



УДК 624.3

DOI: 10.22227/2949-1622.2024.4.14-23

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

Динамика плиты покрытия заглубленного сооружения при варьировании жесткости ее опор

А.В. Алексейцев^{1*}

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация*

* aalexw@mail.ru

Ключевые слова: демпфирование, железобетонная плита, численное моделирование, ударные воздействия, деформации, податливые опоры

История статьи

Поступила в редакцию: 01.09.2024

Доработана: 20.09.2024

Принята к публикации: 28.09.2024

Для цитирования

Алексейцев А.В. Динамика плиты покрытия заглубленного сооружения при варьировании жесткости ее опор // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 8. № 4. С. 14–23.

Аннотация. Изучено влияние процента армирования и класса прочности бетона по сжатию на устойчивость железобетонных элементов при различных соотношениях продольной силы и крутящего момента. Для целей исследования использовано численно-аналитическое решение для стержневых железобетонных элементов, учитывающее изменение жесткости при комбинированном действии продольной сжимающей силы и крутящего момента с учетом нелинейной связи между напряжениями и деформациями по Model Code и изменения прочности и деформативности бетона при сложном напряженно-деформированном состоянии по модели Г.А. Гениева. Для исследуемых железобетонных элементов построены границы области устойчивости при комбинированном действии продольной сжимающей силы и крутящего момента. Показано, что при комбинированном нагружении продольной силой и крутящим моментом для малых значений продольной силы N следует ожидать разрушение от потери прочности сечений при действии крутящего момента M_t . Для подверженных сжатию с кручением элементов из бетонов разных классов прочности по сжатию, но с близкими значениями эффективного процента армирования α_s установлено снижение безразмерной продольной силы α_n и безразмерного крутящего момента α_m по мере роста класса прочности бетона.

Dynamics of a Slab in the Roof of a Buried Structure When the Stiffness of its Supports is Varied

A.V. Alekseytsev^{1*}

¹ *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation*

* aalexw@mail.ru

Анатолий Викторович Алексейцев, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры Железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3035-5571, Scopus: 57191530761, Researcher ID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819, E-mail: aalexw@mail.ru

© Алексейцев А.В., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Keywords: damping, reinforced concrete slab, numerical modelling, impacts, deformations, plastic supports

Article history

Received: 01.09.2024

Revised: 20.09.2024

Accepted: 28.09.2024

For citation

Alekseytsev A.V. Dynamics of a Slab in the Roof of a Buried Structure When the Stiffness of its Supports is Varied. *Reinforced Concrete Structures*. 2024; 4(8): 14-23.

Abstract. An approach to the assessment of the dynamic behaviour of the floor slab of a buried structure is proposed. The estimation of the limiting dynamic load at changing the stiffness of the slab support nodes is performed. The design of supports in the form of crumpled inserts made of electric-welded steel pipe is considered. When building the fibre concrete model, volumetric finite elements were used, coupling with reinforcement was taken into account by using interpolation elements, steel reinforcement was represented as an ideal elastoplastic body. The impulsive impact was represented as a multiplication of a constant and a series of time-varying unit functions. The effect of the presence of damping supports in the perception of dynamic impact with the direction of propagation across the span of the slab was analysed. The results of the research can be used in the design of coverings of buried buildings and structures.

ВВЕДЕНИЕ

Современные условия и вызовы требуют анализа железобетонных конструкций в условиях динамических нагрузок. Это могут быть как механические или комбинированные локальные повреждения [1–4], так и воздействия импульсного характера [5–7]. При этом конструкции, которым придаются более выраженные демпфирующие свойства, обладают способностью выдерживать более интенсивные динамические воздействия. Одним из способов придания таких демпфирующих свойств является использование податливых конструкций в узлах опирания. Исследованиям таких конструкций посвящен ряд работ, например [8–10]. Существенным для оценки динамического эффекта является выбор методики анализа и модели демпфирования. В большинстве работ фактически не учитывается распространение динамической нагрузки по площади и во времени, вместе с тем для ряда динамических воздействий, например взрывных, такой учет требуется для более точной оценки эффекта от воздействия на конструкцию. В этой связи представляется актуальным исследование различных конструкций с варьированием податливости опорных узлов. В данной работе исследуется фиброжелезобетонная плита заглубленного сооружения, симметрично армированная продольной рабочей арматурой, конструктивное решение которой взято в соответствии с типовой серией. Рассмотрены демпфирующие опоры в виде вставок из прямошовной электросварной стальной трубы. Выполнено сравнение динамических эффектов при наличии сплошной трубы в опорном узле, а также при наличии абсолютно жесткой опоры, т.е. при отсутствии трубы, при этом в качестве базовых предпосылок методики анализа приняты положения работ [11, 12].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Плита, форма которой принята в соответствии с типовой серией У 01-01-/80 «Унифицированные сборно-монолитные конструкции заглубленных помещений с перекрытиями балочного типа», имеет пролет 6 м, геометрия сечения и схема армирования приведены на рис. 1.

