EHSAN DEGHANI<sup>1)</sup>MARYAM NAJAFI ZADEH<sup>2)</sup>AZAM NABIZADEH<sup>3)</sup>

## EVALUATION OF SEISMIC BEHAVIOUR OF RAILWAY BRIDGES CONSIDERING TRACK-BRIDGE INTERACTION

## OCENA ZACHOWANIA SEJSMICZNEGO MOSTÓW KOLEJOWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM ODDZIAŁYWANIA POMIĘDZY TOREM I MOSTEM

**STRESZCZENIE.** Mosty kolejowe wykazują dużą odporność na trzęsienia ziemi. Pomimo, że ich wytrzymałość była określana pod względem jakościowym w wielu opracowaniach, m.in. Stowarzyszenia AREMA (ang. *American Railway Engineering and Maintenance of Way Association*), dotychczas nie zaproponowano kryteriów ilościowych tej oceny. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie kryteriów ilościowych oceny zachowania się mostów kolejowych poddanych działaniu obciążeń sejsmicznych. W artykule przedstawiono modele MES odpowiedzi dynamicznej mostów w warunkach sejsmicznych, w których uwzględniono oddziaływanie toru kolejowego z mostem lub to oddziaływanie nie było brane pod uwagę. Badane modele oceniane były z wykorzystaniem analizy pushover i dynamicznej analizy przyrostowej na podstawie czteremastu zapisów trzęsień ziemi, które miały miejsce w przeszłości. Wyniki analiz wyraźnie pokazują, że zaproponowany model uwzględniający oddziaływanie toru z mostem zachowuje się w warunkach sejsmicznych lepiej pod względem wytrzymałościowym. W przypadku tego modelu parametry takie jak: przemieszczenie pomostu, siła ścinająca pomiędzy torem i pomostem oraz obrót plastyczny przegubów są mniejsze o odpowiednio 70-90%, 20-83% i 85-100%. W pracy zaproponowano równania do szacowania przemieszczenia pomostu oraz siły ścinającej w podstawie toru, bez uwzględnienia oddziaływania toru z mostem, wykorzystując metodę maksimów przyspieszenia ziemskiego (ang. *Peak Ground Acceleration*, PGA), zarejestrowanych podczas wstrząsów sejsmicznych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** analiza dynamiczna przyrostowa (IDA), analiza nieliniowa, analiza pushover, most kolejowy, oddziaływanie toru z mostem (TBI).

**ABSTRACT.** Railway bridges have historically performed well in the previous earthquakes. Although this performance has qualitatively been studied in some references such as AREMA code, no quantitative criteria has been proposed for it. Thus, this study aims to present quantitative criteria for railway bridge performance under seismic loads. In the paper, seismic behaviour of railway bridges, with and without track-bridge interaction (TBI), is calculated through finite element modeling. Pushover and incremental dynamic analyses, are utilized to assess the proposed method, considering fourteen records of the past earthquakes. The results clearly show superior performance of the proposed model with track system, in which the deck displacement, base shear, and plastic rotation decrease by 70%-90%, 20%-83%, and 85%-100%, respectively. Finally, two equations are proposed to calculate deck displacement and base shear of railway bridges without performing track-bridge interaction (TBI) by Peak Ground Acceleration (PGA) of the applied record approximately.

**KEYWORDS:** incremental dynamic analysis (IDA), nonlinear analysis, pushover analysis, railway bridge, track-bridge interaction (TBI).

DOI: 10.7409/rabdim.019.004

<sup>1)</sup> University of Qom, Department of civil engineering, Khodakaram Blvd., 37195-1519 Qom, Iran; Dehghani@qom.ac.ir

<sup>2)</sup> University of Qom, Department of civil engineering, Khodakaram Blvd., 37195-1519 Qom, Iran; M.Najafizade@stu.qom.ac.ir

<sup>3)</sup> University of Wisconsin-Milwaukee, Department of Civil and Environmental Engineering, Milwaukee, WI 53211, U.S.A, azam@uwm.edu (✉)

## 1. WPROWADZENIE

Mosty kolejowe są ważnymi obiektami na trasach sieci komunikacyjnych. Obecnie większość torów kolejowych to tory bezстыkowe (TBS) [1]. Właściwości sejsmiczne mostów kolejowych były szczegółowo badane po większych trzęsieniach ziemi takich jak trzęsienie ziemi w Kobe w Japonii. Inżynierowie budowy mostów na całym świecie podejmują starania zmierzające do dokonania przeglądu i udoskonalenia przepisów i specyfikacji w celu opracowania wymogów, które muszą spełniać konstrukcje odporne na trzęsienia ziemi [2]. Wiele prac badawczych poświęcono podłużnym [3-8] i poprzecznym [3, 9-11] oddziaływaniom między mostem a torami kolejowymi. Nawierzchnia kolejowa, stanowiąca sztywną warstwę na moście, ogranicza jego ruchy. Oddziaływanie toru z mostem (ang. *track-bridge interaction*, TBI) to jeden z czynników, dzięki którym mosty w przeszłości dobrze wytrzymały trzęsienia ziemi [2, 12-14]. TBI może przyczynić się do ograniczenia ruchów mostu, a przez to do zmniejszenia uszkodzeń mostów kolejowych. W literaturze [12] powyższe zagadnienie zostało opisane pod względem jakościowym, ale nie ilościowym. Celem niniejszej pracy było zbadanie tego problemu pod względem ilościowym, aby dokładniej określić wpływ TBI na zachowanie sejsmiczne mostów kolejowych używając różnych metod analizy konstrukcji. W wielu pracach oceniano zachowanie sejsmiczne mostów kolejowych bez uwzględnienia TBI [14-18]. Modelowanie numeryczne oddziaływania toru z mostem było tematem wielu prac [19]. Badania miały na celu ocenę wpływu zmian temperatury, pęknięć szyn, trakcji i sił hamowania na oddziaływanie układu tor-most (TBI) [6, 11, 19-21]. Jednakże zachowanie sejsmiczne mostów kolejowych z uwzględnieniem wzajemnego oddziaływania toru z mostem nie było do tej pory szczegółowo badane.

## 2. MATERIAŁY I METODY

### 2.1. SYMULACJA Z WYKORZYSTANIEM MODELU

Znajdujący się pod torowiskiem rozszerzalny pomost wprowadza nieciągłość do charakterystyki toru. Każda siła powodująca przemieszczenie pomostu wywołuje siłę i przemieszczenie toru, i na odwrót. Przemieszczenia mostów kolejowych pod wpływem obciążeń termicznych i obciążeń ruchem pojazdów były szeroko badane i zostały opisane w [6, 11, 19-21]. Oddziaływanie toru z mostem (TBI) definiuje się jako reakcję jednego z tych elementów na skutek obciążenia wywołanego drugim elementem [22]. Według UIC 774-3 [22] i zaleceń europejskiej normy EN 1991-2, sprzęg (podsypka lub element mocujący) między torem

## 1. INTRODUCTION

Railroad bridges are important part of transportation networks. Nowadays, most of tracks on all railways consist of Continuous Welded Rails (CWR) [1]. Seismic performance of railway bridges has been extensively studied after major earthquakes, such as Kobe earthquake in Japan. Bridge engineers put worldwide efforts to review and improve bridge design codes and specifications to come up with seismic resistant design requirements [2]. Several research have studied longitudinal [3-8] and vertical [3, 9-11] force interaction between bridge and railroad tracks. The track system, as a stiff layer over railway bridges, constrains bridge movements. Track bridge interaction (TBI) is one of the reasons that historically showed better performance in the previous earthquakes [2, 12-14]. TBI can cause reduction in bridge movements and consequently, damages to railway bridges. The aforementioned issue has just qualitatively been explained in different literature [12] where a quantitative measure cannot be found for it. This paper aims to qualitatively investigate this issue in order to examine it more accurately and quantify the effect of TBI on seismic behaviour of railway bridges using different methods of seismic analyses. Several studies evaluated seismic behaviour of railway bridges without TBI [14-18]. Numerical modeling of TBI has been widely studied [19]. Several researchers have focused on the effect of temperature changes, rail break, traction, and brake forces on TBI [6, 11, 19-21]. However, the seismic behaviour of railway bridges, considering interaction between track and bridge has not been studied extensively. Therefore, in this study, seismic behaviour of railway bridges considering TBI is evaluated through pushover and incremental dynamic analyses.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. THE SIMULATED MODEL

The existence of an expandable deck under track bed introduces a discontinuity into the characteristics of the track. Each force causing displacement in either the deck or the track applies force and displacement on the other one. Displacement of railway bridges in terms of thermal and traffic load have been extensively studied and described in [6, 11, 19-21]. Accordingly, interaction between track and bridge (TBI) is defined as consequential response of one of them due to the force in the other one [22]. According to UIC 774-3 [22] and the European standard EN 1991-2 [23] recommendations, coupling interface (ballast or fastener) between track and bridge,

a pomostem, który powoduje oddziaływanie w kierunku podłużnym, charakteryzuje się sztywnością nieliniową (Rys. 1). Jak wynika z zamieszczonego rysunku, obciążenie pociągiem zwiększa opór toru na przemieszczenia względne. We wszystkich rozdziałach tego artykułu przyjmuje się, że tor zawsze obciążony jest pociągiem.

