

混凝土宏观力学参数估算研究现状及发展趋势

夏晓舟¹, 章 青¹, 刘光焰², 汤书军¹

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 桂林工学院土木工程系, 广西 桂林 541004)

摘要 综述了混凝土类材料宏观力学参数估算中细观夹杂理论的解析方法和细观数值试验的数值方法的研究现状, 重点介绍了界面连接完好的混凝土类材料有效模量估算的一些分析方法, 并对细观夹杂理论和细观数值试验方法的发展趋势进行了展望, 认为今后的研究热点将是针对混凝土中界面连接不完好和基体材料非线性这两个根本特征下的有效强度估算以及体现混凝土细观特征的宏观本构关系的建立。

关键词 混凝土; 宏观力学参数; 细观夹杂理论; 细观数值试验; 解析估算; 数值估算

中图分类号 :TB124 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2007)04-0438-06

混凝土是由胶凝材料、骨料和其他材料组成的人工复合材料, 其组分构成、内部损伤分布和损伤构造等在细观上存在差异, 在宏观上也具有不同的力学性质, 如有效模量、强度参数(如二参数准则的内聚力和摩擦角)存在差异。混凝土宏观力学参数估算主要指的是有效模量和复合强度估算, 所采用的主要方法是细观夹杂理论的解析方法和细观数值试验的数值方法。解析方法物理意义明确, 很容易了解材料的整体性能, 但对材料的细观破坏很难掌握, 而数值方法则能够模拟材料的细观破坏, 但对材料的整体性能却不易了解。本文首先对混凝土类材料宏观力学参数估算中细观夹杂理论的解析方法和细观数值试验的数值方法的特点和研究现状进行了综述, 然后对细观夹杂理论和细观数值方法今后的发展趋势进行了展望。

1 细观夹杂理论研究现状

细观夹杂理论研究了材料宏观力学性能与微结构参数之间的关联性, 它是复合材料优化设计的理论基础。这种宏观与微观之间的关联性可分为 2 个部分: 一部分是宏观性能与微结构参数之间的无关的普适关系; 另一部分就是宏微观之间的关联性。如何寻找宏微观之间的关联性(即如何通过细观结构来估算复合材料的宏观性能), 途径有 2 种: 一种是利用可以提供上下界限的界限理论来寻找; 另一种是通过可以给出近似估计的近似方法来寻找。为此, 本文详细介绍界限理论和近似方法的研究现状。

1.1 界限理论

复合材料有效弹性模量的估算是细观力学的经典问题之一。如果把复合材料看作各向同性材料, 则有效弹性模量的估算问题可以简化成有效体积模量和剪切模量的估算问题。Voigt 和 Reuss 分别用并联模型和串联模型研究了这一问题^[1], 构造了与最小势能原理相符的均匀应变场以及与最小余能原理相符的均匀应力场。他们分别通过均匀应变场和均匀应力场得到的有效模量给出了平均模量的上限和下限^[2]。然而, 非均质材料应满足的协调位移场或许可静定应力场不只是均匀场一种, 且通过构造均匀应力或应变场来估算有效模量的方法也显得粗糙, 估算范围过大。为此, Hashin 等^[3]通过均匀参考介质引入了极化应变场, 并构造了一个新泛函:

$$HS^0(\boldsymbol{\eta}^*) = \bar{\varphi}(U^0) + \frac{1}{2}[\boldsymbol{\eta}^* \cdot (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{L}_0)(\boldsymbol{E}^0 + \boldsymbol{\varepsilon}^* - \boldsymbol{\eta}^*)] \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{\eta}^*$ ——极化应变场; $\boldsymbol{I}$ ——材料的局部弹性张量; $\boldsymbol{L}_0$ ——均匀参考介质的弹性张量; $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ ——外载作用

收稿日期: 2006-04-03
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50679022, 90510017); 国家自然科学基金委员会和二滩水电开发有限责任公司联合基金重点资助项目(50539090)
作者简介: 夏晓舟(1976—), 男, 江西泰和人, 博士研究生, 主要从事细观损伤破坏力学方面的研究。

