

MÔ PHỎNG BÀI TOÁN VA CHẠM KHỐI CÁT KHÁNG CHẤN BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

ThS. Hồ Sỹ Tâm - ĐH Kanazawa, Nhật Bản

GS.TS. Masuya Hiroshi - ĐH Kanazawa, Nhật Bản

PGS. TS. Nguyễn Cảnh Thái - ĐH Thủy lợi

Tóm tắt: Bài báo nghiên cứu sử dụng phương pháp PTHH mô phỏng quá trình va chạm của một vật rơi hình cầu vào khối cát hình lập phương dùng trong bộ phận kháng chấn của các kết cấu bảo vệ đá rơi. Khối cát được nghiên cứu chịu va chạm bởi vật rơi từ độ cao khác nhau, với hai loại điều kiện biên hông (biến dạng hông tự do FD và biến dạng hông hạn chế bởi vật liệu cùng loại MC). Kết quả nghiên cứu được kiểm định bằng cách so sánh với thí nghiệm mô hình vật lý tương đương. Một số nhận xét và kết luận về tính chính xác của mô hình và sự ảnh hưởng chiều cao đá rơi đến đặc điểm va chạm đã được rút ra.

1. Tổng quan

Đá rơi là thảm họa tự nhiên diễn ra thường xuyên ở vùng núi, mặc dù khối lượng của nó không lớn khi so sánh với trượt đất, trượt đá và tuyết lở. Tuy nhiên, với tần suất xảy ra thường xuyên, quãng đường dịch chuyển dài và đặc biệt là rơi tự do từ độ cao lớn nên nó gây ra các tác động khó lường cùng với năng lượng va chạm lớn. Các đối tượng chịu tác động mạnh mẽ của thảm họa đá rơi là cơ sở hạ tầng như đường giao thông, đường sắt, hệ thống cung cấp và truyền tải điện, nhà máy thủy điện... và đặc biệt là các công trình xây dựng và tính mạng người dân sống bên cạnh sườn núi.

Để giảm thiểu các tác động do đá rơi gây ra, hiện nay trên thế giới thường dùng phổ biến các loại công trình như hàng rào, lưới, tường, đê và đường hầm. Các loại công trình này hoặc là bản thân có khả năng hấp thụ năng lượng va chạm hoặc được bố trí thêm các bộ phận có khả năng hấp thụ và triệt tiêu năng lượng do va chạm gây ra. Với các loại công trình vững chắc như tường bê tông cốt thép, đường hầm hoặc hành lang thì cát là loại vật liệu phổ biến làm thiết bị kháng chấn.

Cát là vật liệu hạt rời có khả năng hấp thụ năng lượng nhờ biến dạng khá tốt, ma sát giữa các hạt cát cũng là một lợi thế giúp cho việc tiêu tán năng lượng một cách hiệu quả. Tuy nhiên, do tính chất rời rạc nên sẽ khó khăn khi thi công và sửa chữa công trình, đặc biệt là cho tường chắn, đê và lưới. Vì vậy, một số công trình nghiên cứu và dự án thực tế đã áp

dụng khối cát bọc trong bao vải địa kỹ thuật và khung lưới thép (thường gọi là sand-cell hoặc geo-cell) để làm thiết bị hấp thụ năng lượng va chạm.

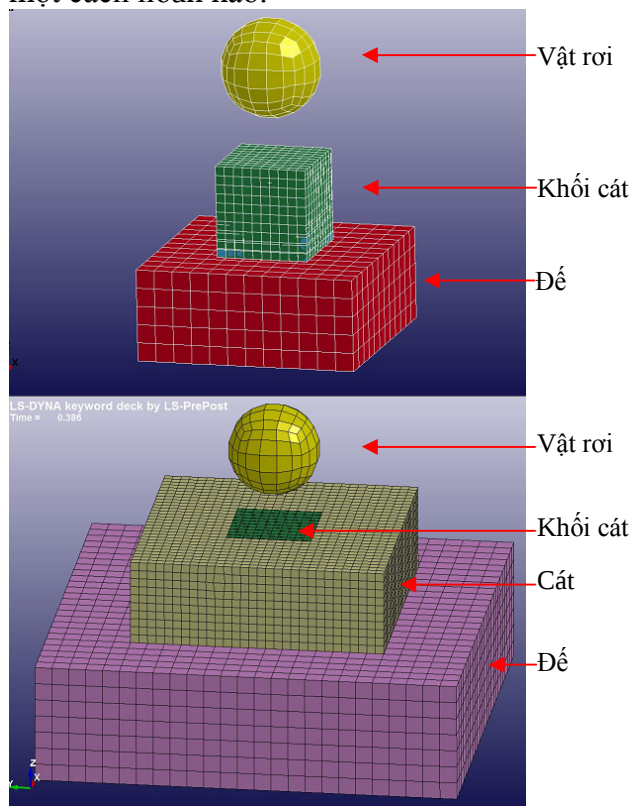
Mục tiêu của nghiên cứu này là mô phỏng động một thí nghiệm vật lý về va chạm của một vật rơi vào một khối cát bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH), đồng thời khảo sát đặc điểm va chạm của các đối tượng này khi thay đổi chiều cao rơi tự do. Nghiên cứu còn khảo sát ảnh hưởng của biến dạng nở hông của khối cát tới các thông số của bài toán va chạm. Sự tương thích của việc so sánh kết quả thí nghiệm và kết quả mô phỏng bằng phương pháp số thể hiện độ tin cậy của mô hình nghiên cứu. Ngoài ra, tác giả tiến hành khảo sát ảnh hưởng của chiều cao vật rơi tới đặc trưng va chạm vào khối cát kháng chấn.

