

(4)

22-28

土体地震永久变形分析述评^①

刘汉龙

Tu435

(河海大学岩土工程研究所 南京 210098)

摘要 在地震作用下,土体将会产生变形,它包括周期变形和不可恢复的残余变形(即永久变形)。这两种变形都可能造成土体裂缝甚至失稳,但永久变形对土工建筑物的安全和使用影响更大,因此,如何预测土体地震后产生的永久变形成为土工抗震分析中一个重要方面。本文综述了目前国内外有关土体地震永久变形分析方法,然后对各种方法的优缺点进行了比较,最后对今后地震永久变形的研究方向提出了初步建议。

关键词 土体 地震 永久变形 滑体分析 整体分析

在地震作用下,对于松砂或中密砂土,导致土体破坏的主要因素是液化;而对于粘土或紧密砂土,导致破坏的主要因素则是震后永久变形,因此永久变形也是土体抗震设计的一个重要内容。本文根据收集到的文献资料,综合叙述了目前国内外有关土体地震永久变形分析的各种方法。主要可分为两大类,第一类是确定性永久变形分析,它包括滑体变形分析和整体变形分析。前者是在1965年由Newmark提出的^[1],它的基本思想在于说明了土石坝在地震瞬态失稳过程中可能只产生有限变形,而不一定会导致破坏或失效;后者主要由Serff和Seed等人在1976年提出的^[2],其主要点是利用室内试验得到的一定初始应力条件下施加一定大小的循环应力在一定周数时产生的永久应变(轴向应变或剪应变)借取不同途径应用于土体变形分析中。第二类是非确定性(即随机性)永久变形分析,它包括滑体位移随机反应分析和整体位移随机反应分析,该类方法是将随机振动理论应用于土体地震反应分析中,计算加速

度、动应力和动应变等变量的概率统计特性,继而求得永久变形的概率统计特性,进一步进行动力可靠性或危险性分析。本文概述了以上两类方法在近年来的发展和改进状况,并对各种方法进行了述评,对今后的研究方向提出了建议。

1 土体地震永久变形分析现状

经过数年的研究,各国学者已建立了不少永久变形计算方法,它包括确定性永久变形分析和随机性永久变形分析两个方面。现简述如下。

1.1 确定性地震永久变形分析

所谓确定性地震永久变形分析,就是对某一条或几条已知的地震波谱进行确定性数值积分,求得加速度、动应力和动位移,进而求得地震永久变形的的方法。它包括滑动体变形分析和整体变形分析两部分。

1.1.1 滑动体变形分析方法

1965年,美国学者Newmark基于极限平衡理论,提出了一个用于评价堆石坝地震

^① 本文为“八五”国家重点科技项目(攻关)子课题“85-208-02-04-02”研究报告的一部分。

永久变形的计算方法^[1],其基本出发点是:当土体内某一点加速度超过材料的屈服加速度时,沿破坏面就会发生滑动,假设永久变形是由于滑动土体沿着最危险的滑动面在地震荷载作用下发生瞬态失稳时滑动的位移所产生的。这种方法需要用到屈服加速度的概念,即土体中预期滑动体开始滑动时作用在该滑动体上的临界加速度 σ_c ,其值可由拟静力法求得。

在 Newmark 法基础上,许多学者做了改进。Frankin 和 Chang 按照 Newmark 刚塑滑块原理,利用数条实测地震加速度纪录和人工加速度时程曲线,进行了土石坝坝坡地震滑动永久位移计算,补充了 Newmark 1965 年报告中的数据,绘出了不同情况下标准化最大滑动永久位移和最大抗滑地震系数以及最大地震加速度系数之比之间的关系上包线^[3]。随后,Markdisi 和 Seed 考虑坝体为非刚性体,运用剪切梁或有限单元法求得坝体的动力反应加速度,并通过一定数量的算例给出了可供估计高 30~60m 土石坝地震永久变形的图表^[4]。

