

基于规范谱拟合的人工地震动持时对 RC 框架结构抗倒塌能力影响

韩建平^{1,2}, 孙小云^{1,2}, 周颖³

- (1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃兰州 730050;
2. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 甘肃兰州 730050;
3. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 现行抗震设计规范中关于地震动持时的规定不明确, 而持时对在罕遇地震作用下结构的非线性地震响应及抗倒塌能力评估影响较大。基于规范反应谱拟合地震动持时分别为 20、40、60 s 的人工地震波各 10 条, 利用 OpenSees 分析软件建立了一钢筋混凝土框架-填充墙结构教学楼的三维空间模型, 以这些人工地震动为输入进行增量动力分析, 得到对应于不同持时记录的结构平均增量动力分析曲线, 进而分析其最大顶点位移、最大残余顶点位移和最大残余层间位移角与各地震动记录有效持时之间的相关性, 给出了结构在不同持时记录以其基本周期对应的谱加速度 $S_a(T_1)$ 表示的抗倒塌能力, 及其与有效持时的关系和不同持时与不同 $S_a(T_1)$ 相应的倒塌概率。分析结果表明: 当地震动强度水平相同时, 较长持时的地震动记录可使结构产生较大的层间位移角和较高的倒塌概率, 并且随着有效持时的增加, 结构的抗倒塌能力呈降低趋势, 而位移需求并不能完全说明持时对结构倒塌发生的影响。

关键词: RC 框架-填充墙结构; 有效持时; 人工地震动; 残余位移; 最大层间位移角; 抗倒塌能力
中图分类号: TU375.4 TU311.41 **文献标志码:** A

Effect of code-spectrum-matched artificial ground motion duration on collapse resistance capacity of RC frame

HAN Jianping^{1,2}, SUN Xiaoyun^{1,2}, ZHOU Ying³

- (1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
3. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The requirement for ground motion duration is not clear in current seismic design code. And ground motion duration has great influence on nonlinear seismic responses and evaluation for collapse resistance capacity under severe earthquake. First, 10 artificial ground motion records with 20 s, 40 s and 60 s duration were generated based on code response spectrum respectively. The three-dimensional model of an infilled RC frame teaching building was built by OpenSees, and incremental dynamic analysis (IDA) was carried out on the model under these artificial ground motion records. Furthermore, the geometric mean IDA curves for all records with different duration were obtained. And correlation of the maximum roof displacement, maximum residual roof displacement and maximum residual inter-story drift ratio with the significant duration was investigated. Finally, the collapse resistance capacity in terms of $S_a(T_1)$, spectral acceleration at the fundamental period of the structure, and its correlation with significant duration of all ground motion records with different duration and collapse probability under different $S_a(T_1)$ were obtained. The analytical results show that records with longer duration can induce larger inter-story drift ratio and higher collapse probability for the structure when intensity levels are similar. With the increase of the significant duration, structural collapse resistance capacity tends to decrease. It seems that the drift demand is not a good indicator for the influence of duration on collapse when the structure is subjected to ground motion with long duration.

Keywords: infilled RC frame structure; significant duration; artificial ground motion; residual displacement; maximum inter-story drift ratio; collapse resistance capacity

基金项目: 国家自然科学基金项目(51268036), 甘肃省科技支撑计划资助(1204FKCA126), 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT13068)。

作者简介: 韩建平(1970—)男, 甘肃宕昌人, 工学博士, 教授。E-mail: jphan@lut.cn
收稿日期: 2015年7月

0 引言

地震动持续时间是地震动特性的三个要素之一,尽管其对结构损坏的影响目前还没有统一的认识,但是在2010年智利8.8级地震和2011年日本东北9.0级地震中,由于长持时引起的结构破坏较为明显^[1]。因此有学者认为,长持时地震动比短持时地震动更具有破坏性^[2]。而目前的抗震设计规范是基于概率的具体场地设计谱,对于持时的规定比较模糊,即要求所选地震动的有效持续时间一般为结构基本周期的5~10倍^[3]。

