

Analiza zmienności odpowiedzi konstrukcji w kontekście akcelerogramów dobieranych do uśrednionych spektrów odpowiedzi

Mgr inż. Michał Bąk, Politechnika Poznańska

1. Wprowadzenie

Analiza time-history, przeprowadzana dla obciążeń dynamicznych o wysokiej zmienności, jakimi są m.in. obciążenia sejsmiczne i parasejsmiczne, w wielu przypadkach jest koniecznością, wynikającą bezpośrednio z obowiązującej normalizacji [7]. Zarówno wtedy, kiedy konstrukcja ma nieregularny kształt, jej materiał charakteryzuje się skomplikowaną charakterystyką wytrzymałościową lub przewidziane zostały elementy redukujące drgania, zalecaną metodą jest analiza w dziedzinie czasu. Dodatkowe wykorzystanie obliczeń nieliniowych może natomiast prowadzić do optymalizacji, będąc w kontrze z zachowawczymi wynikami metod uproszczonych. Kluczowym elementem analiz obiektów obciążonych sejsmicznie jest wybór zapisów ruchów podłoża, które określą miejscowe ryzyka, będące podstawą projektowania opartego na badaniu odkształceń konstrukcji. Prace, polegające na określeniu jednolitej metody, pozwalającej na wybór zestawu wymuszeń kinematycznych, pomimo iż są w zaawansowanej fazie, skutkują obecnie funkcjonowaniem niemal 40 algorytmów [1]. Z perspektywy projektanta ważny jest taki wybór obciążeń, które z jednej strony oddają jak najdokładniej charakterystykę ryzyk związanych z lokalizacją, pozwalając na racjonalne zaprojektowanie konstrukcji, jednocześnie nie prowadząc do skomplikowanej interpretacji wyników przeprowadzonych obliczeń. Wpływ uwzględnienia poziomu zmienności ryzyka sejsmicznego w analizowanym przykładzie badań Jayaram et al. [8], porównując wyniki konstrukcji poddanej działaniu 40 par wymuszeń. Rozszerzenie problemu na badanie zmienności w zależności od docelowego spektrum odpowiedzi, umożliwienia skalowania akcelerogramów jest motywacją dla przeprowadzenia analiz w niniejszym artykule. Ponieważ artykuł ten ma służyć w znacznej mierze czytelnikom związanym z projektowaniem konstrukcji, w większości symulacji poddano 10 par akcelerogramów (jako odniesienie do zalecanej w normie [7] liczby 7 lub 3). Należy jednak zwrócić uwagę, że bezpośrednio wykorzystanie odchylenia standardowego odpowiedzi konstrukcji w projektowaniu wymaga jej ilościowego określenia oraz znacznie większej liczby przeprowadzonych symulacji [9].

2. Analizowane metody wyboru akcelerogramów

Wybór danych wstępnych do projektowania sejsmicznego jest zagadnieniem złożonym, a obecna normalizacja i stan wiedzy pozwala między innymi na wykorzystanie sztucznie generowanych wymuszeń kinematycznych oraz zapisów historycznych [10]. Podstawowym sposobem selekcji akcelerogramów jest dostosowanie do projektowego spektrum odpowiedzi, bazującego np. na normie [7], które jest obowiązkiem dla spektrów występujących na danym obszarze. Bezpośredniemu porównaniu podlegać może pojedyncze spektrum odpowiedzi każdego z akcelerogramów ze spektrum docelowym (wybór np. na podstawie metody najmniejszych kwadratów) lub średnie spektrum wybranego zbioru. Wadą spektrum projektowego jest bardzo niskie prawdopodobieństwo wystąpienia trzęsienia ziemi, które będzie do niego zbliżone. Jedną z zyskujących popularność metod jest wybór oparty na dostosowaniu do warunkowego spektrum odpowiedzi (*CMS Conditional Mean Spectrum*). Oryginalnie pojęcie spektrum warunkowego zostało wprowadzone przez Bakera i Cornela [11, 12], którzy określili w ten sposób spektrum powstałe w wyniku korekty modelu ruchów podłoża w zależności od wartości spektrum dla okresu warunkującego, np. pierwszego okresu drgań własnych. Algorytm ten doczekał się znacznej liczby modyfikacji. Jedną z nich jest wprowadzenie kontroli nad odchyleniem standardowym wybranych akcelerogramów, co pozwala na dokładniejsze oddanie ryzyka sejsmicznego poprzez utrzymanie wyższej losowości danych wstępnych [8, 13]. W niniejszej publikacji podstawą wyboru było oprogramowanie opracowane na podstawie publikacji [14] wraz z modyfikacjami (wprowadzenie spektrum odpowiedzi bazujące na normie [7], korekta procedury optymalizacji).

Analizie zostały poddane następujące czynniki:

- typ spektrum odpowiedzi, do którego dostosowane jest kryterium wyboru akcelerogramów,
- uwzględnienie możliwości skalowania akcelerogramów w trakcie ich wyboru,

Tabela 1. Zestawienie parametrów wyboru akceleroграмów

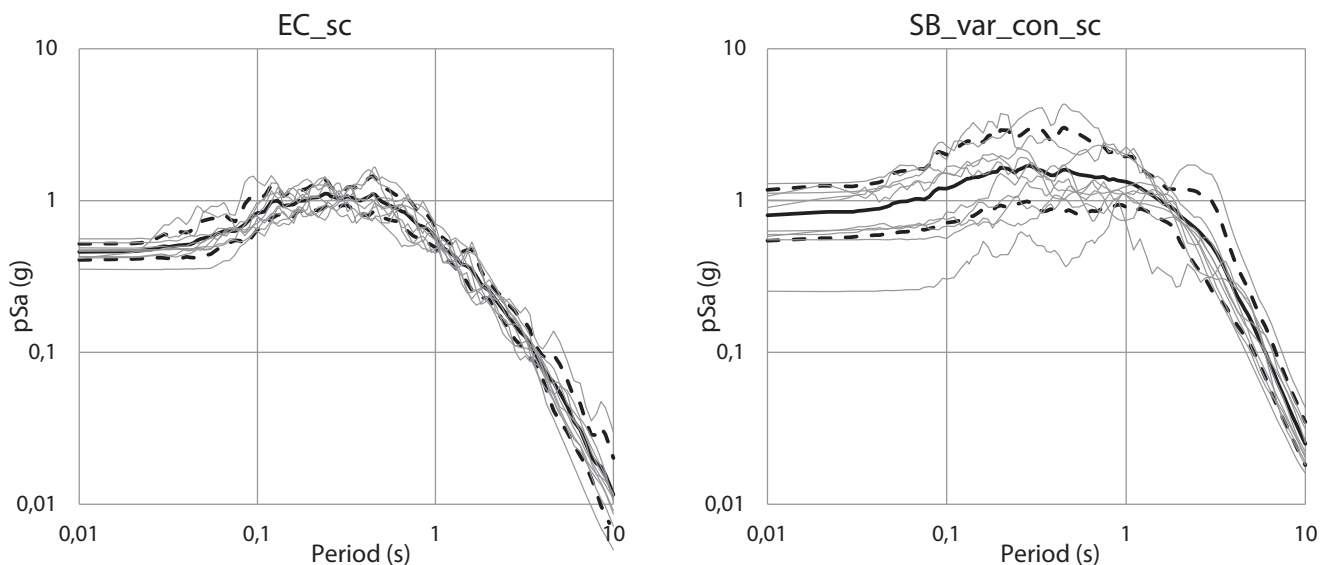
Oznaczenie	Kod	Spektrum docelowe	Skalowanie	Odchylenie standardowe	Liczba wybranych akceleroграмów
A	EC	[7, 15]	tak	nie	10
B	EC_sc	[7, 15]	nie	nie	10
C	SB	[16]	tak	nie	10
D	SB_con	[16]	tak	nie	10
E	SB_con_sc	[16]	nie	nie	10
F	SB_sc	[16]	nie	nie	10
G	SB_var	[16]	tak	tak	10
H	SB_var_con_sc	[16]	nie	tak	10
I	SB_var_sc	[16]	nie	tak	10
J	SB_var_con	[16]	tak	tak	10
K	SB_con	[16]	tak	nie	30
M	SB_var_con	[16]	tak	tak	30

