

SỰ MẤT ỔN ĐỊNH CỦA CỌC TRONG VÙNG CÓ ĐỊA TẦNG HOÁ LỎNG DO ĐỘNG ĐẤT

KS. NGUYỄN MINH DŨNG

Văn phòng Dự án Tổng Công ty TVTK GTVT

Theo bản đồ phân vùng động đất, Miền Bắc Việt nam thuộc khu vực có khả năng xảy ra các trận động đất với cường độ lớn (từ cấp 7 trở lên theo thang MSK-64). Do vậy, trong hầu hết các thiết kế công trình cầu, việc tính toán kết cấu dưới tác dụng của tải trọng động đất đã được đề cập. Tuy nhiên, hiện tượng hoá lỏng của địa tầng (đất cát), một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến khả năng chịu lực của kết cấu móng cọc, chưa được xem xét nghiên cứu thấu đáo trong các tính toán thiết kế móng. Trong phần lớn các trận động đất với cường độ lớn đã xảy ra hiện tượng phá hoại móng cọc của các kết cấu nằm trong vùng có địa tầng hoá lỏng mặc dù kết cấu móng đã được thiết kế với độ an toàn khá cao. Bài viết nhằm giới thiệu một số kết quả nghiên cứu có liên quan đến sự làm việc của kết cấu móng cọc trong địa tầng có tính hoá lỏng khi xảy ra động đất.

Trên thế giới, trong nhiều trận động đất lớn đã xảy ra hiện tượng phá hoại cọc của các kết cấu trong vùng có địa tầng hoá lỏng. Nguyên nhân của sự phá hoại là do cọc đã phải chịu mô men uốn và lực cắt lớn hơn khả năng chịu lực của kết cấu cọc được thiết kế theo các quy chuẩn hiện hành, mặc dù các tiêu chuẩn thiết kế này đã đưa ra hệ số an toàn thiết kế khá cao. Do vậy có thể cho rằng các giả thiết, thông số trong tính toán thiết kế không hoàn toàn đúng với cơ cấu phá hoại cọc trong thực tế. Nhiều nghiên cứu đã được tiến hành nhằm tìm ra sự không phù hợp này.

Giả thiết hiện tại về sự phá hoại của cọc

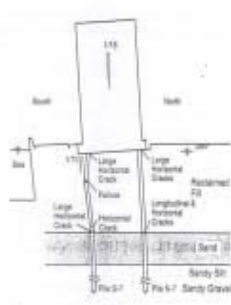
Có thể giải thích sự phá hoại của cọc như sau: tầng đất hoá lỏng, cường độ chịu cắt của lớp đất giảm xuống gần bằng không gây ra hiện tượng “chảy” và kéo theo cùng với nó các lớp đất không chảy lỏng phía trên. Các lớp đất này gây ra chuyển vị của

cọc và cọc bị phá hoại do bị uốn quá lớn. Hiện tượng này thường được đề cập đến như là hiện tượng phá hoại do chuyển vị ngang. Liên quan đến sự tương tác nền-cọc, cơ cấu phá hoại được biết đến phổ biến hiện nay giả thiết rằng đất đẩy cọc (*soil pushes the pile*). Sự biến dạng của nền đất xung quanh móng cọc dường như cũng ủng hộ giả thiết về cơ cấu phá hoại này.

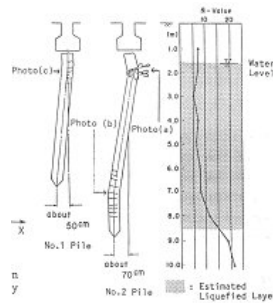
Theo các tác giả của báo cáo được Hội đồng nghiên cứu quốc gia Nhật bản ấn hành năm 1985 (National Research Council, 1985), sự dịch chuyển ngang của đất nền đã được coi là nguyên nhân đầu tiên gây ra sự phá hoại của cọc khi nền đất hoá lỏng. Giả thiết này đã được chấp nhận để giải thích sự phá hoại của cọc trong nhiều trận động đất (Hamada, 1992; Ishihara, 1997; Tokimatsu et al. 1996, 1997, 1998; Goh and O.Rourke, 1999; Finn and Fujita, 2002; Abdoun and Dobry, 2002).