日本学者渡边启行等用等效谐波地面的运动估计了堆石坝的地震永久位移,后来又根据堆石坝施工、设计和科研工作经验,提出了堆石坝地震永久位移与地震加速度及等效周数的经验关系^[5]。后来,美国学者 William 在总结前人方法的基础上,提出了一个独立的计算方法。其基本点是通过逐步积分法进行动力反应谱分析,假设破坏发生在界限明确的滑动面上,破坏应力范围以内材料表现为弹性,超过屈服加速度则发展为完全塑性。屈服加速度由拟静力法求得,该方法特别强调地震过程中筑坝材料抗剪强度降低对永久变形的重大影响。最后,William 运用其建议的方法预测了委内瑞拉 Guri 主坝和 La Honda 坝地震永久变形,预测结果与 Newmark, Markdisi 和 Seed 法的预测大体相近^[6]。

我国学者陈生水、沈珠江通过对面板堆石坝地震永久变形分析发现,当地震烈度较低时,永久变形的计算结果与实测大体相同,而地震烈度较高时,计算结果则明显偏小,因此,作者基于 Newmark 滑块原理,提出了一个可用于强震区域面板堆石坝及心墙堆石坝永久变形的计算方法^[7]。

1.1.2 整体变形分析方法

整体变形分析的基本假定是将土体的变形作为连续介质处理,土的动本构关系采用通常的粘弹性模型,采用有限单元法并结合试验研究进行计算。从永久变形产生机理来看,这类方法包括以下两种:一是软化模量法,该法认为永久变形是由于地震应力作用下静剪切模量降低而引起的,地震永久变形等于按降低的剪切模量所得的静变形与地震前的静变形之差;二是等效结点力法,该法认为地震力对变形的影响可用一组作用于单元结点上的静结点力(即等效结点力)代替,地震永久变形就等于在等效结点力作用下产生的附加变形。具体方法分述如下:

1.1.2.1 Serff, Seed 等提出的四种方法^[12]。

a. 初步近似估算法。该法是 Seed 在 1973 年提出的,由通过坝断面中心铅垂线各单元剪应变表示的应变势平均值乘以坝高,作为铅直断面顶端水平永久变形的近似值。

b. 线性修正模量法。地震前土体的变形采用线性一次加载有限元法分析求出,此时选用的扬氏模量 E 可由静力三轴试验确定,也可由相似土类的经验数据确定。地震前的初始应力 σ_i 和初始应变 ϵ_i 关系如下:

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\epsilon_i} \quad (1)$$

地震后假定应力 σ_i 不变,扬氏模量降低,降低后的模量为 E_f

$$E_f = \frac{\sigma_i}{\epsilon_i + \epsilon_p} \quad (2)$$

式中, ϵ_p 为相应于初始应力 σ_i 和地震动应力

σ_{dp} 的应变势,其值由循环三轴试验求得。

由于坝体中大部分为饱和土体,故地震时可假设土的体变模量不变,则剪切模量就会降低。震后的总变形仍用线性一次加载有限单元法求得。两次静力计算的位移之差即为待求出的地震永久变形。

c. 非线性修正模量法。该法是在上面线性方法的基础上,进一步考虑土体材料的非线性本构关系,并假定地震前后的应力应变关系均为双曲线形式,地震后双曲线初始模量 $(E_i)_{0n}$ 与震前双曲线模量 $(E_i)_{0f}$ 关系如下:

$$(E_i)_{0n} = (E_i)_{0f} \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i + \epsilon_p} \quad (3)$$

该法的计算步骤与线性法相同,只是计算前后的变形分析采用非线性分析加载有限元法进行,有关震后土料的计算参数与震前相同。

d. 等效结点力法。在地震作用下,如果坝体没有破坏,则震动的结果是引起坝体各单元一定程度的应变,这种应变可用单元应变势表示,应变势由动力反应分析和振动三轴试验确定,由于未考虑相邻单元的影响,这种应变势并非各单元的实际应变,为了求得与应变势引起的应变相同的实际应变,可设法在各单元结点上施加一种等效结点力,作为静荷载,按静力法计算坝体的实际变形,即为永久变形。等效结点力计算方法见图 1 和图 2。