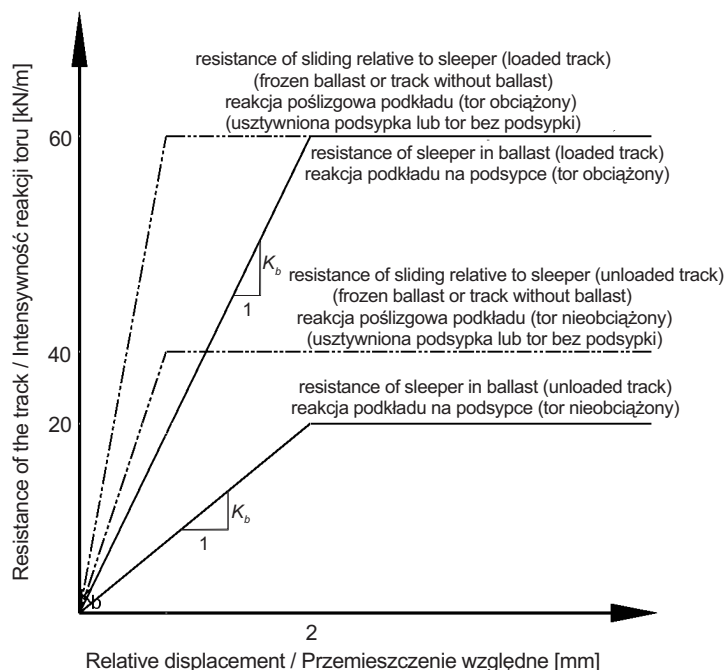


Fig. 1. Shear resistance of track (per unit length) versus longitudinal relative displacement of track

Rys. 1. Intensywność reakcji toru na ścinanie (na jednostkę długości) w funkcji jego względnego przemieszczenia wzdłużnego

Na podstawie badań laboratoryjnych, które opisano w [24] i [25] wyznaczono z dużą dokładnością nieliniową sztywność wartości sprężającej. W artykule przeanalizowano wyniki symulacji zachowania się toru bezстыkowykowego (TBS) na moście stalowym przy wykorzystaniu oprogramowania Abaqus oraz zastosowaniu statycznej analizy pushover oraz dynamicznej analizy przyrostowej (ang. *incremental dynamic analysis*, IDA). Poddany badaniu most składał się z trzech przęseł, każde o długości 18 m (Rys. 2). Most został zaprojektowany według specyfikacji UIC60, a podsypka torowa według UIC773-4 [22]. Model zaproponowany w UIC774-3 [22] (Rys. 1) jest przyjmowany do modelowania oddziaływania toru z mostem (TBI). Do oceny zachowania mostu w warunkach obciążenia sejsmicznego, wykorzystano model MES, przedstawionego na Rys. 2 mostu trójprzęsłowego, w którym uwzględniono oddziaływanie pomostu z torem. Między pomostem a filarami znajdują się elastomerowe łożyska. W Tabl. 1 podano parametry geometryczne i materiałowe układu tor-most oraz przekroju po-

which causes interaction in longitudinal direction, is characterized by a nonlinear stiffness as shown in Fig. 1. According to this figure, application of the train loads increases the resistance of the track to the relative displacements. In all sections of this study, track is assumed to be loaded by a train.

Some literature determined exact nonlinear stiffness of the coupling element by laboratory experiments [24, 25]. In this study, a CWR system on a steel bridge was analyzed through static pushover and incremental dynamic analyses (IDA) using Abaqus software. The bridge consists of three spans, each 18 m long (Fig. 2). The bridge was designed based on UIC60 section and ballast behaviour was considered according to UIC773-4 [22]. The model proposed by UIC774-3 [22] (Fig. 1) is used for modeling of the interaction behaviour. A Finite Element (FE) model of a three-span bridge (Fig. 2) is considered to evaluate the seismic behaviour of railway bridges by taking TBI into consideration. Deck and piers are separated by elastomeric bearings. Table 1 lists the geometry and material parameters of the track-bridge system and the cross section of the deck is shown in Fig. 3. In general, seismic behaviour of bridges can be investigated in vertical ( $z$ ) and horizontal ( $x, y$ ) directions (Fig. 4). However, horizontal seismic behaviour is more important. Considering the lack of studies on the effect of TBI on seismic response of bridges, this study aimed to improve our knowledge in this subject.

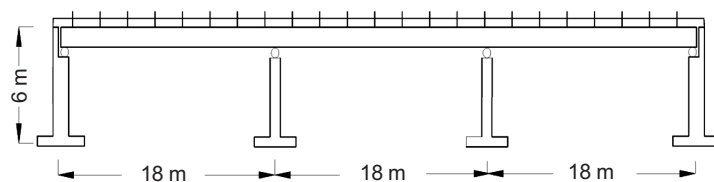


Fig. 2. Sketch of the model  
Rys. 2. Szkic modelu

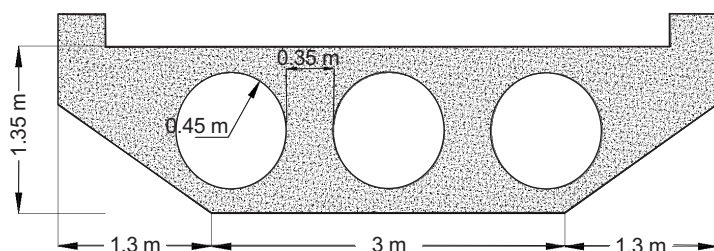


Fig. 3. Cross section of the deck  
Rys. 3. Przekrój poprzeczny pomostu

przecznego pomostu przedstawionego na Rys. 3. Odpowiedź mostu na obciążenie sejsmiczne można badać w kierunku pionowym  $z$  oraz poziomym  $x, y$  (Rys. 4). Jednakże poziome oddziaływania sejsmiczne są dla konstrukcji mostu ważniejsze. Biorąc pod uwagę fakt, że w literaturze dotyczącej reakcji mostów na obciążenie sejsmiczne nie uwzględnia się oddziaływania toru z pomostem, celem niniejszej pracy było pogłębienie wiedzy na ten temat.

Table 1. Geometry and material parameters of track-bridge system  
Tablica 1. Parametry geometryczne i materiałowe układu tor-most

Material parameters / Parametry materiałowe	Result of a measurement / Wynik pomiaru
Length of the bridge Długość mostu	54 m
Height of the bridge Wysokość mostu	6 m
Young's modulus of rail Moduł Younga szyny	$2.1 \cdot E11 \text{ N/m}^2$
Young's modulus of deck and piers Moduł Younga pomostu i filarów	$2.9 \cdot E10 \text{ N/m}^2$
Compressive strength of deck and piers Wytrzymałość na ściskanie pomostu i filarów	30 MPa
Yield stress of rail Granica plastyczności szyny	580 MPa
Area of the deck section Pole powierzchni przekroju pomostu	$4.5422 \text{ m}^2$
Area of the pier section Pole powierzchni przekroju filara	$1.5607 \text{ m}^2$
Area of the rail section per line Pole powierzchni przekroju jednej szyny	$1.537 \cdot E-2 \text{ m}^2$
Deck section's inertia moment of horizontal axis Moment bezwładności przekroju pomostu względem osi poziomej	$8.703 \cdot E-1 \text{ m}^4$
Pier section's inertia moment of horizontal axis Moment bezwładności przekroju filara względem osi poziomej	$9.69 \cdot E-2 \text{ m}^4$
Rail section's inertia moment of horizontal axis per line Moment bezwładności przekroju jednej szyny względem osi poziomej	$3.038 \cdot E-5 \text{ m}^4$

Ponieważ szyny kolejowe w systemach TBS na długich odcinkach nie mają dylatacji, są tak zaprojektowane i wykonane, aby zmiany temperatury i hamowanie pociągów nie powodowały ich deformacji. W pracy założono, że odkształcenie szyn w odległości powyżej 100 m (dwie długości mostu) po jego obydwu stronach jest zerowe. W modelu mostu z nawierzchnią kolejową, tor rozciąga się na odległość 100 m po obu stronach mostu. Most i szyny są sprzężone poprzez podsypkę lub system mocowania szyn. Mocowanie toru jest modelowane za pomocą sprężyn rozmieszczonych w odległości co 1 m, o charakterystyce biliniowej, zgodnie

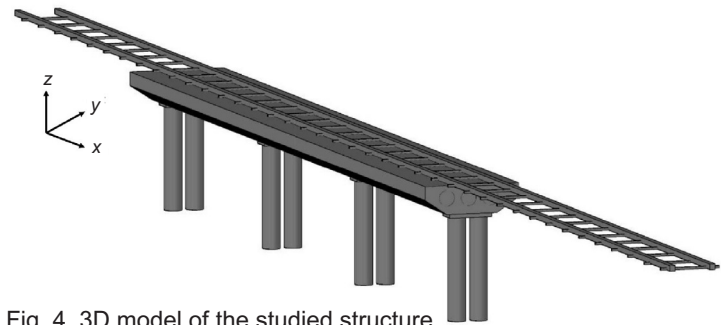


Fig. 4. 3D model of the studied structure  
Rys. 4. Model 3D konstrukcji mostu

In CWR systems, as rails are designed and implemented without expansion joints over long distances, temperature change and train braking wouldn't cause deformation in the rail. In this study, it was assumed that rail deformation tends to zero after 100 m (twice the length of the bridge) on each side of the bridge. Therefore, in the model with track system, track is continued 100 m on each side of the bridge for modeling of the track on the subgrade beyond the bridge. Bridge and rail are coupled through the ballast or fastening system. Track system is modeled by a series of 1 m-spaced discrete shear springs

z Rys. 1 [22]. Szyny, pomosty i filary stanowią elementy ramowe modelu. Podparcia przegubowe na obu końcach filarów są modelowane jako przeguby plastyczne o biliniowej charakterystyce, będącej zależnością pomiędzy momentem a kątem obrotu przekroju zgodnie z kryteriami CALTRANS [26]. Obliczony na podstawie przekroju filarów (Rys. 5) oraz wytrzymałości betonu (30 MPa) i zbrojenia (400 MPa) moment plastyczny wynosił 4780 kNm. Z powodu trudności w uzyskaniu zbieżności numerycznej pominięto zmniejszenie wytrzymałości występujące w kolejnych cyklach obciążenia oraz ujemną sztywność (Rys. 6). Dopuszczalny obrót maksymalny w przegubach przyjęto zgodnie z opracowaniem CALTRANS [26]. Pominięto także skutki nieliniowości geometrycznej przegubów. Możliwa maksymalna siła ścinająca w filarach przy uwzględnieniu obrotowych przegubów plastycznych na obu końcach filarów wynosiła 1593 kN. Obliczona (na podstawie wytrzymałości na ścinanie betonu i zbrojenia) nośność przy ścinaniu plastycznym wynosiła 2532 kN. Tym samym wytrzymałość filarów na ścinanie okazała się większa niż wymagana maksymalna; w rezultacie pominięto występowanie zjawiska ścinania na przegubach i nie uwzględniono go dalej w analizie.