a) Toà nhà Kandla trong trận động đất Bhuj, 2001



b) Toà nhà 3 tầng trong trận động đất Kobe, 1995



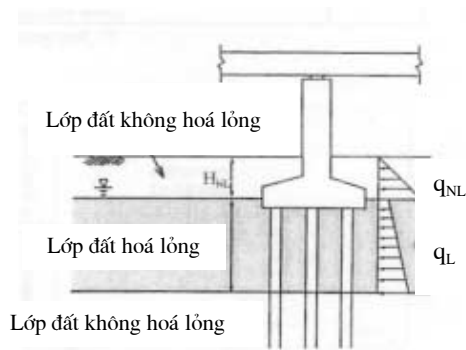
c) Toà nhà NFCH trong trận động đất Niigata, 1964



d) Toà nhà NHK trong trận động đất Niigata, 1964

Hình 1. Phá hoại của móng cọc nhà do hiện tượng hoá lỏng của địa tầng khi xảy ra động đất

Sự thống nhất về giả thiết phá hoại này đã dẫn tới việc Tiêu chuẩn thiết kế đường bộ Nhật bản (Japanese Highway Code of Practice - JRA 1996) đã đưa ra các quy định thiết kế liên quan đến hiện tượng hoá lỏng của đất nền. Tiêu chuẩn này khuyến nghị các kỹ sư thiết kế cần thiết kế cọc chịu uốn với giả thiết rằng lớp đất không hoá lỏng phía trên gây ra áp lực đất bị động đối với cọc và tầng đất hoá lỏng gây ra áp lực đất ngang tương ứng với 30% tổng áp lực đất thẳng đứng (total overburden pressure).



$$q_{NL} = \text{Áp lực đất bị động}$$

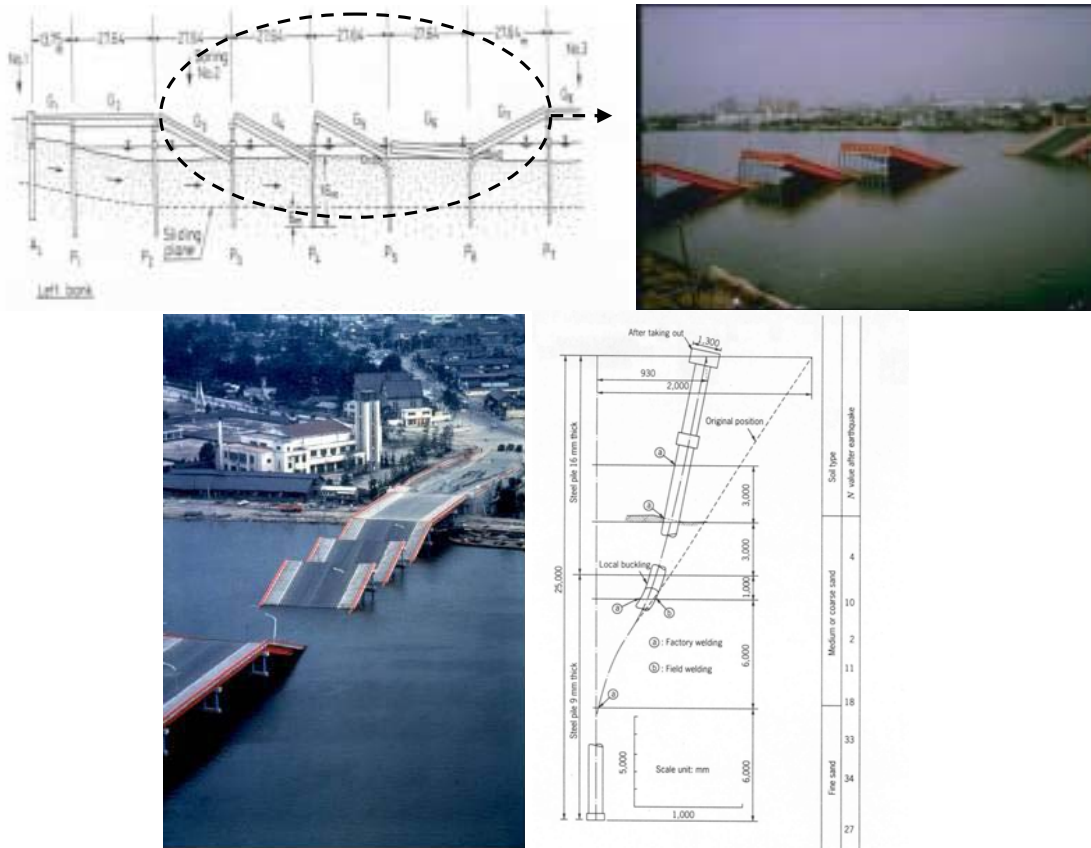
$$q_L = 30\% \text{ of áp lực đất thẳng đứng}$$

