于浩然,王平,王会娟,等.动剪应力折减系数三因素模型在黄土震陷评价中的适用性研究[J].地震工程学报,2026,48(5):1146-1155.DOI:10.20000/j.1000-0844.20260327001
YU Haoran, WANG Ping, WANG Huijuan, et al. Applicability of a three-factor dynamic stress reduction coefficient model in the evaluation of loess seismic subsidence[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(5): 1146-1155. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20260327001

动剪应力折减系数三因素模型在黄土震陷评价中的适用性研究

于浩然[1,2], 王 平[1,2], 王会娟[1,2], 蒲小武[1,2], 钟秀梅[1,2], 张兴富[1,2], 董岩璞[1,2]
(1. 中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000;
2. 中国地震局 黄土地震工程重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘要: 为解决传统动剪应力折减系数(r_d)模型在黄土场地震陷预测中偏差大的问题,首次将三因素r_d计算方法引入黄土场地。研究表明,深度(D)、震级(M)和12 m等效剪切波速($v_{S,12}^*$)是影响r_d的三个最显著因素,为此基于黄土高原48个典型场地实测钻孔波速数据,采用SOILQUAKE程序开展等效线性场地反应分析,引入了融合上述三个显著因素的三因素r_d模型,并与传统方法进行对比验证。该模型在厚覆盖黄土场地0~30 m深度范围内具有连续曲线形式,克服了传统方法沿深度插值拼接的不足。该模型能合理反映r_d曲线随震级增大而左移抬升、随剪切波速增大而形态趋直的物理规律。在兰州典型场地验证中,模型预测震陷量始终控制在SOILQUAKE基准值的1.3~1.8倍之间,而传统方法则从2.0倍急剧攀升至8.3倍,表现出显著的非物理性增长;在2023年积石山6.2级地震震害评估中,模型预测结果与现场调查范围基本吻合,初步验证了模型的适用性。该方法仅需常规勘察获取$v_{S,12}^*$即可快速生成r_d剖面,大幅降低了数据需求和计算成本,为黄土地区地震灾害快速评估提供了经济可行的技术方案。

关键词: 黄土震陷;动剪应力折减系数;三因素模型;等效剪切波速;积石山地震
中图分类号: P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2026)05-1146-10
DOI:10.20000/j.1000-0844.20260327001

收稿日期: 2026-03-27
基金项目: 地震科技星火计划攻关项目(XH23041C);甘肃省青年科技基金(22JR11RA090);应急管理部重点项目(2025-地震地质司-救援22);甘肃省青年人才团队项目(2025QNTD17)
第一作者简介: 于浩然(2000-),女,硕士研究生,主要从事岩土地震工程研究。E-mail:yuhaoran59@126.com。
通信作者: 王 平(1976-),男,博士,正高级工程师,主要从事岩土地震工程及黄土动力学方面的研究。E-mail:lanzhouwang_p@126.com。

Applicability of a three-factor dynamic stress reduction coefficient model in the evaluation of loess seismic subsidence

YU Haoran[1,2], WANG Ping[1,2], WANG Huijuan[1,2], PU Xiaowu[1,2], ZHONG Xiumei[1,2], ZHANG Xingfu[1,2], DONG Yanpu[1,2]

(*1.Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;*
2.Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering of CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: To address the issue of large deviations in the traditional dynamic shear stress reduction coefficient (r_d) model for predicting earthquake-induced settlement in loess sites, the three-factor r_d calculation method is introduced to loess sites for the first time. The study indicates that depth (D), magnitude (M), and the 12-m equivalent shear wave velocity ($v_{S,12}^*$) are the three most significant factors affecting r_d. Therefore, based on measured borehole wave velocity data from 48 typical sites on the Loess Plateau, the SOILQUAKE program was used to conduct equivalent linear site response analysis, and a three-factor r_d model incorporating the three significant factors was introduced and verified through comparison with traditional methods. This model has a continuous curve form within the depth range of 0—30 m in thick loess sites, overcoming the shortcoming of traditional methods that rely on depth interpolation and splicing. The model reasonably reflects the physical laws that the r_d curve shifts leftward and rises with increasing magnitude, and tends to become straighter with increasing shear wave velocity. In validation at a typical site in Lanzhou, the predicted seismic subsidence of this model remained within 1.3 to 1.8 times the SOILQUAKE benchmark value, whereas the traditional method sharply increased from 2.0 times to 8.3 times, exhibiting significant non-physical growth. In the hazard assessment of the 2023 Jishishan M6.2 earthquake, the model's predictions were generally consistent with the field investigation scope, preliminarily verifying the model's applicability. This method only requires conventional investigation to obtain $v_{S,12}^*$ and can quickly generate an r_d profile, greatly reducing data requirements and computational costs, thus providing an economically feasible technical solution for rapid earthquake disaster assessment in loess regions.

