

(E, v) 与(K, G)的转换关系如下：

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \tag{7.2}$$

当 ν 值接近 0.5 的时候不能盲目的使用公式 3.5，因为计算的 K 值将会非常的高，偏离实际值很多。最好是确定好 K 值(利用压缩试验或者 P 波速度试验估计)，然后再用 K 和 ν 来计算 G 值。

表 7.1 和 7.2 分别给出了岩土体的一些典型弹性特性值。

岩石的弹性（实验室值）（Goodman,1980）					表7.1
	干密度(kg/m ³)	E(GPa)	ν	K(GPa)	G(GPa)
砂岩		19.3	0.38	26.8	7.0
粉质砂岩		26.3	0.22	15.6	10.8
石灰石	2090	28.5	0.29	22.6	11.1
页岩	2210-2570	11.1	0.29	8.8	4.3
大理石	2700	55.8	0.25	37.2	22.3
花岗岩		73.8	0.22	43.9	30.2

土的弹性特性值（实验室值）（Das,1980）				表7.2
	干密度(kg/m ³)	弹性模量 E(MPa)	泊松比 ν	
松散均质砂土	1470	10-26	0.2-0.4	
密质均质砂土	1840	34-69	0.3-0.45	
松散含角砾淤泥质砂土	1630			
密实含角砾淤泥质砂土	1940		0.2-0.4	
硬质粘土	1730	6-14	0.2-0.5	
软质粘土	1170-1490	2-3	0.15-0.25	
黄土	1380			
软质有机土	610-820			
冻土	2150			

各向异性弹性特性——作为各向异性弹性体的特殊情况，横切各向同性弹性模型需要 5 中弹性常量： $E_1, E_3, \nu_{12}, \nu_{13}$ 和 G_{13} ；正交各向异性弹性模型有 9 个弹性模量 $E_1, E_2, E_3, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, G_{12}, G_{13}$ 和 G_{23} 。这些常量的定义见理论篇。

均质的节理或是层状的岩石一般表现出横切各向同性弹性特性。一些学者已经给出了用各向同性弹性特性参数、节理刚度和空间参数来表示的弹性常数的公式。表 3.7 给出了各向异性岩石的一些典型的特性值。

横切各向同性弹性岩石的弹性常数（实验室）					表7.3
	E_x (GPa)	E_y (GPa)	ν_{yx}	ν_{zx}	G_{xy} (GPa)
砂岩	43.0	40.0	0.28	0.17	17.0
砂岩	15.7	9.6	0.28	0.21	5.2

石灰石	39.8	36.0	0.18	0.25	14.5
页岩	66.8	49.5	0.17	0.21	25.3
大理石	68.6	50.2	0.06	0.22	26.6
花岗岩	10.7	5.2	0.20	0.41	1.2

流体弹性特性——用于地下水分析的模型涉及到不可压缩的土粒时用到水的体积模量 K_f ，如果土粒是可压缩的，则要用到比奥模量 M 。纯净水在室温情况下的 K_f 值是 2 Gpa。其取值依赖于分析的目的。分析稳态流动或是求初始孔隙压力的分布状态（见理论篇第三章流体-固体相互作用分析），则尽量要用比较低的 K_f ，不用折减。这是由于对于大的 K_f 流动时间步长很小，并且，力学收敛性也较差。在 $FLAC^{3D}$ 中用到的流动时间步长 Δt_f 与孔隙度 n ，渗透系数 k 以及 K_f 有如下关系：

$$\Delta t_f \propto \frac{n}{K_f k} \quad (7.3)$$

对于可变形流体（多数课本中都是将流体设定为不可压缩的）我们可以通过获得的固结系数 C_v 来决定改变 K_f 的结果。

$$C_v = \frac{k'}{m_v + \frac{n}{K_f}} \quad (7.4)$$

其中

$$m_v = \frac{1}{K + 4G/3}$$

$$k = k' \gamma_f$$

其中， k' —— $FLAC^{3D}$ 使用的渗透系数

k ——渗透系数，单位和速度单位一样（如米/秒）

γ_f ——水的单位重量

考虑到固结时间常量与 C_v 成比例，我么可以将 K_f 的值从其实际值（ $2 \times 10^9 Pa$ ）减少，利用上面得表达式看看其产生的误差。

流动体积模量还会影响无流动但是有空隙压力产生的模型的收敛速率（见 1.7 节流动与力学的相互作用）。如果 K_f 是一个通过比较机械模型得到的值，则由于机械变形将会产生孔隙压力。如果 K_f 远比 k 大，则压缩过程就慢，但是一般有可能 K_f 对其影响很小。例如在土体中，孔隙水中还会包含一些尚未溶解的空气，从而明显的使体积模量减小。

