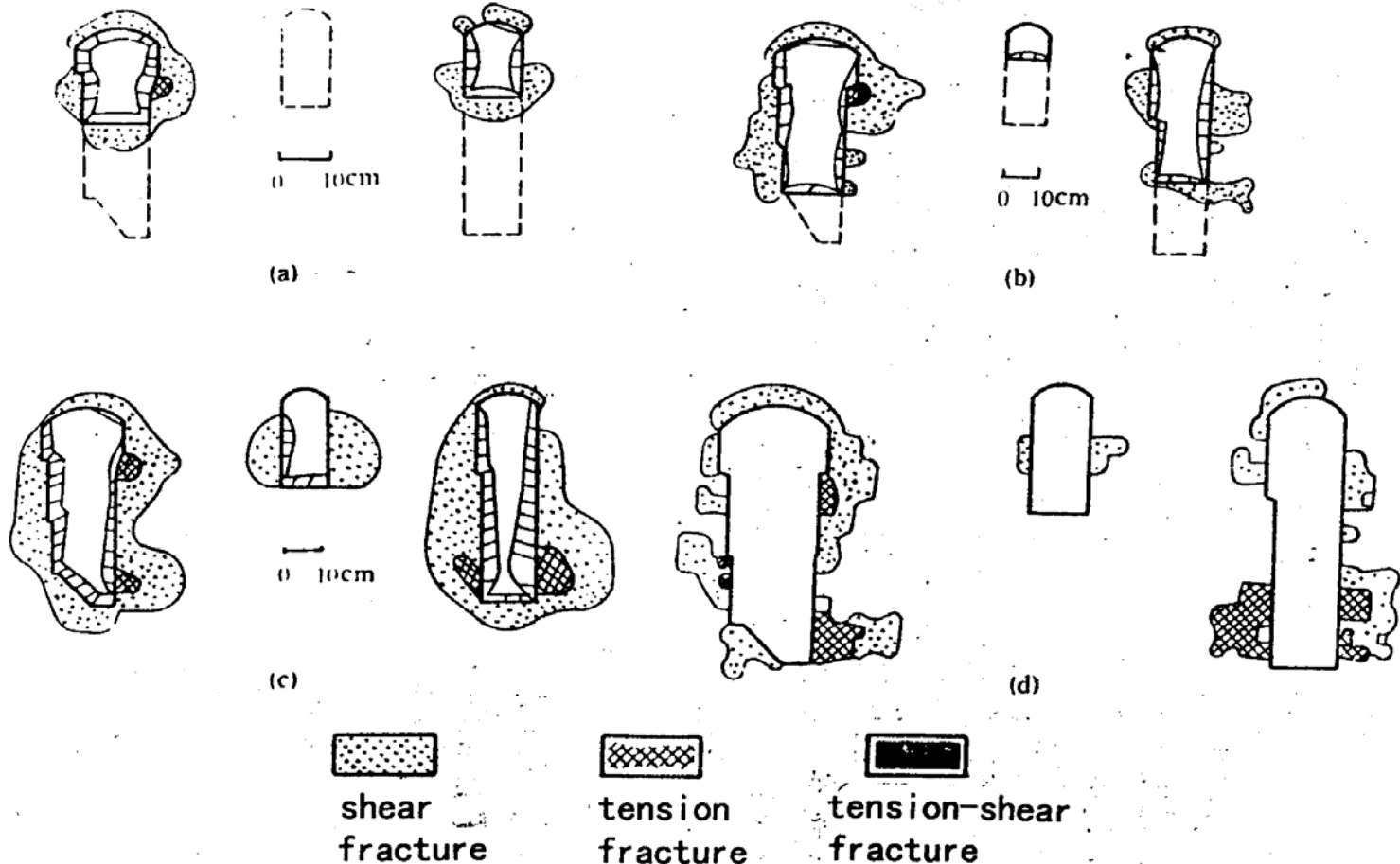
Fracture zone and displacement of no bolts excavation by 5 steps
(scheme 5-I)



 shear fracture  tension fracture  tension-shear fracture

Fracture zone and displacement of no bolts excavation by 6 steps
(scheme 6- I)

11 computation schemes were conducted and compared, a fair scheme was found — the regime VI-3.



Computation result for scheme 6-III. (a) (b) (c) are for 2nd, 4th, and 6th excavation step; (d) is for scheme with high density of reinforcing



岩体施工过程力学的原理

- (1)、工程岩体的稳定不仅与自然因素有关，还与人为的**工程因素**密切相关。
- (2)、复杂岩体的施工，对围岩是一个**非线性的力学荷载**过程。其稳定性是与**应力路径及历史**相关的。施工前要进行动态施工过程力学的**优化分析**，寻求几个较优方案，以供决策。



- (3)、根据岩体及工程特点，要针对性地运用开挖和支护手段，把有害的影响及隐患控制在尽量低的范围内。
- (4)、做好施工期间围岩动态响应的观察和监测，用以判断施工方案的合理性，并及时调整。
- (5)、强调勘察、设计、施工、科研各个环节紧密结合、互相渗透、允许调整施工方案。



上述原理的后面三条与新奥法（NATM）很相似。但前面二条新奥法并未明确提及。该法未从非线性力学分析的角度来阐明其原理本质，也未提到在**施工前**应先做施工方案的**优化分析**比较。该法的实质是一种经验性的总结。

施工过程中力学原理的应用方法



(1) 动态规划原理的应用

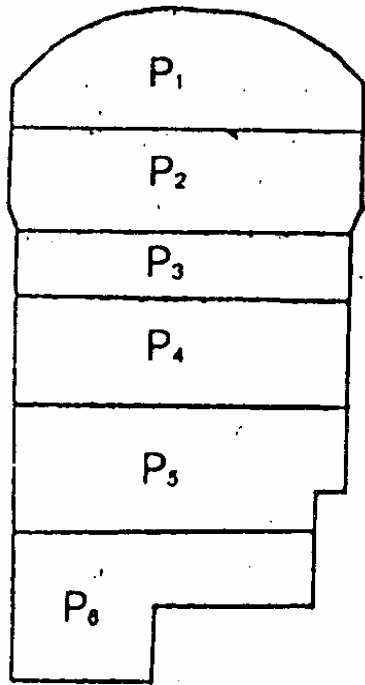
(a) 2大洞群情况

广州抽水蓄能电站、十三陵蓄能电站
等

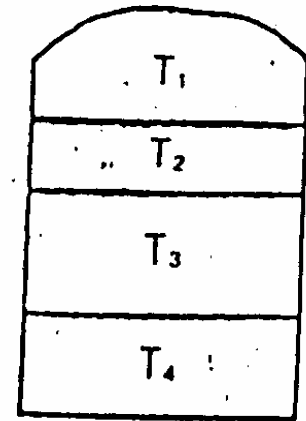
(b) 3大洞群情况

二滩电站、小浪底电站、龙滩、小湾
等电站

(a) Guanzhou pumped storage power station
Shisanlin pumped storage power station
(near Beijing) etc.



main power house

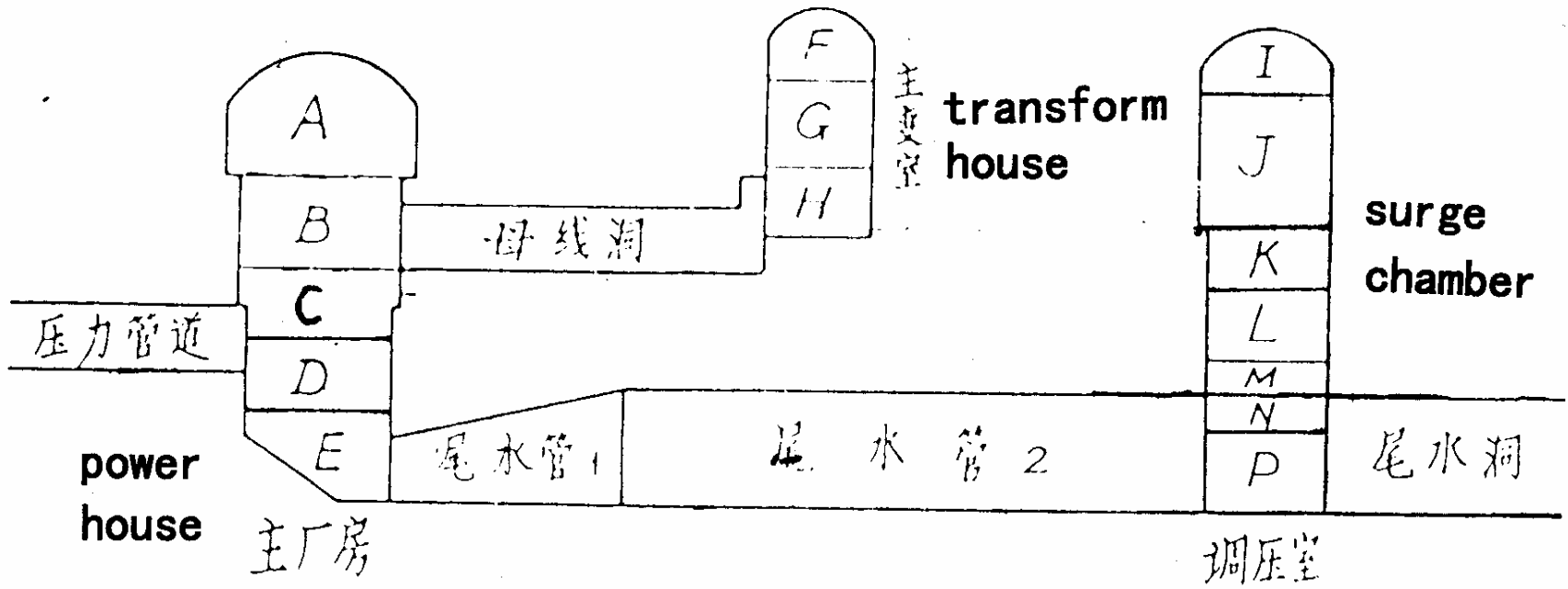


transform house

The allocation of caverns and the partition of excavation

(b) Ertan hydro power station

Xiaolangdi hydro power station etc.