Keywords: loess seismic subsidence; dynamic stress reduction coefficient; three-factor model; equivalent shear wave velocity; Jishishan earthquake

0　引言

黄土为干旱半干旱区一种特殊的第四纪沉积物，大孔隙、弱胶结等特殊结构性，使其具有强烈的水敏性和动力易损性。黄土高原是黄土分布最集中、厚度最大的区域，新构造运动活跃，而地震是其新构造运动的强烈表现形式。因此，自古以来，黄土高原为强震多发区。历次强震都曾引起严重的地震震陷灾害，如2023年12月甘肃积石山6.2级地震在黄土高原与青藏高原过渡地带引发了严重的黄土震陷灾害，极震区黄土震陷最大沉降达57 cm以上，裂缝延伸最长约300 m，最大宽度达83 cm[1]。此次灾害造成巨大的财产损失和人员伤亡，并影响灾后救援等工作。

20世纪90年代末，王兰民等[2]首次提出了黄土震陷的概念及其估算方法，并指出了黄土震陷与软土震陷的本质区别，建立了考虑物性参数、固结应力、振次和动应力等因素的黄土残余应变经验公式，提出了黄土震陷量的分层总和法估算方法，为黄土震陷的定量评估奠定了基础。随后，郁寿松等[3]通过系统的震陷试验研究，明确了动应力、初始固结压力、振动次数和土的类型是影响震陷的主要因素，建立了震陷参数与剪切波速、压缩模量等物性指标的关系。陈永明等[4]进一步研究了剪切波速

与黄土震陷性的统计关系，提出了利用原位波速预测场地震陷量的方法。这些研究成果为黄土震陷评估提供了重要的理论依据和方法支撑。

当前工程实践中，地震震陷的简化计算多沿用源于饱和砂土液化分析的动剪应力折减系数（r_d）模型，如 Seed 等[5]提出的仅依赖深度的典型经验公式。该方法虽被部分研究应用于黄土场地[6]，但其物理基础建立于无结构性砂土的循环响应，难以反映黄土特有的结构性和非线性。尤其在厚层黄土分布区，此类简化模型常导致震陷量严重高估，造成过度保守且不经济的设计。现有主流方法在处理 r_d 时仍存在明显不足。王克等[7]系统研究表明，现有的 r_d 计算方法主要包括 Seed 曲线、NCEER 曲线和 Cetin 方法等。Seed 曲线和 NCEER 曲线仅考虑了深度对 r_d 值的影响，忽略了震级和场地剪切波速的作用，且以图表形式呈现，准确性难以保证；Cetin 方法虽然引入了多个变量，但曲线形式复杂，可操作性不强，尤其在深层土的应用中受到限制。此外，这些方法大多侧重于砂土或其它类型的土壤，而针对黄土的具体情况则鲜有涉及。韩超等[8]通过离心机试验和数值模拟进一步指出，地震动频率和持时对 r_d 分布也有显著影响，且土体液化后 r_d 曲线与经验公式预测值存在显著差异，表明在液化评价中需要综合考虑地震动特征和场地条件的影响。值得注意的是，现行《湿陷性黄土地区建筑标准（GB 50025—2018）》[9]主要针对静力条件下的湿陷问题，并未涉及地震动荷载下的震陷计算；而现行抗震相关指南亦缺乏适用于黄土的 r_d 取值方法。

大量研究表明，r_d 分布受埋深、近地表刚度及地震动强度等多因素控制[7,10]。传统的钻井取样与室内试验方法虽然精度较高，但需开挖探井、取样运输、开展动三轴试验，工作量大、成本高、耗时长，且易受取样扰动影响，难以在常规工程勘察中推广应用。相比之下，基于原位测试参数的简化模型具有显著优势：剪切波速测试已成为岩土工程勘察的标准手段，测试速度快、成本低、可重复性好，且能有效反映黄土的密实程度和结构特征[4]。为此，本研究基于中国黄土地区 48 个典型钻孔的等效线性场地反应分析结果，首次引用一种新型三因素 r_d 模型，该模型公式中考虑了深度（D）地震震级（M）与 12 m 等效剪切波速（$v_{S,12}^*$）。该模型仅需常规勘察获取 $v_{S,12}^*$，即可快速生成 r_d 剖面，大幅降低了数据需求和计算成本。模型在积石山地震真实震陷案例中完成验证，旨在为黄土地区地震灾害快速评估与规范方法改进提供有效技术支撑。

1 研究方法

通过结合数值模拟与经验回归，尝试提出一种适用于厚覆盖黄土场地的实用型动剪应力折减系数（r_d）模型。整体技术路线分为三个阶段：

（1）第一阶段：三因素模型建立与标定——基于王克等[7]提出的三因素框架，引入深度（D）、地震震级（M）和 12 m 等效剪切波速（$v_{S,12}^*$）作为控制参数，利用 48 个钻孔获得的 48 个 r_d 剖面进行参数拟合，建立适用于黄土场地的三因素 r_d 模型（详见 1.3、1.4 节）。

（2）第二阶段：参考数据集构建——选取兰州经典黄土场地，采用 SOILQUAKE 程序开展一维等效线性地震反应分析，获取该场地的 r_d 剖面，作为模型标定的基准数据集（详见 2.1 节）。

（3）第三阶段：模型验证——选取 2023 年积石山 6.2 级地震中一处典型震陷场地（石塬镇秦阴村），将模型预测的震陷量与现场调查值（57 cm[1]）进行对比，同时与传统深度依赖型方法进行比较，验证模型的有效性和优越性（详见 2.2 节）。

1.1 基于场地反应分析的参考数据集构建

为建立有效的标定基准，本研究选取中国黄土高原 48 个典型钻孔，对每个场地，采用 SOILQUAKE 程序开展一维等效线性地震反应分析，输入参数包括实测剪切波速（v_S）剖面、土体重度以及针对湿陷性黄土标定的非线性土体特性（剪切模量衰减曲线与阻尼比）[6]。地震动输入采用与区域地震危险性相容的时程，对应峰值加速度范围 $0.1g$～$0.4g$。

动剪应力折减系数 r_d 是连接地震动输入与土层动力响应的关键参数，其物理意义为：计算深度处实际水平面上的最大剪应力与刚体土柱假设下的最大剪应力之比[7]。为直观说明 r_d 的含义及计算方法，图 1 给出了其示意图。如图所示，在刚体假设下，剪应力随深度线性增大（虚线）；而在实际土层中，由于土体的非线性变形和阻尼耗能，剪应力沿深度的分布呈现非线性衰减（实线），r_d 即为二者之比。