在无流动情况下，饱和体积模量为：

$$K_u = K + \frac{K_f}{n} \quad (7.5)$$

不排水的泊松比为：

$$\nu_u = \frac{3K_u - 2G}{2(3K_u + G)} \quad (7.6)$$

这些值应该和排水常量 k 和 ν 作比较，来估计压缩的效果。重要的是，在 FLAC^{3D} 中，排水特性是用在机械连接的流变计算中的。对于可压缩颗粒，比奥模量对压缩模型的影响比例与流动。

7.3 固有的强度特性

在 FLAC^{3D} 中，描述材料破坏的基本准则是摩尔-库仑准则，这一准则把剪切破坏面看作直线破坏面：

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi} \quad (7.7)$$

其中 $N_\phi = (1 + \sin \phi)/(1 - \sin \phi)$

σ_1 ——最大主应力 (压缩应力为负);

σ_3 ——最小主应力

ϕ ——摩擦角

c ——粘聚力

当 $f_s < 0$ 时进入剪切屈服。这里的两个强度常数 ϕ 和 c 是由实验室的三轴实验获得的。当主应力变为拉力时，摩尔-库仑准则就将失去其物理意义。简单情况下，当表面的在拉应力区域发展到 σ_3 等于单轴抗拉强度的点时， σ^t ，这个次主应力不会达到拉伸强度—例如：

$$f_t = \sigma_3 - \sigma^t \quad (7.8)$$

当 $f_t > 0$ 时进入拉伸屈服。岩石和混凝土的抗拉强度通常有由西实验获得。注意，抗拉强度不能超过 σ_3 ，这是和摩尔-库仑关系的顶点的限制是一致的。最大的值由下式给出

$$\sigma_{\max}^t = \frac{c}{\tan \phi} \quad (7.9)$$

表 7.4 列出了一系列具有代表性的典型的岩石标本的粘聚力、摩擦角和抗拉强度值。土体的具有代表性的典型粘聚力和摩擦角的具有代表性的典型值见表 7.5。土体强度用无侧限抗压强度 q_u 表示， q_u 与粘聚力 C 和摩擦角 ϕ 的关系由下式确定

$$q_u = 2c \tan(45 + \phi/2) \quad (7.10)$$

岩石的强度特性值 (实验室测定)

表7.4

	摩擦角 (度)	粘聚力 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
沙岩	27.8	27.2	1.17
粉质岩	32.1	34.7	--
泥质页岩	14.4	34.8	--

硅岩	42.0	70.6	--
石灰石	42.0	6.72	1.58
山脉花岗岩	51.0	55.1	--
测试场地玄武岩	31.0	66.2	13.1

土体的强度特性值（排水实验测定）表7.5

	粘聚力（kpa）	摩擦角的最大值（度）	摩擦角的残留值（度）
沙砾	--	34	32
无细沙的沙性砂砾	--	35	32
粘性良好的沙性砂砾	1.0	35	32
较细的砂砾和沙的混合体	3.0	28	22
细沙粒	--	32	30
粗沙粒	--	34	30
级配良好的沙粒	--	33	32
低塑性泥沙	2.0	28	25
中-高塑性泥沙	3.0	25	22
低塑性粘土	6.0	24	20
中塑性粘土	8.0	20	10
高塑性粘土	10.0	17	6
有机淤泥或粘土	7.0	20	15

岩石物理力学性质一览表

岩石物理力学性质一览表

性质

岩性 岩石密度(g/cm3) 液限%

塑限%

塑性指数 变形模量（MPa） 孔隙比% 抗拉强度 内聚力 C 摩擦角 备注

碎石（堆积）类土 2.65~2.7

土粒密度 20~40 0.4~0.6 一般假定 0 一般假定 0 36~4

2

黄土类土 干 1.3~1.5 23~33 15~20 8~13 新黄土具有湿陷性 0.8~

1.1 一般假定 0 0.03~0.06（老）

0.01~0.033(新) 15~25 (老)

17.8~28.4(新) 含水率%

10~25

粘性土 1.8~2.05 23~55 16~30 7~25 4~12 (压缩模量) 0.7~1.