- uwzględnienie w funkcji optymalizującej zestaw wybranych akceleroграмów dostosowania zarówno spektrum średniego do docelowego spektrum odpowiedzi oraz uzyskanego odchylenia standardowego do docelowego odchylenia standardowego,

- liczba wybranych akceleroграмów.

Mając na uwadze powyższe punkty, ustalono 12 wytycznych, zgodnie z którymi dokonano selekcji lub selekcji i skalowania akceleroграмów. Zestawienie kombinacji parametrów użytych podczas obliczeń zawiera tabela 1. Wspólnymi parametrami wyboru dla wszystkich metod jest badane miejsce – obszar LAquila (2 strefa sejsmiczna Włoch), metoda optymalizacji zestawu akceleroграмów – SRSS, analizowany przedział spektrum – 0,1–4,0 s oraz wybór na podstawie dwóch prostopadłych, sprzężonych kierunków obciążań [14]. Metody A oraz B obejmują elastyczne spektrum odpowiedzi według normy [7] dla magnitudy powyżej 5,5 (typ 1), gruntu B ($v_{s,30} = 360 - 800$ m/s), referencyjne maksymalne

przyspieszenie gruntu $a_g = 0,25$ g. Dla metod C-J, opartych o spektrum opracowane w [16], wspólnymi parametrami są prędkość rozchodzenia się fali w górnej warstwie podłoża ($v_{s,30} = 470$ m/s), magnituda 6.3 (LAquila, 2009), odległość Joynera Bora do uskoku (5 km), region (Włochy) oraz typ uskoku normalny. Wykresy spektrum odpowiedzi poszczególnych wyselekcjonowanych akceleroграмów wraz ze średnią oraz granicami odchylenia standardowego zawiera rysunek 1. Znacząca różnica wynika z dostosowania również odchylenia standardowego do wartości oczekiwanej w metodzie H. W trakcie przeprowadzania selekcji wykorzystano bazę danych udostępnioną w publikacji [14] oraz platformę internetową [17]. W algorytmie użyto funkcji wyboru akceleroграмów na podstawie dwóch sprzężonych kierunków działania wymuszenia kinetycznego, dlatego zasadnym jest analiza zmienności w kontekście kierunków działania poszczególnych obciążań. W celu kontroli wartości odchylenia standardowego odpowiedzi w zależności



Rys. 1. Średnie spektrum odpowiedzi uzyskane metodami B oraz H

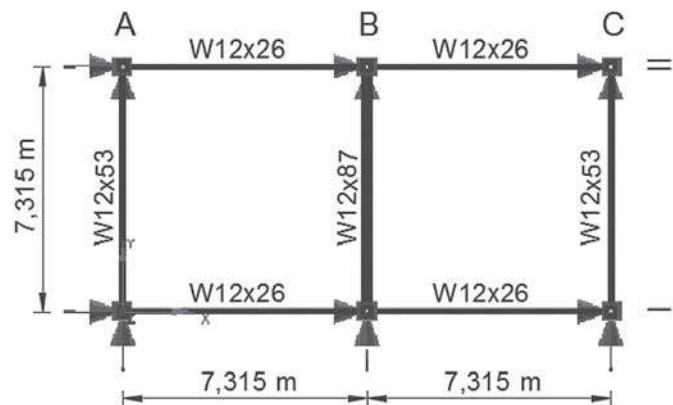
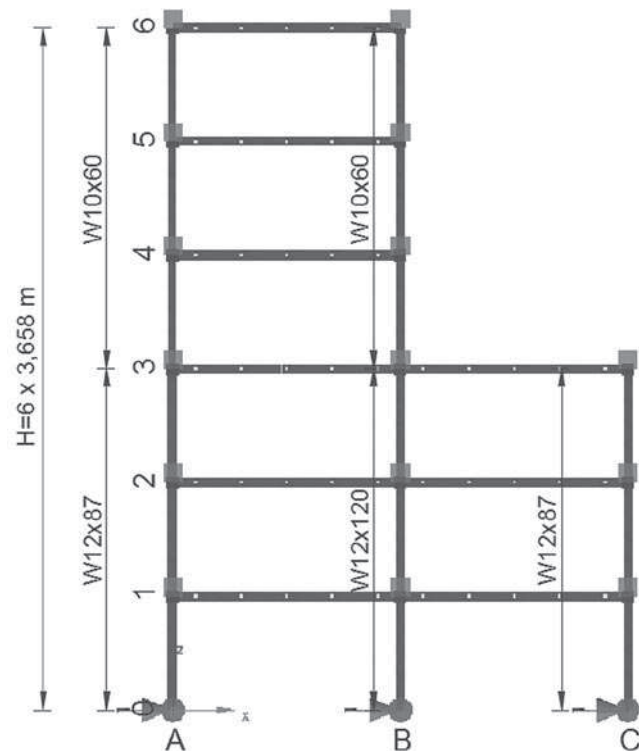
Tabela 2. Średnia uzyskanych parametrów sejsmicznych oraz ich odchyłeń standardowych

Grupa	Kod grupy	Średnia PGA_x [m/s ²]	Odchylenie standardowe PGA_x [m/s ²]	Współczynnik zmienności PGA_x [%]	Średnia PGA_y [m/s ²]	Odchylenie standardowe PGA_y [m/s ²]	Współczynnik zmienności PGA_y [%]
A	EC	3,11	0,66	21	3,31	0,62	19
B	EC_sc	3,05	0,69	23	3,19	0,72	23
C	SB	2,60	0,42	16	2,85	0,53	18
D	SB_con	4,13	1,29	31	4,90	1,11	23
E	SB_con_sc	8,21	9,35	114	5,27	1,52	29
F	SB_sc	2,70	0,43	16	3,04	0,66	22
G	SB_var	2,91	1,71	59	4,22	3,34	79
H	SB_var_con_sc	5,28	2,37	45	5,59	2,34	42
I	SB_var_sc	3,26	1,44	61	3,48	1,75	50
J	SB_var_con	5,08	3,66	56	6,11	3,40	56
K	SB_con	4,63	1,44	31	4,78	1,16	24
M	SB_var_con	4,86	3,66	75	5,75	4,66	81

od liczby przeprowadzonych symulacji, dla dwóch metod przeprowadzono również proces selekcji dla grupy 30 wymuszeń (K, M) [9].

