

Wpływ sprężenia elementów konstrukcji rozbudowy teatru na odpowiedź spowodowaną ruchem metra

Krzysztof Koziol¹, Waldemar Bzdula²

¹ *Institut Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej,
e-mail: koziol_k@poczta.fm*

² *Planungsgruppe Brachmann GmbH,
e-mail: bzdula@interia.pl*

Streszczenie: Dobór rozwiązań konstrukcyjnych budynków pod względem ich odporności na wpływy dynamiczne wymaga niejednokrotnie wykonania pełnej analizy czasowej. Opracowanie zawiera porównanie odpowiedzi budynku wykonanego w dwóch alternatywnych technologiach: tradycyjnej żelbetowej i mieszanej - żelbetowej z częściowym sprężeniem, na wymuszenie spowodowane ruchem wagonów metra w tunelu zlokalizowanym pod obiektem. Odpowiedź budynku rozumiana jest w sensie wpływów na budynek (wartości sił przekrojowych) jak i na ludzi w nim przebywających (wartości RMS w pasmach tercjowych 1/3 oktawowych). Jak wynika z analiz numerycznych dla analizowanych typów konstrukcji nie da się w sposób jednoznaczny określić „najlepszego” rozwiązania. Bowiem w obiekcie da się wyszczególnić regiony cechujące się różną „wrażliwością” dynamiczną uzależnioną od doboru typu technologii zastosowanej do budowy elementów konstrukcji.

Słowa kluczowe: remont, dynamika, całkowanie równań ruchu, metro, dobór rozwiązań konstrukcyjnych

1. Wprowadzenie

Wraz z szybkim rozwojem budownictwa, uszczuplaniem masy konstrukcji, wznoszeniem obiektów o coraz większych gabarytach, rozbudową sieci komunikacyjnej, większą uwagę należy poświęcić zagadnieniom z zakresu dynamiki budowli w szczególności na etapie projektowania. Zagadnienia dynamiki mają szczególne znaczenie w przypadku „lekkich” konstrukcjach szkieletowych, gdzie skutki oddziaływań zmiennych w czasie mogą prowadzić do niepożądanych efektów. Dodatkowym problemem jest lawinowo rosnąca liczba pojazdów komunikacji indywidualnej, masowej oraz transportu ciężkiego – sprzyja to generowaniu drgań mających negatywne oddziaływania na budynki i przebywających w nich ludzi. Dyskomfort związany z drganiami coraz bardziej daje się odczuć w centrach dużych, starych miast, gdzie wąskie uliczki nie są przystosowane do obsługi dużej ilości pojazdów. Ten stan rzeczy niejednokrotnie prowadzi do pojawiania się rys na budynkach zmniejszając jego parametry wytrzymałościowe oraz atrakcyjność, jako obiektu. Dodatkowo dyskomfort związany z nadmiernymi drganiami wpływa również niekorzystnie na osoby przebywające w obiektach. Również tam, gdzie zlokalizowane są urządzenia narażone na nadmierny wpływ drgań, konieczne jest przeprowadzenie dokładnej analizy i oceny skutków oddziaływań dynamicznych.

2. Opis stanu istniejącego

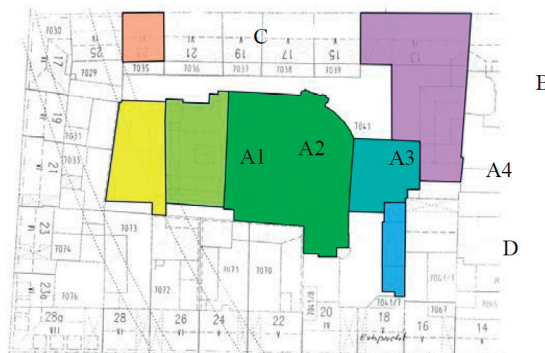
Obiektem poddanym analizie jest część Teatru Narodowego w Monachium (Rys.1). Teatr ten został wybudowany w 1896 roku przez Alexandra Bluma, Josepha Ranke i Karla Stöhra w stylu neobarokowym. Na całość obiektu składają się: sale teatralne - duża i mała, sale wystawowe, restauracja, część administracyjna oraz hotel. W roku 1943 podczas II Wojny Światowej został on w znacznym stopniu zniszczony w wyniku nalotu bombowego. Jego odbudowa i przywrócenie wcześniejszego blasku zostało podjęte na początku lat 50 XX-go wieku.