Hình 2. Áp lực đất tính toán đối với móng cọc theo JRA (1996)

Giả thiết này được đưa ra sau khi phân tích sự làm việc của các móng cọc của đường cao tốc Hanshin, sau khi các móng cọc này đã không bị hư hại trong trận động đất Kobe năm 1995 (Yokoyama et al, 1997). Một số các tiêu chuẩn khác của Mỹ (NEHRP 2000) và của châu Âu (Eurocode 8, part 5 1998) cũng đã đề cập đến cường độ chịu uốn của cọc dưới tác dụng của lực ngang (áp lực đất và lực quán tính).

Tồn tại trong cách giải thích cơ cấu phá hoại của cọc do động đất tại các khu vực đất nền có tính hoá lỏng

Các số liệu lưu trữ về trường hợp phá hoại cầu Showa trong trận động đất Niigata năm 1964 đã cho thấy các giả thiết trước đây vẫn còn các tồn tại. Các nhà nghiên cứu hầu hết đều cho rằng sự phá hoại kết cấu trong trường hợp này là do chuyển vị ngang của tầng đất (lateral spreading) (Hamada, 1992; Ishihara, 1993).



Hình 3. Sự phá hoại của cầu Showa trong trận động đất Niigata năm 1964

Như vậy, nếu giả thiết trên là đúng thì các trụ phải biến dạng về cùng một phía theo hướng dốc của địa tầng. Tuy nhiên, hình 3 cho thấy các cọc của trụ số 5 biến dạng về phía trái và các cọc của trụ số 6 lại biến dạng về phía phải (Fukoka, 1996; Takata et al., 1965), trong khi các trụ gần bờ lại không bị phá hoại mà theo các số liệu ghi chép thì tại đây sự dịch chuyển ngang của đất là lớn nhất.

Vị trí của khớp dẻo (plastic hinge) do dịch chuyển ngang của đất dự kiến xuất hiện tại bề mặt tiếp xúc lớp đất hoá lỏng và lớp đất không hoá lỏng vì tại mặt cắt này phải chịu mô men lớn nhất. Các số liệu ghi lại cho

thấy sự hình thành khớp dẻo cũng xảy ra tại vị trí một phần 3 phía trên của chiều dài cọc.

Giả thuyết hiện tại về sự phá hoại của cọc do uốn cho rằng cọc ở trạng thái cân bằng ổn định (tức là dao động qua lại và không chuyển vị theo một hướng như trong trường hợp mất ổn định) trong thời gian đất hoá lỏng và trước khi xuất hiện chuyển dịch ngang của đất nền. Nói một cách khác giả thuyết bỏ qua đặc tính kết cấu của cọc.

Đặc tính kết cấu của cọc

Về mặt kết cấu, cọc chịu tải trọng thẳng đứng là một kết cấu có độ mảnh lớn với các

gối tựa ngang là đất nền xung quanh cọc. Khi không tồn tại các gối ngang này, cọc sẽ bị phá hoại do mất ổn định. Các cọc thường được thiết kế với tỉ lệ chiều dài/đường kính $L/D = 25 \div 100$ (Bond, 1989). Hai thí nghiệm nghiên cứu biến dạng uốn của hệ cọc với hệ một hàng cọc và nhóm cọc không xét đến đất nền xung quanh (tỉ lệ $L/D = 280/3 \approx 93$) cho thấy ứng với một tải trọng nhất định hệ cọc mất ổn định và tải trọng này chính là tải trọng giới hạn Euler P_{cr} .