Badanie zmienności poszczególnych wymuszeń kinematycznych zostało przeprowadzone w odniesieniu do wiążącego parametru sejsmicznego, jakim jest szczytowe przyspieszenie gruntu podczas wymuszenia (PGA). Porównanie zmienności dla poszczególnych zestawów akcelerogramów zawiera tabela 2. Największą zmiennością charakteryzują się grupy z narzuconym dostosowaniem

do odchylenia standardowego (G-J). Można również zauważyć, że w przypadku tych grup skalowanie nie ma znacznego wpływu na odchylenie standardowe spektrum. Jest to związane z procesem optymalizacji, który dąży do uzyskania określonej wartości odchylenia, a nie do jego minimalizacji. Dla grup, w których funkcja celu obejmuje wyłącznie dostosowanie do docelowego spektrum odpowiedzi, skalowanie, poprzez sztuczne zwiększenie bazy danych, wpływa na zmniejszenie odchylenia standardowego (A-B, C-F, D-E).

**Rys. 2.** Model analizowanej konstrukcji

Wymiary oraz przekroje charakterystyczne modelu zostały przedstawione na rysunku 2. Wykorzystano biliniowy model charakterystyki materiału (wraz z wzmocnieniem równym 0,5%), a walidacja modelu została oparta o publikacje [3, 2] (wyniki walidacji prezentuje rysunek 3). Do obliczeń użyto oprogramowania SeismoStruct [18]. Przeprowadzono nieliniową analizę time-history, uwzględniającą efekty II rzędu, dla ramy o węzłach sztywnych. Wymuszenia kinematyczne zostały uwzględnione w dwóch prostopadłych kierunkach (x, y).

Badaniu poddane zostały podstawowe parametry charakteryzujące odpowiedź konstrukcji:

- stosunek poziomego przemieszczenia dachu do wysokości obiektu (przechylenie konstrukcji) – $tr_{x,y}$
- siły ścinające z poziomie fundamentów – $V_{x,y}^*$
- przechył kondygnacji – $d_{x,y}^*$
- maksymalne przyspieszenie w poziomie kondygnacji $a_{x,y}^*$

4. Wyniki przeprowadzonych analiz

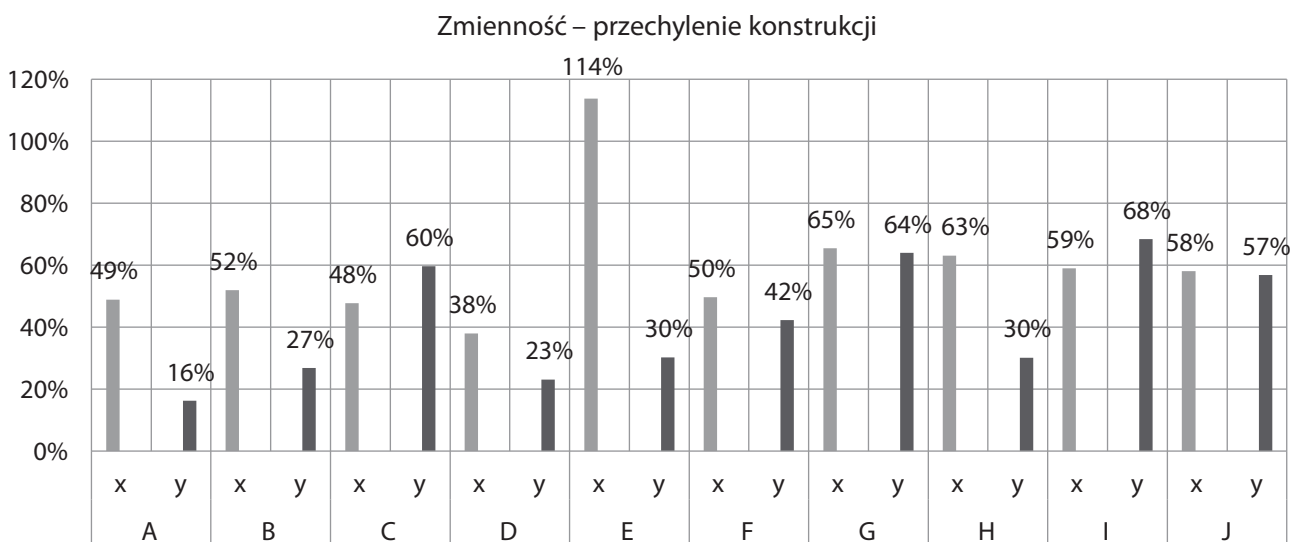
Odchylenia standardowe badano poprzez obliczenie maksymalnej wartości poszczególnych parametrów uzyskanych w trakcie analizy time-story dla każdego z 12 wymuszeń kinetycznych poszczególnych zestawów (A-M). Następnie uzyskane odchylenia standardowe parametrów zostały uśrednione dla całej konstrukcji, dla jednego kierunku. Poszczególne wyniki zostały przedstawione w postaci zmienności – obliczonej jako procentowy udział odchylenia standardowego w średniej wartości parametru.

