# Phân tích chuyển vị của vòm vùi bằng bê tông đúc sẵn chịu tác động của động đất

# Displacement analysis of buried precast arch structures subjected to earthquake

TS. Nguyễn Văn Toản<sup>1,\*</sup> và PGS.TS. Trần Quang Huy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Công nghiệp TP. Hồ Chí Minh;

<sup>2</sup>Khoa Xây dựng, Trường Đại học Nha Trang.

\*Tác giả liên hệ: nguyenvantoan@iuh.edu.vn

■Nhận bài: 27/09/2024 ■Sửa bài: 14/11/2024 ■Duyệt đăng: 08/12/2024

# TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, chuyển vị của kết cấu vòm vùi bằng bê tông đúc sẵn dưới tác động của động đất được đánh giá dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn. Một mô hình phần tử hữu hạn ba chiều của kết cấu vòm vùi bằng bê tông đúc sẵn đã được thiết lập tỉ mỉ có xét đến liên kết và tiếp xúc bề mặt của các phân đoạn vòm và tương tác giữa đất-kết cấu bê tông. Quá trình phân tích chuyển vị cũng đề cập và so sánh đến ảnh hưởng của kích thích động đất đến kết cấu vòm theo hai phương của kết cấu vòm (phương dọc và phương ngang). Những phát hiện chính chỉ ra rằng phản ứng của kết cấu vòm là khác nhau giữa hai phương tác động. Bên cạnh đó, phản ứng của kết cấu vòm khi kích thích theo phương dọc chậm hơn so với kích thích theo phương ngang. Đặc biệt, kích thích địa chấn theo phương ngang. Chuyển vị lớn ở vùng đỉnh miệng vòm (cửa vòm), nên khả năng vùng này dễ bị bong tróc và phá hoại hơn so với phần giữa vòm – vùng có chuyển vị ít hơn.

**Từ khóa:** Kết cấu vòm vùi, Phương pháp phần tử hữu hạn, Phân tích động, Tiếp xúc bề mặt, Tương tác đất-kết cấu

# ABSTRACT

In this study, displacement of buried precast arch structures was evaluated in terms of static and earthquake effects based on the Finite Element Analysis. A three-dimensional finite element model of buried precast arch structures was meticulously established, taking into account the linking and surface contact of segmental arches and soil-concrete interaction. The displacement analysis process mentioned and compared the influences of seismic excitation from earthquakes on the arch structure in two directions (longitude and transversal). The crucial findings indicate that the displacement response of the arch structure is different between the two directions of action. In addition, the displacement of the arch structure to longitudinal excitation is smaller and slower than to the transversal. Interestingly, longitudinal seismic excitation possed a higher significant impact, resulting in a higher risk of damage compared with transverse excitation. Larger displacements occur in the arch mouth, therefore the top zone of the arch at the arch mouth (aka the crown) can be considered more susceptible to peel and destruction than the middle of the arch.

**Keywords:** Buried Precast Arch Structures, Contact Surface, Finite Element Analysis, Dynamic Analysis, Soil-Concrete Interaction

# 1. GIỚI THIỆU CHUNG

Những thập kỷ gần đây, thế giới chứng kiến bước nhảy vọt về công nghệ xây dựng,

cơ sở hạ tầng được đẩy mạnh và phát triển nhanh chóng. Những kết cấu được môđun hóa như các cấu kiện đúc sẵn được sử dụng rộng rãi trong các dự án và công trình khác nhau. Đáng chú ý, kết cấu mô-đun đã được ứng dung rông rãi trong phát triển cơ sở ha tầng ngầm và bán ngầm; từ đó, giữ vai trò thiết yếu trong việc kết nối hạ tầng giao thông [1, 2]. Cầu vòm ngầm mô-đun (modular underground arch bridges) hay cầu vòm vùi bằng bê tông đúc sẵn (buried precast arch bridges) và cống vùi bằng bê tông đúc sẵn (buried precast arch culverts) là những dạng điển hình của kết cấu vòm vùi bằng bê tông đúc sẵn (buried precast arch structures, BPAS) [3]. Việc sử dụng các kết cấu bê tông mô-đun hóa trở thành một giải pháp công nghệ trong kết cấu xây dựng; đối với kết cấu vòm vùi bê tông đúc sẵn, các dạng mô-đun và giải pháp kết cấu này mang lại nhiều lợi thế khác nhau về năng suất xây lắp và năng lực làm việc của kết cấu. Điều này bởi vì khả năng san sẻ tải trong và đất đắp hiêu quả của công trình vùi, ví dụ như cầu vòm vùi có khả năng chịu tải trọng cao hơn cầu thông thường [1]. Các dang kết cấu bê tông đúc sẵn mô-đun có một số lợi thế khi lắp dựng cầu vòm vùi, bao gồm các phương pháp thi công dễ dàng hơn, nhanh hơn và dễ kiểm soát chất lượng các cấu kiện trong quá trình chế tạo tại công xưởng. Có sự đa dạng trong các BPAS về phân loại, cấu trúc và chức năng. Từ những ưu điểm về kỹ thuật, BPAS đã và đang có xu hướng được ứng dụng rộng rãi và đa dạng cho nhiều mục đích xây dựng khác nhau. Có thể được kể đến như: hạ tầng dành cho xe cộ, máy bay và người đi bộ; để tạo cảnh quan thiên nhiên; thoát nước, phục vụ kết nối giao thông dân sinh, thoát nước và mục đích quốc phòng, an ninh.

