BUDOWNICTWO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
3-B/2010
ZESZYT 11
ROK 107
ISSUE 11
YEAR 107

WOJCIECH MIGDA, ROBERT JANKOWSKI*

DOŚWIADCZALNE BADANIA SMUKŁYCH SŁUPÓW PODDANYCH DEFORMACJI I OBCIĄŻENIOM UDERZENIOWYM PODCZAS TRZĘSIEŃ ZIEMI

EXPERIMENTAL STUDY ON SLENDER DEFORMED COLUMNUS UNDER IMPACT LOAD DUE TO EARTHQUAKE EXCITATION

Streszczenie

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników badań doświadczalnych dotyczących zachowania się modeli słupów smukłych pod wpływem pionowego obciążenia uderzeniowego przy wstępnej deformacji na skutek poziomego przemieszczenia podpór w czasie trzęsień ziemi. Podczas badań eksperymentalnych na górną część zdeformowanych prętów stalowych zrzucano kule wykonane z plasteliny. Wyniki badań pokazują, że wraz ze wzrostem relatywnego przemieszczenia pomiędzy mocowaniem górnej i dolnej części pręta wartości maksymalnej siły działającej na pręt maleją, zaś poziome przemieszczenia środka pręta znacząco rosną. Wyniki wykazują jednak, że pomimo wstępnej deformacji pręta potrafi on przenieść dość znaczne obciążenie dynamiczne.

Słowa kluczowe: *badania eksperymentalne, deformacja słupów, obciążenie uderzeniowe*

Abstract

The aim of the paper is to investigate experimentally the behaviour of slender columns under bending observed during earthquakes that are additionally subjected to a vertical impact load. In the experiment, impact load was created by dropping balls made of plasticine onto the top of the deformed steel columns. The results of the experiment show that with the increase of the pre-deformation of a column the peak force acting on its top decreases, whereas the horizontal displacements of the middle part of column increase. The results indicate, however, that even the deformed column is capable to carry substantial dynamic load.

Keywords: experimental study, deformed column, impact load

* Mgr inż. Wojciech Migda, dr hab. inż. Robert Jankowski, prof. PG, Katedra Konstrukcji Metalowych i Zarządzania w Budownictwie, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Oznaczenia

a_1 – przyspieszenie platformy [m/s^2]
a_2 – przyspieszenie kuli [m/s^2]
F – siła pionowa działająca na górną część pręta [N]
m_1 – masa platformy [kg]
m_2 – masa kuli [kg]
t – czas [s]

1. Wstęp

Trzęsienia ziemi stanowią dla konstrukcji budowlanych wyjątkowe obciążenia, podczas których może dojść do znacznych deformacji poziomych z jednoczesnym wystąpieniem pionowych obciążeń uderzeniowych. Taka sytuacja pojawia się w przypadku awarii tzw. słabego piętra (*soft-storey failure*), gdy dochodzi do zniszczenia całego piętra i wyższe części budynku spadają na kondygnację znajdującą się poniżej. Szacuje się, że uszkodzenia tego typu (fot. 1) wystąpiły w większości zniszczonych budynków podczas trzęsienia ziemi Hyougoken-Nanbu w Kobe (17.01.1995) [1]. Również podczas tragicznego trzęsienia ziemi z epicentrum na Sumatrze (26.12.2004) uszkodzenia typu słabego piętra spowodowały znaczne straty w centrum Banda Aceh [2]. Tego typu uszkodzenia powodują, że elementy konstrukcyjne niższej kondygnacji (np. słupy), podlegające deformacjom poziomym na skutek działania sił sejsmicznych, poddane są dodatkowemu obciążeniu uderzeniowemu. Jeżeli nośność tych elementów nie jest wystarczająco duża, może dojść do zniszczenia progresywnego całej budowli i w efekcie zwiększenia liczby ofiar i strat materialnych [3].



Fot. 1. Zniszczenie słabego piętra na poziomie środkowej kondygnacji (Kobe 1995)
Photo 1. Soft-storey failure of the intermediate storey (Kobe 1995)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Badania dotyczące obciążeń uderzeniowych konstrukcji budowlanych powstających podczas trzęsień ziemi prowadzone są w ramach inżynierii sejsmicznej od kilkunastu lat. Jednak dotychczasowe prace badawcze dotyczyły głównie zjawiska poziomej interakcji pomiędzy sąsiednimi budowlami (*structural pounding*) o zbyt małej przerwie dylatacyjnej pomiędzy nimi (zob. np. [4–8]). Cennych wniosków dostarczają także prace dotyczące badań i analiz stropów poddanych uderzeniom (zob. np. [9]).

