

Opole University of Technology
Faculty of Civil Engineering and Architecture
Department of Mechanics and Structural Engineering

Rotational effects for slender building structures under seismic excitations

Efekty rotacyjne smukłych konstrukcji budowlanych obciążonych sejsmicznie

mgr inż. Piotr Adam Bońkowski

Advisor: Zbigniew Zembaty

Promotor: prof. dr hab. inż. Zbigniew Zembaty

Secondary Advisor: Maciej Yan Minch

Promotor pomocniczy: dr inż. Maciej Yan Minch



Opole, 07 Maja 2018

Abstract

For the last ten years rotational effects have gained status of emerging science in geophysics, adding three more components to traditional translations of the ground surface. These added rotational, seismic excitations became an interesting subject in seismic engineering – particularly for slender towers rocking about horizontal axis at their base.

One can treat classic static structural leaning as a particular result of slow ground rotation. Static inclination introduces additional mass eccentricities and non-symmetrical stress distribution in the structure. Similar effects may be produced by vertical irregularities called setbacks. These effects, along with dynamic $P-\Delta$ effects, can totally change seismic response of tall buildings and slender towers.

Dynamic effects of additional, three surface rotational components of the ground motion can substantially affect the structural seismic response. Although seismic surface rotations have been theoretically considered from mid of the XX century, only recent advancements in rotational sensors technology and publications of special issues of the *Bulletin of the Seismological Society of America* in 2009 and the *Journal of Seismology* in 2012 allowed to announce the rotational seismology as an emerging branch of geophysics. These advancements can now be observed in seismic engineering.

In this work, an influence of static and dynamic rotational effects on the seismic response of slender building structures is analysed in detail. Benchmark structures have been chosen – a reinforced concrete, industrial chimney and a tall building. Analyses are preceded by extended literature reviews of both problems.

Nonlinear parametric analyses of the static leaning caused by nonuniform settlement show a specific relation between inclination of a structure and its seismic response. The effect is especially pronounced after reaching specific leaning value characteristic to a structural type. Nonlinear analyses also show that the structural leaning can amplify torsional effects further changing the response.

In numerical analyses of dynamic rotational effects on structures, two additional components (i.e. rocking about horizontal axes) have been included in the seismic ground motion of medium intensive (roughly IV in Modified Mercalli scale) records of mining tremors in Upper Silesian Area. It is shown that rotational components can have substantial (up to 65%) influence on the overall dynamic response. However, the effect is nontrivial as rotational components sometimes increase and sometimes decrease the total seismic response depending on their interaction with other ground motion components and the structural type.

At the end of the dissertation critical discussion of results and ideas for future research is presented.

Rozszerzone streszczenie rozprawy doktorskiej

Obroty podłoża budowli można podzielić na dwa rodzaje – statyczne, odpowiedzialne za pochylenie się konstrukcji i szybko zmienne w czasie wynikające głównie z sejsmicznych zjawisk falowych na powierzchni gruntu. Przedmiotem niniejszej rozprawy jest analiza wpływu obu tych zjawisk na smukłe, wysokie budowle.

Efekty statyczne (rzeczywiste pochylenie budowli, lub w formie wysunięcia jej wyższych części poza obrys rzutu) wprowadzają dodatkowe mimośrodowe masy i niesymetryczny rozkład naprężeń. Wraz z efektami drugiego rzędu $P-\Delta$ mogą one całkowicie zmienić sejsmiczną odpowiedź konstrukcji.

Efekty dynamiczne (dodatkowe 3 składniki rotacyjne wymuszenia sejsmicznego) także mogą wpłynąć na odpowiedź sejsmiczną budowli. Mimo, że rotacje sejsmiczne podłoża były badane już na początku drugiej połowy XX wieku, dopiero ostatnie publikacje specjalnych wydań czasopism *Bulletin of the Seismological Society of America* (Lee et al., 2009) i *Journal of Seismology* (Igel et al., 2012), wraz z niedawnym rozwojem technologii czujników rotacyjnych wskazały na szczególną intensyfikację badań w tym obszarze do tego stopnia, że został on ogłoszony jako nowa gałąź badań (*emerging science*).

