

桥梁结构非线性地震响应分析技术要求
(征求意见稿)
编制说明

标准起草组

2025年6月

目 录

一、任务来源、起草单位、协作单位、主要起草人	1
二、制定标准的必要性和意义	2
三、主要工作过程	5
四、制定标准的原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系	6
五、主要条款的说明，主要技术指标、参数、实验验证的论述	9
六、重大意见分歧的处理依据和结果	10
七、采用国际标准和国外先进标准的，说明采标程度，以及与国内外同类 标准水平的对比情况	10
八、贯彻标准的措施建议	11
九、其他应说明的事项	11

一、任务来源、起草单位、协作单位、主要起草人

(一) 任务来源

2022年10月，西南交通大学参加了中国交通运输协会2022年度第三批团体标准项目立项会议，会议纪要号：（〔2022〕第三批（立审）），提出《桥梁非线性地震响应分析建模技术规程》立项申请并汇报，经质询、讨论，通过立项申请。根据中国交通运输协会发布的“中国交通运输协会关于2022年度第三批团体标准项目立项的公告”（中交协秘字〔2023〕3号）要求，进行后续标准编制工作。

(二) 起草单位

本要求由中国交通运输协会牵头组织编制，西南交通大学作为主要起草单位。邀请清华大学，中国地震局工程力学研究所，中铁二院工程集团有限责任公司，中铁大桥勘测设计院集团有限公司，中铁第一勘察设计院集团有限公司，中国铁道科学研究院集团有限公司，成都亚佳工程新技术开发有限公司，成都市大通路桥机械有限公司等单位参与编制工作。

(三) 主要起草人

邓开来，王海深，陈列，刘伟，苑仁安，卢皓，曾显志，宋彦臣，谢海清，屈爱萍，王涛，汪珍，徐腾飞，段佳宏，赵灿晖，康炜，赵健业，王啸霆，张启祥，乔雷涛，文强，金怡新、张鹤，左辛瑞，邵诗颖。

起草人员工作任务如下表：

表1 起草人员工作任务表

序号	工作内容	参与人员
1	总体策划，技术顾问	邓开来，陈列，王涛
2	前期技术调研与资料整理	邓开来，王海深，刘伟，苑仁安
3	标准正文内容编制与验证（1-4章）	邓开来，曾显志，卢皓，谢海清
4	标准正文内容编制与验证（5-6章）	屈爱萍，汪珍，徐腾飞，段佳宏
5	标准正文内容编制与验证（7-8章）	康炜，王啸霆，赵灿晖
6	标准正文内容编制与验证（9章）	张启祥，乔雷涛，文强
7	标准正文内容编制与验证（附录）	金怡新，张鹤，左辛瑞，邵诗颖
8	标准化审查与项目协调	邓开来，宋彦臣，赵健业

二、制定标准的必要性和意义

（一）背景及意义

在交通强国战略的引领下，我国交通基础设施建设蓬勃发展，不断向高地震烈度山区等复杂区域延伸。桥梁作为交通网络的关键节点，其抗震性能直接关系到交通线路的通达性以及抗震救灾的效率，具有极为重要的战略意义。地震作为一种自然灾害，对桥梁结构的破坏力不容小觑，而准确分析桥梁在地震作用下的响应是确保桥梁抗震设计科学合理的基础。

经过多年的技术积累，桥梁在中小地震下的线弹性地震响应分析技术已经趋于成熟，其分析精度和效率得到了行业从业者的广泛认可，并在实际工程中得到了广泛应用。然而，当遭遇强震时，桥梁结构往往会进入非线性状态，此时线弹性分析方法不再适用。桥梁结构的非线性地震响应分析面临着诸多技术难题，其分析结果受到多种因素的影响，包括所采用的基本假定、建模方式以及软件平台等。目前，行业内缺乏一套统一的非线性分析方法，这导致不同研究者或设计单位对同一桥梁进行非线性响应分析时，结果差异较大，甚至可能出现因分析方法不当而导致的错误结论，给桥梁的抗震设计和安全评估带来了极大的不确定性。

从国内现有相关标准来看，虽然大部分标准对桥梁开展非线性分析有所涉及，提出了相应的要求和建议，但在地震作用的详细规定、非线性分析的适用条件、具体的分析方法以及分析模型的构建等方面，还存在不够详细、不够具体的问题。这使得在实际操作中，工程技术人员难以准确把握和执行，影响了桥梁非线性地震响应分析的规范性和准确性。

