

# International symposium on earth reinforcement

Fukuoka/Kyushu/Japan/14-16  
Nov.2001

# 加筋挡土墙的足尺试验

Full-scale performance testing and  
numerical modelling  
of reinforced soil retaining walls

R.J.Bsthurst,

GeoEngineering Centre at Queen's-RMCC,  
Geotechnical Group, RMCC Ontario, Canada

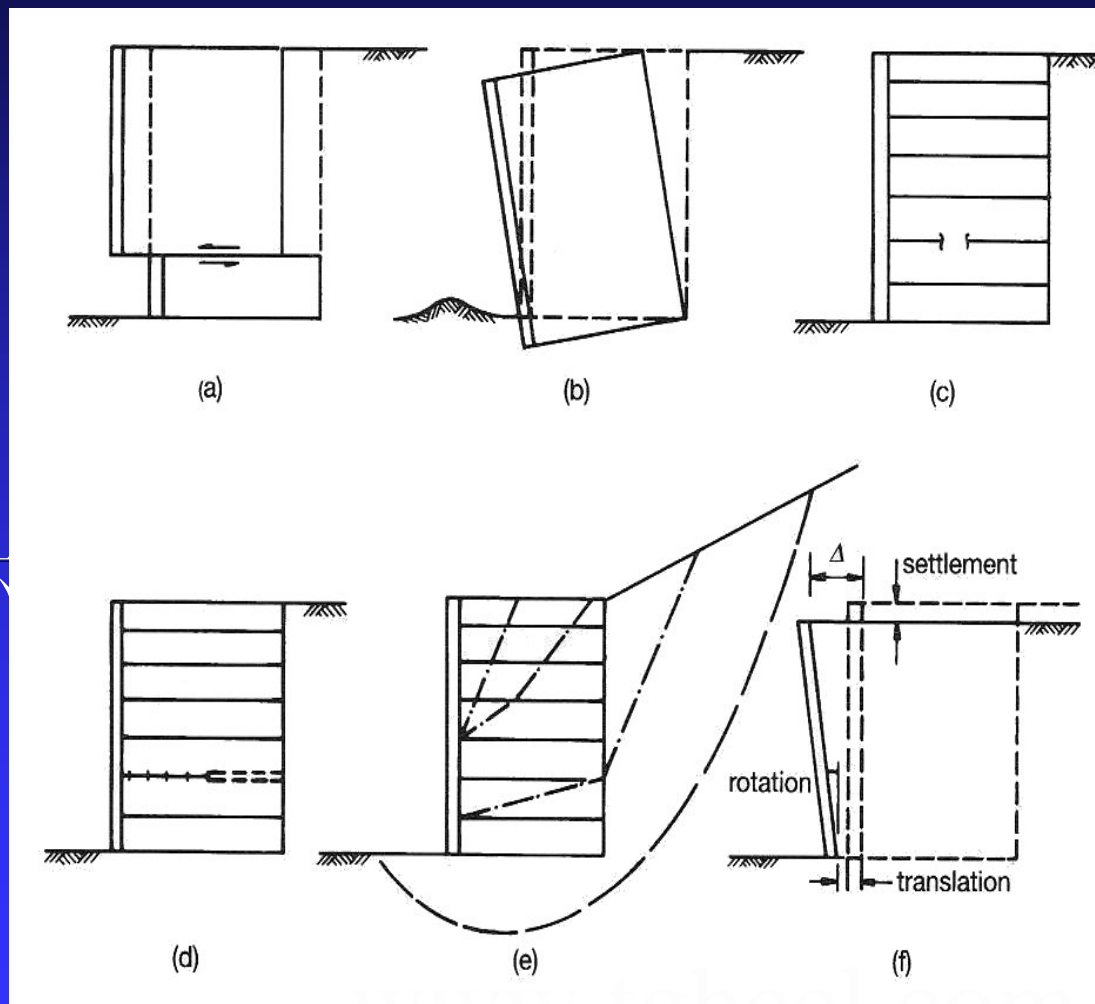
# 加筋路堤和加筋挡土墙

加筋土国际研讨会：专题报告  
R.Kerry Rowe and Allen Lunzhu Li

# 加筋挡土墙的设计

## ■ 加筋挡土墙的破坏模式:

- (a) 滑动破坏
- (b) 承载力破坏
- (c) 筋材断裂
- (d) 筋材拔出
- (e) 滑裂面/滑动楔体破坏
- (f) 倾覆破坏



# 加筋挡土墙的设计

- 1.外部稳定经——经典极限平衡法
- 2.内部稳定性的考虑，不被拉断；不被拔出。
- （间隔和长度）——锚定楔体法。
- 3.内部设计：加筋的耐久性。加筋的老化

## 护面的形式

- 包裹式



# 全高式



- 组合单元





# 筋材种类



# 土工条带



# 锚固式加筋



# 片状土工织物



# 加拿大安大略省的金斯敦的皇家军事 学院 RMCC加筋墙

GeoEngineering Centre at Queen's-  
RMCC(Royal Military College of Canada),  
Geotechnical Group, RMCC Ontario,  
Canada

# 试验概况

- 10座足尺挡土墙的长期研究项目
- 主要介绍其中有6座：一座3.6米高的包裹式加筋挡土墙，和五座3.6米高的由预制混凝土块组合面板挡土墙。（也涉及一座3米高的全高度整体面板墙，一座3米高的分段预制的面板墙）
- 所有墙都通过一个加载装置施加了一个附加荷载。这个装置使得加载水平充分地超过了工作荷载条件

# 分段式面板加筋挡土墙

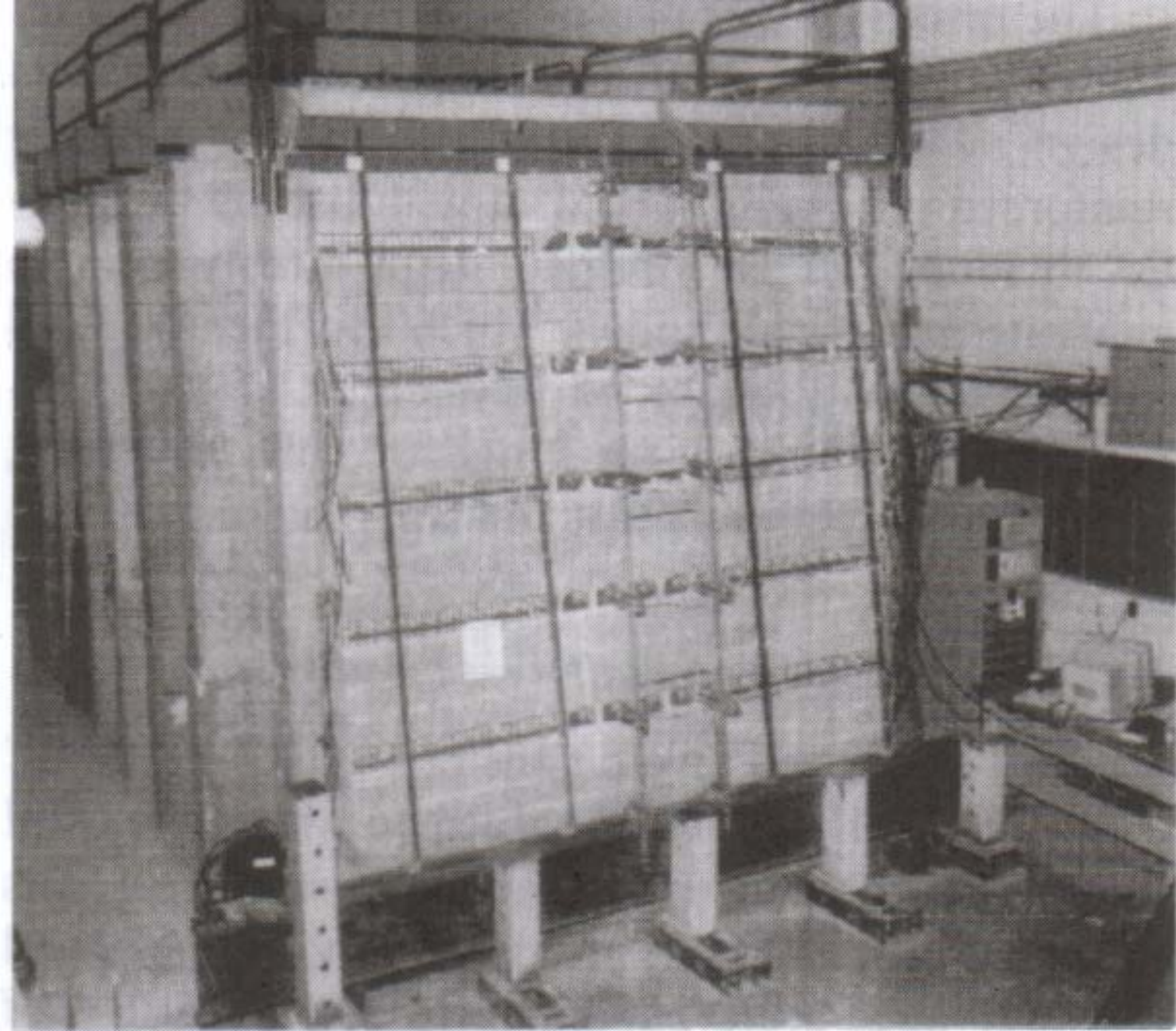
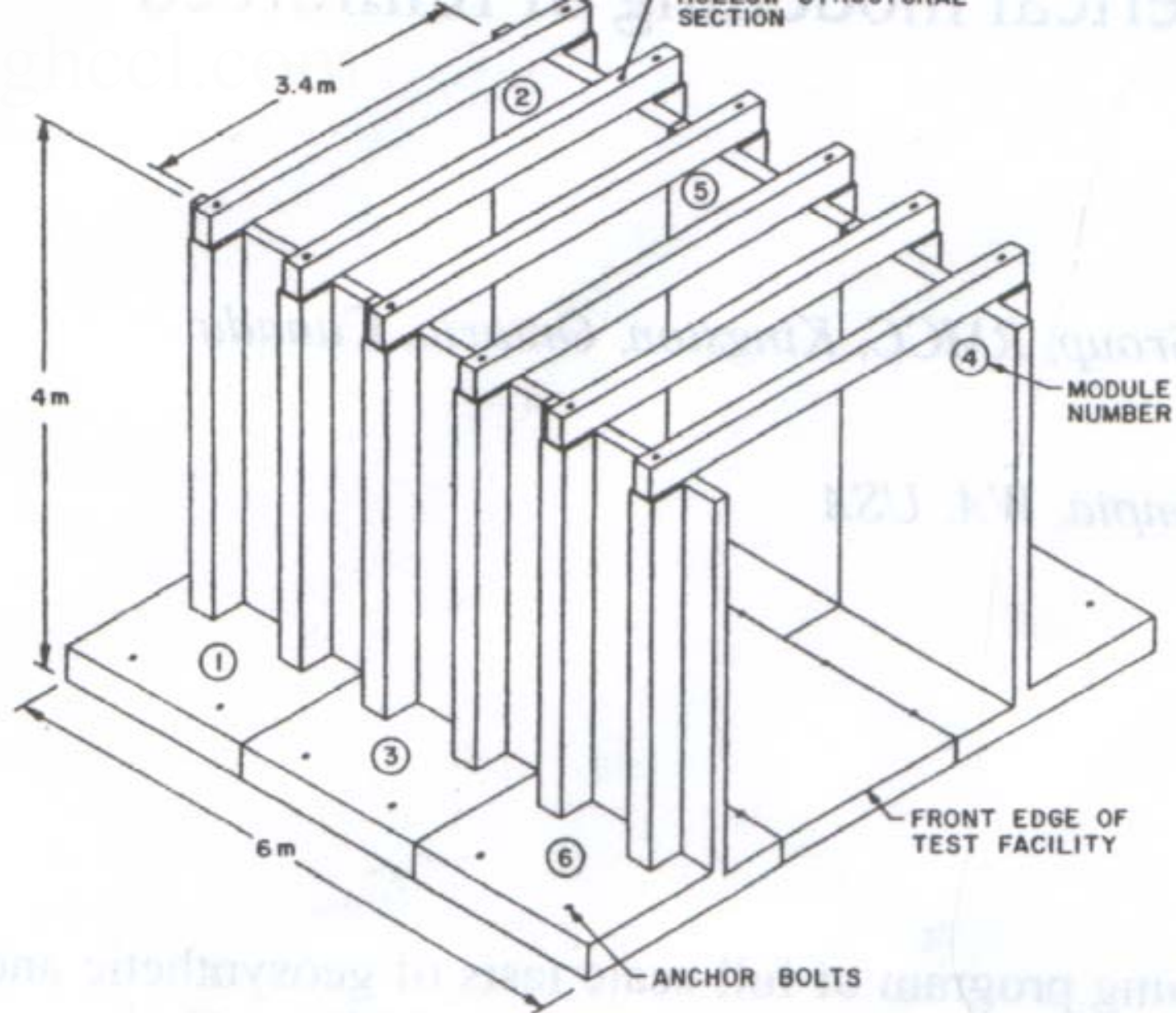


Figure 1 Reinforced soil segmental retaining wall (Wall 1)





挡土墙试验设备



# 足尺加筋挡土墙试验情况表

墙编号	情况	试验目的
No.1	组合预制墙面， 双向PP格栅，间距60cm	标准墙，比较筋材间距、刚度、强度的影响
No.2	组合预制墙面， 双向PP格栅，间距60cm， 格栅的纵向格条数减半	比较筋材的刚度对于： 筋的荷载、应变、墙的变形、总体安全水平的影响
No.3	组合预制墙面， 双向PP格栅，间距90cm	比较加大间距的影响
No.4	使用很柔软的双向PP格栅的包裹式挡土墙，间距60cm	考察墙面刚度和墙脚约束的影响
No.5	组合预制墙面， 在PP格栅中掺加聚酯（PET）格栅 （强度类似，编织，PVC(聚氯乙烯)包裹PET	考察蠕变的影响
No.6	组合预制墙面 焊接的钢丝网格(WWM)，间距60cm	研究加筋刚度的影响

# 加筋情况

- No.1: 一座3.6米高预制混凝土块组合面板挡土墙: 极限抗拉强度为14kN/m的6层加筋
- No.2: 组合组合墙装有极限强度为7kN/m的6层加筋;
- No.3: 极限抗拉强度为14kN/m的的4层加筋。
- No.4: 3.6米高的包裹式加筋挡土墙: 极限抗拉强度为14kN/m的6层加筋;
- No.5: 极限抗拉强度为16kN/m的的6层加筋(编织聚酯 (PET)格栅)
- No.6: 极限抗拉强度为7.5kN/m的的6层加筋焊接的钢丝网格(WWM))

## 加筋情况

- 全高度整体面板墙：抗拉强度为 $12\text{kN/m}$ 的4层加筋
- 一座3米高的分段预制的面板墙： $12\text{kN/m}$ 的4层加筋

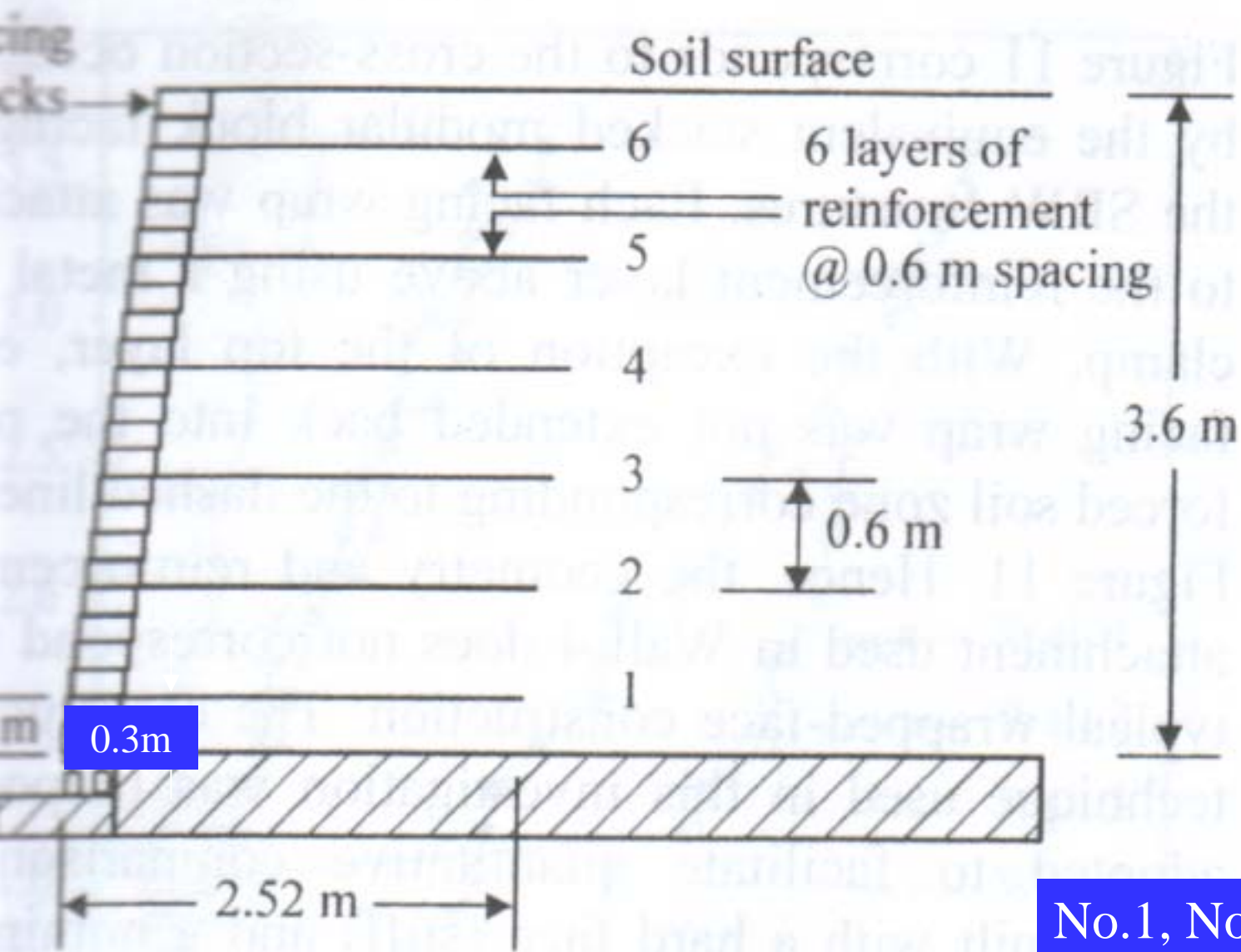
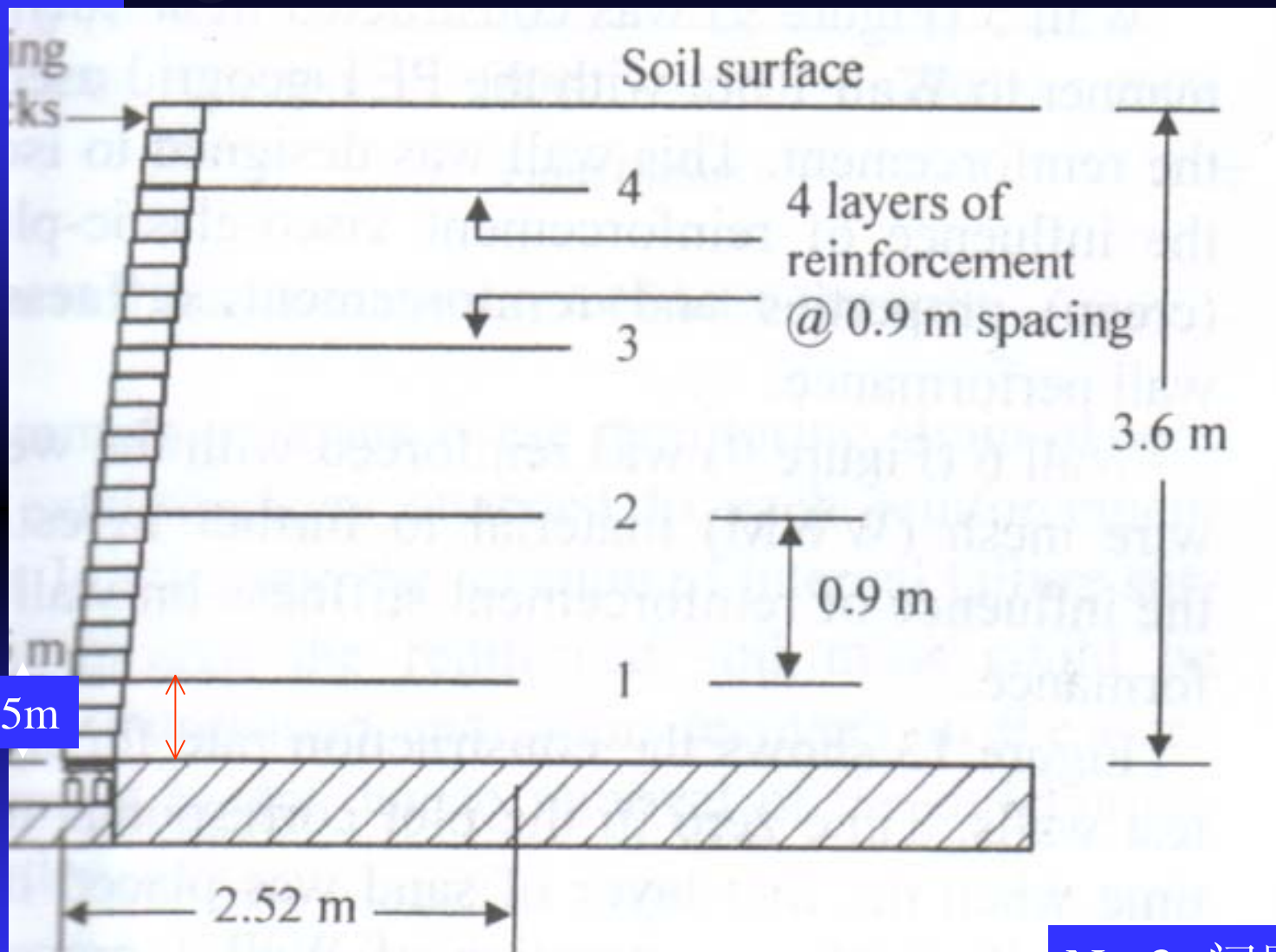