Pierwszym analizowanym parametrem zostało przechylenie konstrukcji (rys. 4). Wyniki dla dwóch płaszczyzn różnią się znacząco, co jest związane z jasno wyodrębnionymi kierunkami pracy konstrukcji, wzdłuż których narzucone zostały wymuszenia kinematyczne. W kierunku x największą zmiennością charakteryzuje się metoda E i jest ona



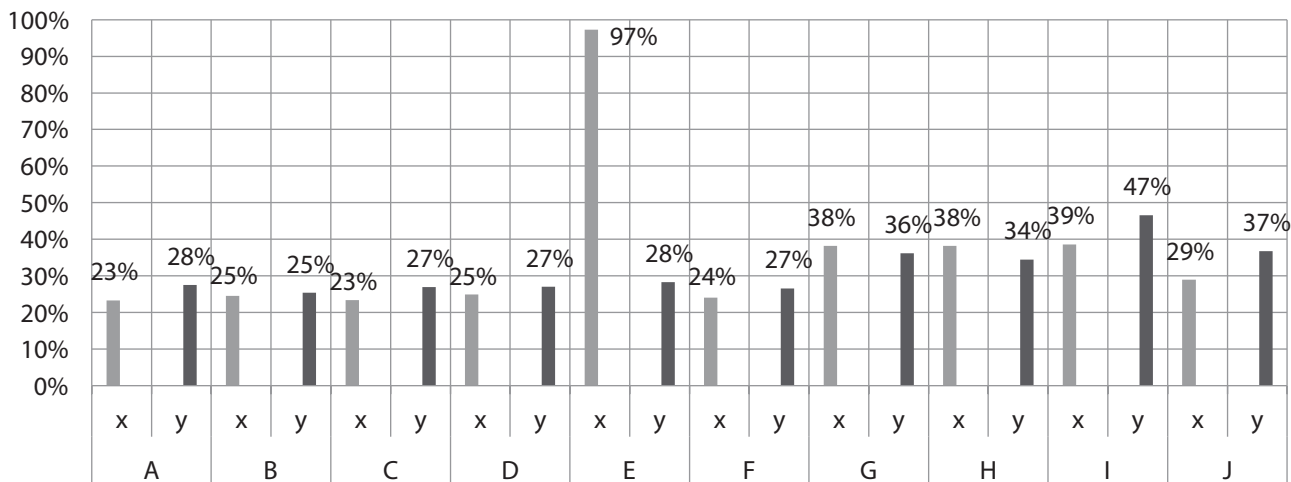
Rys. 3. Walidacja wykorzystanego modelu

szacowana na 114%. Kolejnymi grupami, o zbliżonym poziomie są metody G, H, I oraz J, na co ma wpływ dostosowanie do pożądanego odchylenia standardowego, którym charakteryzuje się spektrum docelowe (metody te mają zmienność na poziomie 60–65%). Następnymi metodami są B oraz F, w których istotną rolę odgrywa brak skalowania wymuszeń, co również ma wpływ na zwiększone odchylenie standardowe wyników (odchylenie standardowe na poziomie 50% wartości średniej). Najniższą zmiennością w kierunku x charakteryzują się metody A, C, D, w których dostosowanie do spektrum nie jest zależne od jego niepewności. Kierunek y charakteryzuje się innym uszeregowaniem. Odchylenie standardowe jest największą częścią średniej wartości przechylenia dla grup C, G, I oraz J (ok. 60%), następnie kolejno grupy E, F, H (30–40%) oraz metody A, B, D (poniżej 30%). Taka hierarchia ponownie wynika z celowego zwiększenia rozproszenia wyników oraz rezygnacji ze skalowania. Zaskoczeniem może być wysoka zmienność metody C, która może wynikać ze skomplikowanego sprzężenia obu kierunków obciążeń na dostosowanie do spektrum.



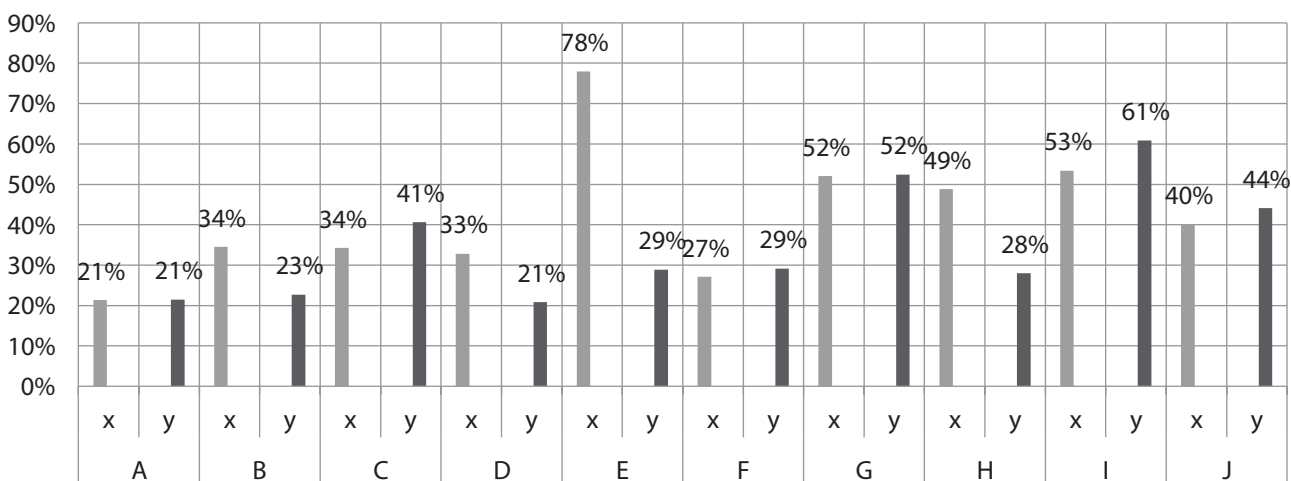
Rys. 4. Zmienność przechylenia konstrukcji dla poszczególnych metod selekcji oraz kierunków obciążenia

Zmienność – siła ścinająca w podstawie



Rys. 5. Zmienność siły tnącej w podstawie dla poszczególnych metod selekcji oraz kierunków obciążenia

Zmienność – przechylenie kondygnacji



Rys. 6. Zmienność przechylenia kondygnacji dla poszczególnych metod selekcji oraz kierunków obciążenia

Zależność pomiędzy zmiennością siły ścinającej w podstawie oraz metoda wyboru akcelerogramów została przedstawiona na rysunku 5. Dla kierunku x największą wartością charakteryzuje się ponownie metoda E (97%) oraz kolejno metody G, H, I (38–39%), J (29%), A, C, D (16–19%). Największą zmienność w płaszczyźnie prostopadłej pokazuje grupa I (47%), Pozostałe grupy można podzielić na dwa przedziały 34–37% – G, H, J, oraz 25–28% grupy A-F.