在等效线性理论框架下，土层循环剪应力与局部惯性力成正比，而后者与峰值加速度线性相关。

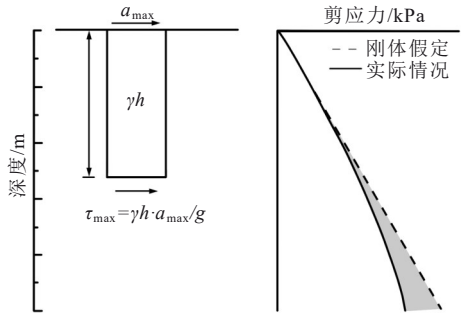


图 1　动应力折减系数含义及计算方法示意图[7]

Fig. 1　Schematic diagram of the definition and calculation method of the dynamic stress reduction coefficient[7]

因此，可通过各深度处峰值加速度与地表峰值加速度的比值，合理表征动剪应力折减系数[5,7]：

$$r_d(z)=\frac{a_{max}(z)}{a_{max,\,surface}} \tag{1}$$

式中：$a_{max}(z)$为深度z处的峰值加速度；$a_{max,\,surface}$为地表峰值加速度。该方法避免了对有效应力的额外假设，确保r_d剖面的物理一致性。最终获得的48个r_d剖面构成模型标定的核心数据集。

1.2　三因素应力折减系数计算模型

目前，动剪应力折减系数的确定方法主要可分为三类：深度依赖型经验公式、一维等效线性场地反应分析和多因素经验回归模型。深度依赖型方法形式简单、便于工程应用，但忽略了地震动强度和场地刚度的影响；一维等效线性分析方法精度较高，但数据需求大、计算复杂，难以在常规工程中推广；多因素经验回归模型兼顾了准确性与实用性，是目前研究的热点方向。下面对这三类方法分别进行介绍。

1.2.1　深度依赖型经验公式

以Seed等[5]提出的方法为代表，将r_d仅表示为深度的函数，通过经验表格或分段线性公式确定（见表1）。从表1可以得出，r_d值随深度增加呈递减趋势：地表处为1.000 3 m深度处降至0.975 6 m深度处为0.955，至12 m深度处已衰减至0.850。该方法优点是形式简单、便于工程应用，但其物理基础建立于无结构性砂土的循环响应，忽略了地震动强度与场地刚度的影响。王克等[7]通过方差分析证明，深度虽是影响r_d的最显著因素，但震级和剪切波速同样起重要作用，不可忽略。此外，该方法在深度大于12 m后采用折线拼接，形式不连续，深层土的计算精度难以保证。

表 1　不同深度黄土的动应力折减系数[6]

Table 1　Dynamic stress reduction coefficients of loess at different depths[6]

深度D/m	0	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0
折减系数K_d	1.000	0.985	0.975	0.965	0.955	0.935	0.915	0.895	0.850

1.2.2　一维等效线性场地反应分析

一维等效线性场地反应分析的基本原理是将土体视为一系列无限薄层所组成的振动体系，各层之间由剪切弹簧和阻尼器联结，并在地震引发的水平剪切振动下分析土体的地震反应。在地基的地震反应分析计算时，可在任意深度处取一个微元体建立运动方程，按一维问题进行分析，求解时可采用等效线性化法或特征线法[11]。目前常用的数值模拟程序包括SHAKE2000、DeepSoil、SOILQUAKE等，通过频域等效线性化迭代计算，可获取场地特异性r_d剖面。

该方法能够充分考虑土层的非线性特性和实际地震动输入，结果最为准确。然而，其数据需求高、计算复杂、需要专业经验，需获取详细的土层剖面、非线性参数和地震动时程，计算过程涉及频域等效线性化迭代，难以在常规工程勘察中推广应用。

1.2.3　多因素经验回归模型

为兼顾准确性与实用性，国内外学者发展了多因素经验公式。代表性工作包括：

Cetin等[12]：引入深度、震级、剪切波速、峰值地面加速度（Peak Ground Acceleration，PGA）等多因素，但公式形式复杂，包含分段函数和指数项，且未进行影响因素显著性分析，可操作性不强

Idriss等[13]：提出震级相关的r_d线，但场地假设过于理想化，且仍采用分段形式

王克等[7]：基于32个场地508条工况的统计分析，通过方差分析明确各因素显著性排序，提出了适用于砂土场地的三因素公式，并验证了其在0～50 m深度范围内的适用性。

1.3　三因素法选择依据

综合对比上述三类方法，本研究选择三因素法主要基于以下考虑：

（1）物理机制完备性：方差分析表明[7]，深度、

震级和剪切波速是影响r_d的三个最显著因素，三者合计可解释r_d变异的90%以上；而PGA的影响相对较小，为保证计算公式的简洁性，减少实际工程计算量，因此未引入该因素。三因素法抓住了核心控制参数，物理基础明确。

（2）参数易获取性：震级M可从地震危险性分析获得，v_S是岩土工程勘察的标准输出成果，无需额外试验。选取12 m是因为该深度属于地震动放大效应最显著的区段，该深度范围内的土层刚度直接决定了场地的动力响应特征；国际土动力学领域也普遍采用$v_{S,12}^*$作为表征场地浅层刚度的核心指标。相较于数值模拟方法，大幅降低了数据需求和计算成本；相较于深度依赖法，仅增加了一个常规参数，却显著提升了精度。关于震级M的确定，可采用区域地震活动性分析、潜在震源区划分、概率地震危险性分析等方法获取。以48个典型场地为例，天水地区历史曾发生1654年8.0级地震，震级上限取8.0级；兰州地区历史最大地震为1125年7.0级，结合断裂活动性取6.0级；庆阳地区为本底地震区，震级上限取5.0级。