Figure 9. Test configuration for Walls 1, 2, 5 and 6.



No.3: 间距90cm

re 10. Test configuration for Wall 3.



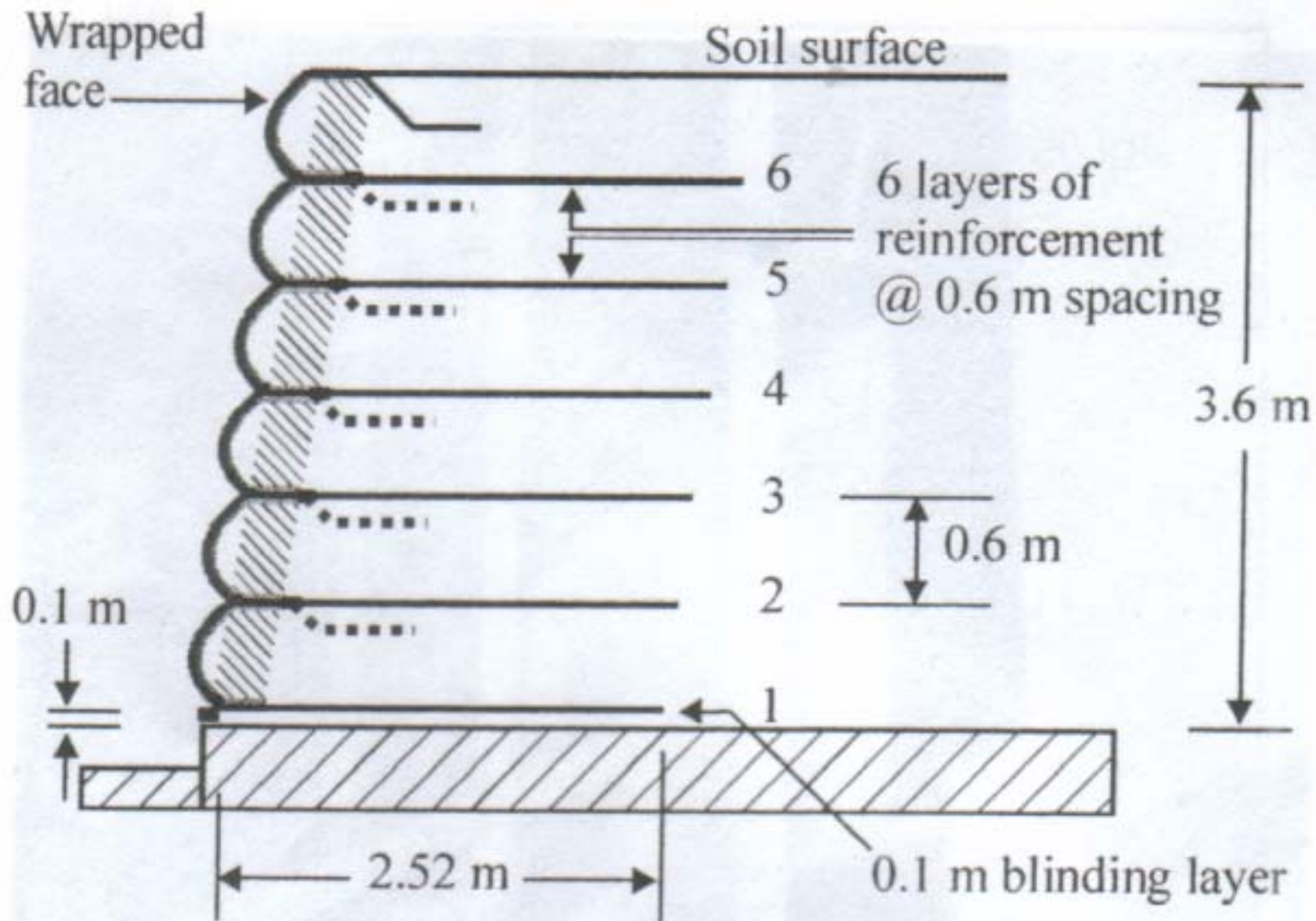
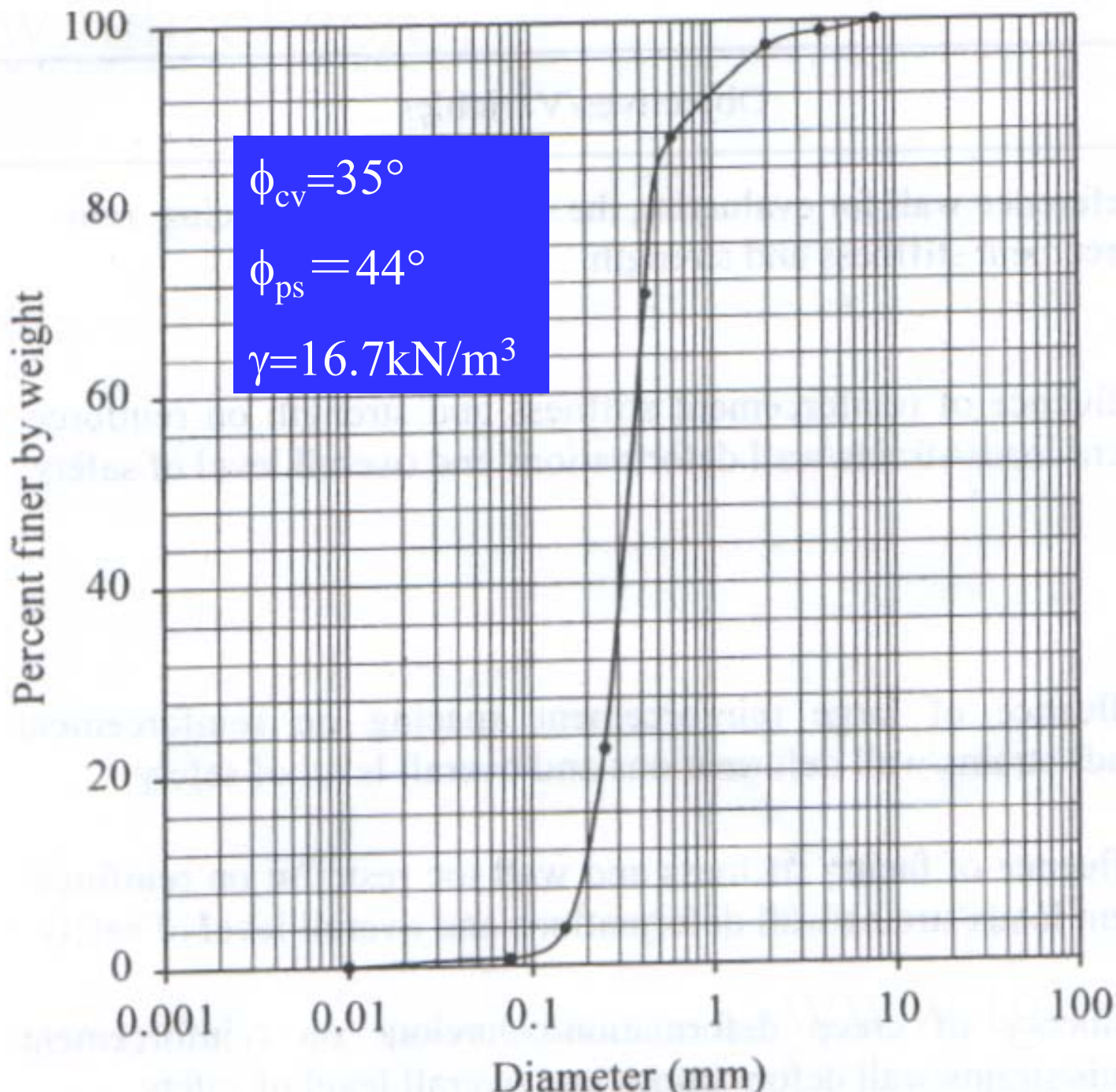
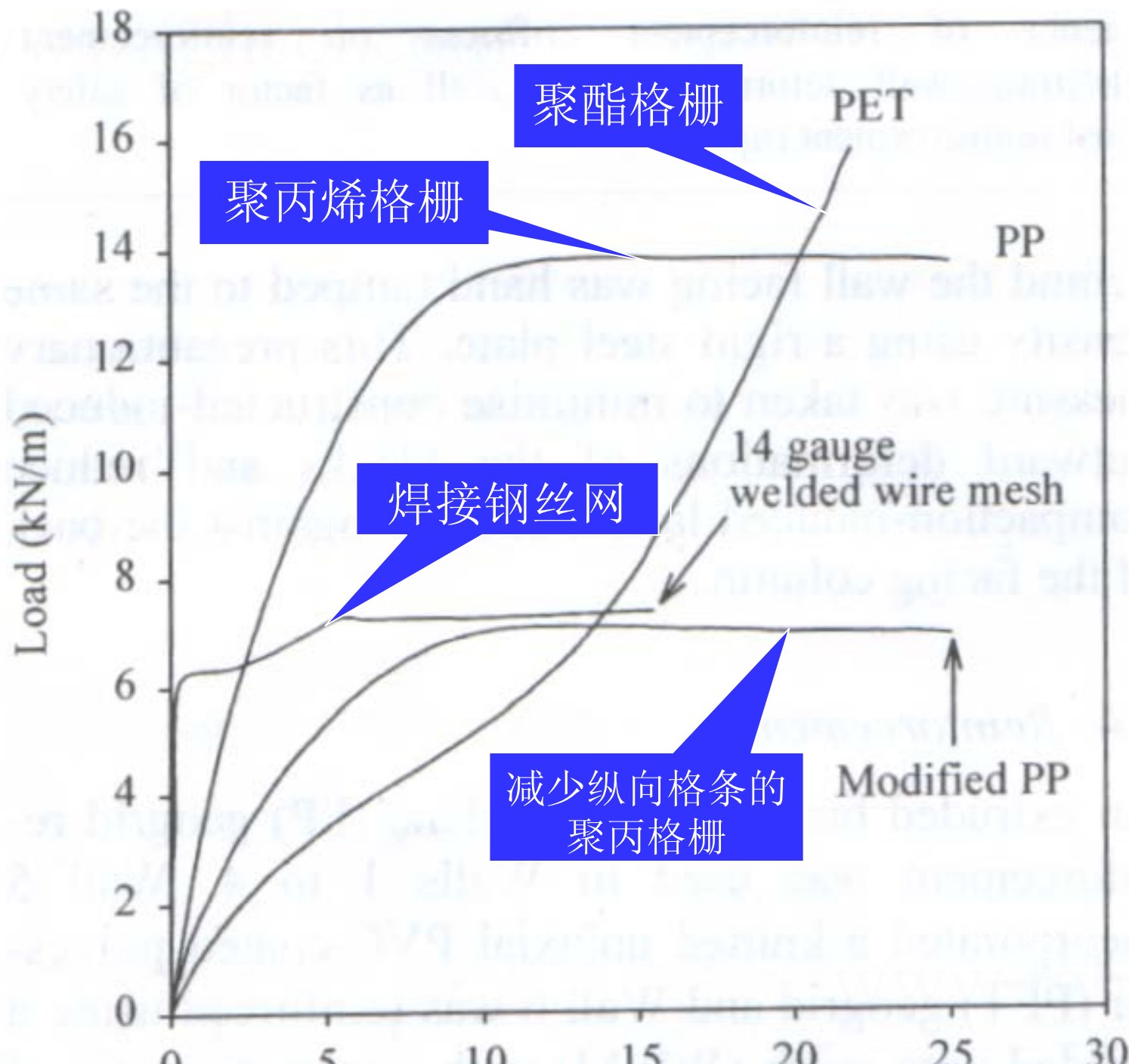


Figure 11. Test configuration for 'Wall 4.



回填砂土：清洁、均匀河砂

# 不同筋材的力学性质





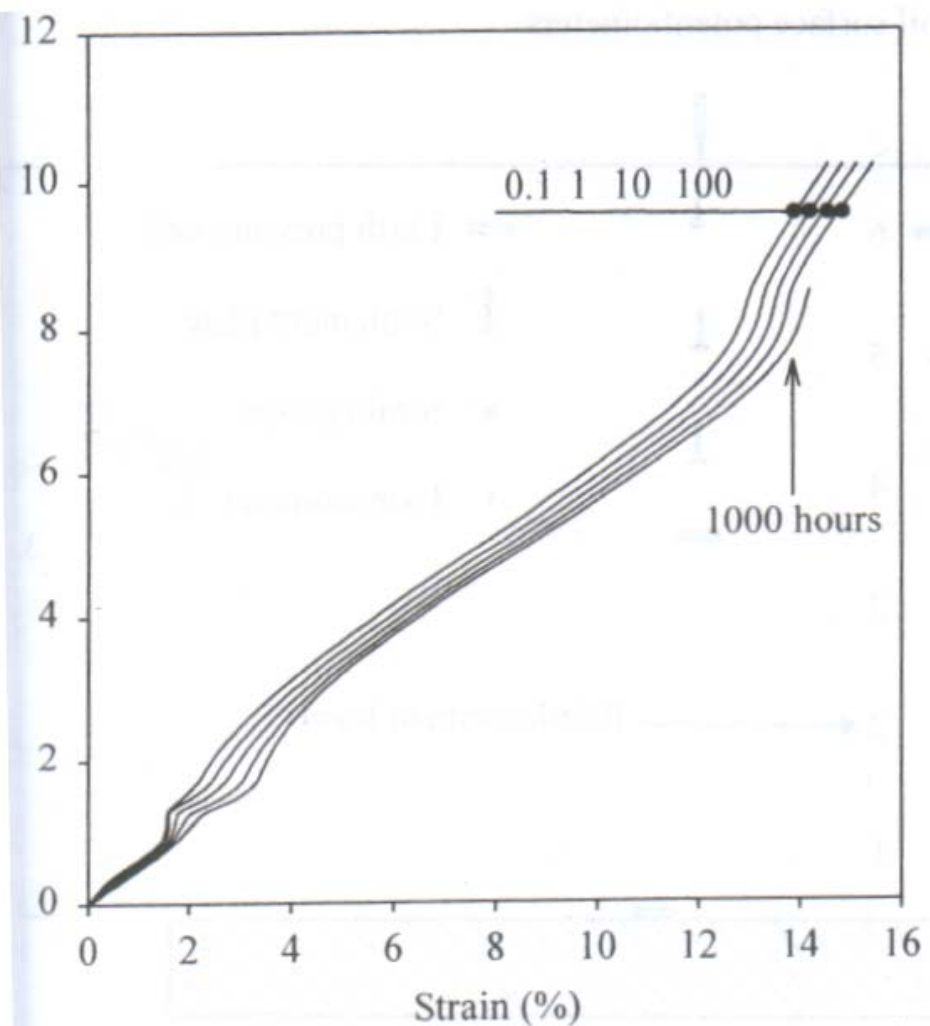
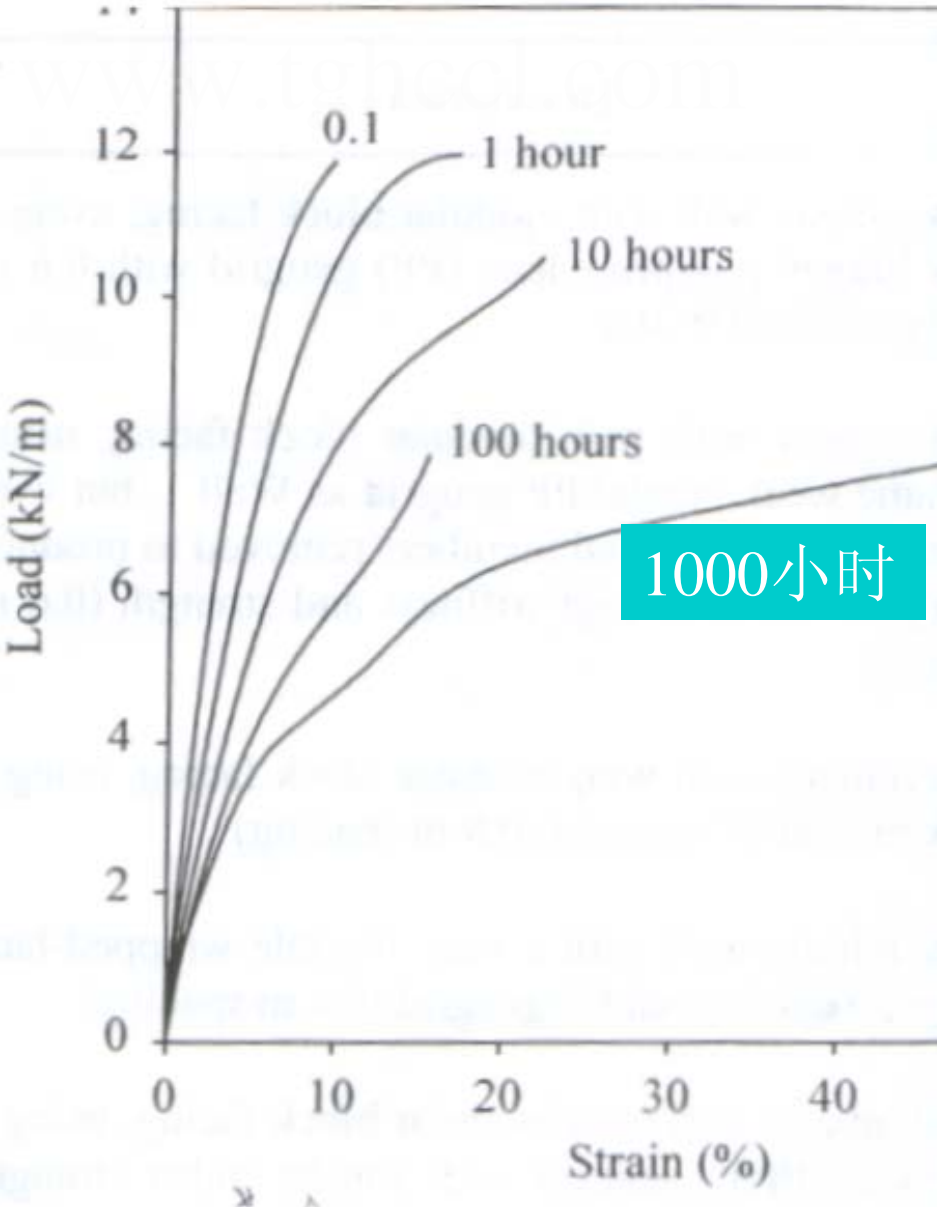