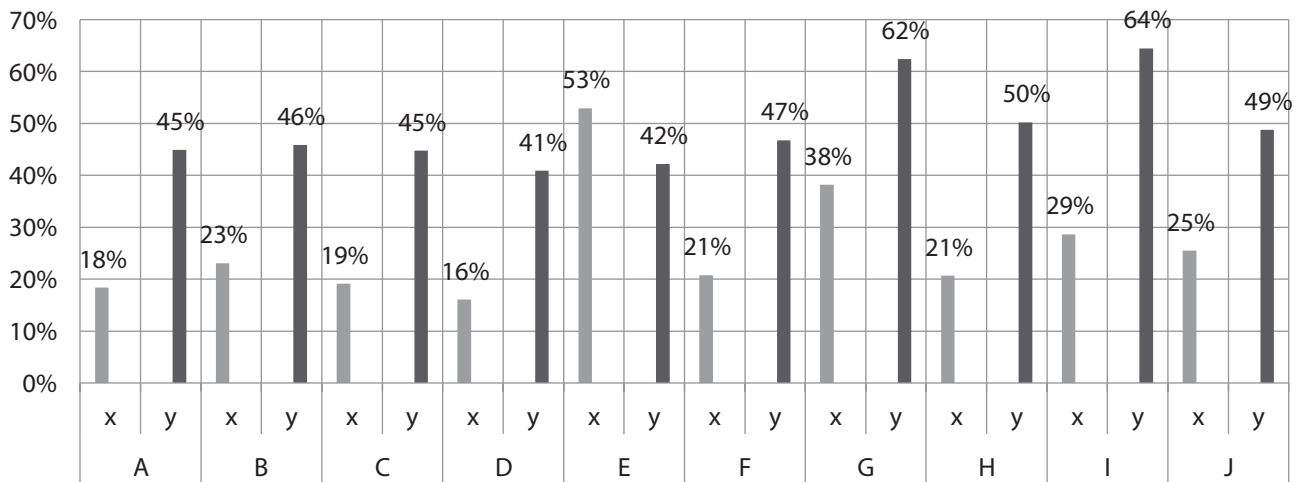
Parametr związany z przechyleniem kondygnacji pokazuje rysunek 6. Również w tym przypadku największą zmiennością dla kierunku x charakteryzuje się grupa E (78%). Do następnych przedziałów zaliczyć należy grupy G, H, I (49–53%), B, C, D, J (33–40%), oraz A F (21–27%). Również w przypadku trzeciego parametru występuje różnica pomiędzy kierunkiem x oraz y, w którym największą zmienność ma grupa I (61%), oraz dalej grupa G (52%).

W dalszej kolejności znajdują się metody C, J (41–44%), E, F, H (28–29%) oraz A, B, D (21–23%).

Przyspieszenie, jako ostatni badany parametr, pokazuje najmniejsze różnice pomiędzy poszczególnymi metodami. W kierunku x w kolejności malejącej zmienności należy uszeregować metody E (53%), G, H, I (38–39%), J (29%) oraz A-D, E (23–25%). Dla porównania kierunek y ma największą zmienność przyspieszenia dla metod G oraz I (62–64%), w dalszej kolejności występują grupy akcelerogramów A-C, F, H, J (45–50%) oraz metody D, E (41–42%).

Spośród przedstawionych wyników można zauważyć, iż w przypadku kierunku x największą zmiennością charakteryzują się kryteria związane z odkształceniem konstrukcji (przechylenie całości oraz poszczególnej kondygnacji) – dla przykładu metody J (57% oraz 40%), aniżeli kryterium siły tnącej podstawy (J 29%) oraz przyspieszenia (J 25%).

Odchylenie standardowe – przyspieszenie kondygnacji



Rys. 7. Zmienność przyspieszenia kondygnacji dla poszczególnych metod selekcji oraz kierunków obciążenia

Kierunek y z kolei wskazuje na większą zmienność parametru przyspieszenia.

Porównanie odchyłeń standardowych dla metod różniących się liczbą wybranych wymuszeń kinematycznych zawiera tabela 3. Metody D oraz K, różniące się wyłącznie liczbą wybranych akcelerografów, wskazują na porównywalne otrzymane średnie wartości zarówno przechyłu konstrukcji oraz siły tnącej w podstawie słupa dla kierunku x. Kierunek y charakteryzuje się wzrostem średnich wartości parametrów odpowiedzi konstrukcji (z 2,765% na 3,216% oraz z 444,48 kN na 590,58 kN). Dla obu kierunków wraz z wzrostem liczby symulacji rośnie wartość odchylenia standardowego. Wyjątkiem jest siła tnąca w podstawie słupa dla kierunku y, gdzie wzrasta średnia, jednak odchylenie standardowe ulega zmniejszeniu (z 27% na 17%). Zestawienie metod uwzględniających odchylenie standardowe docelowego spektrum odpowiedzi pokazuje zmianę wartości średniej badanych parametrów poniżej 25% ich wartości (3,484–2,775%, 3,684–3,545%, 242,08–289,68 kN, 470,97–616,81

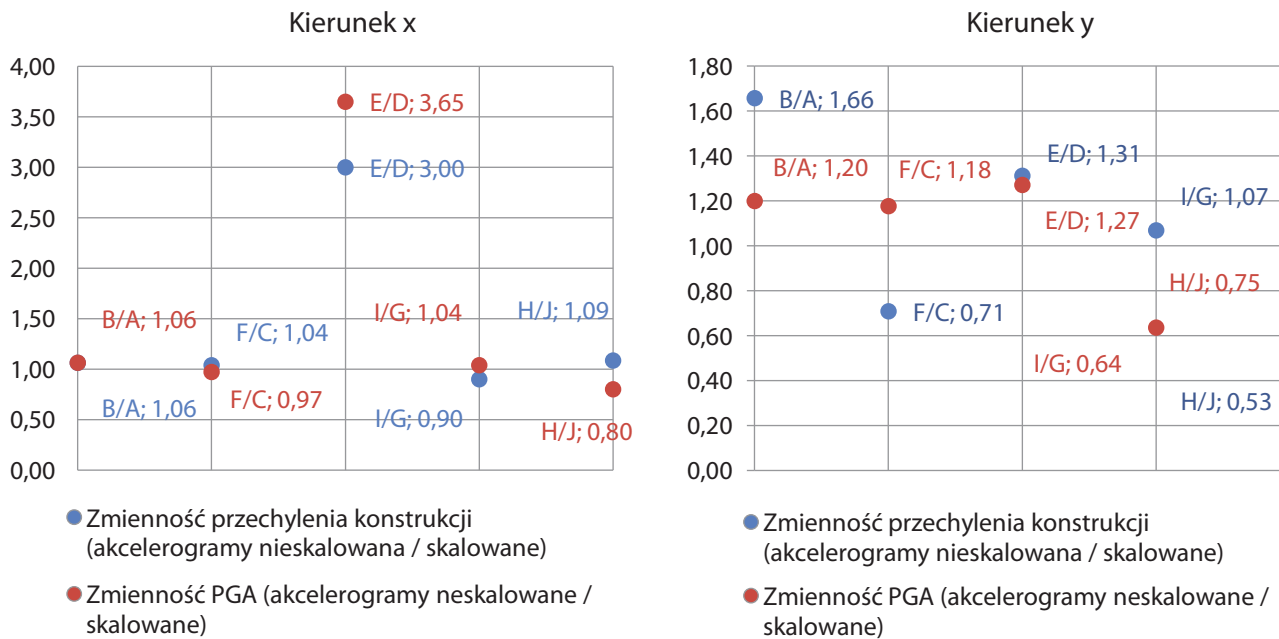
kN). Wartości odchyłeń standardowych również ulegają zmianom, jednak stosunkowo stabilnie zachowuje się współczynnik zmienności (tutaj jedyna znacząca zmiana występuje dla zmienności wartości siły tnącej w podstawie słupa dla kierunku y – zmiana z 37% na 24%).