下由于材料非均质性所产生的扰动应变场 U^0, E^0 ——均匀参考介质在外载作用下产生的位移场和应变场;
 $\bar{\varphi}(U^0)$ ——均匀参考介质代表单元对应于位移场 U^0 的势能. 这样, 外载作用下复合材料的势能就转化为^[4]

$$\bar{\varphi}(u^*) = HS(\eta^*) + \frac{1}{2}[(\eta^* - \varepsilon^*)(I - L_0)(\eta^* - \varepsilon^*)] \quad (2)$$

那么, 由最小势能原理便可推得复合材料有效模量的上界. 同样, 由最小余能原理亦可推得复合材料有效模量的下界. 简单地说, HS 变分法引入了极化应变场. 因此, 根据最小势能原理和最小余能原理可以构造极化应变场, 由极化应变场可以得到复合材料有效模量的上下界. 从 HS 泛函的定义可以看出, HS 变分原理的条件较传统能量变分原理的条件要强, 在没有其他信息的情况下, 由 HS 变分原理得到的界限是最优的. 若要进一步改善界限, 则需给出更多的微结构信息. HS 上下界分析只含有微结构的 2 阶关联信息, 如果要引入微结构的 3 阶关联信息, 则必须直接从势能或余能角度入手.

1.2 近似估计方法

建立近似估计方法的一般步骤是 (a) 确定复合材料微结构的实验表征和相材料性质 (b) 建立局部化关系 (c) 进行均质化处理. 局部化关系是细观力学近似方法的核心, 建立局部化关系的目的是建立均匀边界条件下复合材料代表单元内部各点的应力和应变与所施加宏观外载的关系

$$\sigma(x) = G(x) : \sigma^\infty \text{ 或 } \varepsilon(x) = H(x) : \varepsilon^\infty \quad (3)$$

式中: $G(x), H(x)$ ——应力局部化张量和应变局部化张量; $\sigma^\infty, \varepsilon^\infty$ ——远场应力和远场应变. 在绝大多数细观力学近似方法中, 该步骤通过一些假设将多个夹杂问题转化为单个夹杂问题. 均质化过程, 就是根据所建立的复合材料代表单元平均应力与平均应变的关系给出复合材料的有效性质.

Eshelby^[5]理论是基于点构形的单夹杂问题而建立起来的夹杂理论. 其他夹杂理论方法都是以此理论为基础建立起来的. 如自洽方法、稀疏方法、Mori-Tanaka 方法和 Kuster-Toksoz 方法, 均通过一些假设将多个夹杂问题转化为单个夹杂问题.

设有一无限大基体(模量为 L_0), 该基体含有一非均质椭球夹杂 Ω , 其模量分布用 $K(x)$ 表示. 边界受 ε^∞ 作用, 夹杂内有相变 $\varepsilon^*(x)$, 则利用平衡方程并引入无限大基体的 Green 函数, 介质中任何一点的应变可以写成

$$\varepsilon(x) = \varepsilon^\infty - \int_{\Omega} K(x, x') [(K(x) - L_0) : \varepsilon(x') - L_0 : \varepsilon^*(x)] dv' \quad (4)$$

当施加的相变为常应变时, 在椭球域内部各点, 应变也是一常数, 即 $S = \int_{\Omega} K(x, x') : L_0 dv'$ 为一常数, S 称为 Eshelby 张量. 显然, S 与椭球夹杂 Ω 的形状、方向以及基体的性质有关, 而与 Ω 的大小无关. 设有一(模量为 l_Ω) 椭球夹杂 Ω 嵌入无限大基体, 且基体边界受均匀应力 σ^∞ 或应变 ε^∞ 作用. 根据 Eshelby 理论, 椭球夹杂 Ω 经过一相变(用一待定的本征应变 ε^* 来表示)就变成了与基体相同的材料. 所以, 通过 $\varepsilon = S : \varepsilon^*$ 和叠加原理可以推得夹杂内部的应变

$$\varepsilon_\Omega = \{I + S [(l_\Omega - L_0) : S + L_0]^{-1} (L_0 - l_\Omega)\} : \varepsilon^\infty = H_\Omega : \varepsilon^\infty \quad (5)$$

式中: I ——单位矩阵; H_Ω ——应变局部化张量. 夹杂内部的应力由 $\sigma_\Omega = l_\Omega : \varepsilon_\Omega$ 确定.