0 一般假定 0 0.005~0.06 8~26 含水率%

20~40

岩石密度(g/cm³) 孔隙率 吸水率 软化系数 变形模量 (103MPa)

抗压强度 抗拉强度 内聚力 C 摩擦角

泥岩 0.03~0.37 (粘土岩) 20.7~59 (干粘土岩) 0.01

0.04~0.09 (粘土岩) 23

15~30 (粘土岩)

页岩 2.3~2.62 0.4~10.0 0.5~3.2 0.24~0.74 16~20 10~100 2~

10 3~20 15~30

泥板岩 2.3~2.8 0.1~0.5 0.1~0.3 0.39~0.52 123~199(干板岩)

粉砂岩 10~32 0.07~1.7 29~59

石英砂岩 2.6~2.71 54~58 68~102.5 1.9~3.0 13 (寒武)

54 (震旦) 75~82.5 (似内摩擦角) 摩擦系数 0.54 (寒武) 0.49 (震旦)

砂岩 2.2~2.71 1.6~28.0 0.2~9.0 0.65~0.97 17~41 20~200 4~

25 8~40 35~50

砾岩 2.40~2.66 0.8~10.0 0.3~2.4 0.50~0.96 6.7~16.2 (新鲜岩

体) 10~150 2~15 8~50 35~50

泥灰岩 2.3~2.7 1.0~10.0 0.5~3.0 0.44~0.54 1.3~2.6 (新鲜岩体)

3.5~20

40~60 0.3~1.4

2.8~4.2 0.32 (新鲜岩体) 37 (新鲜岩体)

灰岩 2.3~2.77 16.0~52 0.1~4.45 0.7~0.94 35~39 50~200 5~

20 10~50 35~50

白云岩 2.1~2.7 0.3~25.0 0.1~3.0 6.7~32 80~250 15~25 2

0~50 35~50

片岩	2.69~2.92	0.02~1.85	0.1~0.2	0.53~0.69 (绿泥石片岩)	44~7		
2	10~100	1~10	1~20	26~65			
千枚岩	0.4~3.6	0.5~1.8	0.67~0.96	10 (石英千枚岩)	10~100		
1~10	1~20	26~65					
板岩	2.3~2.75	0.45 左右	0.1~0.3	5.0 (新鲜岩体)	60~200	7~	
15	2~20	45~60					
大理岩	2.6~2.7	0.1~6.0	0.1~1.0	49~67	70~140	2.0~4.0	4.
9 (裂隙较发育岩体)		52 (裂隙较发育岩体)					
石英岩	2.4~2.8	0.1~8.7	0.1~1.5	0.94~0.96	65~70	150~350	1
5~30	10~50	50~60					
花岗岩	2.3~2.8	0.5~4.0	0.1~4.0	0.72~0.97	30~37	100~250	7
~25	14~50	45~60					
闪长岩	2.52~2.96	0.2~5.0	0.3~5.0	0.6~0.8	1.5~8.5 (具裂隙岩		
体)	100~250	10~25	10~50	53~55			
辉长岩	2.55~2.98	0.3~4.0	0.5~4.0		180~300	15~36	10~5
0	50~55						
流纹岩	2.5~3.3			180~300	15~30	10~50	45~60
安山岩	2.3~2.7	1.1~4.5	0.3~4.5	0.81~0.91	8.3~12.0 (具裂隙岩		
体)	100~250	10~20	10~40	45~50			
玄武岩	2.5~3.1	0.5~7.2	0.3~2.8	0.3~0.95	83	180~300	15~3
6	10~50	50~55					

注：未注明为岩体的数据，均为岩石试验数据。

- [1] 唐大雄 刘佑荣 张文殊 王清 工程岩土学 (第二版) 地质出版社 1998 北京
- [2] 重庆建筑工程学院 同济大学 岩体力学 中国建筑工业出版社 1981.10 北京
- [3] 工程地质手册编写委员会 工程地质手册 (第三版) 中国建筑工业出版社 1992.12 北京
- [4] 李先炜 岩体力学性质 煤炭工业出版社