

SO SÁNH ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ ẨM VÀ DUNG TRỌNG ĐẤT ĐẾN KHẢ NĂNG KHÁNG XÓI VÀ KHÁNG XUYỀN CỦA ĐẤT - ÁP DỤNG CHO ĐẤT BÙN

Nguyễn Văn Nghĩa

Trường Đại học Thủy lợi

Nguyễn Thái Sơn

Trung tâm dạy nghề thanh niên thuộc Tỉnh đoàn Kiên Giang

Tóm tắt: Bài báo trình bày kết quả so sánh ảnh hưởng của dung trọng và độ ẩm đầm nén của đất đến khả năng kháng xói và kháng xuyên của đất bùn. Kết quả cho thấy, khả năng kháng xuyên và kháng xói của đất sẽ tăng khi dung trọng khô của đất tăng, ngược lại ảnh hưởng của độ ẩm đến hai thông số trên trái ngược nhau. Khi đất có dung trọng đầm nén nhỏ thì mức độ kháng xói và kháng xuyên sẽ giảm khi độ ẩm đầm nén của đất tăng, nhưng khi dung trọng đầm nén cao thì kết quả chỉ ra ngược nhau, trong khi mức độ kháng xuyên giảm khi độ ẩm tăng thì độ kháng xói lại tăng.

Từ khóa: Kháng xuyên, kháng xói, dung trọng khô, độ ẩm đầm nén, lực hút dính.

Summary: This paper presents a comparison of the influence of soil parameters on the penetration resistance and erosion resistance of a silty soil such as dry density and compaction water content. The results showed an increase of penetration resistance and erosion resistance with dry density, but the influence of compaction water content on the penetration resistance is not completely accorded with that on the erosion resistance. At low dry density, the penetration resistance and erosion resistance decrease with an increase of compaction water content but at high dry density, the result shows a contrary, the penetration resistance decreases while the erosion resistance increases with an increase of water content.

Keywords: penetration resistance, erosion resistance, dry density, compaction water content, suction.

1. GIỚI THIỆU

Khả năng kháng xuyên của đất là một trong các thông số để đánh giá sự gia tăng, phát triển của rễ cây trong các công trình thủy lợi, và ảnh hưởng của lực cản của đất đến mũi cọc khi cần đóng cọc vào đất (Nguyen, 2015b). Độ kháng xuyên (RP) của đất tăng dẫn đến giảm sự phát triển của rễ cây-những yếu tố làm phát sinh xói ngầm và thấm trong các công trình như đê, đập vật liệu địa phương. Thông số này có liên hệ với độ bền cơ học được xác định định bằng thiết bị đo xuyên kế (Bengough and Mullins, 1991).

Hiện tượng xói mòn có thể dẫn đến mất đất, mất

ổn định của đê-đập, và có thể dẫn đến phá hủy công trình thủy lợi (Nguyen et al., 2017). Hiện tượng xói mòn chỉ xuất hiện khi mà ứng suất cắt thủy lực do dòng nước sinh ra vượt quá cường độ chống xói cho phép của đất (độ kháng xói) hay cường độ chống cắt cho phép của đất. Ở đây đã có nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng, cường độ chống xói cho phép (τ_c) của đất phụ thuộc nhiều vào hai thông số cơ bản của đất là: độ ẩm đầm nén và dung trọng khô (các thông số đo được khi đầm nén mẫu đất).

Khả năng hay mức độ kháng xuyên và kháng xói của đất phụ thuộc vào nhiều thông số khác nhau của đất như: dung trọng khô, độ ẩm, độ

Ngày nhận bài: 30/3/2020

Ngày thông qua phản biện: 22/5/2020

Ngày duyệt đăng: 02/6/2020

bão hòa, tỉ lệ rễ cây,... Trong những nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng, dung trọng khô của đất có ảnh hưởng đáng kể đến độ kháng xói cũng như kháng xuyên của đất (Lim, 2009; Nguyen, 2015b; Nguyen et al., 2017; Vaz et al., 2011; Wahl et al., 2009). Nhưng bên cạnh đó, các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, ảnh hưởng của độ ẩm đầm nén đến độ kháng xuyên khá rõ nét (Vaz et al., 2011) thì ảnh hưởng đến độ kháng xói của đất lại khá phức tạp và không đồng nhất (Ansati et al., 2007; Benahmed and Bonelli, 2012; Nguyen et al., 2017).