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników badań doświadczalnych dotyczących zachowania się modeli słupów smukłych pod wpływem obciążenia uderzeniowego przy wstępnej deformacji powstałej na skutek poziomego przemieszczenia podpór. Podczas badań eksperymentalnych wykonanych na specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym na stalowe pręty zamocowane pomiędzy ruchomą platformą a podstawą zrzucano kule wykonane z plasteliny. Badania opisane w niniejszym artykule, bazujące na relatywnie prostym modelu doświadczalnym, umożliwiły przeanalizowanie mechanizmu towarzyszącego awarii słabego piętra.

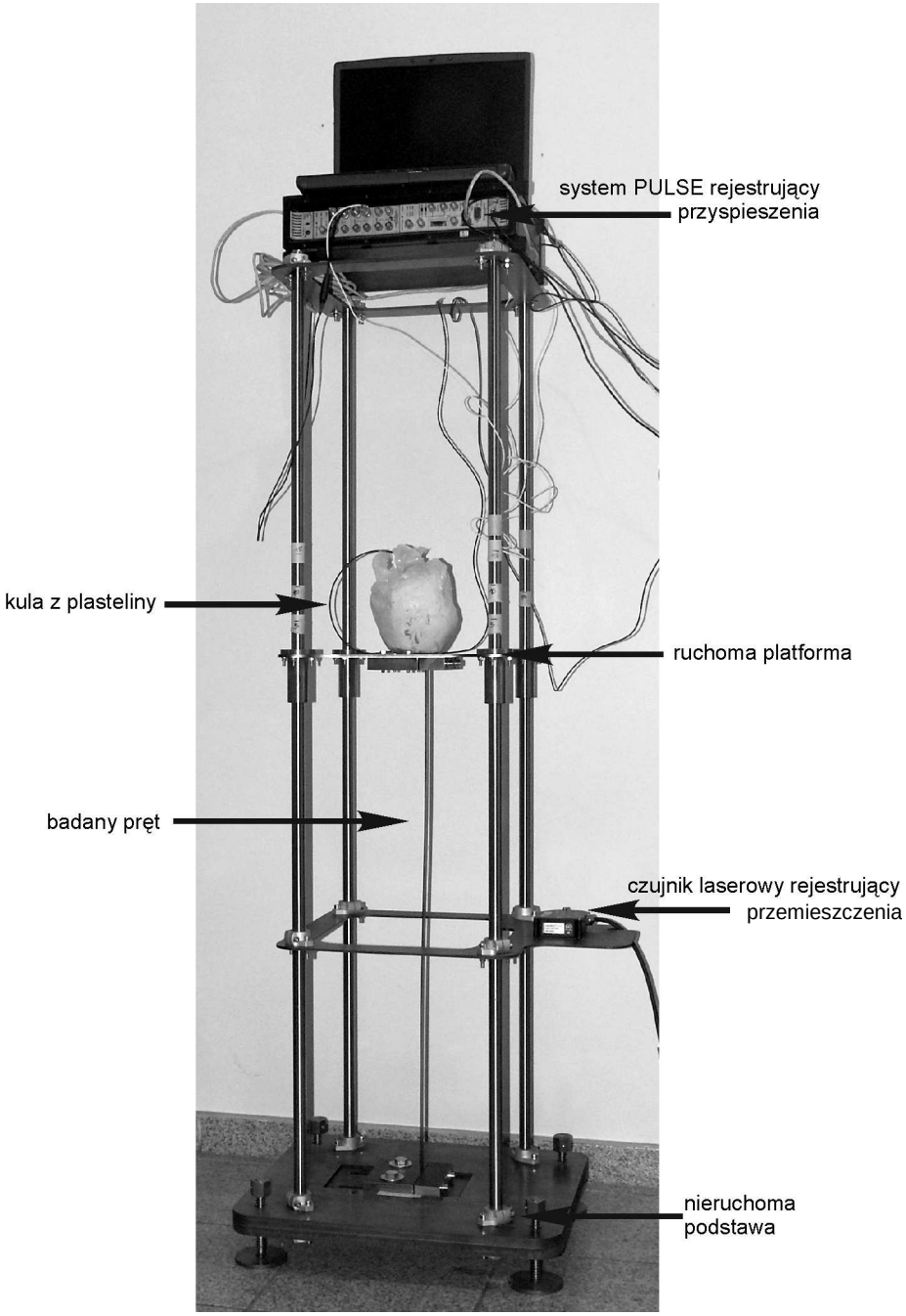
2. Opis stanowiska do badań doświadczalnych

