

Krystyna Kuźniar

Neuronowe wyznaczanie spektrów odpowiedzi od przebiegów drgań wybranej kondygnacji budynku*

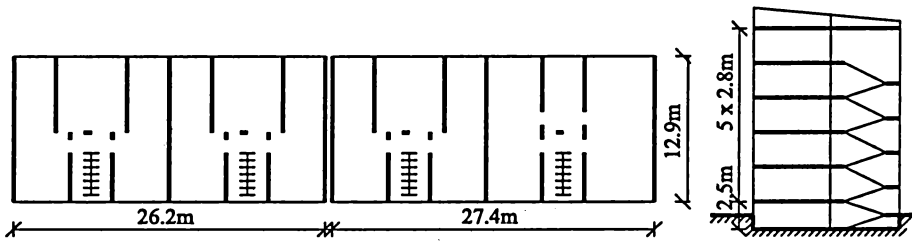
W analizie dynamicznej konstrukcji bardzo często zarówno wymuszenia typu sejsmicznego, jak i odpowiedzi budynków na takie oddziaływania opisuje się za pomocą spektrów odpowiedzi [1, 4, 5]. Spektrum odpowiedzi zawiera informacje o wymuszeniu kinematycznym, a jego ideą jest przyjęcie modelu obiektu w postaci oscylatora, którego drgania wymuszane są ruchem podłoża. Jest to funkcja podająca maksymalne wartości odpowiedzi (przyśpieszenia, prędkości, przemieszczenia) oscylatorów na tego typu wymuszenie, w zależności od okresów drgań własnych oscylatorów oraz założonego tłumienia [6].

Określenie związku między spektrum odpowiedzi wymuszenia i spektrum odpowiedzi od przebiegu drgań wybranej kondygnacji budynku pozwoliłoby na wyznaczenie odpowiedzi dynamicznej obiektu na wymuszenia parasejsmiczne bez konieczności budowania modelu budynku i stosowania równań ruchu. W tym celu zastosowano sztuczne sieci neuronowe i ideę ramek (podobrazów), wykorzystywaną w transmisji obrazów. Właśnie w transmisji obrazów dane dzieli się na ramki (podobrazy). Następnie każda ramka jest przesyłana oddzielnie. W niniejszym artykule dokonano adaptacji idei ramek w celu budowy odpowiednich sieci neuronowych.

Opis przeprowadzonych pomiarów

Analiza dotyczy mieszkalnego, ścianowego budynku prefabrykowanego o średniej wysokości (pięciokondygnacyjnego). Jest to budynek typu BSK, zbudowany w technologii wieloblokowej, posadowiony na podłożu gruntowym na ławach fundamentowych. Na rys. 1 schematycznie pokazano rzut poziomy (z widocznym układem konstrukcyjnym) i przekrój pionowy tego obiektu.

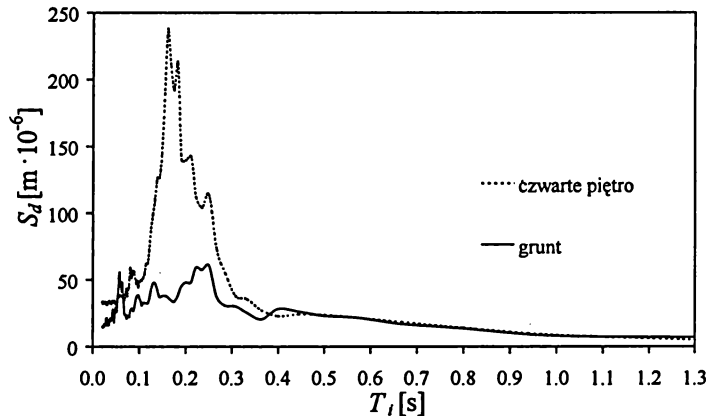
* Tekst złożono do druku 26 września 2005 roku.