稀疏估计假定夹杂的平均应变 $\bar{\varepsilon}_i (i = 1, 2, \dots, n-1)$ 近似等于孤立夹杂嵌入无限大基体中时的应变, 而不考虑基体中所含其他夹杂的影响, 即 $\bar{\varepsilon}_i = H_i : \varepsilon^\infty = H_i : C_0 : \sigma^\infty$, C_0 为弹性柔度张量. 于是, 在能量等效的框架下, 由式

$$\sigma^\infty : \bar{\mu} : \sigma^\infty = \sigma^\infty : \mu_0 : \sigma^\infty + \sigma^\infty : \sum_{i=1}^{n-1} c_i [I - \mu_0 : L_i] : \bar{\varepsilon}_i \quad (6)$$

便可推得复合材料的有效模量估算式

$$\bar{L} = L_0 + \sum_{i=1}^{n-1} c_i (L_i - L_0) : H_i \quad (7)$$

式中: c_i ——第 i 相夹杂的体积分; L_i ——第 i 相夹杂的模量; H_i ——第 i 相夹杂的应变局部化张量. 稀疏估计一般只适用于夹杂的体积分较小的情形, 其估算值取决于夹杂形状和夹杂与基体材料的弹性失配大小等. 对于微裂纹情况, 由于裂纹间的屏蔽作用, 稀疏估计可应用于裂纹含量较高的情形^[6]. 稀疏估计简单但没有考虑裂纹的相互作用. 为此, 冯西桥等^[7]提出了一种基于稀疏模型的有效介质方法. 该方法的核心思想

是假设每一个微裂纹承受着未受扰动的外加应力 σ^∞ , 而其周围有效介质的模量由稀疏分布方法确定.

Mori-Tanaka 方法^[8]能给出有效性质的显式简单表达式. 该方法在建立局部化关系时, 将每个夹杂放置于无限大基体中, 而夹杂间的相互作用通过改变远场应力 σ^∞ 来实现, 即把远场外部施加的应力 σ^∞ 改为基体的平均应力 $\bar{\sigma}^m$. $\bar{\sigma}^m$ 可以合理地反映存在于介质之间的相互作用. 因为每个夹杂都被周围的基体材料所包围, 通过基体平均应力 $\bar{\sigma}^m$ 而与邻近的夹杂发生作用. 假定夹杂与基体按体积平均的应力等于外部施加的应力 σ^∞ , 则可以推出

$$\bar{\sigma}^m = L : \{I - c(S - I)[S + (L_c - L)^{-1} : L]^{-1} : C : \sigma^\infty \quad (8)$$

式中 c ——夹杂的体积分数; L_c ——夹杂的弹性模量. 于是, 只要把稀疏解法中的 σ^∞ 替换为 $\bar{\sigma}^m$, 即 $\bar{\varepsilon}_i = H_i : \bar{\sigma}^m = H_i : C : \bar{\sigma}^m$, 就可以得出由 Mori-Tanaka 方法导出的有效模量估算式. 该有效模量与由对带有取向的各向异性夹杂复合材料有效性质的预测来说, Mori-Tanaka 方法会使预测模型不对称, 对随机取向的微裂纹或扁平夹杂问题来说, Mori-Tanaka 方法的估计结果在 HS 严格上下界之外.

Kuster-Toksoz 方法^[9]在建立局部化关系时, 将每个夹杂放置于无限大基体中并让每个夹杂都受参考应变 ε^∞ 的作用. 该方法在建立参考应变 ε^∞ 与复合材料应变 ε 的关系时, 是将一复合材料椭球 V 放置于无限大基体中并让该椭球 V 受同样参考应变 ε^∞ 作用的. 利用式(5), 有 $\varepsilon = H_V : \varepsilon^\infty$, 其中 H_V 含有待求的复合材料模量. 取基体为参考介质, 则有

$$(\bar{L} - L_0) : \varepsilon = \sum_{i=1}^{n-1} c_i (L_i - L_0) : \varepsilon_i \quad (9)$$

由于夹杂是复合材料, 利用恒等式 $H_i = (L_0 - l_i)^{-1} : L_0 : A_i$, 当 $i = V$ 时, $L_V = \bar{L}$, 则有 $A_V = \sum_{i=1}^{n-1} c_i A_i$, 其中 $A_i = [(L_i - L_0) : S + L_0]^{-1} (L_0 - l_i)$. 将 H_V 的表达式代入关系式 $\varepsilon = H_V : \varepsilon^\infty$ 中, 再将 ε 表达式代入式(9), 整理后便可得到复合材料有效模量的估算式

$$\bar{L} = L_0 : \{I - [S_V + (\sum_{i=1}^{n-1} c_i A_i)^{-1}]^{-1}\} \quad (10)$$

式中 S_V 为椭球 V 的 Eshelby 张量.