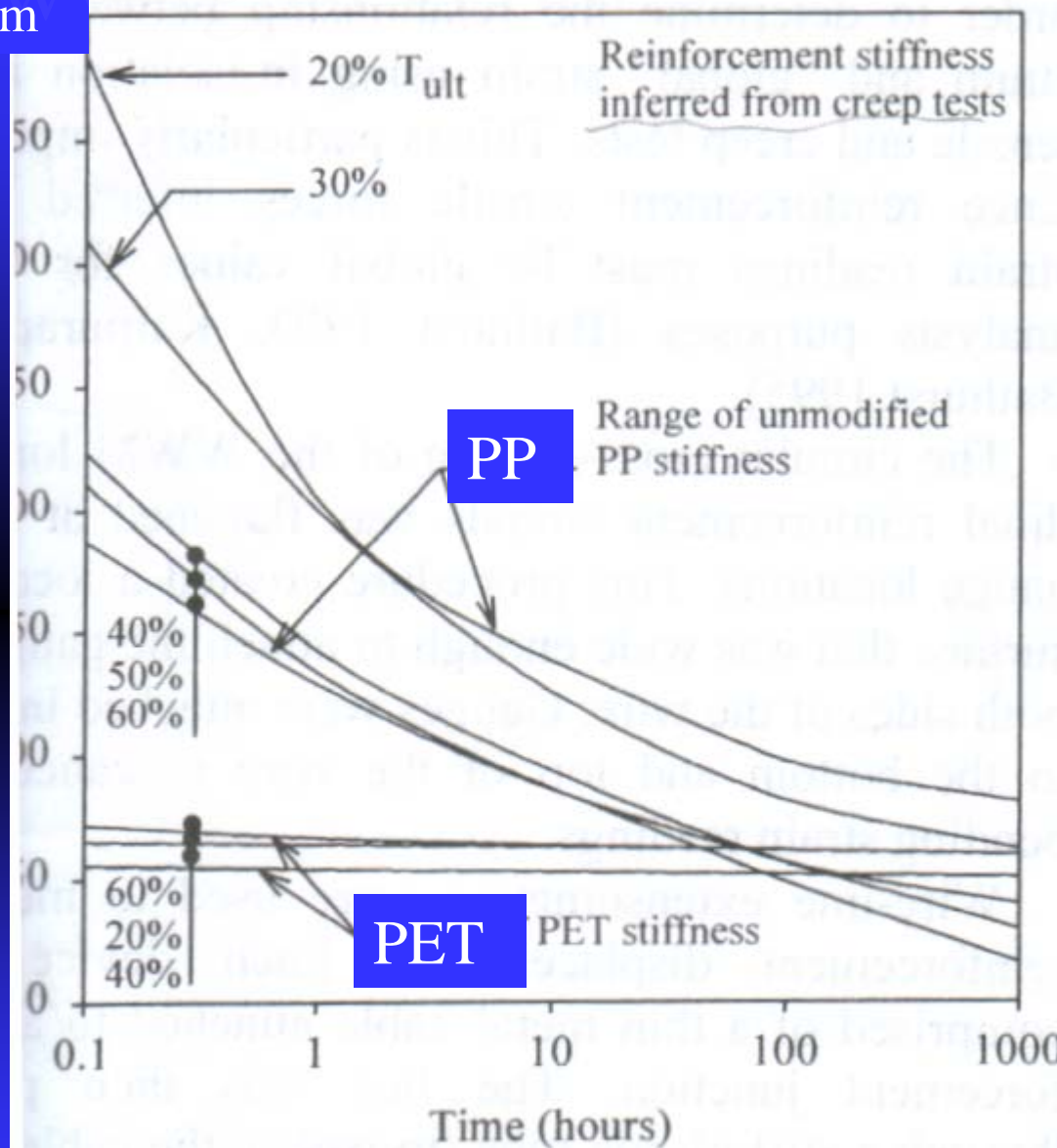
Figure 6. Isochronous load-strain-time curves for the polyester

PP格栅的时间—荷载—应变曲线

PET格栅的时间—荷载—应变曲线

kN/m

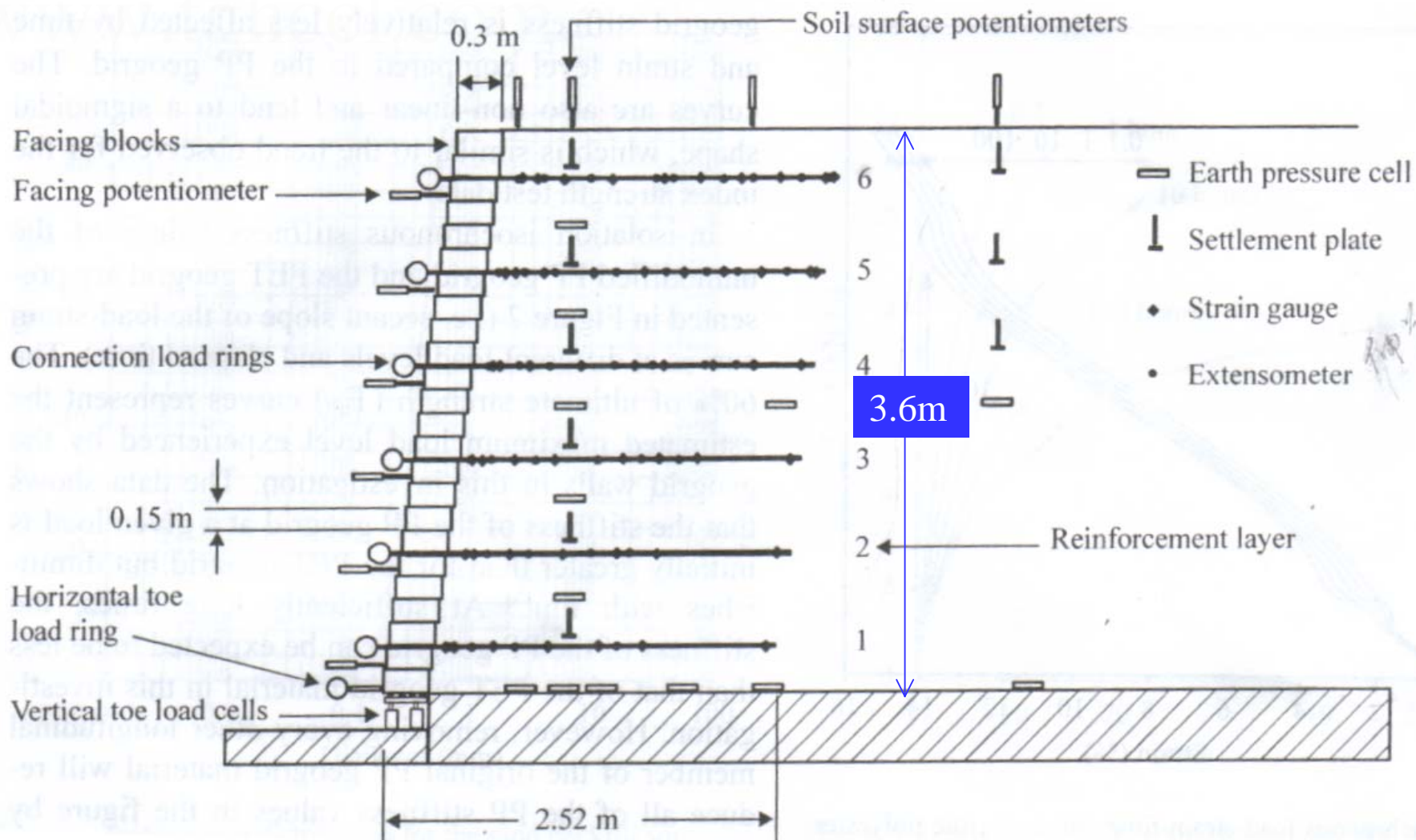
筋材刚度



时间  
(小时)

蠕变试验中筋材刚度与荷载、时间关系

www.tghcecl.com



监测仪器设备：土压力计、沉降板、应变计、伸长计等

## 各墙的施工历时:

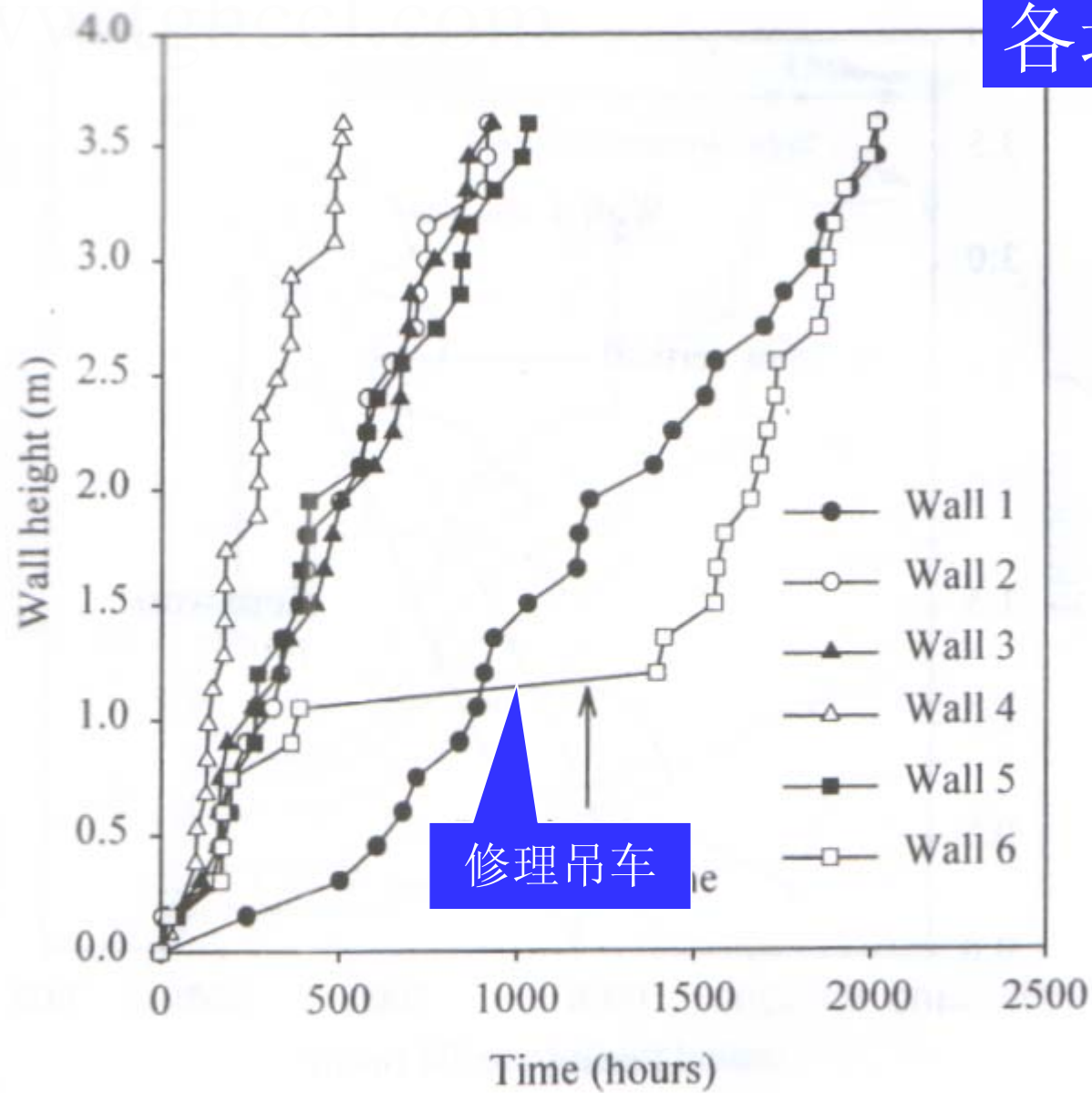
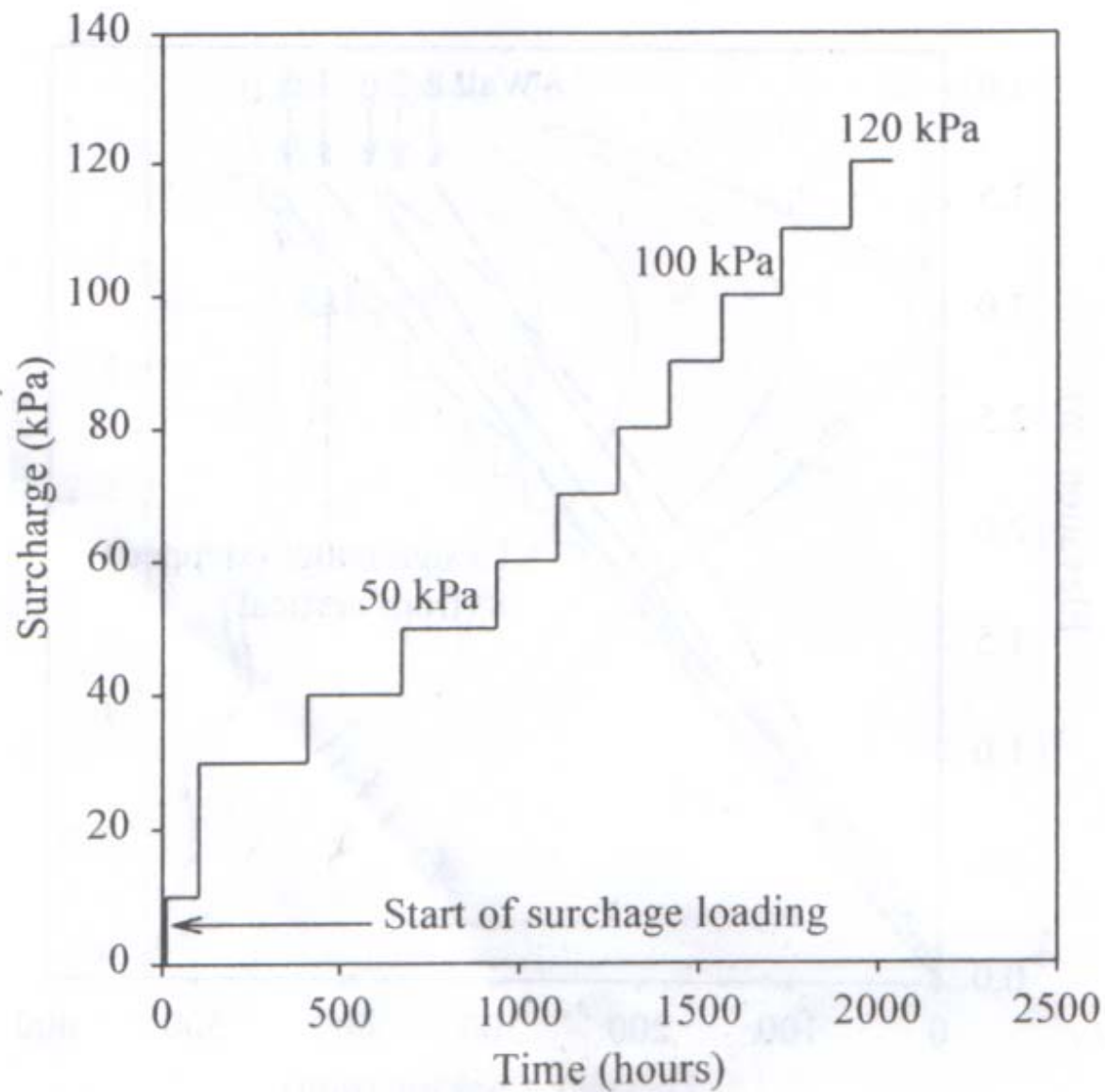


Figure 13. Construction history for RMCC test walls.

