



НЕЛИНЕЙНИ СТАТИЧНИ АНАЛИЗИ НА ИНТЕГРАЛЕН СТОМАНОБЕТОНЕН МОСТ

Александър Илиев¹, Димитър Стефанов¹, Петър Николов²

eng.alexander.iliev@gmail.com, dstefanov@geophys.bas.bg, nikolov_fte@uacg.bg

¹*Българска Академия на Науките (БАН)*

*Национален Институт по Геофизика, Геодезия и География (НИГГГ)
гр. София, ул. "Акад. Г. Бончев", бл. 3, БЪЛГАРИЯ*

²*Университет по Архитектура, Строителство и Геодезия (УАСГ)
гр. София, бул. "Христо Смирненски" №.1, БЪЛГАРИЯ*

Ключови думи: стоманобетонен интегрален мост, хоризонтален капацитет, нелинеен статичен анализ (*push-over*)

Резюме: Мостовете са представляват важни логистични съоръжения, които имат пряко значение върху нормалното функциониране и работа на една държава. Разрушаването или повреждането им при сеизмични събития може да бъде критично непосредствено след земетрението.

Нелинейният статичен анализ дава добра представа за механизма на разрушаване (зони на пластификация) на конструкции, натоварени с хоризонтални натоварвания. Неговото предимство пред динамичния анализ е силно намаленото време за изчисление, поради игнорирането на динамичната част от уравнението на движението. Този тип анализ (нелинеен статичен) осигурява добра оценка на крайния капацитет на конструкцията, но няма възможност да се представи развитието на повредите в различно време от сеизмичното действие. При нелинейния статичен анализ нелинейната връзка сила-преместване на отделните компоненти и елементи се отчита директно в модела на конструкцията. Нелинейните анализи улесняват разбирането на действителното поведение на реална конструкция. Това може да доведе до по-детайлно проучване и оразмеряване на критичните елементи/детайли на мостовата конструкция, което води до по-надеждно и ефективно решение.

Настоящото изследване определя нелинейното реагиране на стоманобетонен интегрален мост с помощта на нелинейни статични анализи.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Нелинейният статичен (*push-over*) анализ е използван в сеизмичното инженерство за оценка на хоризонталния капацитет (сеизмичните характеристики) на сгради и съоръжения. Основната цел на анализа е да се оцени работата на конструкцията при хоризонтални (сеизмични) натоварвания. Този метод помага при:

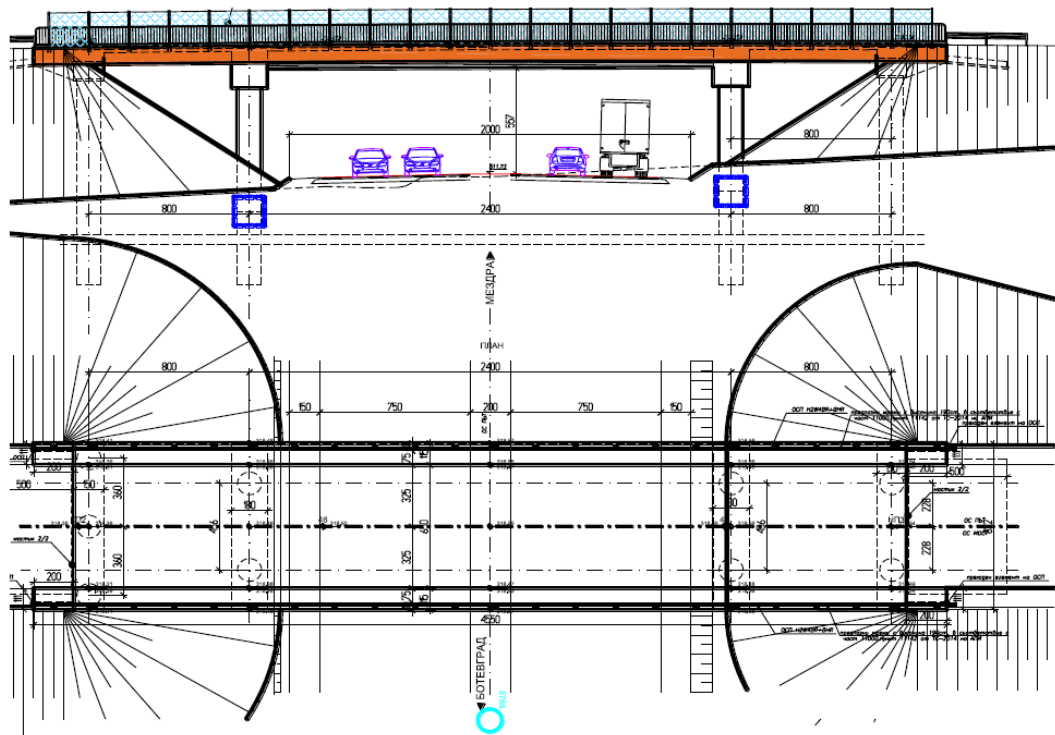
- Определяне на потенциалните слаби места в конструкцията.
- Оценка на способността на конструкцията да противодейства на сеизмични въздействия.