Wykorzystane w badaniach stanowisko doświadczalne (fot. 2) składa się z ruchomej platformy stalowej o masie m_1 = 6 kg, wyposażonej w cztery przemysłowe łożyska liniowe, poruszającej się po pionowych prowadnicach, co pozwala na swobodne przemieszczanie się platformy jedynie w kierunku pionowym (pozostałe przemieszczenia i obroty są zablokowane). Na dole stanowiska znajduje się nieruchoma podstawa. Między podstawą a platformą wprowadzano pręt stalowy o znacznej smukłości, który był utwierdzony w podstawie oraz w platformie. W trakcie badań przesuwano poziomo dolne utwierdzenie pręta, przeprowadzając jego wstępną deformację, symulując w ten sposób rzeczywistą deformację słupów, która występuje podczas trzęsienia ziemi. Poziome przemieszczenie obu mocowań (górnej i dolnej) względem siebie zwiększano stopniowo od 0 do 30 mm (co 10 mm). Testowane pręty, wykonane ze stali A-I, miały długość 800 mm w świetle podpór i przekrój poprzeczny 2 × 20 mm. Wyznaczona teoretycznie wartość statycznej siły krytycznej dla badanych prętów (ze względu na wyboczenie) wynosi 168,6 N.

3. Badania doświadczalne

Podczas badań, na ruchomą platformę stanowiska badawczego (fot. 2) zrzucano, z wysokości 50 i 100 mm, obciążenie w postaci kuli o masie m_2 = 2 kg wykonanej z plasteliny. Przyjęcie takiego obciążenia miało za zadanie symuluję rzeczywistego zderzenia pomiędzy spadającymi kondygnacjami a dolną częścią budynku, które ma charakter niemal plastyczny i odznacza się znaczną dyssypacją energii uderzeniowej [10]. Podczas badań za pomocą dwóch akcelerometrów rejestrowano pionowe przyspieszenia platformy – $a_1(t)$, oraz kuli – $a_2(t)$. Przyspieszenia platformy mierzono akcelerometrem jednokierunkowym, w kuli zaś zastosowano akcelerometr trójosiowy, co pozwalało wyznaczyć maksymalne przyspieszenie występujące w kuli jako wypadkową z trzech składowych. Dodatkowo, za pomocą czujnika laserowego, rejestrowano poziome przemieszczenia

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



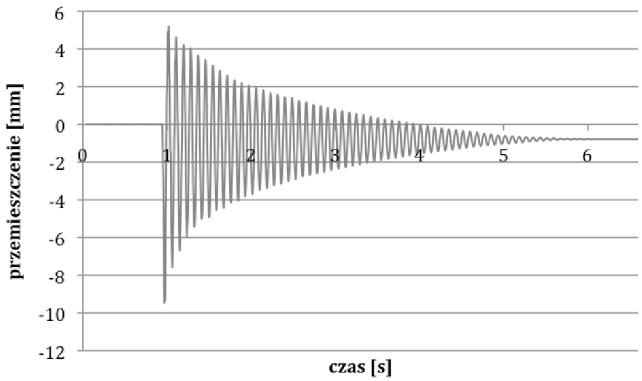
Fot. 2. Stanowisko badawcze
Photo 2. Setup of the experiment