鉴于此，编制《桥梁结构非线性地震响应分析技术要求》这一行业规范显得尤为迫切和必要。本要求的制订旨在填补行业在桥梁非线性地震响应分析方面的技术空白，促进该技术的健康发展。通过对非线性分析的适用条件进行明确规定，让工程技术人员能够准确判断在何种情况下需要采用非线性分析方法，避免盲目分析或错误地采用线性分析方法。同时，对建模方法提出具体要求，规范建模过程，确保分析模型能够真实、准确地反映桥梁结构的实际受力情况和非线性特性，从而提高分析结果的可靠性。

本要求的实施将有助于保障公路、铁路、市政等各行业桥梁结构非线性地震响应分析的合理性，避免因分析方法不当而导致的桥梁抗震设计不合理或过度设计等问题。通过提升分析的精度和效率，不仅能够为桥梁的抗震设计提供更科学的依据，还能降低工程成本，提高工程效益。此外，该标准还将推动桥梁抗震技术的创新与发展，促进相关技术人才的培养和成长，为我国交通基础设施建设在复杂区域的进一步拓展提供有力的技术支撑，助力交通强国战略的深入实施，保障交通网络在地震等极端情况下的安全稳定运行，为经济社会的可持续发展提供坚实的保障。

（二）必要性

1 创新性

目前，桥梁非线性地震响应分析领域缺乏统一的技术标准，导致分析方法和结果差异较大。本要求首次全面整合了材料本构模型、边界条件模拟、桥梁分析模型、地震作用等核心要素，构建了一个系统化的桥梁结构非线性地震响应分析技术体系。

针对桥梁地震响应分析中需要考虑的材料非线性，在传统钢筋、混凝土、钢材的弹塑性本构模型基础上，本要求考虑了钢筋、钢材的延性损伤与断裂，由此可更加合理地分析强震、巨震下结构桥梁构件的失效行为。

针对桥梁地震响应分析中可能出现的边界非线性，对支座在动轴力下的时变荷载行为进行了定义，将水平地震力考虑为竖向荷载的函数，从而有效表征了动轴力效应对支座水平力的影响，相对传统的双线性支座模型，分析精度有了进一步提升。

针对普通支座在地震下可能出现的竖向脱空-冲击过程，本要求建议采用非线性弹性模型，有效考虑主梁上挠产生的支座脱空，以及脱空后向下拍击的强非线性结构行为。编制组的相关研究表明，考虑该拍击效应，可更加合理地分析垫石、支座受到的竖向峰值荷载。

针对固定支座中限位装置的弹脆性失效行为，本要求建议采用具有“弹性-屈服-失效”全过程特征的挡块模型，并明确了挡块失效后单元的退出机制，更加合理地模拟挡块在地震作用下的受力过程和失效模式。

针对铁路桥梁轨道结构的仿真模拟需求，本要求给出WJ-8扣件横桥向失效全过程参考模型，以及梁缝横向错位-轨道约束反力参考模型等，可更精细模拟轨道结构在地

震下的非线性行为。

在桥梁分析模型和地震作用方面，本要求提出了针对性的具体要求。例如，规定了桥梁结构的建模准则，包括单元类型的选择、单元数量的划分以及多尺度单元的耦合规则等。在大跨度桥梁的地震响应分析中，强调应考虑非一致地震动输入；对于跨越活动断层的桥梁，还需考虑非一致地震动引起的拟静位移差。同时，明确要求以施工过程中模拟结果作为地震分析的初始状态，避免传统方法因忽略成桥应力而引入的误差等，以更准确考虑地震作用并获得更真实的桥梁结构响应。

上述相关创新技术要求均在编制组成员发表的期刊上有所提及，证明了本要求的良好创新性。

2 实用性

本要求具有极强的实用性，全面覆盖了桥梁非线性地震响应分析的关键环节，包括材料本构模型、分析方法、抗震装置等，为工程技术人员提供了明确的操作指南。要求结合实际工程需求，简化复杂问题，确保分析方法易于理解和应用，同时通过大量实际工程案例进行验证，保障了分析结果的可靠性。此外，本要求还根据行业技术发展动态更新，适应不同桥梁类型和应用场景，为桥梁抗震设计提供了科学依据，助力交通基础设施高质量发展。