根据地震前各有限单元的主应力差 σ_d ,

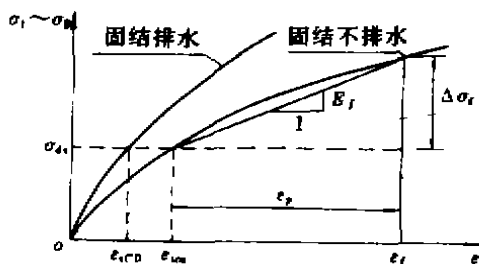


图 1

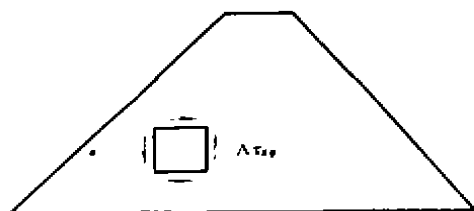
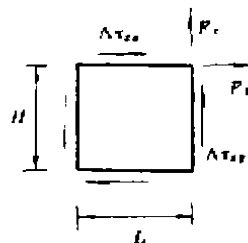


图 2

和地震产生的应变势 ϵ_p , 按图 1 中所示确定各单元中相应于 ϵ_p 的等效主应力差增量 $\Delta\sigma_d$ 。图中地震前的应力应变关系是由排水静力三轴试验确定的,地震时的应力应变关系则用固结不排水静三轴试验确定。由于土体在地震作用下以水平剪切变形为主,因而可以假设 $\Delta\tau_{xy} = \Delta\tau_{max} = \frac{1}{2}\Delta\sigma_d$, 并假定各单元中 $\Delta\tau_{xy}$ 是均匀分布的,从而可按图 2 所示计算各单元水平及竖向等效结点力。

$$F_h = \Delta\tau_{max} \frac{L}{2} \quad (4)$$

$$F_v = \Delta\tau_{max} \frac{H}{2} \quad (5)$$

式中 L, H 分别为各单元的水平及竖向边长,等效静结点力方向与土体初始剪应力方向一致。

将所得的等效结点力施加于坝体各单元结点上,按固结不排水剪切试验确定的应力应变关系曲线,用非线性分析加载有限元法计算所得的变形即为地震永久变形。

1.1.2.2 Taniguchi, Whitman 等提出的方法^[8]。他们针对非液化性土的土坝提出了地震永久变形计算方法,步骤如下:

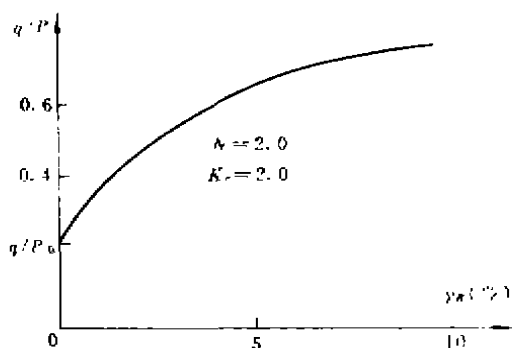


图 3

a. 对坝体进行动力反应分析,求得各有限单元结点的加速度时程曲线,进而计算出各结点上的等效均匀水平加速度 a_{eq} ,则可以计算出相应的等效惯性水平结点力 $F_x = ma_{eq}$, m 为集中质量,并假设此等效水平结点力在同一水平面上是均匀分布的。

b. 根据室内动力试验绘制土的动应力与残余应变 γ_R 的关系曲线如图 3 所示,该曲线可用下式来模拟:

$$\frac{q}{p_u} = \frac{\gamma_R}{a + b\gamma_R} + \frac{q_0}{p_0}$$

式中 a, b 是根据试验确定的常数; $q = q_0 + q_d$; $q_0 = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$; $q_d = \tau_d = \sigma_d/2$; σ_1, σ_3 为初始主应力; σ_d 为轴向动应力幅值; $\gamma_R = 1.5\epsilon_R$; ϵ_R 为轴向残余应变; $p_u = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 。

c. 将等效惯性结点力作用于单元结点上,利用试验求出的动应力与残余应变关系曲线,按静力有限元法求出土体的地震变形。计算时,考虑等效惯性结点力分别指向坝体上游和下游,计算两种相应的变形,然后叠加作为最终地震永久变形。

1.1.2.3 张克绪等根据往返荷载三轴试验结果,给出了永久偏应变的经验公式,在确定地震作用下坝体内土单元的永久偏应变时,考虑了试验土样与坝体内土单元的应力状态不同的影响,在此基础上建立了等效结点力法,并分析了若干土坝的地震永久变形^[9]。

1.1.2.4 钱家欢等在 Serff 的等效结点力法和 Taniguchi 等效惯性力法的基础上,结合两种方法的优点并综合和改进,提出了一种地震永久变形计算方法^[10,11],通过对土石坝和软土地基等实际工程分析,其结果符合一般规律。