（3）形式简洁性：Logistic曲线是一种典型的S型函数，因其能够描述“起始平缓—中间加速—最终趋近渐近线”的变化过程，被广泛应用于生物生长、人口预测及工程领域中具有阈值效应的现象。王克等[7]首次将Logistic曲线用于描述r_d随深度的变化规律，并证明其拟合优度可达0.95以上。本研究采用的Logistic模型仅需三个形态参数，且具有连续曲线形式[式(2)]，克服了以往公式沿深度拼接的弊端，在0～30 m深度范围内光滑连续，便于工程应用。

（4）针对黄土的适应性：现有三因素公式多基于砂土液化分析建立，本研究中首次针对黄土非线性特性进行修正与标定。研究表明，剪切波速能有效反映黄土的密实程度和架空孔隙结构特征，与震陷性具有良好相关性[4]，将v_S作为场地刚度指标，可在不增加勘察工作量的前提下显著提升模型在黄土场地的适用性。

基于上述分析，为克服现行深度依赖型r_d模型的局限性，引入改进的Logistic曲线构造三因素r_d模型[式(2)]，在黄土场地震害评估中进行尝试。

$$r_d(z)=\frac{1-A_2}{1+\left(\frac{z}{d_0}\right)^P}+A_2 \tag{2}$$

式中：z为计算点深度(m)；A_2为渐近线，即曲线最终收敛的渐进值；d_0为参考影响深度，为曲线的中心；P为形状变量。模型中的三个参数表示为常规岩土勘察中易获取的场地指标的函数：

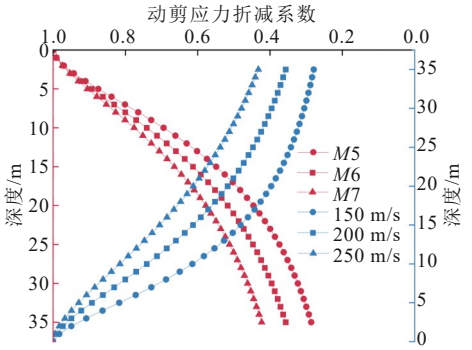
$$\begin{aligned}A_2&=0.42\times M-0.084\\P&=-0.077\times M+2.073\\d_0&=1.922\times M+0.108\times v_{S,12}^*-16.770\end{aligned} \tag{3}$$

式中：M为地震震级；$v_{S,12}^*$为12 m等效剪切波速。上述系数是基于48个典型黄土场地钻孔数据的等效线性场地反应分析结果，通过非线性最小二乘回归拟合得到的。具体地，首先对各场地的r_d剖面采用Logistic曲线逐条拟合，获得每个场地的形态参数A_2、P、d_0；然后以震级M和$v_{S,12}^*$为自变量，对各形态参数进行多元线性回归，得到式(3)中的回归系数。所有回归结果的相关系数R均大于0.7，显著性水平p均小于0.01，表明模型参数拟合良好。

该模型对地震震级与剪切波速的响应特性如图2所示，表明其能合理反映场地动力条件变化对r_d分布的影响。

1.4 三因素模型参数响应特性

为揭示所提模型对关键输入参数的物理响应机制，图2展示了在不同深度、固定其他条件时，动剪应力折减系数r_d随地震震级(M=5、6、7)和12 m等效剪切波速($v_{S,12}^*$=150、200、250 m/s)的变化规律。



注：红线：不同震级(M=5,6,7)，$v_{S,12}^*$=200 m/s；蓝线：不同剪切波速($v_{S,12}^*$=150,200,250 m/s)，M=6

图2 动剪应力折减系数随震级与剪切波速的变化规律

Fig. 2 Variation of the dynamic shear stress reduction coefficient with magnitude and shear wave velocity [red lines: different magnitudes(M=5,6,7), $v_{S,12}^*$ = 200 m/s; blue lines: different shear wave velocities ($v_{S,12}^*$ =150,200,250 m/s), M=6]

如图 2 所示，取 $v_{S,12}^{*}$ 为 200 m/s、计算深度至 35 m 为例，随着震级增大，r_d 曲线整体左移，同一深度处的 r_d 值增大。曲线在深度较大处逐渐趋近于某一稳定值，该稳定值即为渐近线 A_2[式(3)]。且渐近线高度随震级升高而系统性增大。以 34 m 深度为例，M=5 时，r_d 为 0.29；M=7 时，r_d 达 0.43。

如图 2 所示，取震级为 6、计算深度至 35 m 为例，随着 $v_{S,12}^{*}$ 增大，r_d 曲线同样整体左移。低波速(150 m/s)时曲线存在明显拐点；当波速增至 250 m/s 后，拐点逐渐消失，形态趋近于从左下至右上的直线，拐角点同步向左上方移动。该演化规律与场地反应分析中“刚度越大、应力传递越高效”的物理机制高度一致[10]，验证了式(3)能有效捕捉 $v_{S,12}^{*}$ 对 r_d 分布的控制作用。