3 适用性

本要求的适用性广泛且明确，涵盖了公路、铁路、城市道路等行业的桥梁非线性地震响应分析。针对不同类型的桥梁，例如梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥，提出了具体的分析要求和技术指导。同时，本要求还考虑了临跨断层的桥梁分析需求，确保在各种复杂条件下均能为桥梁抗震设计提供可靠的依据，保障工程安全性和抗震性能。

4 紧迫性

随着交通网络向高烈度地震山区拓展，桥梁面临的地震风险日益严峻。实际震害表明，桥梁在强震下表现出显著的非线性行为，甚至出现倒塌，严重影响震后救援和修复。然而，国内现有标准对桥梁非线性地震响应分析的规定尚不完善，缺乏统一的分析方法和模型指导，导致分析结果差异大，甚至出现错误。因此，制定本要求以规范非线性地震响应分析流程、提升抗震设计精度和可靠性，显得尤为紧迫。

三、主要工作过程

（一）起草组工作概述

根据相关要求，中国交通运输协会于2022年下半年正式启动了要求编制工作的筹备，着手组建要求编制起草小组，并全面展开要求编制的相关组织工作。作为主要起草单位，西南交通大学积极行动，广泛收集与本要求相关的各类信息，组织开展深入的调研和验证工作，并积极与各参编单位进行沟通联络，最终明确并确定了要求起草工作组的成员单位，正式成立了要求起草工作组。工作组制定了详细的项目章程，每月定期召开工作例会，严格按照计划有序推进各项工作，顺利完成了要求前期调研、大纲评审、征求意见稿草案评审等一系列重要工作环节。

（二）历次审查会专家审查意见及结论

立项申请与审查

标准起草工作组通过广泛的技术调研、专家咨询以及相关资料的收集整理和消化吸收，在充分总结国内外研究成果的基础上，于2022年8月完成了团体标准《桥梁非线性地震响应分析建模技术规程》的立项申请材料。2022年10月，协会组织行业专家在北京召开立项审查会议，对标准立项报告进行了详细审核，并正式通过了标准项目的编制申请。

工作大纲编制与审核

立项申请获批后，起草小组迅速推进标准编制工作，着手编制标准工作大纲和编制意见草稿。工作大纲草案稿通过微信、邮件等方式提交给参编单位和协会专家进行审核，综合多方意见后，确定了标准起草编制的总体计划内容。根据立项审查会议的要求，标准起草工作组结合编制工作大纲，认真分析、理解和总结，于2024年5月，完成了团体标准《桥梁非线性地震响应分析建模技术规程》的工作大纲的编制工作。2024年7月，协会组织行业专家在北京召开大纲审查会议，提出了以下审查意见：

1. 扩大调研范围，加强针对性；
2. 进一步论证、明确标准的定位和类型；
3. 进一步优化章节结构；
4. 补充有代表性的参编单位；

5. 合理安排计划进度。

根据专家审查意见，标准工作组进一步开展针对性调研，明确标准定位和类型，优化标准结构，并补充完善了分析方法、地震作用等相关规定。同时，通过电子邮件和纸质稿件的方式将修订后的标准递送至行业专家进行评审，并根据反馈意见进行了相应修改。此外，标准编制补充了具有代表性的参编单位，并合理安排了后续编制进度。

征求意见草案编制与审查

2025年4月，协会组织行业专家在北京召开标准征求意见审查会，形成了以下审查意见：

1. 标准名称修改为《桥梁结构非线性地震响应分析技术要求》；
2. 阐述总则内容；
3. 优化章节题目及内容；
4. 删除“符号”相关内容。

2025年5月，标准工作组结合征求意见稿草案评审意见，完成了征求意见稿的修订工作，进一步完善了标准内容，使其更具科学性和实用性。

（三）征求意见及意见处理情况

征求意见阶段尚未开展。

四、制定标准的原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系

（一）编制原则

1 统一性

本要求编制强调统一性，规范了材料本构模型、边界条件和失效机制等核心环节，明确了分析方法和建模流程，统一了技术要求和结果判定标准，确保行业在桥梁非线性地震响应分析中方法一致、结果可靠，提升抗震设计的科学性和规范性。