Kỹ thuật thông dụng nhất được chấp nhận là đo kháng xuyên bằng thiết bị đo *xuyên kế*, thiết bị này được sử dụng rộng rãi như so sánh độ bền của đất và đánh giá nhanh độ đầm nén của đất ở hiện trường (Nguyen, 2015b).

Còn để đo cường độ kháng xói của đất, có một vài thiết bị như: Xói máng (hydraulic flume test), erosion function apparatus, rotating cylinder test, thiết bị xói tia (jet erosion test, mobile jet erodimeter) và thiết bị xói tia cải tiến được nêu trong công trình nghiên cứu của Nguyen et al., (2017).

Trong bài báo này, chi tiết về thiết bị để đo độ kháng xói và kháng xuyên không trình bày chi tiết, người đọc có thể tham khảo trong các bài viết được trích dẫn ở mục tài liệu tham khảo. Bài báo tập trung vào việc so sánh ảnh hưởng của dung trọng khô và độ ẩm đầm nén đến độ kháng xói và kháng xuyên của đất.

2. VẬT LIỆU VÀ THIẾT BỊ THÍ NGHIỆM

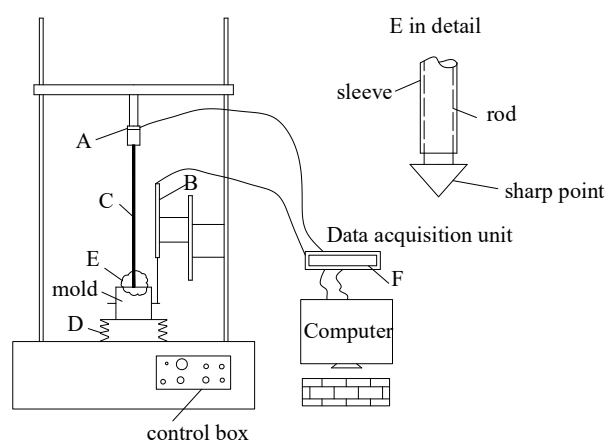
2.1. Thiết bị thí nghiệm

Trong bài báo này, hai thiết bị thí nghiệm lần lượt được sử dụng để đo khả năng kháng xuyên và kháng xói thông qua cường độ chống xói hay chống cắt giới hạn (cho phép) của đất là: thiết bị *xuyên kế* và *thiết bị xói tia* (Jet Erosion Test).

Thiết bị thứ nhất được sử dụng là *Xuyên kế*. Sơ đồ của thiết bị đo *xuyên kế* để đo độ kháng xuyên của đất được mô tả trong hình 1. Nó bao gồm sen-xơ lực (A), sen-xơ chuyển độ (B), cần

xuyên (C), máy nén với tốc độ không đổi (D), côn (đầu) xuyên kế (E) và thiết bị lưu trữ thông tin (F).

Cần xuyên gồm có một ống lồng với đường kính 12mm và một cần với đường kính 8mm, phía trên của cần xuyên được kết nối với sen-xơ lực, đầu còn lại gắn với côn xuyên kế, côn xuyên kế có đường kính thay đổi với góc ở đỉnh nhọn là 90° và đường kính chỗ lớn nhất là 15,5mm. Lực tác dụng lên côn xuyên kế được đo bởi sen-xơ chính là lực kháng xuyên của đất lên đầu côn xuyên. Ống lồng bên ngoài cần xuyên có tác dụng triệt tiêu lực ma sát giữa đất và cần xuyên khi đầu côn xuyên cắm sâu vào trong mẫu đất. Mẫu đất thí nghiệm được đặt lên bề mặt của máy nén và phần cuối của côn xuyên tiếp xúc với bề mặt của mẫu đất thí nghiệm (mẫu đất được đầm trong cối đầm proctor tiêu chuẩn), một sen-xơ chuyển độ được đặt lên tại cối đầm hoặc phần vỏ cối đầm để đo khả năng xuyên của côn xuyên, mục đích là để xác định chính xác chiều sâu xuyên của côn xuyên. Sau đó kết nối với thiết bị lưu trữ (Data logger) và máy tính, bật phần mềm lưu trữ số liệu thí nghiệm (Labview). Để đạt được kết quả tốt, nên cài đặt tốc độ nén thấp. Thí nghiệm trong bài báo này cài đặt tốc độ nén là 1mm/phút.