本研究中所采用的 48 个钻孔覆盖了黄土高原不同地貌单元，包括黄土塬、黄土梁与河谷等多类典型场地。表 2 汇总了经采用的典型黄土场地的震级 M 及 $v_{S,12}^{*}$ 的取值范围。需注意，表中深度与波速均为各场地不同钻孔的实测值范围，而非单一钻孔的连续变化。图 3 给出了全部 48 个钻孔的 r_d 剖面汇总(48 个钻孔的完整平均 r_d 值见表 3)，该图中的 r_d 剖面是根据式(2)～(3)计算得到的理论曲线。计算时，计算深度统一取至 30 m，各场地的震级 M 根据所在区域的地震活动性确定，$v_{S,12}^{*}$ 由钻孔波速测试结果计算得到(取值范围见表 2)。图中黄色条带为 48 个场地的平均值。从统计结果可以看出，不同场地的 r_d 分布存在一定离散性，这与其土层结构差异有关——河谷阶地多具“上软下硬”的二元结构，黄土塬覆盖层厚且连续，黄土梁则受地形切割影响显著[14-15]，这些因素共同导致了 r_d 衰减特征的差异。

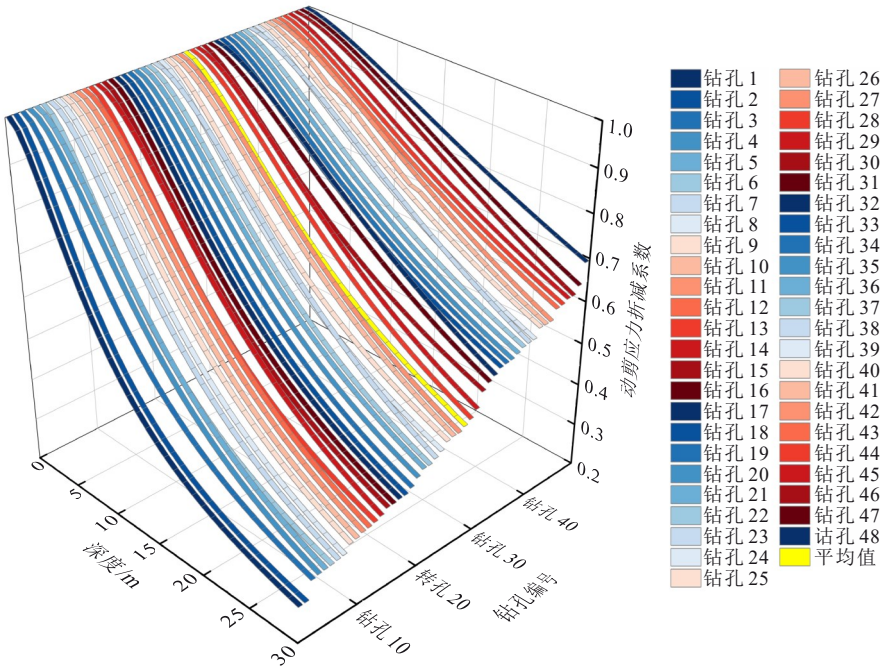


图 3　典型黄土场地动应力折减系数随深度变化曲线

Fig. 3　Variation of the dynamic stress reduction coefficient with depth in typical loess sites

1.5　模型适用边界

模型基于黄土高原 48 个典型钻孔数据标定，其适用范围受限于标定数据集的参数范围。根据表 2 的统计，各场地输入参数的分布如下：

深度范围：0～30 m(超过 30 m 外推需谨慎)。

震级范围：5.0～8.0(覆盖庆阳地区 5.0 级本底地震至天水地区 8.0 级强震)。

$v_{S,12}^{*}$ 范围：138.7～369.4 m/s(涵盖黄土塬、梁、河谷三类地貌单元)。

当目标场地的参数超出上述范围时，建议采用一维等效线性场地反应分析进行专项验证，或补充更多数据对模型进行重新标定。

2　案例验证与结果讨论

为检验模型预测能力，首先在标定数据集内的典型场地(兰州某黄土梁场地)上，对比三因素模型

表 2 48个典型黄土场地计算参数取值范围

Table 2 Ranges of calculation parameters for 48 typical loess sites

地点	钻孔数量	震级 M	深度范围/m	$v^*_{S,12}$范围/(m/s)
兰州榆中	10	6	33～61	187～260
天水秦州	11	8	28～75	205～290
庆阳西峰	10	5	65～122	205～261
定西安定	3	7	33～38	189.1～198.5
平凉灵台	14	5	13～60	138.7～369.4

注：深度范围为各场地钻孔的实测深度，非模型计算深度(模型统一取0～30 m)

与基于SOILQUAKE的场地特异性模拟反演结果；进而，将该模型应用于2023年积石山6.2级地震的震害评估，通过与现场调查震陷量的对比，验证其外推有效性。

2.1 兰州场地模型验证

选取标定数据集中的兰州某黄土梁典型场地作为验证对象。该场地黄土覆盖层厚度约25 m，$v^*_{S,12}$=220 m/s，地震动输入按 M=7.0、PGA=0.20g设定。基于SOILQUAKE软件开展一维等效线性场地反应分析，所得峰值加速度剖面(见图4蓝线)及反演的动剪应力折减系数 r_d 剖面(见图4红线)作为基准真值。传统方法结果和对该兰州黄土梁经典场地利用SOILQUAKE软件进行一维地震反应分析的反演结果，如表3所列，用于验证三因素方法合理性。