- Разбиране на разпределението на нееластичното поведение и идентифициране на последователността от откази на конструктивните елементи.
- Осигуряване на представа за капацитета на деформация и свързаните нива на повреда.

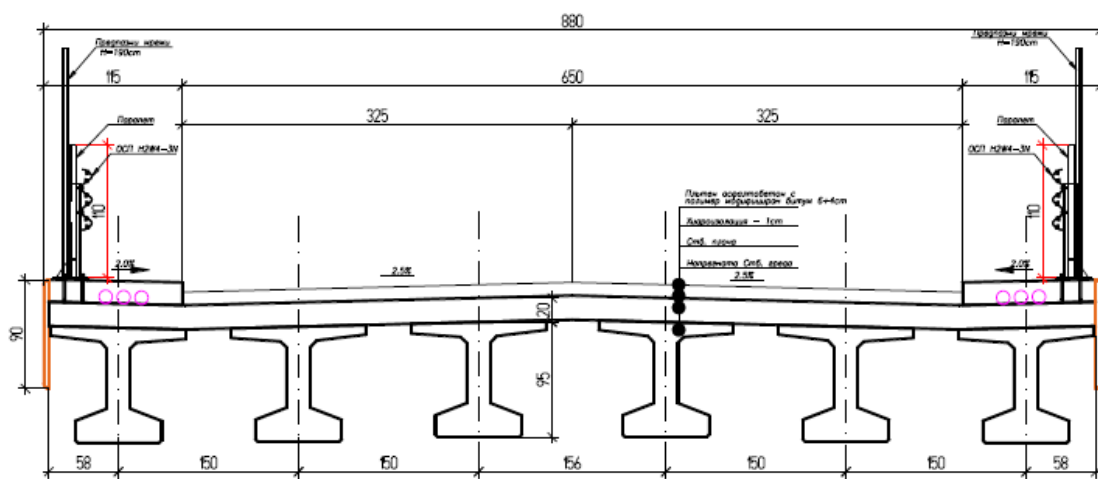
За целта трябва да се разработи подробен конструктивен модел с помощта на софтуер за крайни елементи. Моделът трябва да включва геометрията, свойствата на материала и граничните условия на конструкцията. В зависимост от вида на използваните крайни елементи съществуват и различни материални модели, които да описват нелинейното поведение на стоманобетонните елементи. Ако конструкцията се моделира с обемни или плочести (shell), то най-често материалната нелинейност е представена чрез т.н. модел на разпределените пукнатини (smeared crack approach). Ако конструкцията е моделирана посредством гредови елементи, то най-често тяхната нелинейност е представена чрез концентрирана нелинейност посредством нелинейно пластични стави. Последният вариант е значително по-бърз за изчисленията, докато използването на разпределена нелинейност значително увеличава изчислителното време и изисква повече ресурси. Следва да се използва предварително дефинирана схема на хоризонтално натоварване към конструкцията. Това може да бъде равномерен, триъгълен или всякакъв модел, с който се апроксимира разпределението на сеизмичните сили. След това, постепенно се прилагат странични натоварвания, като същевременно се наблюдава реакцията в основата на конструкцията. Натоварванията се увеличават, докато се достигне целево преместване или докато конструкцията претърпи значителни повреди. Като резултат се получава така наречената капацитивна крива: срязването в основата спрямо преместването на върха на конструкцията. Тази крива представлява връзката между приложената хоризонтална сила и полученото изместване на конструкцията. Едно от предимствата на нелинейния статичен метод е осигуряването на подробна представа за сеизмичните характеристики и потенциалните механизми на повреда. Изисква по-малко изчислително време в сравнение с пълния динамичен анализ. Съществуват и някои недостатъци на описания подход. Резултатите са чувствителни към избора на модел на натоварване и свойствата на материала. Не се улавят точно динамични ефекти като резонанс, както и приносите на по-високи собствени форми. Ограничава се за конструкции, в които режимът на деформация е доминиран от първата собствена форма на трептене. Чрез осигуряване на по-задълбочено разбиране относно поведението на конструкциите при сеизмични натоварвания, анализът играе решаваща роля за повишаване на безопасността и устойчивостта на конструкциите .