$$P_{cr} = \frac{\pi^2}{L_{eff}^2} EI$$

Trong đó: EI - độ cứng của cọc;
 L_{eff} - chiều dài có hiệu của cọc (chiều dài uốn Euler)

Giả thuyết đề xuất về sự phá hoại của cọc

Trong quá trình đất nền hoá lỏng do động đất, đất xung quanh cọc không tồn tại áp lực đất có hiệu dẫn đến không tồn tại các gối đỡ ngang. Cọc làm việc như các cột hẫng không có liên kết ngang và có xu thế mất ổn định dọc trục. Sự mất ổn định này gây ra uốn ngang theo phương có độ cứng uốn đàn hồi nhỏ nhất và dẫn đến việc xuất hiện khớp dẻo. Tải trọng ngang do lực quán tính và chuyển dịch của đất nền và một số nguyên nhân khác làm tăng biến dạng theo phương ngang của cọc dẫn đến sự phá hoại nhanh hơn của cọc.

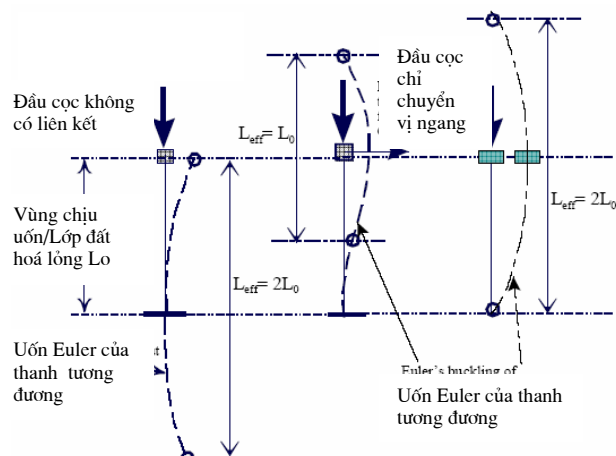
Trái ngược với các giả thuyết hiện tại, giả thuyết về cơ cấu phá hoại cọc này cho rằng cọc đẩy đất nền (*pile pushes the soil*). Giả thuyết này được chứng minh bằng các thí nghiệm lý tâm động được đề cập dưới đây.



Hình 4. Sự phá hoại của nhóm một hàng cọc mô phỏng móng cầu Showa



Hình 5. Sự phá hoại của hệ cọc



Hình 6. Xác định chiều dài có hiệu của cọc

Các thí nghiệm chứng minh giả thiết phá hoại cọc bởi sự mất ổn định do uốn

Mô hình hoá lý tâm động

Hình 1a cho thấy sự phá hoại của toà nhà tại sân bay Kandla trong trận động đất Bhuj năm 2001, toà nhà bị nghiêng 15° ra phía biển. Do động đất xảy ra rất nhanh, cơ cấu phá hoại của nhóm cọc xảy ra dưới móng toà nhà chỉ có thể xác định một cách rõ ràng bằng cách đào hở móng. Mô hình vật lý là một biện pháp thay thế để xác định cơ cấu phá hoại này. Về vấn đề tương tác nền cọc, sự làm việc giống với nguyên trạng được tái tạo thông qua một mô hình thu nhỏ, ứng suất của đất nền sẽ được mô hình hoá một cách chính xác nhằm phản ánh sự làm việc phi tuyến và phụ thuộc ứng suất của đất nền.

Trong thập kỷ trước, một mô hình lý tâm động được coi là một kỹ thuật hữu hiệu để thu thập các số liệu vật lý trong các trận động đất, đồng thời khảo sát các vấn đề tương tác nền cọc nhằm chứng minh cơ cấu phá hoại và các phương pháp thiết kế. Kỹ thuật mô hình vật lý tiên tiến này cho phép thiết lập các mô hình tỉ lệ nhỏ với các trường hợp chất tải phù hợp với thực tế hơn và mức độ mô phỏng ứng suất và biến dạng nguyên trạng chính xác hơn. Một máy lý tâm với tay dầm dài 10m được sử dụng để thực hiện thí nghiệm lý tâm tại Trung tâm Schofield của phòng công trình đại học Cambridge (Cambridge University Engineering Department). Một bàn rung lắc cơ học gọi là máy kích thích SAM do trường đại học Cambridge chế tạo được dùng để tạo ra tải trọng động đất đối với mô hình vật lý (Madabhushi et al 1998).