Một số nghiên cứu chỉ ra rằng dạng công trình ngầm hoặc bán ngầm ít bị tổn thương do động đất hơn dạng công trình lộ thiên hoàn toàn [4]. Tuy nhiên, một số nghiên cứu đã ghi nhận thiệt hại do động đất đối với các công trình ngầm; đặc biệt là một số báo cáo ghi nhận rằng nhiều BPAS bị hư hại do động đất mạnh [1, 2, 5, 6]. Hư hại của các BPAS do động đất có thể biểu hiện ở nhiều mặt khác nhau: từ kết cấu vòm, kết cấu móng, tường cánh cho đến phần đất đắp. Một số nghiên cứu đề xuất quy trình phân tích động đất và thiết kế kháng chấn cho các công trình xây dựng [4, 7]. Do đó, việc nghiên cứu ứng xử của kết cấu vòm vùi bê tông đúc sẵn bởi tác động của động đất trở thành một vấn đề đang được quan tâm của các nhà nghiên cứu trên thế giới.

Nghiên cứu này trình bày phương pháp tiếp cận để phân tích chuyển vị của vòm vùi bằng bê tông đúc sẵn chịu tác động của động đất bằng phân tích ngầm động (dynamic implicit analysis). Trước hết, một mô hình phân tích phần tử hữu hạn ba chiều phức tạp (three-dimensional finite element analysis, 3D FEA) được trình bày. Kế đến, mô hình tương tác bề mặt và liên kết của các thành phần kết cấu trong mô hình được diễn giải chi tiết. Tiếp theo, các phân tích động được thực hiện để nghiên cứu chuyển vị động của vòm dưới kích thích địa chấn từ động đất. Cuối cùng, kết luận trọng yếu được rút ra từ nghiên cứu.

# 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

#### 2.1. Bài toán nghiên cứu

Một kết cấu công trình cầu vòm vùi BPAS có đường xe chạy trên với các kích thước hình học được trình bày trong Hình 1 [8], được mô phỏng số với phần tử gạch tám nút (C3D8) bằng cách sử dụng phần mềm ABAQUS [9]. Tổng chiều dài vòm (bán hình tròn) bao gồm tường cánh là 20 m; đường kính ngoài là 10,5 m; đường kính trong là 10 m đủ bề rộng để thiết kế 2 làn xe chạy qua. Kết cấu vòm được tạo thành từ hai loại khối vòm. Các phân đoạn này có bề dày và bán kính trong/ngoài giống hệt nhau, tuy nhiên bề rộng của chúng khác nhau (1,25 m và 0,625 m). Phần kết cấu móng được đặt lên lớp đất nền á sét dày 5 m nằm trên nền đá gốc. Đất đắp vòm bằng á cát có tổng chiều cao đắp là 10,25 m có hệ số mái là 1,5.



Hình 1. Sơ đồ cầu vòm vùi nghiên cứu

Trong bài toán phân tích phần tử hữu hạn, nếu một lưới phần tử quá thô có thể dẫn đến sai lệch kết quả tính toán so với độ chính xác mong đợi, trong khi đó nếu lưới phần tử quá mịn sẽ đòi hỏi thời gian tính toán rất dài, tốn nhiều chi phí thời gian và tài nguyên máy tính. Vì lý do này, một lưới phần tử đủ mịn được sử dụng cho kết cấu bê tông và lưới thô hơn được sử dụng cho đất xung quanh [Hình 2(a)]. Ngoài ra, việc chia lưới với số lượng phần tử tối ưu cần thiết đã được ước tính trước khi thực hiện mô phỏng dựa trên kết quả thử dần mối quan hệ giữa số phần tử chia lưới với độ hội tụ của chuyển vị và thời gian phân tích.