Считаем, что заглубленная в грунт плита воспринимает нагрузку от действия в течение фазы разряжения τ детонационного взрыва на поверхности. При этом начальный импульс P затухает на величину $\mu < 1$ в зависимости от высоты заглубления плиты. В результате импульс i воспринимается конструкцией. Заменим в рамках рассматриваемой расчетной модели этот импульс распределенной по площади нагрузкой $F(t)$, действующей в течение времени t ($t \neq \tau$):

$$i = \mu P \tau / 2 = F(t)t. \quad (1)$$

Anatoly V. Alekseytsev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3035-5571, Scopus: 57191530761, ResearcherID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819, E-mail: aalexw@mail.ru

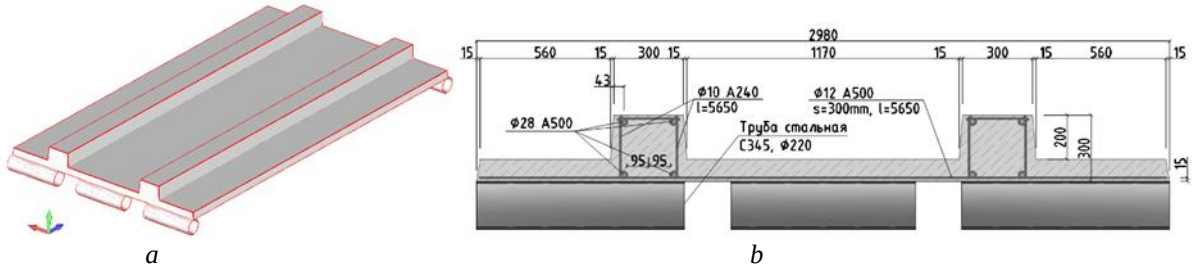


Рис. 1. Твёрдотельная модель плиты (а), поперечное сечение и схема армирования (b)

Fig. 1. Solid model of the slab (a), cross section and reinforcement scheme (b)

Начальный импульс P зависит от типа взрывчатого вещества и его объема. Он может быть определен исходя из экспериментальных исследований, например с использованием модели «JWL»:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}, \quad (2)$$

где V — относительный объем взрывчатого вещества, а остальные величины являются константами, связанными с давлением от энергии взрыва. Например, для тринитротолуола эти константы определены в работе [13].

Время t приложения на конструкцию механической силы может определяться приближенно как 0,1–0,2 от периода первой собственной частоты колебаний. А величину $F(t)$ с учетом возможности моделирования распространения нагрузки по площади и изменения во времени интенсивности этой нагрузки можно выразить в следующем виде:

$$F(t) = q_{st} Q_{st}(t) + \sum_{i=1}^s q_i Q_i(t), \quad (3)$$

где q_{st} , q_i — скалярные значения нагрузок, действующих в период эксплуатации и аварийного динамического догружения соответственно; s — число площадей на поверхности конструкции, по которым распространяются нагрузки q_i ; $Q_{st}(t)$, $Q_i(t)$ — безразмерные (нормированные по значениям q_{st} , q_i) функции изменения нагрузок во времени.

