

**АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ІЗ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО  
ВИБУХІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ**

**ANALYSIS OF STUDIES TO INCREASE THE EXPLOSION  
RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE SLABS**

**Коломійчук Г.П., к.т.н., доцент, Майстренко О.Ф., к.т.н., доцент,  
Коломійчук В.Г., аспірант (Одеська державна академія будівництва та  
архітектури, м. Одеса)**

**Kolomiychuk G.P., PhD, associate professor, Maistrenko O.F., PhD,  
associate professor, Kolomiichuk V.G., postgraduate student (Odessa State  
Academy Civil Engineering and Architecture, Odessa)**

*Оскільки вибухова стійкість залізобетонних несучих конструкцій не є абсолютним поняттям і завжди пов'язана з високою вартістю, то для будь-якого підвищення рівня захисту від пошкоджень виникає необхідність використання відповідних інструментів оцінки, щоб із розумним ступенем точності визначати рівень уразливості нових, а також існуючих конструкцій.*

*The significant destructive potential of explosives indicates the need to increase the explosion resistance of civil and industrial infrastructure facilities, taking into account the design of new and modernization of existing buildings and structures.*

*Blast protection is a complex task, involving a large number of parameters that can affect the limit value of the transmitted load and the bearing capacity of reinforced concrete slabs. Mitigation of the effects of the explosion is in the spotlight due to the unstable geopolitical situation. Reinforced concrete slab structures are not designed to withstand explosive loads, and in areas of a possible attack, their sensitive elements require anti-explosion modernization.*

*The need for knowledge of modern design solutions for reinforced concrete slabs, their behavior under the action of a dynamic load in a complex stress-strain state, makes the task of studying, systematizing and developing solutions for practical use urgent.*

*The article studies experimental and theoretical studies of reinforced concrete slabs under the action of the destructive potential of explosives. The mechanisms of damage formation and the behavior of materials of reinforced concrete slabs under the action of high-speed explosive loads are presented.*

*Significant research has been devoted to various types of upgrades to mitigate the effects of an explosion. Structural solutions with the introduction of modern polymeric materials and heavy-duty concretes are in great demand. The high strength-to-weight ratio, corrosion resistance, ease of use, non-stop installation and relatively low maintenance make these solutions attractive for use in production to increase strength and reduce deflection of reinforced concrete slabs. In the course of the tests performed in the near, intermediate or far field of the explosion, the tested reinforced concrete slabs are preferably modified with an external polymer reinforced with glass fiber or carbon fiber in the form of laminates, sheets or slabs.*

*Even if the modified material did not prevent fracture in most of the tests, the contribution to blast resistance was evident in the improvement in the ductility of the test slabs, with a significant reduction in residual displacements and breakage rates.*

*An analysis of the research and development of various innovative materials and intelligent design solutions to improve the structural resistance to explosion of reinforced concrete slabs was carried out. They are compared with the existing reinforced concrete slabs. Conclusions are obtained for use in practical application and subsequent research.*

*Ключові слова: залізобетонні плити, стійкість до вибухів, дослідні моделі, схема тріщин.*

*Keywords: reinforced concrete slabs, explosion resistance, experimental models, scheme of cracks.*

**Вступ.** Необхідність знань інноваційних конструктивних зразків сучасних залізобетонних плит, їх поведінку під дією динамічного навантаження в складному напружено-деформованому стані, робить актуальною задачу вивчення, систематизації та розробки рішень для практичного застосування. Пом'якшення наслідків вибуху знаходиться в центрі уваги через нестабільну геополітичну ситуацію. Конструкції залізобетонних плит не розраховані на витримування вибухового навантаження, а в районах можливого нападу їх чутливі елементи вимагають противибухової модернізації.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Усвідомлення необхідності захисту конструкцій від вибухових навантажень – не нова проблема. Раніше проведено багато досліджень впливу вибухових навантажень на конструкції, насамперед, залізобетонні плити. Найчастіше виконувались експериментальні дослідження з виявлення потенційного пошкодження залізобетонних плит при реальних і змодельованих вибухових навантаженнях для отримання ефективних рішень покращення їх вибухової стійкості з застосуванням модернізації полімерами армованими волокном [1-10]. Актуальним для цих робіт було, зокрема, аналітичне та експериментальне дослідження залізобетонних плит із двосторонньою модернізацією полімерами, армованими волокном, і без неї для різних параметрів, які можуть впливати на граничне значення переданого навантаження і несучу здатність залізобетонних плит.