Three main caverns



若按如图这种分块，每次开挖一个分块，则按列举法对（a）情况可能有126种施工顺序方案，而对（b）情况则将会有1260种可能的施工方案。如此大工作量实施上是很困难及不可能的。因此需引用一些新的软科学方法来帮助我们。

动态规划方法是一种有力的工具。

- 优点 可将一个N维问题化为N个一维问题，可有效和很快地寻求到优化方案
- 关键元素具有级、状态、决策、转换和收益等n个环节

(2) 人工智能方法的应用

应用动态规划方法时还有二个重要环节需加以介决。

(a) 可能施工顺序的全部集合问题

(b) 形成有限元分步开挖分析的数据文件





但这二项工作的工作量十分浩繁，工作效率低，且很易出差错。因此有必要引入人工智能方法解决这二方面问题。

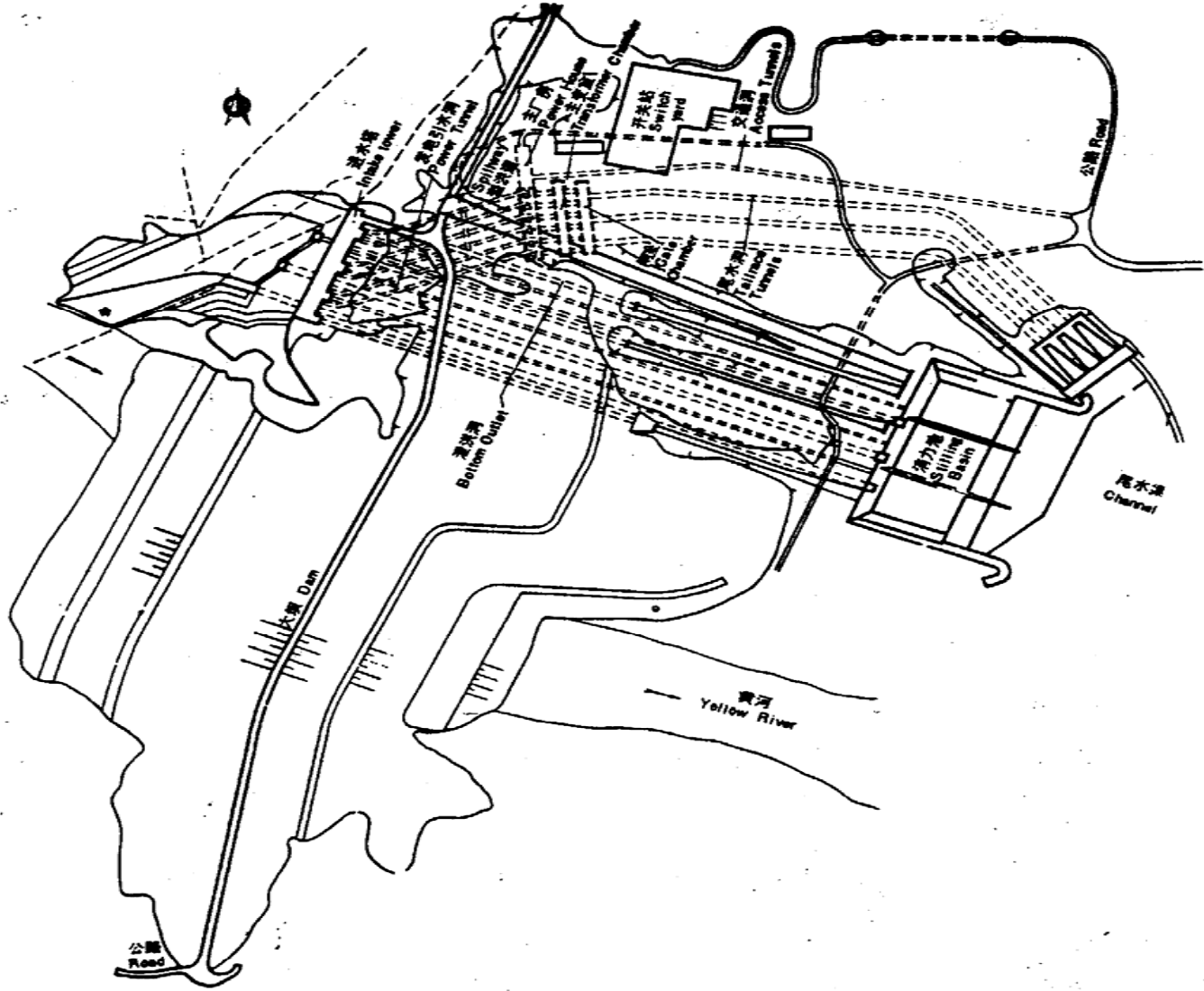
人工智能法有以下功能：即推理、理解、规划、决策、抽象、学习和创造等功能。可用于做施工顺序自动排序、数据文件自动生成和施工方案优化自动决策等工作。

具体作法是将人工智能语言“Turbo Prolog”和有限元（FEM）语言程序相互耦合。

新的优化方法工程应用实例



小浪底水利枢纽工程位于黄河中游，在洛阳附近。主要岩层为各类钙质灰岩，地下厂房群埋深为70-100米。初始地应力不很高，水平向约为3.0MPa。



Xiao Lang Di Project

小浪底水利枢纽总平面布置图

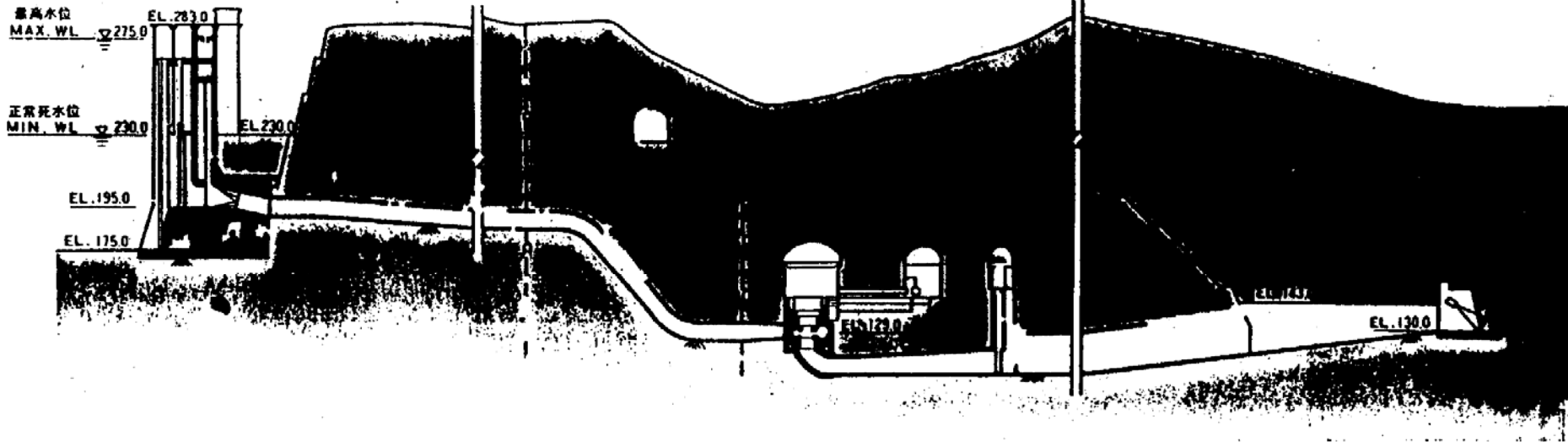
GENERAL LAYOUT OF THE PROJFCT

发电引水系统及厂房纵剖面图

单位: m

PROFILE OF POWER TUNNEL & POWERHOUSE

unit: m



水电站

HYDROPOWER STATION

1 引水洞型式	压力管道
2 条数和尺寸	6- Φ 7.8m
3 最大流量	1922m ³ /s
4 装机容量	6台 \times 300000kw
5 保证出力	305000kw
6 年发电量	51亿度
7 额定水头	117.8m
8 最大水头	139.2m
9 最小水头	77.8m

1 Type of power tunnels	penstock
2 Number and size	6- Φ 7.8m
3 Max. discharge	1922 m ³ /s
4 Installed capacity	6 \times 300MW
5 Guaranteed output	305MW
6 Annual power generation	5.1 billion KWh
7 Rated head	117.8m
8 Max. head	139.2m
9 Min. head	77.8m







先给出几个开挖条件的基本假设，如一


律自上而下分步开挖，每次开挖一个分块等。

并提出优化施工方案的**决策判据**。这有二种

方法：一是用**围岩破损区**大小做判别；二是

用**围岩收敛数值**大小做判别。我们采用第一

种。



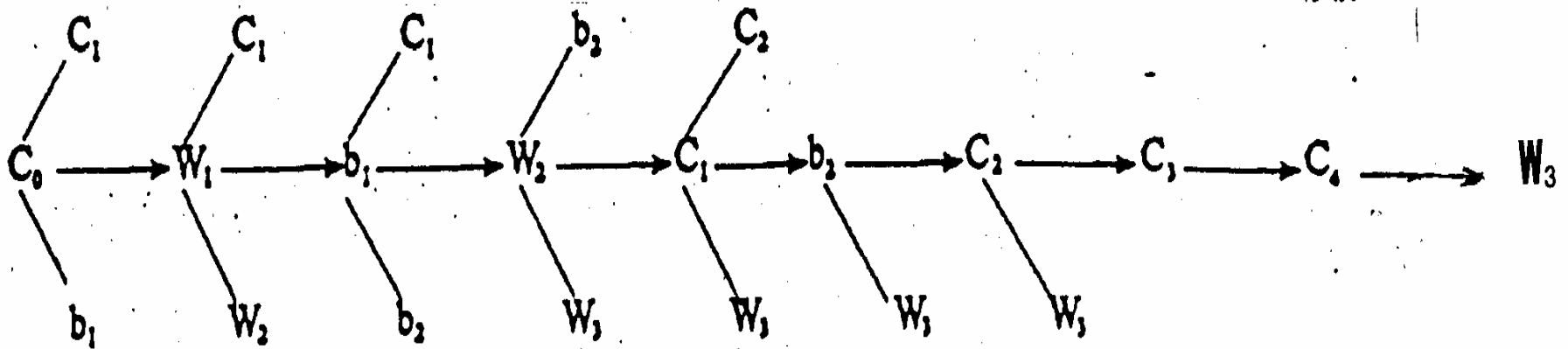
经过我们用动态规划方法和上述人工智能方法来做施工方案和顺序的优化分析，最后只需九步的开挖方案比较，总共22次的有限元计算就可搜索到优化方案。其流程如下：

方案自动生成 → 数据文件自动生成
→ 分部开挖有限元计算 → 自动决策 →
最优方案


operating program WP.PRO

The combination of all possible excavation sequences—1260 (schemes)

Searching process of construction scheme majorization by DPM , only nine stage of decision with total 22 times of computation are needed for each excavating step to make decision.