5. Analiza wyników

Wyniki przedstawione w poprzednim punkcie nie wskazują na bezpośrednią relację pomiędzy zmiennością wiodących parametrów akcelerogramów (PGA) a odpowiedzią konstrukcji. Należy zaznaczyć, iż przeprowadzenie analizy sprężystej wykluczyło dodatkowe komplikacje wynikające z rezultatów przewidujących całkowite zniszczenie, którego prawdopodobieństwo wystąpienia jest problematyczne do określenia i pozostaje kwestią badań naukowych. Haselton et al. [9] zaleca, aby w przypadku potrzeby oszacowania ryzyka szans na katastrofę postępującą obiektu przeprowadzić przynajmniej 30–40 symulacji.

Tabela 3. Średnia uzyskanych wielkości odpowiedzi konstrukcji oraz odchylenia standardowe

Grupa	Kod grupy	Średnia x [%]	Odchylenie standardowe x [%]	Współczynnik zmienności x [%]	Średnia y [%]	Odchylenie standardowe y [%]	Współczynnik zmienności y [%]
Przechyl konstrukcji							
D	SB_con	2,678	1,015	38	2,765	0,612	22
J	SB_var_con	3,484	1,969	57	3,684	1,907	52
K	SB_con	2,775	1,475	53	3,216	1,545	48
M	SB_var_con	2,870	1,482	52	3,545	1,942	55
Siła tnąca w podstawie słupa							
D	SB_con	218,04 kN	54,32 kN	25	444,48 kN	120,11 kN	27
J	SB_var_con	242,08 kN	70,07 kN	29	470,97 kN	173,30 kN	37
K	SB_con	300,42 kN	109,80 kN	37	590,58 kN	100,35 kN	17
M	SB_var_con	289,68 kN	90,73 kN	31	616,81 kN	148,64 kN	24



Rys. 8. Stosunek zmienności wyników dla metod umożliwiających i wykluczających skalowanie

W symulacjach opartych na 3 lub 7 akcelerogramach zniszczenie nie ma znaczenia statystycznego, jednak fakt takiego wyniku powinien skłonić projektanta do przeanalizowania słabych punktów konstrukcji.

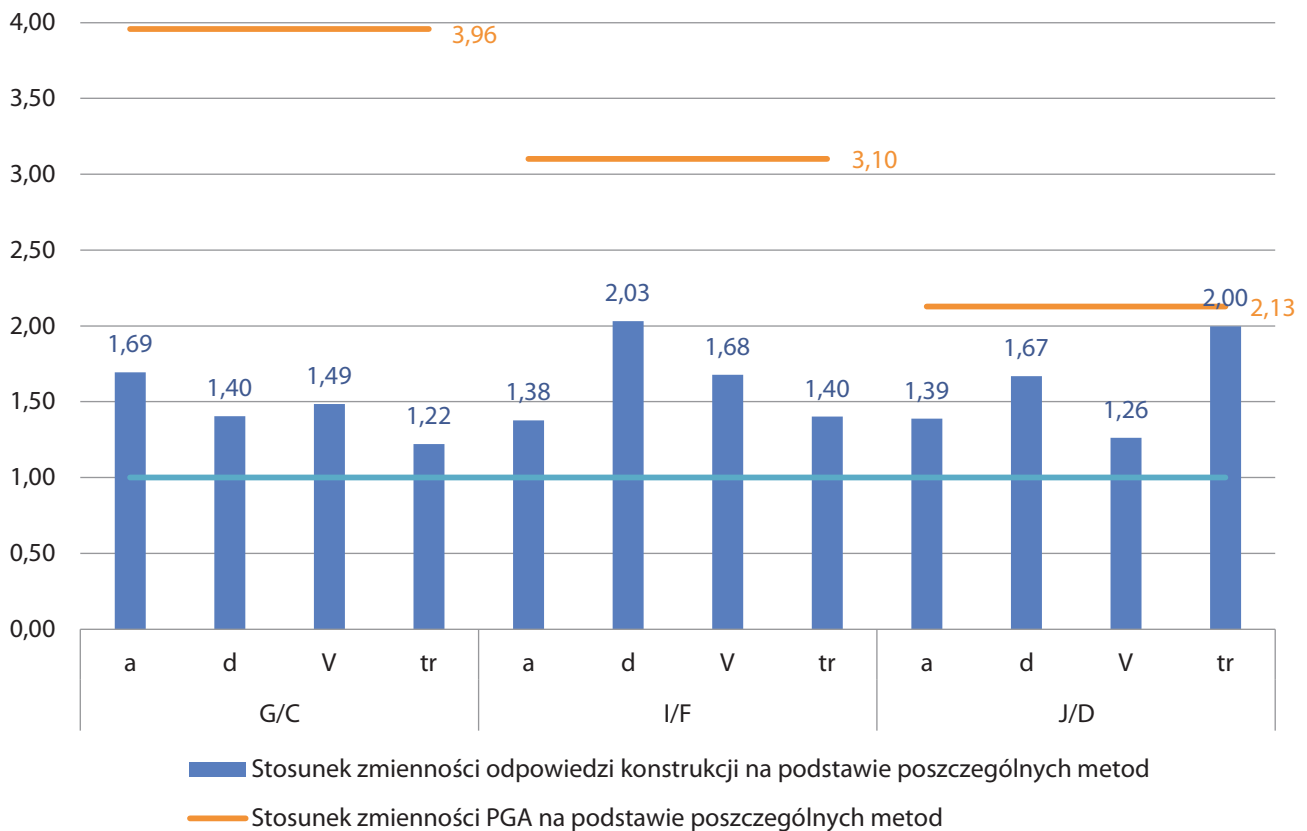
Dane w tabeli 1 pokazują, że dla większości badanych metod zmienność podstawowego parametru, jakim jest maksymalne przyspieszenie gruntu (PGA), jest na podobnym poziomie w obu prostopadłych kierunkach poziomych przemieszczeń. Wyjątek stanowią metody E, F, G, gdzie różnica pomiędzy zmiennością w obu kierunkach przekracza 30%. Interpretacja grupy E wskazuje, iż jeden z akcelerogramów w znacznym stopniu wpływa na średnią i odchylenie standardowe całej grupy w kierunku x (średnie przyspieszenie maksymalne wynosi $8,21 \text{ m/s}^2$, odchylenie standardowe $9,35 \text{ m/s}^2$, jeden z wyników $34,36 \text{ m/s}^2$). Powoduje to nie tylko zaburzenie w parametrach akcelerogramów, ale również w przypadku odpowiedzi konstrukcji (rys. 2–5). Sytuacja ta dotyczy metody spektrum warunkowego [11, 12], którego kształt nie jest związany z obwiednią spektrum naturalnych, dlatego autor nie zaleca rezygnacji ze skalowania podczas wyboru tej metody, a co najwyżej bardziej rygorystyczne ograniczenie współczynnika skali.

