

中国地震学会团体标准《川滇藏东地区重大工程场址强地震动参数评估》编制说明

一、编制的必要性

川滇藏东地区是我国的资源能源基地与战略要地，已建和正在新建多项国家重大工程，在保障国民经济高质量发展和国家安全方面具有举足轻重的作用。如国家第十四个五年规划和 2035 年远景目标中明确要求实施雅鲁藏布江下游水电开发、川藏铁路等重大工程；要求加快西南水电基地建设。

川滇藏东地区位于印度板块与亚欧板块碰撞交界线附近，内部构造运动剧烈，强震频发。1900 年以来，先后发生 1950 年察隅地震、1951 年当雄地震、2008 年汶川地震等 8 级以上特大地震，其中 1950 年 8 月 15 日墨脱-察隅 8.6 级地震是我国有记载以来最大的一次地震，也是全球陆地上发生的最大地震。这也表明这一地区地震活动频度极高、强度极大，重大工程抗震安全面临严峻挑战。

地震动参数的合理评估是重大工程抗震安全评价的基础。川滇藏东地区为高山峡谷区域，地形变化剧烈，历史地震资料又相对缺乏。现有基于经验的方法，依赖于地震记录，忽略了震源破裂和地震波传播的物理机制，无法合理描述该区域坝址的地震动特征，难以反映不同地震由于发震机制和传播过程不同而导致的地面运动场的差异性，难以合理评估近断层重大工程场址的地震动，是制约重大工程建设的关键问题之一。近年来基于物理机制的数值方法得到了快速发展，可以根据坝址区域实际断层构造以及地质地形条件，模拟地震情景，预测重大工程场址的地震动参数。编制《川滇藏东地区重大工程场址强地震动参数评估》团体标准，可为这些重大工程防震减灾提供决策依据，提升重大工程自然灾害的防治能力，具有重要理论意义和工程实用价值。

二、国内外概况

20 世纪 90 年代后，世界大坝建设的中心已转移到了中国，我国在消化总结

国外筑坝技术、大力开展自主创新研究的基础上，在近 30 年建成了一批高度 200m~300m 级的超高坝工程，目前我国水电工程建设技术已达到世界领先水平。近年来，我国在地质条件更加恶劣的雅鲁藏布江、澜沧江等川滇藏东地区的大江大河上正进一步规划多项重大水利工程，该地区的工程面临更加严峻的抗震安全挑战。

当前工程抗震安全分析与评估主要采用基于经验统计衰减关系的地震危险性分析方法，包括概率性地震危险性分析方法（PSHA）、确定性地震危险性分析方法（DSHA）和设定地震方法等。PSHA 方法考虑坝址区域所有可能发生地震的综合影响，采用经验衰减关系来确定场址地震动参数，但 PSHA 方法给出的场址地震动参数不代表未来任何可能发生的地震事件。确定性地震危险性分析方法（DSHA）不含概率概念，其评估对象都是包含震源、震中距等参数的具体地震事件，依据场址周边地震构造或者历史地震情况确定对场址影响最大的地震事件，然后采用场址所在区域的地震动衰减关系来得到场址地震动参数，但 DSHA 结果可靠性依赖经验地震动衰减模型。川滇藏东地区的地震动实测记录，尤其是大震近场记录严重缺乏，难以采用经验地震动衰减模型外推得到可靠的场址近场大震的地震动参数。设定地震方法则对场址地震动贡献最大的潜源区域的地震地质条件和发震构造进行分析，将发生概率最大的地震作为场址设定地震。但根据设定地震确定场址地震动参数时，仍依赖统计得到的经验地震动衰减关系，可能具有较大的不确定性，并且难以考虑复杂的震源机制、传播路径以及局部场地条件的影响。随机有限断层模拟方法，采用半经验半理论方式确定某一场点傅里叶幅值谱，合成地震动时程，忽略了地震波在介质中的传播过程和局部场地效应。2008 年汶川大地震后，国家要求校核最大可信地震作用下高坝工程的安全性，不能发

