

# 珠江三角洲软土地基水泥—水玻璃 防渗固结灌浆处理初步研究

程鉴基

(中国科学院广州化学研究所 广州 510650)

**提要** 本文在阐述珠江三角洲软土水文工程地质条件的基础上,探讨该区水土对水泥—水玻璃灌浆工作机理的影响,并总结出防渗固结灌浆的一些成功经验。

**关键词** 软土, 防渗, 固结, 机理, 准则

## 1 前言

在最近10年中,软土地基化学灌浆工艺与方法有了惊人的发展,形形色色的新工艺与各种各样的新方法不断涌现,而理论却远远落后于技术,落后于实践。因此,有必要对珠江三角洲软土地基水泥—水玻璃防渗固结灌浆作进一步研究。

## 2 珠江三角洲软土地基特征

### 2.1 软土特征

珠江三角洲三面环山,南面濒海,总面积约8460km<sup>2</sup>,系晚更新世晚期(Q<sub>3</sub>)以来,主要由西江、北江和东江在湾内堆积复合沉积而成,曾经历了三次海侵、海退过程,海相沉积软弱土层分布广泛,其地表有数米至几十米的软覆盖层,有机质含量相当丰富。

珠江三角洲软土天然含水量 $W = 60\% \sim 80\%$ ,天然重度 $\gamma = 15 \sim 17 \text{KN/m}^3$ ,天然孔隙比 $e = 1.64 \sim 2.23$ ,粘粒( $d < 0.005 \text{mm}$ )含量占26%~45%。表层软土天然含水量和孔隙比更高,含水量高达100%以上,孔隙比 $e$ 在2.5左右。在三角洲边缘地区,软土含砂量增加,砂粒在土中含量占50%~60%,其含水量和孔隙比较低,一般属于淤泥质土。珠江三角洲软土颗粒粗的矿物是石英、云母、长石、绢云母集合体及少量绿泥石。软土中大于2mm的颗粒多为贝壳、腐木碎片和铁钙质结核,偶见石英和黄铁矿。

珠江三角洲软土微观结构多为粒状链接结构或絮状链接结构。土的结构基本单元体距离较大,单元体间多为长链连接。软土的粘粒矿物成份以伊里石和高岭石为主,属高岭石—伊里石型。软土的力学特性取决于土的微观特征、前期固结压力和固结程度。具有絮状链接结构的土,其压缩性高、次固结量大,抗剪强度和透水性较低。具有粒状链接结构的土,其次固结量相对较少,抗剪强度和透水性有所提高。软土(特别是淤泥质土)的强度是由内摩擦力控制和贡献的,粘聚力特别低。它的结构灵敏性较高,结构破坏后强度降低。

1994年4月28日收到初稿,1994年11月9日收到修改稿。

珠江三角洲的软土一般都属正常固结,某些地区浅层存在欠固结软土。软土的变形特性与荷载历史有密切的关系,软土的抗剪强度与前期固结压力大小和固结程度有关(表1)。总之,土的成份、结构和构造控制着土的强度和应力—应变关系,决定着土的工程特性。

表1 不同固结程度的软土抗剪强度指标  
Table 1 The shear strength parameters of the ooze with different consolidation degrees

固 结 程 度		粘聚力 $c(c')$ (KPa)	内摩擦角 $\varphi(\varphi')$ (°)
不固结		9.4	0.18
固结度 (%)	30	15.1(9.5)	8.4(28.3)
	60	34.8(31.8)	11.8(30.6)
	100	41.7(40.5)	19.4(33.80)

## 2.2 水质特征

珠江三角洲由北向南微倾,地面坡降约 0.01%~0.32%,平原内地表水系发育,各江河水道相互沟通。地下水位埋深 0.8~1.00m 左右,主要系第四纪孔隙潜水。由于海潮影响,导致地下水迳流条件变差,水力交替缓慢,从而使珠江三角洲地下水具有较为明显的咸淡水和  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$ 、 $\text{Cl}-\text{Na}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Na}$  等 3 个不同的水化学类型区。