# 加载系统一（气囊）



No. 5 的加载历史

（聚酯）

## 二· 试验结果与分析

- 2.1 墙面的变形情况
- 2.2 筋材的应变与位移
- 2.3 墙面接触荷载
- 2.4 墙脚处的竖直与水平荷载
- 2.5 垂直土压力
- 2.6 土的沉降



## 2.1 墙面的变形情况

对于组合墙面的墙——施工结束以后墙面的外轮廓。

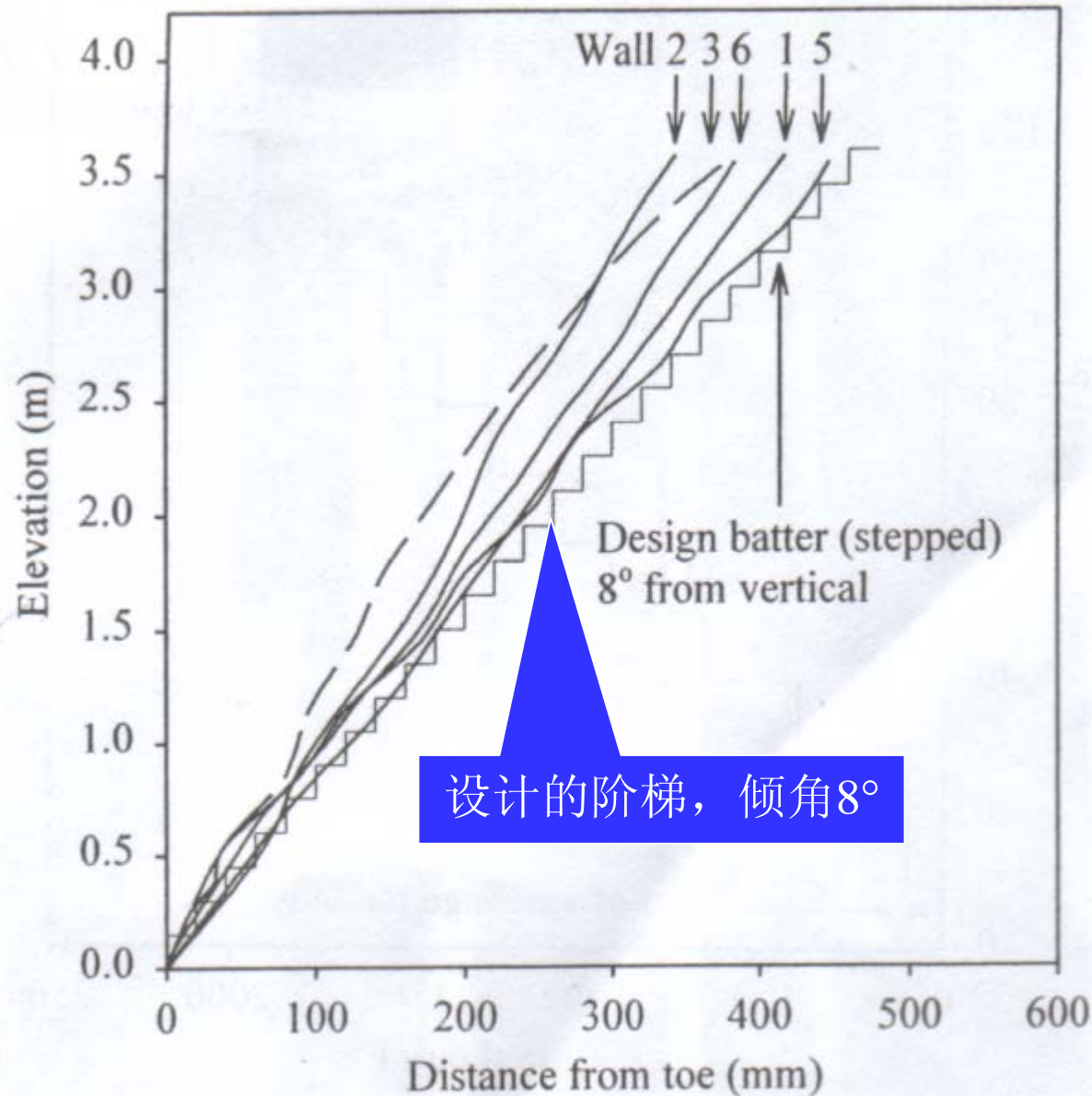
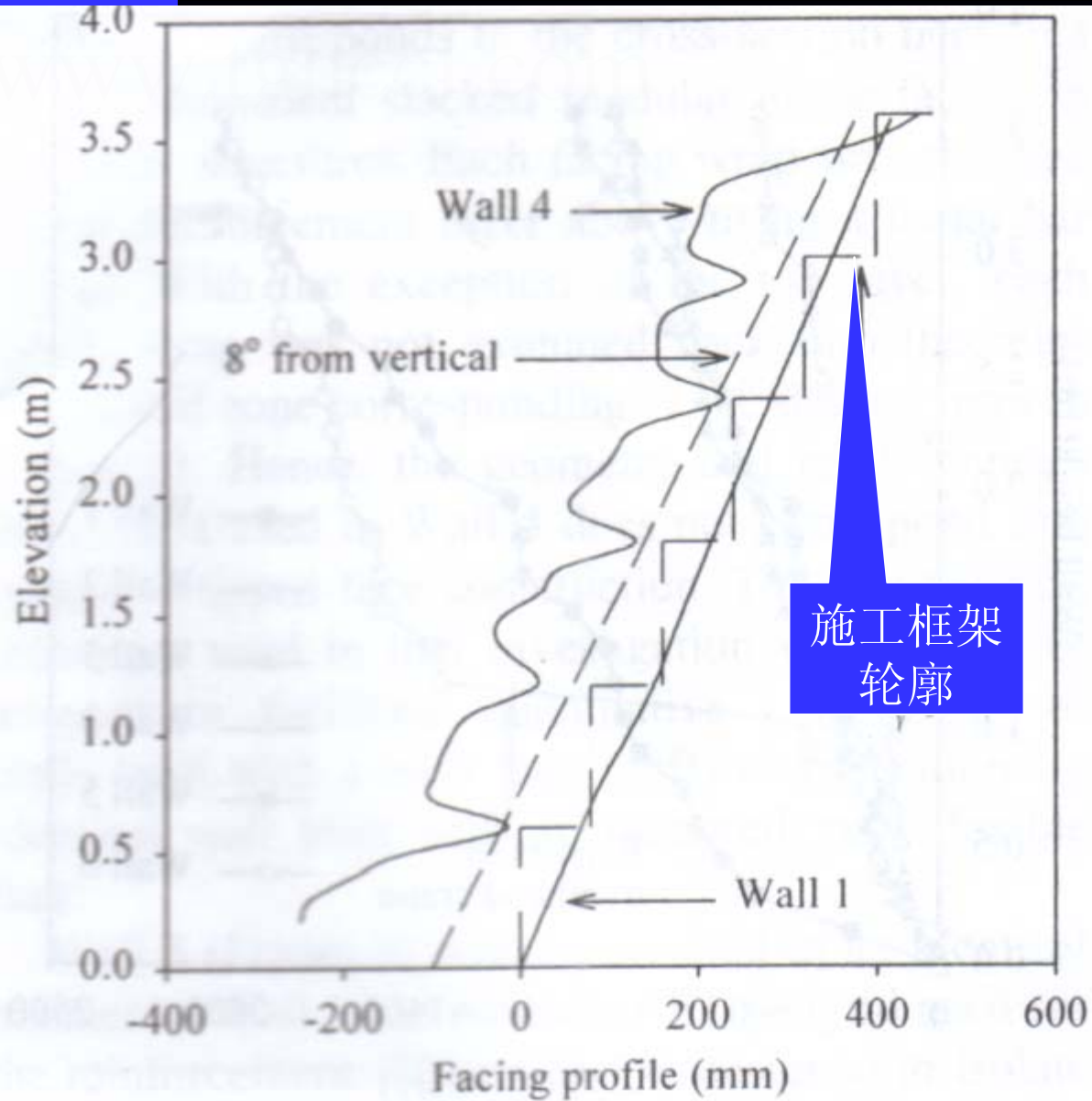


Figure 15. Facing column profiles at end-of-construction for segmental walls.



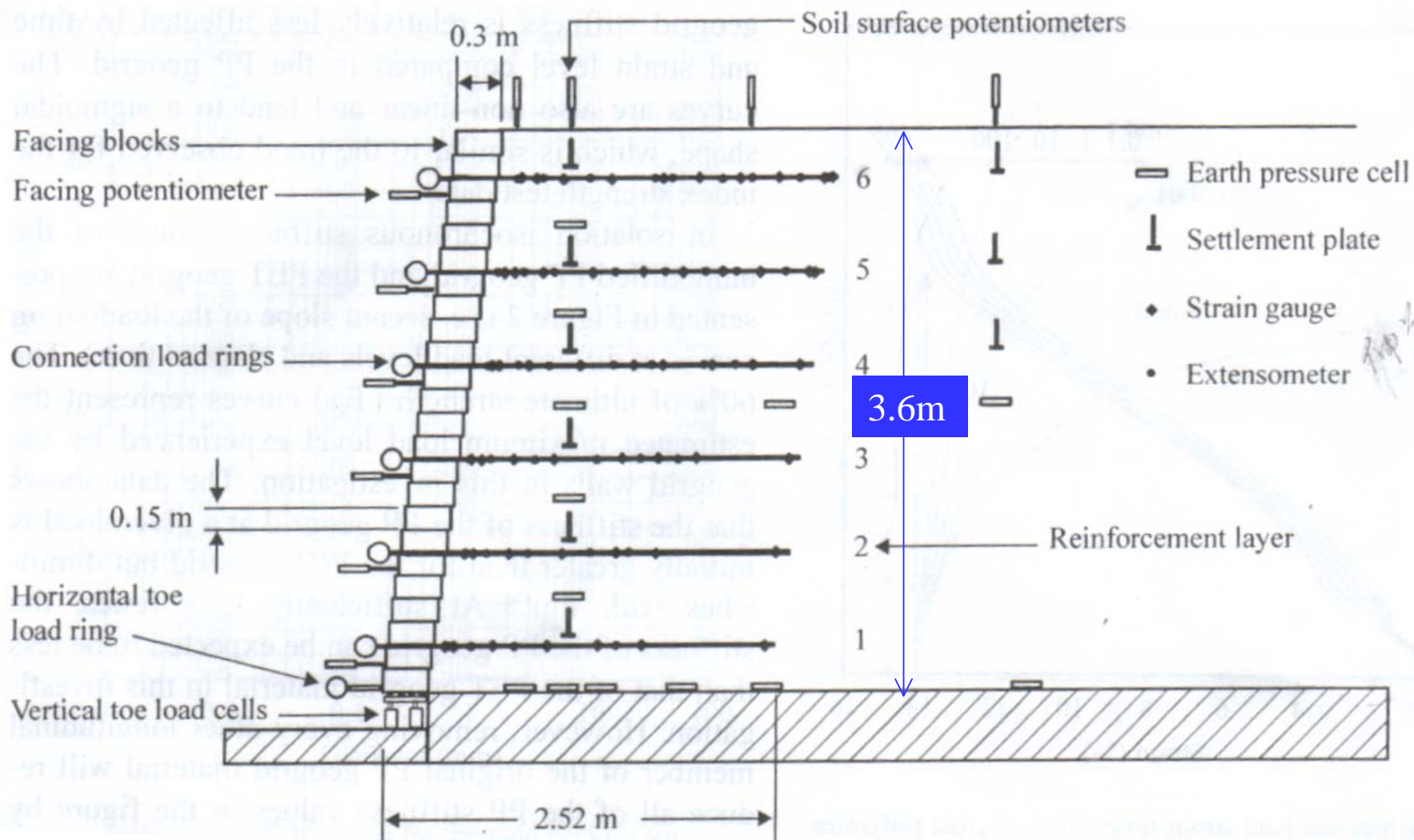
No.4与No.1

施工后墙面轮廓

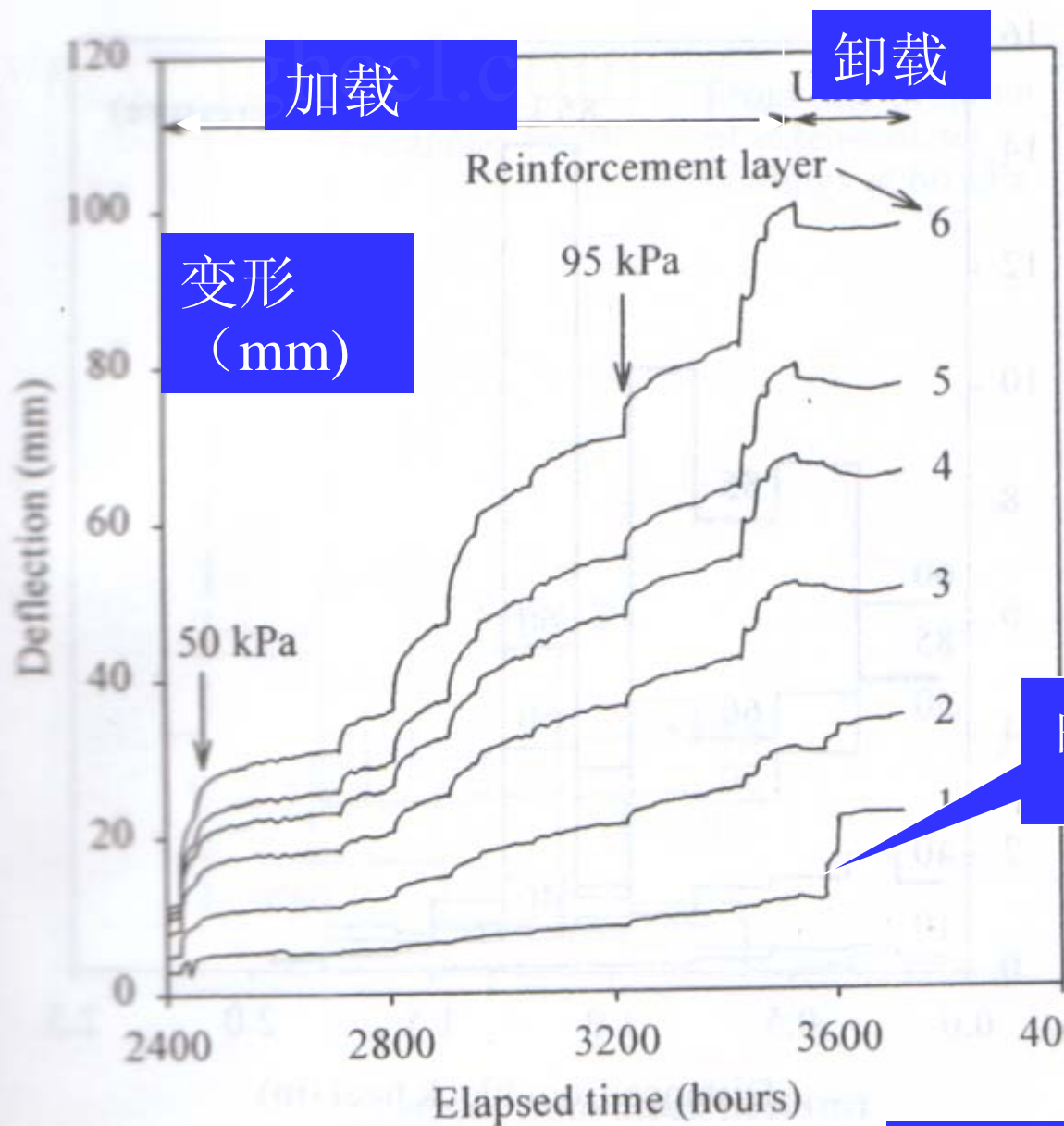
施工框架  
轮廓

Figure 16. Facing column profiles at end-of-construction for segmental Wall 1 and wrapped-face Wall 4.





监测仪器设备：土压力计、沉降板、应变计、伸长计等



加载

卸载

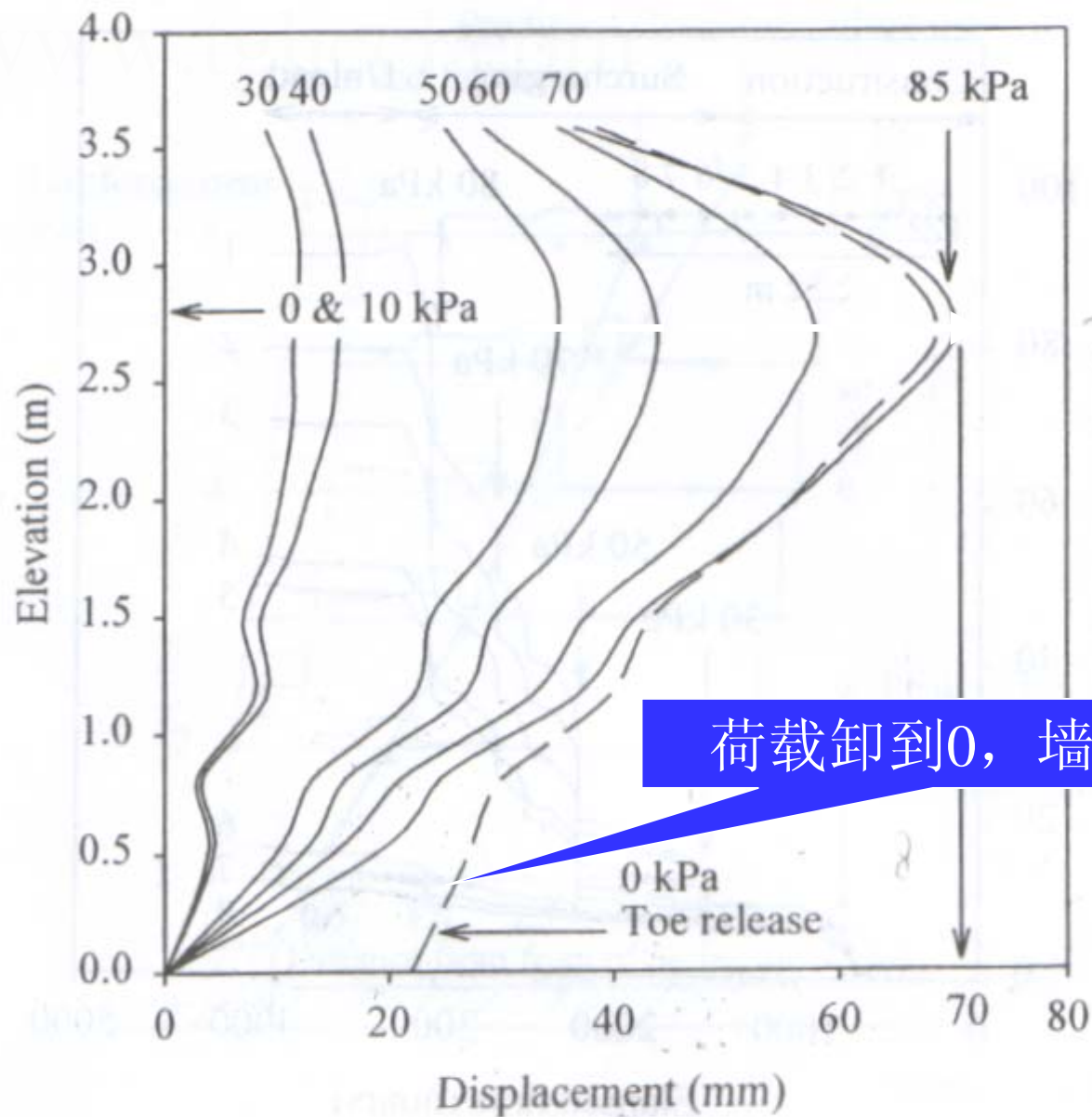
变形  
(mm)

No.1每一  
层加筋处  
墙面的水  
平偏移变  
形

由于墙脚  
放松

时间 (小时)

Figure 17. Horizontal deflections measured at face of Wall opposite reinforcement layers.