生库水失控下泄灾变。《水工建筑物抗震设计标准》GB 51247-2018 将最大可信地震定义为根据工程场址地震地质条件评估的场址可能发生最大地震动的地震。场址最大可信地震一般具有明确的发震断层构造、确定的传播路径、特定的坝址地质地形条件，传统地震危险性分析方法均难以全面考虑这些因素生成场地相关的最大可信地震动，并且无法得到场址区域空间非均匀地震动场。

随着计算能力的提升以及对地震物理机制认识的发展，基于物理机制的确定性地震动模拟方法成为了重大工程抗震安全评价的新趋势。确定性地震动数值模拟包括三个核心内容，即对震源过程进行建模、震源到场址的地震波传播、局部场地效应。采用点源模型或有限断层震源模型可模拟中小震宽频带地震动；对于近场大地震，其断层可达到数十乃至数百公里，破裂过程极其复杂，清华大学研究团队提出了有限厚度震源模型，能准确生成符合实际的宽频带地震动。同时，发展出了震源-介质-场址-结构全过程分析方法，成功重现了 1994 年美国 Northridge 地震中 Pacima 坝和 2022 年泸定地震中大岗山拱坝的动力响应，验证了方法的可靠性。

近年来有学者采用基于物理机制的确定性地震动数值模拟方法进行地震危险性研究，从而给出场址地震动参数估计。Graves, et al. (2011) 提出基于确定性地震动数值模拟的地震危险性分析模型 CyberShake，通过构建具有不同震中位置和滑移量分布的地震情景，用于美国南加州地区的地震危险性分析。CyberShake 采用三维波速结构用于模拟地震波传播，但模拟有效频率上限只达到了 0.5Hz。Panza, et al. (2012) 提出一种新确定性地震危险性分析方法 (Neo-Deterministic Seismic Hazard Assessment, NDSHA)。NDSHA 将地震本身的物理机制和其造成的灾害后果联系起来，根据地震的破裂过程、传播路径和局部场地的影响建立地震

情景，然后采用确定性地震动数值模拟方法生成地震动来进行地震危险性分析。

NDSHA 克服了概率性地震危险性分析和确定性地震危险性分析采用的经验地震动衰减关系的两个主要缺点，即过于依赖地震观测数据和难以考虑地震动的物理机制（Panza and Bela 2020）。Denolle, et al.（2014）提出采用虚拟地震方法（Virtual Earthquake Approach, VEA）来模拟长周期强地震动。该方法首先根据环境地震动场（Ambient seismic field）得到格林函数，然后采用得到的格林函数模拟了圣安德烈亚斯断层南部 7 级的地震情景用于地震危险性评估。

项目团队提出了有限厚度震源模型，构建了震源断层-传播介质-河谷场址宽频带地震动数值模拟技术，很好再现了 1989 年 Landers 地震、1994 年 Northridge 地震等强地震的实测地震动记录，进一步证明了采用确定性地震动数值模拟进行场址地震动评估可行性和合理性。在此基础上，进一步构建了基于海量地震情景模拟确定场址地震动参数的方法，可以预测生成更符合实际情况的坝址峡谷三维地震动分布荷载，为高山峡谷地区重大工程地震动参数评估开辟了一条新的途径，与现有方法并行不悖。提出的基于直接数值模拟的场址地震动参数确定方法已经应用于溪洛渡、黑山峡、黄羊、GX 等高坝抗震研究，该方法在得到与传统方法接近的地震动参数（地震峰值加速度和反应谱）的基础上，可以进一步得到具有特定危险性水平的地震情景、场址宽频带地震动时程、和场址区域空间地震动场，可更合理评估结构地震响应。

三、编制主要过程

1. 任务来源

党的十八大以来，习近平总书记多次就加强防灾减灾救灾工作进行指示和部署，2016 年唐山地震 40 周年时强调同自然灾害抗争是人类生存发展的永恒课题。国家第十四个五年规划和 2035 年远景目标中也明确要求提升地震等自然灾害防

