

# **Vliv seizmického zatížení na odezvu železobetonových rámových konstrukcí**

Karel Pohl

The objective of this paper describe a non-linear analysis of reinforced concrete frame structures and assignment its response to seismic load. We observe the change of natural frequency in dependence of stress of the structure and creation of plastic joints to final force effect of seismic load. The benefit is also about an assignment of ductility of the structure and influence of ductility to seismic response.

## **1. Úvod**

Cílem tohoto projektu je stanovit odezvu konstrukcí na seizmické zatížení, která zohlední všechny podstatné vlivy uplatňující se při tomto mimořádném zatížení. Po ocenění jednotlivých vlivů, bude následovat doporučení pro projekční praxi, kde jsou návrhové možnosti často omezeny přílišnou idealizací výpočetního modelu.

Idealizace výpočetních modelů stavebních konstrukcí, jako je předpoklad lineárního chování stavebních materiálů, může vést k velmi nepřesnému stanovení jejich odezvy. Tato nepřesnost se projeví zejména u konstrukcí, kde použitý materiál vykazuje výrazné nelinearity (železobetonové konstrukce) a kde se zatížení blíží nebo dosahuje mezních stavů napjatosti konstrukce. Seizmické zatížení je při posuzování stavebních konstrukcí často uvažováno jako zatížení mimořádné, s pravděpodobností výskytu v řádu několika desítek let. Při tomto mimořádném zatížení se připouští takový vznik a vývoj plastických kloubů v konstrukci, který nepovede k jejímu kolapsu a tím ohrožení lidských životů a velkých materiálních škod. Jedná se tedy o zatížení, kde by předpoklad lineárního chování materiálů vedl k nedostatečnému popisu napjatosti a přetvoření konstrukce.

## **2. Vliv napjatosti konstrukce na její dynamické vlastnosti**

Pro zvýšení přesnosti výpočtu je nutno použít nelineární materiálovou analýzu stavebních konstrukcí, která nám umožňuje získat lepší představu o odezvě konstrukce na zatížení překračující předpoklad lineárního chování materiálu. Tato materiálová nelineární analýza umožňuje sledovat vývoj napjatosti a přetvoření konstrukce a jejích částí za předpokladu plastického přetváření a vzniku trhlin.

Stav napjatosti konstrukce má zásadní vliv na její tuhost. Postupným

přítěžováním konstrukce dochází k jejímu „změkčování“, které se může výrazně projevit změnou dynamických vlastností konstrukčního systému. Mezi tyto dynamické vlastnosti konstrukce řadíme zejména frekvence a tvary vlastního kmitání. U běžných lineárních úloh se předpokládá, že přitížení a tedy změna napjatosti konstrukce neovlivní tyto dynamické vlastnosti. Tímto se zanedbávají schopnosti konstrukce, které mohou mít u dynamického zatížení podstatný význam.

Výrazně dynamické zatížení, kterým seizmické zatížení je, se z důvodu komplikovanosti úlohy často řeší jako statická úloha metodou rozvoje do tvarů vlastního kmitání, kde se přihlíží k disipačním schopnostem konstrukce zavedením součinitele duktility. Velikost seizmických sil se v takovémto případě stanovuje pomocí spektra odezvy, které vyjadřuje pohyb při zemětřesení v daném místě na povrchu. Seizmické síly jsou zde vyjádřeny jako funkce frekvence vlastního kmitání. Dále je zde přihlíženo k počtu tvarů vlastního kmitání uvažovaných ve výpočtu, pro dosažení požadované přesnosti výpočtu.

Zavedením nelineárního výpočtu pro stanovení frekvence a tvarů vlastního kmitání, respektující skutečný stav napjatosti v konstrukci při seizmickém zatížení, můžeme zjistit podstatnou změnu dynamických vlastností. „Změkčování“ konstrukce dochází ke snižování hodnoty frekvence vlastního kmitání a postupným vytvářením plastických kloubů i ke změně tvarů vlastního kmitání. Touto změnou dynamických vlastností můžeme rozumět zvyšování odolnosti konstrukce proti nárůstu seizmického zatížení.