已有的研究^[4]认为,对于无退化特征的结构,对其进行非线性分析,强震持时影响一般不大;对于有退化特征的结构,尤其是具有下降段恢复力特性,持时对结构最大反应的影响较大。同时研究^[5-6]也表明,虽然地震动持时对结构的最大变形(如最大层间位移和最大层间位移角)没有影响,但与累积破坏指标相关性较好。目前,对于持时特性影响的研究,大多采用谱匹配地震动记录的方法以消除频谱特性对结构地震响应的影响^[7]。也有直接借鉴广义条件强度指标(generalized conditional intensity measure, GCIM)计算一致风险、预期地震动持时的条件概率分布,进而研究持时特性的影响^[8-9]。

为消除频谱特性对结构地震响应的影响,本文作者基于规范谱拟合了峰值加速度为0.4g、持时分别为20、40、60s的人工波地震动记录各10条,采用地震动有效持时的概念,提取了30条地震动的5%~95%有效持时数据进行结构动力分析。算例为一按GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》设计的8度(0.2g)设防的某小学教学综合楼RC框架结构,考虑填充墙平面内外相互作用进行三维建模,选用上述30条人工波,采用OpenSees分析软件对该结构进行增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)。通过IDA的结果,评估地震动持时对该结构抗倒塌能力的影响。

1 地震动持时定义

目前地震动持时定义有很多种,但比较一致的认识有以下两点:一是地震动持时应与地震动幅值相联系;二是地震动持时应与地震动中对结构响应起决定作用的时间段有关,即为主震段或强震段的持续时间^[9]。

为此,地震动持时为地面运动对结构反应起重要作用的那部分持续时间,更长的地震动持时使结构具有更高的累积耗能能力。目前,对地震动持时

的定义较多^[4],Bommer等将这些持时指标主要分为下述三种。

1.1 界定持时 t_b

根据加速度的绝对值定义,即取加速度记录上绝对幅值在第一次和最后一次达到或超过事先规定的值 a_0 (如0.1g或 $0.1a_{PG}$)之间所经历的时间作为地震动持时,按规定限值的不同,分为绝对界定持时和相对界定持时。具体定义如图1所示。

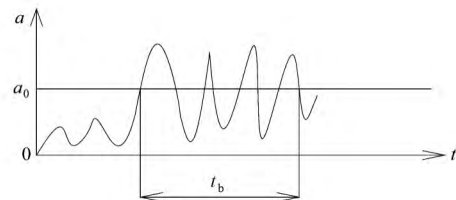


图1 界定持时定义示意

Fig. 1 Schematic diagram of bracketed duration definition

界定持时 t_b 的定义在概念上比较简单,但是限值的选取具有较强的主观性,而且限值的选择对结果有重大的影响。此外,当记录的峰值加速度较大时,相应的规定限值也会较大,有可能地面运动尚未进入定义的地震动持时阶段时,结构已经进入非线性阶段。

1.2 一致持时 t_u

将记录的加速度绝对值达到或超过规定值的持续时间间隔的和定义为一致持时,与界定持时 t_b 类似,分为绝对一致持时和相对一致持时。具体定义如图2所示。

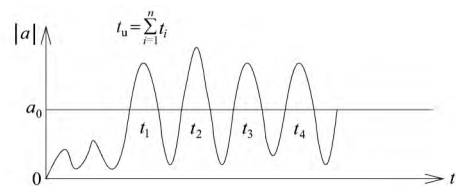


图2 一致持时定义示意

Fig. 2 Schematic diagram of uniform duration definition

王德才^[10]的研究表明,地震动一致持时与结构能量反应有较好的相关性。与界定持时 t_b 相比,一致持时 t_u 的影响要小,但由于时间段不连续,会给使用带来不便。