Mô hình uốn của cọc

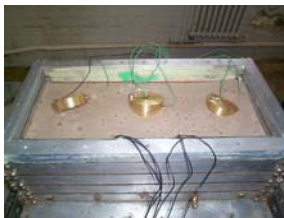
Mục tiêu chính của thí nghiệm lý tâm là chứng minh giả thiết với trường hợp mũi cọc xuyên qua lớp cát xốp đến chặt vừa bão hoà và tựa trên lớp cứng hơn, biến dạng uốn của cọc dưới tác dụng của lực dọc trục đơn thuần có xảy ra hay không trong trường hợp đất nền hoá lỏng do động đất. Kết quả thí nghiệm có thể chứng minh giả thuyết về cơ cấu phá hoại cọc đề cập ở trên. Trong các trận động đất, tải trọng tác động lên cọc chủ yếu là lực dọc trục, lực quán tính và lực chuyển dịch ngang của đất. Sự phá hoại cọc có thể do một trong những lực đó hoặc tổ hợp thích hợp của chúng. Mười hai cọc đã được thí nghiệm theo từng loạt 4 thí nghiệm lý tâm, tách riêng ảnh hưởng của lực quán tính và lực dọc. Tải trọng dọc trục (P) được tác dụng lên cọc bằng một khối đồng gắn trên đỉnh cọc. Khi tăng gia tốc lý tâm, trọng lượng khối đồng làm tăng lực dọc tác dụng lên cọc. Toàn bộ mẫu thử được quay lý tâm tới 50g và lực động đất được tạo ra trong khi quay lý tâm. Ảnh hưởng của lực dọc đơn thuần được nghiên cứu bằng cách sử dụng một khung được thiết kế đặc biệt tạo ra liên kết tại đầu khối nặng chống tác động của lực quán tính.

Tải trọng tác dụng lên cọc dao động trong khoảng 22% đến 148% của tải trọng giới hạn Euler (P_{cr}), cọc làm việc như một cột mảnh bỏ qua tác động ngang của đất. Trong mô hình cũng bố trí các thiết bị đo áp lực thu nhỏ như PPT (Precision Pressure Transducers), LVDT (Linear Variable Differential Transformer), và thiết bị đo gia tốc nhằm xác định phản ứng của đất.

Phân tích kết quả thí nghiệm***Giả thuyết về cơ cấu phá hoại***

Các kết quả thí nghiệm cho thấy các cọc phá hoại với tải trọng thí nghiệm ứng với tỉ lệ $P/P_{cr} \approx 1$. Tải trọng tác dụng trên các cọc số 7, 8 và 10 đơn thuần là lực thẳng đứng. Đầu cọc được giữ trên hướng lắc ngang (không có tác động của lực quán tính) và cọc uốn ngang theo hướng lắc. Cần lưu ý rằng các cọc cùng chịu tải trọng như nhau (tải trọng gây phá hoại) ứng với gia tốc 50-g và ổn định trước khi có tác dụng mô phỏng

động đất. Tại các mặt cắt cọc ứng suất đều nằm trong khoảng làm việc đàn hồi của vật liệu (nhỏ hơn 30% cường độ chảy) tuy nhiên cọc đã bị phá hoại khi có tác dụng động đất. Điều này cho thấy tác dụng đỡ của đất nền đã không tồn tại khi xảy ra hiện tượng hoá lỏng do động đất và cọc bị uốn theo hướng có độ cứng chống uốn đàn hồi nhỏ nhất. Do vậy, có thể cho rằng với trường hợp tải trọng tác dụng lên cọc đủ lớn ($P/P_{cr} \geq 1$) cọc có thể bị phá hoại trước khi có tác động chuyển dịch ngang của đất nền xung quanh do hoá lỏng.



