

MÔ HÌNH HÓA MÔ PHỎNG VÀ NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM MÁY ĐÀM LU RUNG TRONG THI CÔNG BÊ TÔNG BỀ MẶT

MODELLING, SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF A VIBRATORY ROLLER CONCRETE SURFACE COMPACTION

Huỳnh Công Lớn, Lương Văn Tới

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Đầm bê tông bằng rung là một quá trình rất phức tạp. Sự tương tác giữa các tính chất cơ lý của bê tông và các thông số động lực học của lu rung tạo nên một hệ động lực học phi tuyến. Việc dự đoán các ứng xử động lực học của trống lu ảnh hưởng lên các lớp bê tông là rất cần thiết. Nó có thể được sử dụng để tối ưu hóa các thông số làm việc của trống lăn. Trong bài báo này, mô hình đàn nhót-dẻo (VEP) được sử dụng để mô phỏng phản ứng của xe lu rung trong quá trình đầm nén bề mặt bê tông. Mô hình VEP tính đến các yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến các đặc tính động lực học của hệ thống. Việc so sánh kết quả mô phỏng với kết quả thu thập được trong quá trình thi công mặt đường bê tông chỉ ra rằng mô hình này có thể dùng làm cơ sở lý thuyết để thực hiện đầm nén mặt đường bê tông hiệu quả. Kết quả cũng giúp xác định vận tốc, gia tốc của lu rung cũng như mối quan hệ giữa lực tác dụng và chuyển vị của các lớp bê tông.

Từ khóa: Concrete Compaction; Vibratory Roller; Viscoelastic; Roller drum; Parameters of Vibration Roller.

ABSTRACT

Concrete compaction by vibration is a complex process. The interaction between properties of concrete and the dynamic parameters of the vibration roller creates a nonlinear dynamic system. The prediction about the dynamic behaviors of the roller drum influencing on the concrete layers is essential. It can be used to optimize the parameters of the roller drum. In this paper, a viscoelastic-plastic (VEP) model is used to simulate the response of vibratory rollers during the compaction of concrete surface. The VEP model takes into account the most important factors affecting the dynamic characteristics of the system. The comparisons of the simulation results with those collected during the construction of concrete pavement indicate that this model can serve as a theoretical basis for the implementation of effective concrete pavement compaction. The results also help in determining velocity, acceleration of the vibratory roller, as well as the relationship between the acting force and the displacement.

Keywords: Concrete Compaction; Vibratory Roller; Viscoelastic; Roller drum; Parameters of Vibration Roller.

1. TỔNG QUAN

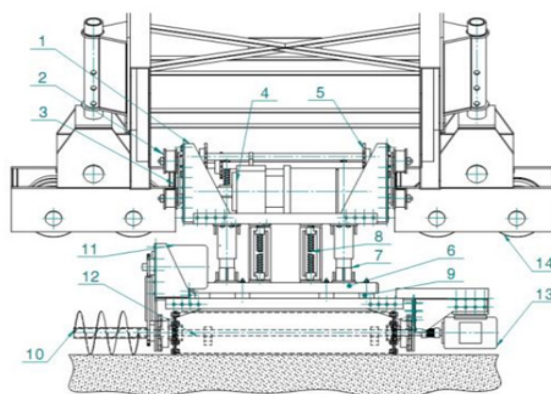
Các đặc trưng cơ bản của chất lượng đường là độ bền, cường độ, độ bằng phẳng của bề mặt, khả năng bám của bánh xe ô tô. Chỉ có thể đáp ứng được các thông số cần thiết nếu công nghệ đầm bê tông được tuân thủ nghiêm ngặt, từ việc lựa chọn các thành phần của hỗn hợp bê tông đường phù hợp cho đến sự lựa chọn đúng thiết bị đầm [1]. Đó là các loại xe lu truyền thống tĩnh và rung có trống trơn, xe lu bánh lốp hơi, xe lu liên hợp, xe lu v.v. [2]. Mặc dù trên thế giới có rất nhiều xe lu rung có công nghệ chế tạo rất tiên tiến nhưng cũng không hoàn toàn đáp ứng các yêu cầu của thực tế thi công đường bộ ở Việt Nam. Do đó, việc nghiên cứu thiết bị lu rung phù hợp với các đặc tính của bê tông trong điều kiện thi công ở Việt Nam là rất cần thiết.