No.2

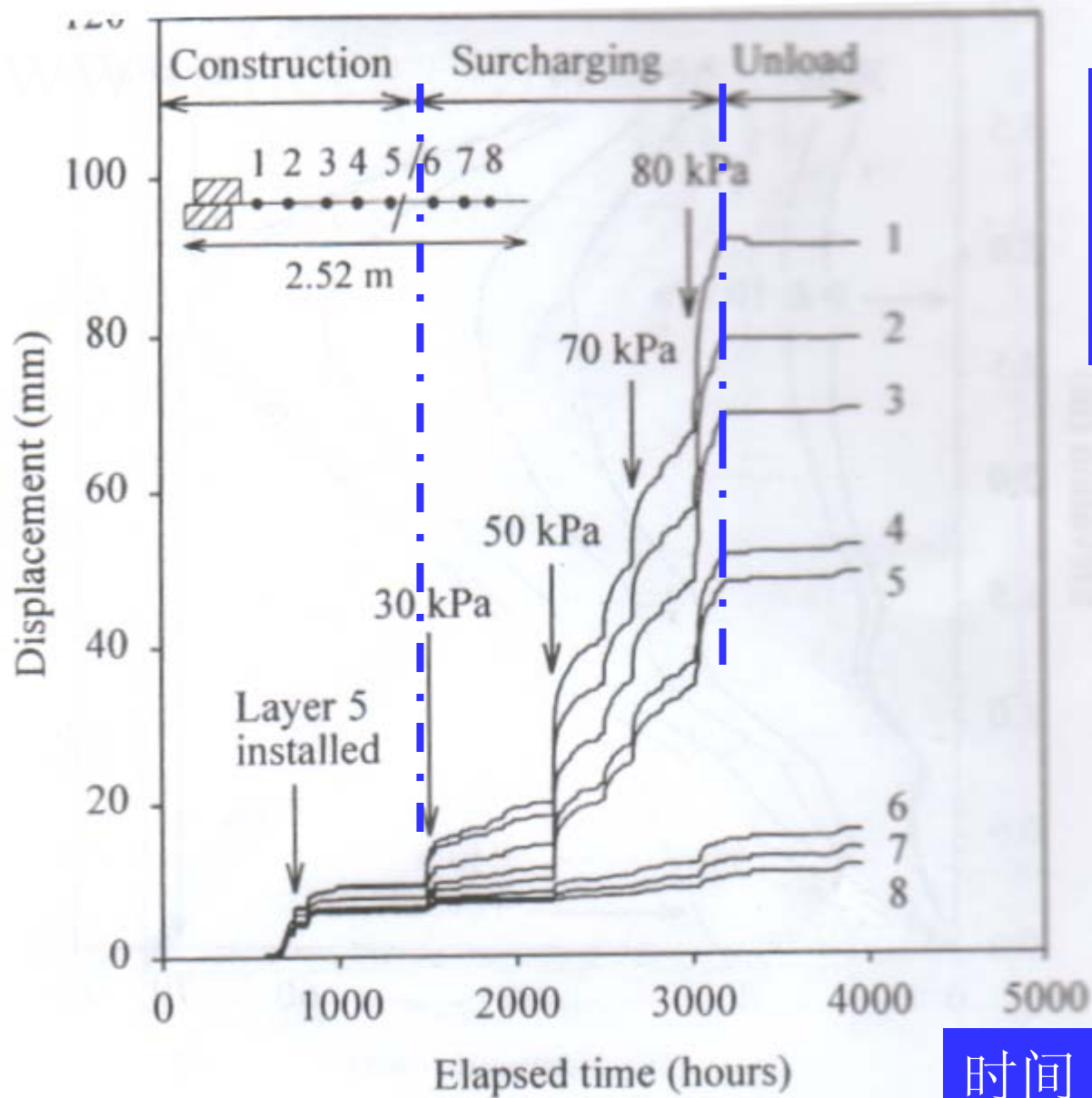
在不同荷载下墙面的轮廓

(以施工后为0)

荷载卸到0，墙脚放松

Figure 18. Facing profiles for Wall 2 taken with respect to end-of-construction.

## 2.2 筋材的应变与位移



No.2, 第四层筋, 记录的各点水平位移随时间的变化。

时间

Figure 19. Extensometer displacements recorded for reinforcement layer 4 of Wall 2.



应变  
(%)

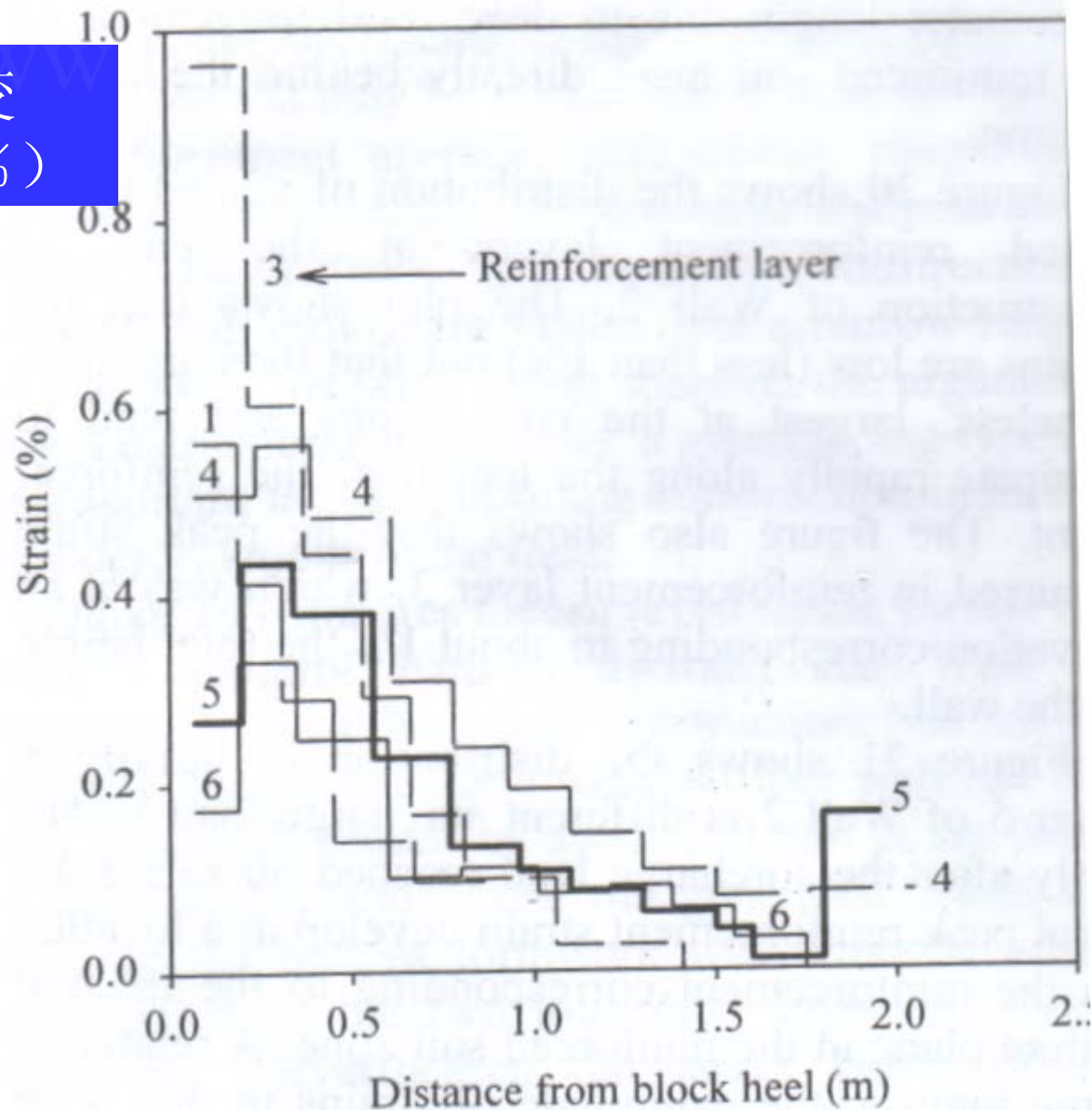
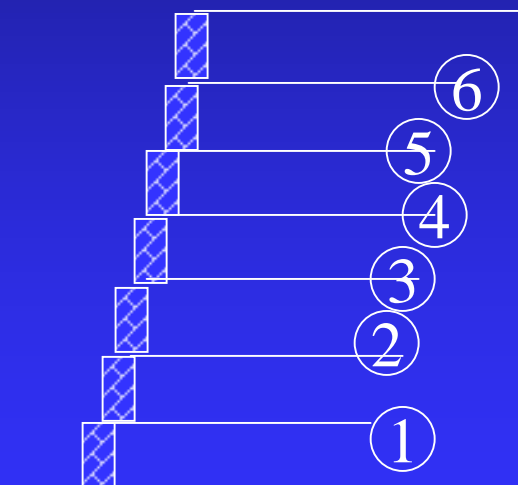


Figure 20. Distribution of strains at the end of construction for Wall 2.

No.2

施工结束时，  
每层筋沿长度  
的应变分布



No.2

第五层筋

在加超载过程中的应变分布

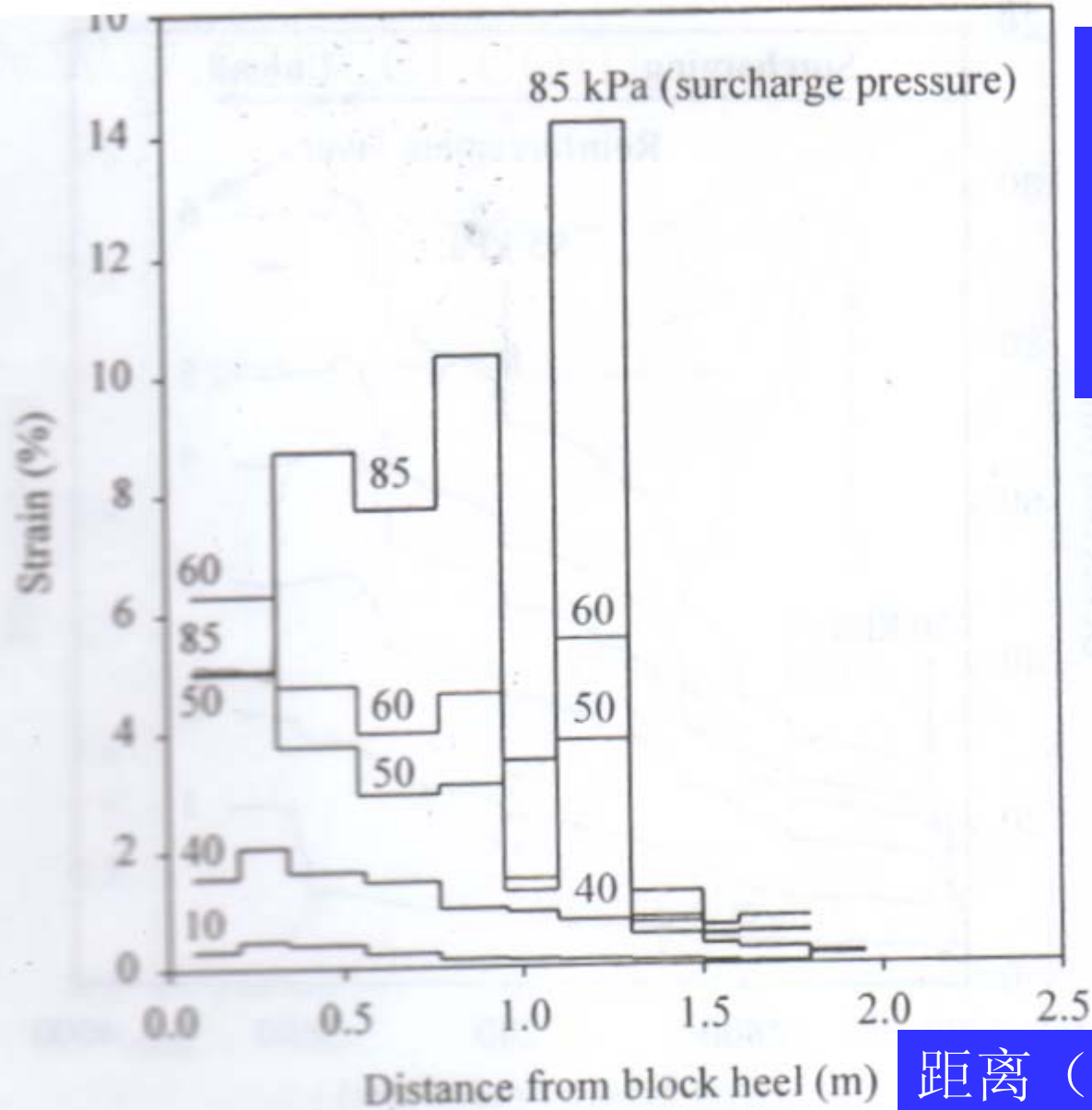
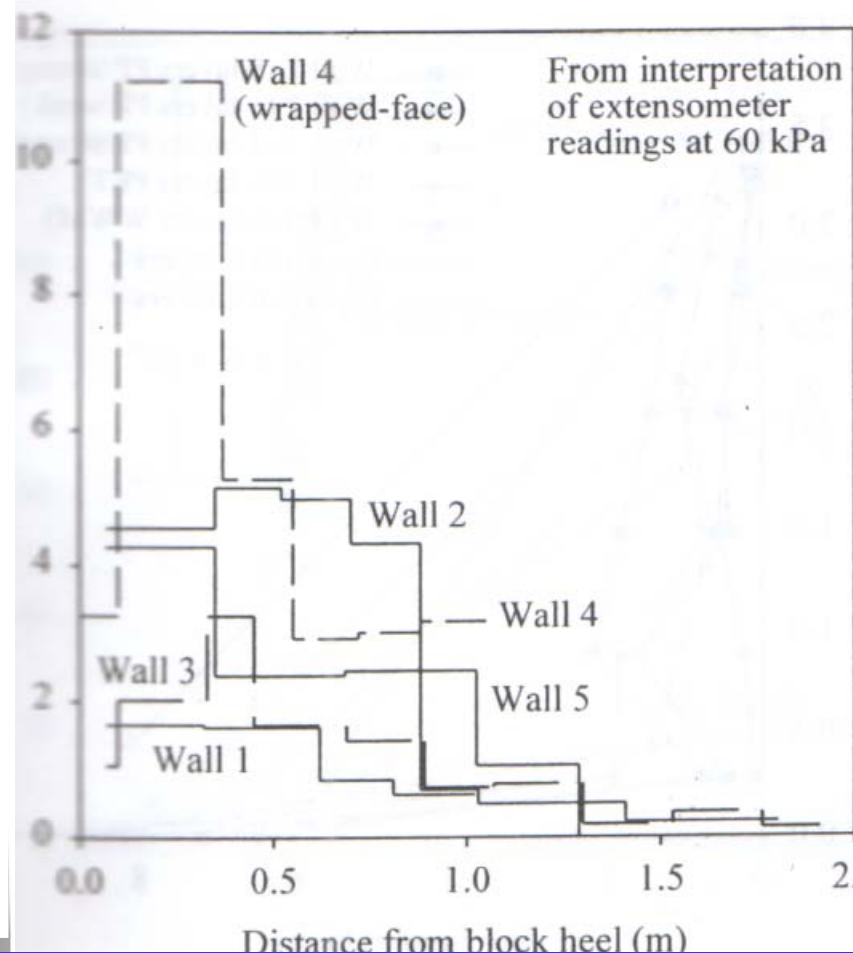
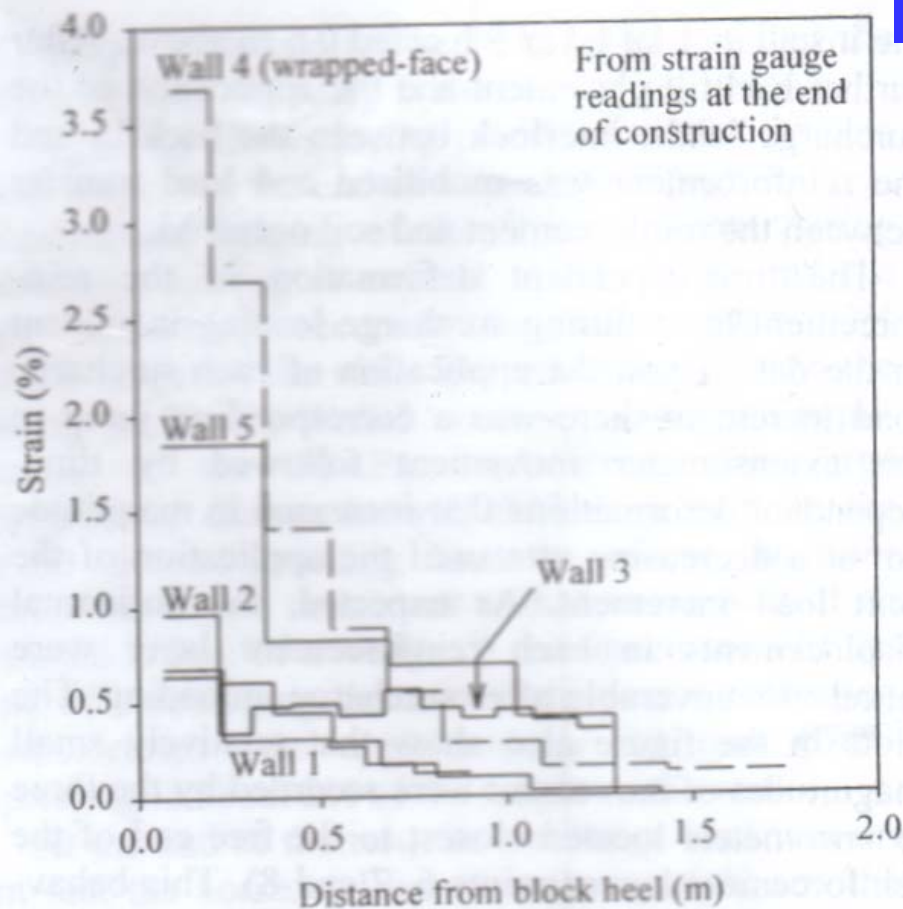


Figure 21. Strain in layer 5 for Wall 2 during surcharge loading.