W niniejszej rozprawie zbadano wpływ efektów rotacyjnych na odpowiedź smukłych konstrukcji budowlanych. Do analiz użyto dwóch modeli numerycznych metody elementów skończonych: żelbetowego 160m komina przemysłowego i 30-piętrowego budynku o konstrukcji szkieletowej.

W rozdziale 1. przedstawiono wprowadzenie do problematyki pracy, przykłady smukłych i pochylonych konstrukcji budowlanych, a także omówiono cel, zakres i tezy pracy.

W rozdziale 2. opisano numeryczne podstawy metody *Time-History Analysis* wykorzystywanej do nieliniowych analiz sejsmicznej odpowiedzi budowli na zadane zapisy czasowe wymuszeń sejsmicznych.

Rozdział 3. zawiera przegląd literaturowy z zakresu smukłych konstrukcji wymuszonych sejsmicznie (np. Milani et al., 2012; Wilson, 2003; Zembaty, 1987) i smukłych pochylonych konstrukcji (np. Burland et al., 2009; Marchi et al., 2011; Milani et al., 2017; Oruba, 2010). W ramach przeglądu nie napotkano jednak prac szczegółowo analizujących problem wstępnie pochylonych smukłych konstrukcji budowlanych wymuszonych sejsmicznie. Wyjątkiem jest praca Milani i in. (2017) ograniczająca się jednak do stosunkowo niskich, murowanych wież charakterystycznych dla zabytkowej zabudowy Włoch oraz do prostych modeli numerycznych.

W rozdziale 4. przedstawiono sformułowanie problemu pochylonych budowli wymuszonych sejsmicznie. Pokazano przykłady wstępnego pochylenia konstrukcji wynikających z ich

nierównomiernego osiadania, szkód górniczych lub umyślnego zaprojektowania jako pochyłonych. Zostały opisane wybrane polskie zalecenia techniczne związane z projektowaniem obiektów na terenach górniczych dotyczących m.in. ich pochylenia i oddziaływania na nie wstrząsów górniczych, a także niektóre punkty norm europejskich (CEN, 2004, 2005a) dotyczące stanów granicznych konstrukcji budowlanych. Przedstawiono również wyniki parametrycznych, nieliniowych analiz sejsmicznych wstępnie pochyłonych wysokich konstrukcji komina i budynku. Pomimo różnego stopnia skomplikowania geometrycznego badanych modeli, a także innej, nieliniowej odpowiedzi na statyczne, wstępne pochylenie zauważono wspólne cechy wpływu pochylenia na ich odpowiedź dynamiczną. Małe wartości pochylenia (do około 10mm/m) nie wpływają w sposób znaczący na zmianę charakteru odpowiedzi dynamicznej, podczas gdy duże mają istotny wpływ na efekty sejsmiczne. W przypadku analizowanego komina wzrost pochylenia wiąże się ze zwiększeniem momentów zginających w jego dolnej części, natomiast w górnej części trzonu od pewnej wartości wstępnego obrotu podstawy momenty te maleją. Z kolei dla analizowanego budynku wzrost jego pochylenia przekłada się na zwiększenie sił wewnętrznych na całej jego wysokości. W obu analizowanych przypadkach pochylenie wiąże się z pojawieniem dodatkowych sejsmicznych momentów skręcających. Część wyników z tego rozdziału zostało opublikowanych w recenzowanych czasopismach lub materiałach konferencyjnych (Bońkowski et al., 2016a, 2016b).

Rozdział 5. stanowi przegląd literaturowy z zakresu wpływu składników rotacyjnych trzęsień ziemi na drgania budowli. Omówiono prace dotyczące pierwszych historycznych obserwacji efektów rotacyjnych (por.: Kozák, 2009; Mallet, 1862); wczesnych teoretycznych prac związanych z otrzymywaniem składników rotacyjnych i ich efektów na budowle (np. Lee and Trifunac, 1987; Newmark, 1969; Zembaty and Boffi, 1994); najnowszych prac z tego zakresu (np. Basu et al., 2012; Falamarz-Sheikhabadi and Ghafory-Ashtiany, 2015).