根据自洽方法^[10]的夹杂嵌入一无限大待求的等效介质中的假定, 将稀疏解法中的基体弹性模量替换为待求的等效介质弹性模量:

$$\bar{\varepsilon}_i = H_i : \varepsilon^\infty = H_i : \bar{C} : \bar{\sigma}^\infty = \{I + S_i : \bar{C} (L_i - \bar{L})\}^{-1} : \bar{C} : \bar{\sigma}^\infty \quad (11)$$

式中 $\bar{C}$ 为待求的等效介质的柔度张量. 将式(11)代入能量框架式(6), 便可求出复合材料有效模量的表达式. 值得注意的是, 该表达式为一隐式方程, 需迭代求解. 对孔洞材料或刚性夹杂来说, 基于自洽方法的预测在夹杂体积百分比大于一定值后, 复合材料的刚度就为零或无穷大, 即孔洞或刚性夹杂会形成连接, 并会导致逾渗. 所以, 自洽方法无法描述具有连续相这一基本特征的复合材料的微结构特征. 此外, 自洽方法还忽略了基体与夹杂间的形态差异.

对于界面不完好的 Eshelby 问题, Shoichi 等^[11]用连续迭代法研究了含有滑移夹杂的复合材料的有效模量和滞弹性问题. Gaof^[12]假设界面上的相对法向和切向位移分别与界面上的法向和切向应力成正比并导出了非完好界面的球形夹杂 Eshelby 张量. Qiu^[13]也采用界面上的相对法向和切向位移分别与界面上的法向和切向应力成正比的假定并对 Mori-Tanaka 估算方法进行了修正, 同时研究了非完好界面对复合材料有效模量的影响.

上述基于点构形的方法不太适用于高密集型的夹杂问题. 根据 St. Venant 原理, 距离某个夹杂较远处的复合材料对该夹杂的影响可以通过模量为 $\bar{L}$ (复合材料的有效模量) 的均匀材料来反映. 为了对所有夹杂上的平均应力做出估计, 可将每种类型的夹杂嵌入到某个有限基体材料区域 (称为夹杂的基体氛围), 然后将基体氛围嵌入到无限大待求的有效介质中. 这个由夹杂及其基体氛围合成的胞元叫做基体胞元, 简称胞元. 建立在胞元模型基础上的近似方法, 主要有广义自洽法、有效自洽法、IDD 估计以及更为广义的双夹杂方法. 对于各向同性 (或横观各向同性) 问题, 当所有夹杂及其基体氛围为同心球或同心圆柱时, 广义自洽法^[14]可获得与实验结果最为一致的解析估计. 但对于非同心的球或圆柱, 比如椭球夹杂复合材料或裂纹体, 广义自洽法不能给出解析估计. 为此, Huang 等^[15]采用具有椭球性质的基体氛围、相应的位移模式以及数值方法对所需

要的复合材料和裂纹体的有效性质进行了估计,且估计效率较高、精度较好。Zheng等^[16]提出了一种新的有效自洽方法,该方法可精确估计夹杂平均应变和平均应力,能得到同心球或同轴圆柱以外的简单解析解。但是,该方法与广义自洽方法一样,不能得到复合材料有效模量的显式表达式。为此,Zheng等^[17]又在有效自洽方法的基础上通过泰勒展开获得了复合材料有效模量的直接表达式。这就是相互作用直推法估计(称为IDD估计)方法。有效自洽方法和IDD方法采用夹杂的基体氛围的Eshelby张量来修正基体材料的平均应力,这2种方法都具有与Mori-Tanaka方法完全类同的形式简单性。尽管胞元模型考虑夹杂间的相互作用比基于点构形的方法要精细得多,但如果高密集型夹杂复合材料的夹杂构形不太光滑,如出现尖角或棱边,夹杂间的局部集中效应所产生的相互影响会很大,胞元模型就不太合适。混凝土这种复合材料就会出现此类问题。当然,高密集型的微裂纹也会出现此类问题,如屏蔽和劣化作用。因此,建立一种能反映夹杂间局部效应产生的屏蔽和放大作用的模型,是解决高密集型夹杂问题的关键。Kachanov^[18]在考察裂纹间的相互作用时,通过相互作用张量法建立了裂纹间的相互作用关系。高蕴昕等^[19]则运用相互作用张量法将裂纹间的相互作用关系扩展到任意缺陷或夹杂。