Rys. 1. Teatr Narodowy w Monachium

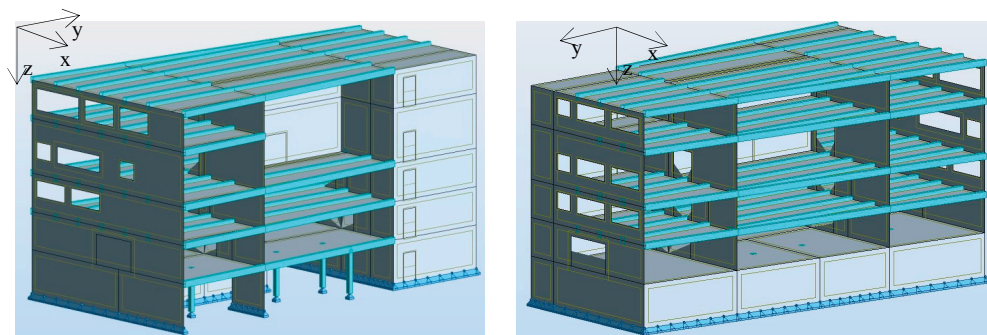
Z uwagi na pogarszający się stan techniczny obiektu nadszarpniętego czasem i historią, w 2002 roku przystąpiono do generalnego remontu. Ze względu na zabytkowy i reprezentacyjny charakter budynku remont obejmował wzmocnienie jego elementów konstrukcyjnych przy zachowaniu funkcjonalności obiektu.

Zakres przeprowadzonych prac obejmował m.in. wymianę konstrukcji dachowej, częściową rozbiórkę starych stropów i wbudowanie nowych stropów żelbetowych, wzmocnienie innych elementów nośnych, wymianę lub wzmocnienie fundamentów. Częściowej rekonstrukcji i renowacji zostały poddane również elementy detali architektonicznych. Mając na uwadze to, iż zakres prac związanych z przebudową całego obiektu jest przedsięwzięciem złożonym, został on podzielony na części (A1, A2, A3, A4, B, C, D) przedstawione na rys. 2. Miało to na celu lepszą organizację prac i usprawnienie przepływu informacji związanych z wykonawstwem.



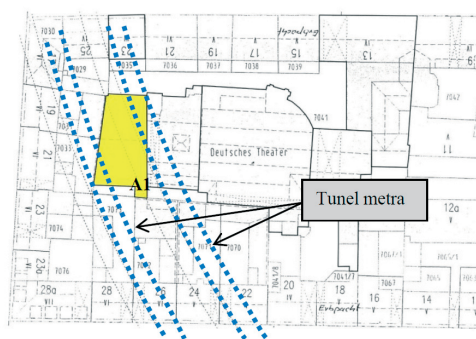
Rys. 2. Teatr Narodowy w Monachium – podział obiektu na części

Tematem niniejszego opracowania są prace poświęcone obiektowi A1. Po gruntownej analizie podjęto decyzję o rozbiórce tej części i na jej miejsce wybudowanie nowego obiektu, oddzielonego dylatacją od części A2. Uwarunkowane to było złym stanem technicznym elementów nośnych, który nie kwalifikował ich do dalszej rekonstrukcji. Nowy obiekt został zaprojektowany i wykonany jako pięciokondygnacyjna konstrukcja żelbetowa. Elementy nośne stanowią ściany żelbetowe grubości 25 cm. Stropy wykonano jako żelbetowe monolityczne grubości 16 i 20 cm, oparte na belkach żelbetowych o przekroju $b/h=30/45$ cm. Na potrzeby niniejszego opracowania przeanalizowano konstrukcję również jako częściowo sprężoną – w tym wypadku sprężeniu poddano stropy nad poszczególnymi kondygnacjami (płyty stropowe strunobetonowe). Model przestrzenny pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Teatr Narodowy w Monachium - obiekt A1, model 3D, od frontu i od tyłu

W związku z lokalizacją linii metra bezpośrednio pod obiektem A1 (Rys. 4) zaistniała potrzeba określenia wpływu drgań generowanych przez przejeżdżające w tunelu wagony metra na obiekt oraz ich oddziaływanie na ludzi przebywających w nim. Tunel linii metra znajduje się 21 m poniżej poziomu fundamentu. Informacja ta pozwoliła dobrać wymuszenia obciążające budynek z bazy danych Politechniki Krakowskiej.