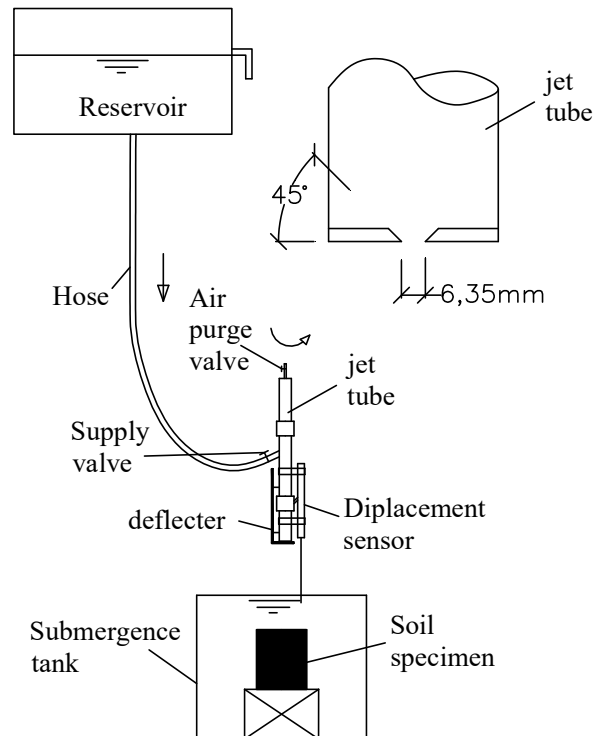


Hình 1: Sơ đồ thiết bị xuyên kế (mô phỏng theo Nguyen, 2014)

Sen-xơ lực (A), sen-xơ chuyển độ (B) cần xuyên (C), máy nén với tốc độ không đổi (D), côn xuyên (E) và thiết bị lưu trữ số liệu thí nghiệm (F)

Thiết bị thứ hai là xói tia (JET). Thiết bị xói tia (JET) là thiết bị được phát triển ở trường đại học Ecole Central Paris (Nguyen et al., 2017), thiết bị này cho phép đo chiều sâu hố xói theo thời gian trong quá trình thí nghiệm. Sơ đồ thiết bị JET được thể hiện trong hình 2, nó gồm có một ống tube tròn mê-ca đường kính 50mm và dài 800mm, một đầu ống tạo tia nước một đầu trên có gắn một van xả khí. Đầu phía dưới ống có lắp một miếng nhựa tổng hợp dày 5mm, miếng nhựa này được khoét lỗ chính giữa, lỗ có đường kính nhỏ nhất 6,35mm và lỗ được tạo dạng côn với góc 45°. Nước được dẫn vào khoảng giữa của ống tube, nước được điền đầy ống từ dưới lên trên vì vậy sẽ dễ dàng loại bỏ bọt khí lẫn trong nước trong quá trình nạp nước vào ống tube. Ống tube được giữ bởi hệ thống kẹp, đầu dưới của ống tube có gắn thiết bị tách dòng (deflector) để đóng/mở tia nước một cách thủ công. Khi cần đo, thiết bị tách dòng sẽ lập tức ngắt (đóng) dòng tia nước để thực hiện thao tác đo độ sâu hố xói bằng cấp đo sâu.

Mẫu đất được đầm trong cối đầm proctor tiêu chuẩn có chiều cao 117mm và đường kính 101,6mm. Mẫu đất và cối đầm được lật ngược để trong bể chứa ngập nước, bể có chiều cao 600mm và đường kính 500mm. Trước khi thí nghiệm và cho tia nước tác động vào mẫu đất, nước được bơm vào làm đầy bể chứa mẫu đất, chiều sâu ngập nước được tính từ mặt mẫu đất thí nghiệm đến mép trên của bể chứa. Để đảm bảo không ảnh hưởng đến kết quả thí nghiệm, vỏ cối đầm được bôi mỡ chống thấm, mục đích không làm ảnh hưởng đến độ ẩm của đất xung quanh và phía dưới mẫu đất thí nghiệm.



Hình 2: Sơ đồ thiết bị xói tia JET (mô phỏng theo Nguyen et al., 2017).