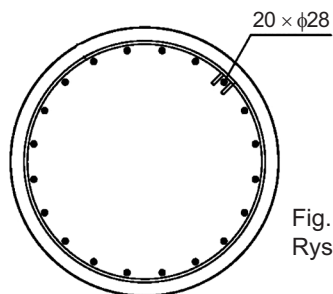


Fig. 5. Cross section of the piers  
Rys. 5. Przekrój poprzeczny filara

Aby zbadać wpływ efektu TBI na zachowanie się mostów kolejowych w czasie wstrząsów sejsmicznych przeanalizowano dwa modele mostowe: z i bez nawierzchni kolejowej poddanych statycznemu obciążeniu pushover oraz przyrostowemu obciążeniu dynamicznemu. Według rekomendacji AREMA [12], w ocenie sejsmicznej mostów nie uwzględnia się wpływu obciążeń eksploatacyjnych. Ponieważ celem tej pracy jest analiza dynamiczna i zbadanie oddziaływania TBI na sejsmiczne zachowanie mostów, wpływ masy i sztywności pociągu nie został uwzględniony w rozpatrywanym modelu dynamicznym.

## 2.2. ANALIZA PUSHOVER

Styczna nieliniowa analiza przyrostowa, nazywana także analizą pushover, używana jest do szacowania wytrzymałości oraz sprężystego i plastycznego zachowania się konstrukcji mostu pod obciążeniami sejsmicznymi. W tym

with bilinear stiffness according to Fig. 1 [22]. Tracks, decks, and piers are modelled as frame elements. Piers' hinge supports are modeled by defining plastic hinges at both ends of the piers where bilinear moment-rotation relationships are assigned according to CALTRANS [26]. Based on the piers' section (Fig. 5) and the strength of concrete (30 MPa) as well as reinforcement (400 MPa), the plastic moment is calculated as 4780 kNm. In-cycle strength degradation and negative stiffness were ignored due to numerical convergence issues (Fig. 6). The maximum rotation in plastic hinges was considered as the allowable maximum rotation according to CALTRANS [26]. The geometric nonlinearity effects are also neglected. Maximum possible shear force on piers by assuming flexural plastic hinges on both sides of the piers is calculated as 1593 kN. On other hand, plastic shear resistance considering concrete and reinforcement shear strength is calculated as 2532 kN. Accordingly, the shear strengths of piers are more than maximum required shear, therefore, shear hinge formation is ignored and no shear hinge is considered in the analyses.

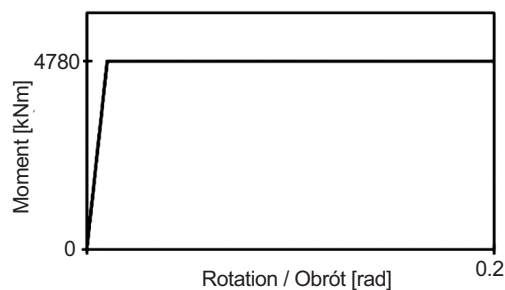


Fig. 6. Moment-rotation relationship of plastic hinges in piers  
Rys. 6. Zależność moment-obrót przegubów plastycznych w filarach

To investigate the effect of TBI on seismic behaviour of railway bridges, two bridge models, with and without track system, are analyzed using pushover and incremental dynamic loads. According to AREMA [12], live load effect is not considered in seismic evaluation of bridges. Therefore, since the purpose of this research is dynamic analysis and the effect of TBI on seismic behaviour of bridges, the effect of mass and stiffness of train was not considered in the dynamic model.

## 2.2. PUSHOVER ANALYSIS

An incremental nonlinear static analysis also called pushover analysis has been used to estimate strength, elastic and plastic behaviour of structures under seismic loads. In this approach, a monotonically increasing horizontal load

podejściu konstrukcja poddawana jest jednostajnie rosnącemu obciążeniu poziomemu przyłożonemu do środka ciężkości przekroju pomostu z uwzględnieniem obciążeń pionowych, aż do momentu zawalenia się mostu. Rejestrowane jest przemieszczenie punktu kontrolnego względem ścinanej podstawy, spowodowane przyłożonymi obciążeniami, a następnie wykreślane są uproszczone krzywe przebiegu tego przesunięcia. Dzięki analizie pushover można uzyskać wiedzę na temat kolejnych etapów uplastyczniania konstrukcji, powstawania przeciążeń na przegubach plastycznych i mechanizmów zniszczenia mostów pod obciążeniami sejsmicznymi [27]. Ponieważ procedura ta jest koncepcyjnie i obliczeniowo prosta, jest ona szeroko stosowana do oceny wytrzymałości konstrukcji mostowej narażonej na zmianę warunków sejsmicznych.

### 2.3. ANALIZA DYNAMICZNA PRZYROSTOWA (IDA)

Aby uwzględnić niepewności będące nieodłączną częścią pomiarów obciążenia i nośności konstrukcji należy przeprowadzić analizę jej niezawodności użytkowej (eksploatacyjnej) [28]. Przyrostowa analiza dynamiczna (IDA) jest jedną z metod, które uwzględniają takie niepewności. Podstawową koncepcję podejścia IDA, nazwanego dynamiczną analizą pushover, przedstawił Bertero [29]. Także badacze Chopra i Goel [30, 31] oraz Bertero [29] zastosowali podejście IDA do oceny sejsmicznego zachowania się konstrukcji. W dynamicznej analizie przyrostowej wykorzystuje się zbiór zapisów z wielu trzęsień ziemi do przesłedzenia ich nieliniowych przebiegów czasowych [32]. Każdy taki zapis jest przeskalowany (w górę lub w dół), aby określić reakcję sprężystą i ostateczny sposób zniszczenia konstrukcji. Miara intensywności sejsmicznej (ang. *Intensity Measure*, IM) to parametr charakteryzujący własności zapisanych przebiegów. W analizie IDA [32] jako miary intensywności sejsmicznej (IM) powszechnie przyjmuje się maksimum przyspieszenia ziemskiego (ang. *Peak Ground Acceleration*, PGA) oraz przyspieszenie widmowe. Reakcja modeli konstrukcji na ustalone obciążenie sejsmiczne może być wyrażona za pomocą miary zniszczenia (ang. *Damage Measure*, DM). Opisują go takie wielkości jak: maksymalna siła ścinająca w podstawie, ciągłość historii zapisywanych pików, obroty węzła, różne proponowane wskaźniki zniszczenia (np. globalna skumulowana energia histerezy czy globalny wskaźnik Parka i Anga), przesuwanie się maksimum oraz maksymalna zmiana kąta wynikająca z przesunięcia pomiędzy kondygnacjami [32]. Ostatecznie, dla każdego przeskalowanego zapisu wykreślane są krzywe IDA przedstawiające zależność między miarą zniszczenia (DM) a miarą intensywności sejsmicznej (IM), jak to pokazano na Rys. 7. Wybór odpowiednich parametrów

is applied at the centre of the deck in the presence of vertical loads until the structural collapse occurs. Displacement of the control point under applied loads is plotted versus base shear to get the pushover curves. Pushover analysis can provide a significant insight into the sequence of yielding, formation of plastic hinges, and failure of a structure under seismic loads [27]. Since this procedure is conceptually and computationally simple, it has been widely used for evaluating the seismic performance of structures.

### 2.3. INCREMENTAL DYNAMIC ANALYSIS (IDA)

To include uncertainties inherent in loads and structural capacity, reliability based analysis should be considered in seismic performance of structures [28]. Incremental dynamic analysis (IDA) is one of the methods that considers such uncertainties into account. The main idea of IDA approach was presented by Bertero [29] which is called “dynamic pushover”. Studies such as Chopra and Goel [30, 31], Bertero [29] have used the IDA approach to evaluate the seismic behaviour of structures. IDA uses a set of different earthquake records for nonlinear time history analysis [32]. Each record is scaled (up or down) to motivate the elastic response and target collapse state, respectively. Intensity Measure (IM) is a parameter which expresses the properties of the applied records. PGA and spectral acceleration are appropriate and common choices for Intensity Measure (IM) in IDA analysis [32]. Response of structural models to a predetermined seismic loading can be expressed by the damage measure (DM). Possible selections of this parameter are maximum base shear, peak story ductility, node rotations, various proposed damage indices (e.g. a global cumulative hysteretic energy and a global Park-Ang index), peak roof drift, and the maximum peak inter-story drift angle [32]. Finally, IDA curves are shown as the damage measure (DM) versus Intensity Measure (IM) for each scaled record as shown in Fig. 7. Selecting appropriate parameters for the Intensity Measure (IM) and damage measure (DM) depends on the type of the structure and its application in IDA approach [32]. These must represent dynamic characteristics of each record such as the frequency content, energy [32], and behaviour of the structure under incremental nonlinear analysis (IDA). In this study, PGA is selected as IM parameter. Also, the maximum displacement of the deck, maximum base-shear, dissipated energy, and plastic hinge rotation in piers are considered as DMs to achieve appropriate structural response versus the earthquake records.

w celu ustalenia miary intensywności sejsmicznej (IM) oraz miary zniszczenia (DM) zależy od rodzaju konstrukcji i kontekstu zastosowania w analizie IDA [32]. Parametry te muszą reprezentować charakterystyki dynamiczne każdego zapisu, takie jak charakterystyka częstotliwościowa, energia [32] i zachowanie się konstrukcji w nieliniowej analizie przyrostowej. W niniejszej pracy przyjęto maksymalne przyspieszenie ziemskie (PGA) jako parametr miary intensywności (IM). W modelu, aby uzyskać odpowiednią reakcję konstrukcji w zależności od zapisu skali trzęsienia ziemi, jako miary charakteryzujące zniszczenie konstrukcji (DM) wzięto pod uwagę takie parametry jak: maksymalne przemieszczenie pomostu, maksymalna siła ścinająca w podstawie, energię rozproszoną i obrót przegubu plastycznego w filarach.