*Hình 2.* Mô hình phần tử hữu hạn và động đất tác động theo các phương

Để đánh giá ứng xử và sức kháng chấn của công trình xây dưng, nhiều nghiên cứu [10-17] đã sử dung phương pháp phân tích lịch sử thời gian; đặc biệt, đối với công trình ngầm và bán ngầm [3, 18-21]. Do đó, có thể thấy phân tích lịch sử thời gian của công trình là một khía cạnh quan trọng trong nghiên cứu đánh giá công trình xây dưng. Ở đây, phản ứng đông của BPAS được mô phỏng dưới chuyển động nền do đông đất thực gây ra [Hình 2(b)], được khuyển nghị để đánh giá sức kháng chấn [22]. Trong nghiên cứu này, phân tích phản ứng địa chấn của BPAS được tính toán bằng bô giải thuật ngầm động (dynamic implicit solver) có sẵn trong ABAQUS cho hai giai đoạn được phân tích: giai đoạn gần như tĩnh (quasi-static stage) và giai đoạn động (dynamic stage). Trước khi áp dụng kích thích địa chấn, giai đoan gần như tĩnh được mô hình hóa để loại bỏ ảnh hưởng của quán tính. Tải trọng bản thân tăng tuyến tính với bước gia tăng nhỏ được áp dung đủ lâu cho đến khi ứng suất/ chuyển vi trong vòm đat đến đô ổn đinh tĩnh. Sau đó, một trận động đất (earthquake, EQ) được gán vào mô hình trong một khoảng thời gian. Để nghiên cứu ứng xử địa chấn, sự dịch chuyển của các mặt bên bị hạn chế trên biên rút gon (truncated boundaries) và môt chuyển động nền được áp dụng ở mặt dưới. Tải trọng lên kết cấu bao gồm trọng lượng bản thân và kích thích đia chấn có gia tốc đỉnh (peak ground acceleration, PGA) là 0,4g từ trận động đất ở Gyeongju, Hàn Quốc [xem Hình 2(b)]. Kích thích địa chấn được áp dụng riêng rẽ theo phương X (ngang vòm) và phương Z (doc vòm), như trong Hình 2(a).



Hình 3. Sơ đồ khảo sát chuyển vị trên vòm

Phân tích lịch sử thời gian của BPAS được tiến hành để đánh giá chuyển vị của kết cấu vòm tại thời điểm bất kỳ chịu tác động địa chấn. Nghiên cứu này đánh giá chuyển vị tại một số vị trí trên kết cấu vỏ hầm, cụ thể tại ba đoạn, bao gồm: miệng vòm (đoạn SEG0625R2), 1/4 vòm (đoạn SEG1250R11) và giữa vòm (đoạn SEG1250R8). Tại mỗi mặt cắt khảo sát, thực hiện đánh giá phản ứng của các nút trong phần tử ở các góc 0 độ (ở chân vòm), 45 độ (ở giữa thân vòm), và 90 độ (ở đỉnh vòm) (xem Hình 3).

#### 2.2. Mô hình tương tác và liên kết

Đối với kết cấu vòm phân đoan, hình dang bề mặt mối nối giữa các phân đoạn (ví dụ: mối nối ngàm âm-dương, mối nối phẳng, mối nối rãnh lưỡi) và tác dung của cốt thép dư ứng lực trong kết cấu vỏ tạo nên khả năng chịu lực cắt tại các bề mặt tiếp xúc của các phân đoạn. Bên canh đó, đất đắp có góc ma sát lớn, được đầm nén chặt tạo ra hiệu ứng vòm bao quanh kết cấu vòm. Do đó, cần phải mô hình hóa chính xác ma sát của các bề mặt tiếp xúc giữa các bộ phận kết cấu của BPAS. Mô hình tiếp xúc bề mặt Coulomb tiêu chuẩn [9] được áp dụng trong nghiên cứu này. Ở dang cơ bản của mô hình tiếp xúc bề mặt Coulomb, hai bề mặt tiếp xúc có thể mang ứng suất cắt lên đến một độ lớn nhất định trên bề mặt tiếp xúc của chúng trước khi chúng bắt đầu trươt tương đối với nhau (xem Hình 4). Mô hình ma sát Coulomb tiêu chuẩn liên quan đến ứng suất cắt do ma sát cho phép tối đa trên bề mặt tiếp xúc với áp suất tiếp xúc giữa các vật thể tiếp xúc.