Rys. 1. Rzut poziomy i przekrój pionowy budynku BSK

Badania budynku prowadzono w skali naturalnej, wielokrotnie przez wiele lat [2, 3]. Źródłem drgań były odstrzały materiału wybuchowego w pobliskim kamieniołomie.

Z wielu uzyskanych wyników badań eksperymentalnych pod uwagę wzięto szesnaście. Dotyczą one drgań poziomych w kierunku poprzecznym budynku i stanowią parę: wymuszenie – odpowiedź budynku. Mierzono jednocześnie przemieszczenia drgań na gruncie przed budynkiem i w poziomie posadzki czwartego piętra budynku. Dla każdego przebiegu przemieszczeń drgań (wymuszeń i odpowiedzi budynku) policzono przemieszczeniowe spektrum odpowiedzi. Przyjęto ułamek tłumienia krytycznego $\xi = 2\%$ [3]. Na rys. 2 pokazano przykładowo parę spektrów odpowiedzi od przebiegów drgań: wymuszenie – odpowiedź w poziomie posadzki czwartego piętra budynku.



Rys. 2. Przemieszczeniowe spektra odpowiedzi od przebiegów drgań w kierunku poprzecznym budynku BSK w poziomie gruntu i posadzki czwartego piętra

Neuronowe odwzorowanie spektrów odpowiedzi wymuszeń z gruntu w spektra odpowiedzi przebiegów drgań wybranej kondygnacji budynku z wykorzystaniem idei ramek (podobrazów)

Wykorzystując dane eksperymentalne z badań przeprowadzonych *in situ*, podjęto próbę zastosowania techniki neuronowej do określenia związku między spektrami odpowiedzi wyznaczonymi na podstawie przebiegów drgań zarejestrowanych na gruncie przed budynkiem i w poziomie czwartego piętra obiektu. W celu budowy odpowiednich sieci neuronowych, dokonano adaptacji idei ramek (podobrazów) z transmisji obrazów.

Odpowiednie spektra podzielono na segmenty (fragmenty, części). Każda część spektrum odpowiedzi wymuszenia odwzorowywana była za pomocą sieci neuronowej w odpowiadającą jej wartość spektrum odpowiedzi od przebiegu drgań wybranej kondygnacji budynku.

Okresy drgań (T_i) wzięto z przedziału [0.02, 1.3]s. T_i przyjmowano wg związku $T_i = 1/f_i$, przy czym krok próbkowania f_i wynosił 0.25 Hz. Otrzymano zatem 198 wartości przemieszczeniowego spektrum odpowiedzi dla każdego z analizowanych przebiegów drgań (zarówno w poziomie gruntu, jak i w poziomie posadzki czwartego piętra budynku).

Zaproponowano następujący wektor wejścia:

$$\mathbf{x}_{(6 \times 1)} = \{ S_{dg}(T_{i-2}), S_{dg}(T_{i-1}), S_{dg}(T_i), S_{dg}(T_{i+1}), S_{dg}(T_{i+2}), T_i \} \quad (1)$$

gdzie: $T_{i-2}, T_{i-1}, T_i, T_{i+1}, T_{i+2}$ – kolejne okresy drgań, $i = 3, \dots, 196$; S_{dg} – przemieszczeniowe spektrum odpowiedzi od przebiegów drgań zarejestrowanych na gruncie.

Na wyjściu z sieci wyliczano odpowiednią wartość przemieszczeniowego spektrum odpowiedzi w poziomie posadzki czwartego piętra budynku:

$$\mathbf{y}_{(1 \times 1)} = \{ S_{do}(T_i) \}, i = 3, \dots, 196 \quad (2)$$

Analizowano sieci neuronowe typu wstecznej propagacji błędu z metodą uczenia Resilient back-propagation i sigmoidalną funkcją aktywacji. Wykorzystano symulator neuronowy SNNS, wersja 4.2 [7]. Przydatność budowanych sieci oceniana była na podstawie błędów uczenia i testowania (Mean Square Error) wg wzoru (3), błędów względnych wg wzorów (4), współczynnika korelacji liniowej wg wzoru (5), standardowego błędu resztkowego wg wzoru (6):