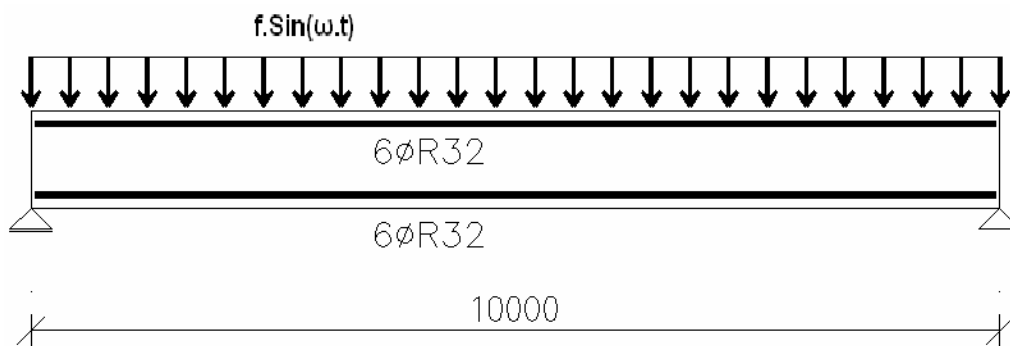
Detailní nelineární analýzou zjistíme u konstrukcí podstatný nárůst posunutí oproti lineárnímu výpočtu a přerozdělení vnitřních sil, v závislosti na velikosti zatížení. Hodnoty posunutí mohou dosahovat výrazného nárůstu, ale pro posuzování konstrukcí na účinky mimořádných zatížení není tento mezní stav rozhodující. Rozhodující pro bezpečné přenesení účinku seizmického zatížení je rozdělení napjatosti v konstrukci. Zde se snížení frekvence vlastního kmitání a tím redukce přístupujících seizmických sil může projevit jako velmi příznivý faktor ovlivňující odolnost konstrukce.

Pro idealizované lineární úlohy je zcela podstatné stanovení takové hodnoty součinitele duktility, který bezpečně zohlední disipační schopnosti konstrukce a zároveň přihlédně k ekonomickým požadavkům na výstavbu. Pro návrh stavebních konstrukcí odolných vůči zemětřesným účinkům je důležité v maximální míře umožnit tvorbu plastických kloubů před vznikem kinematického mechanismu. Jedná se tedy především o konstrukční záležitost (tuhý sloup – měkký trám, dostatečné vyztužení železobetonových konstrukcí v místech potenciálního vzniku plastických kloubů pro zvýšení jejich disipačních schopností apod.). Vhodným konstrukčním uspořádáním, tuhostním a hmotnostním „naladěním“ konstrukce se může výrazně zvýšit její odolnost vůči seismickému zatížení.

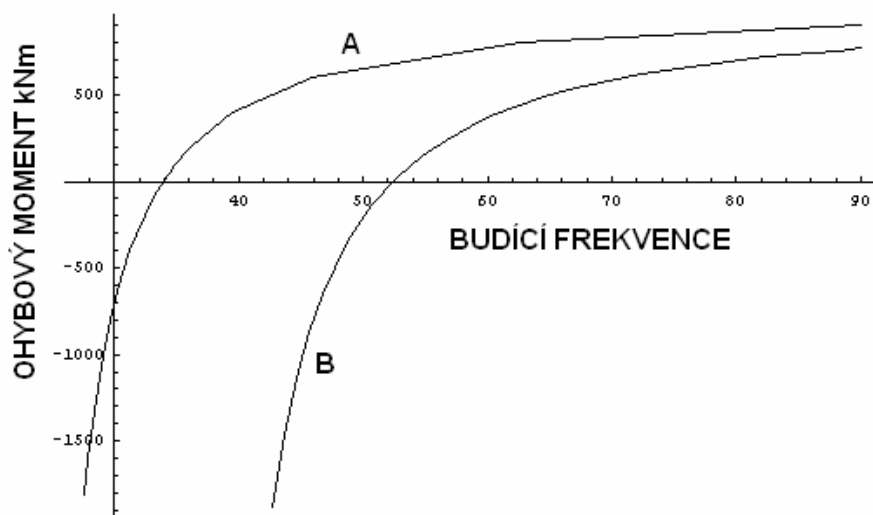
### 3. Odezva rámové železobetonové konstrukce

Vliv nelinearity na změnu dynamických vlastností bude ukázán na železobetonovém prostém nosníku, který je zatížen rovnoměrným spojitým zatížením, které je harmonické s proměnnou budící frekvencí (viz obr.1). Byla sledována odezva v podobě maximálního ohybového momentu. Odezva byla stanovena jak lineárním, tak nelineárním výpočtem. Zde je patrné, že došlo k výraznému posunutí funkce odezvy a to takové, že v případě lineárního výpočtu se můžeme dopustit výrazné chyby v návrhu, vedoucí ke kolapsu konstrukce (viz obr.2).