李华祥等^[20]从复合材料细观结构的代表性胞元入手,利用塑性极限理论中的机动分析及有限元方法计算了细观结构的极限荷载域,并通过宏细观尺度对应关系得到了复合材料的宏观屈服准则。Bathelemy等^[21]应用细观夹杂理论研究了完好界面和非摩擦型滑移界面2种情形下宏观摩擦系数和基质摩擦系数与骨料体积分数之间的关系,得出了能反映细观参数的宏观本构模型,但研究过程未涉及内聚力参数的估算问题。事实上,混凝土强度参数的估算是件很困难的事情,因为能够描述混凝土类材料强度准则的最简单的模型至少需要2个参数,如DP准则的内聚力和摩擦角,而影响这2个参数的因素(除基质的材料参数和骨料体积分数外,还有骨料形状、骨料分布形式以及骨料与基质之间的界面接触特性等)相当复杂且各自相关。

2 混凝土细观数值模拟研究现状

应用细观夹杂理论很难描述混凝土的局部损伤和断裂情形。细观数值试验能直观反映混凝土细观损伤和裂缝扩展的情形。通过细观参数的敏感性分析,可以得出各细观参数(如骨料的形状、级配、分布形式和界面强度等)对试件极限承载能力的影响规律。随着计算机科学技术的不断发展以及图形软件和网格剖分工具的逐步升级,混凝土细观骨料的生成和网格剖分技术也在不断提高,目前已可以进行三维数值试验、任意多变形骨料的模拟以及骨料表面密集、骨料内部稀疏的优化剖分。因此,借助于能体现混凝土细观构造特性的细观有限元模型,既能进行损伤破坏的追踪模拟,又可进行宏观力学参数的分析研究。

刘光廷等^[22]应用二维随机骨料模型和非线性有限元技术模拟了单边裂缝受拉试件从损伤到断裂破坏的全过程。彭一江等^[23]应用二维随机骨料模型研究了碾压混凝土的劈拉强度特性,并得出了无层面碾压混凝土劈拉强度比有层面碾压混凝土强的结论。马怀发等^[24]也应用二维随机骨料模型研究了混凝土单轴压缩和三点弯曲2种受载情形从损伤到断裂的破坏全过程,结果表明:单轴压缩时,随机骨料分布对试件宏观强度影响不大,试件宏观强度在试验强度的统计范围之内;三点弯曲时,界面强度和界面损伤演化参数对混凝土抗弯强度的影响很大,而对固化水泥砂浆强度的影响很小。

由于格构模型采用了简单的本构关系和单轴强度破坏准则,并通过一定的概率分布形式来描述材料性能和骨料分布的细观非均匀性,因此,许多学者^[25]都应用该模型模拟非均质材料的破坏过程。据研究,利用格构模型来模拟由拉伸破坏引起的断裂过程是非常有效的,但很难反映卸载问题。唐春安等^[26]用Weibull随机分布描述了各相组分的非均匀性,并建立了细观损伤模型。该模型分别以最大拉应力准则和摩尔库仑准则作为损伤本构关系的损伤阈值,其细观单元满足弹性损伤的本构关系。但是,该模型仅考虑了混凝土各相材料力学特性分布的随机性,而未考虑混凝土粗骨料颗粒分布的随机性。Zhong等^[27]建立的细观模型也以随机粒子模型假设为基础,但Zhong等^[27]认为基体本身存在缺陷,这些裂纹受力后会进一步扩展和贯通。应用该模型时,除需给定骨料的弹性力学参数和几何参数外,还需给定基体的参数,如内聚力、摩擦角、Ⅰ型和Ⅱ型断裂韧度等。这些参数一般根据砂浆基质和混凝土之间黏结面的性质来选取。由于该模型假定混凝土骨料是弹性的并且不会发生破坏,因此该模型不适用于一些软骨料混凝土。