$$MSE(V) = \frac{1}{V \cdot M} \sum_{p=1}^V \sum_{li=1}^M (z_i^{(p)} - y_i^{(p)})^2 \quad (3)$$

$$ep_i = (1 - y_i^{(p)} / z_i^{(p)}) \cdot 100\%, \quad ep = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |ep_i|, \quad eV_{avr} = \frac{1}{V \cdot M} \sum_{p=1}^V \sum_{i=1}^M |ep_i| \quad (4)$$

$$r(V) = \frac{\sum_{p=1}^V \sum_{i=1}^M (z_i^{(p)} - \bar{z}) \cdot (y_i^{(p)} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{p=1}^V \sum_{i=1}^M (z_i^{(p)} - \bar{z})^2 \cdot \sum_{p=1}^V \sum_{i=1}^M (y_i^{(p)} - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

$$st\epsilon(V) = \sqrt{\frac{1}{V \cdot M} \sum_{p=1}^V \sum_{i=1}^M (z_i^{(p)} - y_i^{(p)})^2} \quad (6)$$

gdzie: $z_i^{(p)}$ $y_i^{(p)}$ – wartość oczekiwana i wyliczona i -tego neuronu w p -tym wzorcu;
 V – liczba wzorców, $V = L, T, P$; L – liczba wzorców uczących, T – liczba wzorców testujących, P – liczba wszystkich wzorców; M – liczba wyjść; \bar{z} , \bar{y} , – wartości śred-

nie (oczekiwana i wyliczona); $\bar{z} = \frac{1}{V \cdot M} \sum_{p=1}^V \sum_{i=1}^M z_i^{(p)}$, $\bar{y} = \frac{1}{V \cdot M} \sum_{p=1}^V \sum_{i=1}^M y_i^{(p)}$.

Do oceny uzyskanych rezultatów obliczeń wykorzystano również tzw. procent sukcesu (Success Ratio) $SR[\%]$ w funkcji błędu względnego $ep[\%]$. SR określa jaki procent wzorców uzyskano z predykcji neuronowej z błędem nie większym niż ep .

Z danych doświadczalnych uzyskano $P=3104$ wzorce. Można je pogrupować w szesnastu grupach odpowiadających szesnastu pomierzonym parom przebiegów przemieszczeń drgań: wymuszenie – odpowiedź budynku. Każda grupa zawiera 194 wzorce. Do uczenia sieci wzięto osiem z tych grup ($n_L=8$) i zastosowano bardzo prostą strukturę sieci: 6 – 5 – 1.

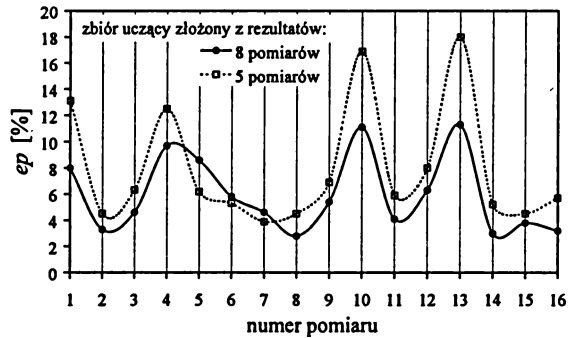
Dodatkowo obliczenia przeprowadzono dla sieci o takich samych architekturach (6 – 5 – 1), ale do ich uczenia brano kolejno zbiory wzorców złożone z $n_L = 2, 3, 4, 5$ grup danych. Jak już wspomniano powyżej, każda grupa tworzona była na podstawie odpowiedniej pary pomierzonych przebiegów drgań: wymuszenie – odpowiedź budynku. Celem tych rozważań było zbadanie, czy zostaną uzyskane satysfakcjonujące wyniki, gdy do zbudowania zbioru uczącego przeznaczony się mniej niż 50% wzorców.