**Цілі і завдання.** Виконати аналіз досліджень нових розробок інтелектуальних проектних рішень щодо підвищення вибухонебезпечності залізобетонних плит із використанням різноманітних інноваційних матеріалів.

**Основна частина.** В роботі [4] дослідні зразки були випробувані на сталевій рамі (рис. 1). Під час випробування використовувалися кутові

секції, закріплені болтами, щоб ефективно забезпечити утримання вгору проти відскоку плити та зменшити бічний рух. Ефективний проліт плит становив 1800 мм. Опорне кріплення заряду вибухової речовини складалося із трьох секцій труб, як показано на рис. 2. Заряд підвішували до горизонтальної секції за допомогою легкого троса. Заряд був центрований над плитою за допомогою чотирьох напрямних струн. Дані були записані за допомогою датчика лінійного змінного зміщення (LVDT), датчиків тиску та високошвидкісної камери. Для запису історії зсуву в центрі кожної плити було встановлено LVDT з максимальним діапазоном 250 мм, частота дискретизації становила 10 кГц. Датчики тиску використовувалися для вимірювання тиску повітряного вибуху як у центрі зразка (PT1), так і біля однієї опори (PT2). Тиск вибуху вище 6,9 МПа не реєстрували, оскільки перетворювачі були вилучені, щоб уникнути пошкодження при більш високих тисках. Датчики тиску мали частоту дискретизації 2 МГц. Для запису кожного експерименту використовувалася високошвидкісна камера, яка знімала 2000 кадрів в секунду.



Рис. 1. Сталева рама для закріплення моделей залізобетонних плит

Орієнтація заряду може суттєво впливати на піковий надлишковий тиск та імпульс. Для циліндричних зарядів піковий надлишковий тиск та імпульс залежать від місць детонації. Для низьких відношень довжини до діаметру більше енергії спрямовується в осьовому напрямку, а для високих відношень довжини до діаметру більше енергії спрямовується в радіальному напрямку.

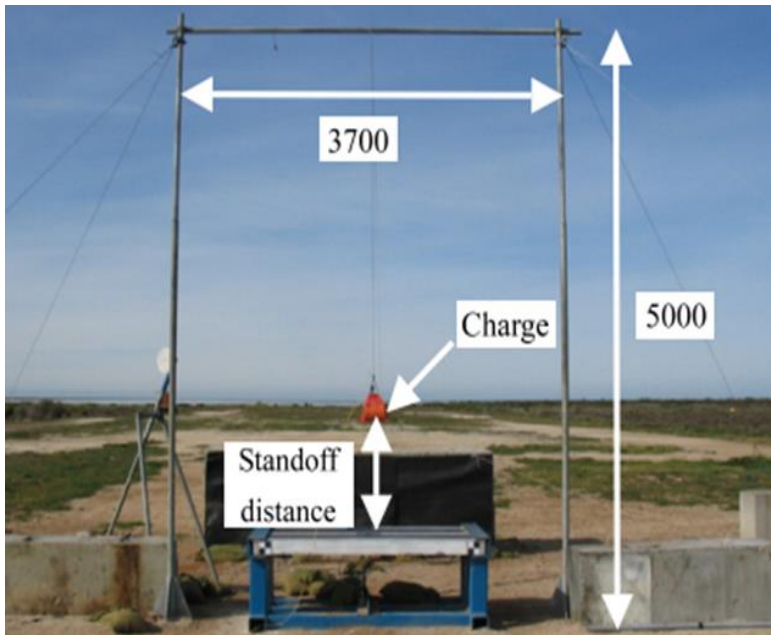


Рис. 2. Опорне кріплення заряду вибухової речовини

Звичайна залізобетонна плита NRC-3 була випробувана на вибух від заряду вагою 3,4 кг, розташованого над нею на висі 93 см. Спостерігалися дрібні тріщини незначної залишкової ширини, але малоімовірно, що момент плинності в плиті був досягнутий. Після того, як плита NRC-4 була випробувана на вибух від заряду вагою 8 кг, розташованого над нею на висі 75 см, по довжині плити з'явилися тріщини, які мали значну глибину та кількість. Тріщин біля опор не було.