## 2.4. WYBRANE ZAPISY

Aby przeprowadzić przyrostową analizę dynamiczną należy wybrać odpowiedni zestaw zapisów przebiegu trzęsienia ziemi. Parametry takie jak amplituda drgań, czas trwania, maksymalne przyspieszenie ziemskie (PGA) i dominujący okres trwania trzęsienia ziemi mogą różnić się w szerokim zakresie z powodu niepewności pomiarów wynikających z natury ruchów ziemi. Według Shome'a i Cornella [33], do analizy IDA w przypadku niskich konstrukcji niezbędne jest 15-20 zapisów ruchów ziemi. W tej sytuacji z Bazy Danych PEER (ang. *PEER Strong Ground Motion Database*) [34] dotyczących silnych ruchów Ziemi wybrano zbiór czterestu takich zapisów, które przedstawiono w Tabl. 2.

## 2.4. SELECTED RECORDS

Table 2. Characteristics and specifications of earthquake records used for IDA analysis

Tablica 2. Charakterystyki trzęsień ziemi zastosowane do analizy IDA

No. Nr	Earthquake / Trzęsienie ziemi				Recording station Stacja zapisująca	No. Nr	Earthquake / Trzęsienie ziemi				Recording station Stacja zapisująca
	Location Lokalizacja	Year Rok	PGA	Predominant period Okres dominujący			Location Lokalizacja	Year Rok	PGA	Predominant period Okres dominujący	
1	Bam, Iran	2003	0.8	0.2	Bam	8	Kocaeli, Turkey	1999	0.21	0.16	Duzce
2	Chi-Chi, Taiwan	1999	0.493	0.4	CHY024	9	Kobe, Japan	1995	0.242	0.66	Shin-Osaka
3	Imperial Valley-L	1940	0.28	0.46	ElCentro	10	Friuli, Italy	1976	0.357	0.26	Tolmezzo
4	Imperial Valley-T	1940	0.207	0.58	ElCentro	11	Duzce, Turkey	1999	0.74	0.32	Bolu
5	Manjil, Iran	1990	0.497	0.16	Abbar	12	Lander	1992	0.28	0.32	Coolwater
6	Northridge	1994	0.345	0.24	Arleta	13	San Fernando	1971	0.184	0.12	LA-Hollywood Stor
7	Tabas, Iran	1978	0.854	0.24	Tabas	14	Hector Mine	1999	0.26	0.22	Hector

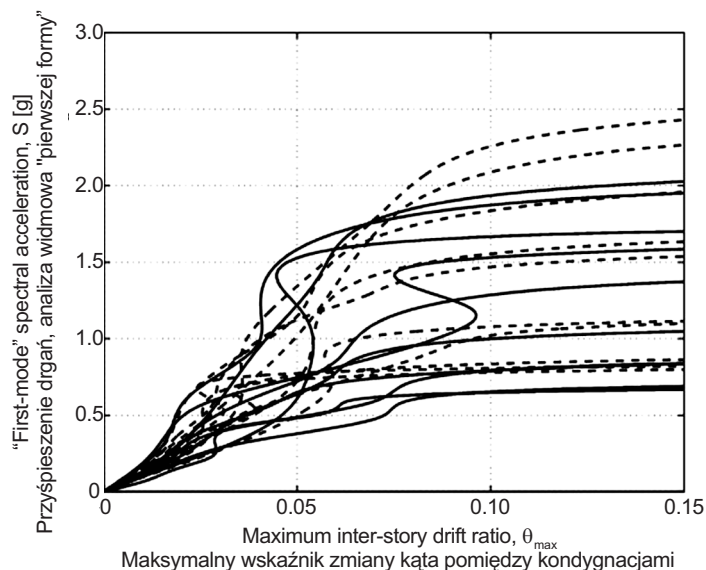


Fig. 7. IDA curves as spectral acceleration (IM) versus maximum inter-story drift ratio (DM) [32]

Rys. 7. Krzywe IDA obrazujące zależność w analizie widmowej przyspieszenia drgań (IM) od maksymalnego wskaźnika zmiany kąta pomiędzy kondygnacjami (DM) [32]

In order to perform the IDA procedure, a suite of ground motion records should be selected. Earthquake properties such as amplitudes, durations, PGA, and predominant period of earthquakes might vary over a wide range due to uncertainties inherent in ground motions. According to Shome and Cornell [33], 15 to 20 ground motion records are needed for IDA analysis of low rise structures. In this study, a set of fourteen records of ground motions are selected from the PEER Strong Ground Motion Database [34] as listed in Table 2.

### 3. WYNIKI I Dyskusja

#### 3.1. ANALIZA PUSHOVER

Wpływ oddziaływania toru i mostu (TBI) na zachowanie sejsmiczne mostów kolejowych badano w następujący sposób. Przeprowadzono analizy pushover dwóch modeli, odpowiednio: - z uwzględnieniem i - bez uwzględnienia nawierzchni kolejowej, przykładając skupione obciążenie oraz równomiernie rozłożone obciążenie na środku pomostu w kierunku podłużnym. Konstrukcje obciążano na odcinku do 0,5 m i rejestrowano przebieg przemieszczenia w wyniku działania siły ścinającej w podstawie (Rys. 8). W obu modelach mostu, z i bez toru, występują na skutek założenia idealnej reakcji sprężysto-plastycznej filarów segmentowe obszary liniowe. Model mostu uwzględniający oddziaływanie tor-most ma jeszcze jeden obszar liniowy, charakteryzujący się większym nachyleniem obserwowanym na początku analizy. W Tabl. 3 przedstawiono uzyskane dla dwóch modeli wartości maksymalnych przemieszczeń i maksymalnej siły tnącej w podstawie na końcu każdego kroku (obszaru liniowego) analizy pushover.

Table 3. Displacements and base-shears for pushover analyses of models with and without bridge interaction  
Tablica 3. Przemieszczenia i siły tnące pomiędzy torem i mostem w analizie pushover w przypadku modeli: - z uwzględnieniem i - bez uwzględnienia wzajemnego oddziaływania układu tor-most

Line / Tor	Bridge with TBI		Bridge without TBI	
	Most z uwzględnieniem wzajemnego oddziaływania tor-most		Most bez uwzględnienia wzajemnego oddziaływania tor-most	
	Max displacement [m] Maksymalne przemieszczenie	Max shear [ton] Maksymalna siła tnąca	Max displacement [m] Maksymalne przemieszczenie	Max shear [ton] Maksymalna siła tnąca
1	0.017	406	0.08	341
2	0.09	698	0.235	576
3	0.22	930	–	–

Model uwzględniający oddziaływanie tor-most (TBI) wykazuje liniowo-sprężyste zachowanie w pierwszym obszarze liniowym. Drugiemu obszarowi liniowemu towarzyszy sprężyste oddziaływanie podsypki torowej w obszar strefy plastycznej. W trzecim obszarze liniowym pojawiają się przeguby plastyczne powstające u dołu filarów. Ostatecznie przeguby plastyczne tworzą się na górnym końcu filarów w obszarze poziomym. Linia pozioma w obrębie krzywej bierze się z założenia idealnej reakcji sprężysto-plastycznej przegubów plastycznych na końcu filarów i nieliniowych, sprężystych oddziaływań toru z mostem (TBI). Natomiast w modelu nieuwzględniającym oddziaływanie toru i mostu (TBI) pierwsza strefa jest sprężysta, a druga i trzecia są zgodne (równoważne) z odpowiednio trzecią i czwartą strefą modelu uwzględniającego oddziaływanie TBI. Z Rys. 8 wynika, że:

- z powodu wzajemnego oddziaływania toru i mostu (TBI) analizowane konstrukcje wchodzą w strefę nieliniową z pewnym opóźnieniem,

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. PUSHOVER ANALYSIS

To evaluate the effect of the track-bridge interaction (TBI) on seismic behavior of railway bridges, the result of the proposed analysis will be investigated in the following way. Pushover analyses of both models, railway with and without track system, were performed by applying a concentrated and uniform load at the center of the decks in the longitudinal directions. The structures were pushed up to 0.5 m and deck displacements versus base shear were plotted as shown in Fig. 8. Both bridge models, with and without track, show segmental linear regions, which is due to assumption of ideal elastic-plastic behaviour of piers. However, the bridge model including TBI has one more linear region with higher slope at the start of the analysis. Table 3 shows the values of maximum displacements and maximum base shear at the end of each step (each linear region) of push over analyses of two models.

The model with track-bridge interaction (TBI) shows a linear elastic behaviour in the first linear region. Second line is accompanied with some of the ballast springs entering into plastic zone. Third linear region shows plastic hinges are formed at the bottom of the piers. Finally, plastic hinges formed at the top of the piers in the horizontal region. The reason for the horizontal line in the curve is the assumption of ideal elastic-plastic behaviour of the plastic hinges at the end of the piers and the nonlinear springs of the track-bridge interaction (TBI). In the model without TBI, the first zone is elastic, and the second and the third zones are in accordance with (equivalent to) the third and the fourth zone of the model with TBI, respectively. According to Fig. 8, it can be concluded that:

- due to track-bridge interaction (TBI), the structures enter into the nonlinear zone with some delays,



- model uwzględniający oddziaływanie toru z mostem (TBI) charakteryzuje się większą wartością sztywności sprężystej (większe nachylenie pierwszej linii) niż model drugi nieuwzględniający efektu TBI,
- krzywe pokazują wyższe wartości całkowitego ścinania podstawy dla stałej wartości przemieszczenia pomostu,
- nośność mostu i torowiska odpowiadająca danemu stopniowi zniszczenia zwiększa się przy uwzględnieniu oddziaływania układu tor-most (TBI),
- obszar pod krzywą w przypadku zastosowania modelu uwzględniającego oddziaływanie toru z mostem (TBI) jest większy niż dla drugiego modelu. Na skutek oddziaływania tor-most (TBI) więcej energii zostaje rozproszonej w konstrukcji, a przyczyną tego zjawiska jest wejście elementów podsytki w strefę plastyczną.