2. ОПИСАНИЕ НА ИЗСЛЕДВАНАТА КОНСТРУКЦИЯ

Обект на изследване е гредови стоманобетонен рамков мост в права и без косота. Мостът се състои от 3 отвора и обща дължина 40 м, фиг.1. В напречно направление, мостът е с размер 8,8 м, фиг.2. Средната височина на стълбовете е 6 m, а диаметърът им е 1,2 м. В средния отвор (24 м) надлъжните греди от връхната конструкция са предварително напрегнати. Те са с от типа ГТ и са с височина 95 см. В крайните полета връхната конструкция е плочеста. Напречен разрез в средното поле на надлеза е показан на фиг.2. Фундирането е в земна основа тип С, посредством изливни пилоти с диаметър 120cm и дължина 22 м. Съоръжението е проектирано с коефициент на значимост 1,4 и коефициент на поведение 1,5. За натоварване от подвижен трафик е приет товарен модел LM1 [1].



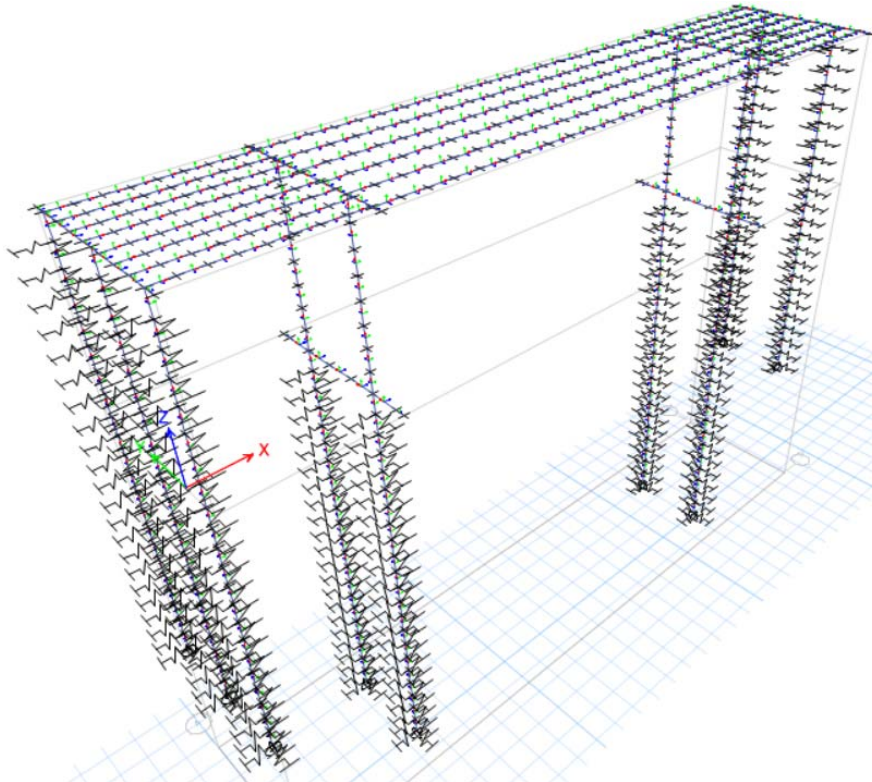
Фиг.1. Надлъжен изглед и план на моста



Фиг.2. Напречен разрез в средно поле

3. МОДЕЛ ЗА НЕЛИНЕЙНИ СТАТИЧНИ АНАЛИЗИ

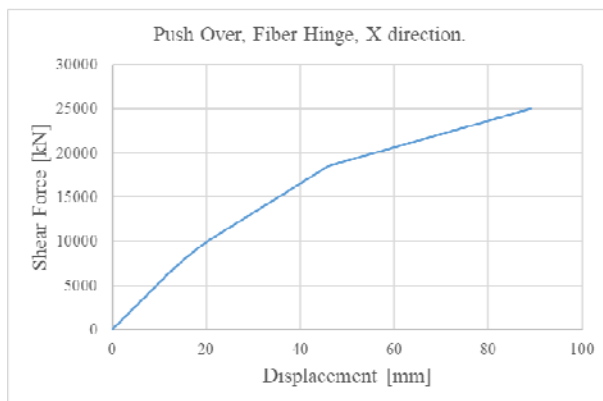
За определянето на хоризонталния капацитет в двете перпендикулярни направления е разработен триизмерен модел по крайни елементи с програмен продукт ETABS [2]. Колоните, ригелите, надлъжните греди и пилотите са моделирани с гредови елементи. Върхната конструкция се опира върху долното строене (ригелите) посредством корава връзка (без лагери) както при стълбовете, така и при устоите, с което моста може да бъде определен