Rys. 4. Lokalizacja linii metra pod częścią A1

3. Analiza numeryczna

W celu przeprowadzenia analizy dynamicznej mającej określić wpływy drgań na budynek i ludzi, sporządzono modele numeryczne (MES) budynków w dwóch wariantach obliczeniowych:

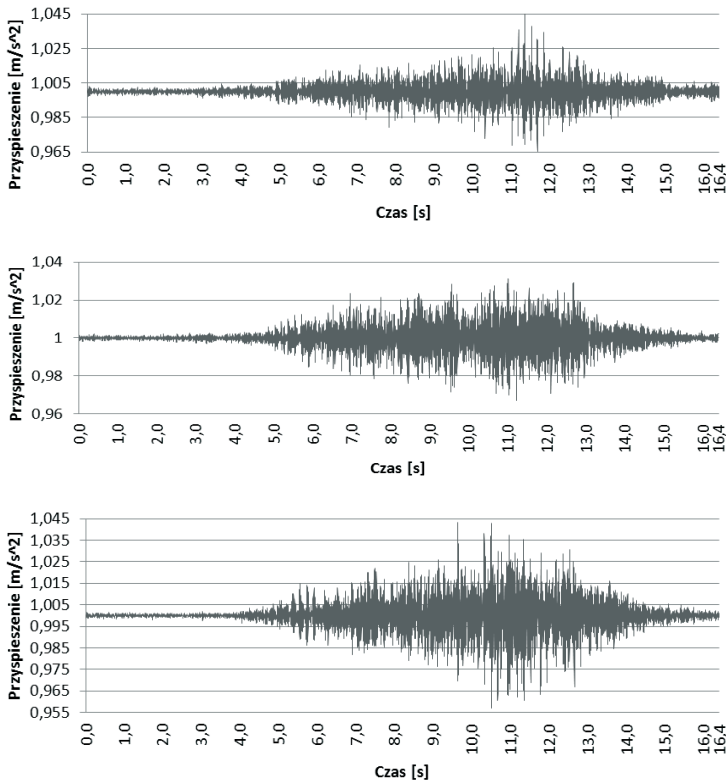
- dla konstrukcji żelbetowej,
- dla konstrukcji mieszanej - żelbetowo-sprężonej.

Model konstrukcji pokazany na rys. 3 został obciążony wymuszeniem kinematycznym dobranym na podstawie pomiarów przeprowadzonych w podobnych warunkach geometrycznych i materiałowych. Stanowi on przebieg czasowy przyspieszeń drgań wywołanych przez przejeżdżające metro. Wymuszenie to przyłożono w miejscach podparcia modelu z gruntem, przy czym dokonano uproszczenia - założono jednakowe wymuszenie w przestrzeni. W analizie uwzględniono dwie składowe poziome x i y oraz składową pionową z . Przebieg przyspieszeń drgań w poszczególnych kierunkach pokazano na rys. 5.

Korzystając z dwuparametrowego modelu tłumienia Rayleigha [1] określono przy znajomości problemu własnego (Tabela 2) współczynniki tłumienia masowo-szywnościowego dla analizowanych konstrukcji (Tabela 1).

$$\alpha = \frac{2\xi\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j}, \quad \beta = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \quad (1)$$

Gdzie: α – współczynnik masowy, β – współczynnik sztywnościowy, ω_i, ω_j – częstotliwości drgań własnych konstrukcji, $\xi=0,05$ - ułamek tłumienia krytycznego dla konstrukcji przyjęto zgodnie z literaturą [1].



Rys. 5. Wymuszenie kinematyczne generowane przez przejeżdżające metro, składowe przyspieszenia drgań [m/s²] w kierunku x , y i z

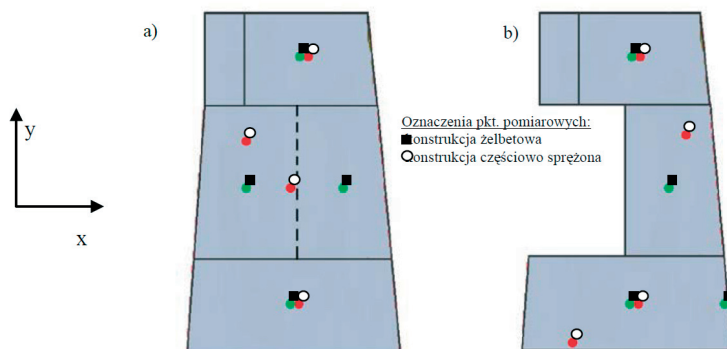
Tabela 1. Współczynniki tłumienia

Lp.	Parametr tłumienia	Budynek żelbetowy	Budynek częściowo sprężony
1	a	5,7647	4,9797
2	b	0,000371	0,000382