Численная задача решается путем прямого интегрирования уравнений движения, конечно, элементной модели с использованием неявной схемы, дающей более устойчивые решения для динамики низких скоростей:

$$[M] \ddot{y}(t) + [C] \dot{y}(t) + [K_\tau(t)] y(t) = F(t) + G\chi(t); \quad (4)$$

$$[K_\tau(t)] = [K_{bo}(t)] + [K_{so}(t)] + [K_{po}(t)] + [K_{b\sigma}(t)] + [K_{s\sigma}(t)] + [K_{p\sigma}(t)].$$

где $[K_\tau(t)]$ — касательная матрица жесткости системы, получающаяся из матриц малых деформаций фибробетона $[K_{bo}(t)]$, арматуры $[K_{so}(t)]$, демпфирующих элементов $[K_{po}(t)]$, а также трех соответствующих геометрических матриц. Правая часть уравнения движения учитывает инерционные свойства объекта, при $t > 0$ с помощью функции Хевисайда $\chi(t)$ в уравнение помимо вектора внешних узловых сил $F(t)$ включается вектор узловых масс. Остальные величины в уравнении — это матрицы масс $[M]$ и демпфирования $[C]$, а также векторы узловых ускорений, скоростей и перемещений соответственно $\ddot{y}(t)$, $\dot{y}(t)$, $y(t)$.

Моделирование материалов с учетом физической нелинейности выполнялось так. Использовался фибробетон с неметаллической фиброй, поведение которого можно с приемлемой степенью точности описать поверхностью текучести Друкера – Прагера:

$$\sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} = A + B(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3); \quad (5)$$

$$A = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_b R_{bt}}{R_b + R_{bt}} \right), \quad B = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_{bt} - R_b}{R_b + R_{bt}} \right),$$

(6)

где σ_1 – σ_3 — главные напряжения; R_b, R_{bt} — расчетные сопротивления фибробетона сжатию. Арматура работает по билинейной схеме упругопластического тела без упрочнения.

Параметры модели фибробетона представлены в таблице.

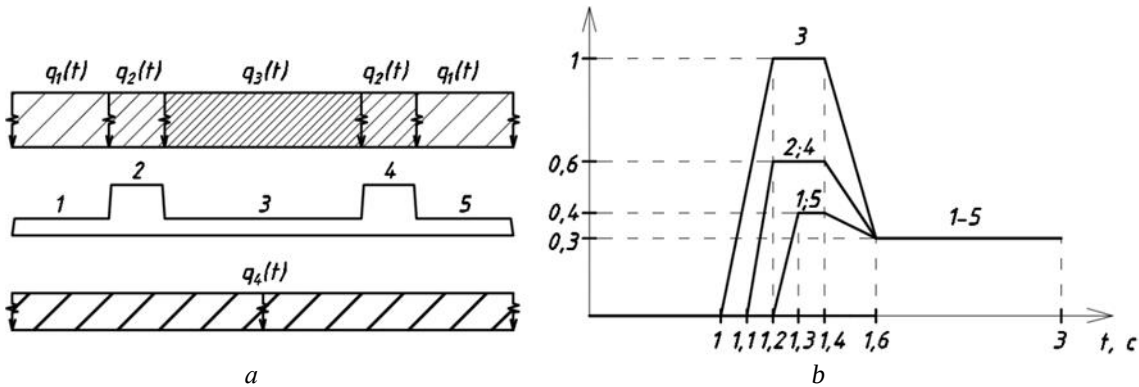
Параметры модели фибробетона
Parameters of the fiberboard model

Сопротивление сжатию R_b , МПа Compressive strength R_b , MPa	Сопротивление растяжению R_b , МПа Tensile strength R_b , MPa	Угол внутреннего трения φ , град. Internal friction angle φ , deg.	Напряжения когезии C , МПа Cohesion stress C , MPa	Угол дилатации, град. Dilatancy angle, deg.	Порог дилатации σ/R_b Dilatancy level σ/R_b
11,5	4,0	35	3,0	25	0,8

РЕЗУЛЬТАТЫ

Интерпретация кососимметричной нагрузки в соответствии с уравнением (3), а также схема распространения этой нагрузки по площадям и вид функций $Q_i(t)$ при $i=1...5$ представлены на рис. 2. Напряженное состояние фибробетона показано на рис. 3.

Из рисунка видно, что в момент времени $t = 1$ с (состояние до динамического воздействия при равномерной нагрузке 15 кПа) напряжения в сжатой зоне бетона близки к расчетному сопротивлению, т.е. плита с учетом условий эксплуатации запроектирована рационально. В начале действия импульса $t = 1,2$ с правая балка догружена сильнее, в плитной части появляется растяжение. При распространении импульса $t = 1,3$ с, $t = 1,4$ с плитная часть получает сквозные трещины и выполняет только поддерживающую функцию, усилия перераспределяются между несущими балками. Время $t = 1,6$ с динамическая нагрузка является пиковой. При этом деформации сжатой зоны бетона превышают предельные и в момент $t = 2,0$ с, когда действует эксплуатационная статическая нагрузка с дополнительным весом от грунта нарушенной структуры, происходит разупрочнение фибробетона в верхней зоне, сжатая зона бетона смещается от верхних крайних волокон вниз, а несущая способность обеспечивается симметричной продольной арматурой. Характерное состояние арматуры при этом показано на рис. 4.