като интегрален. За моделирането на нелинейното поведение са използвани пластични стави с концентрирана нелинейност. За хоризонталното натоварване са приложени ускорения в двете перпендикулярни направления. Разгледани са два варианта за определяне характеристиките на пластичните стави- автоматично определяне на характеристиките и фибров модел. Пилотите са подпирани с пружини със съответния коефициент на леглото (Винклерова константа) определени по методологията, дадена в [3].



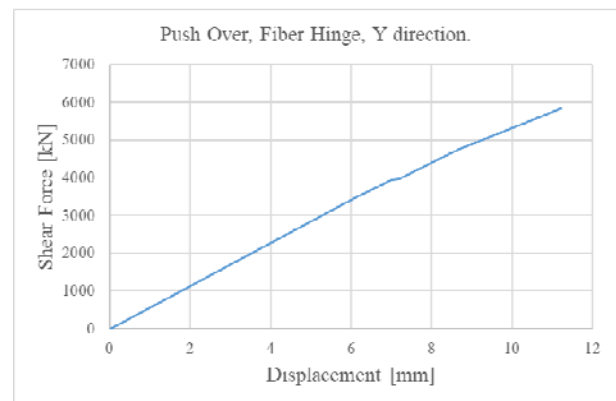
Фиг.3. Общ триизмерен изглед на модела по крайни елементи

4. РЕЗУЛТАТИ

В тази част от статията са представени сравнителни резултати от нелинейни статични анализи с различни варианти на моделиране на пластичните стави в прътовите елементи по двете перпендикулярни оси. На фиг.4 е представена графика на максималната срязваща сила в основата на моста към максималното преместване на връхната конструкция. Този вид взаимодействие се нарича още пуш-овър крива (push-over curve). На фиг.5 е преставена същата крива, но за посока на моста Y (перпендикулярно на оста на движение). Прави впечатление, че по посока Y, максималното преместване достига едва 11мм. Това е така, поради невъзможност на програмния продукт да намери сходимост за решение за по-голямо въздействие. Именно поради тази причина е използван и друг подход за представяне на нелинейностите в пластичните стави (автоматичен).