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

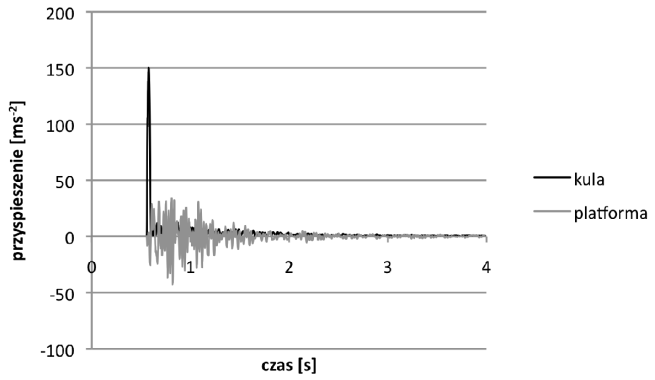
środka pręta (fot. 2). Do celów pomiarowch oraz do akwizycji danych wykorzystano system PULSE. Przykładowe przebiegi czasowe poziomego przemieszczenia środka pręta oraz pionowych przyspieszeń platformy i kuli przedstawiono na rys. 1 i 2. Dodatkowo na rys. 3 pokazano przebieg czasowy pionowej siły – $F(t)$, działającej na górną część pręta w wyniku zderzenia kuli z platformą, której wartość dla każdego kroku czasowego wyznaczono ze wzoru

$$F(t) = m_1 a_1(t) + m_2 a_2(t) \tag{1}$$

Wartości maksymalne tej siły w zależności od wstępnej deformacji w postaci relatywnego poziomego przemieszczenia pomiędzy mocowaniami pręta pokazano na rys. 4. Z kolei na rys. 5 przedstawiono zależność pomiędzy ekstremalnym przemieszczeniem poziomym środka pręta a jego wstępną deformacją.

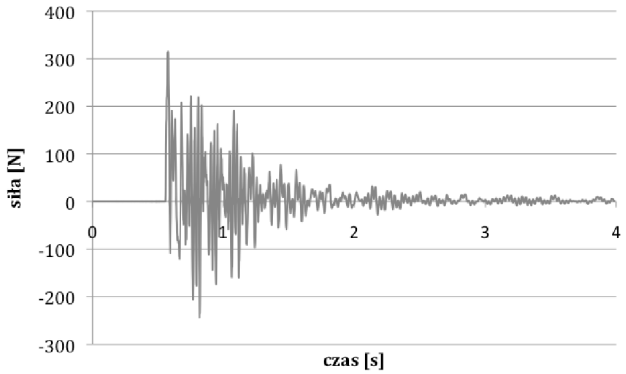


Rys. 1. Przebieg czasowy poziomego przemieszczenia środka pręta (wstępna deformacja pręta: 20 mm, wysokość zrzutu kuli: 5 cm)
Fig. 1. Horizontal displacement time history of the middle part of the column (pre-deflection: 20 mm, drop height: 5 cm)

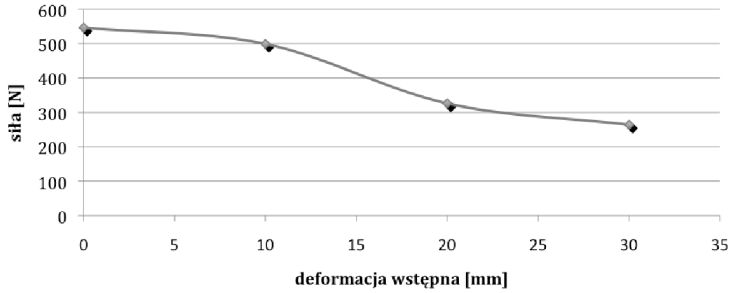


Rys. 2. Przebiegi czasowe pionowych przyspieszeń platformy i kuli (wstępna deformacja pręta: 20 mm, wysokość zrzutu kuli: 5 cm)
Fig. 2. Time history of the vertical accelerations in the platform and ball (pre-deflection: 20 mm, drop height: 5 cm)

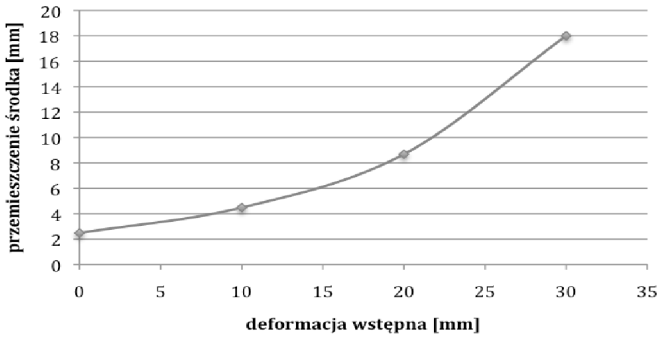
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 3. Przebieg czasowy pionowej siły działającej na górną część pręta w wyniku uderzenia (wstępna deformacja pręta: 20 mm, wysokość zrzutu kuli: 5 cm)
Fig. 3. Time history of vertical force acting on the top of column as the result of impact (pre-deflection: 20 mm, drop height: 5 cm)