2.2. Vật liệu

Vật liệu được sử dụng là đất bùn được lấy từ một con đê phía nam nước Pháp. Các thí nghiệm để xác định thuộc tính của đất gồm: thí nghiệm giới hạn Atterberg (AFNOR 2005a), thí nghiệm xác định thành phần hạt (AFNOR 2005b), thí nghiệm đầm nén tiêu chuẩn (AFNOR 2014). Giới hạn chảy (w_L) nằm trong khoảng từ 30% đến 35%, giới hạn dẻo (w_P) thay đổi từ 14% đến 16%, chỉ số dẻo (I_P) nằm trong khoảng từ 13% đến 16%, và giá trị xanh mê-ti-len (methylene blue value) là VBS = 1,8, giá trị này cho thấy đất có độ dẻo cao. Độ ẩm tối ưu (w_{OPN}) của đất là 17,2% tương ứng với dung trọng đầm nén tối đa (γ_{dOPN}) là 16,8kN/m³. Trong cả hai thí nghiệm, mẫu đất được đầm nén trong cối đầm proctor tiêu chuẩn.

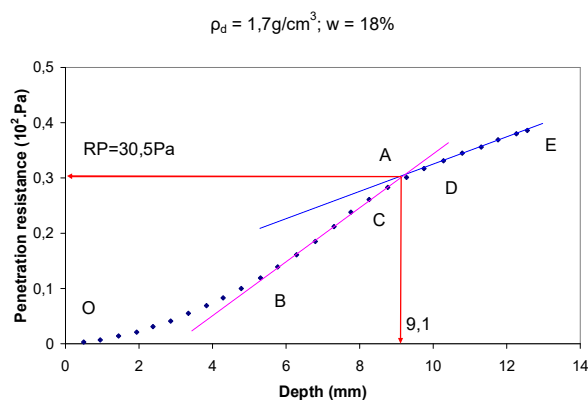
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Lựa chọn giá trị đặc trưng cho độ kháng xuyên

Sự thay đổi của khả năng kháng xuyên của đất biến thiên theo chiều sâu xuyên vào trong đất

được thể hiện trong *hình 3*. Khả năng kháng xuyên đo được là giá trị tác dụng lên đầu côn của xuyên kế.

Sự phát triển của khả năng kháng xuyên là một hàm của chiều sâu xuyên trong đất, gồm có 4 giai đoạn: hai giai đoạn là biến thiên phi tuyến OB và CD, hai giai đoạn biến thiên tuyến tính là BC và DE. Trong đoạn OB, côn xuyên kế vẫn chưa bị cắm ngập trong đất và đất bị đẩy ra xung quanh côn xuyên kế. Trong đoạn BC, đất dưới mũi côn được nén chặt vì vậy khả năng kháng xuyên tăng do sự suy giảm tỉ lệ lỗ rỗng trong đất. Ở đoạn DE, đất bị đẩy ra do côn xuyên vào đất làm cho mức độ kháng xuyên tăng nhẹ theo chiều sâu xuyên.



Hình 3: Sự phát triển của khả năng kháng xuyên theo chiều sâu đất

Để thuận tiện cho việc so sánh các trường hợp, điểm A là điểm được lựa chọn (giao của hai đường BC và DE) trong *hình 3* để xác định khả năng kháng xuyên giới hạn của đất.

3.2. Xác định khả năng kháng xói (cường độ chống cắt giới hạn)

$$t_m = \frac{J_e}{k_D \tau_c} \left[0.5 \ln \frac{J_e + J}{J_e - J} - \frac{J}{J_e} - 0.5 \ln \frac{J_e + J_i}{J_e - J_i} + \frac{J_i}{J_e} \right] \quad (2)$$

với, t_m là thời gian đo độ sâu hố xói.

Bài báo này tập trung vào việc phân tích kết quả của cường độ chống cắt giới hạn mà không đi vào phân tích lý thuyết cũng như

Một trong những thông số đặc trưng cho hiện tượng xói mòn là cường độ chống cắt giới hạn, thông số này chính là giá trị nhỏ nhất của cường độ cắt thủy lực mà tại đó đất bị xói, cường độ chống cắt giới hạn là giá trị đặc trưng cho khả năng kháng xói của đất.