Модернізована звичайна плита PET-2 двома пластинами з полімеру, армованого скловолоком, товщиною 2,8 мм на стиснутій поверхні. Зразок PET-2 піддавався вибуху вагою 5 кг на відстані 92 см. Отримані пошкодження показані на рис. 3, який включає тріщини, пов'язані з вигином і зсувом (виділено після випробування), а також відклеюванням ламінату FRP (рис. 4). Подрібнення бетону не спостерігалося.

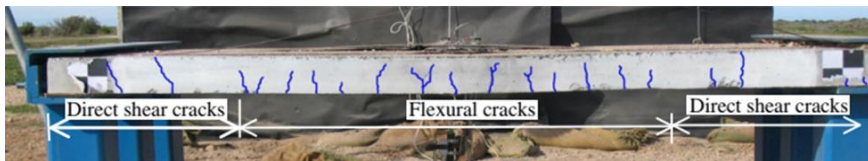


Рис. 3. Візерунки тріщин в бетоні плити PET-2

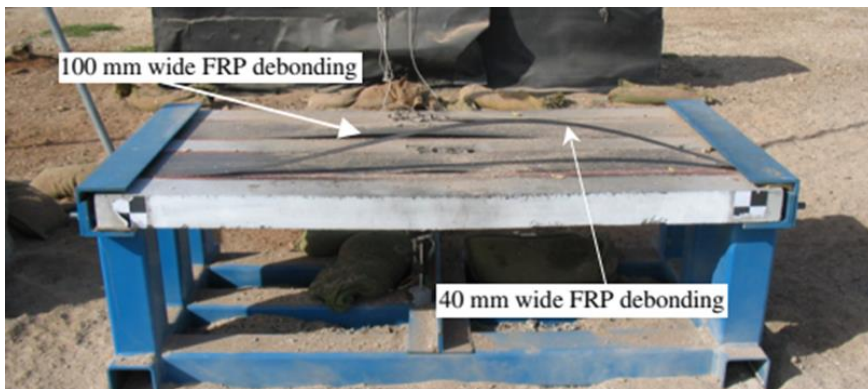


Рис. 4. Відклеювання пластин з полімеру, армованого скловолоконном

В плиті PET-2 виникло роз'єднання між верхнім і нижнім шарами FRP. Одна пластина шириною 100 мм відклеєна на центральній лінії плити, а одна пластина шириною 40 мм відклеєна по довжині плити. Відшарування відбулося між смугами FRP, а не на межі розділу FRP-бетон. При швидкому навантаженні в зонах зосереджених навантажень (реакцій) можуть утворюватися тріщини прямого зсуву. Прямі зсувні руйнування виключають розвиток міцності плити на вигин і є небажаними, хоча, ймовірно, немінучими для зарядів ближнього поля.

Проста фібробетонна плита UHPFC надвисокої продуктивності витримала вагу заряду 3,4 кг на відстань до заряду вибухової речовини 0,5 м. В плиті спостерігалось лише розтріскування при вигині в середині і чвертях, як показано на рис. 5. LVDT зафіксував постійний прогин 4,1 мм. Це випробування підтвердило значну здатність фібробетону надвисокої продуктивності протистояти вибуховим навантаженням.



Рис. 5. Візерунки тріщин в бетоні плити UHPFC

Армована фібробетонна плита надвисокої продуктивності RUHPFC піддавалася сильному вибуховому навантаженню з масою заряду 20 кг і відстанню 0,37 м. Роздавлення бетону спостерігалося в області утворення шарніру приблизно в центрі прольоту, як показано на рис. 6. Весь процес спостереження за прогином вибуху не був виконаний повністю, оскільки LVDT було зруйновано під час випробування, але максимальний зареєстрований прогин перевищив 100 мм. Корисність високоякісного фібробетону для стійкості до вибухів була додатково підтверджена цим великим навантаженням від вибуху на невеликій відстані протистояння.