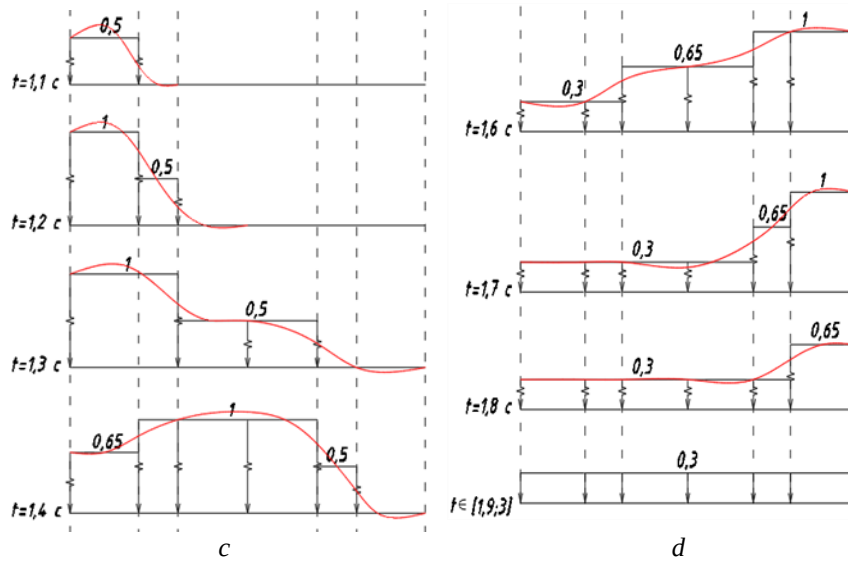
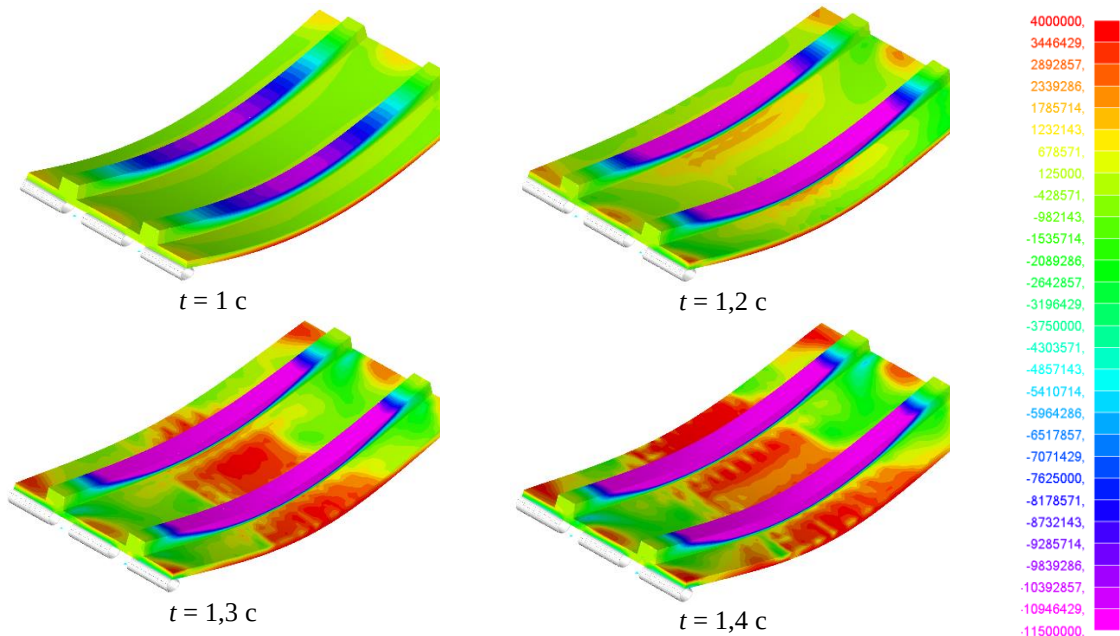