御工程标准。本项目面向“建立高效科学的自然灾害防治体系，提高全社会自然灾害防治能力”国家重大战略需求，编制《川滇藏东地区重大工程场址强地震动参数评估》团体标准，为川滇藏东地震重大工程抗震分析与安全性评价提供重要技术支撑。

2. 起草单位和主要起草人

本标准拟由清华大学、北京工业大学等单位编制。主编单位清华大学编制工作主要依托其水工结构学科、水圈科学与水利水电工程全国重点实验室，具有坚实的技术力量和充足的科研经费。清华大学水工结构学科是全国重点学科，由院士、长江学者、杰青、优青等 20 余人组成，2011 年以美国工程院院士 Ellingwood 教授为组长的国际评估专家组特别指出，包括地震工程在内的水工结构方向处于同类学科的国际前 5 名（the top five in the world）。水圈科学与水利水电工程全国重点实验室在 2008、2013 和 2018 年连续 3 次被评估为优秀。

本标准拟由王进廷、张楚汉、杜修力、李小军等人编制。王进廷，清华大学教授，国家杰出青年基金获得者，国家“万人计划”科技创新领军人才。主要从事地震动模拟与高坝结构抗震研究，主持完成国家重点研发计划项目课题、国家自然科学基金重点项目等多项科研课题。发表学术论文 200 余篇，其中 SCI 论文 100 余篇；出版专著 2 部；授权国家发明专利 15 项。先后获国家科技进步二等奖 2 项、省部级科技奖 9 项，以及中国青年科技奖、茅以升北京青年科技奖、张光斗优秀青年科技奖等奖励。兼任中国地震学会强震动观测技术与应用专委会，中国地震学会基础设施工程防震减灾专委会副主任，中国水力发电工程学会抗震防灾专委会副主任，《Earthquake Science》、《Earthquake Engineering and Resilience》、《振动与冲击》、《地震科学进展》等期刊编委。

3. 主要工作过程

（1）调研阶段

- **资料收集：**系统搜集川滇藏东地区的地质、地震活动历史、地形地貌、工程实践案例、既有抗震标准等基础资料。
- **需求分析：**分析重大工程抗震安全评估的需求，识别存在的技术空白和挑战。

- **文献综述：**整理国内外相关研究文献，对比分析，为标准制定提供理论依据。

(2) 立项阶段

- **可行性分析：**基于调研结果，分析标准编制的必要性和可行性，明确目标与预期效果。
- **方案制定：**编制立项申请书，明确项目目标、任务分解、预期成果、实施计划等。
- **申报审批：**向中国地震学会提交立项申请，进行项目审批流程。

(3) 起草阶段

- **框架设计：**确定标准的基本框架、章节设置、技术条款的逻辑结构。
- **内容编写：**撰写各章节内容，明确评估原则、方法、参数、计算公式、技术要求等。
- **初步整合：**整合各部分内容，形成标准初稿，确保内容完整性、规范性和一致性。

(4) 内部讨论与修改阶段

- **专家研讨：**组织内部专家会议，对初稿进行逐条讨论，提出修改意见。
- **修订完善：**根据讨论结果，修正技术错误，优化表达，确保内容的准确性和实用性。
- **多轮审核：**反复讨论与修订，直至内部达成共识，形成相对成熟的标准草案。

(5) 公开征求意见与修改

在前期修改论证基础上，编制组对标准草案进行进一步完善，并拟将标准草案公开发布，广泛征求行业内外的意见和建议。

四、条文说明

川滇藏东地区重大工程场址强地震动参数评估

条文说明

1 范围

本文件采用基于物理机制的直接数值模拟法确定周边存在重要活动断层的重大工程场址地震动参数。相关条文适用于川滇藏东高山峡谷地区高坝水电站、地下洞室、桥梁、隧道等重大工程场址的地震动参数评估