%



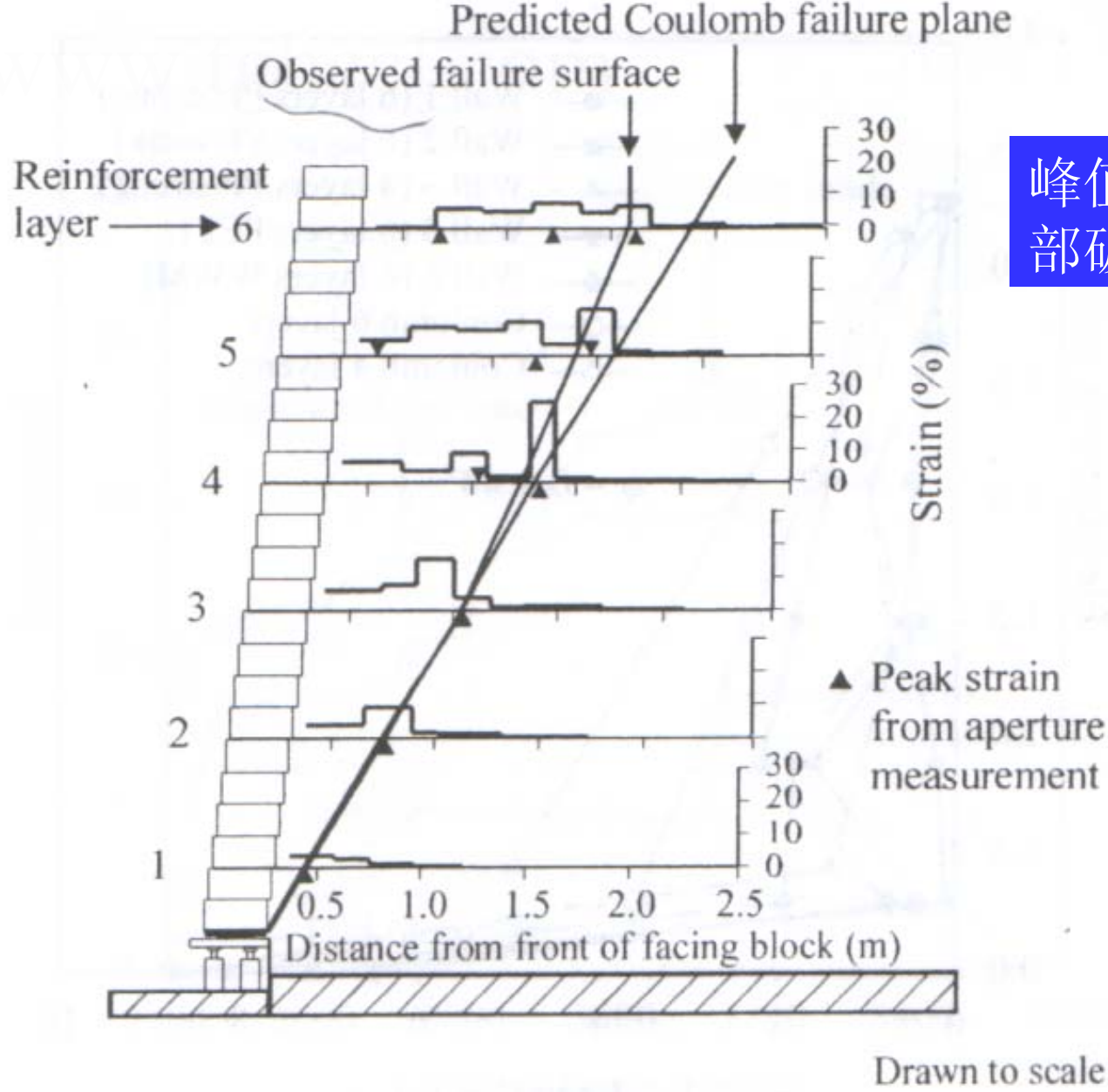
No.1, No.2, No.3, No.4, No.5

No.1—No5, 第三层筋

第三层筋，在施工结束时量测的应变

60kPa超载下，量测的应变分布





峰值应变位置和潜在内部破坏面

Figure 24. Location of peak reinforcement strain and internal failure surface for Wall 2.

## 2.3 墙面与筋材的连结荷载

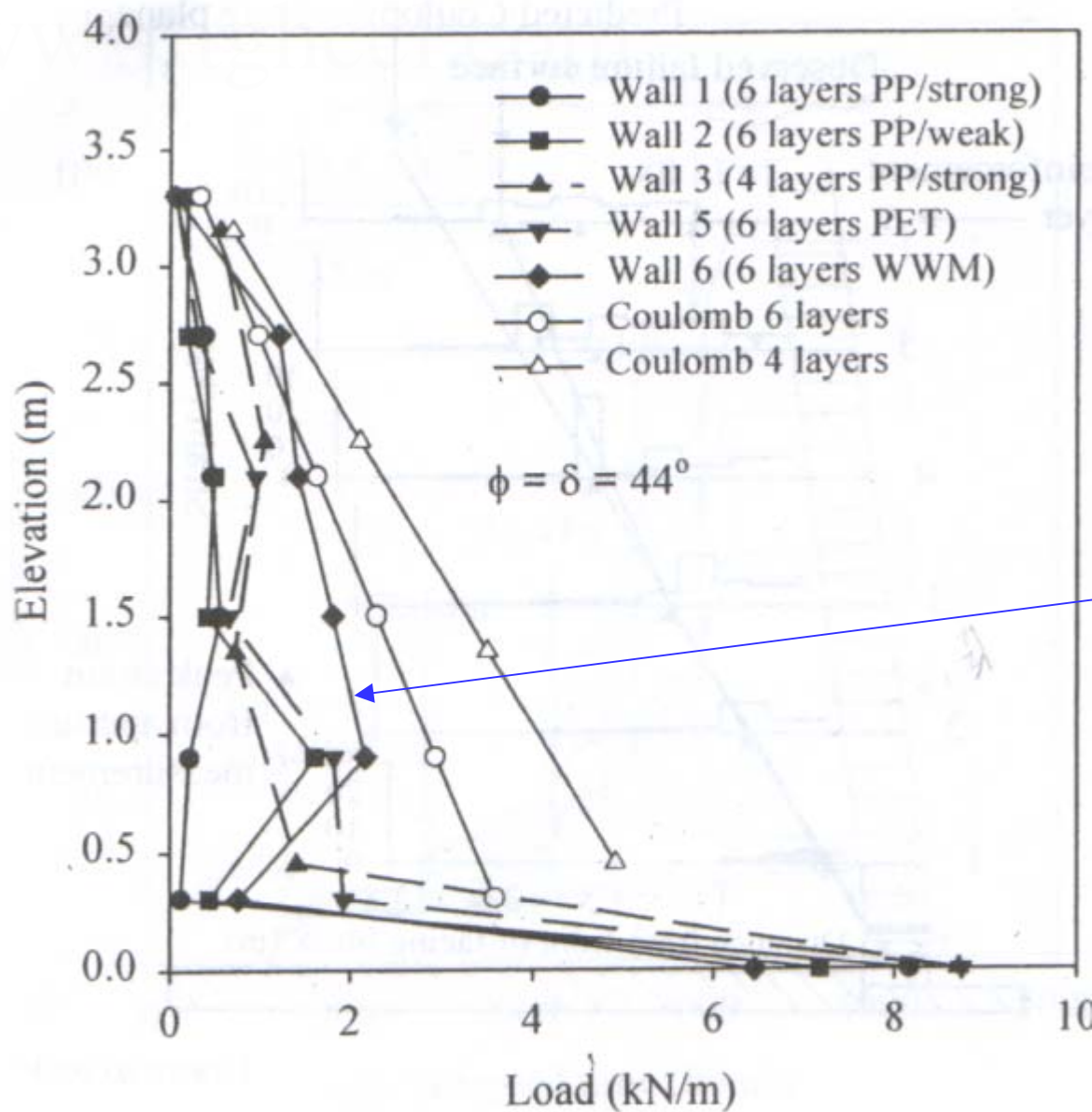


Figure 25. Measured versus predicted connection loads at the end of construction for  $\phi = 44$  degrees.

5个刚性墙面

量测的与预计  
( $\phi = \delta = 44^\circ$ ) 的

施工结束时的

墙面连结荷载：  
No.6的连结荷载最大—筋的刚度最大

## 2.4 墙脚处的竖直与水平荷载

No.5

墙面的底脚处竖直荷载:

两个量力盒的荷载之和大于墙面混凝土块的自重!

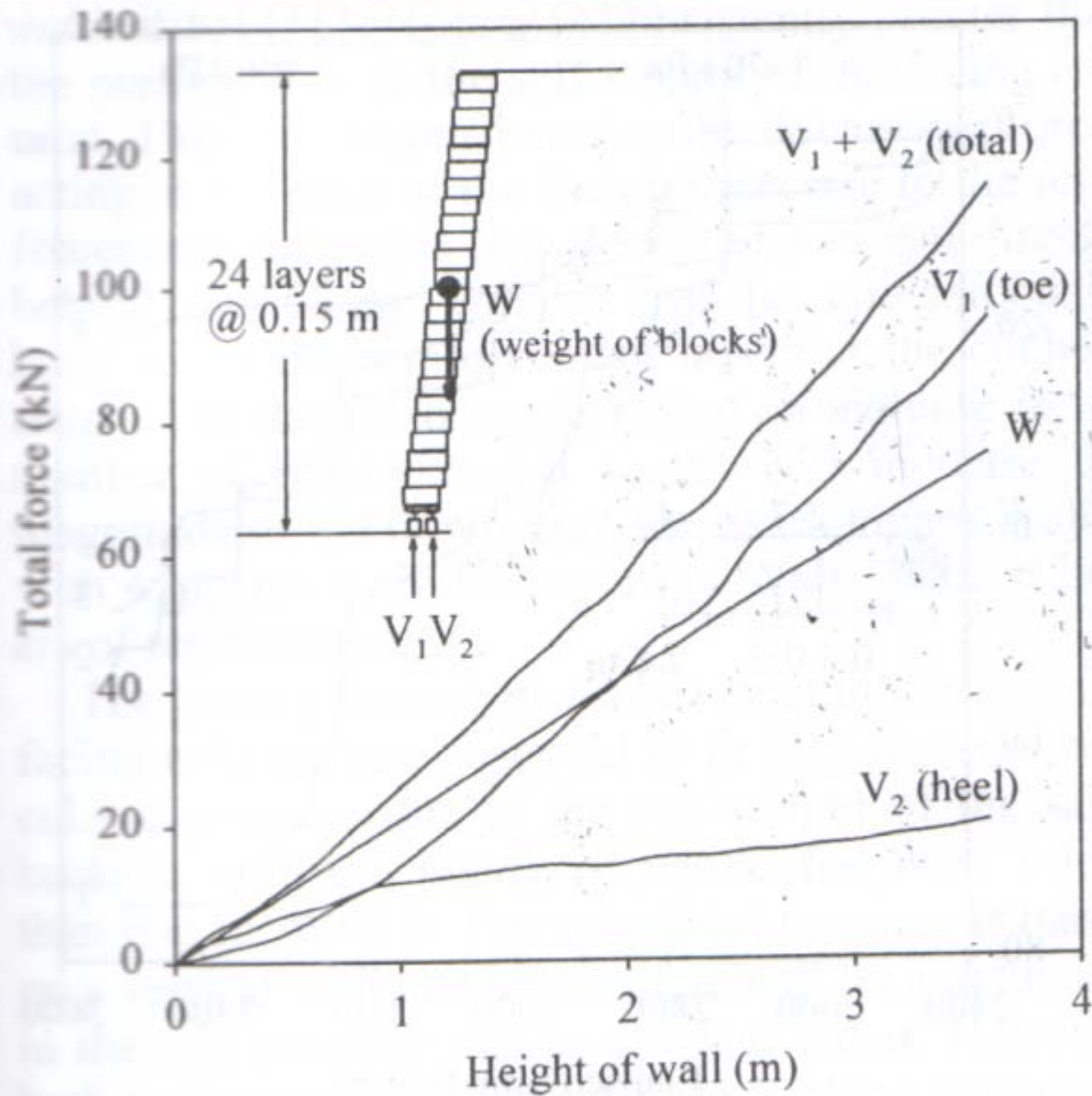


Figure 27. Vertical toe load forces for Wall 5 during construction.

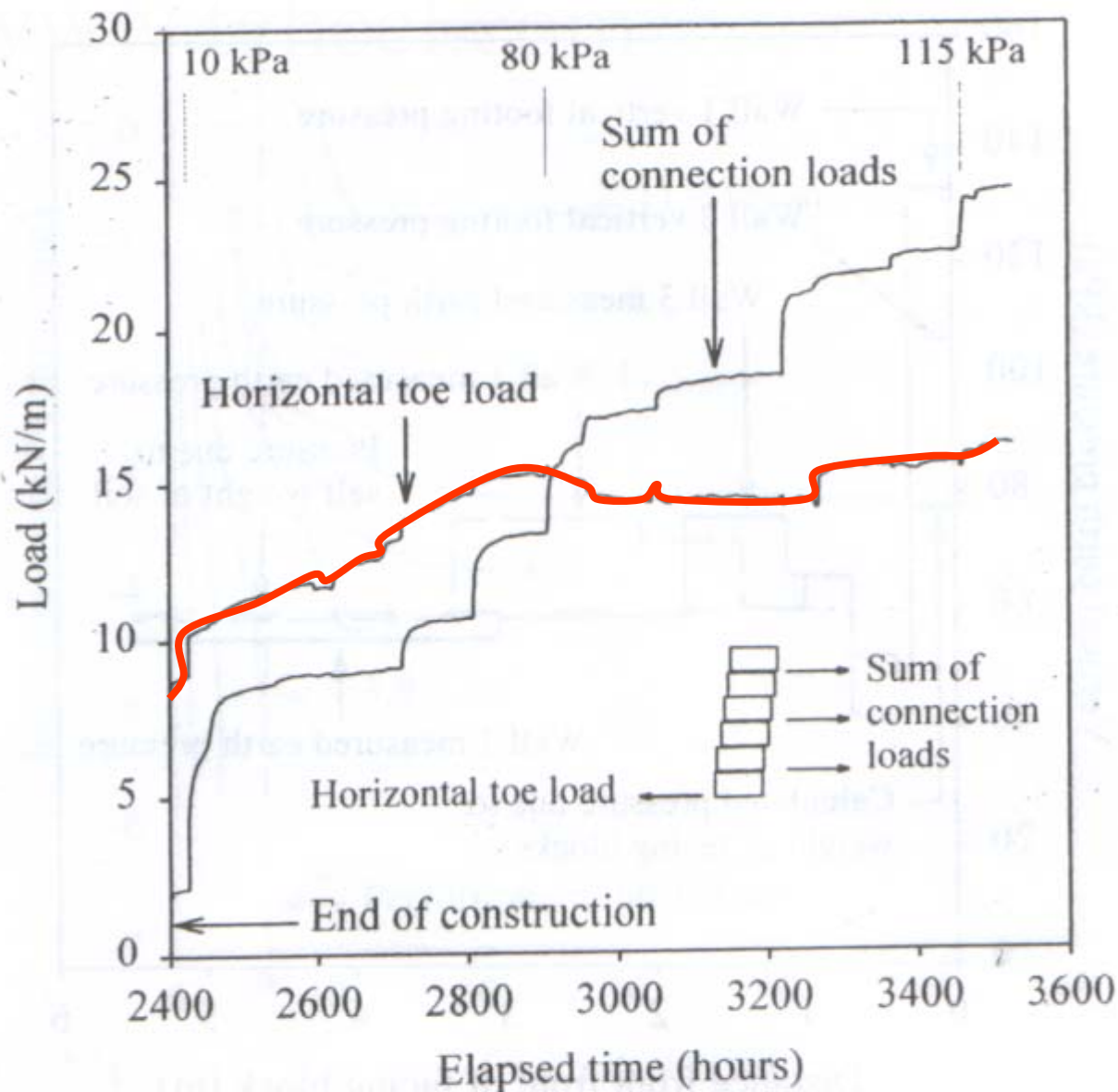


Figure 28. Horizontal toe load at the base of Wall 1 during surcharge compared with the sum of the connection loads.