珠江三角洲地下迳流条件差,水力交替迟缓,封闭条件好,绝大多数处于缺氧还原环境。此外,珠江三角洲处于北回归线以南地区,气候温热多雨,有利于有机质的分解和铁细菌的繁殖,促使铁质水生成,形成铁质水的广泛分布。西、北江三角洲铁离子一般含量 1~10mg/L;东江三角洲及广州、佛山的铁离子含量 0.3~1mg/L;珠江三角洲中部广泛平原,铁离子含量特高,一般均超过 10mg/L。

珠江三角洲绝大部分地区地下水都含有氨态氮,即氨氮水。 $\text{NH}_4^+$  离子含量普遍超过饮用标准。淡水型地下肥水主要分布于西、北江三角洲,矿化度小于 1g/L。咸水型地下肥水主要分布于珠江三角洲中部和南部,最高矿化度可达 21.7g/L。

## 3 水泥—水玻璃浆材特性

### 3.1 普通硅酸盐水泥的特性

- (1) 细度 15,水泥颗粒能吸收周围的水份,利于土体脱水排气。
- (2) 凝结时间,初凝 >45min,终凝 <12h,龄期 28d。
- (3) 早期强度较高,一般抗压强度 20~40MPa,抗折强度 3~6MPa。
- (4) 抗冻性好。

### 3.2 水玻璃基本性质

水玻璃是氧化钠( $\text{Na}_2\text{O}$ )与无水二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )以各种比率结合而成的,它的分子式是  $\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$  ( $n$  为克分子比)。水玻璃克分子比 ( $M\cdot R$ ) 与重量比的关系:  $M\cdot R = \text{重量比} \left( \frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}} \right) \times 1.032$  ( $\text{SiO}_2$  与  $\text{Na}_2\text{O}$  的分子量的比)。

浆液温度与比重的关系：以  $t$  °C 比重测定值 ( $Be' t$  °C) 求出 20 °C 比重值 ( $Be' 20$  °C)：

$$Be' 20^{\circ}\text{C} \approx Be' t^{\circ}\text{C} + 0.04(t - 20)^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

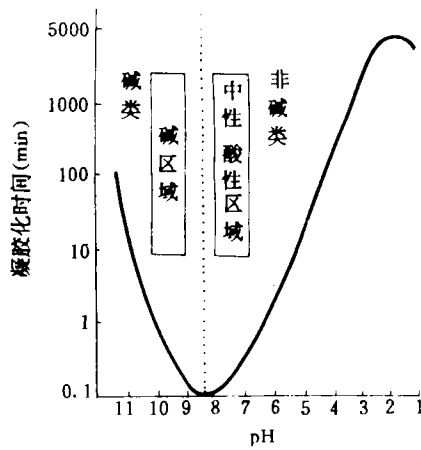


图 1 碱类和非碱类的关系图  
(水玻璃—酸性反应剂时凝胶化与 PH)  
Fig. 1 The relation of  
alkali and monalkali types

在一定浓度的水玻璃溶液 ( $\text{SiO}_2$  含量 4% ~ 10%) 中。加入酸性固化剂，其混合液的 PH 值就降低，产生凝胶能力。随着酸的增加，凝胶时间缩短。再加酸，凝胶时间达到峰值 (图 1)。现在使用的水玻璃类浆液，大部分为在碱性区域凝胶的碱类。非碱性类的浆液几乎都在中性区域 (PH=6~7) 凝胶。所以，非碱类的浆液也称中性浆液。

水玻璃属碱性硅酸盐，呈碱性。即使含有 9%~10% 的  $\text{Na}_2\text{O}$ ，也与苛性钠 ( $\text{NaOH}$ ) 不同，而是与  $\text{SiO}_2$  结合的，游离的碱 (尚未反应的碱) 少，所以使用水玻璃是安全的。

### 3.3 水泥—水玻璃浆材特性

水泥—水玻璃浆材既有粒状水泥浆材的特性，也具有真溶液水玻璃的化学浆材特性，既发挥两种材料的优势，又能节约成本，是一种优化组合的很好形式，并具有如下特性：

- (1) 固化时间快。能在 30~120 秒内，根据需要任意调节，凝胶时间易于控制，有利于控制浆液的扩散半径，防止浆液流失。
- (2) 固化率高，近 100%，几乎不收缩，克服了其它材料固化收缩留空的缺点。
- (3) 可灌性较好，充填率 100%，有多少空隙就能填充多少空隙。
- (4) 固结体具有较高的强度，早期强度也高。并具有良好的耐久性和耐水浸能力。
- (5) 水泥—水玻璃具有表面活性作用，能与土体有较好的结合力，进行化学反应形成复合土，有利于软土的脱水密实固结和硬化。
- (6) 浆液固结过程中产生水合反应放出热量，对砂土有脱水排气作用，又有利于从空隙进浆。
- (7) 材料来源广泛、价格便宜、无毒性、使用方便。