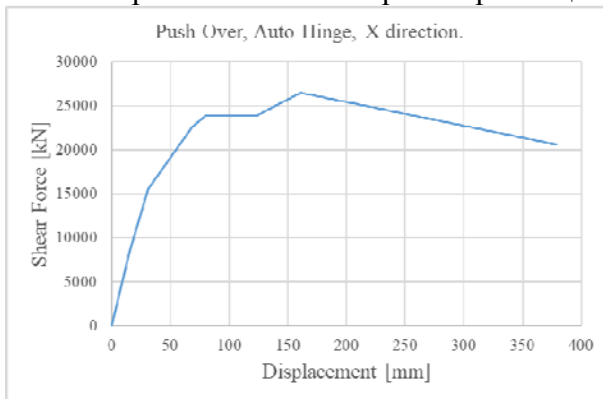


Фиг.4. Пуш-овър крива в посока X.
Фибров модел.

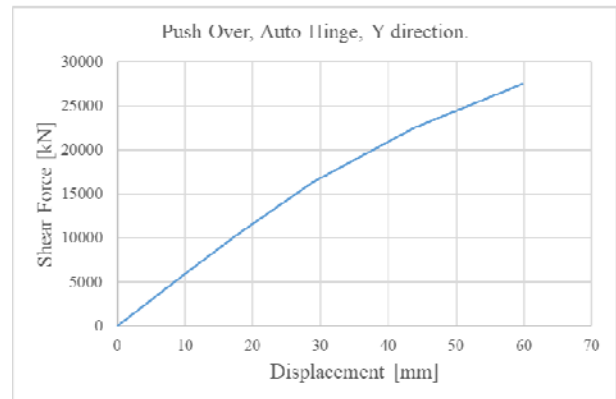


Фиг.5. Пуш-овър крива в посока Y.
Фибров модел.

На фиг.6 и фиг.7 са показани пуш-овър кривите от автоматичен модел за представяне на пластичните зависимости в краищата на прътовите елементи за посока X и съответно Y. Прави впечатление, че числено програмния продукт достига до големи премествания на върха и срязващи сили в основата.

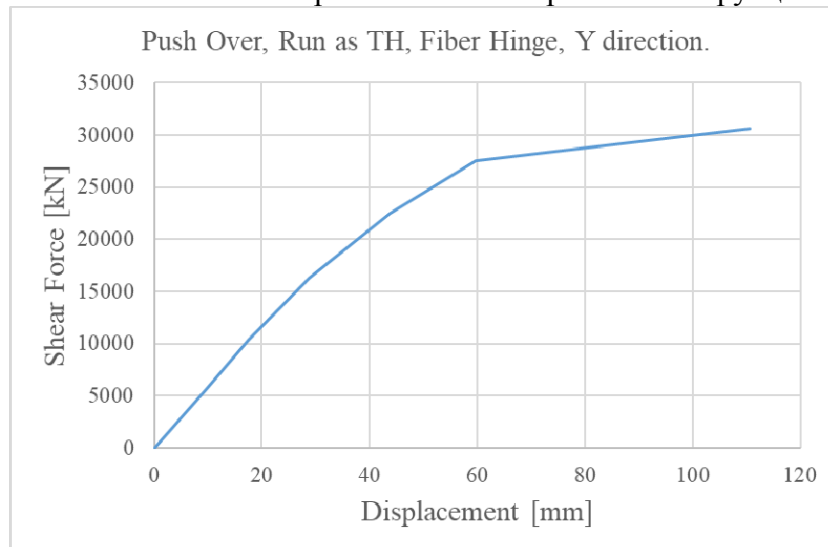


**Фиг.6. Пуш-овър крива в посока X.
Автоматичен модел.**



**Фиг.7. Пуш-овър крива в посока Y.
Автоматичен модел.**

Въпреки относително добрите резултати от автоматичния модел е направен и още един вариант за решение, като при него натоварването е зададено квази-статично и решението е като при анализ във времето (Load Cases Data: Load Application: Quasi-Static (run as time history)). При него по посока Y, решението достига до 30000kN срязваща сила в основата и 110mm преместване на върха на конструкцията.