2. Một vài nét về các nghiên cứu thí nghiệm mô hình vật lý và mô phỏng phương pháp liên quan

Do có các tính năng nổi trội như đã nói trên nên cát được các nhà khoa học và các kỹ sư thiết kế quan tâm nghiên cứu và áp dụng trong các dự án thực tế. Một số nhóm nghiên cứu đã tiến hành các thí nghiệm với nhiều quy mô khác nhau. Đầu tiên phải kể đến các nghiên cứu cơ bản về các thuộc tính của cát và các vật liệu liên quan như là: các nghiên cứu nén tĩnh để khảo sát ứng xử cơ học và độ bền của khối địa kỹ thuật được đổ đầy cát hoặc cát và các chất độn khác như cao su, xốp...^{1), 2)}; các nghiên cứu về ứng xử cơ học của rọ thép tạo khung cho geo-cell^{2), 3)}. Lambert và nhóm

nghiên cứu⁴⁾ đã tiến hành một loạt các thí nghiệm khảo sát đặc tính va chạm vào khối địa kỹ thuật với các vật liệu bên trong khác nhau như đá, cát và hỗn hợp cát với mạt cao su lốp xe. Trong thí nghiệm này năng lượng va chạm được tạo ra bằng cách thả rơi tự do một vật nặng từ một độ cao nhất định. Thí nghiệm cũng khảo sát hai loại điều kiện biên của khối địa kỹ thuật: biến dạng tự do (FD) và có xét đến ảnh hưởng của các khối bên cạnh có cùng dạng vật liệu (MC). Sau các nghiên cứu thí nghiệm của các bài toán có quy mô nhỏ trong phòng thí nghiệm, một loạt các thí nghiệm hiện trường với mô hình 1/2 hoặc 1/1 đã được thực hiện. Lambert⁵⁾, Bourrier⁶⁾ và Heyman^{7), 10)} đã tiến hành nghiên cứu thí nghiệm với các quy mô nói trên với các loại công trình bảo vệ đá rơi là tường và dề.

Các nghiên cứu thí nghiệm mô hình vật lý sẽ dễ dàng tiếp cận với thực tế điều kiện biên của bài toán hơn, khả năng thuyết phục và độ tin cậy sẽ cao hơn nhưng sẽ tốn kém thời gian và tiền bạc. Để hạn chế những nhược điểm này, cách tiếp cận bằng mô phỏng số học sẽ là sự lựa chọn để bổ sung cho thí nghiệm vật lý một cách hoàn hảo.



Hình 1. Mô hình PTHH

Hiện nay có hai phương pháp phổ biến được các nhà khoa học lựa chọn cho việc mô phỏng các bài toán va chạm là phương pháp phần tử rời rạc (Discrete Element Method - DEM) và phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM). Đối với các loại vật liệu có thành phần hạt khá lớn như đá, phương pháp DEM sẽ là sự lựa chọn thích hợp^{8),9)}. Tuy nhiên phương pháp rời rạc không xét được các kết cấu chính khác như tường, đường hầm.... Chính vì vậy, nếu phương pháp phần tử hữu hạn, với một mô hình vật liệu phù hợp cho phần kháng chấn thì hứa hẹn sẽ giải quyết nhiều vấn đề mang tính tổng thể (cả lớp kháng chấn và kết cấu chính) của bài toán va chạm.

Từ các đánh giá trên đây, tác giả lựa chọn chương trình tính toán động LS-DYNA dựa trên phương pháp FEM và thuật toán hiện để mô phỏng thí nghiệm va chạm vào khối cát kháng chấn (Hình 1). Mô hình bao gồm một vật rơi hình tròn có đường kính 54 cm bằng bê tông vỏ thép. Khối cát hình lập phương có cạnh 50 cm, được tạo hình bằng lưới thép hình lục lăng, vải địa kỹ thuật được dùng như túi chứa cát. Khối cát được đặt trên tấm bê tông cốt thép dày 70 cm (tượng trưng cho kết cấu chính phía sau lớp kháng chấn). Với điều kiện biên dạng tự do (FD) cho khối cát, khối bê tông có dạng hình vuông trên mặt chiếu bằng với kích thước mỗi cạnh là 120 cm. Với điều kiện biên bị hạn chế bởi vật liệu cát xung quanh (MC), kích thước mỗi cạnh của tấm bê tông là 210 cm. Khối bê tông được đặt trên 4 gối đỡ là các cảm biến tải trọng (load cell) dùng để đo lực chuyển tiếp. Lực va chạm được tạo ra bằng cách thả vật rơi tự do từ độ cao 5,3 m.