1.3 有效持时 t_s

根据地面运动能量释放,取其不同百分比之间的时间段,如Trifunac等^[11]给出的90%有效持时,即从地震动能量达到总能量的5%开始至总能量的95%为止所经历的时间。具体表达式为

$$I(t) = \frac{\int_0^t a^2(t) dt}{\int_0^{t_{total}} a^2(t) dt} \quad (1)$$

式中: $a(t)$ 为地震动加速度时程, t_{total} 为地震动总持

时, $I(t)$ 是一个值从 0 到 1 的函数。参数的具体定义见图 3。

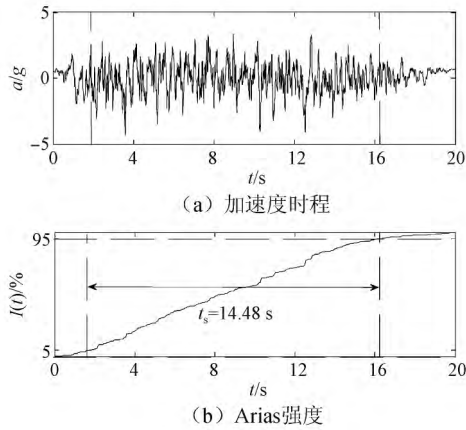


图 3 地震动 5%~95% 有效持时的计算
Fig. 3 Computation of 5%~95% significant duration of a ground motion

有效持时 t_s 考虑到了整个加速度时程的特征并且是一个连续的时间段,因此是目前应用较多的一种强震持时定义。Bradley^[12] 认为采用有效持时评估结构响应是最适合的。

2 人工波地震动持时

为了消除峰值加速度和频谱特性的影响,仅考虑地震动持时对结构响应的影响,基于规范谱拟合 30 条人工波,使其具有相同的峰值加速度 ($0.4g$) 和相似的频谱特性,采用有效持时来定义强震持时。以第 6 条人工波为例,有效持时的计算结果见图 3。提取各条地震动的有效持时见表 1。

表 1 所生成的人工波地震动持时
Table 1 Duration of selected artificial ground motion records

序号	t_{total}/s	t_s/s	序号	t_{total}/s	t_s/s	序号	t_{total}/s	t_s/s
1	20	14.46	11	40	25.36	21	60	37.17
2	20	14.53	12	40	25.64	22	60	37.78
3	20	13.88	13	40	26.98	23	60	38.08
4	20	13.75	14	40	26.21	24	60	39.15
5	20	14.37	15	40	26.64	25	60	37.60
6	20	14.48	16	40	25.15	26	60	37.43
7	20	14.58	17	40	25.76	27	60	37.80
8	20	13.95	18	40	26.99	28	60	37.85
9	20	13.70	19	40	25.79	29	60	39.10
10	20	14.18	20	40	26.60	30	60	37.57

3 算例分析

3.1 多层 RC 框架-填充墙结构有限元分析模型

图 4 所示为某小学综合楼结构平面。该结构为 6 层 RC 框架,1 层层高 4 m,其他层层高均为 3.6 m。

填充墙采用加气混凝土砌块,砌体砂浆采用 M5 混合砂浆,砌筑质量等级为 B 级。楼板采用厚为 270 mm 的空心楼板,框架柱与框架梁均采用 C40 混凝土,楼板采用 C30 混凝土。梁柱受力主筋均采用 HRB400 钢筋,箍筋采用 HPB300 钢筋。抗震设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度值为 $0.2g$,场地类别为 II 类,设计地震分组为第三组,场地设计特征周期为 0.45 s,建筑抗震设防类别为重点设防类。由于此实际工程中梁柱截面尺寸及配筋的复杂多样,在此不一列举。