Search process of optimization for construction order



从下表可看出三种不同方案（设计单位、
施工单位和作者优化方法）的结果：
三种不同施工顺序方案比较(小浪底厂房洞群)

(a) 设计单位原方案

$$a_1+a_5+w+c_3 \rightarrow a_2+b_1+c_1 \rightarrow a_3+b_2+c_2 \rightarrow a_4$$

(b) 施工单位原方案

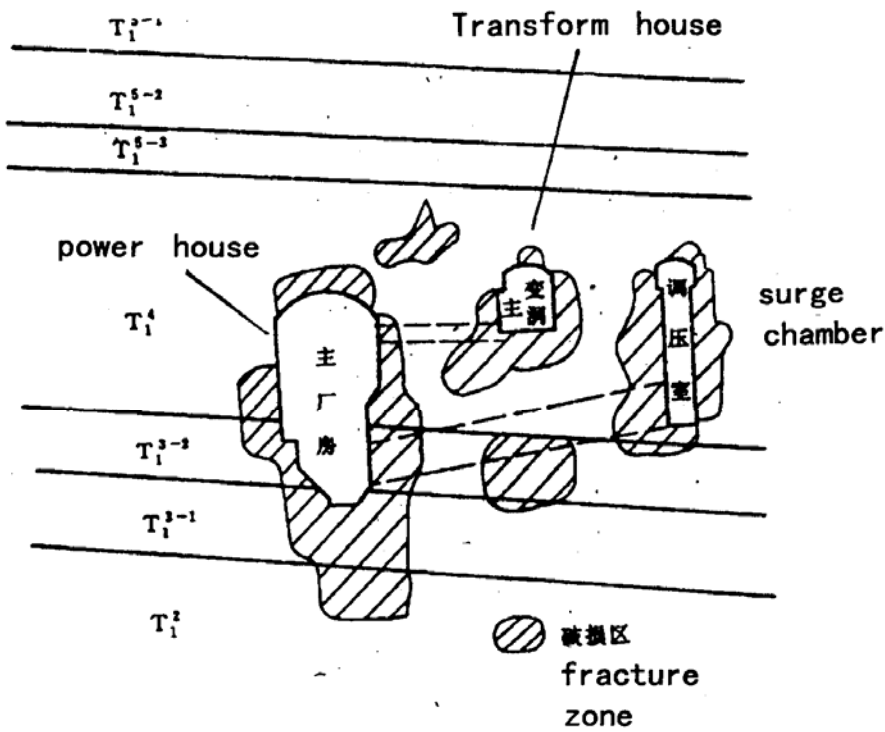
$$a_1+b_1+c_1 \rightarrow a_2+b_2+c_2 \rightarrow a_3+b_2 \rightarrow a_4+a_5+w+c_3$$

(c) 作者用新方法得到的优化方案

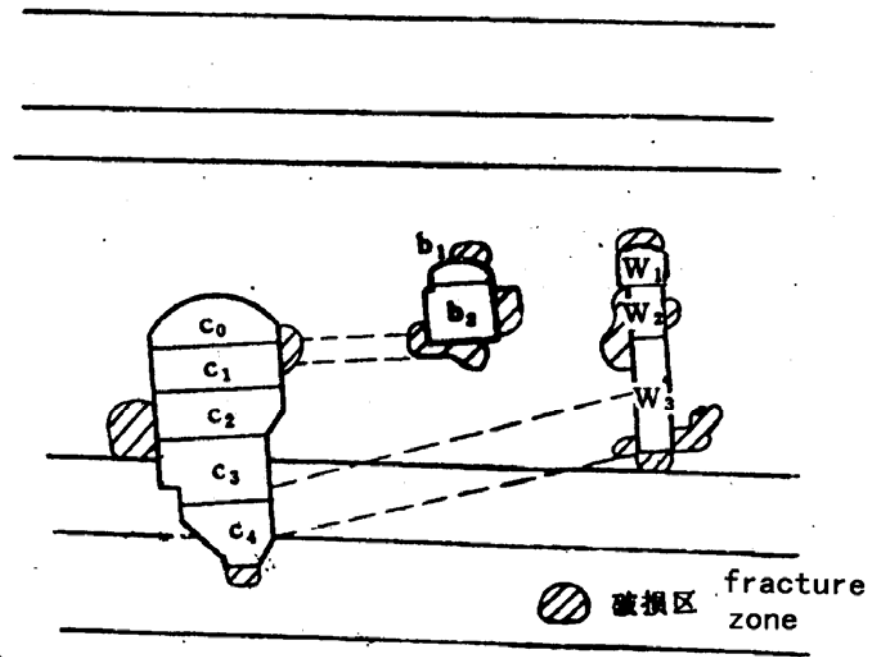
$$a_1+c_1 \rightarrow b_1+c_2 \rightarrow a_2+c_2 \rightarrow a_3+w \rightarrow a_4+b_2 \rightarrow a_5$$



方 案	无锚工况 (米 ²)	锚喷工况 (米 ²)	破损区减少 的比率	主要洞室最大收敛值(cm)	
				水平向	垂直向
(a) 破损区面积	3585.06	1501.7	58.11%	2.89	2.68
(b) 破损区面积	3145.02	1448.71	46.06%		
减少的比率(a-b)/a	12.27%	3.48%		1.96	0.46
(C) 破损区面积	2204.42	1035.25	53.04%		
减少的比率(a-b)/a	38.51%	31.04%		1.37	0.45



Fracture zone for initial excavating order



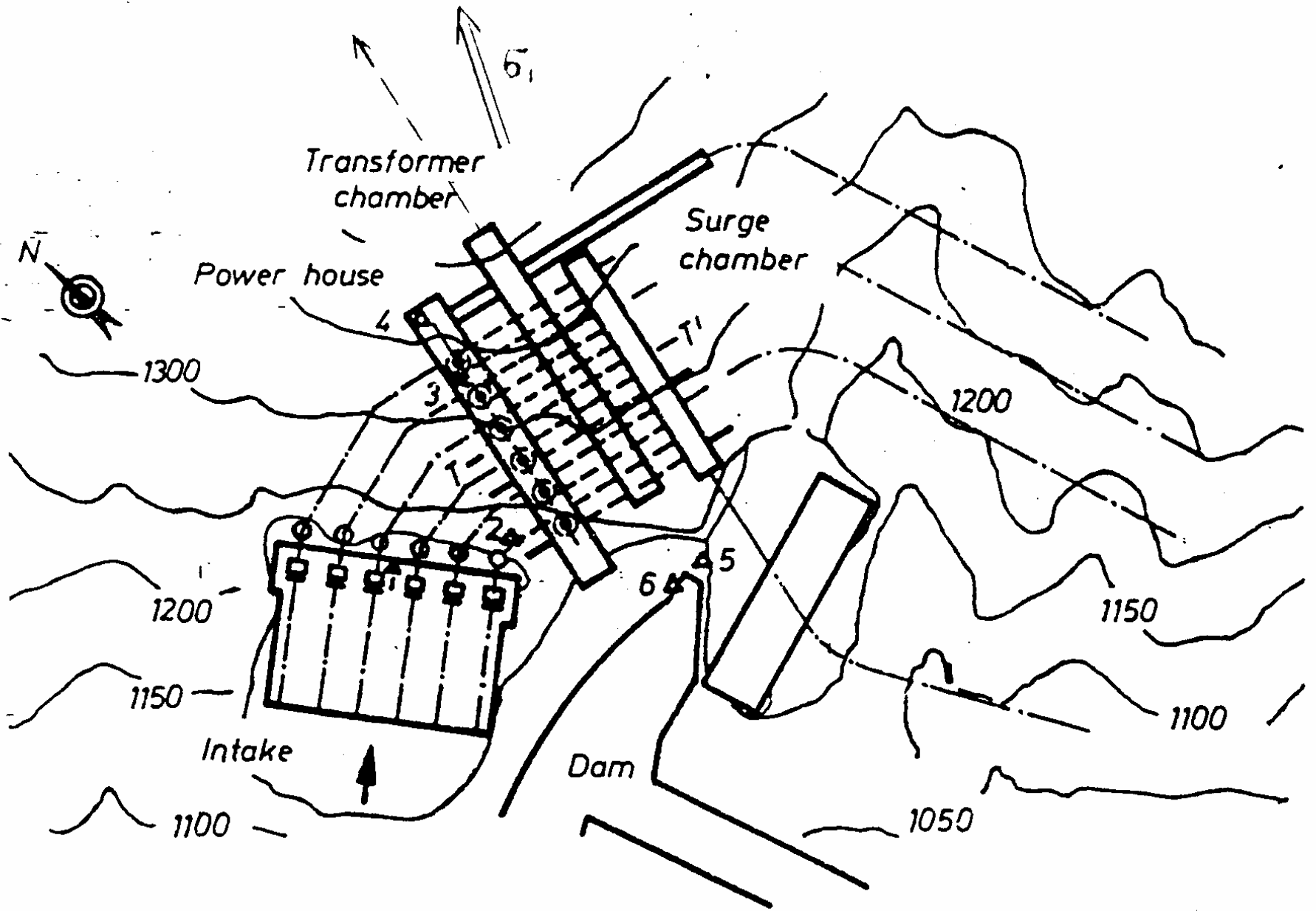
Fracture zone for new excavating order after optimization

时空变载分析原则:

近年来在施工过程力学原理的应用中,又对其进行了**深入一步的发展**,并扩充了其应用的内容,通过总结提出了以下应用原则:

- ◆ **(a)** 地下工程的**长轴方向**,**水平地应力主向**和**地层构造**(断层、节理组)的主向,三者间的关系若能**优化布设**将大大有利围岩稳定。
- ◆ **(b)** 大型地下工程的开挖支护是对围岩各部位的**反复加卸荷**过程。应注意围岩性质在此过程中的**变化**。