此外,可以直接在本构模型中反映细观损伤特性的统计方法的研究也有所进展。例如,夏蒙莽等^[28]根据统计细观损伤力学基本概念提出了统计细观损伤力学理论,并认为宏观损伤不仅表现为本构方程中的物性

(如内变量理论所假设的),而且还依赖于时、空的场变量,并会受到损伤场演化方程的控制.夏蒙芬等^[28]在推导裂纹数密度演化方程时采用了局部平均场近似,即对“宏观小、细观大”体元中的控制场和细观无序性进行了平均化处理.实际系统中的细观无序性将导致系统行为涨落.一般来讲,只有当损伤局部化的驱动因素超过某个与无序程度有关的阈值时,才会出现真正的损伤局部化.值得一提的是,谢和平^[29]通过引入分形概念的方法将微缺陷的结构特征反映到了宏观上,从而实现了宏细观之间的有机结合,也使得对损伤的定量描述更加合理.

3 发展趋势

细观数值模拟可以直接反映混凝土内部的损伤和破坏特性.通过细观数值模拟,可以建立宏观本构关系.由于数值试验成本低,物理试验将会被数值试验所取代.尤其在高性能混凝土(如纤维混凝土、碾压混凝土和全级配大坝混凝土等)研发方面,数值试验具有很大的优越性.随着高性能计算机和并行程序的进一步发展,三维的和更为细观的数值模拟都将能够顺利进行.因此,可以利用三维随机骨料的细观数值模型来研究各种工况(单轴拉伸、单轴压缩、假三轴试验、三点弯曲和等截面杆扭转)下细观参数对极限承载能力的影响,还可以利用三维细观数值模型来研究细观参数对强化特性、软化特性和剪胀特性等的影响.

由于细观夹杂理论具有明确的物理意义,该理论将在如下一些问题的研究中发挥很大的作用.(a)夹杂刚度对混凝土宏观强度参数(摩擦角和内聚力)的影响;(b)夹杂与界面的各种接触类型对混凝土宏观强度参数的影响;(c)考虑骨料分布的细观夹杂理论估算模型;(d)高密度夹杂时扁平状夹杂如裂纹的细观夹杂估算理论.

如果将细观夹杂理论与细观数值试验相结合(例如,通过细观数值试验模拟出各级荷载作用下的裂纹并把裂纹看成夹杂相(损伤相),利用夹杂理论估算出裂纹出现时的宏观有效模量并和未损时的有效模量进行比较),就能够定义宏观力学性能的损伤,从而建立宏细观损伤本构模型.

参考文献:

- [1] MURA T. Micromechanics of defects in solid[M]. New York: Martinus Nijhoff Publishers, 1982.
- [2] HILL R. The elastic behaviour of a crystalline aggregate[J]. Proc Phys Soc, 1952, A65: 349-354.
- [3] HASHIN Z, SHTRIKMAN S. A variational approach to the elastic behaviour of multiphase materials[J]. J Mech Phys of Solids, 1963, 11: 127-140.
- [4] 胡更开, 郑泉水, 黄筑平. 复合材料有效弹性性质分析方法[J]. 力学进展, 2001, 31(8): 361-393.
- [5] ESHELBY J D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems[J]. Proc Roy Soc Lond, 1957, A241: 376-396.
- [6] KACHANOV M. Effective elastic properties of cracked solids: critical review of some basic concepts[J]. Appl Mech Rev, 1992, 48: 304-335.
- [7] 冯西桥, 余寿文. 计算微裂纹损伤材料有效模量的一种简单方法[J]. 力学学报, 2001, 33(1): 102-108.
- [8] MORI T, TANAKA K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions[J]. Acta Metall, 1973, 21: 571-574.
- [9] KUSTER G T, TOKSOZ M N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media: I theoretical formulation[J]. Geophysics, 1974, 39: 587-606.
- [10] WILLS J R. Bounds and self-consistent estimates for the overall properties of anisotropic composite[J]. J Mech Phys of Solids, 1977, 25: 185-202.
- [11] SHOICHI S, JASIUK L, MORI T, et al. Successive iteration method applied to composites sliding inclusions: effective modulus and an elasticity[J]. Mechanics of Materials, 1990, 9: 229-243.
- [12] GAO Zhan-jun. A circular inclusion with imperfect interface: Eshelby's tensor and related problems[J]. Journal of Applied Mechanics, 1995, 62: 860-866.
- [13] QU Jian-min. The effect of slightly weakened interfaces on the overall elastic properties of composite materials[J]. Mechanics of Materials, 1993, 14: 269-281.
- [14] CHRISTEN R M. A critical evaluation for a class of micro-mechanics models[J]. J Mech Phys Solids, 1990, 38: 379-404.