3. Mô phỏng va chạm bằng phương pháp phần tử hữu hạn

a. Các thông số tính toán

Trong phạm vi bài báo này, bộ phận quan trọng nhất ảnh hưởng lớn đến kết quả tính toán là khối cát, chính vì vậy nhóm tác giả đã tiến hành các nghiên cứu về ảnh hưởng của thông số cơ bản của vật liệu cát tới ứng xử va chạm. Các thông số được giới thiệu dưới đây (bảng 1) đã được nghiên cứu kỹ mà trong

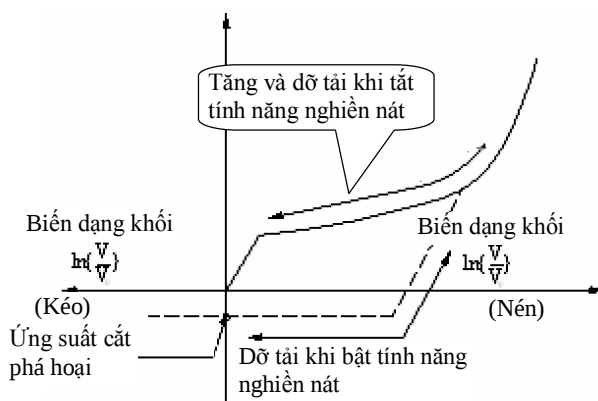
phạm vi bài báo này không thể giới thiệu hết được. Với bài toán mô phỏng va chạm vào cát, các thông số tính toán cần thiết bao gồm mô đun cắt, mô đun đàn hồi khối, trọng lượng riêng, hệ số Poisson, góc ma sát trong, lực dính và đặc biệt là quan hệ ứng suất biến dạng. Các thông số khác của vải địa kỹ thuật được xác định dựa trên kết quả thí nghiệm kéo tĩnh. Lưới thép bọc ngoài khối cát có tác dụng tạo khung hình khối lập phương, ít ảnh hưởng đến kết quả va chạm nên được đơn giản hóa. Các thông số tính toán khác của vật rơi và khối đỡ bê tông được mặc định phù hợp với vật liệu bê tông.

Bảng 1. Các thông số cơ bản tính toán

Thông số	Đơn vị	Giá trị
Trọng lượng riêng (ρ)	kg/m ³	1680
Hệ số poisson (ν)	-	0,35
Mô đun cắt (G)	N/m ²	2,08E+07
Mô đun bulk (K)	N/m ²	6,27E+08
Góc ma sát trong (φ)	Độ	32,50
Lực dính đơn vị (c)	N/m ²	100,00

Bảng 2. Quan hệ ứng suất biến dạng của vật liệu cát

TT	Ứng suất P (N/m ²)	Biến dạng ln(V/V ₀)	TT	Ứng suất P (N/m ²)	Biến dạng ln(V/V ₀)
1	0,00	0,000	6	0,060	2,02x10 ⁶
2	2,05x10 ⁵	0,020	7	0,065	2,38x10 ⁶
3	4,85x10 ⁵	0,030	8	0,070	2,77x10 ⁶
4	8,81x10 ⁵	0,040	9	0,075	3,19x10 ⁶
5	1,40x10 ⁶	0,050	10	0,080	3,63x10 ⁶



Hình 2. Đường đặc tính cơ bản của cát

b. Các mô hình vật liệu cơ bản

Mô hình được mô phỏng bởi phần mềm mô phỏng động ba chiều LS-DYNA theo phương pháp PTHH, thuật toán hiện. Các mô hình vật liệu được lựa chọn phù hợp với tích chất của

từng bộ phận. Mô hình vật liệu đàn hồi tuyến tính đơn giản được dùng để mô phỏng các bộ phận như túi, vật rơi và đế bê tông. Riêng với cát, qua thực tế các nghiên cứu liên quan đều đánh giá đây là loại vật liệu phức tạp, đặc biệt là khi mô phỏng bằng phương pháp PTHH. Chính vì vậy, nhóm tác giả lựa chọn mô hình vật liệu đất và xốp dễ vỡ có kể đến phá hoại. Wang Z. L.¹⁰⁾ đã sử dụng mô hình này để mô phỏng giảm nhẹ ảnh hưởng của lớp địa kỹ thuật tới xốp tới sóng ứng suất với nhiều bộ thông số vật liệu khác nhau. Mô hình này được giới thiệu lần đầu bởi Krieg (1972)¹¹⁾ dựa trên tiêu chuẩn phá hoại Drucker-Prager. Hình 2 và bảng 2 giới thiệu đường đặc tính cơ bản của mô hình MAT_SOIL_AND_FOAM của LS-DYNA¹²⁾ với hai lựa chọn cho quá trình tăng tải và dỡ tải. Do hình dạng khối cát là hình lập phương nên để tiện cho việc mô phỏng thì phần tử hình khối chữ nhật sẽ được sử dụng.