W rozdziale 6. przedstawiono wprowadzenie teoretyczne do 6-składnikowego wymuszenia sejsmicznego. Wskazano, że aktualnie ze względu na brak odpowiednich pomiarów rotacji podczas silnych trzęsień ziemi, niezbędne jest ich otrzymywanie pośrednio z rozkładów falowych. Omówiono wyprowadzenia składników rotacyjnych przez Lee i Trifunaca (1987) będącymi podstawą do otrzymania zapisów rotacyjnych trzęsień ziemi przy użyciu rozkładu zapisów translacyjnych na podstawowe rodzaje fal oraz pracę (Basu et al., 2012) dotyczącą otrzymywania dodatkowych składników przy użyciu pomiarów z jednej (*Single Station Procedures – SSP*) i wielu stacji pomiarowych (*Multi Station Procedures – MSP*). Dotychczas jedyną normą podejmującą zagadnienie składników rotacyjnych jest Eurokod 8, część 3 (CEN, 2005b), stąd też opisano jej podstawowe założenia w tym zakresie.

Następnie, w rozdziale 7. przedstawiono wyniki analizy numerycznych żelbetowego komina przemysłowego o wysokości 160 m, 30 i 20 piętrowych budynków wymuszonych przez jednoczesne oddziaływanie składnika translacyjnego i rotacyjnego. Użyto przy tym rzeczywistych zapisów średnio intensywnych (około IV stopień w zmodyfikowanej skali Mercalliego) wstrząsów górniczych zarejestrowanych na Górnym Śląsku otrzymanych przez Zembatego i zespół (2017). Wyniki obliczeń wskazują na znaczący udział składnika rotacyjnego w całkowitej odpowiedzi badanych konstrukcji, znaczący udział wyższych postaci drgań, większą wrażliwość składnika rotacyjnego na podatność podłoża czy skomplikowany wpływ wymuszanego kierunku na interakcję składnika rotacyjnego z pozostałymi, translacyjnymi składnikami wstrząsu górniczego. Część wyników z tego rozdziału zostało opublikowanych w recenzowanych czasopismach (Bońkowski et al., 2017, 2018).

W kolejnych rozdziałach przedstawiono wnioski i plany na dalszą działalność badawczą (rozdział 8), bibliografię (rozdział 9), dane analizowanych modeli (załączniki A.1-A.3), porównanie programów służących do obliczeń oddziaływania składnika rotacyjnego na konstrukcje (załącznik A.1.1), przykład otrzymania składników rotacyjnych według procedury SSP wg Basu (załącznik B) i dane wykorzystywanych zapisów wstrząsów górniczych (załącznik C).

Literatura

- Basu, D., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C., 2012. Characterizing the Rotational Components of Earthquake Ground Motion (Technical Report No. MCEER-12-0005). University at Buffalo, The State University of New York, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Bońkowski, P., Zembaty, Z., Minch, M.Y., 2017. Analiza komina żelbetowego poddanego rotacyjnemu składnikowi wstrząsu górniczego. Mater. Bud. nr 6.
- Bońkowski, P., Zembaty, Z., Minch, M.Y., 2016a. Nonlinear interaction of initial leaning of r/c slender tower with its seismic response. Presented at the Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation - Proceedings of the 6th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, SEMC 2016, pp. 303–308.
- Bońkowski, P., Zembaty, Z., Minch, M.Y., 2016b. Nieliniowa analiza komina żelbetowego pod obciążeniem sejsmicznym z uwzględnieniem wstępnego pochyleń. Mater. Bud. 1, 34–35. <https://doi.org/10.15199/33.2016.05.14>
- Bońkowski, P.A., Zembaty, Z., Minch, M.Y., 2018. Time history response analysis of a slender tower under translational-rocking seismic excitations. Eng. Struct. 155, 387–393. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.042>
- Burland, J.B., Jamiolkowski, M., Viggiani, C., 2009. Leaning Tower of Pisa: Behaviour after Stabilization Operations. Int. J. Geengin. Case Hist. 1, 156–169.
- CEN, 2005a. EN 1998-3:2005 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings buildings.
- CEN, 2005b. EN 1998-6:2005 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 6: Towers, masts and chimneys.
- CEN, 2004. EN 1998-1:2004 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.
- Falamarz-Sheikhabadi, M.R., Ghafory-Ashtiany, M., 2015. Rotational components in structural loading. Soil Dyn. Earthq. Eng. 75, 220–233. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.04.012>