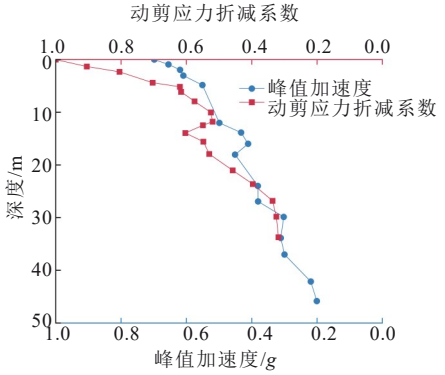


图 4 兰州典型黄土梁场地峰值加速度响应与反演动剪应力折减系数剖面

Fig. 4 Peak acceleration response and inverted dynamic shear stress reduction coefficient profile of a typical loess ridge site in Lanzhou

在此基础上，通过标准分层总和法，分别采用：(1)传统深度依赖型 r_d 模型结果；(2)三因素模型结果；(3)SOILQUAKE场地特异性模拟反演结果，计算震陷量并对比精度。震陷量采用标准分层总和法计算，计算公式为：

$$S_d = \sum_{i=1}^{n} \epsilon_{pi} \cdot h_i \tag{4}$$

式中：S_d 为场地总震陷量(cm)；ϵ_{pi} 为第 i 层土的震陷系数(通过室内动三轴试验得到的震陷曲线确定)；h_i 为第 i 层土的厚度(cm)；n 为土层划分总数。三种方案对应的动剪应力折减系数 r_d 数据汇总于表3，通过室内试验获取各个深度的震陷曲线如图5所示，震陷量计算结果汇总于表4。

为了探究模型在不同强度地震下的响应规律，选取100 gal、200 gal及400 gal工况进行了对比分析

表 3 典型黄土场地动剪应力折减系数(r_d)完整剖面数据

Table 3 Full profile data of the dynamic shear stress reduction coefficient (r_d) for typical loess sites

深度	三因素法 r_d 平均值(48个钻孔)	传统方法	兰州场地反演结果
0	1	1	1
1	0.992 11	0.993 9	0.949 5
2	0.976 85	0.990 8	0.858 9
3	0.957 25	0.986 1	0.747 7
4	0.934 84	0.979 8	0.624 4
5	0.910 71	0.971 9	0.627 3
6	0.885 65	0.962 4	0.593 8
7	0.860 24	0.951 3	0.572 6
8	0.834 91	0.938 6	0.525 1
9	0.809 97	0.924 3	0.530 5
10	0.785 66	0.908 4	0.539 8
11	0.762 1	0.890 9	0.561 2
12	0.739 4	0.871 8	0.589 9
13	0.717 61	0.851 1	0.615 9
14	0.696 77	0.828 8	0.644 6
15	0.676 87	0.804 9	0.593 7
16	0.657 92	0.779 4	0.552 2
17	0.639 87	0.752 3	0.544 0
18	0.622 71	0.723 6	0.535 0
19	0.606 4	0.693 3	0.528 2
20	0.590 91	0.661 4	0.520 5
21	0.576 19	0.627 9	0.471 4
22	0.562 21	0.592 8	0.453 3
23	0.548 92	0.556 1	0.436 4
24	0.536 31	0.517 8	0.401 3
25	0.524 3	0.477 9	0.384 6
26	0.512 89	0.436 4	0.366 8
27	0.502 04	0.393 3	0.347 8
28	0.491 71	0.348 6	0.343 4
29	0.479 73	0.302 3	0.339 2
30	0.470 35	0.254 4	0.334 3

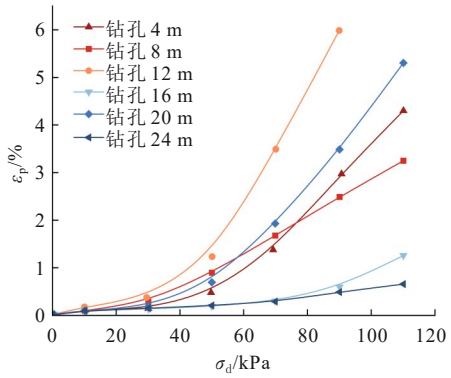


图 5　兰州某典型黄土场地震陷曲线

Fig. 5　Seismic subsidence curves of a typical loess site in Lanzhou

表 4　黄土震陷量预测结果

Table 4　Predicted loess seismic subsidence values

计算方法	计算深度/m	各地震烈度下的最大震陷量/cm		
		Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ
三因素 r_d 平均值	24.0	1.80	5.40	17.08
传统方法	24.0	2.40	16.80	108.00
兰州场地反演结果	24.0	1.20	3.00	13.00

（图 6）。随着 PGA 增大，传统方法的预测值迅速偏离，对 SOILQUAKE 基准的倍数由 100 gal 时的 3.6 倍急剧攀升至 400 gal 时的 8.4 倍，呈现出显著的非物理性指数增长；相比之下，本研究提出的三因素模型在整个工况范围内表现稳定，其预测值始终维持在 SOILQUAKE 基准的 1.3 至 2.4 倍之间，表现出良好的合理性与一致性。究其原因，传统方法所采用的深度依赖型 r_d 曲线未能反映场地实际动力响应（图 4），导致循环剪应力被高估；而三因素模型通过引入深度、震级与 $v_{S,12}^*$，使得 r_d 取值更接近实际场地反应。

需要强调的是，该场地黄土的震陷潜力已通过室内动三轴试验得到验证（图 5），确保了计算前提的有效性。综上，三因素模型在已知场地条件下能有效逼近 SOILQUAKE 数值模拟反演结果，显著优于传统简化方法，具备良好的工程适用性。