Rys. 4. Maksymalna siła pionowa działająca na górną część pręta w wyniku uderzenia w zależności od wstępnej deformacji (wysokość zrzutu kuli: 5 cm)
Fig. 4. Peak vertical force acting on the top of column as the result of impact with respect to pre-deflection (drop height: 5 cm)



Rys. 5. Ekstremalne poziome przemieszczenie środka pręta w zależności od jego wstępnej deformacji
Fig. 5. Peak horizontal displacement of the middle part of the column with respect to its pre-deflection

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

4. Wnioski

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych dotyczących zachowania się modeli słupów smukłych pod wpływem pionowego obciążenia uderzeniowego przy wstępnej deformacji powstałej na skutek poziomego przemieszczenia podpór podczas trzęsień ziemi. Podczas badań na platformę połączoną z górną częścią wstępnie zdeformowanych prętów stalowych zrzucano, z różnych wysokości, kule wykonane z plasteliny, mierząc pionowe przyspieszenia platformy i kuli oraz poziome przemieszczenia środka pręta.

Wyniki badań pokazują, że poziom rejestrowanych wartości zależy od wstępnej deformacji pręta. Wraz ze wzrostem relatywnego przemieszczenia pomiędzy mocowaniem górnej i dolnej części pręta wartości przyspieszeń maleją, zaś poziome przemieszczenia środka pręta zwiększają się w sposób istotny. Badania wykazują jednak, że pomimo wstępnego obciążenia pręta oraz jego wstępnej deformacji potrafi on przenieść dość znaczne obciążenie dynamiczne (nawet kilkukrotnie większe od statycznej siły krytycznej), jeżeli wysokość upadku kuli, a co za tym idzie wartość przyspieszeń, które odpowiadają sile dynamicznej nie przekraczają pewnego poziomu.

Opisany w niniejszym artykule eksperyment przeprowadzono dla małych modeli słupów. Potrzebne są zatem dalsze badania z zastosowaniem większych modeli w celu weryfikacji uzyskanych wyników.

Literatura

[1] Watanabe F., *Behavior of reinforced concrete buildings during the Hyougoken-Nanbu earthquake*, Cement and Concrete Composites, vol. 19, 1997, 203-211.

[2] Ghobarah A., Saatcioglu M., Nistor I., *The impact of the 26 December 2004 earthquake and tsunami on structures and infrastructure*, Engineering Structures, vol. 28, 2006, 312-326.

[3] Talaat M., Mosalam K.M., *Modeling progressive collapse in reinforced concrete buildings using direct element removal*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 38, 2009, 609-634.

[4] Jankowski R., Wilde K., Fujino Y., *Pounding of superstructure segments in isolated elevated bridge during earthquakes*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 27, 1998, 487-502.

[5] Karayannis C.G., Favvata M.J., *Earthquake-induced interaction between adjacent reinforced concrete structures with non-equal heights*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 34, 2005, 1-20.

[6] Jankowski R., *Non-linear viscoelastic modelling of earthquake-induced structural pounding*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 34, 2005, 595-611.

[7] Anagnostopoulos S.A., Karamaneas C.E., *Use of collision shear walls to minimize seismic separation and to protect adjacent buildings from collapse due to earthquake-induced pounding*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 37, 2008, 1371-1388.

[8] Jankowski R., *Non-linear FEM analysis of earthquake-induced pounding between the main building and the stairway tower of the Olive View Hospital*, Engineering Structures, vol. 31, 2009, 1851-1864.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[9] Zineddin M., Krauthammer T., *Dynamic response and behavior of reinforced concrete slabs under impact loading*, International Journal of Impact Engineering, vol. 34, 2007, 1517-1534.

[10] Goldsmith W., *Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids*, Edward Arnold, London 1960.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