Рис. 2. Площади покрытия импульсом и последовательность 1–5 его распространения (а); вид безразмерных функций изменения интенсивности импульса во времени (б); распределение интенсивности в моменты времени (с, д)

Fig. 2. Areas covered by the pulse and the sequence 1–5 of its propagation (a); view of dimensionless functions of the pulse intensity change in time (b); intensity distribution at the moments of time (c, d)

В результате кососимметричного нагружения стержни напряжены также несимметрично, в одном верхнем и в одном нижнем стержне наблюдаются близкие к пределу текучести напряжения, что подтверждает необходимость симметричного продольного армирования. В данной задаче моделировалось контактное взаимодействие плиты с трубой, что позволяет учитывать действительную работу опоры, так как при ее деформировании увеличивается площадь контакта трубы и плиты. При этом можно показать ее напряженное состояние для оценки уровня пластической работы при динамическом нагружении (рис. 5).



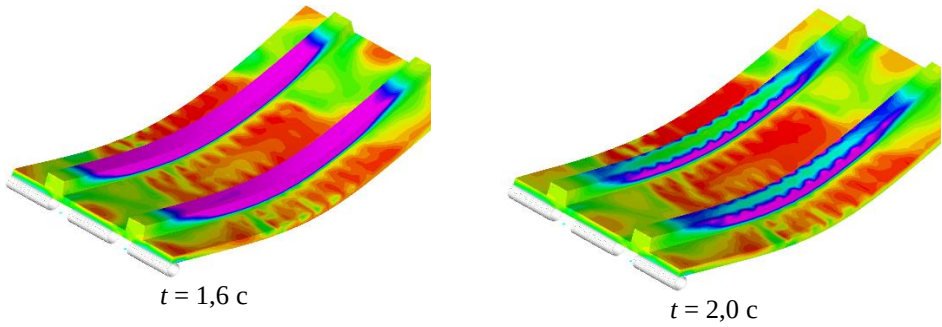


Рис. 3. Напряженное состояние во времени фибробетона при косимметричном импульсном воздействии (предельная нагруженность)

Fig. 3. Stress state in time of fibre concrete under oblique-symmetrical pulse action (limit loading)