1.1.2.5 沈珠江等提出的有效应力分析法^[12,13]。作者在进行有效应力地震反应分析时,提出一组计算动力作用下残余体积应变增量和残余剪切应变增量的公式,将动力计算过程分为地震阶段和震后阶段,每个阶段再划分若干时段,在地震阶段中每个时段同时进行动力反应分析及静力计算,震后阶段只进行静力计算。运用该法,作者对陡河水库坝等进行了地震残余变形的计算。

1.2 随机性地震永久变形分析

以上所介绍的方法,主要集中在某一确定性地震波作用下,土体确定性永久变形计算上。然而现有的研究表明,土体的地震反应及永久变形与输入地震波型有密切关系。实践计算表明,即使是控制参数(如最大加速度、主振频率及强震持续时间等)完全等效,但波形不同的数条地震波引起同一坝体的永久位移也有数倍之差^[3,4]。而在实际工程中,对某一建筑场地要想准确地估算出今后若干年可能遇到的具体地震波形是不太可能的,因此合理的途径应当是考虑地震动过程的随机性,经过场地地震危险性分析,确定坝基输入随机震动,然后从随机振动可靠性角度进行永久变形概率分析。

1.2.1 滑体变形随机性分析

1984 年, Lin 首次在第八届世界地震工程会议上介绍了他所进行的土石坝地震永久变形概率分析^[14]。作者将地震输入模拟为平稳随机过程,土石坝采用三角形剪切梁模型,在等价线性系统随机反应分析的基础上,引入 Newmark 等滑块模型,计算了土石坝坝坡沿某一最危险滑动面发生超过某一数值滑

动位移的概率。

1986年, Lin 和 Whitman, 进一步对他们的方法用于理想滑块永久变形计算的各个细节作了具体介绍^[15], 并对前文中的一些公式进行了补充说明和验证。

1991年, 我国学者吴再光等人参照 Lin 的研究, 对土石坝地震永久变形进行了更深入的分析^[16]。作者除了最危险滑动面、临界地震加速度确定以及等价线性化随机反应计算之外, 还通过人造波数值模拟计算, 对永久变形的概率模型进行了统计检验, 通过大量的综合分析计算, 给出了滑块响应谱参数与永久变形参数之间的统计关系, 对土石坝的圆弧滑动面以及堆石坝的平面滑动永久变形分别进行了计算^[17]。其主要计算步骤为:

- a. 确定土石坝内可能滑动体位置和临界地震加速度 A_c ;
- b. 确定可能滑动体上平均地震加速度功率谱;
- c. 产生配合平稳谱的数条人工地震波;
- d. 计算每条人工地震波引起的永久变形;
- e. 统计永久变形的概率分布及其分布参数。

此外, 1991年, Yegian 等人对 Lin 的方法做了进一步研究, 得出了一些有益的结论^[18]。

1.2.2 整体变形随机性分析

站在整体变形的角度上进行地震永久变形随机性研究, 目前国内外还很少有人涉及。从收集的文献来看, 仅有我国学者吴再光等人做了初步工作, 作者将液化分析的累积损伤模型引入土体随机地震作用下软化模量分析中^[19], 首次对某典型高桩码头岸坡进行平均软化变形的计算, 同时对该岸坡在振动台上模拟进行了动力模型试验, 计算结果与模型试验结果在变形趋势上相符。后来作者又对该方法进行了改进, 进行了粉土海堤的随

机地震平均永久变形分析^[20]。

2 各种分析方法的比较

以上所介绍的永久变形计算方法, 由于产生的机理不同, 各种方法的适用条件和优缺点也不相同。

Newmark 提出刚性滑动面假设和屈服加速度概念, 奠定了滑动体位移计算方法的基础, 这种方法应用于粘性土和紧砂能得到比较合理的结果, 这方面可供参考的计算实例较多, 并有不少简化方法、经验公式图表等, 因此该方法有较强的适用性。但由于方法中假设屈服加速度不随动荷载的作用而降低, 所以对于强度在震动过程中要大幅度降低的情况能否适宜, 尚待进一步研究。由于地震中材料抗剪强度的降低将会导致地震永久变形发生重大变化, 因而该法在排水条件不良的由饱和无粘性土填筑而成的坝体永久变形分析中难以发挥作用。