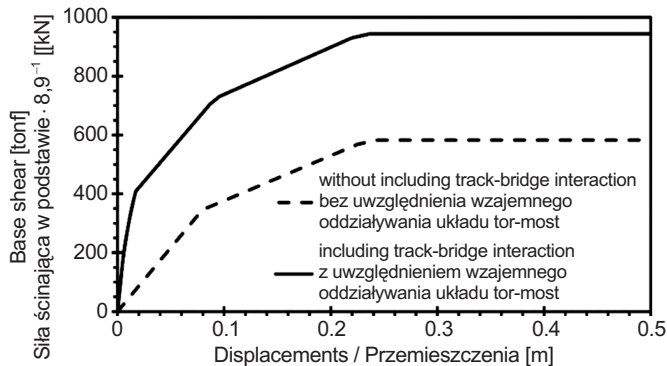


Fig. 8. Pushover curves for model with and without TBI  
Rys. 8. Krzywe pushover w przypadku modelu uwzględniającego oraz nieuwzględniającego efekt wzajemnego oddziaływania toru i mostu

Należy zauważyć, że siła ścinająca podstawę w przypadku modelu z torowiskiem (Rys. 8) wynika ze ścinania całego modelu. Jeśli weźmie się pod uwagę tylko ścinanie filarów, krzywe dla obydwu modeli: – z i – bez uwzględnienia TBI, idealnie pokrywają się. Biorąc pod uwagę fakt, że graniczna nośność mostu na ścinanie jest związana z charakterystykami plastycznych przegubów filarów, krzywe przebiegu uproszczonego obu modeli przybierają taki sam kształt. Zatem na tej podstawie można wyciągnąć wniosek, że w badaniu oddziaływania toru z mostem (TBI) nieliniowa analiza statyczna (pushover) nie daje dokładnego wyniku.

### 3.2. WYNIKI ANALIZY DYNAMICZNEJ PRZYROSTOWEJ (IDA)

Krzywe IDA dla wybranego zestawu zapisów rejestrujących trzęsienie ziemi oraz modelu mostu uwzględniającego TBI przedstawiono na Rys. 9. W przedstawionych analizach jako miarę intensywności sejsmicznej (IM) przyjęto maksymalne przyspieszenie ziemskie (PGA). Przemieszczenie pomostu,

- the model with TBI has more elastic stiffness (higher slope in the first response line) than the other one,
- the total base shear values are increased in the curves for a constant value of deck displacement,
- the capacity of the bridge and the track system corresponding to a specific level of damage is increased when considering TBI,
- the area under the curve of the model with TBI is larger than the other one. This reveals that TBI dissipates more energy in the structure. The reason is that since the entrance of the ballast elements to the plastic zone, more energy is dissipated.

It should be noted that the base shear of the model considering TBI, shown in Fig. 8, is calculated from the shear of whole model. If only the shear of piers is considered, both curves of two models, with and without TBI consideration, perfectly. Considering the fact that ultimate shear capacity of the bridge is related to the characteristics of the plastic hinges of the piers, pushover curves of both models become the same. Therefore, it can be concluded that in order to investigate the TBI effect, nonlinear static analysis cannot solely result in an accurate outcome.

### 3.2. INCREMENTAL DYNAMIC ANALYSIS (IDA) RESULTS

IDA curves for the bridge with track system under selected suite of records are presented in Fig. 9. PGA was considered as Intensity Measure (IM) in the analyses. The deck displacement, maximum base-shear, dissipated energy, and plastic hinge rotation in the piers were measured as damage measures (DMs). Each point of the curves represents the maximum (absolute) value of the intended response over time under a specific earthquake intensity. In fact, every curve is produced from a large number of non-linear time history analyses. Each curve in Fig. 9 is obtained from 10-12 time history analyses. Structural behaviour at different stages of elastic limit to collapse and global instability are shown in the IDA curves (Fig. 9). The curves have slight difference in the elastic deformation stage since few elements reached the yielding point. However, the differences increase as more elements enter the plastic zone. As the intensity of earthquakes increases, number of plastic hinges in elements, slope of the curves, and stiffness of the structure decrease.

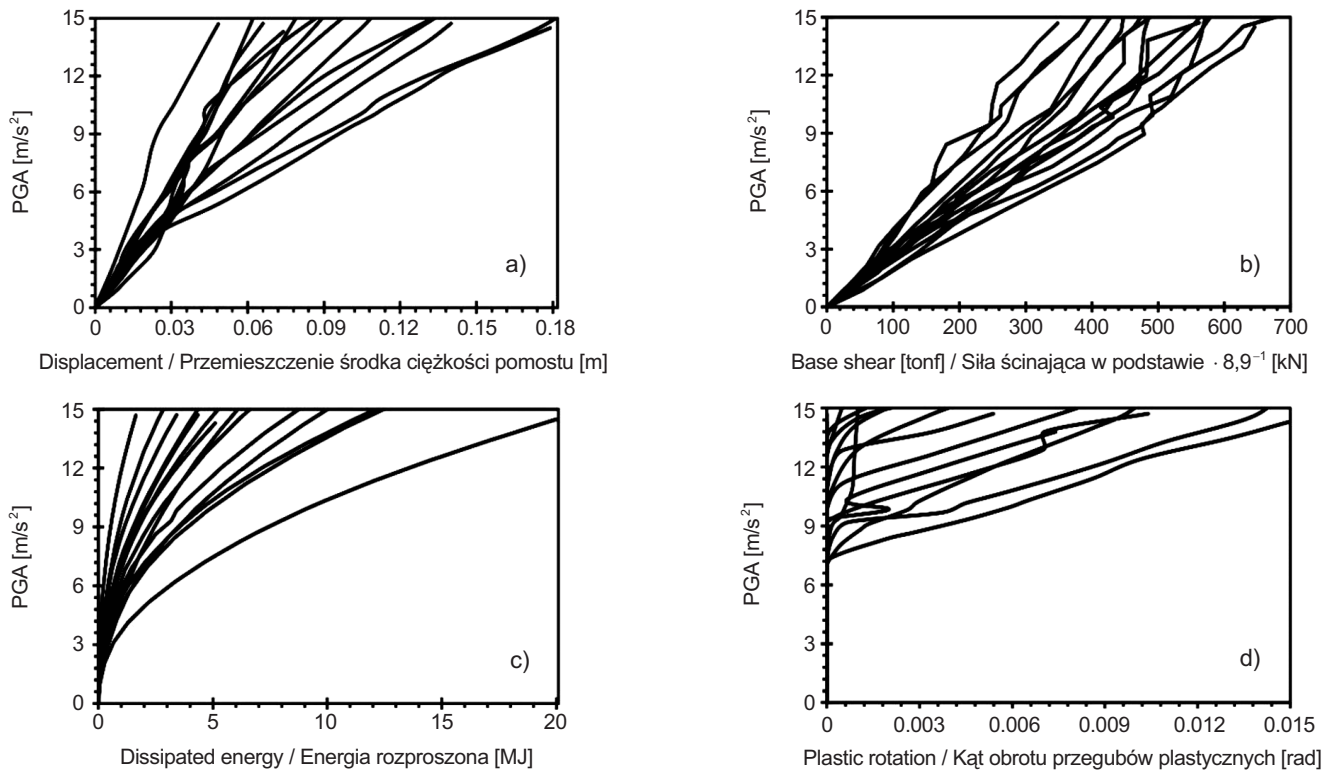


Fig. 9. IDA curves obtained from the analysis of the model with TBI under 14 mentioned records for seismic intensity PGA and DM as: a) midpoint displacement of the bridge deck, b) base shear, c) dissipated energy during the earthquake, d) plastic hinge rotation in piers Rys. 9. Krzywe IDA w analizie modelu uwzględniającego wzajemne oddziaływanie toru i mostu (TBI) uzyskane na podstawie 14 zapisów intensywności sejsmicznej PGA i DM w postaci: a) przemieszczenia środka pomostu, b) siły ścinającej w podstawie, c) energii rozproszonej podczas trzęsienia ziemi, d) obrotu przegubów plastycznych w filarach

maksymalną siłę ścinającą w podstawie, energię rozproszoną i obrót przegubu plastycznego w filarach przyjęto natomiast jako miary zniszczenia (DM). Każdy punkt znajdujący się na krzywych reprezentuje maksymalną (bezwzględną) wartość odpowiedzi konstrukcji w czasie jako efekt zmierzonej intensywności trzęsienia ziemi. W rzeczywistości każda krzywa powstaje na podstawie dużej liczby nieliniowych analiz przebiegów czasowych. Każdą krzywą na Rys. 9 opracowano na podstawie analiz od 10 do 12 przebiegów czasowych. Krzywe IDA (Rys. 9) przedstawiają zachowanie się konstrukcji w różnych stadiach począwszy od granicy sprężystości do zniszczenia i całkowitej niestateczności. Różnią się one nieco w stadium odkształcania sprężystego, ponieważ niewiele elementów konstrukcji osiągnęło granicę plastyczności. Jednak różnice te zwiększają się w miarę, gdy więcej elementów wchodzi w strefę plastyczną. Gdy zwiększa się intensywność trzęsienia ziemi, liczba przegubów plastycznych w filarach, nachylenie krzywych i sztywność konstrukcji zmniejszają się.