Trong bài báo này trình bày mô hình toán mô tả tương tác giữa lu rung và lớp bê tông mặt đường. Cụm lăn rung được mô hình hóa như một hệ thống hai bậc tự do bao gồm các phần tử khối lượng, lò xo và bộ giảm chấn. Mặt đường bê tông được mô hình hóa dưới dạng dẻo nhót đàn hồi (VEP). Các phương trình động lực học cho hệ thống kép được chứng tỏ có thể tính toán được và phù hợp với mô phỏng số. Nó cũng chỉ ra rằng các thông số làm việc của hệ thống trong các phương trình này phụ thuộc vào thông số động lực học của lu rung và các tính chất cơ lý của hỗn hợp bê tông. Hơn nữa, người ta thấy rằng các thông số này có thể thu được từ kết quả thử nghiệm một cách đơn giản. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình dự báo chính xác độ đầm nén của hỗn hợp bê tông tươi tại hiện trường. So sánh kết quả mô phỏng với kết quả thu thập được trong quá trình thi công mặt đường bê tông cho thấy mô hình này có thể làm cơ sở lý thuyết cho việc thực hiện đầm nén mặt đường bê tông hiệu quả.

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau. Đầu tiên, mô hình động lực học của đầm lu rung và chuyển vị của mặt đường bê tông được trình bày. Sau đó, các thông số làm việc của đầm lu rung được xác định dựa vào dữ liệu thực nghiệm. Các kết quả mô phỏng cho các trường hợp đầm nén khác nhau và sự so sánh của chúng với dữ liệu đầm lu rung thực nghiệm được trình bày và thảo luận. Cuối cùng, các kết luận được rút ra từ nghiên cứu hiện tại và hướng nghiên cứu trong tương lai được đề xuất.

2. MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM VÀ MÔ HÌNH MÔ PHỎNG CỦA ĐẦM LU RUNG

2.1. Nguyên lý cấu tạo và làm việc của máy đầm lu rung

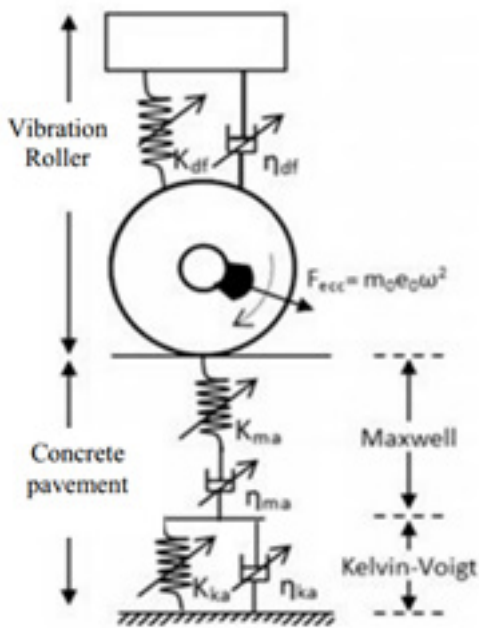


Hình 1. Nguyên lý làm việc của đầm lu rung.

Nguyên lý cấu tạo của đầm lu rung bao gồm các cụm chi tiết như sau: (1) Kết cấu thép của đầm lu rung; (2) Bánh xe di chuyển cụm lu rung được đặt trên ray; (3) Đường ray; (4) Động cơ của cơ cấu di chuyển bàn rung; (5) Xích kéo di chuyển cho cụm lu rung; (6) Bàn rung truyền chuyển động cho trống lăn; (7) Ống dẫn hướng cho bàn rung; (8) Các vít điều chỉnh; (9) Cao su giảm chấn; (10) Vít san bê tông; (11) Trống lăn; (12) Trục lệch tâm; (13) Động cơ tạo rung cho trống lăn và chuyển động vuốt mặt cho bề mặt bê tông.