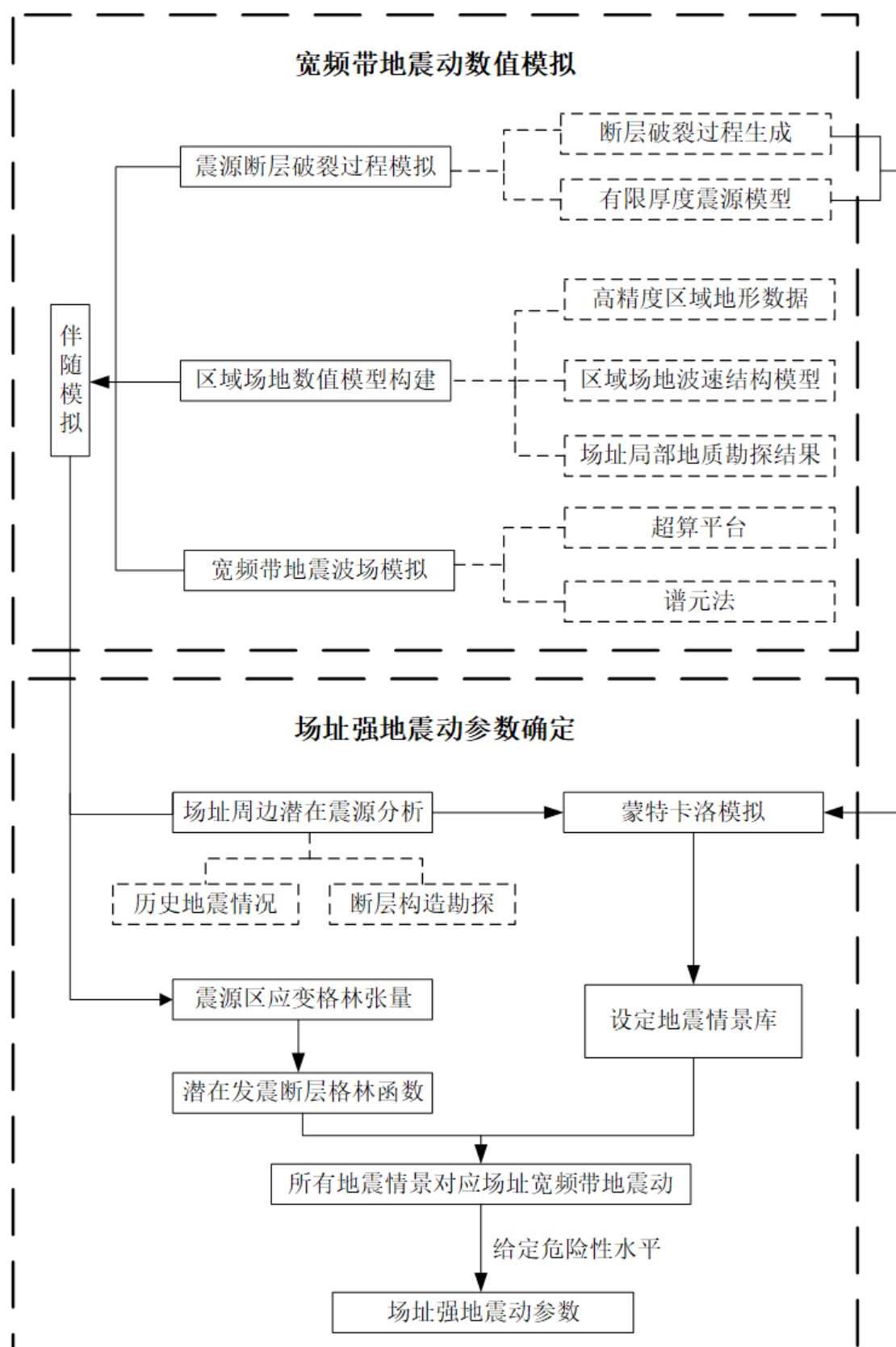
5 基本规定

5.1 场址强地震动参数评估需要考虑工程场址周边实际地形地质条件和活动断层构造。活动断层构造需按照工程场址地震安全性评价工作报告确定,选取对场址校核地震有重要贡献(大于 10%)的潜在震源区内的活动断层构造作为考虑对象。当有多个活动断层构造都有重要贡献时,应单独分析这些活动断层构造对场址的地震危险性。