Obr. 1 Železobetonový prostý nosník zatížený harmonickým zatížením s proměnnou budící frekvencí.



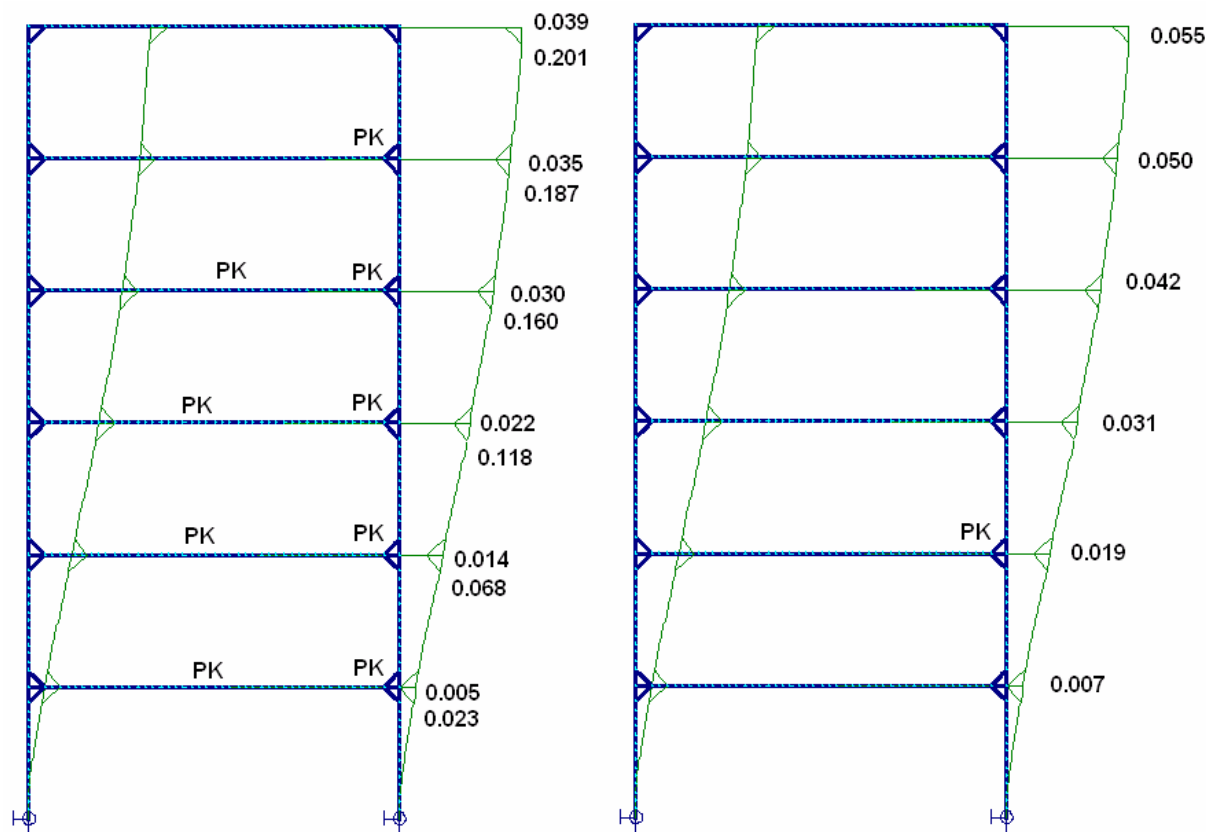
Obr. 2 Odezva železobetonového prostého nosníku, stanovena lineárním a nelineárním výpočtem.