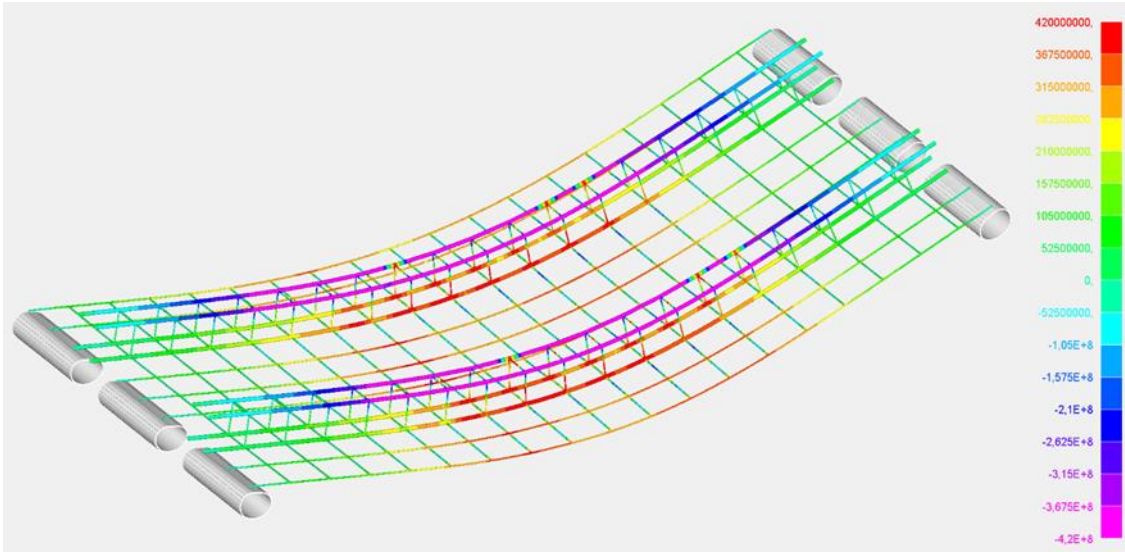


Рис. 4. Напряженное состояние арматуры при пиковой динамической нагрузке

Fig. 4. Stress state of reinforcement under peak dynamic loading

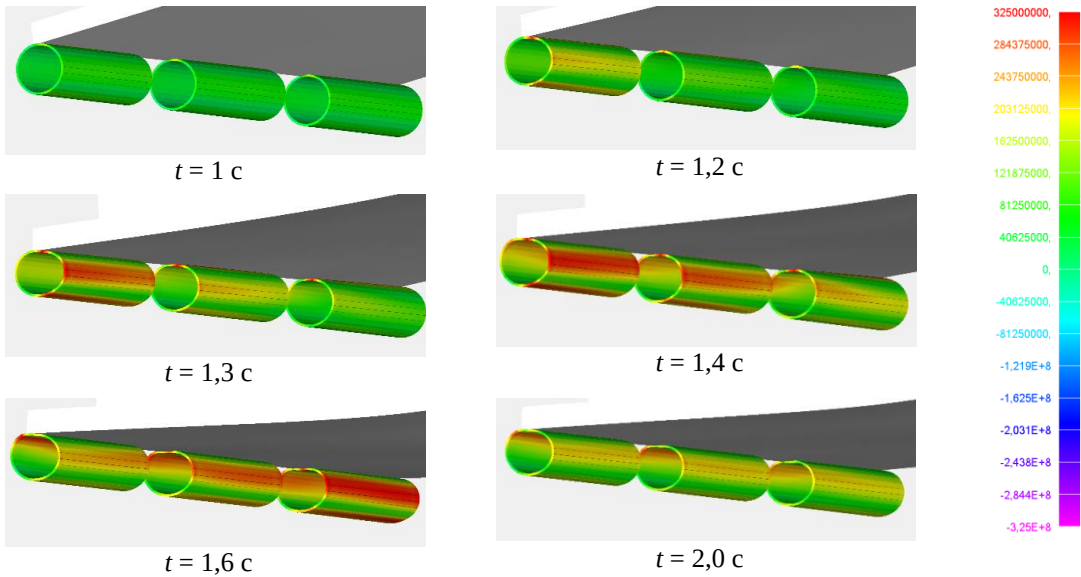


Рис. 5. Напряженное состояние во времени сминаемых вставок из трубы (предельная нагруженность)

Fig. 5. Stress state in time of plastically deformed pipe inserts (ultimate load)

Как видно из рис. 5, при динамическом воздействии податливая опора (труба) получает необратимые пластические деформации, при этом каждая из вставок входит в состояние пластического деформирования.

При расчетах варьировались разные толщины труб. В предыдущих исследованиях [10, 12] рассматривалась симметричная нагрузка и была выявлена оптимальная толщина трубы, при которой динамическая нагрузка была максимальной. Результаты расчета при кососимметричной нагрузке показали, что наибольшая нагрузка может быть воспринята при толщине трубы из стали С325, равной 10 мм. Результаты расчетов показаны на рис. 6.

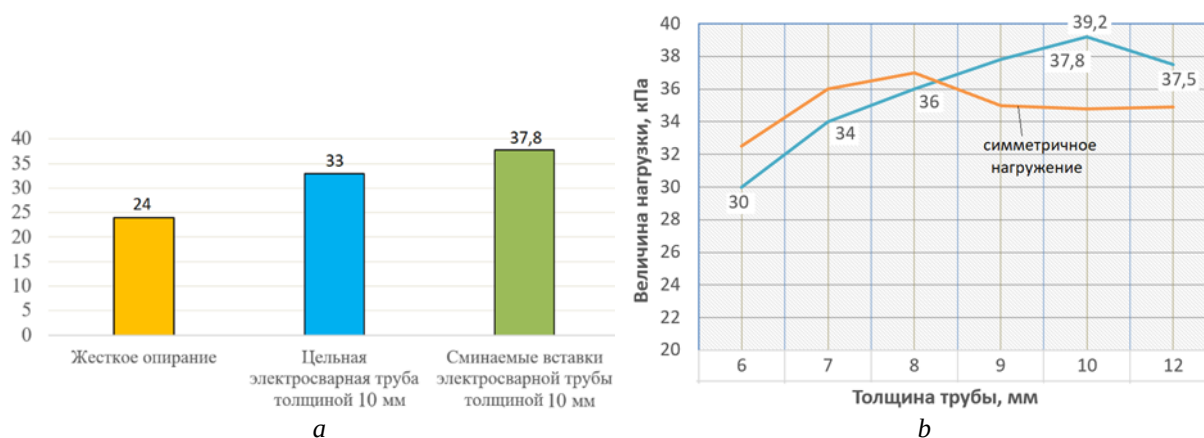


Рис. 6. Результаты оценки предельной динамической нагрузки для кососимметричного импульса и разных податливостей опор (a); характер изменения динамической нагрузки при варьировании толщины трубы в виде вставок (b)