Zjawisko rezonansu można dostrzec w krzywych IDA opracowanych na podstawie zapisów trzęsień ziemi w El Centro

The resonance phenomenon can be seen for El Centro and Kobe records in IDA curves. This is because of the proximity of the predominant period of the records to the structure period in which the highest values of DMs for these two records occur. For simplicity of evaluations, the 16%, 50% (median), and 84% values are also plotted for the studied models as shown in Fig. 10. To investigate the effect of track system on the seismic behaviour of railway bridges, a summary of IDA curves of the models with and without track system are plotted in Fig. 11. According to this figure, as the intensity of ground motions and formation of plastic hinges increases, the differences among curves increase. Also, TBI causes failure in curves at higher response values. Results from Fig. 11 can be summarized as follows:

- the base shear of the model including TBI is between 20% and 83% less than the bridge model without TBI. The response curves are more apart in the earthquakes with low intensities. However, the curves get closer as more plastic hinges form,

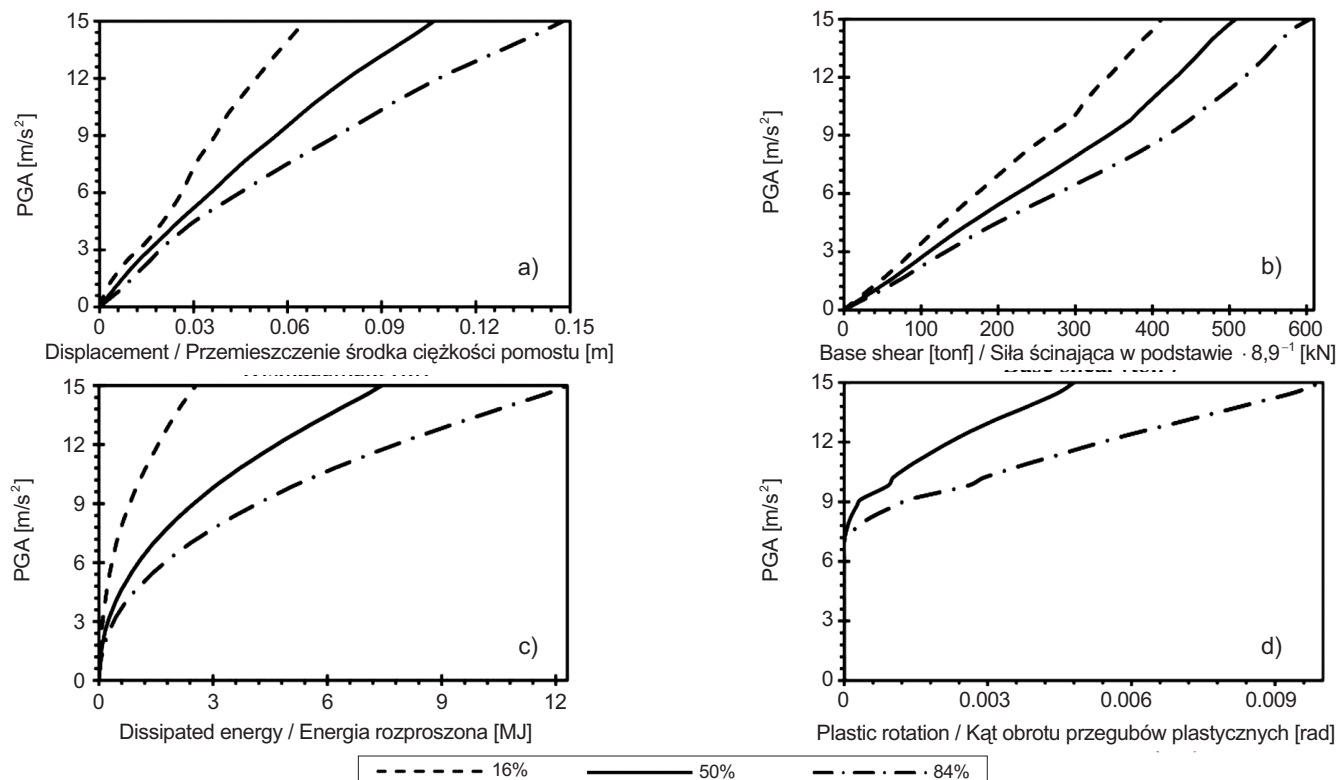


Fig. 10. Summarized IDA curves obtained from the analysis of the model with TBI under 14 mentioned records for seismic intensity PGA and DM as: a) midpoint displacement of the bridge deck, b) base shear, c) dissipated energy during the earthquake, d) plastic hinge rotation in piers

Rys. 10. Wypadkowe krzywe IDA w analizie modelu uwzględniającego wzajemne oddziaływanie toru i mostu (TBI) uzyskane na podstawie 14 zapisów intensywności sejsmicznej PGA i DM w postaci: a) przemieszczenia środka pomostu, b) siły ścinającej w podstawie, c) energii rozproszonej podczas trzęsienia ziemi, d) obrotu przegubów plastycznych w filarach

i Kobe. Jest to spowodowane zbliżeniem dominującego okresu drgań zapisów oraz okresu drgań własnych konstrukcji, w którym występują najwyższe wartości miary zniszczenia (DM) dla obu tych zapisów. W celu uproszczenia oceny wykreślono także krzywe dla przypadków z uwzględnieniem wartości median: 16%, 50% i 84% (Rys. 10). W celu zbadania wpływu torowiska na sejsmiczne zachowanie się mostów na Rys. 11 przedstawiono wypadkowe krzywych IDA odpowiednio dla modeli: – z i – bez efektu TBI. Z analizy rysunku wynika, że w miarę nasilania się ruchów ziemi i tworzenia się przegubów plastycznych powiększają się odchylenia między krzywymi. Także oddziaływania między torem i mostem (TBI) przyczyniają się do różnicowania krzywych przy wyższych wartościach odpowiedzi na wstrząsy sejsmiczne. Przedstawione na Rys. 11 wyniki można podsumować:

- siła ścinająca w podstawie w przypadku modelu uwzględniającego TBI jest od 20% do 83% mniejsza niż dla modelu mostu bez torowiska. Krzywe odpowiedzi są bardziej od siebie oddalone w przypadku trzęsień ziemi o małej intensywności. Krzywe te zbliżają się natomiast do siebie, gdy powstaje więcej przegubów plastycznych,

- TBI can cause reduction in deck displacement from 70% to 90%,
- rotation in plastic hinges is highly reduced (approximately 85% to 100%) due to TBI effect (Fig. 11d). By limiting rotation in plastic hinges up to 0.013 radian, the model without TBI could withstand ground acceleration up to 0.63 g while the model including TBI withstands twice.

### 3.3. PROPOSED EQUATIONS

Regarding to the fact that in the most current design codes, the effects of the track-bridge interaction (TBI) are discarded or only considered in thermal and break forces [22], this research tried to propose a modifying factor to be applied on the base shear and maximum deck displacement to account for the effect of TBI without including it in the model. Using the results from section 3.2 of this study, ratio of deck displacements and base shears versus PGA for two systems, with and without TBI, are plotted in Fig. 12 and Fig. 13, respectively. As it is obvious in the figures, these ratios in all 14 records show approximately similar behaviour. Hence, the median, 16%

- oddziaływanie układu tor-most (TBI) może spowodować zmniejszenie przemieszczenia pomostu względem toru o 70-90%,
- z powodu oddziaływania toru na most obrót w przegubach plastycznych został zredukowany o około 85-100% (Rys. 11d). W wyniku ograniczenia kąta obrotu przegubów plastycznych do 0,013 radiana model bez uwzględnienia efektu TBI był w stanie wytrzymać przyspieszenie ziemskie do 0,63 g, podczas gdy model mostu z TBI wytrzymywał dwa razy większe przyspieszenie ziemskie.

and 84% values of the ratio of the deck displacement and base shear in two mentioned cases are obtained and plotted in Fig. 14 and Fig. 15. By performing linear regression on the calculated percentiles, equations (1) and (2) are fit to the data. These equations which are correlated to PGA (correlation factor equal to 0.95) can be used to calculate the modification factor for the maximum deck displacement and base shear, without including TBI in the model:

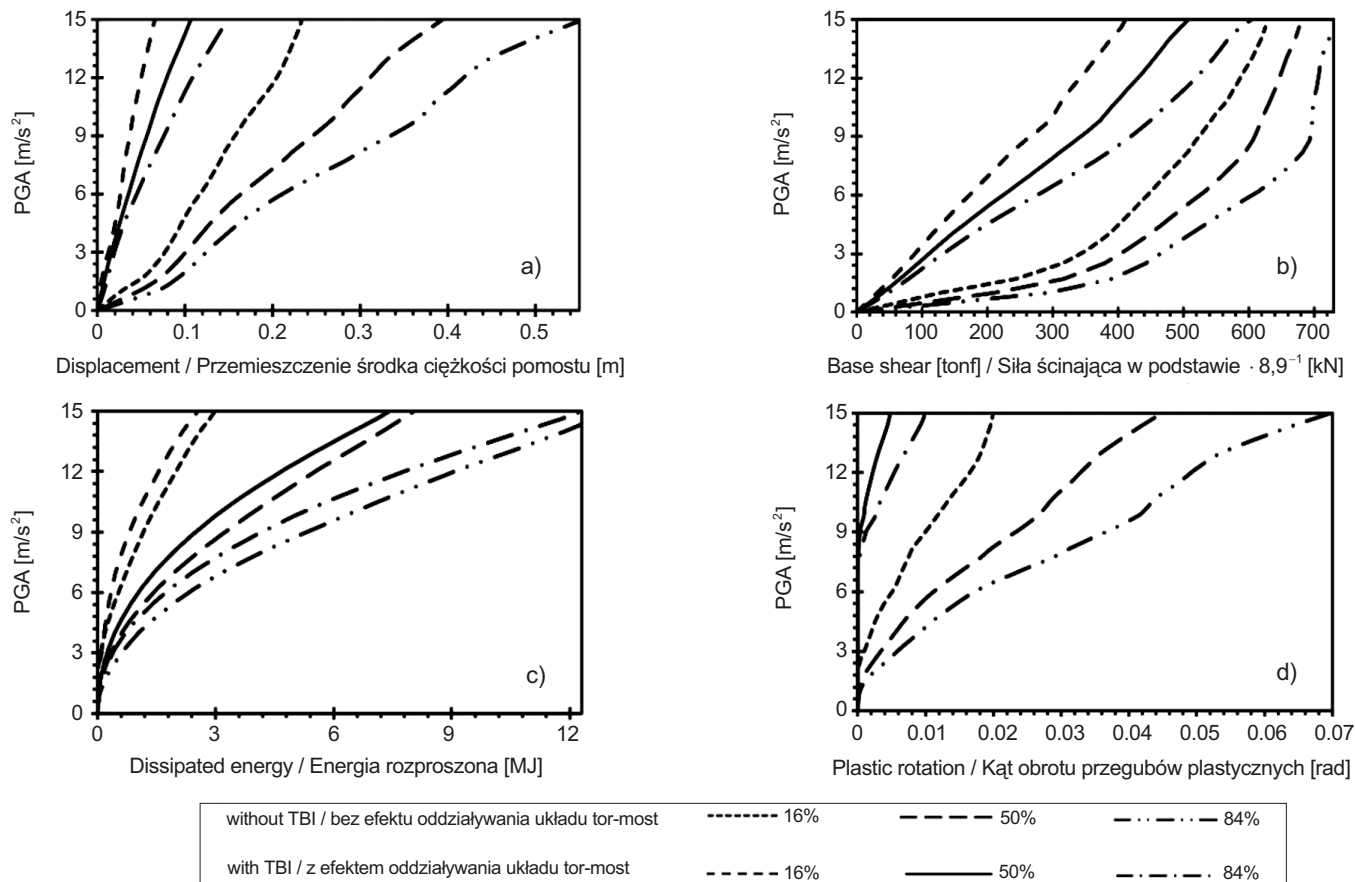


Fig. 11. Comparison of summarized IDA curves of the models including and not including TBI in which seismic intensity is PGA and DM are: a) midpoint displacement of the bridge deck, b) base shear, c) dissipated energy during the earthquake, d) plastic hinge rotation in piers

Rys. 11. Porównanie wypadkowych krzywych IDA modeli uwzględniających i nieuwzględniających wzajemne oddziaływanie tor-most, w których PGA i DM odnoszą się do: a) przemieszczenia środka pomostu, b) siły ścinającej w podstawie, c) energii rozproszonej podczas trzęsienia ziemi, d) obrotu przegubów plastycznych w filarach

### 3.3. PROPONOWANE RÓWNANIA

Ponieważ efekty oddziaływania toru z mostem (TBI) są często pomijane lub uwzględniane jedynie w przypadku obciążeń termicznych i sił niszczących [22], w artykule zaproponowano wprowadzenie współczynnika modyfikacji zależnego zarówno od siły ścinającej podstawę jak i od

$$\alpha = 0.04a + 0.2, \quad (1)$$

$$\beta = 0.01a + 0.15, \quad (2)$$

where  $a$  is PGA record, and  $\alpha$  and  $\beta$  are maximum deck displacements and base shear modifying factors, respectively.

maksymalnego przemieszczenia pomostu, tak aby w konsekwencji uwzględnić efekty oddziaływania pomiędzy torem i mostem bez włączania ich do założeń modelu. Wykorzystując wyniki uzyskane w podrozdziale 3.2, pokazano na Rys. 12 i 13 wykresy zależności przemieszczeń pomostu oraz siły ścinającej w podstawie od maksymalnego przyspieszenia ziemskiego (PGA) kolejno dla układów: - z oraz - bez uwzględnienia oddziaływania toru z mostem (TBI). Krzywe obrazujące te zależności zachowują się w przybliżeniu podobnie w przypadku wszystkich 14 zapisów. Stąd dla powyższych dwóch przypadków otrzymano wartości mediany: 16% i 84% współczynników przemieszczenia pomostu i ścinania w podstawie, których wykresy przedstawiono na Rys. 14 i 15. Poddając obliczone percentyle analizie regresji liniowej, równania (1) i (2) dopasowuje się do danych. Równania te, skorelowane z PGA (współczynnik korelacji 0,95), można używać do obliczania współczynnika modyfikacji w przypadku parametrów maksymalnego przemieszczenia pomostu i ścinania podstawy, bez włączania interakcji TBI do modelu:

$$\alpha = 0.04a + 0.2, \quad (1)$$

$$\beta = 0.01a + 0.15, \quad (2)$$

gdzie  $a$  jest zapisem przyspieszenia PGA, natomiast  $\alpha$  i  $\beta$  to współczynniki modyfikacji wprowadzone w celu korekty maksymalnego przemieszczenia pomostu oraz siły ścinającej podstawę.

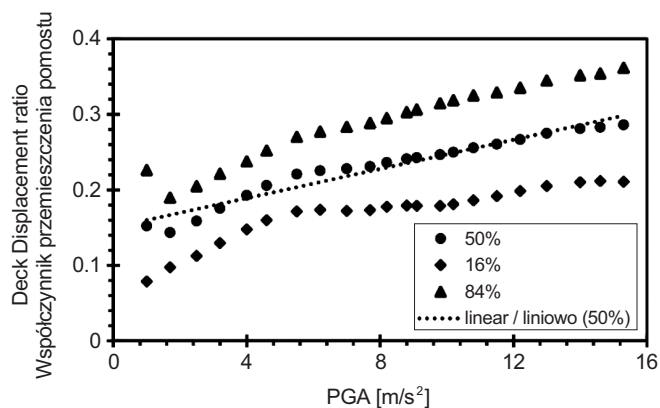


Fig. 14. Median 16% and 84% curves of the deck displacement ratios depending on the PGA for model with and without TBI  
Rys. 14. Zmiany współczynników przemieszczenia pomostu w zależności od PGA, przedstawione w postaci krzywych o wartościach median 16% i 84%, w przypadku modeli uwzględniających i nieuwzględniających wzajemne oddziaływanie pomiędzy torem i mostem

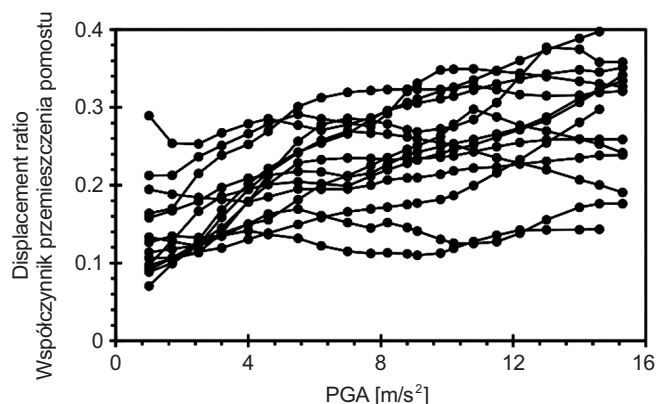


Fig. 12. Changes of the deck displacement ratios depending of the PGA for models with and without TBI

Rys. 12. Zmiany współczynników przemieszczenia pomostu w zależności od PGA, w przypadku modeli uwzględniających i nieuwzględniających wzajemne oddziaływanie pomiędzy torem i mostem

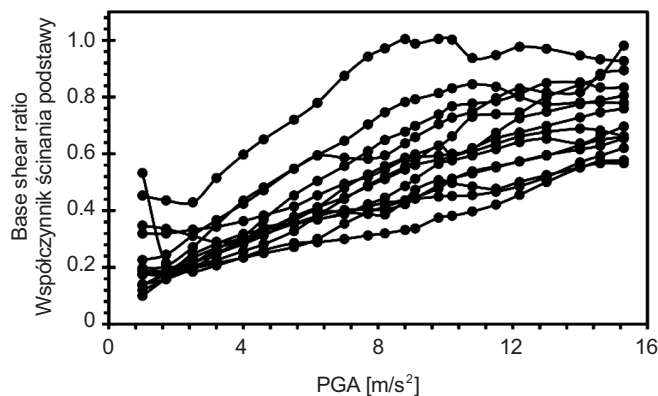


Fig. 13. Changes of the base shear ratios depending on the PGA for models with and without TBI

Rys. 13. Zmiany współczynników ścinania podstawy w zależności od PGA w przypadku modeli uwzględniających i nieuwzględniających wzajemne oddziaływanie pomiędzy torem i mostem

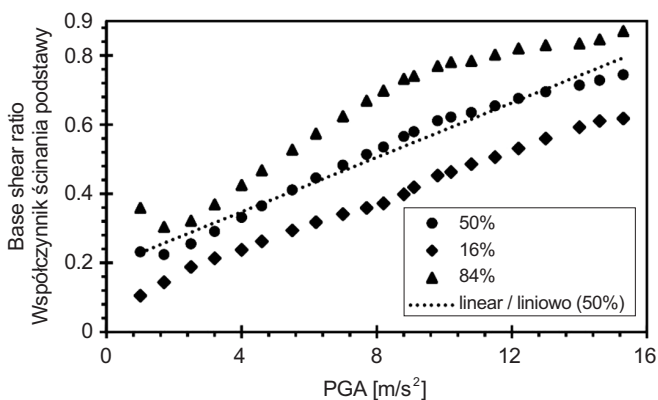


Fig. 15. Median 16% and 84% curves of the base shear ratios depending on the PGA for model with and without TBI

Rys. 15. Zmiany współczynników ścinania podstawy w zależności od PGA, przedstawione w postaci krzywych o wartościach median 16% i 84%, w przypadku modeli uwzględniających i nieuwzględniających wzajemne oddziaływanie pomiędzy torem i mostem