2.2　积石山地震真实场地验证

为进一步验证三因素 r_d 模型在真实地震案例中的适用性，选取 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 6.2 级地震中一处典型震陷场地开展验证。该场地位于石塬镇秦阴村，属黄土梁地貌，黄土厚度约 22 m，现场调查震陷量范围为 10～57 cm。场地输入参数如下：地震动：M=6.2，参照钟秀梅等[1]采用的 PGA 水平（0.30g～0.60g）土层参数取 $v_{S,12}^*$=220 m/s，密度 γ=16.5 kN/m^3。

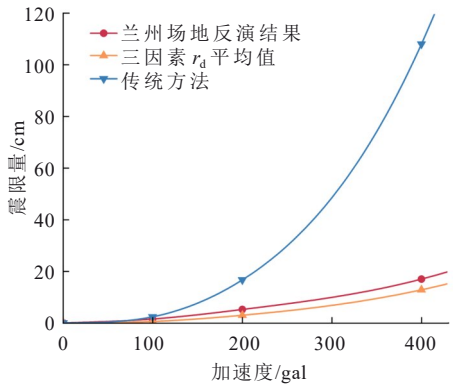


图 6　不同动应力折减系数法下黄土场地的震陷量曲线

Fig. 6　Seismic subsidence curves of loess sites under different dynamic stress reduction coefficient methods

钟秀梅等[1]基于该场地原状黄土的室内动三轴试验，获取了不同动应力水平下的震陷曲线，采用分层总和法计算了不同 PGA 水平下的震陷量。该方法通过专门的室内试验获取场地土体的震陷特性，数据需求高、成本大，结果较为可靠，可作为本次研究的模型验证的参照基准。

采用相同的分层总和法，以三因素 r_d 模型结果计算各深度处的 r_d 值，代入震陷量计算公式，可得该简化方法在不同 PGA 水平下的震陷量，与钟秀梅等[1]的计算结果对比如表 5 所列。

表 5　不同方法计算秦阴村场地震陷量对比

Table 5　Comparison of calculated seismic subsidence values for the Qinyin Village site using different methods

PGA/g	传统方法（钟等）/cm	三因素法/cm	现场调查范围/cm
0.30	51.39	26.72	10～57

从表 5 可以看出，在 PGA=0.30g 时，三因素法预测的震陷量（26.72 cm）处于钟秀梅等[1]现场调查的“10～57 cm”范围内，而传统方法的预测结果为 51.39 cm，略低于调查上限。该结果表明了模型在灾害评估中具有一定的参考价值。三因素法结果偏小的主要原因是其 r_d 取值在深层（10～20 m）显著小于传统方法（表 1），从而降低了该深度范围内的动应力水平。需要指出的是，传统方法是基于专门室内动三轴试验计算的，数据需求高、成本大；而三因素法仅需常规勘察获取 $v_{S,12}^*$，无需开展专门试验，

大幅降低了数据需求和计算成本，因此在实际工程快速评估中具有显著优势。

2.3 讨论

本研究通过“内部验证＋外部应用”双路径，系统论证了三因素动剪应力折减系数（r_d）模型在黄土场地震陷评估中的有效性。其成功可归因于对物理机制的更完备刻画：传统方法[5]仅依赖深度，隐含“所有场地在相同深度具有相同应力传递效率”的错误假设；而本研究中的模型引入了多方面影响因素，使 r_d 能随地震能量输入与场地刚度自适应调整，从根本上克服了传统方法的局限性。周燕国等[16]研究表明，地震动强度指标（如峰值加速度、地震剪应力比等）对场地液化触发和震后沉降评价具有显著影响，且不同指标的评价能力存在差异，因此在液化（震陷）评价中合理选择地震动强度指标至关重要。本研究中引入震级 M 作为地震动强度的表征参数，正是基于这一认识。

值得强调的是，本模型的工程价值不仅体现在精度提升，更在于大幅降低数据需求与计算成本。传统评估需开展钻井取样、动三轴试验及复杂场地反应分析，周期长、费用高，难以在常规勘察中推广；而本研究中提出的方法仅需岩土工程勘察标准输出的 $v_{S,12}^*$，即可快速生成 r_d 剖面。以积石山地震为例，在缺乏详细场地模型的应急条件下，三因素模型仍能快速给出 26.72 cm 的震陷预测，该结果与现场调查的“10～57 cm”范围基本吻合，而传统方法的预测结果为 51.39 cm，虽同样在调查范围内，但其数据需求高、成本大。这充分证明，融合深度、地震动参数与场地刚度的动态 r_d 模型，是实现黄土地区震害快速评估的经济可行方案。

当然，本次研究仍存在着一定局限。模型基于等效线性理论标定，在超大应变（＞1%）或强非线性阶段（如震陷临界状态）可能存在偏差。邓龙胜等[17]指出，黄土残余应变还受地震动卓越频率与有效持时影响，未来工作将结合离心机模型试验与强震台阵记录进一步验证。

3 结论

研究基于黄土高原 48 个典型钻孔的等效线性场地反应分析，结合 2023 年积石山 6.2 级地震真实震害数据，引入一种适用于黄土地区的三因素动剪应力折减系数（r_d）模型，并系统验证其有效性。主要结论如下：

（1）三因素模型能有效反映地震动强度与场地刚度对 r_d 分布的控制作用。通过引入融合深度（D）、地震震级（M）与 12 m 等效剪切波速 $v_{S,12}^*$ 的三因素 r_d 模型成功再现了 r_d 曲线随震级增大而左移抬升、随波速增加而形态趋直的物理规律，克服了传统深度依赖型模型的局限性。

（2）模型具有显著的工程实用性优势。仅需常规勘察获取 $v_{S,12}^*$，即可快速生成 r_d 剖面，大幅降低了数据需求和计算成本，为黄土地区地震灾害快速评估提供了经济可行的技术方案。