Nguyên lý làm việc của máy đầm lu rung như sau: Cụm lu rung bao gồm trống lăn (11) được lắp trên trục lệch tâm (12) được truyền chuyển động quay thông qua động cơ (13). Do nguyên lý của trục lệch tâm khi chuyển động quay sẽ tạo ra các lực ly tâm tạo rung động cho trống lăn (11) thông qua bàn rung (6). Như vậy, trống lăn sẽ tạo ra hai chuyển động cùng lúc là chuyển động quay quanh trục của nó và chuyển động tịnh tiến theo phương đứng, sự kết hợp của hai chuyển động này sẽ tạo ra công tác vừa đầm nén bê tông vừa vuốt mặt bê tông. Đồng thời, toàn bộ bàn rung cũng chuyển động tịnh tiến theo phương tiếp tuyến với mặt đường, như vậy toàn bộ mặt đường sẽ được đầm và làm phẳng.

2.2. Mô hình hóa mô phỏng của máy đầm lu rung và hỗn hợp bê tông



Hình 2. Mô hình động lực học tương tác giữa đầm lu rung và bê tông.

Trong quá trình đầm tại hiện trường, máy lu rung và các lớp mặt đường bê tông bên dưới tạo thành một hệ thống liên kết. Do đó, bất

kỳ sự thay đổi nào về độ cứng của hỗn hợp bê tông sẽ ảnh hưởng đến phản ứng rung của trống lăn. Mô hình đề xuất có thể được chia thành hai phần: Phần thứ nhất thể hiện đặc tính động lực học của lu rung và phần thứ hai thể hiện đặc tính động lực học của mặt đường bê tông [4, 5]. Lực tác động được tạo ra bởi chuyển động quay của khối lệch tâm được thể hiện như sau [4]:

$$F_{ecc} = m_0 e_0 \omega_0^2 \sin(\omega_0 t) \quad (1)$$

Chỉ chuyển động thẳng đứng (Phương z) được xem xét trong mô hình này. Lực ly tâm của các phần lệch tâm được biểu diễn dưới dạng hình sin theo phương z như sau [4]:

$$F_{ecc} = m_0 e_0 \omega_0^2 \sin(\omega_0 t) \quad (2)$$

Trong đó:

$$F_{ecc} = \begin{cases} 0, t = k \left(\frac{T}{2} \right); k = 0, 1, 2, 3, \dots \\ m_0 e_0 \omega_0^2 t = (k + 1) \left(\frac{T}{4} \right); k = 0, 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Và } \omega_0 = 2\pi f_0; \quad f_0 = \frac{1}{T}.$$

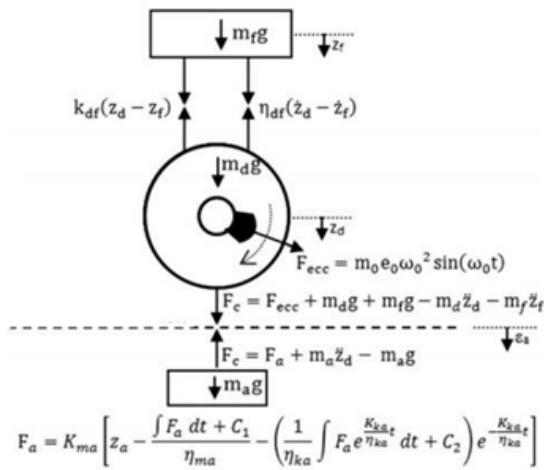
Mô hình hóa hỗn hợp bê tông rất phức tạp vì ứng xử của nó phụ thuộc vào đặc tính thể tích của hỗn hợp, lực đầm nén, tần số gia tải và biên độ dao động. Trong bài báo này, mặt đường bê tông bên dưới được mô hình hóa bằng cách sử dụng mô hình Burgers dẻo nhớt. Các phần tử lò xo tuân theo định luật Hooke (trong đó $F = k\varepsilon$ là ứng suất tác dụng, ε là biến dạng kết quả và k là mô đun Young của lò xo) trong khi hai phần tử giảm chấn tuân