Tabela 2. Częstotliwości drgań własnych analizowanej konstrukcji

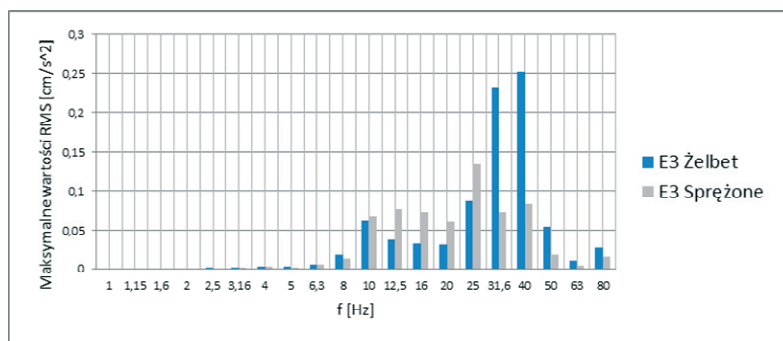
Postać własna	Budynek żelbetowy	Charakter i kierunek drgań	Budynek częściowo sprężony	Charakter i kierunek drgań
1	6,39	gięte X	5,28	gięte Z
2	6,60	gięte Z	6,73	gięte Z
3	7,09	gięte Z	6,77	giętno-skrętne
4	7,36	gięte Z	7,36	gięte Z
5	7,50	gięte Z	7,55	gięte Z

Odpowiedź dynamiczną konstrukcji na zadane wymuszenie kinematyczne obliczono metodą Newmarka, a więc bezpośredniego całkowania równań różniczkowych drugiego rzędu. Wartości odpowiedzi konstrukcji w postaci przyspieszeń na poszczególnych kondygnacjach analizowano w niżej przedstawionych przykładowych punktach (Rys. 6) odpowiednio dla konstrukcji żelbetowej i częściowo sprężonej.

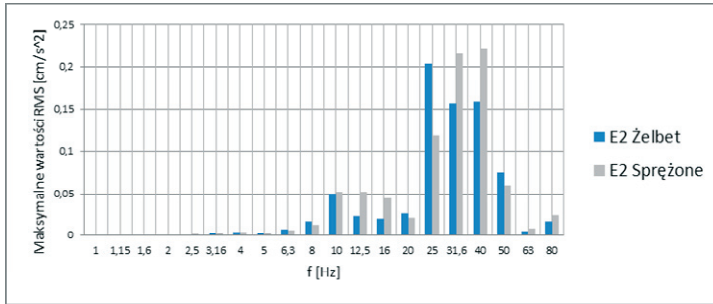


Rys. 6. Przykładowe punkty pomiarowe dla stropu: a) nad 3 piętrem, b) nad 2 piętrem

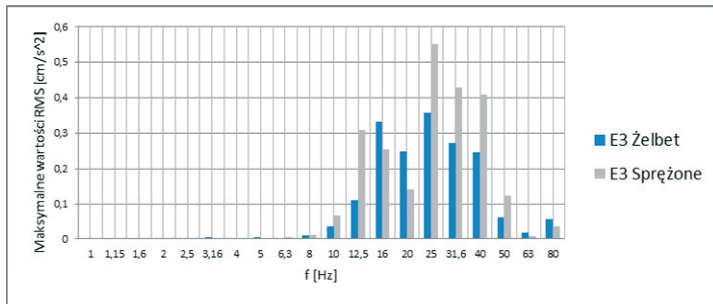
Przebiegi czasowe odpowiedzi (przyspieszeń drgań) konstrukcji dla poszczególnych kondygnacji poddano analizie w postaci wartości skutecznych (RMS - root mean square) w tercyjnych pasmach częstotliwości w kierunkach poziomym i pionowym. Zbiorcze zestawienie maksymalnych wartości RMS dla wybranych kondygnacji przedstawiono poniżej. Jak można zauważyć na rysunkach poniżej (Rys. 7 do 10), wartości przyspieszeń drgań w kierunku poziomym i pionowym są różne w zależności od przedziału tercyjowego i kondygnacji. Niemniej wartość dopuszczalna granicy komfortu wibracyjnego we wszystkich kierunkach i na wszystkich kondygnacjach nie została przekroczona.