2 协调性

标准编制注重协调性，充分考虑与现有桥梁抗震设计规范及相关行业标准的衔接，避免冲突与重复。在技术内容上，协调了混凝土、钢材等材料的本构模型，以及支座、

挡块等构件的失效机制，确保整体分析流程的连贯性。同时，兼顾不同桥梁类型和应用场景，平衡技术先进性与工程可操作性，保障标准在行业内顺利实施，推动桥梁抗震设计的规范化与科学化发展。

3 适用性

标准编制充分考虑了适用性，涵盖了多种桥梁类型（铁路桥梁、公路桥梁、市政桥梁、城市轨道桥梁、以及人行桥梁）和不同抗震设防烈度区域。针对不同场景，明确了非线性地震响应分析的具体要求，包括材料模型、边界条件和失效判据等。同时，本要求结合实际工程需求，简化复杂问题，确保分析方法易于理解和应用，为桥梁抗震设计提供科学依据，保障工程安全。

4 一致性

本要求编制遵循一致性原则，确保技术要求、分析方法和模型构建在全行业内统一规范。从材料本构模型到边界条件设定，再到失效机制表征，各环节均采用标准化流程，避免因方法差异导致的结果偏差。同时，标准在不同桥梁类型和应用场景中保持一致的技术准则，保障分析结果的可比性和可靠性，为桥梁抗震设计提供统一的科学依据，推动行业技术的规范化发展。

5 规范性

本要求编制严格遵循规范性原则，确保内容科学严谨、逻辑清晰。从材料本构模型到边界条件模拟，再到失效机制表征，各环节均制定了明确的技术要求和操作流程。标准还规定了详细的建模准则、单元划分规则以及多尺度单元耦合方法，确保分析过程的规范性。同时，标准明确了施工过程模拟作为地震分析初始状态的要求，避免因简化而引入误差，为桥梁抗震设计提供可靠的依据。

6 目标性

本要求编制明确以提升桥梁抗震性能为目标，聚焦非线性地震响应分析的关键环节，规范技术要求和操作流程。旨在通过科学合理的分析方法，准确评估桥梁在强震下的行为，为抗震设计提供精准依据，保障桥梁工程的安全性和可靠性，助力交通基础设施高质量发展。

（二）技术要素确定原则

1 目的性原则

本要求的目的性体现在通过技术要素的精细化设计，精准规范桥梁非线性地震响应分析的全流程。技术要素聚焦于提升分析精度、优化建模方法、明确失效判据，为桥梁抗震设计提供可靠依据，确保技术要求与抗震目标高度契合，保障桥梁结构安全。

2 性能特性原则

本要求明确要求分析方法和模型应精准反映桥梁结构在地震作用下的力学行为，包括材料的非线性特性、构件的失效模式以及整体结构的抗震性能，确保分析结果能够真实、可靠地指导桥梁抗震设计，保障结构在地震下的安全性和功能性。

3 可证实性原则

本要求对桥梁非线性地震响应分析的全流程进行了详细规定，涵盖材料本构模型、分析方法、分析模型、地震作用等关键环节。通过明确各环节的技术要求和操作流程，确保分析结果的准确性、可重复性和可靠性，充分体现了标准的可证实性。

（三）与现行法律、法规的关系

无。

（四）与相关标准的差异性分析

表2 与现行标准的差异对比

标准号	标准名称	本要求的差异
JTGT 2231-01—2020	《公路桥梁抗震设计规范》	填补空白：形成完整的桥梁结构非线性地震响应分析逻辑框架及逻辑结构。
GB 50111-2006	《铁路工程抗震设计规范》（2009年版）	细化提升：明确了非线性地震响应分析的适用条件、分析方法和分析模型等关键要素的详细要求，对轨道结构的建模技术提出了建议。
T/CECS 906—2021	《建筑结构非线性分析技术标准》	体现行业特色：体现了桥梁的结构设计特征与施工过程特征。

五、主要条款的说明，主要技术指标、参数、实验验证的论述

（一）主要条款的说明

1 确定标准主要内容的论据

1) 非线性分析的桥梁类型（3.2条）

理论依据：本要求参考《公路桥梁抗震设计规范》（JTGT 2231-01—2020）中关于需开展非线性地震响应分析的桥梁类型的相关规定，并在此基础上进行了进一步的补充与完善，以提升分析结果的科学性与准确性，确保桥梁抗震设计的可靠性。