5.2 《水工建筑物抗震设计标准》(GB51247-2018)规定“当发震断层距离场址小于 10km、震级大于 7.0 级时,宜研究近场大震中发震断层作为面源破裂的过程”。由于工程结构抗震分析需要考虑宽频带地震动(10Hz 以上),地震动数值模拟中常用的有限断层震源模型只能生成低频地震动(1Hz 以下),不能满足工程抗震研究需求。有限厚度震源模型可以考虑复杂震源破裂过程,并生成符合实际的宽频带地震动,因此本文件推荐采用有限厚度震源模型用于宽频带地震动数值模拟。

6 工作内容

本文件针对我国川滇藏东地区重大工程面临的地震风险问题,采用确定性数值模拟方法评估场址强地震动参数。与当前工程抗震实践广泛采用的经验地震动模型相比,基于物理机制的确定性数值模拟方法可以全面考虑震源破裂过程、传播路径和局部场地条件的影响,且不依赖历史地震动记录数据,可以为川滇藏东地区重大工程场址地震危险性提供有效评估手段。本文件规定方法的技术路线如图 E-1 所示。



图E-1 重大工程强地震动参数评估技术路线

7 设定地震主要参数确定

7.1 近场区域主要发震断层

按照条文 7.1 中的规定确定对场址有主要影响的发震断层。

7.2 断层构造地震情景震级

断层构造地震情景震级依据地震安评成果，按照条文 7.2 中说明确定。

7.3 发震断层参数

说明发震断层参数的具体选取原则。

7.4 震源层面及子源

规定有限厚度震源模型的参数确定方法。

7.5 模拟区域波速结构

波速结构对于确定性地震动数值模拟非常重要，而大多数地区往往缺乏精确三维波速结构。但是，重大工程场址都经过详细的地质勘探，具有较为准确的地质信息，因此本文件推荐采用融合场址地质信息的区域波速结构构建方法，通过将可获得的区域波速结构与目标场地局部波速信息融合用于宽频带地震动数值模拟。对历史地震的模拟表明，采用该方法构建的波速结构可以得到与实际情况相符的宽频带地震动(Wang et al., 2021, 2022)。

7.6 模拟区域地形参数

本文件推荐采用的谱元法进行波场模拟时，每个波长约需要 5 个点来模拟。对于工程抗震需要的宽频带地震动，区域场地数值模型网格尺寸一般都大于 50m，可直接在公开数据源获得的分辨率 30m 以上地形数据基本可以满足需求。如果需要更高精度的地形数值，可通过商业数据源或采用倾斜摄影技术获取。

8 设定地震情景库生成

8.1 考虑地震情景变量

采用运动学震源模型模拟地震断层破裂过程时，需要赋予每个子源相应的破裂参数，包括滑移量、破裂速度、上升时间和滑动方向。通过考虑震源模型中的所有变量参数，采用蒙特卡洛方法对每个发震构造生成完备的地震情景库。

8.2 地震情景数量

本文件采用具有真实物理背景的地震情景进行地震危险性分析，考虑未来可能遭遇地震的所有不确定性，通过足够多的地震情景来得到工程场址的地震危险

性结果。大地震的断层破裂尺度极大，可达数十乃至数百公里，且破裂过程及其复杂，用于宽频带地震动模拟的运动学震源模型可能包含数万乃至数十万个变量。尽管本文将推荐采用的降维方法可以显著减少震源变量空间维度，但需要考虑的变量数量仍然多达数千。因此，需要足够多的地震情景工况才能充分评估工程场址地震危险性结果。根据现有研究，本文件建议对每个发震构造应生成不少于一百万场地震情景进行地震危险性评估。