Fig. 6. Results of calculation of the ultimate dynamic load for oblique symmetrical impulse and different support pliability (a); character of dynamic load variation when varying the pipe thickness in the form of inserts (b)

ДИСКУССИЯ

Результаты расчетов и анализ литературы показывают, что на значение предельной динамической нагрузки существенным образом влияют:

- конфигурации сминаемых вставок;
- компоновка узла, в котором установлена демпфирующая опора (ограничение деформаций демпфера);
- учет отверждения опор после фазы пластического деформирования;
- учет возможных предшествующих воздействий на конструкцию, требующий рассмотрения комбинаций особых воздействий [14];
- назначение параметров демпферов с учетом оценки последствий рисков аварийной ситуации [15], которые могут наступить в случае потери несущей конструкцией свойств живучести [16].

То есть вопрос поиска оптимального конструктивного решения так и остался открытым. Представляется, что такую задачу ввиду высокой расчетной трудоемкости можно решить с помощью методов поисковой оптимизации или предсказаний на основе элементов искусственного интеллекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан способ моделирования плит заглубленных сооружений на основе объемных моделей метода конечных элементов. При этом используется подход, позволяющий моделировать распространение импульсной нагрузки по произвольной площади (изменение пятна удара), а также независимое изменение во времени интенсивности импульсной нагрузки на основе суммирования безразмерных временных функций.

2. Подтверждена и обоснована необходимость симметричного армирования конструкций при динамических воздействиях как симметричного, так и несимметричного характера.