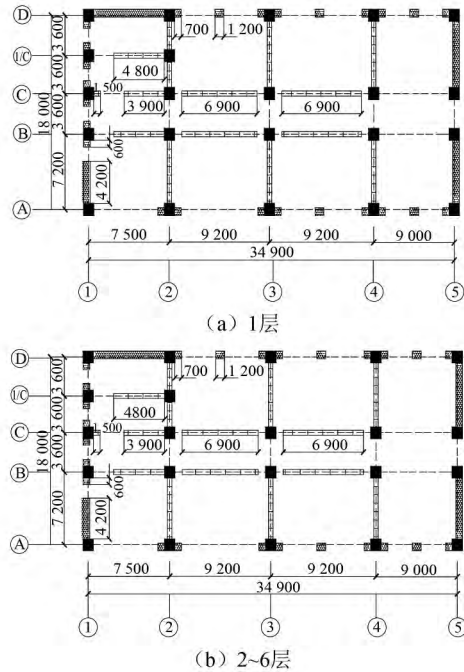


图 4 6 层 RC 框架-填充墙结构平面布置
Fig. 4 Floor plan of 6-story infilled RC frame structure

采用 OpenSees 有限元软件进行分析,混凝土本构采用 Concrete02,并考虑核心区混凝土的约束效应,分别对核心区混凝土和保护层混凝土的本构关系进行定义^[13-14]。钢筋的本构模型采用 ReinforcingSteel,考虑了钢筋后期强度退化。梁、柱采用纤维单元建立整体框架的分析模型^[13-15]。梁、柱均采用基于位移的梁柱单元,每个梁、柱单元均设置 5 个积分点。柱的几何坐标转换选用 P-Δ 转换器,以考虑结构侧移引起的二阶效应^[14]。将柱截面混凝土划分为矩形块状网格,每一网格假定为一根纤维,钢筋部分每一根钢筋假定为一根纤维。考虑纵向钢筋和箍筋对核心混凝土的约束效应,将混凝土分为外包混凝土和核心混凝土两部分,并分别对其进行本构参数定义。

填充墙采用如图 5 所示的纤维离散化梁-柱单元的填充墙模型,采用 2 个带塑性铰的梁单元进行模拟,考虑平面内与平面外的相互作用^[16-17],其表达式为

$$\left(\frac{M_N}{M_{N0}}\right)^{3/2} + \left(\frac{P_H}{P_{H0}}\right)^{3/2} \leq 1.0 \quad (2)$$

式中, M_N 是平面内有力作用时的平面外受弯承载力, M_{N0} 是平面内没有力作用时的平面外受弯承载力, P_H 是平面外有力作用时等效支撑的轴向承载力, P_{H0} 是平面外无力作用时等效支撑的轴向承载力。

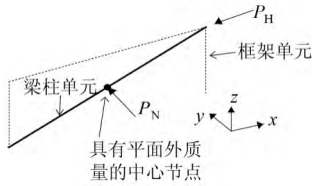


图5 纤维离散化梁-柱单元的填充墙模型
Fig. 5 Proposed infill model using beam-column elements with fiber discretization

3.2 增量动力分析结果

以阻尼比为 5% 的结构基本周期 T_1 对应的加速度谱值 $S_a(T_1, 5\%)$ 为强度指标, 调整表 1 人工波记录, 对该框架结构进行增量动力分析, 提取每次分析得到的最大层间位移角的平均值, 得到的 IDA 曲线, 结果见图 6。

由图 6 可见, 对于三种具有不同总持时的记录, 结构最大层间位移角平均值达到某一值 (约为 0.015) 以前, 具有不同总持时地震动记录作用引起的结构响应相差不大, 但当最大层间位移角平均值超过这一值, 结构最大层间位移角平均值随不同持时记录的 $S_a(T_1, 5\%)$ 的变化有所不同。当各持时记录的 $S_a(T_1, 5\%)$ 相同时, 较长持时记录会使结构产生较大的最大层间位移角。

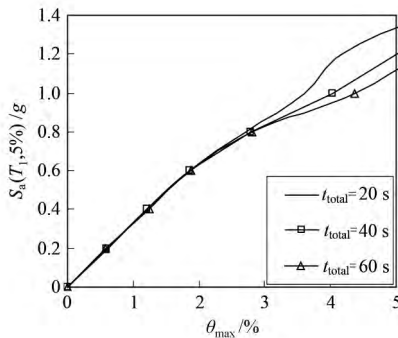
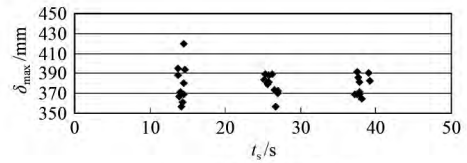