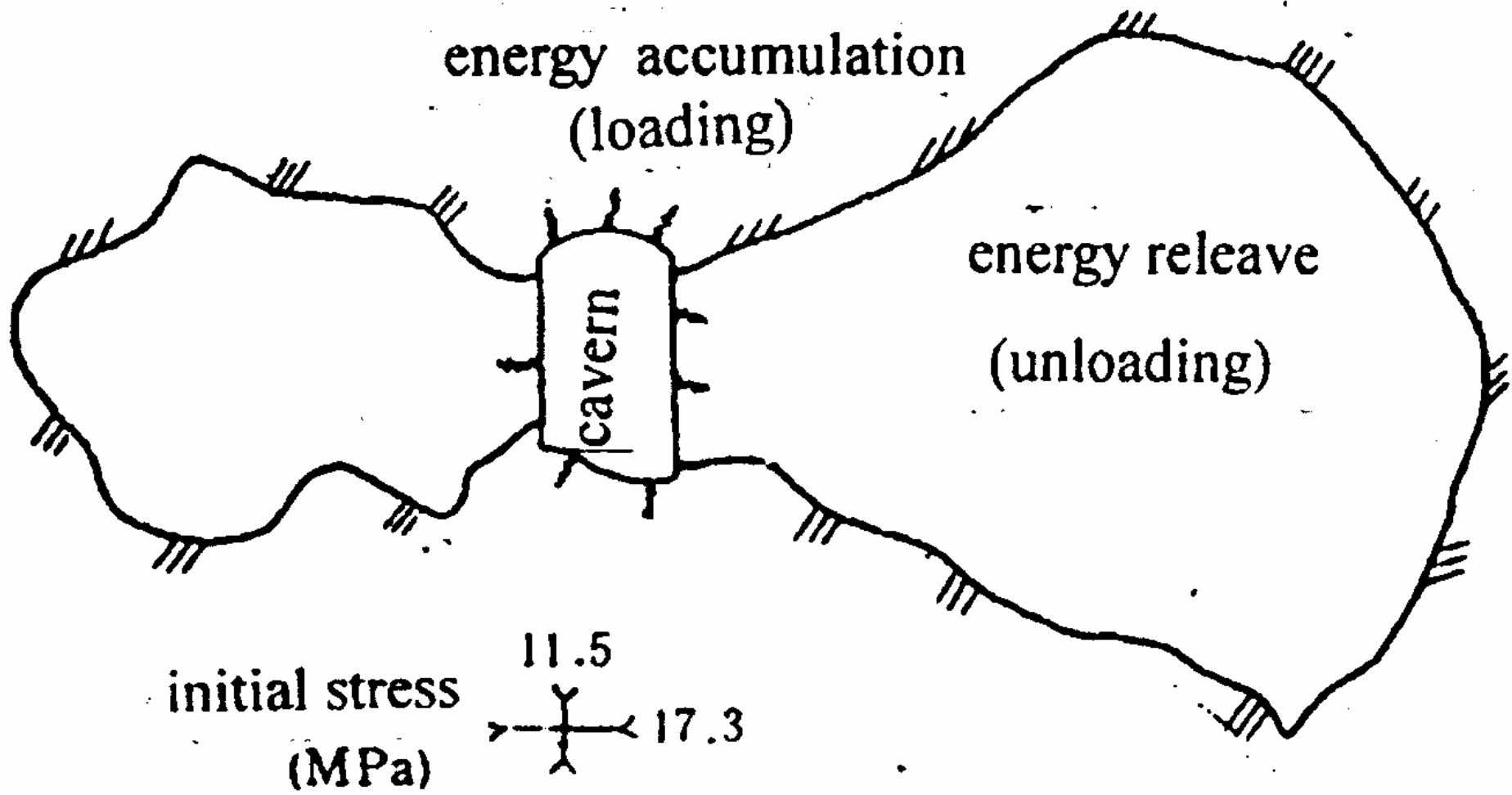




Layout of underground power chambers at dam site



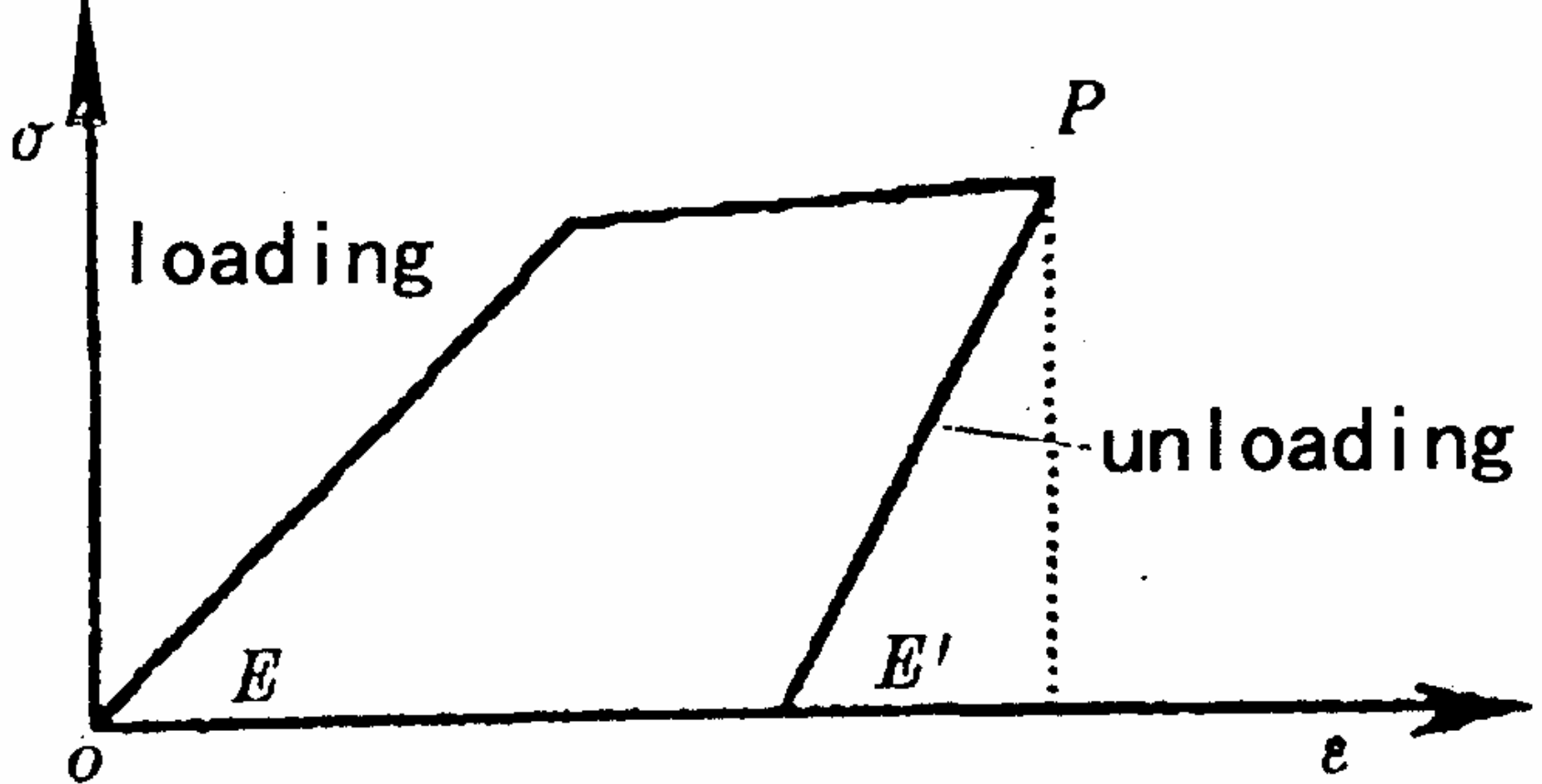
- ◆ © 对于洞室群或互为相邻的采矿场，其围岩稳定与多个工作面的开挖工作在空间和时间的相互关系上密切相关，应寻求其优化关系。
- ◆ (d) 一般来讲，地下工程的断面，其围岩都同时存在加载区（能量积聚区）和卸载区（能量释放区）。它们都是成对相向出现的。
- ◆ (e) 软弱围岩一般都有流变性能。研究开挖支护必须考虑时间因素。即使对脆性围岩，在其发生岩爆之前，也有一个能量积聚的过程。



Loading and Unloading Distribution After Excavation



- ◆ (f) 围岩应力分析应根据其不同部位分别按加载或卸载过程的应力路径进行时空仿真分析。
- ◆ (g) 开挖支护过程是个复杂的开放巨系统，围岩与外界有不断的能量交换。在分析工作中应充分考虑介质的能量耗散问题。