3. На примере фиброжелезобетонной плиты заглубленного сооружения показано, что использование пластических свойств опор для поглощения энергии удара позволяет увеличивать несущую способность основной конструкции на 30–35 %. Дальнейшее увеличение несущей способности представляется достижимым с помощью алгоритмов эвристического поиска рациональных податливостей для опор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамразян А.Г. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 29–35.
2. Колчунов В.И., Туен Ву.Н., Нижегородов Д.И. Динамический отклик конструктивной системы здания с конечным числом степеней свободы при особом воздействии // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 10. С. 1337–1345.
3. Сертик И.Н., Курченко Н.С., Алексейцев А.В., Лагутина А.А. Анализ в геометрически, физически и конструктивно нелинейной постановке динамического поведения плоских рам при запроектных воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 49–51.
4. Алексейцев А.В. Анализ устойчивости железобетонной колонны при горизонтальных ударных воздействиях // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 2. № 2. С. 3–12.
5. Чернуха Н.А. Особенности расчета сооружений на взрывные воздействия в среде SCAD // Инженерно-строительный журнал. № 1. 2014. С. 12–22.
6. Белов Н.Н., Кабанцев О.В., Коняев А.А., Копаница Д.Г. и др. Расчет прочности железобетона на ударные нагрузки // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47. № 6 (280). С. 165–173.
7. Radchenko P., Batuev S., Radchenko A. Fracture of Protective Structures from Heavy Reinforcing Cement During Interaction with High-velocity Impactor. Journal of Siberian Federal University // Mathematics & Physics. 2021. No. 14. Pp. 779–786. DOI: 10.17516/1997-1397-2021-14-6-779-786
8. Тонких Г.П., Кумпяк О.Г., Галаяудинов З.Р. Расчет прочности защитных сооружений гражданской обороны на податливых опорах в виде сминаемых вставок кольцевого сечения // Технологии гражданской безопасности. 2020. Т. 17. № 4 (66). С. 94–97.
9. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading // AIP Conference Proceedings. Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists “Advanced Materials in Technology and Construction”. 2016. P. 070006.
10. Алексейцев А.В., Курченко Н.С., Сазонова С.А. Динамика фиброжелезобетонной плиты на податливых опорах при переменной по площади импульсной нагрузке // Строительство и реконструкция. 2022. № 5 (103). С. 23–33.
11. Mkrtychev O.V., Savenkov A.Yu. Modeling of blast effects on underground structure // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2019. No. 15 (4). Pp. 111–122.
12. Alekseytsev A., Sazonova S. Numerical analysis of the buried fiber concrete slabs dynamics under blast loads // Magazine of Civil Engineering. 2023. No. 1 (117). P. 1170.
13. Castedo R., Natale M., López L.M., Sanchidrián J.A. et al. Estimation of Jones-Wilkins-Lee parameters of emulsion explosives using cylinder tests and their numerical validation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 112. Pp. 290–301.
14. Tamrazyan A., Avetisyan L. Comparative analysis of analytical and experimental results of the strength of compressed reinforced concrete columns under special combinations of loads // MATEC Web of Conferences. 5th International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education, IPICSE 2016. 2016. P. 01029.
15. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Эволюционная оптимизация нормально эксплуатируемых железобетонных балочных конструкций с учетом риска аварийных ситуаций // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 9. С. 45–50.
16. Тамразян А.Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 3. № 3. С. 62–74.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G. Calculation of eccentrically compressed reinforced concrete elements under dynamic loading under fire conditions. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 3:29-35.
2. Kolchunov V.I., Tuen Vu.N., Nizhegorodov D.I. Dynamic response of a structural system of a building with a finite number of degrees of freedom under a special impact. *Vestnik MGSU*. 2021; 16(10):1337-1345. (in Russian).
3. Serpik I.N., Kurchenko N.S., Alekseytsev A.V., Lagutina A.A. Analysis in geometrical, physical and constructive nonlinear formulation of dynamic behaviour of plane frames under beyond-design impacts. *Industrial and Civil Engineering*. 2012; 10:49-51.
4. Alekseytsev A.V. Stability analysis of a reinforced concrete column at horizontal impact actions. *Reinforced Concrete Structures*. 2023; 2(2):3-12.
5. Chernukha N.A. Features of calculation of structures for explosive impacts in SCAD environment. *Engineering and Construction Journal*. 2014; 1:12-22.
6. Belov N.N., Kabantsev O.V., Konyaev A.A., Kopanitsa D.G. et al. Calculation of the reinforced concrete strength for the impact loads. *Applied mechanics and technical physics*. 2006; 47: 6(280):165-173. (in Russian).
7. Radchenko P., Batuev S., Radchenko A. Fracture of Protective Structures from Heavy Reinforcing Cement During Interaction with High-velocity Impactor. Journal of Siberian Federal University. *Mathematics & Physics*. 2021; 14:779-786. DOI: 10.17516/1997-1397-2021-14-6-779-786
8. Tonkikh G.P., Kumpiak O.G., Galyautdinov Z.R. Calculation of the strength of civil defence protective structures on the pliable supports in the form of crumpled inserts of the annular section. *Civil Security Technologies*. 2020; 17:4(66):94-97.
9. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading. *AIP Conference Proceedings. Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists "Advanced Materials in Technology and Construction"*. 2016; 070006.
10. Alekseytsev A.V., Kurchenko N.S., Sazonova S.A. Dynamics of a fibre-reinforced concrete slab on the pliable supports under an area-variable impulse load. *Building and reconstruction*. 2022; 5(103):23-33. (in Russian).
11. Mkrtychyev O.V., Savenkov A.Y. Modeling of blast effects on underground structure. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019; 15(4):111-122.
12. Alekseytsev A., Sazonova S. Numerical analysis of the buried fiber concrete slabs dynamics under blast loads. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 1(117):1170.
13. Castedo R., Natale M., López L.M., Sanchidrián J.A. et al. Estimation of Jones-Wilkins-Lee parameters of emulsion explosives using cylinder tests and their numerical validation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018; 112: 290-301.
14. Tamrazyan A., Avetisyan L. Comparative analysis of analytical and experimental results of the strength of compressed reinforced concrete columns under special combinations of loads. *MATEC Web of Conferences. 5th International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education, IPICSE 2016*. 2016; 01029.
15. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Evolutionary Optimization of Normally Operated Reinforced Concrete Beam Structures with Account of Accident Risk. *Industrial and civil engineering*. 2019; 9:45-50.
16. Tamrazyan A.G. Conceptual approaches to the assessment of survivability of building structures, buildings and structures. *Reinforced Concrete Structures*. 2023; 3(3):62-74.