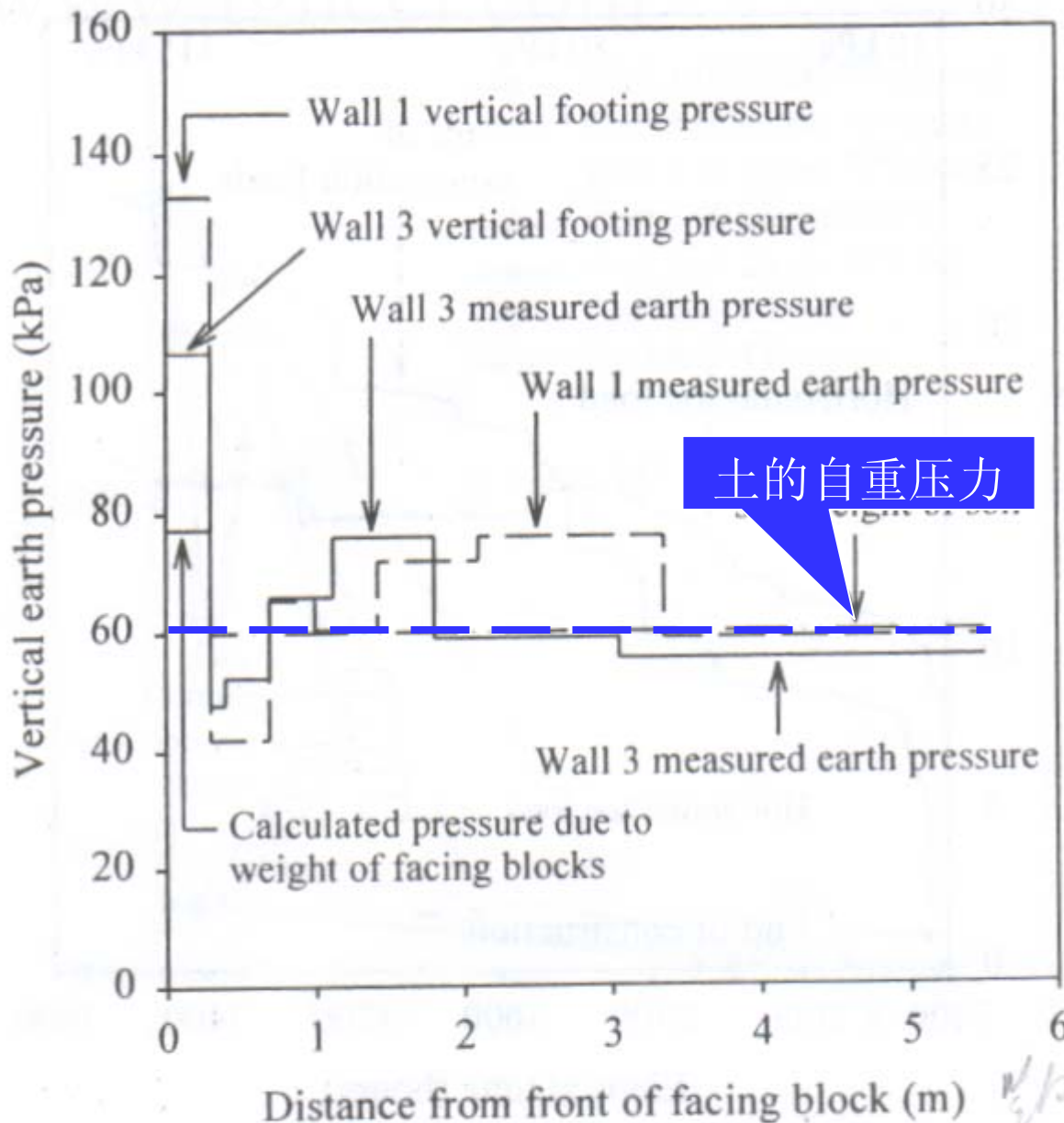
No.1

墙脚处的水平荷载与加筋层墙上的总接触荷载：

在施工结束，墙底约束占墙面上水平土压力的85%



## 2.5 垂直土压力



No.1, No.3

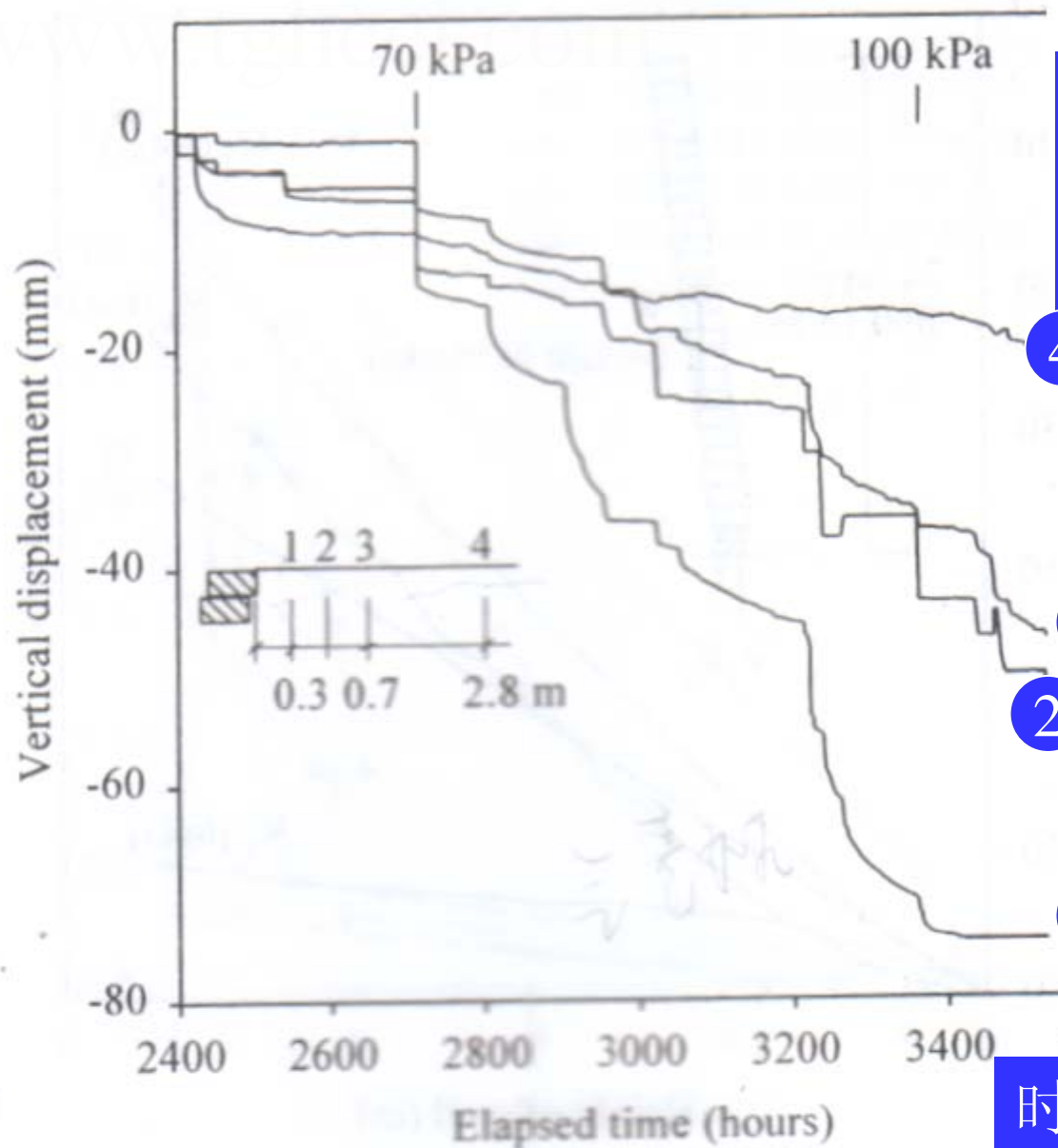
施工结束

在填土基底处垂直土压力:

1. 墙面底部底垂直压力大于自重

2. 紧靠墙面后面垂直压力减少

Figure 29. Vertical earth pressure distribution at the base of the



No.1

超载作用下，填土的表面变形

4

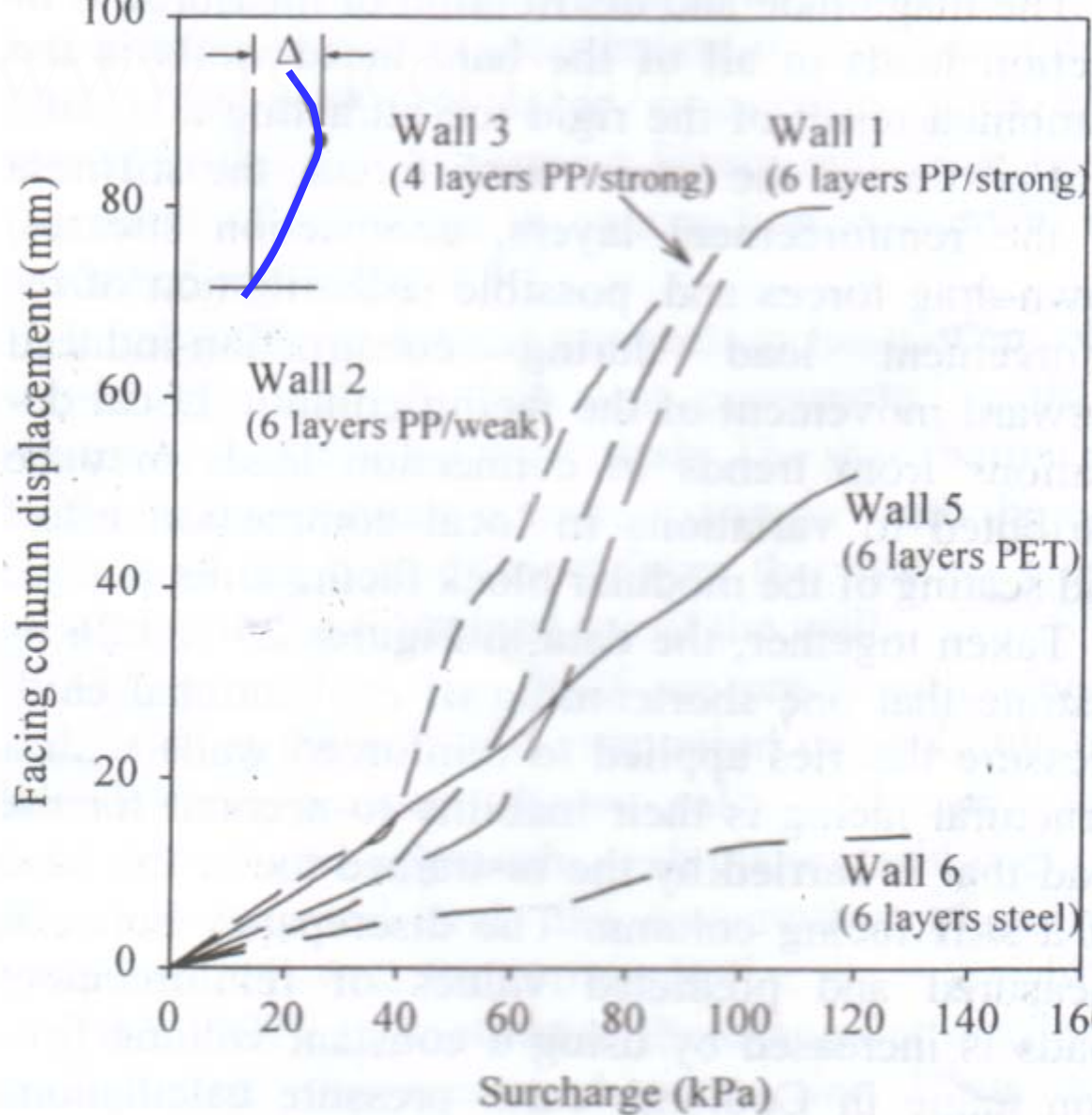
3

2

1

时间

Figure 30. Vertical soil surface deformation for Wall 1 d surcharge loading.



No.1, No.2, No.3, No.5, No.6

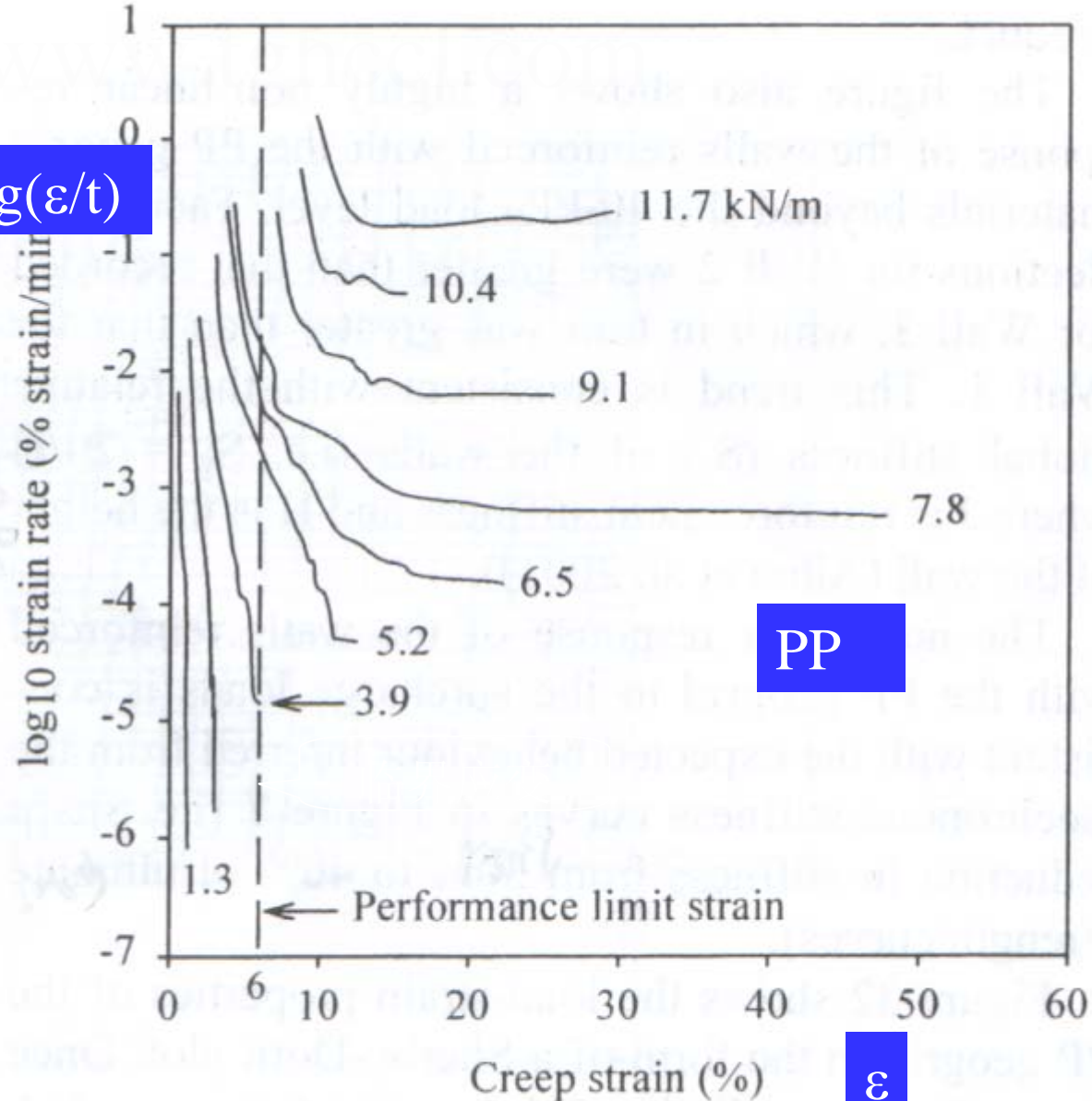
在施工之后超载作用下  
墙面超载—位移关系

Figure 31. Overall performance of segmental walls based on post-construction facing displacement during surcharge loading.

## 2.6 土的沉降

$\lg(\epsilon/t)$

log10 strain rate (% strain/min)



PP

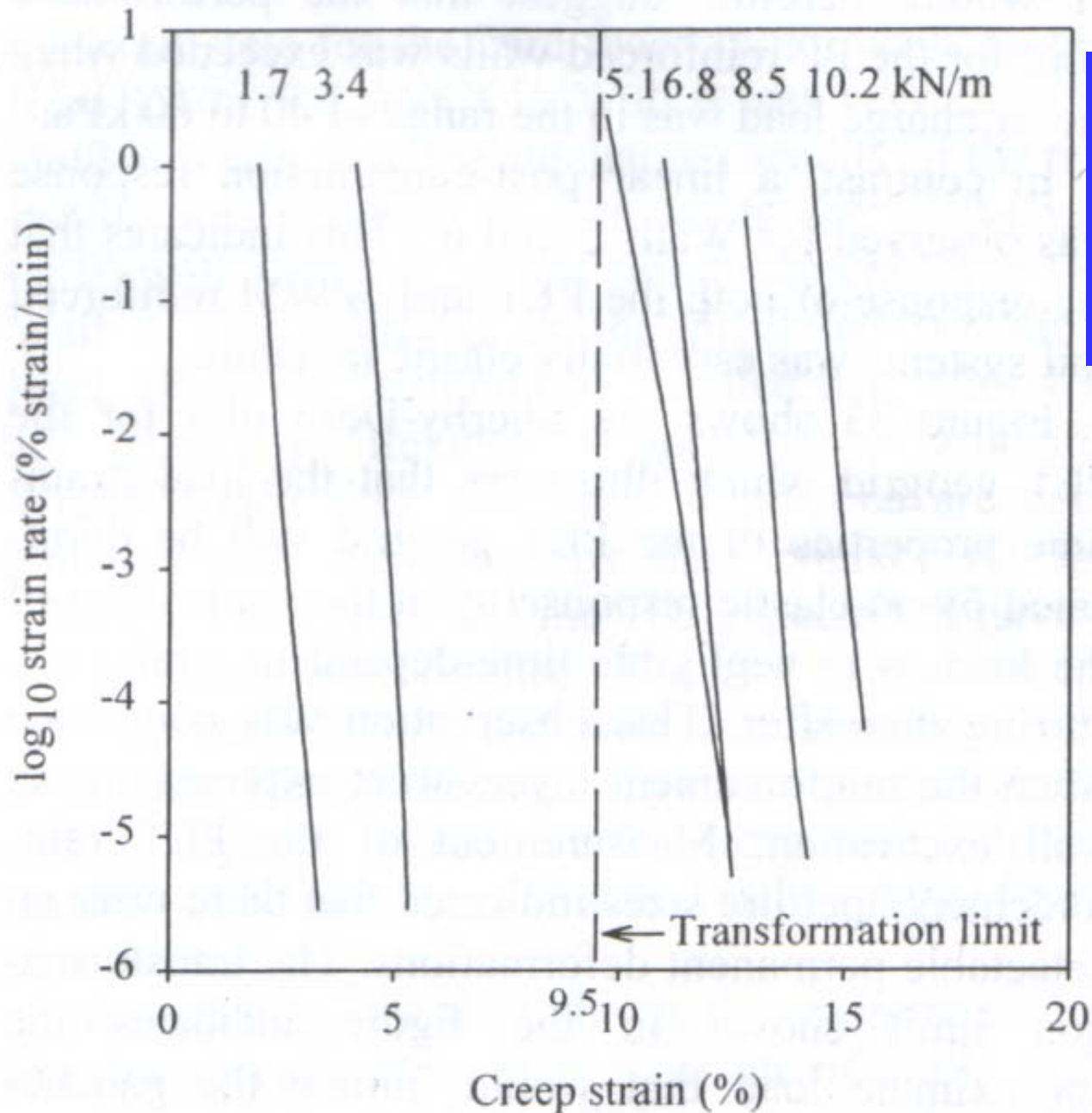
$\epsilon$

PP

蠕变应变—log应变率(%/分钟):随着应变率的减少,蠕变应变增加

Figure 32. Sherby-Dorn plot for the unmodified PP geogrid.

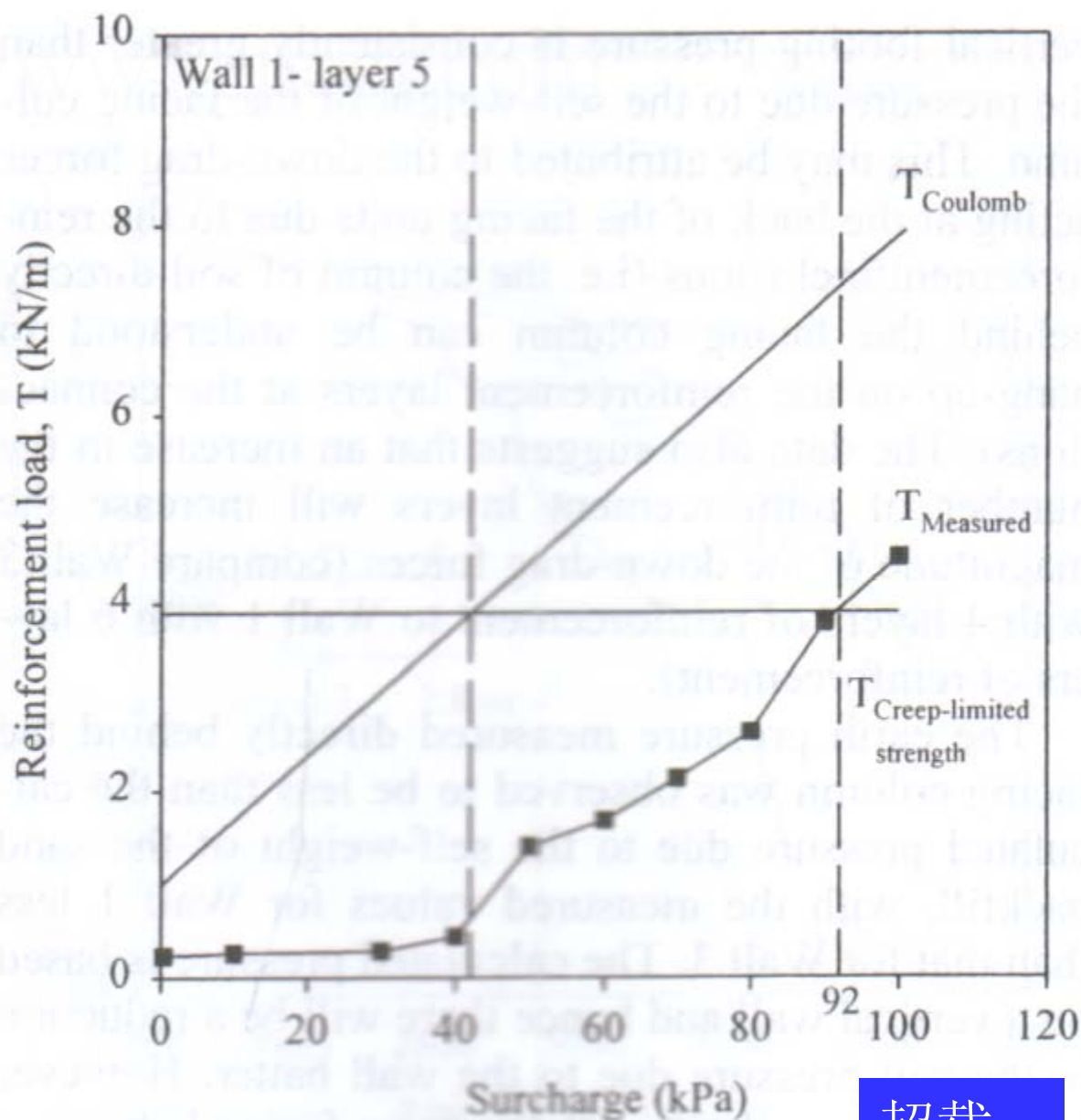




PET（聚酯）

蠕变应变— $\log$ （应变率%/分钟）：变化不大

Figure 33. Sherby-Dorn plot for the PET geogrid.