Stress-strain curve in elasto-plastic stage

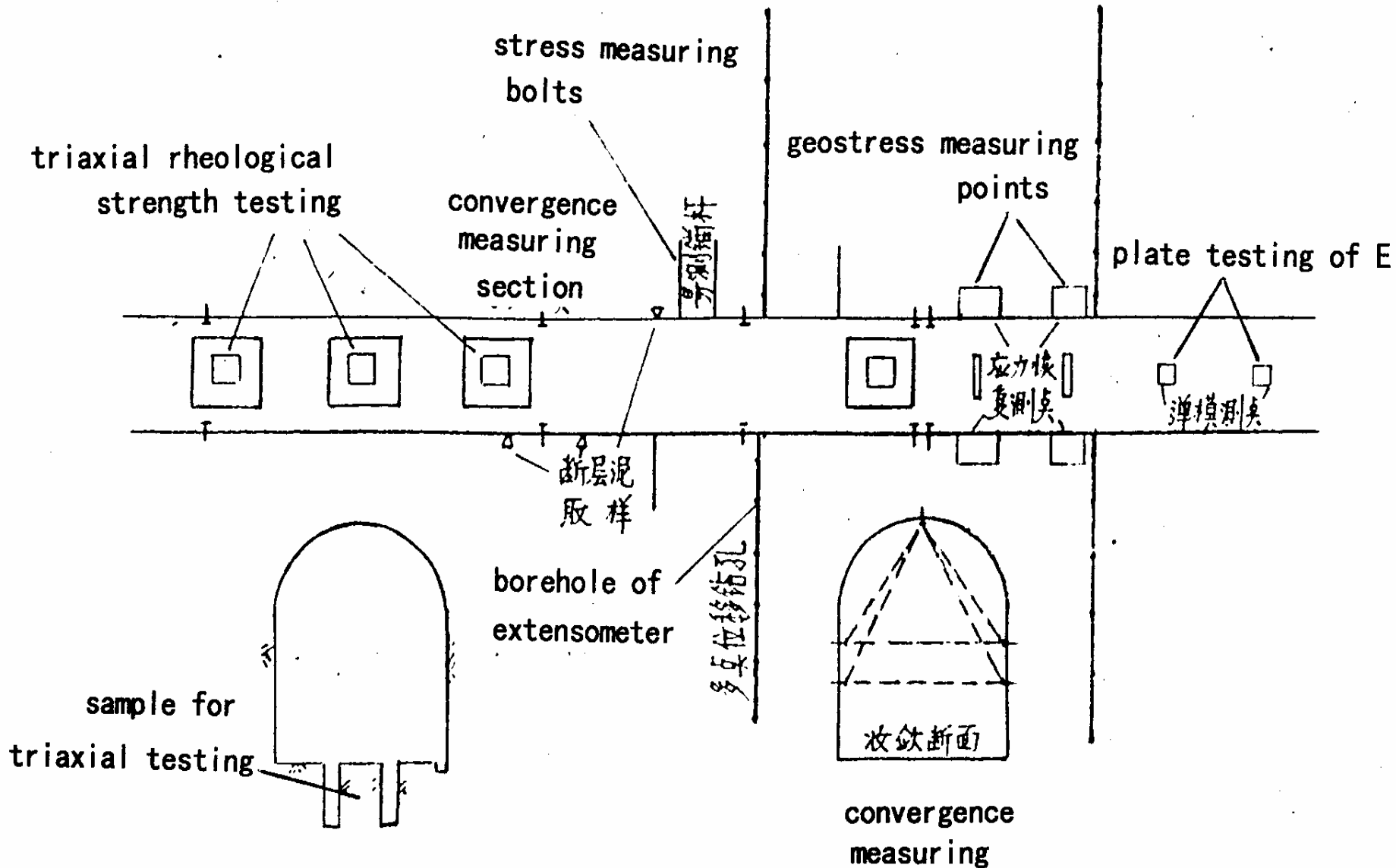
(f) In summary , the problem of energy dissipation during excavation-supporting process in both space and time should be fully taken into account when conducting numerical analyses .

时空变载效应分析的工程实例

(1) 金川镍矿不良岩层中巷道稳定性研究

金川镍矿是我国最大的镍矿生产基地。矿区具有较高的地应力，现开采深度已超过500米。在二辉橄榄岩等不良岩体中裂隙发育、围岩破碎、巷道难以支护保持稳定。因此开展了较全面的岩体力学试验和分析研究（如图）。包括围岩变形观测、地应力测量，现场岩体大型流变力学试验和流变力学数值分析等。



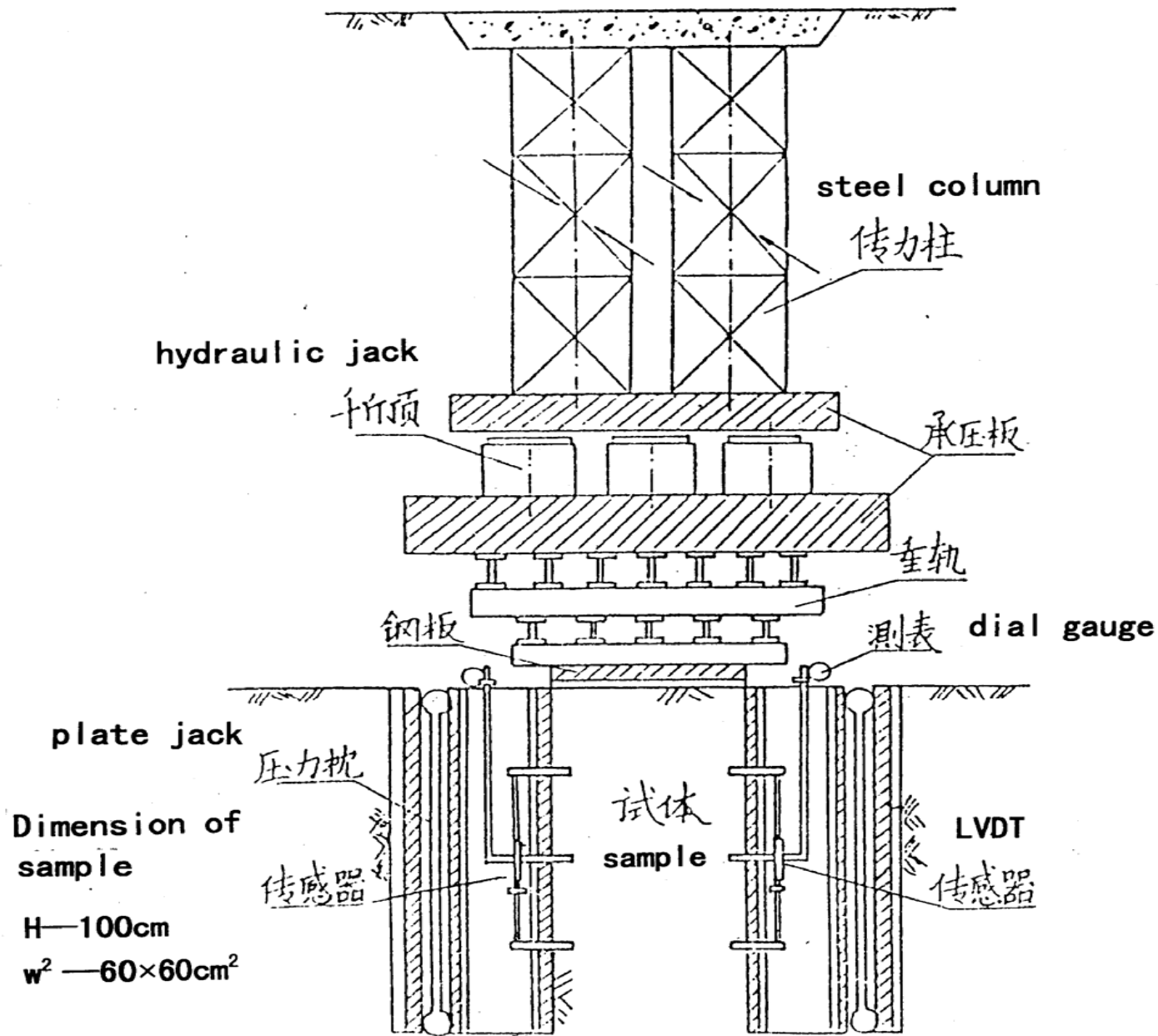


Layout of comprehensive rock testings in testing gallery



试验和观测表明围岩具有明显的时效力学特性。现场岩体的弹性模量也只有实验室数值的1/20。围岩变形表明有三阶段的不同特征：

- (a) 急速变形阶段 约共30天，变形量占总量的50-80%
- (b) 缓慢变形段 约共3-4个月，连同（a）段变形可共达总变形量的90%
- © 趋于稳定变形段 可持续100-140天



Layout of triaxial rheological testing

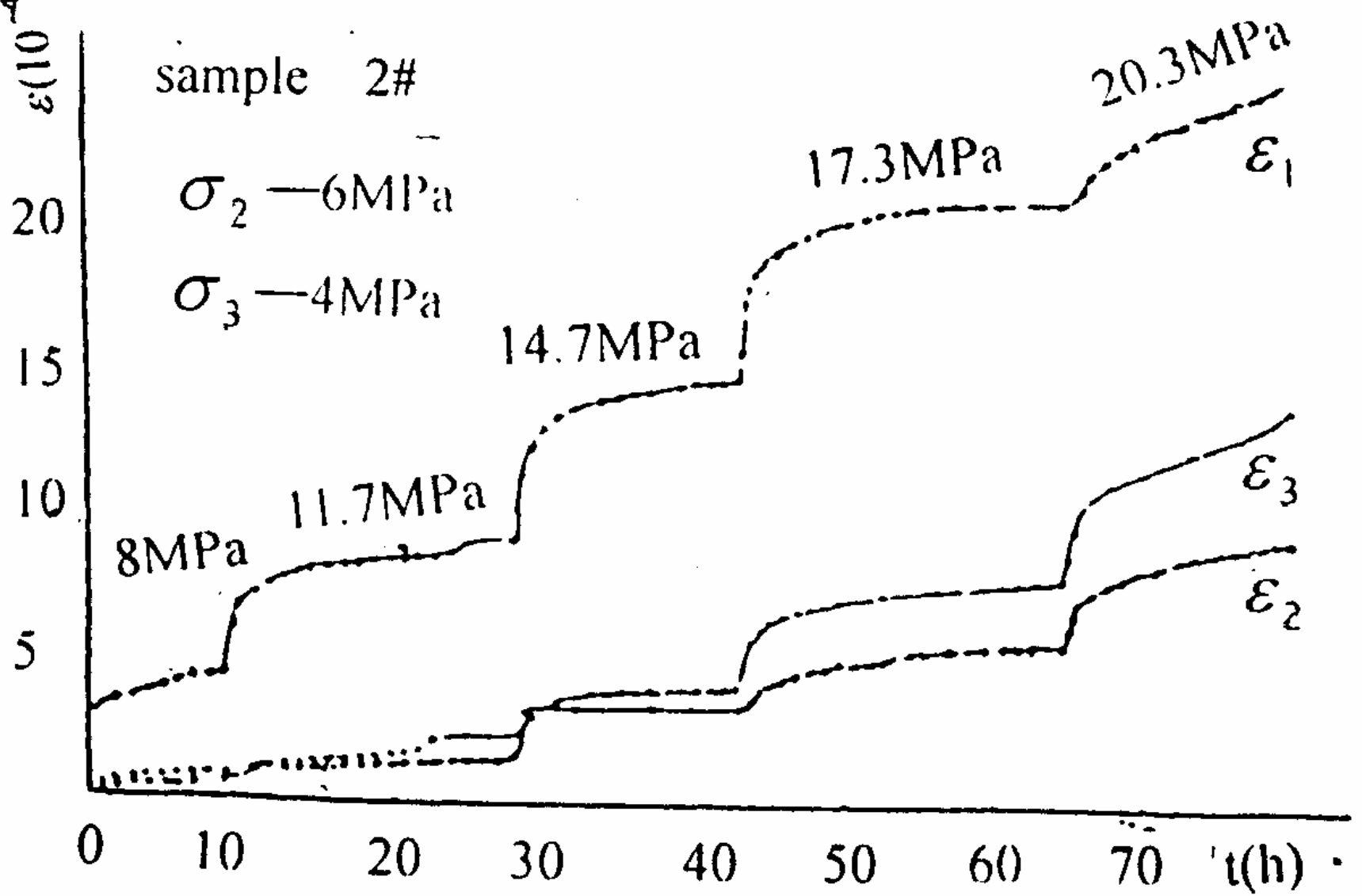


Figure Relation Curve of Time and Loading from In-situ Triaxial Rheological Tests