## 4 珠江三角洲软土地基水泥—水玻璃灌浆方法及其作用机理

### 4.1 概述

用人工的方法向地基土颗粒的孔隙、土层的界面或岩层的裂隙里注入具有充填、胶结性的浆液材料，以便硬化后增加其强度或降低渗透性的注浆施工过程称为注浆施工方法，简称注浆法。注浆形态分充填注浆、割裂注浆 (又称脉状注浆或劈裂注浆)、渗透注浆和压密注浆等。应用注浆技术，一方面取决于所选择的注浆材料是否适合于受注地层的水文工

程地质条件(表 2)和工程要求;另一方面决定于注浆工艺的合理与否。一般认为当浆液的凝胶时间大于 8min 时,采用单液系统的注浆工艺;当浆液的凝胶时间为几十秒至几分钟时,采用双液系统的注浆工艺。在一定程度上,化学固结注浆与水泥固结注浆有共同的特性,因此可参照水泥灌浆的方法,结合需固结的岩土情况进行化学灌浆。对含水性差的粘性软土进行注浆时,注浆材料附近的孔隙水压上升,其后若继续加压时,引起局部剪切,破坏了粘性土的特有结构。对含砂的软土,浆液渗透还受透气性的影响,其经验关系为<sup>[1]</sup>

$$\frac{K}{K_c} = \frac{1}{70} \sim \frac{1}{200} \tag{2}$$

式中:  $K$ —渗透系数,  $K_c$ —透气系数。

水泥—水玻璃灌浆机理包括物理(机械)作用机理和化学反应机理。物理作用机理主要是通过水泥水玻璃灌浆改变软土的物理力学性能;化学反应机理主要是水泥水玻璃浆材与水土发生反应形成复合土。这两种现象一般都是同时存在,并依靠惰性充填、化学胶结和离子交换作用达到防参加固的目的,但对不同地区水土各有偏重。

表 2 土质与注浆关系

Table 2 The relationship of soil property and grouting

土 质	注浆目的	N 值	孔 隙 率(%)	
			范 围	标 准 值
垆 埠 土	堵 水 加固地基	0~4	65~75	70
		4~8	50~70	60
		8~15	40~60	50
粘 土	堵 水 加固地基	0~10	46~50	48
		10~30	40~48	44
		30 以上	30~40	35
		0~10	46~50	48
砂	加固地基	10~30	40~48	44
		10~30	40~60	50
砂 砾	堵 水	10~30	40~60	50
		30~50	28~40	34
		50 以上	22~30	26

复合地基的承载力计算:

$$q_{\mu} = \frac{1}{3}(\alpha \cdot c \cdot N_c + \beta \gamma_1 B N_{\gamma} + \gamma_2 D_f N_g) \tag{3}$$

式中:  $q_{\mu}$ —长期允许承载力( $P_s$ ),

$\alpha$ 、 $\beta$ —形状系数,

$c$ —基础荷载面下的地基土的内聚力( $P_s$ ),

$\gamma_1$ —基础荷载面下的地基单位体积重量( $N/m^3$ ),

$\gamma_2$ —基础荷载面上的地基单位体积重量( $N/m^3$ ),

$N_c$ —承载力系数(内聚力项),

$N_{\gamma}$ —承载力系数(内摩擦项),

$N_g$ —承载力系数(埋设深度项),

$\gamma_1$  和  $\gamma_2$ —水面以下水中的地基单位体积重量。

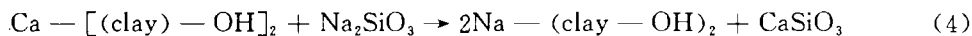
#### 4.2 软土水泥—水玻璃灌浆物理作用机理探讨

软土灌浆的物理工作原理一般分为渗透、挤密、劈裂三大类。可单一作用,但普遍的是浆液以多种运动方式同时作用于土体,而且不只三种,可能还有冲剪、混和、置换与抬动等。在劈裂灌浆中,没有劈裂就没有挤密,它们是相辅相成不可分割的整体。在渗透灌浆中,没有劈裂(当然只是沿灌浆管周围发生),浆液就不能更有效地渗透到土体中。随着灌浆过程,一种运动方式可能取代另一种运动方式。所以,软土水泥—水玻璃灌浆的机理是一个相当复杂的工作过程。