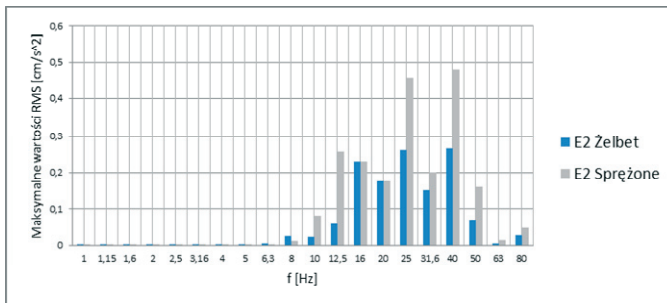
Rys. 7. Porównanie maksymalnych wartości RMS w pasmach tercyjnych na kierunku poziomym dla kondygnacji 3



Rys. 8. Porównanie maksymalnych wartości RMS w pasmach tercyjnych na kierunku poziomym dla kondygnacji 2



Rys. 9. Porównanie maksymalnych wartości RMS w pasmach tercyjnych na kierunku pionowym dla kondygnacji 3



Rys. 10. Porównanie maksymalnych wartości RMS w pasmach tercyjnych na kierunku z dla kondygnacji 2

4. Wnioski

Przedmiotem niniejszej pracy była próba określenia potencjalnych negatywnych wpływów drgań generowanych przez przejeżdżające metro na budynek i ludzi w nim przebywających. Na podstawie otrzymanych wyników z przeprowadzonej analizy dynamicznej dla rozważanego obiektu, negatywne wpływy drgań na ludzi nie przekraczają wartości dopuszczalnych, zarówno w kierunku poziomym jak i pionowym. Dodatkowe siły przekrojowe (Tabela 3) powstałe w wyniku działania wymuszeń kinematycznych należy uwzględnić w obliczeniach statycznych jako dodatkowe obciążenie. W analizowanej konstrukcji ich wielkość w porównaniu z siłami przekrojowymi związanymi z obciążeniami typowymi (normowymi statycznymi) jest znikoma - poniżej 1%.

Tabela 3. Zestawienie ekstremalnych sił przekrojowych spowodowanych działaniami dynamicznymi pochodzącymi od przejazdu metra

Budynek żelbetowy						
Lp	Kondygnacja	Fx	Fy	Fz	Mx	My
	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]
1	Parter	28,1	2,2	22,6	0,2	2,4
2	Piętro1	20,5	4,0	16,7	0,5	2,3
3	Piętro 2	33,2	4,9	24,2	0,3	2,4
4	Piętro 3	17,6	3,9	25,3	0,5	2,0
Budynek częściowo sprężony						
Lp	Kondygnacja	Fx	Fy	Fz	Mx	My
	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]
1	Parter	22,7	3,3	19,5	0,5	3,2
2	Piętro1	31,1	5,6	23,8	0,4	2,9
3	Piętro 2	20,1	4,5	27,1	0,3	2,5
4	Piętro 3	33,7	4,3	28,2	0,4	2,0

Analiza odpowiedzi konstrukcji na obciążenie związane z wymuszeniem od pobliskiej linii metra w wariantach żelbetowym i częściowo sprężonym pokazała nam, że w przypadku obliczanego obiektu jest trudno dobrać rozwiązanie materiałowe pod względem dynamicznym (Rys. 7 do 10, Tab. 4). W kierunku pionowym dla kondygnacji parteru korzystniejszym jest wariant konstrukcji wykonanej jako żelbetowej (stosunek amplitud RMS sięga wartości 2,45 dla częstotliwości 8Hz), ale dla kierunku poziomego zdecydowanie lepszym jest sprężenie stropów. Najgorsze wyniki dla sprężenia uzyskujemy na kondygnacji 3, gdzie dla kierunku pionowego w/w współczynnik sięga wartości 4,67 przy częstotliwości 1,15Hz.