Túi cát đóng vai trò như một vật chứa cát, đồng thời cũng hấp thu một phần năng lượng va chạm. Trong bài báo này, phần tử tấm vỏ và mô hình vật liệu vải (Fabric) sẽ được lựa chọn mô phỏng túi cát địa kỹ thuật. Phần tử khối chữ nhật và vật liệu đàn hồi tuyến tính được dùng để mô phỏng vật rơi và khối đỡ bê tông.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm

Trường hợp thí nghiệm	F_{im}^{max} (kN)	F_{tr}^{max} (kN)	T_{im} ms	p_{max} (cm)	I_{im} kN.s
FD_5,3m_Exp.	90	128	52	20	2,99
MC_5,3m_Exp.	130	226	30	11	2,64

Bảng 4. Kết quả mô phỏng bằng PTHH

Trường hợp tính toán	F_{im}^{max} (kN)	F_{tr}^{max} (kN)	T_{im} (ms)	p_{max} (cm)	I (kN.s)
FD_3,0m_FEM	58	93	65	0,31	2,24
FD_5,3m_FEM	89	140	58	0,35	3,09
FD_7,5m_FEM	105	179	55	0,38	3,64
FD_10m_FEM	111	193	65	0,40	4,17
MC_3,0m_FEM	68	157	40	0,17	1,99
MC_5,3m_FEM	102	251	36	0,20	2,73
MC_7,5m_FEM	112	312	47	0,25	3,36
MC_10m_FEM	120	360	61	0,32	3,98

4. Kết quả tính toán và phân tích

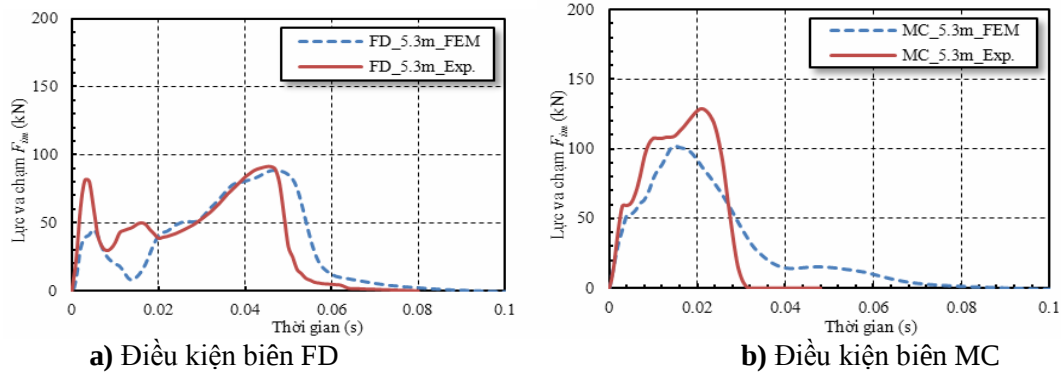
a. So sánh kết quả mô phỏng và kết quả thí nghiệm

Bảng 3 và 4 cùng với các hình 3 – 5 thể hiện kết quả tính toán mô hình và kết quả thí

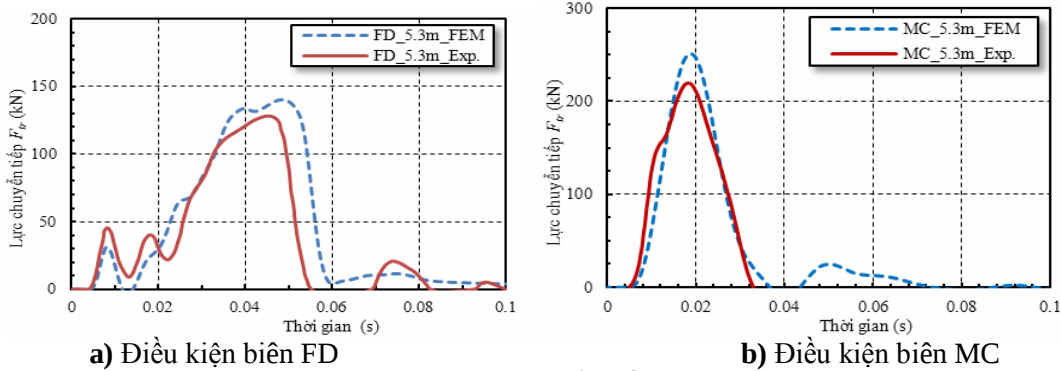
nghiệm. Đường nét đứt và ký hiệu FEM thể hiện kết quả mô hình số còn đường nét liền và ký hiệu Exp thể hiện kết quả thí nghiệm, F_{im} thể hiện lực va chạm, F_{tr} thể hiện lực chuyển tiếp, p ký hiệu độ đâm xuyên. Dưới đây là các