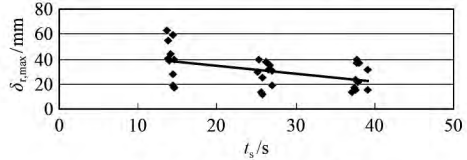
图6 不同总持时记录的平均 IDA 曲线
Fig. 6 Mean IDA curves of different total duration records

分析中对所有调整后的记录统一增加了 20 s 的零强度持时段, 以获得结构即将倒塌 ($\theta_{max} = 1/20$) 时较稳定的顶点最大残余位移 $\delta_{r,max}$ 、最大残余层间位移角 $\theta_{r,max}$ 以及顶点最大位移 δ_{max} 随着有效持时 t_g 增加的变化趋势, 见图 7。

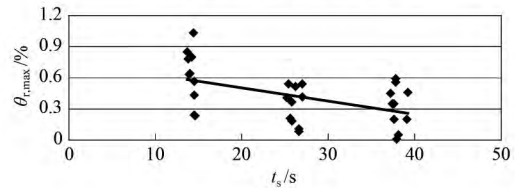
由图 7 可见, 随着有效持时的增加, 残余位移呈减小的趋势, 而最大顶点位移没有明显变化。这与 Raghunandan 等^[2]得出的结论一致, 地震动持时与结构的最大反应关系不大。



(a) 顶点最大位移 δ_{max}



(b) 顶点最大残余位移 $\delta_{r,max}$



(c) 最大残余层间位移角 $\theta_{r,max}$

图7 倒塌时位移响应与有效持时的相关性

Fig. 7 Correlation of displacement responses with significant duration of ground motion before collapse

3.3 结构抗倒塌能力评估

借鉴 FEMA350 的建议, 以谱加速度 $S_a(T_1, 5\%)$ 和最大层间侧移角 θ_{max} 分别作为强度指标 (intensity measure, IM) 和损伤指标 (damage measure, DM), 以 20% 初始斜率对应的 $S_a(T_1, 5\%)$ 和 $C_{DM} = \theta_{max} = 1/20$ 构成 DM-IM 混合准则作为倒塌判定准则^[17], 获得有效持时与对应于每条地震动记录结构倒塌时的 $S_{a,coll}(T_1, 5\%)$ 之间的相关性, 见图 8。

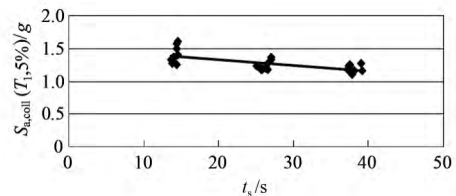


图8 抗倒塌能力与地震动有效持时之间的相关性

Fig. 8 Correlation of collapse resistance capacity with significant duration of ground motion

由图 8 可见, 随着地震动有效持时的增大, 结构的抗倒塌能力呈现降低的趋势, 即有效持时越大结构易发生倒塌。

不同 $S_a(T_1, 5\%)$ 下结构倒塌概率 P_{coll} 见图 9。

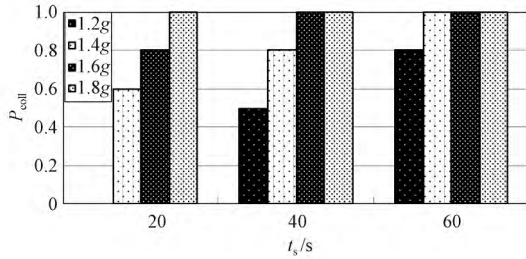


图9 不同总持时、不同强度下结构的倒塌概率

Fig.9 Structural collapse probability under different total duration records with different intensity

由图9可见,较长持时记录使结构发生倒塌的概率大于较短持时记录使结构发生倒塌的概率。

4 结论

1) 强度相同的地震动,较长持时的地震动会使结构产生较大的层间位移角,并且随着地震动强度的增大,这种差异会愈加明显。

2) 当最大层间位移角达到1/20时,其最大残余位移(最大残余层间位移角和顶点最大残余位移)以及顶点最大位移与有效持时相关性不大,结构位移需求并不能够说明地震动持时对结构倒塌的影响。

3) 地震动强度一定时,持时的增加会降低结构的抗倒塌能力,并且会使结构发生倒塌的概率显著增长。

参 考 文 献

[1] Midorikawa S, Miura H, Si H. Preliminary analysis for characteristics of strong ground motion from Gigantic Earthquakes [C]// Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo, Japan: International Association for Earthquake Engineering, 2012: Paper No. 0941.