[15] HUANG Y , HU K X , WEI X et al. A generalized self-consistent mechanics method for composite materials with multiphase inclusions [J]. J Mech Phys of Solids ,1994 ,42 :491-504.

[16] ZHENG Quan-shui , DU Dan-xu. Closed-form interacting solution for overall elastic moduli of composite materials with multi-phase inclusion ,holes and microcracks[J]. Key Engineering Materials ,1998 ,145-149 :479-488.

[17] ZHENG Quan-shui , DU Dan-xu. An explicit and universally applicable estimate for the effective properties of multiphase composites which accounts for inclusion distribution[J]. J Mech Phys of Solids ,2001 ,49(11) :2765-2788.

[18] KACHANOV M. Elastic solids with many cracks :A simple method of analysis[J]. International Journal of Solids and Structures ,1987 ,23 (1) 23-43.

[19] 高蕴昕 , 郑泉水 , 余寿文. 损伤体有效弹性性质的细观分析和不变性描述 :一个考虑微缺陷相互作用的一般理论模式[J]. 力学学报 ,1998 ,30(5) 552-563.

[20] 李华祥 , 刘应华 , 冯西桥 , 等. 确定复合材料宏观屈服准则的细观力学方法[J]. 固体力学学报 ,2002 ,23(2) :133-139.

[21] BATHELEMY J F , DORMIEUX L. A micromechanical approach to the strength criterion of Drucker-Prager materials reinforced by rigid inclusions[J]. Int J Numer Anal Meth Geomech ,2004 ,28 :565-582.

[22] 刘光廷 , 王宗敏. 用随机骨料模型模拟混凝土材料的断裂[J]. 清华大学学报 :自然科学版 ,1996 ,36(1) 84-89.

[23] 彭一江 , 黎保琨 , 刘斌. 碾压混凝土细观结构力学性能的数值模拟[J]. 水利学报 ,2001(6) :19-22.

[24] 马怀发 , 陈厚群 , 黎保琨. 混凝土试件细观结构的数值模拟[J]. 水利学报 ,2004(10) 27-35.

[25] 杨强 , 程勇刚 , 张浩. 基于格构模型的岩石类材料开裂的数值模拟[J]. 工程力学 ,2003 ,20(1) :117-120.

[26] 唐春安 , 朱万成. 混凝土损伤与断裂 :数值试验[M]. 北京 :科学出版社 ,2003.

[27] ZHONG Xiao-xiong , CHANG C S. Micromechanical modeling for behavior of cementitious granular materials[J]. Journal of Engineering Mechanics ,ASCE ,1999 ,125(11) :1280-1285.

[28] 夏蒙梦 , 韩闻生 , 柯孚久 , 等. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变[J]. 力学进展 ,1995 ,25(1) :1-40.

[29] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学[M]. 徐州 :中国矿业大学出版社 ,1990.

Current research on estimation of macroscopic mechanical parameters of concrete and its development trend

XIA Xiao-zhou¹ , ZHANG Qing¹ , LIU Guang-yan² , TANG Shu-jun¹

(1. College of Civil Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. Department of Civil Engineering , Guilin College of Technology , Guilin 541004 , China)

Abstract :A review was made on the current research on estimation of macroscopic mechanical parameters of concrete from two aspects , i. e. the analytic method based on mesoscopic inclusion theory and the meso-numerical experiments , with emphasis placed on some analytic methods for estimation of effective moduli of concrete materials with perfect interface , and the development trend of the research was prospected. Furthermore , the hotspots in further research were put forward , i. e. the estimation of the effective strength of concrete materials with imperfect interface and nonlinear matrix and the establishment of macro-constitutive relationship with the mesoscopic parameters of concrete.

Key words :concrete ; macro-mechanical parameter ; mesoscopic inclusion theory ; meso-numerical experiment ; analytic estimation ; numerical estimation