W tabeli 1 podano błędy uczenia i testowania sieci, do uczenia których wzięto odpowiednio $n_L = 8$ i $n_L = 5$ grup danych.

| n_L | Liczba wzorców | | $MSE(L)$ | Liczba epok se | $MSE(T)$ | | $eV_{avr}[\%]$ | | $r(P)$ | st $\varepsilon (P)$ |
|-------|----------------|------|----------|------------------|----------|---------|----------------|-----|--------|----------------------|
| | L | T | | | średni | max | L | T | | |
| 8 | 1552 | 1552 | 0.00007 | 3000 | 0.00065 | 0.00161 | 3.8 | 8.1 | 0.791 | 0.019 |
| 5 | 970 | 2134 | 0.00010 | 3000 | 0.00072 | 0.00217 | 5.2 | 9.2 | 0.687 | 0.023 |

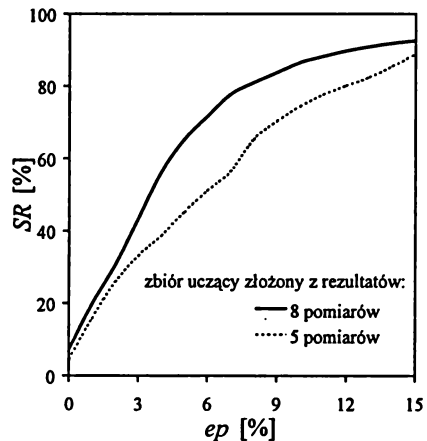
Tabela 1. Błędy sieci neuronowych WPB o strukturze 6 – 5 – 1

Z kolei na rys. 3 porównano średnie błędy względne obliczone osobno dla danych z każdego przeprowadzonego pomiaru par przebiegów drgań: wymuszenie – odpowiedź budynku.



Rys. 3. Średnie błędy względne odpowiedzi budynku wyznaczonej neuronowo od każdego z rozważanych wymuszeń

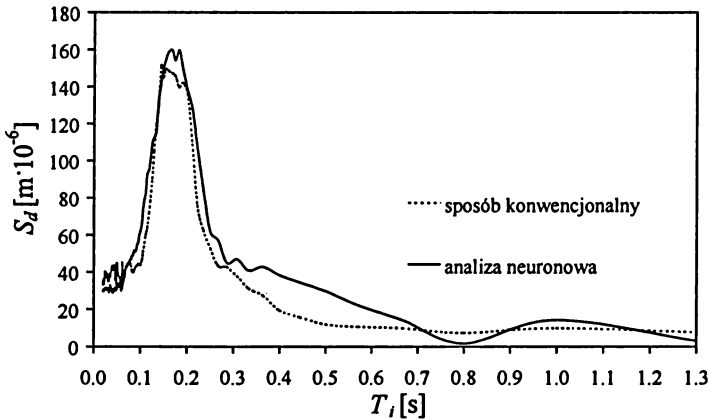
Na rys. 4 zamieszczono wykresy procentu sukcesu $SR(ep)[\%]$ predykcji przemieszczeniowych spektrów odpowiedzi w poziomie posadzki czwartego piętra budynku przy wykorzystaniu powyższych sieci.



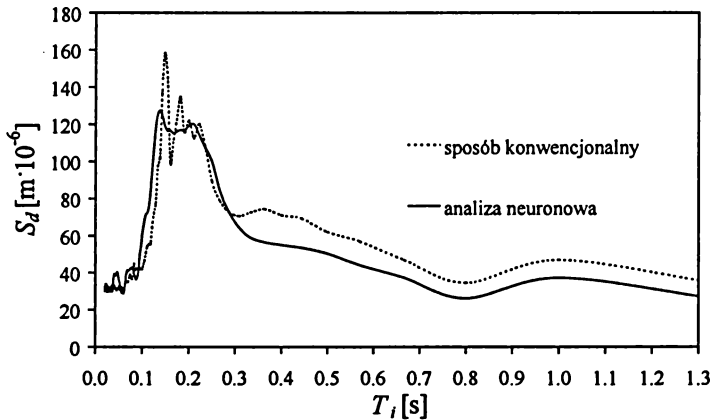
Rys. 4. Procent sukcesu $SR(ep)$ dla neuronowej predykcji spektrów odpowiedzi w poziomie posadzki czwartego piętra budynku