整体变形计算方法的基本假设是将土体作为连续介质, 因此, 对于地震后坝体出现裂缝和滑动的情况, 不宜采用。另外, 这类方法还有一个共同点, 都是在对坝体作了静力和动力有限元分析, 已知坝体的静应力和动应力状态以及地震参数后进行的, 所以坝体的静力和动力分析方法和结果的精度将直接影响永久变形的计算结果, 这也是一个值得深入研究的课题。

在 Serff 和 Seed 等人提出的四个计算方法中, 都使用了应变势的概念。初步近似估算法采用剪应变势 γ_s 来估算坝体的水平永久位移, 近似程度较大; 修正模量法包括线性和非线性两种方法, 采用软化模量概念, 即认为永久变形是由于在地震作用下静剪切模量降低产生的, 采用轴向应变势 ϵ_s 来修正模量, 得到了修正后的应力应变关系, 以此来协调由应变势 ϵ_s 产生的位移。这种方法中未直接考虑地震惯性力的作用, 但在应变势 ϵ_s 中作

了间接的反映。等效结点力法的出发点是认为地震引起的永久变形等于某种等效结点力作用下所产生的附加变形。这里,等效结点力是通过应变势和静力三轴固结不排水剪切试验所得的应力应变关系来求相应于应变势 ϵ_p 的动主应力差 $\Delta\sigma_d$,再用一种近似的方法求相应的等效结点力,然后按静力三轴固结不排水的应力应变关系来求等效结点力作用下的附加变形,作为地震永久变形。但是,应变势本身是根据试验规律和计算所得的静应力与动应力状态而求得的,计算中又根据静力三轴固结不排水剪的应力应变关系来反推主动应力差 $\Delta\sigma_d$ 就显得重复、不太合理了。此外,用固结不排水的静三轴试验得到的应力应变关系来代替地震时的应力应变关系,也有值得进一步考虑的地方。但是,该法中等效结点力的概念是很有价值的,它不仅考虑了地震惯性力的作用,而且将一种不规则的随机荷载转化为等效静荷载,给计算带来了很大方便。

在这四种方法中,由于使用了应变势的概念,所以如何求应变势成为问题的关键。目前对应变势发展规律的研究成果见得还不多。Serff 等人在文献[2]中建议了一套试验研究方法,由这些试验曲线和静动力有限元分析的结果求出应变势,然后将各单元应变势作为原始数据输入计算永久变形程序。这里,由于没有相应的计算应变势的公式,静力、动力和永久变形三部分计算不能一次进行,给计算带来不便。因此,如何确定动三轴试验中,动应力(初始应力、循环应力和循环周数)与永久应变之间的关系,并用公式表达出来,成为这类方法中十分重要的课题。

Taniguchi 和 Whitman 等人提出的方法^[8],主要针对非液化性土。方法中直接将结点加速度历时曲线转化为等效结点力,然后根据由试验确定的动应力与残余应变关系曲线进行迭代计算,求得永久变形。该法概念上

比较直观明了,但是在由结点加速度推求等效结点力时,加速度的方向不好考虑,作者仍在计算中将等效结点力分别指向上游和下游两种情况进行计算,然后将两次变形迭加作为总的永久变形。但事实上,地震加速度方向是随时变化的,不可能同时指向上游或下游。而地震永久应变是沿起始剪应力方向积累的,所以等效结点力的方向应与初始剪应力方向有关,由于结点力的方向与剪应力方向不存在简单关系,故结点力方向难以考虑妥当。该法的特点是采用了由试验得到的动应力与残余应变关系曲线,从概念上比较合理。

总的来说,对永久变形随机性研究还不太多。在滑体随机变形分析中,最典型的是吴再兴等人较全面地建立了一种概率分析方法,但该方法仍同确定性滑体分析一样,存在强度变化的不足。在整体随机变形分析中,目前仅从统计平均角度进行研究,虽然考虑了随机而不可预见的地震波影响,但随机地震反应分析的目的是进行土体动力可靠度分析,仅从平均角度进行分析还不够。因此,考虑地震荷载的随机性和土料的非线性,进行永久变形可靠度分析,目前才刚刚开始,如何较详细地计算土体随机地震反应而建立永久变形概率分析模型,这是有待解决的问题。