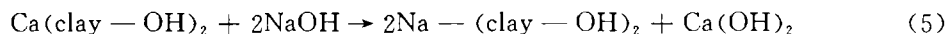
由于软土的强度是由内摩擦力控制,并具有较高的结构灵敏性,使得劈裂灌浆在软土地基中获得理想的效果。压力浆液能在较低的压力下劈裂土体,使裂隙扩展并加剧挤密和扰动等一系列机械作用。在劈裂过程中,被劈裂的裂隙中有水,自由水和毛细水能在灌浆压力推动浆液扩散时排去,但裂隙表面的附着水和结合水一般不易被浆液排去,它将对亲水型的水泥水玻璃浆液起稀释作用。因此,适当提高浆液浓度将附着水吸收,在一定程度上消除水的影响,是提高灌浆效果的有效途径之一。

#### 4.3 水泥—水玻璃灌浆软土化学反应机理分析

软土中的粘土矿物处于与水共存状态时,一部分发生水解而电离,粘土颗粒的表面带负电,与水泥(带正电)进行极弱的电荷置换,其中反应最显著的是膨润土中的蒙脱石类矿物 $[Al_2(Si_4O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O]$ 。在水泥浆液与粘土接触界面处,能利用它的吸水、粘性和粘结力,有效地解决水泥悬浊液因水合反应而硬化后析出水的问题,缩短硬化时间,避免水泥材料的分离,增加水泥浆液粘性和粘结力,防止浆液流失。另外,粘土胶体是一种盐类,把 Ca 饱和的粘土(clay)用 Ca—(clay)—OH 表示时,与水玻璃的反应<sup>[2]</sup>:



水玻璃中游离碱(NaOH)的反应:



粘土矿物对于水玻璃浆液,发生象水玻璃与水泥的反应,并具有吸附离子的性质,但反应缓慢,有的甚至妨碍凝胶反应,变成长凝胶时间。在地基中含腐植土时,就有腐植酸 $[C_{78}H_{52}O_5(CO+OH)_8(OH)_7(CO)_2]$ 等有机物。在这样的土层中注入碱类浆液时,由于碱(NaOH)的影响,腐植酸等有机质被萃取而溶于水中。

#### 4.4 地下水的作用

地下水不但对建筑工程有隆起、管涌、漏砂及冻胀等影响,而且对水泥水玻璃灌浆质量效果也有物理作用和化学反应两方面的影响。当浆液通过注浆管进入地下时,由于受到施工用水和地下水及周围环境的影响,一部分浆液被稀释,其凝胶时间延长。稀释 1.4 倍就完全不凝胶,甚至不固结(图 2)或固结物溶脱。又因一般各种浆液的基本性质和特性,都是采用较纯净的淡水和原生矿物为对象进行实验而得到的。若地下水具有特殊性质时,将和浆液起化学反应,甚至达不到预期注浆效果。

自然界中的地下水大致分为淡水与非淡水;也可分为含氯化钠(NaCl)的海水和含有其它盐类呈酸性或碱性的地下水。非淡水因含有杂质极易与水泥水玻璃浆液中的碱反应。上述两种水的作用分别为:

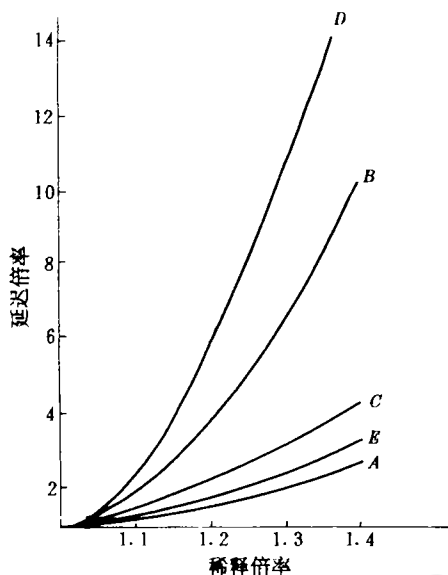


图 2 稀释后的凝胶时间的延长  $T$ — 稀释时的凝胶时间:  $T_0$ — 浆液的凝胶时间

Fig. 2 The prolongation of gelling time after the dilution

(1) 水泥水玻璃混合浆液与含海水的地下水化学反应。海水主要成分是氯化钠(NaCl)以及钙(Ca)和镁(Mg)的氯化物或硫酸盐等。由于水玻璃浓度和硬化剂的种类不同,在含海水的地基中注入碱类浆液时,凝胶时间变快,有细微沉淀析出,并影响浆液的渗透性。若为碱类悬浊型浆液,水泥硬化时间延迟,固结强度下降。

(2) 水泥水玻璃混合浆液与酸性或碱性地下水的化学作用。对于酸性地下水用碱类溶液时,凝胶时间有缩短的趋势,当使用悬浊型浆液时,妨碍水泥的固化,耐久性也降低。对于碱性水,用碱类浆液时,凝胶时间有延长的趋势。

## 5 工程实例—广州标致汽车制造厂仓库软土地基加固工程

### 5.1 工程概况

该仓库位于广州市黄埔区吉山,原系广州汽车制造厂仓库,建于 60 年代中期,木质金字架结构,以 6.0m 长木桩为独立桩基础,每桩台有 4 根桩,组成群桩台。因年久雨淋日晒及多次小地震等自然因素的影响,该仓库南端下沉,墙体略向外倾,已危及安全。受业主委托,又鉴于该场地地质条件比较简单,特选用既有水泥特性,又有水玻璃特点的单一水泥水玻璃注浆加固软土地基,防止上部结构进一步恶化。

### 5.2 场地水文工程地质条件简况

土层主要由不同质矿物颗粒组成。在土颗粒间的空隙中含有水和空气,它们可单独或共存。土的颜色因土层不同而异,洪积层呈鲜明褐色和黄色;冲积层呈灰暗色;有机质土呈褐色或黑色。

该场地的地层结构自上而下分:

- (1) 回填土。杂色, 含碎石砖瓦渣等杂物, 堆积杂乱无章, 松散、潮湿, 层厚 2m。
- (2) 淤泥。灰黑色, 含较多有机质植物碎茎等, 流塑, 厚度 2m 左右。
- (3) 砂砾石。灰黄色, 石英质砂砾, 大小混杂, 分选性差, 松散、饱和, 厚度约 1m。
- (4) 粘土。土黄色, 含 5~10% 石英砂砾, 可塑, 湿, 厚度 5m 以上。

该场地的地下水主要赋存在砂砾石层, 渗透系数  $K = 5.8 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ , 地下水水位埋深 1.5m。受黄埔港海潮的影响, 水质微咸, 铁质 ( $\text{Fe}^{2+} = 0.3 \sim 10 \text{g/L}$ ) 和氨态氮 ( $\text{NH}_4^+ = 0.5 \sim 0.6 \text{mg/L}$ ) 都超标, 矿化度 0.3~1.2g/L, PH=8~8.5。地下水水化学类型属 Cl—Na 型水。

### 5.3 施工措施及效果

鉴于松木桩基 6 个桩台, 最大沉降量 10cm 以上, 特设计每桩台 4 个注浆孔, 四方型布置, 灌浆孔深 8.0m, 注浆段 6.0m (即地表层杂填土不用处理)。先灌外墙孔, 后灌内墙孔; 又先灌奇数孔, 后灌偶数孔。少量多次间歇性分期分批施灌。砂层段还需结合花管先低后高的中低压 ( $< 0.8 \text{MPa}$ ) 上行式灌浆。