9 场址地震动模拟

9.1 震源区应变格林张量

对于重大工程场址的地震危险性分析，场址位置是固定的，而对工程场址有重要影响的潜在震源区域的尺度可能达到数十公里乃至数百公里。为了模拟宽频带地震动，数值模型需要非常精细的网格并因此可能具有数十亿乃至数百亿以上自由度。为了得到可靠的地震危险性分析结果，需要考虑尽可能全面的场址可能遭遇的地震情景。采用数值模拟方法直接生成所有考虑地震情景在场址宽频带地震动所需的计算量是难以接受的，因此本文件建议采用附录 C 介绍的伴随模拟方法生成地震情景在场址的地震动，这种方法对于单个场址只需要 3 次完整的数值模拟，使得采用确定性数值方法模拟所有地震情景在场址宽频带地震动的计算量达到可以工程可接受的程度。

9.2 有限厚度震源子断层格林函数

为了生成大地震的宽频带地震动，有限厚度震源模型包含超过数万个多种尺度的子源，并且每个子源也具有多个变量参数。因此，用于地震模拟的有限厚度震源模型的变量数目可能多达数十万。由于场址地震危险性分析需要考虑尽可能多的地震情景，如果需要考虑的变量数目多达数十万，很难在有限的工况下充分考虑场址可能遭遇的地震情景工况。为了解决这个问题，按照附录 D 中方法对震源的变量空间进行降维，得到每个子断层在场址对应的地震动，即每个子断层的格林函数，用于直接合成所有地震情景在场址地震动。

9.3 地震情景对应场址地震动

对于给定破裂过程的地震情景，为了得到其对应的场址宽频带地震动，首先采用预先计算的应变格林张量计算所有子断层两个相互垂直的方向（如断层的走

向和倾向)具有不同上升时间的格林函数。按照附录 D 中子断层格林函数中的定义,对于每种破裂过程,根据子断层的上升时间 T_j 选取预先得到的相应上升时间的 $u_j(T_j, \lambda_j, D_j, t_j)$;根据子断层的滑动角 λ_j 通过调整两个相互垂直方向的格林函数的幅值比例并将其叠加得到相应滑动角的 $u_j(T_j, \lambda_j, D_j, t_j)$;根据子断层的滑移量 D_j 通过放大或缩小子断层格林函数得到相应滑动量的 $u_j(T_j, \lambda_j, D_j, t_j)$;根据子断层的破裂时间 t_j 在时域中平移子断层的格林函数得到相应破裂时间的 $u_j(T_j, \lambda_j, D_j, t_j)$ 。将根据不同破裂过程参数调整后的所有子断层的 $u_j(T_j, \lambda_j, D_j, t_j)$ 叠加即可得到场址最终的宽频带地震动。

10 场址地震危险性评估

本文件全面考虑场址未来可能遭遇地震的不确定性,通过海量地震情景来评估重大工程场址的地震风险。采用确定性宽频带地震动数值模拟方法生成工程场址地震动时程,可以全面考虑地震的真实物理背景,包括震源破裂过程、传播路径和局部场地效应,进而得到更精准的场址地震危险性结果。为了得到重大工程场址强地震动参数,首先需要选取合适的地震强度参数,一般采用峰值加速度,谱加速度或其它工程适用的地震强度参数;然后通过统计所有地震情景在场址地震动的强度参数,得到场址地震危险性曲线;最后按照目前国内外相关研究对最大可信地震参数确定的一般准则,将 15%超越概率对应的地震动参数作为场址设定地震强地震动参数。另外,与传统地震危险性分析方法相比,本文件中方法可以进一步得到给定地震危险性水平的地震情景及场址三维宽频带地震动时程。对于选取的地震强度参数,某一地震危险性水平对应值的地震情景不唯一,为了反映未来可能遭遇地震的随机性与不确定性,本文件建议对同一地震危险性水平,选取该地震危险性水平对应的 3-5 场地震情景在场址生成的地震动时程用于工程结构抗震分析。

五、其他需要说明的问题

无。

标准编制工作组

2024 年 11 月 13 日