Wpływ poszczególnych parametrów procesu wyboru akcelerogramów na korelację pomiędzy zmiennością parametrów sejsmicznych i odpowiedzią konstrukcji zostało zinterpretowane poprzez określenie stosunku zmienności w parach poszczególnych metod. Każdorazowo porównaniu podlegają dwie metody, różniące się od siebie wyłącznie parametrem podlegającym analizie (np. metoda pozwalająca na skalowanie i uniemożliwiająca).

Tabela 2 wskazuje, iż sterowanie warunkami podczas wyboru akcelerogramów ma bezpośrednie przełożenie na podstawowy

parametr trzęsień ziemi, jakim jest maksymalne przyspieszenie gruntu. Stosunek zmienności przechyłu konstrukcji oraz maksymalnych przyspieszeń gruntu w przypadku wykorzystania metod z uwzględnieniem skalowania akcelerogramów oraz z jego pominięciem prezentują rysunki 8a oraz 8b. Umożliwienie skalowania wymuszeń kinematycznych zmniejsza zmienność PGA dla metod nie wykorzystujących dopasowania do odchylenia standardowego (stosunek B/A, F/C, E/D na ogół większy niż 1,0). Metody G–J nie wykazują takiej zależności, ponieważ brak skalowania w rzeczywistości ogranicza dostępną bazę danych, przez co dopasowanie do pożądanej nieregularności akcelerogramów jest dużo mniej dokładne. Niestety takiego odwzorowania nie widać w wynikach odpowiedzi konstrukcji. Porównanie metod C oraz F (różnią się wyłącznie możliwością skalowania) pokazuje, iż w kierunku y, pomimo iż zmienność maksymalnego przyspieszenia gruntu jest ok 20% większa dla metody F, zmienność przechyłu konstrukcji jest niższa o niemal 30%. Podobną sytuację pokazują metody G oraz I – skalowanie powoduje spadek zmienności PGA o 36% oraz wzrost zmienności przechyłu o 7%. Powyższy opis, pomimo dużej zbieżności wyników w przypadku niektórych metod, nie pozwala na jednoznaczne stwierdzenie zależności pomiędzy zmiennością PGA oraz odpowiedzią konstrukcji.

Również w przypadku typu spektrum odpowiedzi, będącego podstawą wyboru akcelerogramów, nie można powiedzieć o jednoznacznym jego wpływie na zmienność wyników. Prace nad kształtem spektrum podlegają nieustannym dyskusjom, a ponieważ jest ono silnie zależne od lokalnych warunków geologicznych oraz sejsmicznych, nie należy oczekiwać powstania jednorodnego spektrum, które będzie możliwe do zastosowania we wszystkich lokalizacjach i dla różnych zjawisk



Rys. 9. Stosunek zmienności wyników dla metod uwzględniających/nie uwzględniających docelowego odchylenia standardowego

czy to sejsmicznych czy parasejsmicznych [19]. Wybierając docelowe spektrum odpowiedzi, należy skupić się na wytycznych obowiązujących norm np. [7] lub literaturze poświęconej badaniom lokalnej sejsmiczności [20, 21].

Sytuacja ulega zmianie przy analizie uwzględnienia odchylenia standardowego podczas wyboru akcelerogramów. Wówczas zarówno parametry charakteryzujące wymuszenia oraz odpowiedź konstrukcji (w każdym z 4 badanych kryteriów) podlegają zwiększonej zmienności. Należy zwrócić jednak uwagę, iż zmiana tego parametru podczas wyboru akcelerogramów ma znacznie większy wpływ na maksymalne przyspieszenie, aniżeli na odpowiedź konstrukcji (rys. 9). W przypadku porównania metod C oraz G uwzględnienie odchylenia standardowego w funkcji optymalizacji zwiększa zmienność maksymalnego przyspieszenia z 16 do 59% (stosunek 3,96), natomiast stosunek zmienności dla poszczególnych parametrów odpowiedzi jest znacznie mniejszy i wynosi od 1,22 do 1,69. Podobne wnioski można wysnuć na podstawie porównania metod F-I (tutaj różnice są mniejsze, ale tendencja pozostaje taka sama). Najmniejsza różnica wynika z porównania grup D-J. W przypadku procesu selekcji z wykorzystaniem skalowania, spektrum docelowego opartego na pracy [16], umożliwienia modyfikacji spektrum poprzez jego uwarunkowanie od jednej z wartości (spektrum warunkowe), zmienność parametrów wybranych akcelerogramów wzrasta dwukrotnie

wraz z uwzględnieniem w optymalizacji odchylenia standardowego, natomiast zmienność odpowiedzi konstrukcji 1,26–2-krotnie. W porównaniu z analizą przeprowadzoną w pracy [8] stosunek współczynników zmienności jest na tym samym poziomie – dla przechyłu kondygnacji J/D równy 1,67, w badaniach Jayaram et al. równy 1,64 dla budynku 4-kondygnacyjnego oraz 1,95 dla budynku 20-kondygnacyjnego. Jest to swoisty rodzaj kompromisu pomiędzy oczekiwaniami sejsmologów, którym zależy będzie na odpowiedniej reprezentacji niepewności i ryzyk związanych z lokalizacją oraz projektantami, którzy dążą do jednoznacznych wyników swoich analiz.

Zestawienie wyników w tabeli 3 pokazuje, iż z perspektywy zmienności wyników metoda optymalizująca również wartość odchylenia standardowego wybranych akcelerogramów od wartości średniej, pozwala na bardziej stabilne wyniki (zmienność pozostaje na tym samym poziomie), nawet przy liczbie symulacji wskazanej w normie [7]. Należy jednak zaznaczyć, iż liczba ta wystarcza wyłącznie na jakościowe określenie poziomu odchylenia standardowego odpowiedzi konstrukcji, a w przypadku konieczności określenia jego wartości, należy znacząco zwiększyć liczbę symulacji (4-5 krotnie) [9]. Niepokojące jest zwiększenie odchyłek standardowych i zmienności związanych ze zmianą liczby wykorzystanych wymuszeń kinematycznych dla metod D i K (bez porównania odchyłek standardowych). Przyczyną

może być wykorzystanie tej samej bazy danych akceleroqramów, co przy zastosowaniu w procesie optymalizacji algorytmu greedy powoduje, że w grupie wybranych wymuszeń jest więcej składników oddalających się od spektrum docelowego. Istotne jest, aby w przypadku kiedy wyborze podlega 30–50 akceleroqramów, baza danych miała odpowiednie rozmiary, pozwalając na efektywne wykorzystanie algorytmu optymalizacji.