đánh giá qua so sánh các kết quả có được này:

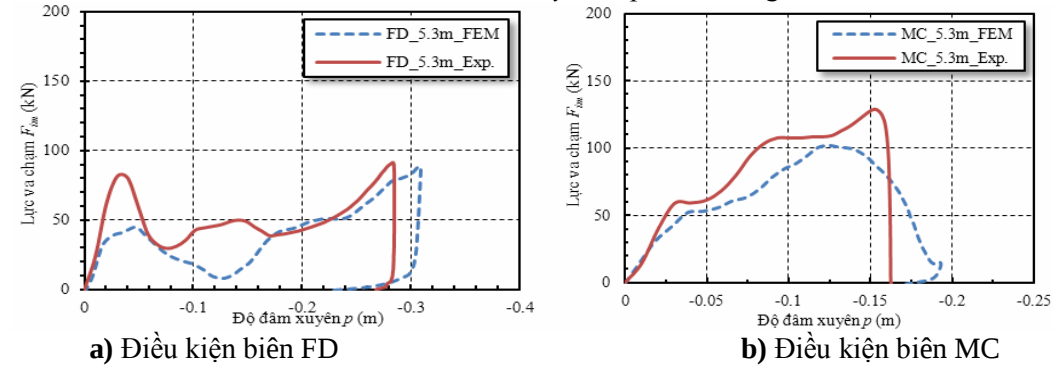
1) Kết quả tính toán mô hình theo phương pháp PTHH có độ tương thích cao so với kết quả thí nghiệm. Sai số lớn nhất ở một số thông số chỉ khoảng dưới 20%.



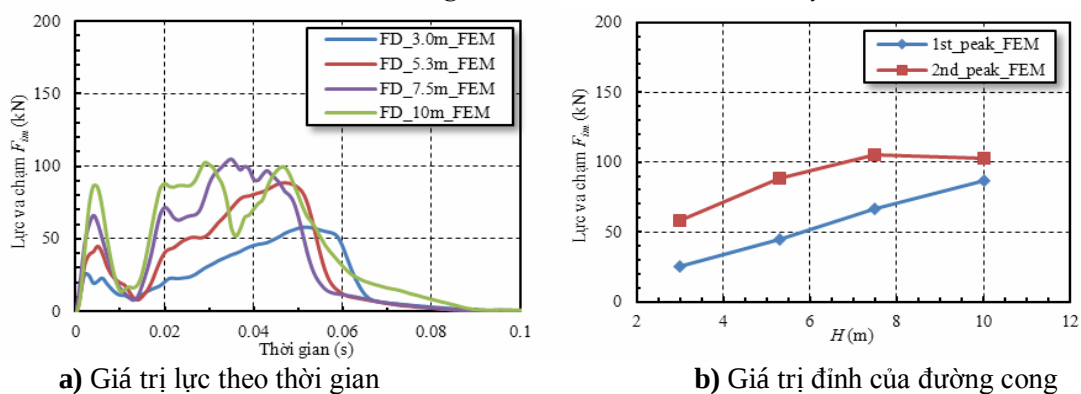
Hình 3. Quan hệ lực va chạm theo thời gian



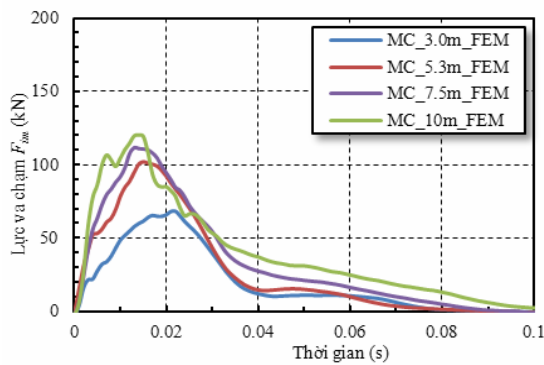
Hình 4. Quan hệ lực chuyển tiếp theo thời gian



Hình 5. Quan hệ giữa lực va chạm và độ đâm xuyên



Hình 6. Lực va chạm trong điều kiện biên FD với các chiều cao rơi khác nhau



Hình 7. Lực va chạm (biên MC)

2) Hình 3a cho thấy giá trị cực đại và thời gian va chạm trong điều kiện biên FD là gần như xấp xỉ nhau. Tuy nhiên, kết quả thí nghiệm cho thấy vào khoảng 2 ms lực va chạm tăng lên cao (khoảng 80 kN) sau đó nhanh chóng giảm xuống trước khi đạt đỉnh. Kết quả mô phỏng tại thời điểm này chỉ đạt $\frac{1}{2}$ so với thí nghiệm.