Рис. 6. Руїнування фібробетонної армованої плити RUHPFC

В роботі [1] використані односторонні залізобетонні квадратні плити з номінальними розмірами 1200×1200×90 мм. Плити спиралися на дві сталеві балки з відстанню між центрами опор 1048 мм. Різні матеріали та схеми модернізації були досліджені проти вибухових навантажень, що знаходяться поза площиною.

Посилаючись на таблицю 1, чотири односторонні залізобетонні плити були побудовані та зміцнені за різними схемами та двома різними композитними матеріалами, такими як полімери, армовані вуглеволокном (CFRP) і полімери, армовані сталевими волокнами (SRP). За винятком контрольної плити (тобто 1A), дві плити (тобто 2A і 2B) були зміцнені листами CFRP, а дві інші плити (тобто 3A і 3B) були зміцнені листами SRP. Товщина листів CFRP і SRP становила 0,165 мм і 1,32 мм, відповідно. Листи містили лише односпрямовані волокна, які були встановлені по всій поперечній ширині плит і закінчувалися на відстані 152 мм від торців плит.

Таблиця 1

Експериментальна тестова матриця

Постріл №	Плита №	Схема зміцнення	Відстань проти-стояння (мм)	Вага заряду, гексоген (кг)
1	1А	не має	910	0,45
2	1А	не має	300	0,90
3	2А	CFRP (1 сторона)	300	1,35
4	2В	CFRP (2 сторони)	300	1,35
5	3А	SRP (1 сторона)	300	1,35
6	3В	SRP (2 сторони)	300	1,35

У той час, як плити 2А і 3А зміцнювали тільки з боку натягу (нижня сторона), плити 2В і 3В укріплювали з обох сторін. Зміцнення з обох боків було здійснено для оцінки впливу негативних моментів, які можуть розвиватися при динамічних навантаженнях, на вибухонепроникність залізобетонних плит.

Заряд підвішували над зразками, що випробовувалися, на певну відстань за допомогою дроту, який також використовувався як провідний контур для розпалювання заряду.

Усі плити були армовані трьома сталевими прутками діаметром 9,5 мм у кожному напрямку, коефіцієнт армування при цьому становить 0,18%. Цей коефіцієнт підкріплення було обрано, оскільки потужність плит необхідно контролювати в межах максимально можливої ваги зарядів, які можна було б використовувати всередині експериментальної шахти UMR, перш ніж завдати шкоди самій шахті.

Усі п'ять плит були відлиті з бетону з міцністю 27,6 МПа, а межа текучості внутрішньої арматури становила 414 МПа з модулем пружності 200 ГПа. Листи CFRP та SRP продемонстрували пружну поведінку до граничної міцності на розрив, яка становила 3792 МПа та 514 МПа, а модуль пружності становив 228 ГПа та 36 ГПа, відповідно.

Важливо підкреслити, що, оскільки ці випробування проводилися при реальних вибухових навантаженнях [1], під час випробувань не допускалося підключати ні тензодатчики до дослідних зразків, ні прилади для вимірювання переміщення. Це було зроблено, щоб уникнути пошкодження будь-яких приладів, які використовувалися під час тестування. Таким чином, в описі результатів випробувань наводяться лише візуальні перевірки та вимірювання після випробування щодо ширини залишкової тріщини та деформацій плити.

Плита 1А, постріл №1. Уважний огляд показав, що на нижній стороні плити було видно лише незначні тріщини. Це вказує на те, що вага заряду була передбачена з розумним ступенем точності, оскільки

спостережуваний рівень пошкодження добре корелював із прогнозованим рівнем пошкодження.