#### 4. POSUMOWANIE I WNIOSKI

W oparciu o uproszczoną analizę pushover i przyrostową analizę dynamiczną (IDA) oceniono zachowanie się mostu kolejowego z uwzględnieniem wzajemnego oddziaływania toru z mostem (TBI) w warunkach zwiększonej aktywności sejsmicznej ziemi. Dwa mosty kolejowe, modelowane w wariantach: jeden – z efektem TBI oraz drugi – bez efektu TBI, poddano działaniu czternastu głównych uniwersalnych typów trzęsień ziemi. Następnie porównano otrzymane w wyniku analiz dla obu modeli parametry fizyczne konstrukcji: siłę ścinania podstawy, energię rozproszoną, przemieszczenie pomostu, a także obroty przegubu. Ogólnie można stwierdzić, że obecność torów bezстыkowych (TBS) na mostach bardzo poprawia ich sejsmiczne i dynamiczne parametry. Krzywe przebiegu statycznego w przypadku obu modeli konstrukcji pokrywają się idealnie, co wskazuje, że na podstawie analizy pushover nie da się potwierdzić zwiększonej odporności mostu w przypadku wystąpienia różnych poziomów intensywności trzęsienia ziemi. Analiza nieliniowego przebiegu czasowego wykazała, że dla ustalonego poziomu trzęsienia ziemi efekt oddziaływania pomiędzy torem i mostem (TBI) może skutecznie zmniejszyć przemieszczenie pomostu, siłę ścinającą podstawę i obrót przegubów plastycznych o odpowiednio 70-90%, 20-83% i 85-100%. Choć całkowita energia rozproszona przez mechanizm wzajemnego oddziaływania układu zwiększyła się na skutek zmniejszenia się kąta obrotu przegubów plastycznych, to jednak w rezultacie energia rozproszona przez całą konstrukcję mostu zmniejszyła się. Ponadto oceniano wpływ dominującego okresu trzęsienia ziemi na stan zniszczenia konstrukcji mostów. Otrzymane wyniki we wszystkich badanych przypadkach pokazują najwyższą wartość przemieszczeń dla zapisów trzęsienia ziemi w Kobe i w El Centro, gdzie dominujący okres drgań wynosił 0,6 s. Wynika z tego, że okres nieliniowy konstrukcji, przy którym występuje zjawisko rezonansu, wynosił około 0,6 s. Na podstawie wyników otrzymanych z przyrostowej analizy dynamicznej (IDA) rozpatrywanych modeli zaproponowano dwa równania przeznaczone do szacowania odpowiednio: przemieszczenia pomostu oraz siły ścinającej podstawę konstrukcji, przy dowolnym maksymalnym przyśpieszeniu ziemskim (PGA), bez przeprowadzania czasochłonnej analizy nieliniowej uwzględniającej wzajemne oddziaływania pomiędzy torem a mostem (TBI).

#### BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

[1] *Esveld I.C.*: A better understanding of continuous welded rail track. *Parameters*, 1, 1996, 9-6

#### 4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

In this paper, seismic behaviour of the railway bridge considering track-bridge interaction (TBI) using pushover and incremental dynamic analysis (IDA) was evaluated. Two railway bridges with and without TBI were subjected to fourteen major universal earthquakes. Analyses results such as base shear forces, dissipated energy, deck displacements, and hinge rotations were compared in both models. In general, it can be concluded that the existence of continuous welded rails (CWRs) on bridges can greatly improve seismic and dynamic performances of the bridges. The static pushover curves of both structural models perfectly coincide, indicating that pushover analysis cannot provide the amount of increased resistance of bridge on different earthquake levels. Nonlinear time history analysis demonstrated that at a certain earthquake level, TBI effect could reduce deck displacement, base shear, and plastic rotation each from 70%-90%, 20%-83%, and 85%-100%, respectively. Considering these effects, even though the total dissipated energy by interaction mechanism increased, due to a decrease in the rotation of plastic hinges, the dissipated energy was decreased by the bridge structure. Furthermore, the influence of the earthquake predominant period was assessed. According to the obtained results, the outcomes showed the highest response values for Kobe and El Centro records with predominant period approximately equal to 0.6s. It could be concluded that the structures nonlinear period is about 0.6 s, where resonance phenomenon occurs. Finally, by using the IDA results, two new equations are proposed to estimate deck displacement and base shear of the bridge for any PGA level, to avoid time-consuming nonlinear analysis including TBI.

[2] *Bruneau M.*: Performance of steel bridges during the 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe, Japan) earthquake—a North American perspective. *Engineering Structures*, 20, 12, 1998, 1063-1078

[3] *Biondi B., Muscolino G., Sofi A.*: A substructure approach for the dynamic analysis of train-track-bridge system. *Computers & structures*, 83, 28-30, 2005, 2271-2281

[4] *Bu Y.Z.*: Research on the transmission mechanism of longitudinal force for highspeed railway bridges. Ph. D. Dissertation in Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 1998

- [5] *Read D., LoPresti J.*: Management of rail neutral temperature and longitudinal rail forces. *Railway Track and Structures*, **101**, 8, 2005, 18-19
- [6] *Ruge P., Birk C.*: Longitudinal forces in continuously welded rails on bridgedecks due to nonlinear track-bridge interaction. *Computers & structures*, **85**, 7-8, 2007, 458-475
- [7] *Xu Q.Y., Zhang X.J.*: Longitudinal forces characteristic of Bogl longitudinal connected ballastless track on high-speed railway bridge [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, **40**, 2, 2009, 526-532
- [8] *Yan B., Dai G.L., Zhang H.P.*: Beam-track interaction of high-speed railway bridge with ballast track. *Journal of Central South University*, **19**, 5, 2012, 1447-1453
- [9] *Battini J.M., Ülker-Kaustell M.*: A simple finite element to consider the non-linear influence of the ballast on vibrations of railway bridges. *Engineering structures*, **33**, 9, 2011, 2597-2602
- [10] *Dai G.L., Liu W.S.*: Applicability of small resistance fastener on long-span continuous bridges of high-speed railway. *Journal of Central South University*, **20**, 5, 2013, 1426-1433
- [11] *Rauert T., Bigelow H., Hoffmeister B., Feldmann M.*: On the prediction of the interaction effect caused by continuous ballast on filler beam railway bridges by experimentally supported numerical studies. *Engineering Structures*, **32**, 12, 2010, 3981-3988
- [12] AREMA. *Seismic Design For Railway Structures*. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, Washington, United States, 2006
- [13] *Khan M.A.*: *Earthquake-Resistant Structures: Design, Build, and Retrofit*. Butterworth-Heinemann, 2013
- [14] *He X., Kawatani M., Hayashikawa T., Matsumoto T.*: Numerical analysis on seismic response of Shinkansen bridge-train interaction system under moderate earthquakes. *Earthquake engineering and engineering vibration*, **10**, 1, 2011, 85-97
- [15] *Zhao Z., Wu G., Ali E., Wang X., Kou C.*: Rock slope stability evaluation in static and seismic conditions for left bank of Jinsha River Bridge along Lijiang-Xamgyi'nyilha railway, China. *Journal of Modern Transportation*, **20**, 3, 2012, 121-128
- [16] *Yan B., Liu S., Pu H., Dai G., Cai X.*: Elastic-plastic seismic response of CRTS II slab ballastless track system on high-speed railway bridges. *Science China Technological Sciences*, **60**, 6, 2017, 865-871
- [17] *Caglayan O., Ozakgul K., Tezer O., Uzgider E.*: Evaluation of a steel railway bridge for dynamic and seismic loads. *Journal of Constructional Steel Research*, **67**, 8, 2011, 1198-1211
- [18] *Mu D., Gwon S.G., Choi D.H.*: Dynamic responses of a cable-stayed bridge under a high speed train with random track irregularities and a vertical seismic load. *International Journal of Steel Structures*, **16**, 4, 2016, 1339-1354
- [19] *Ryjáček P., Vokáč M.*: Long-term monitoring of steel railway bridge interaction with continuous welded rail. *Journal of Constructional Steel Research*, **99**, 2014, 176-186
- [20] *Dai G.L., Yan B.*: Longitudinal forces of continuously welded track on high-speed railway cable-stayed bridge considering impact of adjacent bridges. *Journal of Central South University*, **19**, 8, 2012, 2348-2353
- [21] *Ruge P., Widarda D.R., Schmälzlin G., Bagayoko L.*: Longitudinal track-bridge interaction due to sudden change of coupling interface. *Computers & Structures*, **87**, 1-2, 2009, 47-58
- [22] UIC774-3. *Track-bridge interaction*. Union Internationale des Chemins de fer, Paris, 2001
- [23] EN13764-1:2002 *Railway applications - Track - Rail - Part 1*. European Standard, Brussels
- [24] *Zhang J., Wu D.J., Li Q.*: Loading-history-based track-bridge interaction analysis with experimental fastener resistance. *Engineering Structures*, **83**, 2015, 62-73
- [25] *Ryjáček P., Howlader M.M., Vokáč M., Stollenwerk B., Ondovčák P.*: The rail-bridge interaction-recent advances with ERS fastening system for steel bridges. *Transportation Research Procedia*, **14**, 2016, 3972-3981
- [26] CALTRANS. *Seismic design criteria*. California Department of Transportation, Sacramento, California, 2004
- [27] *Shinde D., Nair Veena V., Pudale Yojana M.*: Pushover analysis of multi story building. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, **3**, 2014, 691-693
- [28] FEMA-350 *Recommended Seismic Design Criteria for new steel moment-frame buildings*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000
- [29] *Bertero V.V.*: Strength and deformation capacities of buildings under extreme environments. *Structural engineering and structural mechanics*, **53**, 1, 1977, 29-79

- [30] *Chopra A.K., Goel R.K.*: A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake engineering & structural dynamics*, **31**, 3, 2002, 561-582
- [31] *Chopra A.K., Goel, R.K.*: A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric plan buildings. *Earthquake engineering & structural dynamics*, **33**, 8, 2004, 903-927
- [32] *Vamvatsikos D., Cornell C.A.*: Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **31**, 3, 2002, 491-514
- [33] *Shome N., Cornell C.A.*: Normalization and scaling accelerograms for nonlinear structural analysis. *Proceedings of the 6th US National Conference on Earthquake Engineering*, 1-12 May 1998, Seattle, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland (CD-ROM)
- [34] *Strong Motion Database*. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER), 2005