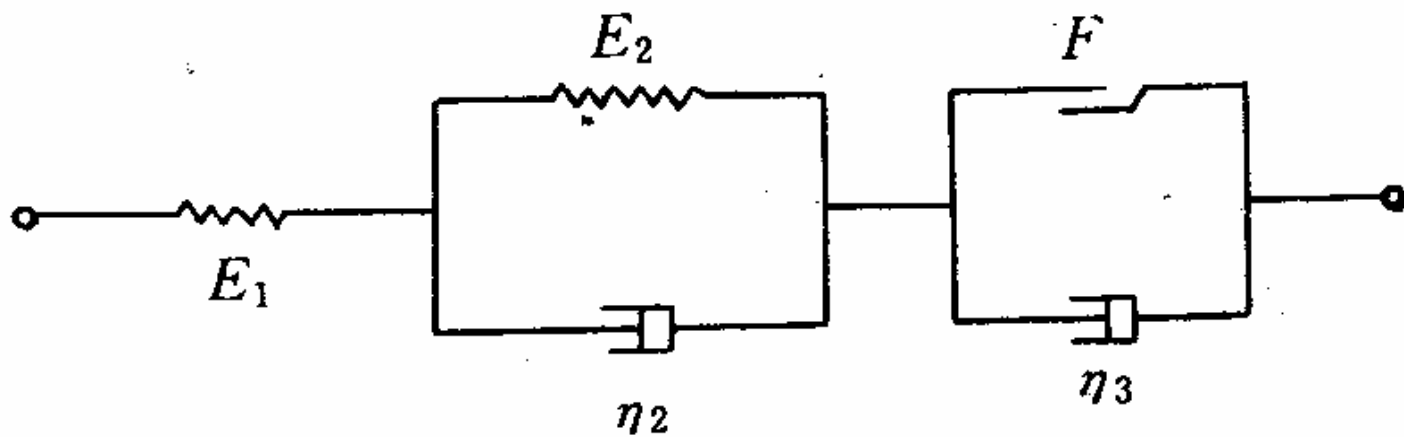
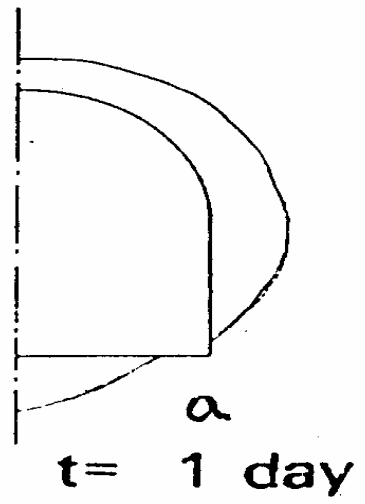
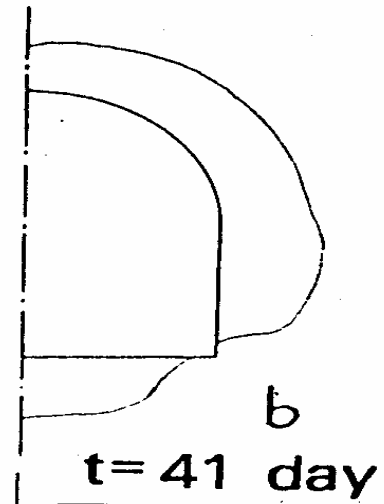


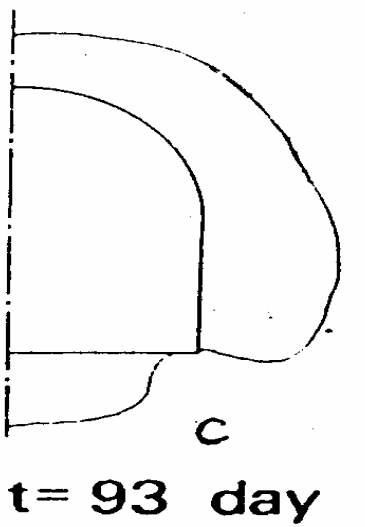
图 西源流变模型



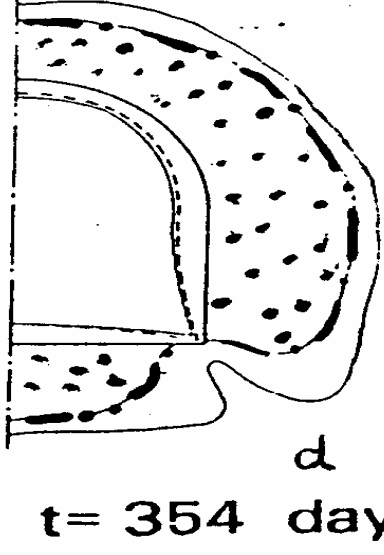
a
t= 1 day



b
t= 41 day



c
t= 93 day



d
t= 354 day

————— displ. (no support)
- - - - - displ. (with support)

Extension of plastic zone vs.
time of rock surrounding

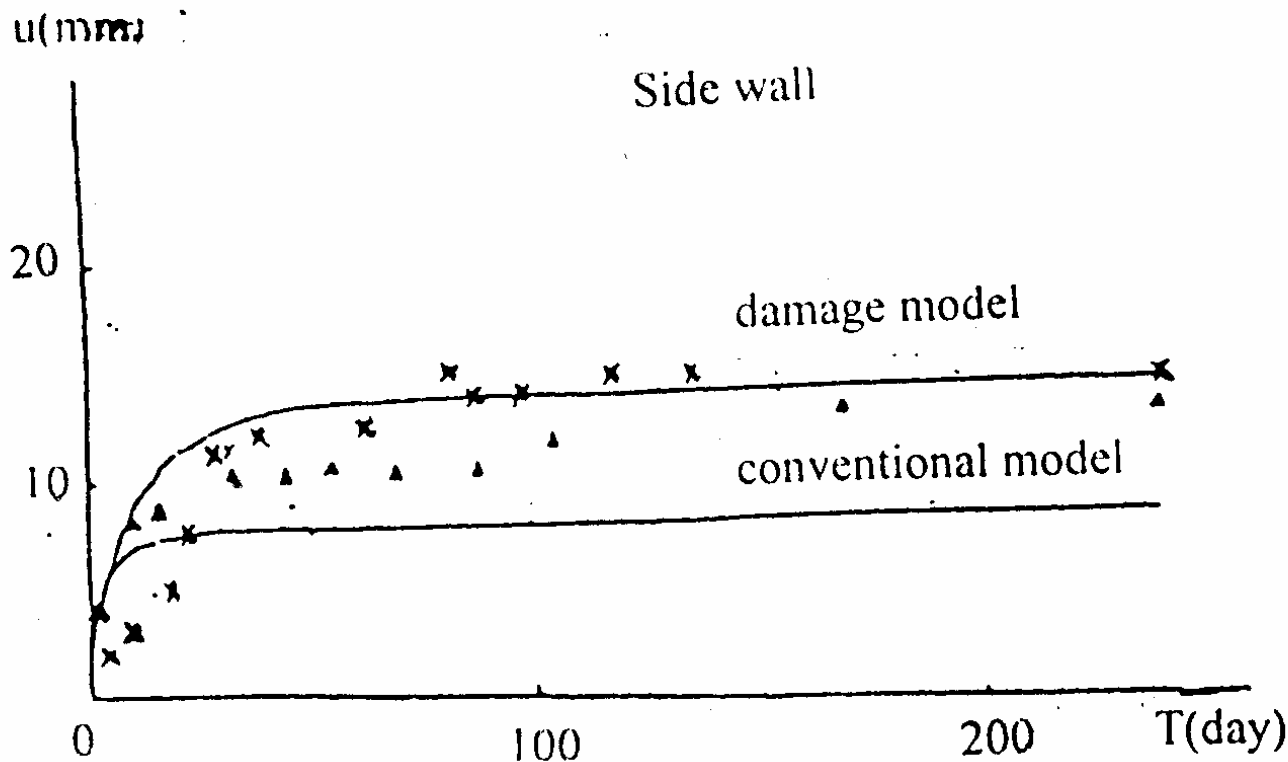


最后在支护上采用了长锚杆锚喷网复合性支护形式。根据流变力学有限元计算，大约在（a）阶段变形20-30天后复喷混凝土做为2次支护最为合理。

在稳定性计算分析中采用了弹塑性和流变损伤模型，后者采用西源模型。从二种模型计算结果看，损伤模型更接近于实测结果。

上述考虑了时间因素的综合性研究方法和支护方案保证了该巷道20年以上的稳定性。

It is shown that analyses by **damage rheological model** are more agreeable with the *in-situ* measured results than those from conventional model.



x monitored of cross section 1# Δ monitored of cross section 2#

Figure Comparison Curve Between the *In-situ* Measured Values and the Computing

(2) 军都山隧道变形观测及分析

军都山双线铁路隧道位于北京北郊。其相当一部分穿越了黄土层。隧道高宽各为11.5米和12米，但在黄土层的埋深只有12米左右。

观测工作

因担心浅埋隧道洞顶的稳定性，于地表向隧道顶部提前预埋了多点位移计，以观测顶部土层变形。最后测出隧道开挖后最深埋点1#点的位移达15.26mm。变形过程曲线显示出三阶段特征。



Monitoring

Deformation monitoring were conducted by extensometers etc. Monitoring borehole were drilled vertically from surface in the due front of the tunnel face.