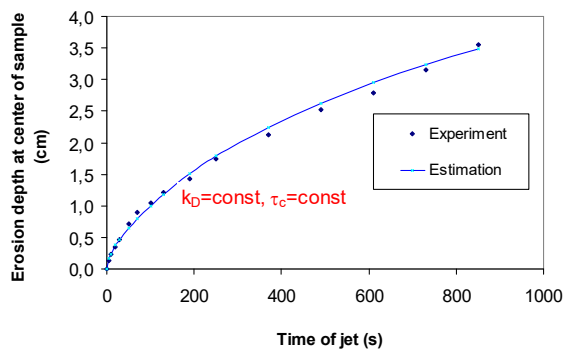
Từ dữ liệu thu được trong thí nghiệm JET (đường nét đứt trong *hình 4*), Nguyen et al., 2017 đã giới thiệu một phương pháp để xác định thông số xói trên cơ sở phương trình 1 bằng cách giả sử tốc độ xói có thể xác định bằng tỉ lệ thay đổi của độ sâu hố xói (dJ/dt):

$$dJ/dt = k_D \cdot (\tau_c - \tau_c) \quad (1)$$

Ở đây, J là chiều sâu xói tại điểm sâu nhất trên mẫu thí nghiệm (cm), dJ/dt là tốc độ xói (cm/s), τ_c được xác định từ đường kính lỗ tia và khoảng cách từ tia nước đến bề mặt mẫu đất thí nghiệm, τ_c là cường độ chống cắt giới hạn, chính là giá trị mà tại đó hiện tượng xói không xảy ra hoặc gần như không xảy ra, k_D là hệ số xói ($\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$).

Trị số cường độ chống cắt giới hạn được xác định tại thời điểm mà không xuất hiện hiện tượng xói trên bề mặt mẫu đất thí nghiệm, tức tại thời điểm đó độ sâu hố xói đạt giá trị lớn nhất (J_e). Tuy nhiên thực tế thí nghiệm, việc xác định được J_e phải đợi rất lâu và đôi khi không khả thi trong môi trường thí nghiệm, do vậy trị số J_e sẽ được xác định bằng cách giả định đường cong biểu thị độ sâu hố xói và tính đúng dần các điểm (trị số độ sâu hố xói) đo so với trị số tính toán, áp dụng phương trình (2) được nêu trong nghiên cứu của Hanson and Cook, 1997; Hanson et al., 2002; Hanson and Cook, 2004.

phương pháp xác định thông số xói, việc xác định thông số xói được thể hiện trong các nghiên cứu của Nguyen, 2015a; Nguyen et al., 2017.

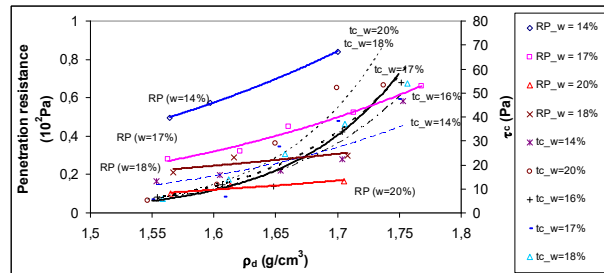


Hình 4: Diễn biến độ sâu hố xói theo thời gian thí nghiệm JET

3.3. Ảnh hưởng của dung trọng khô

Trong loạt thí nghiệm đầu tiên, nghiên cứu ảnh hưởng của dung trọng khô (ρ_d) khi không chế độ ẩm đầm nén không đổi ($w=\text{const}$). Kết quả thu được như trên hình 5 chỉ ra rằng độ kháng xuyên (RP) và kháng xói (thông qua cường độ chống cắt giới hạn τ_c) tăng khi dung trọng khô tăng, kết quả này phù hợp với các nghiên cứu đã chỉ ra bởi các tác giả Lim (2009), Ansati et al. (2007), Benahmed and Bonelli (2012), Vaz et al. (2011), Mulqueen et al. (1977). Điều này có thể lý giải bởi sự tăng độ hút dính và cường độ bền của đất khi tăng dung trọng khô (Fleureau et al., 2011; Taibi, 1994; Taibi et al., 2011).

Tại dung trọng khô lớn thì ảnh hưởng của độ ẩm đầm nén đến độ kháng xuyên và kháng xói rất rõ nét nhưng cho xu hướng ngược nhau, độ kháng xuyên giảm khi độ ẩm tăng nhưng độ kháng xói lại tăng khi độ ẩm tăng. Điều này có nghĩa là khi đạt đến dung trọng đầm nén nhất định thì khả năng kháng xói của đất tăng dù cho đất dễ bị “xuyên” hơn. Những kết quả này có nghĩa rằng ở dung trọng đầm nén cao thì lực hút dính không có vai trò quan trọng mà là cấu trúc của đất sẽ giữ vai trò quan trọng.