6. Podsumowanie

Przedstawiona w artykule analiza podyktowana była sprawdzeniem, jakie konsekwencje może mieć stosowanie różnych parametrów podczas wyboru zapisów time-history w trakcie procesu projektowania. Dotychczasowe badania nie różnicowały spektrum docelowego oraz możliwości skalowania akceleroqramów, skupiając się na rozbieżności pomiędzy dopasowaniem do średniej lub średniej i odchylenia standardowego. Pomimo wielu możliwości w tej kwestii przydatność poszczególnych metod jest oceniana głównie na podstawie poziomu dyspersji parametrów samych akceleroqramów. Jak pokazują jednak zaprezentowane wyniki, sama zmiana spektrum lub umożliwienie skalowania wymuszeń kinematycznych ma niewielki wpływ na uzyskanie pełniejszej charakterystyki sejsmicznej lokalizacji (niewielka zmienność PGA), a jednocześnie nie jest możliwe jednoznaczne określenie wpływu na zmienność odpowiedzi konstrukcji. Zastosowanie spektrum projektowego będącego obwiednią możliwych zjawisk oraz wybór akceleroqramów, które w osobnym, bezpośrednim porównaniu stanowią najlepsze dopasowanie, będzie podejściem zachowawczym, preferującym spektra o nienaturalnym, specyficznym kształcie, co prowadzi do konserwatywnych wyników. Oparcie selekcji na metodzie spektrum CMS jest bardziej odpowiednie i lepiej oddaje ryzyko sejsmiczne i prowadzi do bardziej prawdopodobnych wyników odpowiedzi konstrukcji w zakresie średniej odpowiedzi, co jest sugerowane przez Eurokod [7]. Projekty wymagające analizy prawdopodobieństwa zniszczenia konstrukcji lub uwzględniające w obliczeniach wartość odchylenia standardowego poszczególnych wielkości wymagają wykorzystania metody wyboru uwzględniającej w procesie optymalizacji zbioru wybranych akceleroqramów odchylenia standardowego, co jednocześnie skutkuje koniecznością przeprowadzenia przynajmniej 30, a w przypadku analizy zniszczenia przynajmniej 40 symulacji, zgodnie z zaleceniami [9]. Kluczowym podczas wyboru takiej liczby zapisów jest zbudowanie odpowiedniej bazy danych, zapewniającej efektywny proces optymalizacji.

BIBLIOGRAFIA

[1] Haselton C. B., Evaluation of ground motion selection and modification methods: predicting median interstory drift response of buildings, PEER Ground Motion Selection and Modification Working Group, 2009

- [2] Kim S.-E., Choi S.-H., Practical advanced analysis for semi-rigid space frames, *International Journal of Solids and Structures*, tom 38, 2001, str. 9111–9131
- [3] Nguyen P.-C., Kim S.-E., Nonlinear elastic dynamic analysis of space steel frames with semi-rigid connections, *Journal of Constructional Steel Research* 84/2013, str. 72–81
- [4] Nguyen P.-C., Kim S.-E., Nonlinear inelastic time-history analysis of three-dimensional semi-rigid steel frames, *Journal of Constructional Steel Research* 101/2014, str. 192–206
- [5] Ngo-Huu C., Nguyen P.-C., Kim S.-E., Second order plastic-hinge analysis of space semi-rigid steel frames, *Thin-Walled Structures* 60/2012, str. 98–104
- [6] Chiorean C., A computer method for nonlinear inelastic analysis of 3D semi-rigid steel frameworks, *Engineering Structures*, tom 31, 2009, str. 3016–3033
- [7] EN 1998-1:2004 Eurokod 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for building, European Committee for Standardizations, 2004
- [8] Jayaram N., Lin T., Baker J. W., A computationally efficient ground-motion selection algorithm for matching a target response spectrum mean and variance, *Earthquake Spectra*, tom 27, 3/2011, str. 797–815
- [9] Haselton C. B., Whittaker A. S., Hortaacsu A., Baker J. W., Bray J., Grant D., Selecting and scaling earthquake ground motions for performing response-history analyses, [w:] *Proceedings of the 15 world conference on earthquake engineering*, Lisboa, 2012
- [10] Bąk M., Wykorzystanie analizy time-history podczas projektowania konstrukcji obciążonych sejsmicznie, *Przegląd Budowlany* 5/2017, str. 37–46
- [11] Baker J. W., i Cornell C. A., Spectral shape, epsilon and record selection, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 35/2006, str. 1077–1095
- [12] Baker J. W., Conditional mean spectrum: tool for ground-motion selection, *Journal of Structural Engineering* 137/2011, str. 322–331
- [13] Ha S. J., Han S. W., An efficient method for selecting and scaling ground motions matching target response spectrum mean and variance, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 45/2016, str. 1381–1387
- [14] Baker J. W., Lee C., An Improved Algorithm for Selecting Ground Motions to Match a Conditional Spectrum, *Journal of Earthquake Engineering*, tom 22, 4/2018, str. 708–723
- [15] Trifunac M. D., Earthquake response spectra for performance based design – A critical review, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 37/2012, str. 73–83
- [16] Boore D. M., Stewart J. P., Seyhan E., Atkinson G. M., NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes, *Earthquake Spectra*, tom 30, 3/2014, str. 1057–1085
- [17] PEER [Online]. Available: <https://ngawest2.berkeley.edu>
- [18] S. Ltd., SeismoStruct 2016 – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures, available from <http://www.seissoft.com>, 2016
- [19] Zembaty Z., How to model rockburst seismic loads for civil engineering purposes?, *Bulletin of Earthquake Engineering*, tom 9, 9/2011, str. 1403–1416
- [20] C. Meletti F., Visini V. D'Amico, Rovida A., Seismic hazard in central Italy and the Amatrice earthquake, *Annals of Geophysics*, tom 59, 2016, str. 1–8
- [21] Murru M., Taroni M., Akinci A., Falcone G., What is the impact of the August 24, 2016 Amatrice earthquake on the seismic hazard assessment in central Italy?, *Annals of Geophysics*, tom 59, 2016
- [22] L. de Lima, S. e Andrade, P. da S. Vllasco, L. da Silva, Experimental and mechanical model fo predicting the behaviour of minor axis beam-to-column semi-rigid joints, *International Journal of Mechanical Sciences*, tom 44, 2002, str. 1047–1065
- [23] L. Simoes da Silva, Towards a consistent design approach for steel joints under generalized loading, *Journal of Constructional Steel Research*, tom 64, 2008, str. 1059–1075
- [24] Cabrero J., Bayo E., The semi-rigid behaviour of three-dimensional steel beam-to-column joints subjected to proportional loading. Part I. Experimental evaluation, *Journal of Constructional Steel Research*, tom 63, 2007, str. 1241–1253