Natomiast na rys. 5 przykładowo pokazano porównanie przemieszczeniowych spektrów odpowiedzi w poziomie posadzki czwartego piętra obliczonych konwencjonalnie i wyznaczonych neuronowo przy użyciu sieci, dla której zbiór uczący składał się z 50% wszystkich wzorców (8 par przebiegów drgań).

a)



b)



Rys. 5. Porównanie przemieszczeniowych spektrów odpowiedzi wyznaczonych w poziomie posadzki czwartego piętra w sposób konwencjonalny i przy wykorzystaniu analizy neuronowej

Wnioski

– Główną korzyścią przedstawionej metody wykorzystującej analizę neuronową i ideę ramek jest to, że predykcja przemieszczeniowych spektrów odpowiedzi w poziomie najwyższej kondygnacji budynku może być dokonana przy użyciu prostej sieci neuronowej. Zatem ocena odpowiedzi dynamicznej budynku może się odbywać bez analizy równania ruchu rozważanego obiektu.

– Zastosowanie bardzo prostej sieci ze zbiorem uczącym złożonym z 50% wszystkich wzorców, pozwala na predykcję spektrów odpowiedzi w poziomie posadzki czwartego piętra z satysfakcjonującą dokładnością. Tak wyznaczone spektra są bliskie odpowiednim spektrum obliczonym w sposób konwencjonalny. Redukcja wielkości zbioru uczącego prowadzi do istotnego pogorszenia wyników.

Bibliografia

- [1] Balendra T., Lam N.T.K., Wilson J.L., Kong K.H., *Analysis of long-distance earthquake tremors and base shear demand for buildings in Singapore*, Engineering Structures, 24, 2002, p. 99–108
- [2] Ciesielski R., Kuźniar K., Maciąg E., Tataro T., *Empirical formulae for fundamental natural periods of buildings with load bearing walls*, Archives of Civil Engineering, 38, 4, 1992, p. 291–299
- [3] Ciesielski R., Kuźniar K., Maciąg E., Tataro T., *Damping of vibration in precast buildings with bearing concrete walls*, Archives of Civil Engineering, 40, 3, 1995, p. 329–341
- [4] Kowalski W., Maciąg E., Tataro T., *Normalized response spectra for mining tremors and their applications*, Proc. 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris 1998, CD ROM
- [5] Lam N.T.K., Chandler A.M., Wilson J.L., Hutchinson G.L., *Response spectrum predictions for potential near-field and far-field earthquakes affecting Hong Kong: rock sites*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22, 2002, p. 47–72
- [6] Ciesielski R. i in., *Komentarz do normy PN-85/B-02170. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki*, COBPBO, Warszawa 1988
- [7] Zell A. (ed.), *SNNS – Stuttgart Neural Network Simulator, User's Manual, Version 4.2*, Univ. Stuttgart 1998

Neural computation of response spectra from building's selected floor vibrations

Summary

The paper deals with the application of neural networks for computation of response spectra on the fourth floor of a prefabricated medium-height building under seismic-type excitations. The subpicture idea from picture transmission is also adapted to this problem. Both the training and testing patterns were formulated on the basis of measurements performed on an actual structure. The obtained results show that application of simple neural networks with the subpicture idea enables to map the displacement response spectra on the ground level to spectra on the fourth-floor level of a building with satisfactory accuracy.

Key words: neural networks, response spectra, seismic-type excitations