a) Thí nghiệm SB-02



b) Cọc số 3

c) Cọc số 7
khi đào hốd) Cọc số 7 đào
hố hoàn toàne) Cọc số 7 thí nghiệm
không có đất**Hình 7. Phá hoại cọc trong thí nghiệm ly tâm**

Mã thí nghiệm	Cọc số	Tải trọng P (N)	P/A (MPa)	P/P _{cr}	Lực tác dụng	Ghi chú
SB-02	1	768	79	0.97	Thẳng đứng+Quán tính	Phá hoại
Lcọc= 160mm A=9.7 mm ²	2	642	65	1.01	Thẳng đứng+Quán tính	Phá hoại
	3	617	63	0.97	Thẳng đứng+Quán tính	Phá hoại
SB-03 Lcọc= 180mm A = 11.2 mm ²	4	294	26.3	0.5	Thẳng đứng+Quán tính	Không phá hoại
	5	220	19.7	0.35	Thẳng đứng+Quán tính	Không phá hoại
	6	113	10.1	0.22	Thẳng đứng+Quán tính	Không phá hoại
SB-04 Lcọc= 180mm A = 11.2 mm ²	7	610	54.5	1.04	Thẳng đứng	Phá hoại
	8	872	78	1.48	Thẳng đứng	Phá hoại
	9	2249	201	0.25	Thẳng đứng	Không phá hoại
SB-06 Lcọc= 180mm A = 11.2 mm ²	10	735	65.6	1.25	Thẳng đứng	Phá hoại
	11	269	24	0.46	Thẳng đứng+Quán tính	Không phá hoại
	12	441	39.4	0.75	Thẳng đứng+Quán tính	Phá hoại

Tóm tắt kết quả thí nghiệm

VẤN ĐỀ CHUNG

Các cọc của mẫu thí nghiệm SB-02 không có liên kết tại đỉnh cọc và chịu toàn bộ lực quán tính, đầu cọc xoay và dịch chuyển ngang (hình 7a), kết quả thí nghiệm này tương tự như trường hợp phá hoại toà nhà tại sân bay Kandla (hình 1a). Một cọc trong nhóm bị phá hoại do tác dụng động đất (hình 7b). Trong thí nghiệm này, khớp dẻo hình thành tại vị trí một phần ba phía trên cọc tương tự vị trí khớp dẻo hình thành trên cọc của toà nhà 3 tầng trên hình 1b bị phá hoại trong trận động đất Kobe 1995. Kết quả thí nghiệm này cho thấy cơ cấu phá hoại cọc thực tế có thể được mô phỏng thông qua mô hình ly tâm động. Và kết quả thí nghiệm cũng chỉ ra rằng biến dạng uốn có thể là cơ cấu phá hoại cọc tại khu vực có đất nền hoá lỏng khi xảy ra động đất.

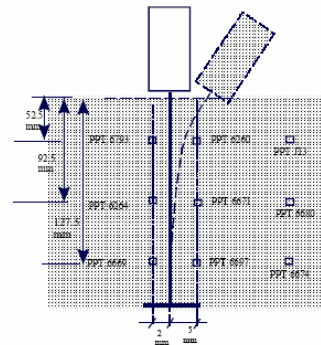
Sức kháng của tầng đất hoá lỏng

Sự khác nhau về mode biến dạng của cọc số 7 trong hai thí nghiệm (hình 7c và 7e) là một điểm đáng lưu ý. Đường biến dạng của cọc tương ứng với mô men uốn cho thấy phần phía dưới của lớp đất hoá lỏng có sức kháng nhất định và làm giảm mô men uốn tại một phần ba thân cọc phía dưới. Do vậy có thể cho rằng ban đầu lớp đất hoá lỏng không ngăn được sự hình thành biến dạng uốn của cọc tuy nhiên sau đó đã tạo ra sức kháng thứ cấp.