（3）模型在积石山真实震陷案例中验证了其有效性。当 $PGA=0.30g$ 时，模型预测震陷量为 26.72 cm，与现场调查的“10～57 cm”范围基本吻合，表明了模型在灾害评估中的参考价值。该方法仅需常规勘察获取 $v_{S,12}^*$，无需开展专门室内试验，数据需求和计算成本显著低于传统方法，体现了良好的工程实用性。

（4）本模型基于等效线性分析标定，在超大应变条件下可能存在局限，需进一步研究完善。未来可结合离心机试验与强震台阵记录，探索考虑频率特性影响的改进方案。

建议在黄土地区地震灾害风险评估及未来《湿陷性黄土地区建筑规范》修订中，考虑引入此类融合地震动参数与场地刚度的动态 r_d 模型，以提升震陷计算的准确性与安全性。

参考文献（References）

[1] 钟秀梅，王平，王杰民，等. 积石山 M6.2 地震诱发秦阴村黄土震陷灾害研究[J]. 地震工程学报，2024，46(4)：818-824，856.
ZHONG Xiumei，WANG Ping，WANG Jiemin，et al. Characteristics of the loess seismic subsidence in Qinyin Village，Shiyuan Town，induced by the Jishishan M6.2 earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal，2024，46(4)：818-824，856.

[2] 王兰民，张振中. 地震时黄土震陷量的估算方法[J]. 自然灾害学报，1993，2(3)：85-94.
WANG Lanmin，ZHANG Zhenzhong. A method of estimating the quantity of seismic subsidence in loess deposits during earthquakes[J]. Journal of Natural Disasters，1993，2(3)：85-94.

[3] 郁寿松，石兆吉. 土壤震陷试验研究[J]. 岩土工程学报，1989，11(4)：35-44.
YU Shousong，SHI Zhaoji. Experimental investigation of soil settlement due to earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，1989，11(4)：35-44.

[4] 陈永明，王兰民，刘红玫. 剪切波速预测黄土场地震陷量的方

法[J]. 岩石力学与工程学报，2003，22(增刊2)：2834-2839.
CHEN Yongming，WANG Lanmin，LIU Hongmei. Prediction method of seismic subsidence of loess ground with shear wave velocity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2003，22(Suppl02)：2834-2839.

[5] SEED H B，IDRISS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division，1971，97(9)：1249-1273.

[6] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京：地震出版社，2003.
WANG Lanmin. Loess dynamics[M]. Beijing：Seismological Press，2003.

[7] 王克，孙锐，袁晓铭. 动剪应力折减系数影响因素及计算公式[J]. 岩石力学与工程学报，2018，37(1)：177-189.
WANG Ke，SUN Rui，YUAN Xiaoming. Influence factors and formula for dynamic stress reduction coefficient[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2018，37(1)：177-189.

[8] 韩超，周燕国，凌道盛，等. 液化判别应力折减系数分布特征研究[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29(9)：1833-1839.
HAN Chao，ZHOU Yanguo，LING Daosheng，et al. Study of distribution features of stress reduction coefficient in liquefaction evaluation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2010，29(9)：1833-1839.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部，国家市场监督管理总局. 湿陷性黄土地区建筑标准：GB 50025—2018[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China，State Administration for Market Regulation. Standard for building construction in collapsible loess regions：GB 50025—2018[S]. Beijing：China Architecture & Building Press，2019.

[10] YOUD T L，IDRISS I M. Liquefaction resistance of soils：summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2001，127(4)：297-313.

[11] 王平. 非饱和黄土震陷致灾机理及评价方法[D]. 西安：西安理工大学，2022.
WANG Ping. Seismic subsidence mechanism and evaluation method of unsaturated loess[D]. Xi'an：Xi'an University of Technology，2022.

[12] CETIN K O，SEED R B. Nonlinear shear mass participation factor (r_d) for cyclic shear stress ratio evaluation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering，2004，24(2)：103-113.

[13] IDRISS I M，BOULANGER R W. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering，2006，26(2-4)：115-130.

[14] 石玉成，蔡红卫，孙崇绍. 黄土地区场地的地震地面运动参数特征[J]. 西北地震学报，1998，20(3)：66-67.
SHI Yucheng，CAI Hongwei，SUN Chongshao. Characteristics of earthquake ground motion parameters in loess areas[J]. Northwestern Seismological Journal，1998，20(3)：66-67.

[15] 石玉成，王兰民，张向红. 黄土场地不同土层结构对地震地面运动参数的影响[J]. 工程地质学报，2000，8(增刊1)，355-358.
SHI Yucheng，WANG Lanmin，ZHANG Xianghong. Influence of different soil layer structures of loess site on earthquake ground motion parameters[J]. Journal of Engineering Geology，2000，8(Suppl01)，355-358.

[16] 周燕国，谭晓明，梁甜，等. 利用地震动强度指标评价场地液化的离心模型试验研究[J]. 岩土力学，2017，38(7)：1869-1877.
ZHOU Yanguo，TAN Xiaoming，LIANG Tian，et al. Evaluation of soil liquefaction by ground motion intensity index by centrifuge model test[J]. Rock and Soil Mechanics，2017，38(7)：1869-1877.

[17] 邓龙胜，范文. 随机地震荷载作用下黄土震陷的影响因素研究[J]. 岩石力学与工程学报，2011，30(9)：1924-1931.
DENG Longsheng，FAN Wen. Study of influencing factors of loess seismic subsidence induced by stochastic seismic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2011，30(9)：1924-1931.

（本文编辑：贾源源）