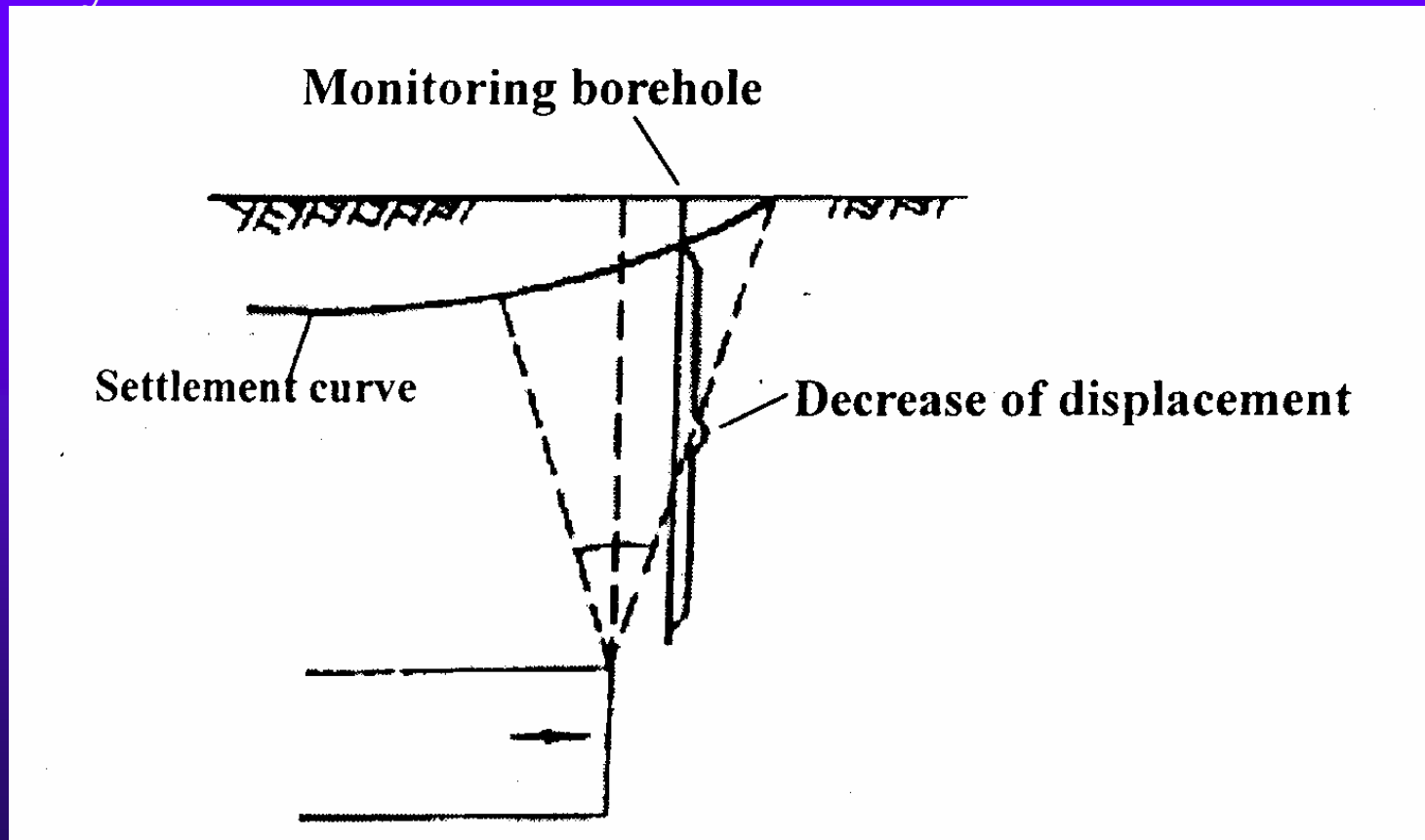


Fig. Relation Between Predrilled Boreholes and Working Face of the Tunnel

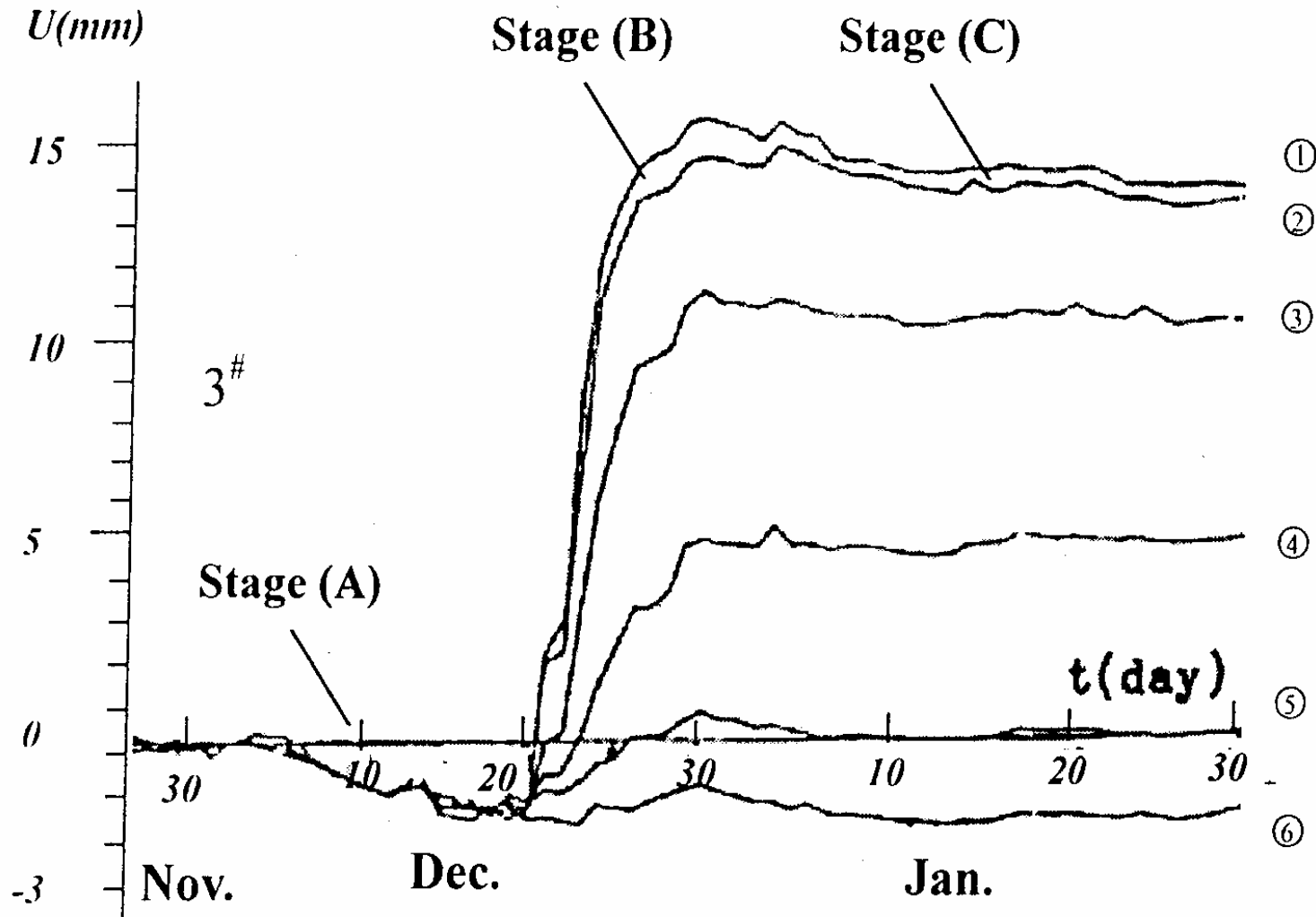


Fig. Variation Curve of Displacements in Borehole 3 Versus Time in Upward Excavation