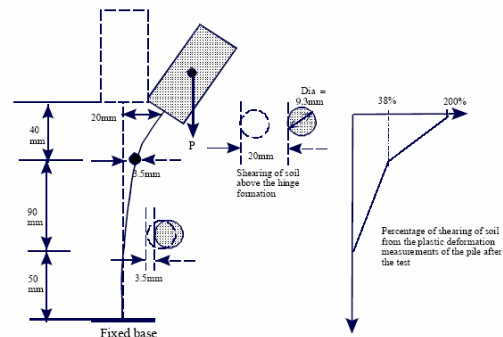
Tương tác nền cọc

Hình 8 mô tả sơ đồ bố trí các thiết bị đo áp lực xung quanh cọc số 8. Lưu ý rằng khi quá trình rung lắc bắt đầu, áp lực lỗ rỗng trong đất tăng lên bắt đầu từ khu vực phía trên sau đó lan xuống phía dưới. Trong các trường hợp, tại thời điểm khoảng 0.2 s sau khi lắc bắt đầu áp lực lỗ rỗng đạt ổn định. Vào khoảng từ 0.5÷1.0 s áp lực ngang có

hiệu tác dụng lên cọc sẽ mất dần từ trên xuống dưới. Khi hiện tượng này xảy ra tại chiều sâu giới hạn H_c cọc sẽ mất ổn định với $L_{eff} = 2H_c$ trong trường hợp cọc không có liên kết tại đỉnh cọc. Sự mất ổn định này gây ra biến dạng theo phương ngang đẩy đất nền. Cùng lúc vị trí áp lực có hiệu bằng không nhanh chóng lan xuống phía dưới cho đến khi toàn bộ chiều dài cọc không chịu tác động của đất nền.



Hình 8. Sơ đồ bố trí thiết bị đo áp lực xung quanh cọc số 8



Hình 9. Chuyển vị đàn hồi của cọc số 8 mẫu thử SB-04

Biến dạng uốn của cọc

Sự khác biệt của biến dạng uốn cổ điển (lý thuyết) và biến dạng uốn của cọc thực tế được thể hiện rõ trên hình 5a,b và hình 7d,e. Theo lý thuyết của biến dạng uốn Euler khớp dẻo xuất hiện tại chân của cọc

hằng, còn với biến dạng uốn của cọc khớp này xuất hiện ở nửa phía trên của cọc.

Rõ ràng là sức kháng nhất định của nền đất hoá lỏng đã cản trở việc phát triển chiều dài uốn trên toàn bộ chiều dài cọc như trong trường hợp thí nghiệm cọc không có đất nền. Phần phía trên có lớp đất hoá lỏng có thể được mô tả chính xác ở trạng thái hoá lỏng và có cường độ chịu cắt bằng không. Phần trên của cọc cũng là vị trí có chuyển vị lớn nhất. Cọc bị uốn dẫn đến giảm độ cứng chống uốn do chảy dẻo. Chuyển vị lớn của bệ cọc dẫn tới mô men uốn cọc tăng lên dẫn tới việc hình thành khớp dẻo trước khi kết cấu bị phá hoại. Cơ cấu phá hoại này được minh hoạ bằng thí nghiệm đơn giản trình bày dưới đây.

Một mô hình tương tự như mô hình được mô tả trên hình 5 có bố trí các ống rỗng bên