Плита 1А, постріл №2. Була зафіксована велика тріщина вздовж центру плити з виміряною максимальною шириною 3 мм. Крім того, залишкове зміщення в центрі плити було виміряно на рівні 21 мм, а залишкове зміщення в середній точці вздовж краю було виміряно на рівні 11 мм. Припускаючи, що залишковий зсув змінюється лінійно від центру до країв плити, середнє залишкове зміщення було розраховано на рівні майже 14 мм.

Плита 2А, постріл №3. Збільшення тиску майже на 16% у порівнянні з попереднім пострілом № 2. Хоча застосований тиск не був значним, ця плита була серйозно пошкоджена під цим зарядом вибухової речовини, та жодну залишкову деформацію або ширину тріщини не можна було реально виміряти для цієї плити. Порівнюючи результати з плитами 1В і 2А, незначна зміна тиску призвела до значної зміни рівня пошкоджень.

Плита 2В, постріл №4. В центрі плити не було значних тріщин при вигині, що відповідало прогнозованим рівням пошкоджень для модернізованих плит. Однак, біля опор спостерігалися лише дві великі тріщини зсуву, і майбутні дослідження також мають розглянути зрушення зсуву залізобетонних плит під впливом вибухових навантажень. Ці результати показують, що негативні моменти, які розвиваються в динаміці вибухових навантажень, можуть бути значними, і зміцнення з обох сторін рекомендується для підвищення опору залізобетонних елементів при вибухових навантаженнях, коли ці навантаження близькі до граничних. Крім того, ніяких значних залишкових деформацій або розміри ширини тріщин не змогли виміряти для цієї плити.

Плита 3А, постріл №5. Плита також зазнала значних пошкоджень під дією вибухівки. Цей результат ще раз вказує на те, що плити, модернізовані листами SRP лише з одного боку, також не були достатніми для збільшення вибухонепроникності плит для даного рівня загрози, але спостережувані рівні пошкоджень знаходяться в межах передбачених рівнів пошкодження або кінцевих умов.

Плита 3В, постріл №6. Як і в плиті 2В, біля опор також спостерігалися дві великі тріщини зсуву, і значних тріщин при згині не зафіксовано. Ці результати майже ідентичні тим, що спостерігалися для плити 2В, що вказує на те, що модернізація з використанням композитів SRP була виконана так само, як і плити, модернізованої більш традиційним композитом CFRP. Таким чином, результати випробувань чітко показують, що ця нова економічно ефективна технологія SRP показала великий потенціал для підвищення стійкості бетонних елементів до вибуху.

**Висновки і перспективи досліджень.** Виконаний аналіз результатів експериментальних досліджень поведінки моделей залізобетонних плит



під дією вибухових речовин різної ваги, з різної відстані від моделі. Випробування показали, що фібробетонна плита UHPFC зазнала менше пошкоджень, ніж традиційні плити. Ефективність армованої фібробетонної плити RUHPFC перевершила всі інші типи плит. Адгезійне склеювання зовнішньої пластини з FRP до стискаючої поверхні залізобетонної плити NRC покращило її стійкість до вибухів, але відсоток покращення не визначений кількісно, оскільки не було можливості перевірити момент початкового руйнування через вихід із ладу приладів від дії вибуху.

Можна зробити висновок, що розглянута досить складна проблема, яка є актуальною і потребує подальшого вивчення.