theo định luật Newton ($\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$), trong đó σ là ứng suất, ε là độ dịch chuyển và η là độ nhớt). Trong khi đó, phương trình Berger có thể được biểu diễn như sau:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_v + \varepsilon_d =$$

$$\frac{\sigma}{K_{ma}} + \frac{\int \sigma dt + C_1}{\eta_{ma}} + \left(\frac{1}{\eta_{ka}} \int \sigma e^{\frac{K_{ka}}{\eta_{ka}}} + C_2 \right) e^{-\frac{K_{ka}}{\eta_{ka}}} \quad (4)$$

Trong đó, $C_1 = C_2$ hằng số phụ thuộc vào các điều kiện ban đầu và phải được xác định từ các thử nghiệm trong phòng thí nghiệm.



Hình 3. Biểu đồ vật thể tự do thể hiện lực tương tác giữa máy lu rung và mặt đường bê tông.

Các phương trình mô tả đáp ứng động lực học của hệ liên kết giữa mặt đường lu có thể được biểu diễn như sau:

$$\varepsilon_e = z_a - \varepsilon_v - \varepsilon_d$$

$$z_a = \frac{\int F_a dt + C_1}{\eta_{ma}} - \left(\frac{1}{\eta_{ka}} \int F_a e^{\frac{K_{ka}}{\eta_{ka}}} dt + C_2 \right) e^{-\frac{K_{ka}}{\eta_{ka}}} \quad (5)$$

$$F_a = K_{ma} \cdot \varepsilon_e = K_{ma} \left[z_a - \frac{\int F_a dt + C_1}{\eta_{ma}} - \left(\frac{1}{\eta_{ka}} \int F_a e^{\frac{K_{ka}}{\eta_{ka}}} dt + C_2 \right) e^{-\frac{K_{ka}}{\eta_{ka}}} \right] \quad (6)$$

$$F_c = m_0 e_0 \Omega^2 \sin(\Omega t) + m_d g + m_f g - m_d \ddot{z}_d - m_f \ddot{z}_f = m_d \ddot{z}_d - m_a g + F_a \quad (7)$$

$$m_f \ddot{z}_f = m_f g + k_{df}(z_d - z_f) + C_{df}(\dot{z}_d - \dot{z}_f) \quad (8)$$

$$(m_d + m_a) \ddot{z}_d = (m_d + m_a) \ddot{z}_a =$$

$$m_0 e_0 \Omega^2 \sin(\Omega t) + m_d g + m_a g - k_{df}(z_d - z_f) - c_{df}(\dot{z}_d - \dot{z}_f) - K_{ma} \left[z_a - \frac{\int F_a dt + C_1}{\eta_{ma}} - \left(\frac{1}{\eta_{ka}} \int F_a e^{\frac{K_{ka}}{\eta_{ka}}} dt + C_2 \right) e^{-\frac{K_{ka}}{\eta_{ka}}} \right] \quad (9)$$

Với:

F_{ecc} : Lực ly tâm;
 k_{df} : Độ cứng hệ trống lu – khung;
 η_{df} : Giảm chấn hệ trống lu – khung;
 k_{ma} : Độ cứng lò xo Maxwell;
 η_{ma} : Giảm chấn lò xo Maxwell;
 k_{ka} : Độ cứng lò xo Kelvin;
 η_{ka} : Giảm chấn lò xo Kelvin-Voigt.