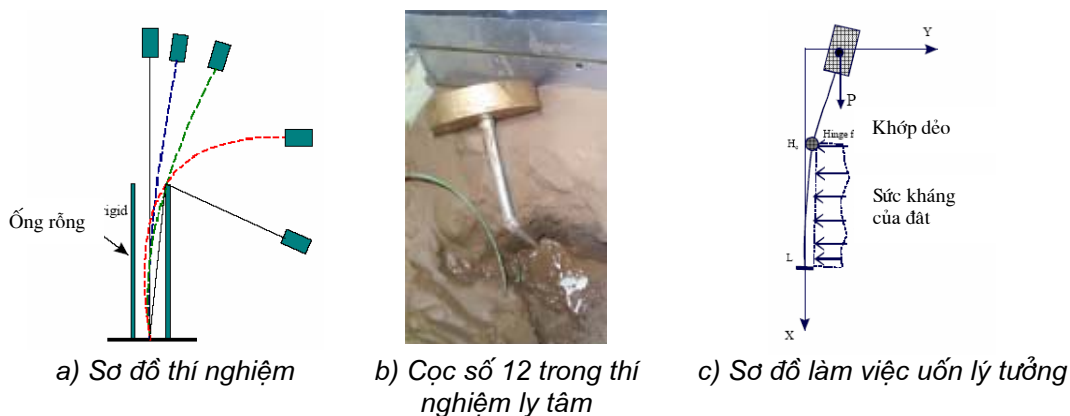
ngoài phía dưới cọc được sử dụng làm thí nghiệm (hình 10). Phần trên của hệ cọc có thể chuyển vị tự do mô phỏng trạng thái đất nền hoá lỏng hoàn toàn. Như đã đề cập ở trên, ban đầu sức kháng của đất nền tác dụng lên cọc được bỏ qua, sau khi chuyển vị của cọc lớn lên, nền đất sẽ hình thành sức kháng nhất định. Việc bố trí các ống rỗng chính là để mô phỏng gần đúng trạng thái làm việc này.

Từ kết quả thí nghiệm có thể rút ra hai nhận xét:

- Với hai trường hợp có và không bố trí các ống rỗng, tải trọng uốn (tải trọng giới hạn) là như nhau;
- Vị trí của khớp dẻo phụ thuộc vào sự làm việc sau khi biến dạng uốn hình thành (post-buckling behavior) và phụ thuộc vào khả năng chịu uốn của cọc sau khi mất ổn định.



Hình 10. Thí nghiệm đơn giản về cơ cấu phá hoại cọc



Hình 11 So sánh thí nghiệm mô hình lý tâm và mô hình đơn giản

Một số kết luận

- Để đảm bảo an toàn khai thác của công trình, trong các tiêu chuẩn thiết kế cần đề cập đến các chỉ tiêu nhằm loại trừ biến dạng uốn do mất ổn định của cọc có độ mảnh lớn trong khu vực có đất nền hoá lỏng khi có tác dụng của động đất.
- Khi thiết kế móng cọc trong vùng có khả năng xảy ra động đất lớn, cần tính toán chiều dài uốn Euler của cọc có xét đến sự làm việc của liên kết bệ cọc. Việc lựa chọn tiết diện cọc cần xét tới khả năng mất ổn định do uốn trong trường hợp tải trọng bất lợi nhất.
- Trong vùng có đất nền hoá lỏng khi có động đất, xem xét phương án móng với số lượng cọc nhỏ nhưng có tiết diện cọc lớn nhằm tránh hiện tượng mất ổn định do uốn.
- Các kết quả thí nghiệm mô hình ly tâm đã giúp đưa ra giả thuyết về tương tác nền cọc trong trường hợp cọc biến dạng uốn. Khi biến dạng, cọc “cắt” vùng đất tiếp xúc, đất vùng này có sức kháng tạm thời nhưng không đủ để ngăn cản sự hình thành khớp dẻo trên cọc dẫn đến sự phá hoại của cọc.
- Đối với các móng cọc hiện hữu nằm trong vùng đất nền có khả năng hoá lỏng khi có động đất lớn cần có các nghiên cứu nhằm đưa ra các biện pháp tăng cường, nếu cần.

Tài liệu tham khảo:

1. Bhattacharya, S., Madabhushi, S.P.G and Bolton, M.D (2002): *An alternative mechanism of pile failure in liquefiable deposits during earthquakes*, Technical report of University of Cambridge, CUED/D-SOILS/TR324 (Oct 2002)
2. Eurocode 8: Part 5 (1998), *Design provisions for earthquake resistance of structures foundations, retaining structures and geotechnical aspects*, European Committee for standardization, Brussels.
3. JRA (1996). Japanese Road Association, *Specification for Highway Bridges, Part V, Seismic Design*.
4. National Research Council (NRC, 1985): *Liquefaction of soils during earthquakes*. Washington, DC: National Academic Press.
5. Schofield, A. N. (1981). *Dynamic and Earthquake Geotechnical Centrifuge Modelling*. Proc. Int. Conf. Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol. 3, 1081-1100.