3) Hình 3b thể hiện lực va chạm trong điều kiện MC, kết quả thí nghiệm cho lực va chạm cao hơn khoảng 20% so với kết quả mô phỏng. Lực va chạm của thí nghiệm đạt đỉnh và kết thúc rất nhanh sau đó ở khoảng 30 ms, ngược lại, quá trình này từ mô hình số được kéo dài hơn rất nhiều.

4) Hình 4 thể hiện lịch sử lực chuyển tiếp thu được từ bốn gối đỡ dưới bề bê tông trong cả hai điều kiện biên FD và MC. Giá trị lớn nhất thu được từ mô phỏng lớn hơn kết quả thí nghiệm khoảng 3-5%. Với điều kiện biên FD, thời gian duy trì lực chuyển tiếp trong mô hình số dài hơn thí nghiệm khoảng 5 ms trong khi với điều kiện biên MC, kết quả này gần như trùng khớp.

5) Quan hệ giữa lực va chạm và độ đâm xuyên của vật rơi vào khối cát được trình bày trên hình 5. Từ đây, dễ dàng nhận ra sự khác và giống nhau về lực va chạm như đã phân tích ở trên. Ngoài ra, nó cũng thể hiện sự khác nhau và giống nhau về giá trị cực đại của độ đâm xuyên cũng như quan hệ giữa lực va chạm và vị trí của vật rơi trên khối cát. Thường thì giá trị cực đại của lực va chạm đạt được tương ứng với độ đâm xuyên lớn nhất. Riêng mô hình số trong điều kiện MC, giá trị cực đại đạt được tương ứng với độ đâm xuyên chỉ khoảng 0.125m.

6) So sánh kết quả thí nghiệm ở bảng 3 và kết quả mô phỏng ở bảng 4 cho thấy có sự sai khác rất nhỏ của xung lực va chạm I_{im} giữa hai mô hình (chỉ khoảng 3,5%). Tỷ lệ của xung lực

trong mô phỏng/thí nghiệm với điều kiện biên FD và MC lần lượt là 3,09/2,99 và 2,73/2,64.

b. Nghiên cứu ảnh hưởng của chiều cao rơi tới các đặc trưng va chạm

Nghiên cứu này còn khảo sát đặc điểm va chạm khi thay đổi chiều cao vật rơi trong cả hai loại điều kiện biên mà điều kiện thí nghiệm không tiến hành được. Chiều cao rơi tự do H thay đổi từ 3 m đến 10 m. Kết quả tính toán thể hiện trên các biểu đồ từ Hình 6 đến 11.

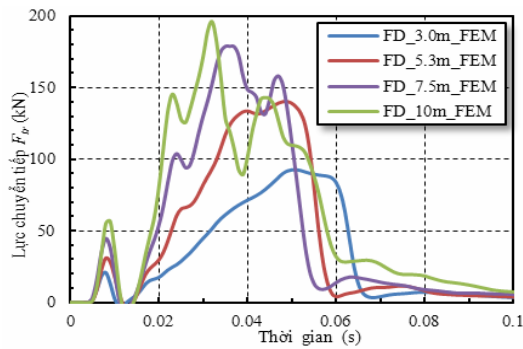
1) Hình 6a giới thiệu kết quả tính toán lực va chạm, trong khi hình 6b giới thiệu biểu đồ quan hệ giữa giá trị các đỉnh của nó theo chiều cao rơi. Một điều dễ nhận thấy là quan hệ lực va chạm và thời gian có hai đỉnh khá rõ ràng. Khi chiều cao rơi tự do tăng lên, giá trị của đỉnh thứ nhất tăng lên một cách tuyến tính, còn giá trị của đỉnh thứ hai tăng lên rồi sau đó có xu thế nằm ngang. Ứng với chiều cao rơi 10 m giá trị hai đỉnh này tiến tới gần bằng nhau. Ngoài ra, thời gian duy trì đỉnh lực va chạm kéo dài ra khi chiều cao H tăng lên.

2) Hình 7 – 8 giới thiệu lực va chạm (điều kiện biên MC), lực chuyển tiếp (điều kiện biên FD và MC) theo thời gian, tất cả đều cho thấy giá trị cực đại tăng lên và thời gian duy trì đỉnh của lực va chạm cũng kéo dài ra khi tăng chiều cao rơi.

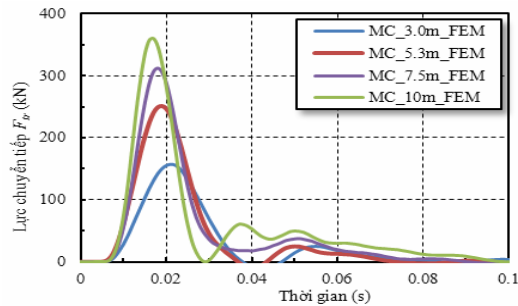
3) Hình 9 thể hiện mối quan hệ giữa chiều cao rơi và giá trị cực đại của lực va chạm và lực chuyển tiếp. Có thể nhận ra lực chuyển tiếp luôn lớn hơn lực va chạm. Ngoài ra, khoảng chênh lệch giữa hai loại lực này trong điều kiện MC cao hơn rất nhiều so với trong điều kiện FD. Cụ thể, với chiều cao rơi tính toán 10 m, trong điều kiện FD ghi nhận lực chuyển tiếp cực đại cao gấp khoảng 2 lần so với lực va chạm cực đại, trong khi đó sự chênh lệch này trong điều kiện MC là khoảng 3 lần.