超载

Figure 34. Comparison of predicted and measured reinforcement load for layer 5 of Wall 1.

No.1

第五层筋

预测与量测的筋材  
平均荷载

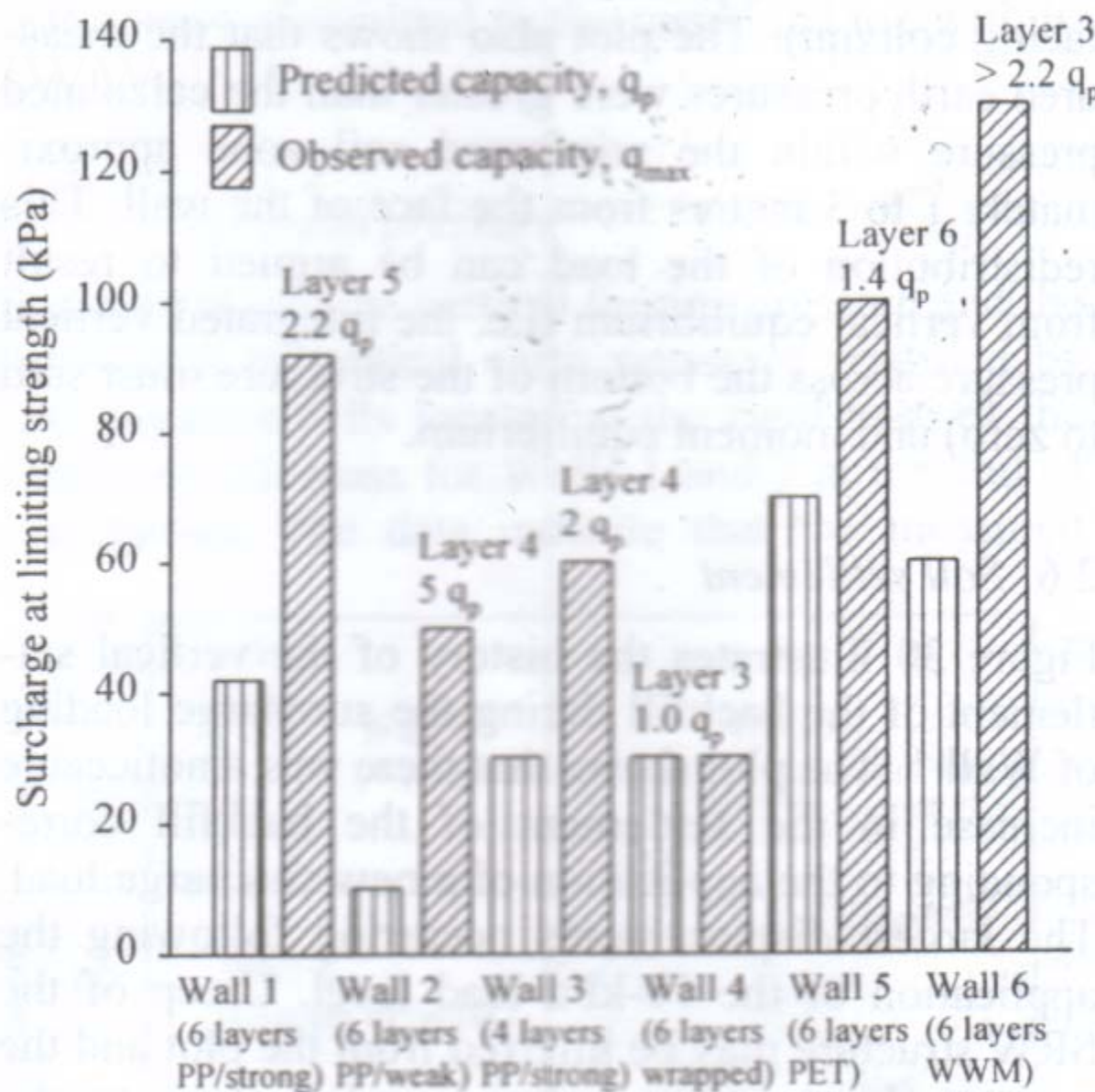


Figure 35. Comparison of predicted and observed surcharge capacity of test walls based on creep-limited strength of the reinforcement.

No.1—No.6

基于蠕变极限强度预测的试验墙的承载力

与观测值比较：  
可见一般观测值明显高于预测值

# 观测结果

- 一般来说，系统变形随着附加荷载的大小而增加，而加筋随时间的变形则在常荷载下增加。
- 从全高度面板墙和分段预制面板墙所观察到的破坏平面，与库伦楔块预计的结果是一致的。
- 对全高度面板墙而言，观察到的最大应变在墙后加筋连接处，并且其附加荷载承载力比分层面板墙更高一些，这是由前者护面的刚性而带来的结果。
- 被限制的墙趾吸收了作用于全高度面板墙背的侧向土压力的相当可观的一部分。



- 在施工和加载的过程中，第一座组合面板墙上观察到了每一次增加荷载时产生的蠕变变形；
- 在施工末期还在连接处观察到了最大的加筋应变。
- 包裹式墙在常载期间观察到了显著的随时间变化的加筋应变。
- 在最高附加荷载下，所有三座组合墙的加筋层的峰值应变分布显示出对数螺旋破坏面，这种破坏面在实践中可以用简单的库伦破坏平面近似。
- 组合面板墙在施工末期护面柱顶端的偏移量为墙高的2%~4%。
- 包裹式墙比其他墙的水平位移更大些，其加筋应变则是可比较的第一座组合面板墙在施工末期纪录的最大加筋应变的4倍。

# 主要结论

- a. 预制组合面板墙的连接荷载最大。
- b. 墙趾承担了回填土作用于墙护面而产生的水平力的相当一部分。这部分承载力（设计时忽略了）引起了现在设计方法的保守性。
- c. 由于土体的向下的拉力，作用于墙趾的竖向荷载比混凝土块的自重大得多。
- d. 聚丙烯土工格栅加筋在常载作用下的应变因蠕变而随时间增大。
- e. 相对刚性墙护面减少了加筋应变，而这种应变将在包裹式墙中得到发展。



# 案例分析的基本结论

- 对于具有粗粒回填土的加筋土墙，观察到的加筋应变通常小于预计值。
- 朗肯和库仑理论能合理地预计粗粒回填土的最大加筋应变的部位，但却高估了其数值。
- 预制组合墙面的连接荷载可能比全高度面板墙的大一些，这是受护面刚性的影响的结果。
- 具有粘性回填土的加筋墙的性状对夯实质量非常敏感，并随由于水分渗透引起的含水量变化而变化。
- 当使用对蠕变敏感的土工合成材料加筋时，施工后加筋将产生蠕变。

### 3. 加筋挡土墙的蠕变

# 案例1：西雅图挡土墙

- 12.6米高的包裹式土工织物加筋墙
- 地基由6米厚的密实粗粒材料、紧接于其下的0~15米厚的软质粉质粘土和粘质粉土，以及下面的非常密实的冰川沉积物组成。
- 四种类型的土工织物按相同的0.38米的垂直间距布置，墙的较高部分刚度较大，较低部分则较小。
- 设计基于传统的锚定分析，最大的加筋应变在施加最终荷载后预计在2.5%到3.5%之间。

- 墙完工9.5个月后，墙的护面在中间高度处发生了最大为150毫米的水平位移，在墙顶部则为90毫米。
- 完工后墙面在墙的底部附近偏移很小，但在顶部附近却增加了约30毫米。同时也观察到了显著的沉降，这很可能是由地基土料的固结引起的。
- 沉降在墙表面最大，而在加筋区域中部附近则最小。这与测量到的墙底的竖向应力的的大小一致。
- 由应变片测得的最大加筋应变为0.5%，而基于机械式应变计的应变范围则从0.7%~1%。观察到的应变显著地小于设计值。附加荷载在较低有加筋层中引起了相对较小的应变增量（例如小于0.05%），在较高的层中则引起了相对大一些的增量（如从0.1%~0.2%）。
- 土中测得的水平应变为1%~2%，附加荷载下墙表面最大的土体应变大于7%。加筋和土体应变的不同表明，土与加筋之间产生了一些滑移。
- 应变测量表明，墙完工后土工合成材料产生了蠕变。

# 主要结论

- ●观察到的加筋应变表明，对于相对较高的土墙，设计方法偏于保守。
- ●测得的现场加筋蠕变率比基于蠕变试验的蠕变率要小。
- ●加筋层位置越高；发挥的拉力越大，建后蠕变应变越大，墙表面建后变形也越大。
- ●加筋蠕变对墙底的竖向应力没有影响。
- ●土工织物层中峰值应变的地方存在一个弯曲面。

## 案例2：一座斜立面板墙（加拿大新不伦瑞克省的弗雷德里克顿）

- 6.1米高、389.5米长的墙
- 它采用了单向高密度聚乙烯土工格栅加筋，和单独的预制分格式混凝土斜立面板。
- 土工格栅加筋间隔为1.22米，机械连接于面板上。附加有未连接于面板的土工格栅加筋，被放置于连接的格栅层之间，以增加内部的稳定性。
- 根据设计时的计算，总共需要8层中等强度（120年设计强度为16千牛/米）和一层低强度（120年设计强度为8千牛/米）的单向高密度聚乙烯土工格栅。



# 测试结果

- 观察到的最大的加筋应变在施工末期小于0.5%，
- 14个月的监控期后达1.4%。在建后14个月内，墙面板由最初的偏向回填土2%的坡度变为近乎垂直。
- 从施工期间的观察来看，侧向墙压力略低于预计的朗肯理论值，并且随深度相对稳定。
- 但是，在监控期间，墙中间高度处的侧向土压力逐渐增至或大于预计值，但是墙底的压力仍然很低

## 案例分析

- ● 加筋应变的增加部分是由土工合成材料的蠕变引起的。
- ● 由于荷载被传至加筋上，作用于墙护面的侧向墙压力在施工期间和完工后接下来的时间里起初很小。但是，完工一段时间后，墙中间高度附近的侧向压力随时间有了相当可观的增加。
- ● 加筋的应力松弛也可能有助于作用在墙上的侧向土压力的随时间增加。

# 两座加筋墙

（意大利的维琴察附近）

- 2座4米高的加筋土墙
- 其中一座是用3层抗拉强度为45千牛/米的高密度聚乙烯土工格栅加强，另一座则用3层抗拉强度为20千牛/米的聚丙烯土工格栅加强。
- 墙完工后，两座墙都用3.5米厚的回填土层作为附加荷载，分三个阶段加载至破坏。

## 监测

- 加筋应变的发展被监测了约2年。结果证实了两种不同的破坏机制：
- 高密度聚乙烯土工格栅加筋墙的拔出破坏，
- 聚丙烯加筋墙有加筋的抗拉破坏。

# 案例分析

- ●加筋应变和附加荷载应力水平与土工格栅的蠕变特性均有关。
- ●在附加荷载下持续时间增加时，加筋应变显得明显起来。
- ●蠕变应变率随总应变水平线性增加。
- ●记录到的聚丙烯土工格栅的最大应变率为1.25%/年（总应变为4%），这比高密度聚乙烯格栅（0.2%/年，总应变为1.5%）要更大一些。
- ●破坏面上加筋应变随时间增加的现象非常明显。
- ●上部的加筋蠕变比下部的大。
-

## 结论意见

- 土工合成材料加筋的粘滞性，将对加筋土墙完工后的工作情况产生显著的影响。
- 土工合成材料加筋的蠕变和应力松弛，可以把荷载从土工材料转移到土墙护面，这将增加墙承受的侧向土压力。随后，将使墙产生随时间的变形。
- 选择具有合适的长期强度的土工合成材料加筋是很重要的。
- 既然蠕变应变随应力水平增加，那么降低工作应力水平将明显地减少筋材的蠕变应变。



## 4. 软土地基上的加筋土墙

# 案例1：日本具有混凝土护面的土工织物加筋土墙

- 8米高的加筋试验墙：它具有混凝土块护面，并被施加了0.5米高的碎石超载；
- 其地基由上至下依次为2.5米的粗粒填土材料、1.6米后的关东垆母（日本关东火山灰质粘土），与1.3米的粘土层、砂层。
- 墙用11层6米长的土工织物加强。基于所用的设计手册所预计的安全系数近似为1。

# 观测

- 施工末期墙中间高度附近的最大水平位移约为65毫米，再加上由于地基移动引起的水平位移约20毫米。
- 建后161天期间，该处水平位移增至约95毫米。
- 护面底部沉降在施工末期为60毫米，并在完工后160天期间增至约78毫米。
- 在每一层的应力分布表明，接近加筋与护面结合处的应变最大。
- 加筋在施工末期最大的应变值约为1%，转换成拉力的话约为9千牛/米。这远比设计强度29.4千牛/米为小
- 在远离护面区域，竖向压力等于或小于填土重量引起的压力；而护面下面的竖向应力，则远大于因混凝土块自重引起的压力。

## 结论意见

- ● 分层预制的混凝土板的刚性面板增加了墙中间高度处的水平位移的最大值。
- ● 建后墙的水平位移随地基沉降而增加表明，墙的水平位移与地基在墙体荷载下的固结期间的位移有关。
- 最大的加筋应变相对较小，并直接发生于墙后加筋被机械连接于混凝土护面块的地方。在这些稳定条件下，基于楔块分析理论预计的最大加筋应变，被连接处的高加筋应变值掩盖了
- ● 相对刚性护面增加了混凝土护面底部竖向应力的最大值。

- 护具有粗粒回填土的加筋挡土墙，基于现在的设计方法，在工作条件下其筋材发挥的应变是较小的。但是，墙的位移相当显著，足以在土体中产生主动土压力。
- 一旦回填土达到主动土压力状态，加筋提供绝大部分抗拉能力以保持结构的稳定性。破坏面或最大加筋应变处，能被一般设计方法中的朗肯或库仑理论合理地描述。
- 通过测得的现场实测的低水平加筋力，可知现在的设计方法常常是保守的，并且破坏时的附加荷载压力一致大于设计方法的预计值。
- 保守来自于几个因素，足尺实验数据表明，墙面的趾部承受了回填土作用于墙护面的水平力的相当显著的一部分。

- 加筋墙的承载力受护面的刚性影响。最大的加筋力的分布也受到护面类型的不同的影响（例如，刚性护面看来能导致紧靠护面单元后的筋材中产生较高的加筋力）。
- 相对刚性墙护面减少了加筋应变，而这个应变在包裹式挡土墙上将得到发展。
- 全高度刚性面板护面墙倾向于提高上层加筋中的**连结处的结合应变**；相对柔性的标准包裹式护面能容纳墙的偏斜，并且其结合应变通常比潜在破坏面上的应变小得多。
- 全高度刚性混凝土护面也可以承受侧向土压力，并能减少转移到加筋的土压力荷载。
- 在其墙趾处传递**连接荷载**看来是护面系统刚性的功能



- 锚定楔块模型对于粗粒回填材料而言，相当好地描述了其工作性状。但是，从具有粘性回填土的墙中观察到的变形的大小和方式来看，与粗粒回填土的墙有着显著的不同。
- 粘性回填土随时间的变形，趋于比粗粒回填土墙大得多。用粘性回填土建造的加筋土墙在施工末期（这是，非饱和回填土中具有负孔压）的安全因数比完工后要大一些。负孔压随着水分渗透将有明显的消散，并且在回填土达到饱和（例如由于暴雨和较差的排水条件而产生）时成为正孔压。
- 粘性回填土的饱和将导致土中抗剪强度的丧失，并随之危及挡土墙。如此而言，高质量的夯实和合适的排水条件，对于限制完工后变形是必要的。这对具有膨胀特性的回填粘性土尤其重要。

- 加筋墙完工后的变形也是土工合成材料粘滞行为的一个结果。现场案例现实，加筋（尤其是沿潜在破坏面的）中发挥的力越大，完工后的蠕变应变越大，变形也越大。
- 加筋的时间依赖特性对墙底竖向应力的影响不大。但是，完工后加筋的蠕变和应力松弛能增加作用于刚性墙表面的侧向压力。
- 聚酯土工格栅加筋对蠕变的敏感程度，比高密度聚乙烯或聚丙烯加筋更小一些；
- 对于建在软沉积土地基上的墙而言，墙与地基土的与剪切和固结相关的位移将非常显著。

# 结论：1.加筋路堤

- 塑料竖向排水板加快了地基土的固结，并增加了路堤的稳定性，这是由于建造过程中伴随着固结，强度显著提高。

- 当路堤建于软地基上时，缓慢的施工和分层施工能明显地增加路堤的稳定性。

- 通过使用加筋和适当的施工速率，路堤能安全地建于泥炭土上。

- 现场观察到的工作条件下的加筋应变通常小于设计值，并且明显低于假定的用不排水剪强度的极限平衡法所预计的值。

# 结论：1.加筋路堤

- 低水平的加筋应变发挥可以归因于下面几点：  
设计时采用的低抗剪强度、施工期间地基土的部分固结，以及工作的应力水平。
- 虽然施工期间的加筋应变可能较低，但是当地基土对施工速率敏感，并且加筋对蠕变敏感时，加筋应变将有显著的增加。
- 当路堤建于对施工速率敏感的地基土上时，就其稳定性而言，最危险的时候可能发生于施工后的一段时间内。

## 结论：2.加筋挡土墙

- 对于具有粗粒回填土的加筋土墙，观察到的加筋应变通常小于预计值。
- 朗肯和库仑理论能合理地预计粗粒回填土的最大加筋应变的部位，但却高估了其数值。
- 预制组合墙面的连接荷载可能比全高度面板墙的大一些，这是受护面刚性的影响的结果。
- 具有粘性回填土的加筋墙的性状对夯实质量非常敏感，并随由于水分渗透引起的含水量变化而变化。
- 当使用对蠕变敏感的土工合成材料加筋时，施工后加筋将产生蠕变。

谢谢