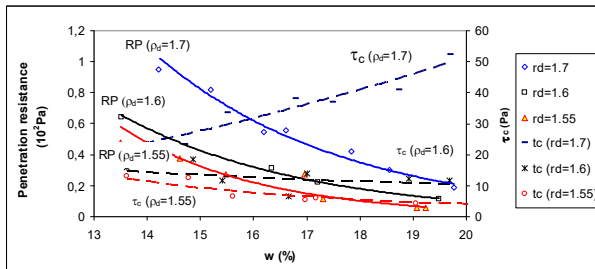


Hình 5: Sự thay đổi của độ kháng xuyên (RP) và kháng xói (τ_c) theo dung trọng khô ứng với các độ ẩm đầm nén khác nhau.

3.4. Ảnh hưởng của độ ẩm đầm nén

Trong loạt thí nghiệm thứ hai, dung trọng khô được khống chế không đổi trong khi thay đổi độ ẩm đầm nén (hình 6). Dựa vào kết quả thu được cho thấy sự thay đổi độ kháng xuyên là khá tương đồng trong khi sự thay đổi của độ kháng xói khá phức tạp. Khi dung trọng đầm nén thấp ($\rho_d \leq 1.6 \text{ g/cm}^3$) thì độ kháng xuyên và kháng xói đều giảm khi độ ẩm đầm nén gia tăng, kết quả này khá phù hợp với những kết luận trong các nghiên cứu của Vaz (2003) và Vaz et al. (2011), điều này có thể lý giải bằng việc suy giảm lực hút dính của đất khi độ ẩm đầm nén tăng, ở đây cấu trúc của đất không có vai trò nổi trội bằng lực hút dính trong việc thay đổi trị số của độ kháng xuyên và kháng xói.

Tuy nhiên, khi dung trọng đầm nén cao ($\rho_d = 1.7 \text{ g/cm}^3$) thì cho thấy diễn biến của độ kháng xuyên và kháng xói theo sự thay đổi độ ẩm cho kết quả trái ngược nhau, độ kháng xói (τ_c) lại tăng khi gia tăng độ ẩm đầm nén, điều này có thể lý giải bởi vai trò thứ yếu (hoặc không có) của lực hút dính vì thực tế khi độ ẩm tăng thì lực hút dính giảm (Nguyen, 2014; Nguyen et al., 2017), trong trường hợp này cấu trúc của đất sẽ giữ một vai trò rất quan trọng khi kháng xói. Và khi độ ẩm đầm nén thấp thì sự thay đổi dung trọng đầm nén lại có vai trò quan trọng đối với sự thay đổi khác biệt về độ kháng xuyên của đất (hình 6).



Hình 6: Sự thay đổi độ kháng xuyên (RP) và kháng xói (τ_c) theo độ ẩm đầm nén (w) ứng với các dung trọng đầm nén khác nhau (ρ_d).

4. KẾT LUẬN

Trên cơ sở các kết quả thu được từ nghiên cứu thực nghiệm, có thể kết luận rằng:

- Độ kháng xuyên và kháng xói của đất gia tăng khi tăng dung trọng đầm nén. Khi dung trọng đầm nén cao thì cấu trúc của đất sẽ đóng vai trò quan trọng còn lực hút dính không đóng vai trò

quan trọng trong việc thay đổi trị số của độ kháng xuyên và kháng xói.

- Khi dung trọng đầm nén thấp ($\rho_d \leq 1.6 \text{ g/cm}^3$) thì độ kháng xuyên và kháng xói sẽ giảm khi tăng độ ẩm đầm nén của đất, nhưng khi dung trọng khô cao hơn thì ảnh hưởng của độ ẩm đầm nén đến hai thông số trên cho kết quả trái ngược nhau, trong khi độ kháng xuyên giảm thì độ kháng xói tăng. Điều này rất quan trọng trong các công trình dùng vật liệu địa phương, đó là khi đầm đạt dung trọng nhất định thì độ ẩm của đất tăng đôi khi lại không làm giảm khả năng chống xói của đất.