(a) 早期变形段（压缩性变形）

在隧道推进达到钻孔轴线之前所有6个测点都表现出土体为压缩性变形。

(b) 剧烈变形段（伸张性变形）

当隧道工作面推前达到钻孔轴线后，孔内测点位移马上变为伸张性，并变化剧烈，最大值可达15mm左右。此段持续了10天左右。



(c) 趋于稳定性变形段

当隧道工作面远离钻孔14米之后，孔内上面的4个测点基本上没有多少变化，但最深的二个点表现为位移反弹现象（减少），这表明该部分土体有固结现象。

时空效应的模拟分析

为了模拟和解释土体变形的时空效应，用有限元分析来做一说明。现用一个二维分析来研究隧道上半部分的推进影响，采用一个虚拟的支护力的变化来模拟此过程。

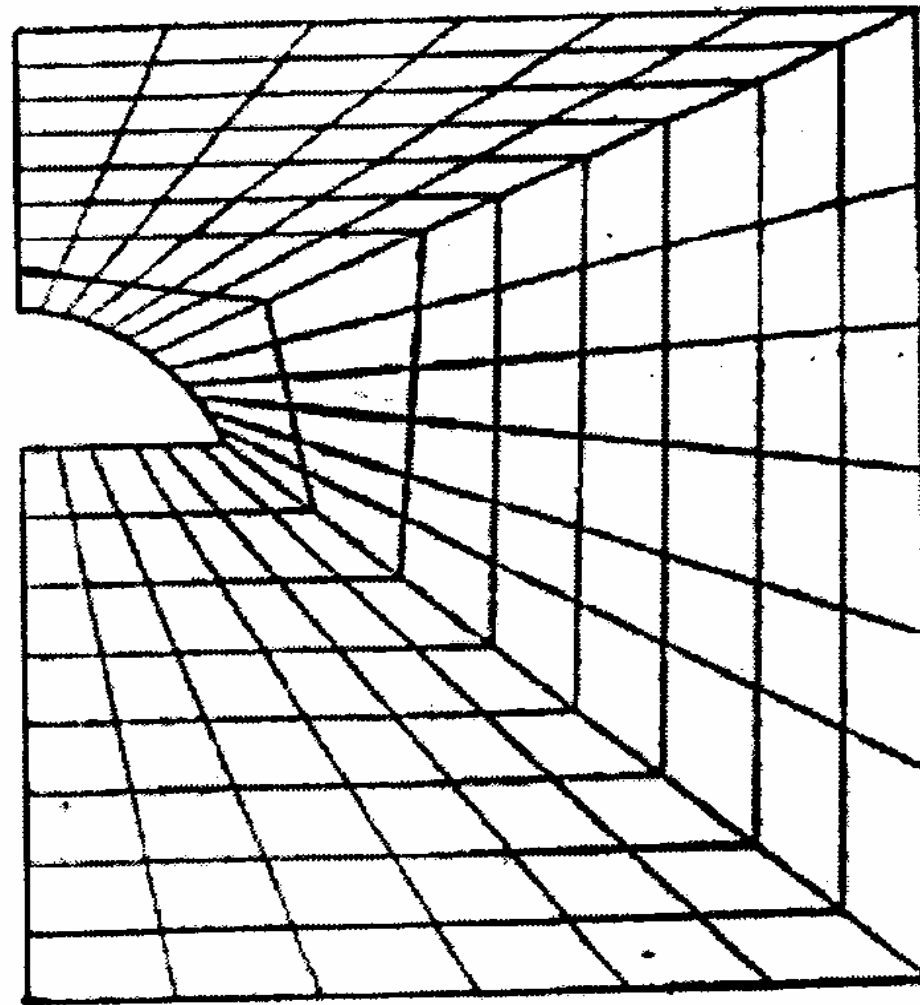


Fig. FEM Analysis after Excavating the Upper of Tunnel

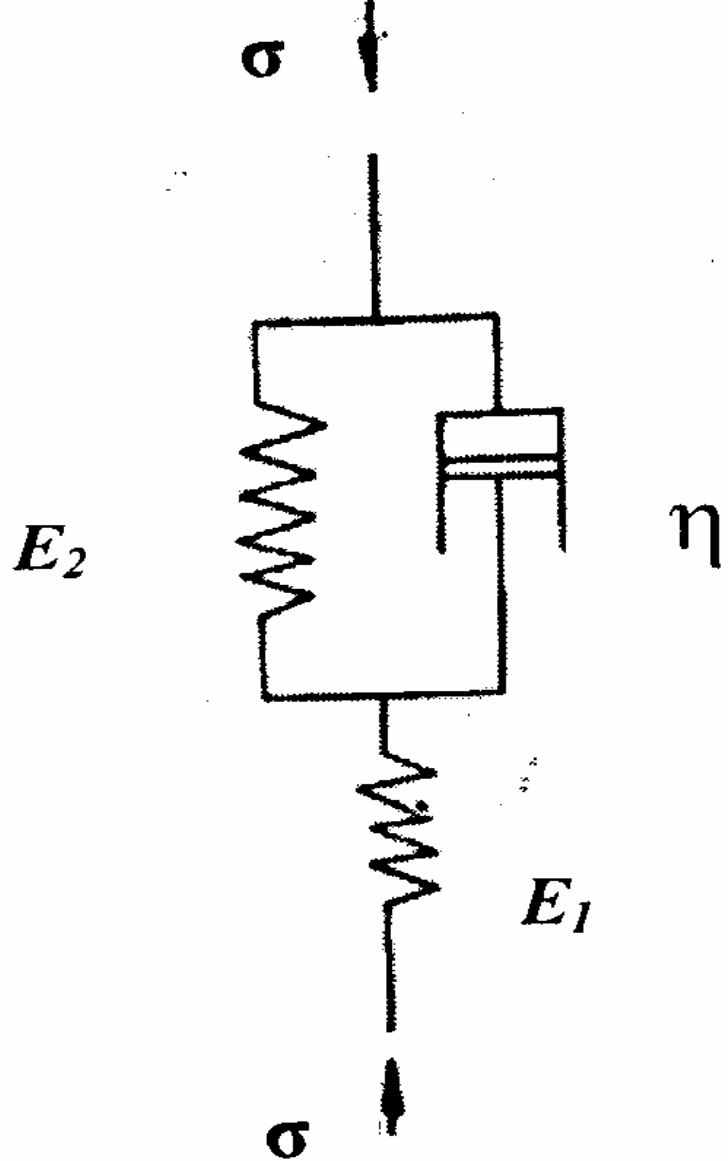


Fig. 6 Poynting-Thomson Visco-Elastic Model



若假设围岩为一典型的粘——弹性介质（三单元模型），并采用粘弹性对应原理，则围岩位移可表示为：

$$u(t, x, y, z) = f(x, y, z)M(t)$$

其中

$$M(t) = \frac{1}{E_1} \left[0.5 - \frac{1}{\pi} \arctg(t - t_0 - z) \right]$$

$$\left[1 + \frac{E_0}{E_1} - \frac{E_1}{E_2} e - \frac{E_2}{\eta} (t - t_0) \right]$$

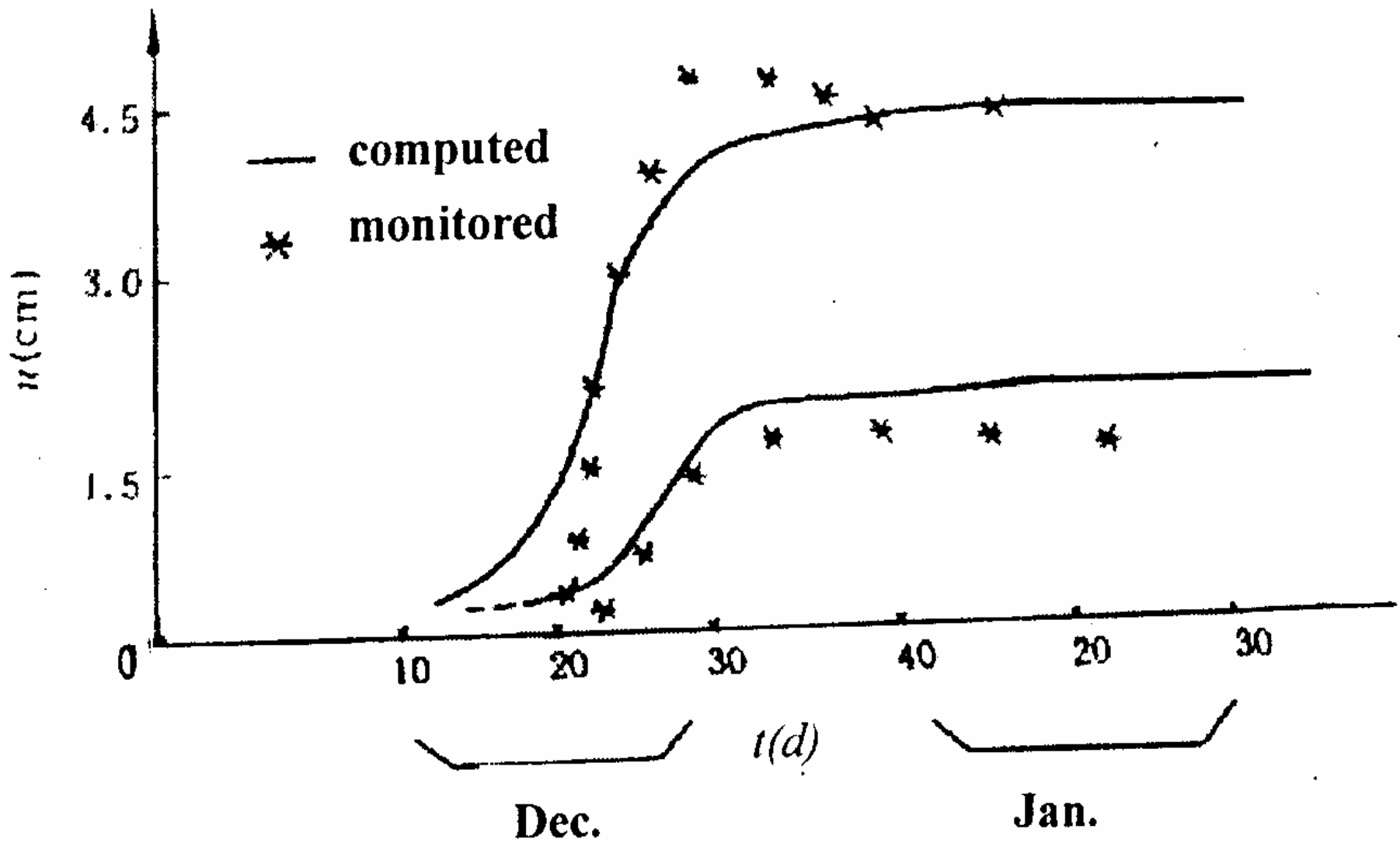
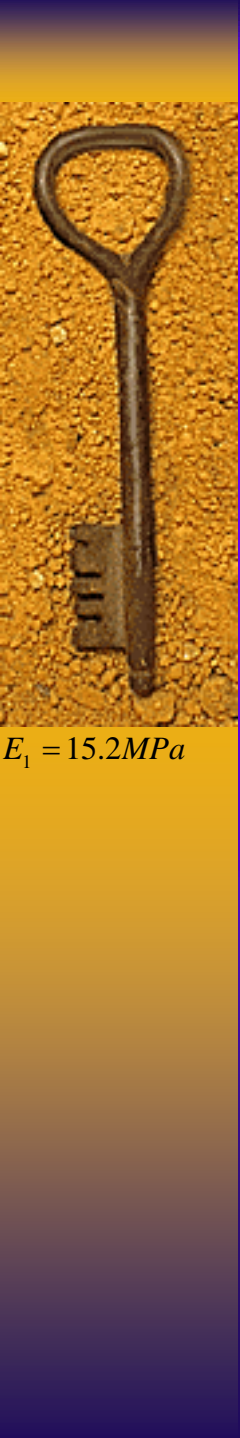


Fig. Comparison of Computation Curves to Monitored Dates



以上述方程来拟合钻孔中测点1和4的观测结果，并用反分析方法来求取地层的相关力学参数，可得到

$$E_1 = 15.2MPa \quad E_2 = 45.8MPa \quad \eta = 5504.3MPa \text{ 天}$$

从该图可看出隧道围岩变形考虑时空效应是相当符合实际情况的。

结论

1. 岩体的稳定性强烈受到**施工过程**的影响，特别对**复杂条件**下更为如此。因此提出了一个新的研究方向“**岩体施工过程力学**”及其原理。
2. 采用了**动态规划原理**和**人工智能方法**来实施复杂情况下的**施工过程力学原理**，并对工程**施工方案和顺序**进行优化分析。从工程实例分析来看是十分有效的。优化效果明显。
3. 为**深化**施工过程力学原理，提出了“**时空变载分析原则**”，是对该原理的**发展**。并用工程实例说明了这些原则的重要性。