[2] Raghunandan M, Liel A B. Effect of ground motion duration on earthquake-induced structural collapse [J]. Structural Safety, 2013, 41(3): 119-133.

[3] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))

[4] 李杰, 李国强. 地震工程学导论[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 51-53. (LI Jie, LI Guoqiang. Introduction to earthquake engineering [M]. Beijing: Seismological Press, 1992: 51-53. (in Chinese))

[5] Foschaar J C, Baker J W, Deierlein G G. Preliminary assessment of ground motion duration effects on structural collapse [C]// Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo, Japan: International Association for Earthquake Engineering,

2012: Paper No. 5363.

[6] Lin L, Naumoski N, Saatcioglu M, et al. Effects of strong-motion duration on the response of reinforced concrete frame buildings [C]// Proceedings of the 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering. Toronto, Ontario, Canada: Canadian Association for Earthquake Engineering, 2010: Paper No. 810.

[7] Hancock J, Bommer J J. Using spectral matched records to explore the influence of strong-motion duration on inelastic structural response [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(4): 291-299.

[8] Bradley B A. A generalized conditional intensity measure approach and holistic ground-motion selection [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2010, 39(12): 1321-1342.

[9] Reagan C, Baker J W, Deierlein G G, et al. Hazard-consistent ground motion duration: calculation procedure and impact on structural collapse risk [C]// Proceedings of the 10th U. S. National Conference on Earthquake Engineering. Oakland, CA: Earthquake Engineering Research Institute, 2014.

[10] 王德才. 基于能量分析的地震动输入选择及能量谱研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010: 40-43. (WANG Decai. Research on energy spectrum and the selection of earthquake accelerograms for dynamic analysis based on energy [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010: 40-43. (in Chinese))

[11] Trifunac M D, Brady A G. A study on the duration of strong earthquake of ground motion [J]. Bulletin of the Seismological Society of American, 1975, 65(3): 581-626.

[12] Bradley B A. Correlation of significant duration with amplitude and cumulative intensity measures and its use in ground motion selection [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2011, 15(6): 809-832.

[13] 韩建平, 杨军平. 考虑结构构件退化特性评估大震下RC框架抗整体性倒塌能力[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(6): 111-122. (HAN Jianping, YANG Junping. Investigation on global collapse resistance capacity of RC frame under severe earthquake considering deterioration characteristic of structural components [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(6): 111-122. (in Chinese))

[14] Mazzoni S, McKenna F, Fenves G L. The OpenSees getting started manual [EB/OL]. [2015-07-15]. <http://opensees.berkeley.edu>.

[15] Kunnath S K, Heo Y A, Mohle J F. Nonlinear uniaxial material model for reinforcing steel bars [J]. Journal of

Structural Engineering , ASCE , 2009 , 135 (4) : 335–343.

[16] Kadysiewski S , Mosalam K M. Modeling of unreinforced masonry infill walls considering in-plane and out-of-plane interaction [R]. Report No. PEER 2008/102. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center , University of California at Berkeley , 2009.

[17] 韩建平 ,黄林杰 ,孙小云. 考虑填充墙平面内外相互

作用评估 RC 框架-填充墙结构抗整体性倒塌能力 [J/OL]. 工程力学 , 2015 [2015-12-01]. <http://gclx.tsinghua.edu.cn/CN/10.6052/j.issn.1000-4750>. (HAN Jianping , HUANG Linjie , SUN Xiaoyun. Global collapse resistance capacity investigation of infilled RC frame considering in-plane and out-of-plane interaction of infill walls [J]. Engineering Mechanics , 2015 [2015-12-01]. [http://gclx.tsinghua.edu.cn / CN/10.6052/j.issn.1000-4750](http://gclx.tsinghua.edu.cn/CN/10.6052/j.issn.1000-4750). (in Chinese))