Фиг.8. Пуш-овър крива в посока Y. Фибров модел. Анализ като история във времето

От проведените анализи и направените резултати, може да се направи извода, че по-слабата страна на моста е извън равнината (перпендикулярно на оста на моста).

5. ИЗВОД

В настоящата статия е направен обзор на нелинейните статични числени процедури, като средство за определяне нелинейното поведение и сеизмичен капацитет на пътни стоманобетонни интегрални мостове. Анализирани са гредови стоманобетонен мост в права и без косота. Мостът се състои от 3 отвора и обща дължина 40 м. За определянето на хоризонталния капацитет в двете перпендикулярни направления е разработен триизмерен модел по крайни елементи с програмен продукт ETABS [2]. Колоните, ригелите в напречно направление, надлъжните греди в надлъжно

направление и пилотите са моделирани с гредови елементи. За моделирането на нелинейното поведение са използвани пластични стави с концентрирана нелинейност. Изследвани са два варианта за представяне на нелинейното поведение в пластичните стави: автоматичен и фибров подход. Представени са графики на максималната срязваща сила в основата на моста към максималното преместване на връхната конструкция, за двата вида. Въпреки относително добрите резултати от автоматичния модел е направен и още един вариант за решение, като при него натоварването е зададено квази-статично и решението е като при анализ във времето (Load Cases Data: Load Application: Quasi-Static (run as time history)). От проведените анализи и направените резултати, може да се направи извода, че по-слабата страна на моста е извън равнината (перпендикулярно на оста на моста).

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] БДС EN 1998-2, Еврокод 8: Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия, Част 2: Мостове.
- [2] ETABS 2015: CSI Analysis Reference Manual.
- [3] Priestley, M.J.N, Seible F and Calvi G.M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, 1996, p.465.
- [4] FEMA 440, Improvement of Nonlinear Static Analysis Procedure, June 2005.

NONLINEAR STATIC (PUSH-OVER) ANALYSIS OF INTEGRAL CONCRETE BRIDGE

Alexander Iliev¹, Dimitar Stefanov¹, Petar Nikolov²

eng.alexander.iliev@gmail.com, dstefanov@geophys.bas.bg, nikolov_fte@uacg.bg

¹*Bulgarian Academy of Sciences*

*National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography
Sofia, Acad. G. Bonchev str., bl. 3, BULGARIA*

²*University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy (UACG)
Sofia, Hristo Smirnenrski 1, BULGARIA*

Key words: *reinforced concrete integral bridge, horizontal capacity, nonlinear static (push-over) analysis.*

Abstract: *Bridges are important logistical facilities that have a direct impact on the normal functioning and operation of a country. This is precisely what makes them important, and accordingly any possible loss or damage in seismic events would be significant.*

Nonlinear static analysis gives a good idea of the failure mechanism (plasticization zones) of structures loaded with horizontal loads. Its advantage over dynamic time history analysis is the greatly reduced computational time, due to ignoring the dynamic part of the equation of motion. This type of analysis provides a good estimate of the ultimate capacity of the structure, but there is no possibility to represent the development of damage at different times from the seismic action. In the non-linear static analysis, the non-linear force-displacement relationship of individual components and elements is directly accounted for in the building model. Nonlinear analyzes make it easier to understand the actual behavior of a real structure. This can lead to a more detailed investigation and dimensioning of the critical elements/details of the bridge structure, leading to a more reliable and efficient solution.

The current study determines the non-linear response of a reinforced concrete integral bridge by means of non-linear static analyzes.