3. KẾT QUẢ MÔ PHÒNG VÀ THỰC NGHIỆM

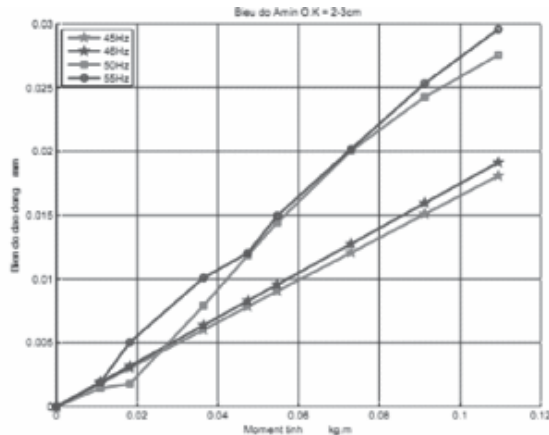
3.1. Mô phỏng và chọn thông số làm việc cho hệ trống lu rung

Sử dụng thư viện mô phỏng của phần mềm MATLAB để mô phỏng quá trình làm việc của máy đầm lu rung ở các miền giá trị của các biên tần số dao động là 45Hz, 46Hz, 50Hz, 55Hz và moment lệch tâm từ 0.02kgm đến 0.12kgm. Cùng với các thông số động lực học và thông số hình học của hệ trống lu – khung như sau:

Symbol	Description	Unit	Value
C_{df}	Hệ số giảm chấn của hệ trống lu – khung	N.s/m	0.05
k_{df}	Hệ số độ cứng của hệ trống lu – khung	N/m	39951
m_f	Khối lượng khung	kg	310
m_d	Khối lượng lu	Kg	570
$M_0 e_0$	Moment lệch tâm	Kg.m	0.4-0.9
ω	Tần số góc	Rad/s	40-60
W	Bề rộng trống lu	m	1.2
A	Diện tích tiếp xúc của hệ trống lu	m ²	0.05



Khi tiến hành mô phỏng quá trình làm việc của hệ trống lu rung – khung tương ứng với lớp bê tông dày 200mm, mác bê tông là 200 và độ sụt của bê tông là 5cm. Chúng ta đạt được kết quả mô phỏng của 05 trường hợp tương ứng với các miền tần số dao động 45Hz, 46Hz, 50Hz và 55Hz như sau:



Hình 4. Biểu đồ thể hiện tương quan giữa moment lệch tâm và biên độ dao động.

Dựa trên kết quả mô phỏng, ta có thể chọn được các thông số làm việc của hệ trống lu rung – khung máy như sau:

- Moment tĩnh lệch tâm: 6kg.cm;
- Tần số rung: $\omega = 50\text{Hz}$;
- Biên độ dao động của trống lăn trên bề mặt bê tông: $A_{\max} = 0.15\text{mm}$;
- Biên độ dao động của lớp bê tông ở độ sâu 200mm: $A_{\min} = 0.03\text{mm}$;
- Lực tác dụng lên lớp bê tông: $F = 3500\text{kG}$.

3.2. Thực nghiệm đầm bê tông bằng máy đầm lu rung

Thông số làm việc và kết cấu của hệ trống lu rung – khung:

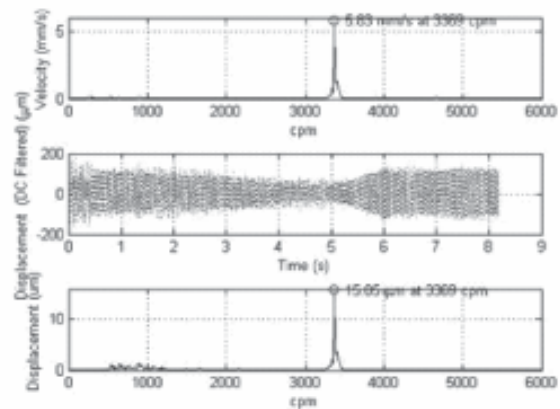
- Moment tĩnh lệch tâm: 6kg.cm;
- Tần số rung: $\omega = 50\text{Hz}$;