### **References**

1. Silva, P. F., & Lu, B. (2007). Improving the blast resistance capacity of RC slabs with innovative composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 38(5-6), 523–534. doi: 10.1016/j.compositesb.2006.06.015.
2. Silva, P. F., & Lu, B. (2009). Blast Resistance Capacity of Reinforced Concrete Slabs. *Journal of Structural Engineering*, 135(6), 708–716. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541x.0000011.
3. Draganić, H., Gazić, G., Lukić, S., & Jeleč, M. (2021). Experimental investigation on blast load resistance of reinforced concrete slabs retrofitted with epoxy resin impregnated glass fiber textiles. *Composite Structures*, 274, 114349. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114349.
4. Wu, C., Oehlers, D. J., Rebentrost, M., Leach, J., & Whittaker, A. S. (2009). Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs. *Engineering Structures*, 31(9), 2060–2069. doi: 10.1016/j.engstruct.2009.03.020.
5. Orton, S. L., Chiarito, V. P., Minor, J. K., & Coleman, T. G. (2014). Experimental Testing of CFRP-Strengthened Reinforced Concrete Slab Elements Loaded by Close-In Blast. *Journal of Structural Engineering*, 140(2), 04013060. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541x.0000821.
6. Tanapornraweekit, G., Haritos, N., & Mendis, P. (2011). Behavior of FRP-RC Slabs under Multiple Independent Air Blasts. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 25(5), 433–440. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000191.
7. Nam, J., Kim, H., & Kim, G. (2017). Experimental Investigation on the Blast Resistance of Fiber-Reinforced Cementitious Composite Panels Subjected to Contact Explosions. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(1), 29–43. doi:10.1007/s40069-016-0179-y.
8. Li, J., Wu, C., Hao, H., Su, Y., & Liu, Z. (2016). Blast resistance of concrete slab reinforced with high performance fibre material. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 1(2), 51–59. doi:10.1080/24705314.2016.1179496.
9. Wang, W., Zhang, D., Lu, F., Wang, S.-C., & Tang, F. (2012). Experimental study on scaling the explosion resistance of a one-way square reinforced concrete slab under a close-in blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 49, 158–164. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2012.03.010.
10. Thiagarajan, G., Kadambi, A. V., Robert, S., & Johnson, C. F. (2015). Experimental and finite element analysis of doubly reinforced concrete slabs subjected to

blast loads. *International Journal of Impact Engineering*, 75, 162–173. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2014.07.018.

### **Список використаних джерел**

1. Silva, P. F., & Lu, B. (2007). Improving the blast resistance capacity of RC slabs with innovative composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 38(5-6), 523–534. doi: 10.1016/j.compositesb.2006.06.015.

2. Silva, P. F., & Lu, B. (2009). Blast Resistance Capacity of Reinforced Concrete Slabs. *Journal of Structural Engineering*, 135(6), 708–716. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541x.0000011.

3. Draganić, H., Gazić, G., Lukić, S., & Jeleč, M. (2021). Experimental investigation on blast load resistance of reinforced concrete slabs retrofitted with epoxy resin impregnated glass fiber textiles. *Composite Structures*, 274, 114349. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114349.

4. Wu, C., Oehlers, D. J., Rebentrost, M., Leach, J., & Whittaker, A. S. (2009). Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs. *Engineering Structures*, 31(9), 2060–2069. doi: 10.1016/j.engstruct.2009.03.020.

5. Orton, S. L., Chiarito, V. P., Minor, J. K., & Coleman, T. G. (2014). Experimental Testing of CFRP-Strengthened Reinforced Concrete Slab Elements Loaded by Close-In Blast. *Journal of Structural Engineering*, 140(2), 04013060. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541x.0000821.

6. Tanapornraweekit, G., Haritos, N., & Mendis, P. (2011). Behavior of FRP-RC Slabs under Multiple Independent Air Blasts. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 25(5), 433–440. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000191.

7. Nam, J., Kim, H., & Kim, G. (2017). Experimental Investigation on the Blast Resistance of Fiber-Reinforced Cementitious Composite Panels Subjected to Contact Explosions. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(1), 29–43. doi:10.1007/s40069-016-0179-y.

8. Li, J., Wu, C., Hao, H., Su, Y., & Liu, Z. (2016). Blast resistance of concrete slab reinforced with high performance fibre material. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 1(2), 51–59. doi:10.1080/24705314.2016.1179496.

9. Wang, W., Zhang, D., Lu, F., Wang, S.-C., & Tang, F. (2012). Experimental study on scaling the explosion resistance of a one-way square reinforced concrete slab under a close-in blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 49, 158–164. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2012.03.010.

10. Thiagarajan, G., Kadambi, A. V., Robert, S., & Johnson, C. F. (2015). Experimental and finite element analysis of doubly reinforced concrete slabs subjected to blast loads. *International Journal of Impact Engineering*, 75, 162–173. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2014.07.018.