A - NELINEÁRNÍ ODEZVA ŽELEZOBETONOVÉHO MATERIÁLU  
B - LINEÁRNÍ ODEZVA BETONOVÉHO MATERIÁLU

Odezva konstrukce na seizmické zatížení byla provedena na železobetonové rámové konstrukci. Konstrukce byla vystavena účinku stálého a provozního zatížení a seizmickému zatížení odpovídajícímu špičkové hodnotě efektivního zrychlení  $a_g = 0.85 \text{ ms}^{-2}$ . Na takto vyvozené zatížení byl proveden návrh konstrukce a její vyztužení dle normy ČSN P ENV 1992-1-1. Pro návrh vyztužení byl uvažován součinitel duktility  $\eta = 2.0$ . Rozdělení hmotnosti bylo uvažováno jako spojitě rovnoměrné, výztuž byla uvažována třídy R a beton třídy C25/30, průřez byl navržen obdélníkový 500/1000 mm. Tím byla získána konstrukce, která byla podrobena důkladné nelineární analýze (viz obr.3). Výsledky byly též porovnány s lineárním řešením (viz tab.1).

Obr. 3 Patrové posunutí železobetonové rámové konstrukce [m]. Obrázek vlevo – lineární a nelineární výpočet. Obrázek v pravo – výsledná odezva po redukci seizmických sil.



Z výsledků je patrné, že hodnota patrového posunutí se po nelineární analýze výrazně zvětšila. Došlo ke vzniku plastických kloubů (v obrázku označeny PK) a k výraznému snížení hodnot frekvencí vlastního kmitání (viz tab.1). Těto změny frekvencí odpovídají také redukce seizmických sil, které jsou funkcí frekvencí vlastního kmitání. Po několika iteračních výpočtech, které upravovaly

hodnoty frekvencí vlastního kmitání a jim odpovídajících seizmických sil, se výpočet ustálil na hodnotě maximálního patrového posunutí 0,055 m. Výsledné seizmické síly se vlivem materiálové nelinearity a vznikem plastických kloubů zmenšily o 47%.

Je tedy patrné, že rezerva konstrukce před dosažením kinematického mechanismu je výrazně vyšší, než plyne z lineárního řešení úlohy. Nabízí se tedy přikročit k optimalizaci návrhu a provést nový dimenzační návrh prvků konstrukce. Je třeba při návrhu dbát zejména o to, aby vznik a vývoj plastických kloubů v konstrukci umožňoval plné využití disipačních vlastností konstrukce a zároveň nevedl k jejímu předčasnému kolapsu.

*Tab. 1 Frekvence vlastního kmitání železobetonové rámové konstrukce [Hz]. Tabulka vlevo – lineární a nelineární výpočet. Tabulka vpravo – výsledné hodnoty frekvencí po redukci seizmických sil.*

	FREKVENCE VL. KMITÁNÍ [Hz]			FREKVENCE VL. KMITÁNÍ [Hz]	
	Lineární	Nelineární		Lineární	Nelineární
I.vlastní tvar	1,06	0,30	I.vlastní tvar	1,06	0,67
II.vlastní tvar	3,45	1,55	II.vlastní tvar	3,45	2,21
III.vlastní tvar	6,49	2,88	III.vlastní tvar	6,49	4,28

#### 4. Závěr

Výpočet odezvy konstrukce na seizmické zatížení se jeví pro projekční navrhování poměrně komplikovaný. Zejména tehdy, pokud je nutno uvážit vyšší počet tvarů vlastního kmitání. Zjednodušení, která zavádí norma Eurocode 8, kdy výrazně dynamická úloha se převádí na úlohu statickou zavedením součinitele duktility  $q$  jsou výrazným zjednodušením této problematiky, která poskytuje výsledky na straně bezpečné. Nepřesností je zde dosahováno u výpočtu posunutí konstrukce, které jsou citlivé na nelineární chování materiálu, dále se může výrazněji projevit změna vlastní frekvenci vlivem napjatosti konstrukce. Tato změna bude u většiny stavebních konstrukcí opět na straně bezpečné.

Pro projektanta je velmi důležité odhadnout skutečné disipační možnosti konstrukce, případně navrhovat konstrukce s maximálním využitím jejich potenciálu plastického přetváření před vznikem kinematického mechanismu. Pro stavby velmi důležitého charakteru je nutno podle doporučení normy uvážit součinitel duktility  $q = 1,0$  a nebo provést detailní nelineární analýzu, která vede k optimálnějšímu navrhování stavebních konstrukcí.

## **Poděkování**

Příspěvek vznikl za podpory výzkumného záměru:  
VZ 04 CEZ MSM 6840770005 Udržitelná výstavba

## **Použitá literatura**

HUMAR, J.I.: Dynamics of Structures, Balkema, 2002  
JIRÁSEK, M. and BAŽANT Z.P.: Inelastic Analysis of Structures, J.Wiley & Sons, 2001