- Khi dung trọng đầm nén thấp, lực hút dính sẽ đóng vai trò quan trọng đối với trị số của độ kháng xuyên và kháng xói, trong khi dung trọng đầm nén cao và độ ẩm đầm nén thấp thì cấu trúc của đất lại giữ vai trò quan trọng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] AFNOR (2005a). "Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 4: détermination de la distribution granulométrique des particules [Determination of grain size distribution]", AFNOR standard XP CEN ISO/TS 17892-4, Paris, France.
- [2] AFNOR (2005b). "Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12: détermination des limites d'Atterberg [Determination of Atterberg limits]", AFNOR standard XP CEN ISO/TS 17892-12, Paris, France.
- [3] AFNOR (2014). "Sols: reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié [Standard and Modified Proctor tests]". AFNOR standard NF P94-093, Paris, France.
- [4] Ansati, S.A., Kothiyari, U.C., and Ranga Raju, K.G. (2007). "Incipient motion characteristics of cohesive sediments". *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 13(2), 108-121.
- [5] Bengough, A.G., Mullins, C.E. (1991). Penetrometer resistance, root penetration resistance and root elongation rate in two sandy loam soils. *Plant Soil* 131, 59– 66.
- [6] Benahmed, N., and Bonelli, S. (2012). "Internal erosion of cohesive soils: laboratory parametric study". *6th International Conference on Scour and Erosion, ICSE 6-Paris*, 1041-1047.
- [7] Fleureau J.M, Dao L.Q, Oualmakrane M, Souli H, and Bannour H (2011), "Etude des mécanismes mis en jeu lors du Jet Erosion Test", *EDF-ENISE Final Report*. Paris, p90.
- [8] Hanson, G.J., and Cook, K.R. (1997). "Development of excess shear stress parameters for

- circular jet testing”. *ASAE paper*, No.972227.
- [9] Hanson, G.J., Robinson, K.M., and Cook, K.R. (2002). “Scour below an overfall: Part II. Prediction”. *Transaction of ASAE*, 45(4), 957-964.
 - [10] Hanson, G.J., and Cook, K.R. (2004). “Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ”. *American Society of Agricultural Engineers ISSN 0883-8542*, 20(4), 455-462.
 - [11] Lim, S.S., and Khalili, N. (2009). “An improved rotating cylinder test design for laboratory measurement of erosion in clayed soils”. *Geotechnical Testing Journal*, 32(3), 232-238.
 - [12] Mulqueen, J., Stafford, J.V., Tanner, D.W. (1977). “Evaluation of penetrometers for measuring soil strength”. *Journal of Terramechanics*, 14(3), 137-151.
 - [13] Nguyen, V.N. (2014). “Caractérisation de l'érosion des sols par le Jet Erosion Test”. *Ph.D report*, Ecole Centrale Paris, 380pp.
 - [14] Nguyen, V. N., (2015a). “A method for estimating erosion parameters from Jet Erosion Test”, *Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 49, p54-58.
 - [15] Nguyen, V. N., (2015b). “The influence of some parameters on penetration resistance of a silty soil”, *Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 51, p44-49.
 - [16] Nguyen, V. N., Courivaud, J. R., Pinette, P., Souli, H., Fleureau, J. M. (2017): Using an improved Jet Erosion Test to study the influence of soil parameters on soil erosion. *Journal of Hydraulic Engineering*. 143(8), pp1-11.
 - [17] Taibi S (1994), “Comportement mécanique et hydraulique des sols soumis à une pression interstitielle négative – Etude expérimentale et modélisation”. PhD report, Ecole Centrale Paris, Paris.
 - [18] Taibi, S., Fleureau, J.M., Abou-Bekr, N., Zerhouni, M.I., Benchouk, A., Lachgueur, K., and Souli, H. (2011). “Some aspects of the behaviour of compacted soils along wetting paths”. *Géotechnique*, 61(5), 431-437.
 - [19] Vaz C.M.P (2003), “Use of a Combined Penetrometer-TDR Moisture Probe for Soil Compaction Studies”, *Embrapa Agricultural Instrumentation*, São Carlos, Brazil, pp8.
 - [20] Vaz C.M.P, Manieri J.M, De Maria I.C, Tuller M (2011), “Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content”, *Geoderma*, 166, p92-101.
 - [21] Wahl, T.L., Regazzoni, P.L., and Erdogan, Z. (2009). “Practical improvements for the hole erosion test”, *Proc. 33rd IAHR Congress*, Vancouver, British Columbia, Canada. 8.