- Igel, H., Brokesova, J., Evans, J., Zembaty, Z., 2012. Preface to the special issue on advances in rotational seismology: instrumentation, theory, observations and engineering. *J. Seismol.* 16, 571–572. <https://doi.org/10.1007/s10950-012-9307-6>
- Kozák, J.T., 2009. Tutorial on Earthquake Rotational Effects: Historical Examples. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 99, 998–1010. <https://doi.org/10.1785/0120080308>
- Lee, V.W., Trifunac, M.D., 1987. Rocking strong earthquake accelerations. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 6, 75–89. [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(87\)90017-0](https://doi.org/10.1016/0267-7261(87)90017-0)
- Lee, W.H.K., Celebi, M., Todorovska, M.I., Igel, H., 2009. Introduction to the Special Issue on Rotational Seismology and Engineering Applications. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 99, 945–957. <https://doi.org/10.1785/0120080344>
- Mallet, R., 1862. *Great Neapolitan Earthquake of 1857: The First Principles of Observational Seismology as Developed in the Report to the Royal Society of London of the Expedition Made by Command of the Society Into the Interior of the Kingdom of Naples, to Investigate the Circumstances of the Great Earthquake of December 1857.* Chapman and Hall.
- Marchi, M., Butterfield, R., Gottardi, G., Lancellotta, R., 2011. Stability and strength analysis of leaning towers. *Géotechnique* 61, 1069–1079. <https://doi.org/10.1680/geot.9.P.054>
- Milani, G., Casolo, S., Naliato, A., Tralli, A., 2012. Seismic Assessment of a Medieval Masonry Tower in Northern Italy by Limit, Nonlinear Static, and Full Dynamic Analyses. *Int. J. Archit. Herit.* 6, 489–524. <https://doi.org/10.1080/15583058.2011.588987>
- Milani, G., Shehu, R., Valente, M., 2017. Role of inclination in the seismic vulnerability of bell towers: FE models and simplified approaches. *Bull. Earthq. Eng.* 15, 1707–1737. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0043-0>
- Newmark, N.M., 1969. Torsion in Symmetrical Buildings, in: *Proceedings, Fourth World Conference on Earthquake Engineering.* Presented at the Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, pp. A3-19 to A3-32.
- Oruba, R., 2010. *Oddziaływanie środowiska przemysłowego i eksploatacji górniczej na bezpieczeństwo żelbetowych kominów przemysłowych, Rozprawy, monografie = Dissertations, monographs.* Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Wilson, J.L., 2003. Earthquake response of tall reinforced concrete chimneys. *Eng. Struct.* 25, 11–24.
- Zembaty, Z., 1987. On the reliability of tower-shaped structures under seismic excitations. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 15, 761–775.
- Zembaty, Z., Boffi, G., 1994. Effect of Rotational Seismic ground motion on Dynamic Response of Slender Towers. *Eur. Earthq. Eng.* 8, 3–11.
- Zembaty, Z., Mutke, G., Nawrocki, D., Bobra, P., 2017. Rotational Ground-Motion Records from Induced Seismic Events. *Seismol. Res. Lett.* 88, 13–22. <https://doi.org/10.1785/0220160131>