3 今后的研究方向

土体地震永久变形分析是一个比较复杂的问题,尽管目前的研究已取得一定进展,但仍有许多值得研究的课题。通过上述评,建议今后开展以下几个方面的研究。

3.1 对一些比较符合实际和有较大实用价值的方法,针对不同的优缺点,进一步完善和补充,同时针对不同的影响因素(如加速度、坝型、坝高和坝坡等)进行系统研究,以找出地震永久变形与上述诸因素的关系。

3.2 进一步研究循环三轴试验中应力与永久应变的相互关系,探求其合理而应用方便

的函数表达式,以保证计算的准确性。

3.3 大力开展地震永久变形随机性研究,从而进行土体动力可靠性或者危险性分析,以使工程设计人员能够从经济和安全的角度进行优化设计。

3.4 开展地震作用下土体裂缝的研究,以弥补整体变形分析的不足。

3.5 进行对土体不利永久变形的抗震措施的研究。

3.6 对各种地震永久变形分析方法编制出相应的计算程序,以加快计算速度,方便推广应用。

3.7 由于实际永久变形是藕合在地震动的每一瞬间的,因此在可能的条件下应开展土体动力弹塑性分析,以求出符合实际的永久变形。

参考文献

- 1 Newmark N M. Effects of earthquake on dams and embankments. *Geotechnique*, 1965, 15(20)
- 2 Serff N, Seed H B, Markdisi F I, et al. Earthquake induced deformation of earth dams. Report No. EERC76-4, University of California, Berkeley, 1976
- 3 Franklin A G, Chang F K. Earthquake resistance of earth and rock fill dams; permanent displacement of earth embankments by Newmark sliding block analysis. Misc. Paper S-71-117, Report 5. U. S. Army Engineer, WES, 1977
- 4 Markdisi F I, Seed H B. Simplified procedure for estimating dam and embankments earthquake induced deformation. *Proc. ASCE, JGED*, 1978, 104(GTT):849~867
- 5 渡边启行. ワイルグムの動的解析—1、動的解析の方法. *大ダム*, 1979(87):46~64
- 6 William, Y, et al. Permanent deformation of earth dam due to earthquake. In: *Proc. Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. St. Louis, 1991
- 7 陈生水,沈珠江. 强震区域堆石坝的地震永久变形分析方法. *河海大学学报*, 1990, 20(2):117~120
- 8 Taniguchi E, Whitman R V, Marr W A. Prediction of earthquake induced deformation of earth dams. *Soils and Foundation*, 1983, 23(4)
- 9 张克绪等. 地震引起的土坝永久变形分析. *地震工程与工程振动*, 1989, 9(1)
- 10 钱家欢等. 小浪底土坝地震后永久变形预估. *河海科技进展*, 1993, 13(4):70~72
- 11 Liu H L. Earthquake induced permanent displacement on soft soil foundation. In: *Proc. Int. Conf. on Soft Soil Engrg. Guangzhou*. Beijing: Science Press, 1993
- 12 沈珠江. 饱和砂土的动力渗流变形计算. *水利学报*, 1980(2)
- 13 沈珠江等. 陡河水库坝的地震液化及变形分析. *水利水电科学研究*, 1984(1)
- 14 Lin J S. Risk assessments of the earthquake induced permanent displacements in earth dams. In: *Proc. 8th Int. WCEE*, 1984
- 15 Lin J S, Whitman R V. Earthquake induced displacements of sliding blocks. *ASCE*, 1986, 112(1):44~59
- 16 吴再光,韩国城,林泉. 土石坝地震永久变形的危险性分析. *岩土工程学报*, 1991, 13(2)
- 17 吴再光,韩国城. 面板堆石坝地震塑性滑移的概率分析. 见:第六届全国土力学及基础工程学术讨论会论文集. 上海:同济大学出版社, 1991
- 18 Yegian M K, Marciano E A, Ghahraman V G. Seismic risk analysis for earth dams. *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, 1991, 117(1):18~34
- 19 吴再光,韩国城. 随机地震作用下高桩码头岸坡永久变形分析. *岩土工程师*, 1991(3)
- 20 吴再光,韩国城. 粉土海堤随机地震反应及振陷变形分析. 见:首届全国岩土力学与工程青年工作者学术讨论会论文集. 杭州:浙江大学出版社, 1992

(收稿日期:1994-05-20)