Tabela 4. Stosunek (rozwiązanie żelbet/częściowe sprężenie) ekstremalnych wartości RMS w kierunku pionowym i poziomym na poszczególnych kondygnacjach

lp	Budynek żelbetowy					Budynek częściowo sprężony			
	częst	KONDYGNACJA				KONDYGNACJA			
	f	0	1	2	3	0	1	2	3
	[Hz]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	1	1,73	0,06	0,94	3,26	0,79	0,48	0,94	2,55
2	1,15	1,45	0,08	0,43	4,67	0,40	0,22	0,94	1,82
3	1,6	2,20	0,09	0,62	2,89	0,52	0,23	1,22	1,46
4	2	2,23	0,11	0,52	2,92	0,52	0,40	0,98	1,49
5	2,5	2,19	0,10	0,53	2,65	0,43	0,48	0,79	1,78
6	3,16	1,99	0,16	0,69	2,67	0,36	0,52	0,99	1,07
7	4	1,34	0,69	0,93	0,98	0,41	0,79	1,01	0,92
8	5	2,04	0,31	0,75	2,33	0,25	0,55	0,96	1,26
9	6,3	1,55	1,86	1,35	0,69	0,36	0,89	1,10	1,03
10	8	2,45	0,56	1,89	0,88	0,11	0,87	1,41	1,40
11	10	1,88	0,27	0,28	0,54	0,13	0,77	0,96	0,92
12	12,5	0,36	0,24	0,23	0,36	0,11	0,48	0,44	0,50
13	16	0,29	1,11	1,00	1,30	0,07	0,79	0,45	0,46
14	20	1,63	0,83	1,00	1,75	0,04	1,16	1,23	0,53
15	25	1,28	1,39	0,57	0,65	0,02	2,10	1,72	0,65
16	31,6	2,09	0,78	0,76	0,64	0,02	1,04	0,73	3,20
17	40	1,89	0,58	0,55	0,61	0,02	0,94	0,72	3,02
18	50	1,19	0,65	0,44	0,49	0,03	0,74	1,26	2,88
19	63	0,67	0,29	0,44	2,42	0,09	0,38	0,57	2,12
20	80	0,39	1,35	0,59	1,46	0,02	1,08	0,68	1,67

Poza analizą czasową odpowiedzi budynku na drgania spowodowane ruchem metra, określono metodą uproszczoną wpływ drgań na ludzi [2]. Na podstawie otrzymanych wyników analizowane drgania okazały się być w dopuszczalnym zakresie, tym samym nie stwierdzono negatywnych oddziaływań na ludzi.

Literatura

- 1 R. Ciesielski, E. Mąciąg "Drgania drogowe i ich wpływ na budynki", Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990
- 2 H. Feldmann, Ch. Heinemeyer, B. Völling „Design Guide for Floor Vibrations“, http://www.arcelormittal.com/sections/fileadmin/redaction/4-Library/1-Sales_programme_Brochures/Vibration/Vibration_EN.pdf (Stan: 11.03.2013)
- 3 Ch. Petersen „Dynamik der Baukonstruktionen“, Vieweg Verlagsgesellschaft, Wiesbaden 2000
- 4 H. Kramer „Angewandte Baudynamik“, Ernst & Sohn, Berlin 2013
- 5 Ch. Barth, W. Rustler „Finite Elemente in der Baustatik-Praxis. Mit vielen Anwendungsbeispielen“, Bauwerk, Berlin 2010
- 6 PN-88/B-02171 "Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach", Polski Komitet Normalizacyjny
- 7 PN-91/N-01354 " Drgania. Dopuszczalne wartości przyspieszenia drgań o ogólnym oddziaływaniu na organizm człowieka i metody oceny narażenia", Polski Komitet Normalizacyjny
- 8 PN-85/B-02170 "Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki", Polski Komitet Normalizacyjny

The effect of compression design elements for the development of theater-Tell caused by the subway movement

Krzysztof Koziół¹, Waldemar Bzdula²

¹ *Department of Structural Mechanics, Cracow University of Technology,
e-mail: koziol_k@poczta.fm*

² *Planungsgruppe Brachmann GmbH Munich, e-mail: bzdula@interia.pl*

Abstract: The choice of building design solutions in terms of their resistance to the influence of dynamic performance often requires a full analysis of the time. The study contains a comparison of the response of the building made in two alternative technologies: traditional concrete and mixed concrete with partial compression on the force caused by the movement of the subway in a tunnel located under the object. The building answer is understood in the sense of the influence on the building (the internal forces) as well as people staying in it (the RMS value in one-third octave 1/3 octave bands). As from numerical analysis for the analyzed types of structures, the best solution cannot be unambiguously determined. In the object the regions characterized by different dynamic "sensitivity" dependent on the choice of the type of technology used to build the elements of the structure.

Keywords: repair, dynamics, integration of the equations of motion, the subway, the selection of design solutions.