该工程选择双液法注浆, 用两台泵分别调节甲液和乙液的流量、压力和浆速等参数。一般用中型活塞式注浆泵。该泵出浆量 40~200L/min; 最大压力 2.45~6.86MPa。按先少量后多量, 先快速后慢速原则施工。在注浆过程中, 时而有黄褐色地下水从排气泄水诱导孔返出, 水泥水玻璃混合浆液凝固时间明显延长, 固结体强度也略降。这是有机质土和铁质碱性地下水影响的结果。为此, 需补充灌浆才能达到预期加固的目的。

经随机抽样检查, 发现注浆孔周围能形成  $d = 0.3 \sim 0.5 \text{m}$  的似球状浆体窝团, 尚见淤泥由黑变灰白的压密现象; 砂砾石层渗透充填固结浆脉; 粘土层中沿层理劈裂充填形成的 2~35mm 浆块, 分布不均匀。但从整体看, 水泥水玻璃混合浆形成以灌浆孔为中心的树根脉状固结体, 并起到骨架支撑作用。一般的固结体强度可达 5MPa 以上。施工完毕, 全部桩都有 5~8cm 的回升, 注浆效果良好 (表 3)。

表 3 各土层灌浆前后力学特性对比  
Table 3 The comparison of mechanical properties of soil before and after grouting

土名	灌浆前			灌浆后		
	含水量 $W$ (%)	渗透系数 $K$ (cm/s)	抗压强度 $R$ (MPa)	含水量 $W$ (%)	渗透系数 $K$ (cm/s)	抗压强度 $R$ (MPa)
淤泥	95	$3.4 \times 10^{-7}$	0.4	38	$2.1 \times 10^{-8}$	1.2
砂砾	—	$5.8 \times 10^{-5}$	—	—	$1.2 \times 10^{-7}$	—
粘土	35	$6.8 \times 10^{-7}$	1.4	25	$4.2 \times 10^{-8}$	1.8

## 6 结语

珠江三角洲由于其形成条件和水文、气候等自然因素的影响, 具有独特的沉积环境。

水分布,对水泥—水玻璃灌浆固结机理影响较大。除稀释的物理作用外,还有化学反应,最明显的是碱性水和微咸水对混合浆液固化时间延迟和强度下降的影响。另外,次生矿物粘土中的蒙脱石、淤泥中的腐植土有机质等都影响灌浆过程的工作机理,甚至延长凝固时间降低结石体强度。

笔者经多年的摸索,在总结前人成功经验的基础上,初步研究出适合珠江三角洲软土灌浆特点的经济合理的科学施工准则:

- (1) 一般地质条件简单场地,可用单一的水泥水玻璃灌浆施工。
- (2) 一般地质条件中等场地,以水泥—水玻璃为主加其它材料进行复合注浆。
- (3) 一般地质条件复杂场地,特别是淤泥厚和砂层多者,水泥—水玻璃灌浆应结合其它基础方法(如钻孔桩或挖孔桩等)优化组合使用。
- (4) 少量多次—少量多次重复注浆,尤其适应于要求高的地基处理工程。
- (5) 先内后外—基坑帷幕注浆时,先灌相对基坑的内排,后灌外排。
- (6) 先外后内—地基加固补强注浆时,先灌相对基础的外排,后灌内排。
- (7) 外密内疏—外排密内排疏,有利于环形包围圈的形成,防止跑浆。
- (8) 先疏后密—先疏孔后逐步加密孔,有利于被灌土体的均匀完整性和强度提高。
- (9) 先快后慢—先快速后慢速注浆,有利于提高空隙充填率。
- (10) 先低后高—先低压力后高压、有利于提高土体的强度。
- (11) 先少后多—先少量后多量,有利于寻找最佳灌浆部位,提高经济效益。

## 7 参考文献

1 广东地质学校编:工程地质学. 广州:广东地质局印刷,1978  
 2 杜嘉鸿等:国外化学注浆教程. 北京:水利电力出版社,1987

# CEMENT-WATER GLASS ON OOZE FOUNDATION IN ZHUJIANG DELTA

Cheng Jianji

(Guangzhou Institute of Chemistry, Academia Sinica, Guangzhou 510650)

### Abstract

The effects of the water and soil in Zhujiang Delta on the grouting mechanism of cement-water glass is discussed, on account of ooze hydrogeological condition there. Some successful experiences of seepage-proof grouting consolidation are summed up.

**Key words** ooze, seepage-proof, consolidation, mechanism, criterion