4) Hình 10 biểu diễn quan hệ giữa chiều sâu đâm xuyên của vật rơi vào túi cát theo thời gian với các giá trị chiều cao rơi khác nhau. Chiều sâu xuyên càng lớn khi chiều cao rơi tăng lên. Ngoài ra, trong điều kiện FD, độ đâm xuyên lớn hơn và chiều cao phục hồi sau va chạm cũng lớn hơn các giá trị này trong điều kiện MC.

5) Quan hệ giữa xung lực va chạm I_{im} với các chiều cao rơi khác nhau trong cả hai điều kiện biên (hình 11) có dạng gần như tuyến tính, tuy nhiên xung lực va chạm trong điều kiện biên FD luôn luôn lớn hơn điều kiện biên MC khoảng 10%.

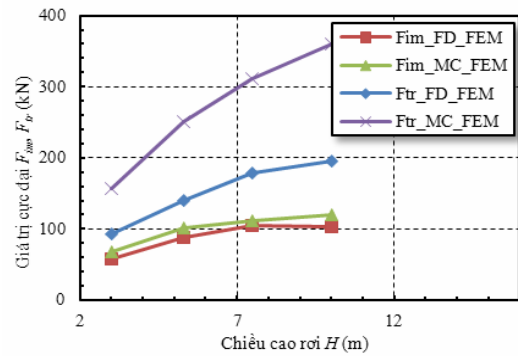


a) Điều kiện biên FD



b) Điều kiện biên MC

Hình 8. Lực chuyển tiếp theo thời gian

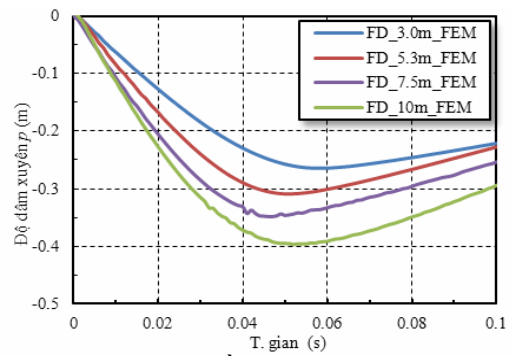


Hình 9. Giá trị cực đại của lực va chạm và lực chuyển tiếp

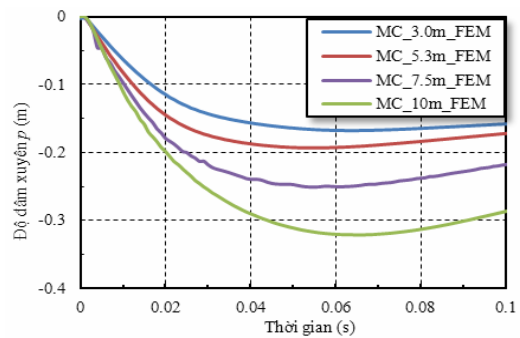
c. Một số ý kiến thảo luận:

1) Từ kết quả tính toán theo mô hình so sánh với kết quả đo đạc thí nghiệm cho thấy một sự tương đồng cao. Trong thực tế, sai số khi mô phỏng so với thí nghiệm đạt dưới 30% được coi là thành công. Có thể kết luận rằng trong giới hạn nghiên cứu của mô hình nói trên, mô hình phần tử hữu hạn có độ tin cậy cao.

2) Sự khác nhau ở giai đoạn đầu của lực va chạm trong điều kiện FD một phần là do ảnh hưởng của lớp lưới mắt cáo dùng để tạo khung cho khối cát trong mô hình vật lý. Mặc dầu không ảnh hưởng nhiều nhưng nó làm cho lực va chạm tăng nhanh khi vật rơi bắt đầu chạm vào lưới. Nhưng do đặc tính dẻo của lưới nên giá trị lực va chạm giảm nhanh sau đó. Trong mô hình số, lưới thép này được bỏ qua nên dẫn đến sự khác biệt này.