2) 桥梁施工过程的考虑（4.1.3条）

数据依据：通过对大跨度劲性骨架钢管混凝土桥梁的抗震性能分析发现，在极罕遇地震作用下，若考虑施工过程的影响，桥梁的损伤演化规律将发生显著变化，跨中挠度显著降低，同时劲性骨架钢管混凝土拱圈截面的抗弯矩能力会降低12%-17%。

3) 一维单元选择（4.2.3条）

数据依据：根据经典钢筋混凝土结构理论，当剪跨比大于2.5时，钢筋混凝土结构主要表现为弯曲破坏模式，可采用一维单元进行模拟。

4) 支座竖向力学模型（6.2.2条）

当轴力变化超过 $\pm 30\%$ 时，需要考虑动轴力效应。30%的取值来源于橡胶支座规范中，测试支座竖向刚度的荷载取值范围。

5) 轨道结构分析模型（附录F）

数据依据：根据项目组完成的WJ-8扣件破坏试验，以及基于试验完成的精细化模型分析得到，该模型可支撑采用WJ-8扣件无砟轨道结构的非线性分析。

2 标准中通用内容的编写要求

依据征求意见审查会专家组意见和建议，现将标准立项时名称为《桥梁结构非线性地震响应分析技术规程》，修改为《桥梁结构非线性地震响应分析技术要求》。

（二）主要技术指标、参数、实验验证的论述

本要求系统性地规定了桥梁非线性地震响应分析的全过程，涵盖基本要求、分析方法与模型、主体结构、抗震装置、基础与附属结构以及大跨度桥梁的特殊要求，为桥梁抗震设计提供了全面、科学的技术指导，确保分析结果的准确性和可靠性：

1 基本要求（第3章）

本章明确了桥梁非线性地震响应分析需考虑的非线性因素，包括材料、几何和边界非线性，并规定了必须进行非线性分析的桥梁类型，如大跨度桥梁、高墩桥梁、抗震设防烈度较高的桥梁等。

2 分析方法和分析模型（第4章）

本章详细阐述了非线性地震响应分析应采用的方法（如动力时程分析）、方法参数选择、分析模型的建立，以及地震作用的考虑方式，确保分析过程科学合理。

3 主体结构（第5章）

本章针对钢筋混凝土结构和钢结构两种常见桥梁结构，规定了材料本构模型、单元类型选择和建模原则，为桥梁主体结构的非线性分析提供了明确的技术指导。

4 抗震装置（第6章）

本章聚焦于桥梁抗震装置（如支座、阻尼器、挡块等），提供了详细的计算理论和关键参数的计算方法，明确了抗震装置的非线性模拟要求。

5 基础和附属结构（第7-8章）

本章对桥梁基础和附属结构的模拟方法进行了详细规定，确保这些部分在非线性地震响应分析中能够被准确模拟。

6 大跨度桥梁（第9章）

本章专门针对大跨度桥梁，强调在非线性地震响应分析中需考虑的特殊因素，如成桥应力状态、变形状态、建模方式以及非一致地震作用，为大跨度桥梁的抗震设计提供针对性指导。

六、重大意见分歧的处理依据和结果

本要求制定过程未发生过重大意见分歧。

七、采用国际标准和国外先进标准的，说明采标程度，以及与国内外同类标准水平的对比情况

本要求没有涉及到相关国际标准。

本要求在符合国家和行业现行有关标准规定的前提下，充分吸纳、总结了已有的类似标准的特色，与《建筑结构非线性分析技术标准》（T/CECS 906-2021）相比，本要求集中体现了桥梁结构特征，根据桥梁结构形式、桥址场地特征，提出了更具针对性的要求和建议。

本要求的总体技术水平属于国内先进水平。

八、贯彻标准的措施建议

本要求发布后建议在全国范围内进行该标准的宣贯工作，同时建议相关专家在桥梁抗震领域、相关高等院校和企业进行宣传和推荐。

建议作为推荐性标准颁布，在批准发布3个月后实施。

九、其他应说明的事项

（一）涉及专利等应说明的事项

无。

（二）变更信息

无。