- Biên độ dao động của trống lăn trên bề mặt bê tông: $A_{\max} = 0.15\text{mm}$;
- Biên độ dao động của lớp bê tông ở độ sâu 200mm: $A_{\min} = 0.03\text{mm}$;
- Lực tác dụng lên lớp bê tông: $F = 3500\text{kG}$;
- Bề rộng lu: $W = 1.2\text{m}$;
- Khối lượng trống lu: $m_d = 570\text{kg}$;
- Khối lượng khung: $m_f = 310\text{kg}$.

Đặc tính của lớp bê tông cần đầm:

- Bê tông mác: 200;
- Chiều dày lớp bê tông cần đầm: 200mm;
- Độ sụt bê tông: 5cm.

Quá trình thực nghiệm đầm cho kết quả như sau:



Hình 5. Chuyển vị, vận tốc và gia tốc của mặt bê tông tại bề mặt và tại chiều sâu 200mm

Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng lớp bê tông ở vị tiếp xúc với trống lu rung có biên độ chuyển động là 0.15mm với vận tốc là 5.83mm/s.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, một mô hình toán học được xây dựng nhằm mục đích tìm hiểu sự tương tác giữa lớp hỗn hợp bê tông và xe

lu rung trong quá trình thi công mặt đường bê tông. Mô hình tính đến các đặc tính nhớt-dẻo của hỗn hợp bê tông và động lực học của trống lăn để dự đoán ảnh hưởng của quá trình đầm nén đối với rung động của trống lăn. Hơn nữa, các thông số làm việc của mô hình được thể hiện dễ dàng từ các thông số kết cấu của trống lu rung và từ các đặc tính vật liệu của hỗn hợp bê tông. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình dự đoán độ đầm nén của hỗn hợp bê tông tươi khi thực nghiệm với độ chính xác hợp lý. ❖

Ngày nhận bài: **05/9/2023**

Ngày phản biện: **12/10/2023**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Sergey Maksimovich Ugay, Uri Uakovlevich Kovalenko and Natalya Sargeevna Pogotovkina. *Statistical research of vibration road rollers and perforated operating devices*, World Applied Sciences Journal 25, 2013.
- [2]. Malutin. *Roll to the fullest*. Road Rollers, 2013.
- [3]. Kostelyov, M.P.. *The compaction of asphalt requires the renewed generation of rollers*, Road equipment, 2003.
- [4]. Fares Beainy, Sesh Commuri, Musharaf Zaman, Imran Syed. *Viscoelastic – Plastic model of asphalt-roller interaction*, International journal of Geomechanics-ASCE, American, 2013.
- [5]. Fares Beainy, Sesh Commuri, Musharaf Zaman. *Dynamical response of vibratory rollers during the compaction of asphalt pavements*, International journal of Geomechanics-ASCE, American, 2014.
- [6]. Nguyễn Hồng Ngân, Huỳnh Công Lớn, Đặng Sĩ Lê. *Nghiên cứu hợp lý hóa các thông số làm việc của máy san đầm trực lăn trong quá trình đầm bê tông*, Hội nghị Khoa học và Công nghệ toàn quốc về Cơ khí lần thứ III, 2013.
- [7]. Trần Văn Tuấn. *Cơ sở kỹ thuật rung trong trong xây dựng và sản xuất vật liệu xây dựng*, NXB. Xây dựng Hà Nội, 2005.
- [8]. Burger. *Considerations-model systemsphenomenological theories of relaxation and of viscosity*, mechanical, Viscosity and Plasticity, Nordemann Publishing, New York, 1935.
- [9]. Ralph O.Lane. *Behavior of fresh concrete during vibration*, Reported by ACI Committee 309. USA, 1998.