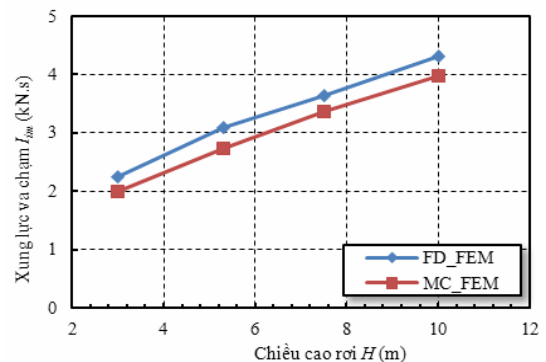


a) Điều kiện biên FD



b) Điều kiện biên MC

Hình 10. Độ đâm xuyên theo thời gian



Hình 11. Quan hệ giữa xung lực và chiều H

1) Kết quả tính toán cho thấy ảnh hưởng rõ nét của điều kiện biên của khối cát tới các thông số của bài toán va chạm. Với điều kiện biên MC (xét khối bị va chạm cùng làm việc đồng thời với các khối cát khác xung quanh) thu được lực va chạm và lực chuyển tiếp cao hơn trong trường hợp khối cát làm việc độc lập. Từ đây có thể lưu ý cho việc cần thiết phải nghiên cứu bài toán va chạm có xét đến sự làm việc tổng thể của các bộ phận.

5. Kết luận

Cát là loại vật liệu tự nhiên được sử dụng phổ biến làm lớp hấp thu va chạm trong nhiều loại công trình bảo vệ đá rơi. Đây là loại vật liệu hạt rời có đặc tính cơ học khá phức tạp, việc mô phỏng loại vật liệu này bằng phương pháp

PTHH cho kết quả đáng tin cậy sẽ giúp cho việc tính toán thiết kế kết cấu bảo vệ đá rơi trở nên dễ dàng hơn. Từ nghiên cứu này có thể gợi ý cho các nghiên cứu tiếp theo về xác định khả

năng giới hạn chịu đựng năng lượng va chạm của các khối cát khi kích thước khối cát thay đổi. Nghiên cứu này làm cơ sở cho kỹ sư thiết kế định lượng chiều dày khối kháng chắn.

Tài liệu tham khảo

- 1) Wesseloo, J., Visser, A.T., Rust, E., , The stress-strain behaviour of multiple cell geocell pack, Geotextiles and geomembranes 27, ScienceDirect, pp. 31-38, 2009.
- 2) Lambert, S., Nicot, F., Gotteland, P., Uniaxial compressive behavior of scrapped-tire and sand-filled wire netted geocell with a geotextile envelope, Geotextiles and geomembranes, in press, 2011.
- 3) Nicot, F., Gotteland, P., Bertrand, D., Lambert, S., Multi-scale approach to geo-composite cellular structures subjected to impact, International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol. 31, pp. 1477-1515, 2007.
- 4) Lambert, S., Gotteland, P., Nicot, F., Experimental study of impact response of geocells as component of rockfall protection embankment, Natural Hazards and Earth Systems Science, Vol. 9, pp.459-467, 2009.
- 5) Lambert, S., Bertrand, D., Nicot, F., Gotteland, P., Impact behaviour of geo-cells used in rock fall protection dykes, Intl Conf. on Structures under shock and impact, 14-16 mai, Portugal, pp. 197-206, 2008.
- 6) Bourrier, F., Lambert, S., Heymann, A., Gotteland, P. Evaluation of the efficiency of a model of rockfall protection structures based on real-scale experiments. Numge, Trondheim, Norvège, 2-4 juin, pp. 2281-2290, 2010.
- 7) Heymann, A., Gotteland, P., Lambert, S., Impact load transmission within a half scale sandwich rockfall protection wall. Third Euro Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures, AGS'10, Djerba, 10-12 mai, pp. 331-346, 2010.
- 8) Heymann, A., Lambert, S., Haza-Rozier, E., Vincelas, G., Gotteland, P., An experimental comparison of real-scale rockfall protection sandwich structures, 11th International Conference on Structures Under Shock and Impact, Tallinn, Estonia, p. 15-26, 2010.
- 9) Bertrand, D., Nicot, F., Gotteland, P., Lambert, S.. Modelling a geo-composite cell using discrete analysis, Computers and geotechnics, Vol. 32, pp. 564-577, 2006.
- 10) Masuya H., Nakata Y., Development of numerical model combining distinct element and finite element methods and application to rock shed analysis, Proceeding of Japan society of civil engineering, No 710/I, pp. 113-128, 2002.
- 11) Wang Z. L., Li Y. C., Wang J. G., Numerical analysis of attenuation effect of EPS geofoam on stress-waves in civil defense engineering, Geotextiles and Geomembranes 24, pp.265-273, 2006.
- 12) Kieg R. D., A simple constitutive description for cellular concrete, Sandia report SC-DR-72-0883, 1972.
- 13) Livermore Software Technology, LS-DYNA Keyword User's Manual, Vol. I, Version 971, May 2010.

Abstract:

SIMULATION OF IMPACT RESPONSE ON SAND-CELL CUSHION BY FEM

This paper presents a research of using FEM to simulate impact response on sand-cell of cushion layer of rockfall protection structures. Sand-cell was collided by a sphere from different falling heights with two kinds of lateral boundary condition: free deformation (FD) condition and material confinement (MC) condition. Simulation results were used to compare with experiment results. Some evaluations and conclusions about accuracy of numerical model and the effect of falling heights to impact response on sand-cell are presented.