Mô hình ma sát Coulomb tiêu chuẩn xác định ứng suất cắt tới hạn mà tại đó sự trượt của các bề mặt bắt đầu bằng một phần nhỏ của áp suất tiếp xúc giữa các bề mặt, như phương trình (1). Đối với mô hình ba chiều, hai thành phần trực giao của ứng suất cắt ( $\tau_1$  và  $\tau_2$ ) cùng với mặt tiếp xúc giữa hai vật thể và các thành phần này hoạt động theo các hướng tiếp tuyến cục bộ đối với các bề mặt tiếp xúc hoặc các phần tử tiếp xúc. Hiện tượng trượt có thể xảy ra nếu ứng suất tương đương ở ứng suất tới hạn  $\tau_{eq} = \tau_{crit}$ . Bên cạnh đó, ma sát là đẳng hướng, dẫn đến hướng trượt và ứng suất ma sát trùng với phương trình (3) [9].

$$\tau_{crit} = \max\left(\mu p, \tau_{\max}\right) \tag{1}$$

$$\tau_{eq} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} , \ \dot{\gamma}_{eq} = \sqrt{\dot{\gamma}_1^2 + \dot{\gamma}_2^2} \qquad (2)$$

$$\frac{\tau_i}{\tau_{ea}} = \frac{\dot{\gamma}_i}{\dot{\gamma}_{ea}} \tag{3}$$

Trong đó:  $\tau_{crit}$  là ứng suất cắt tới hạn; plà áp suất tiếp xúc;  $\mu$  là hệ số ma sát đẳng hướng;  $\tau_{max}$  do người dùng chỉ định;  $\tau_{eq}$  là ứng suất cắt tương đương;  $\dot{\gamma}_{eq}$  là tỷ lệ trượt tương đương;  $\tau_1$  và  $\tau_2$  là hai thành phần ứng suất cắt (ứng suất tiếp);  $\dot{\gamma}_i$  là hệ số tốc độ trượt theo hướng i (i = 1,2).



#### Hình 4. Vùng trượt cho mô hình tiếp xúc bề mặt Coulomb tiêu chuẩn [9].

Các liên kết dọc và ngang giữa các phân đoạn vòm bằng các thanh thép dự ứng lực được mô hình hóa bằng cách sử dụng các phần tử lò xo (spring element) [3]. Độ cứng của mối nối bởi thanh thép dự ứng lực bằng độ cứng của phần tử lò xo (xem Hình 5). Độ cứng kéo và nén của thanh cốt thép dự ứng lực được tính bằng cách sử dụng phương trình (4) [3].

$$k = \frac{AE}{L} \tag{4}$$

Trong đó: k là độ cứng tương đương (N/m), A là diện tích mặt cắt ngang của cốt thép (m<sup>2</sup>), E là môđun đàn hồi của vật liệu (Pa), L là chiều dài của cốt thép (m).



Hình 5. Mô hình giản đơn của các thanh dự ứng lực liên kết

## 3. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH VÀ ĐÁNH GIÁ

#### 3.1. Dạng hư hại trên vòm

Hình 6 minh họa dạng chuyển vị của vòm,

có sự so sánh khác nhau giữa hai phương tác động kích thích tại cùng một thời điểm, điều này tương đồng với phát hiện và ghi nhận trong báo cáo nghiên cứu trước đây [1, 8]. Cụ thể, chuyển vị lớn nhất ghi nhận được của vòm bởi kích thích theo phương dọc gấp khoảng 1,45 lần so với phương ngang (2,29cm so với 1,58cm). Có thể thấy đỉnh vòm là vùng có chuyển vị lớn nhất tức là nguy cơ chịu tổn thương nhiều nhất so với các vị trí khác của vòm khi chịu tác động của động đất.



Hình 6. Chuyển vị của vòm dưới tác động của

động đất theo các phương

Xét riêng ở phần đỉnh vòm, vùng đỉnh vòm ở cửa vòm dễ bị bong tróc và phá hoại hơn so với phần giữa vòm. Do đó, vùng cửa vòm được nhận định là vùng xung yếu nhất. Trong khi đó, phần chân vòm tương đối ổn định trong suốt quá trình chịu động đất. Đỉnh vòm ở khu vực giữa vòm đều có sự chuyển vị khống đáng kể trong cả hai hướng tác động của động đất. Điều này bởi vì hiệu ứng vòmđất có tính đối xứng giúp tăng cường sức kháng chấn của vòm.

# 3.2. Phản ứng chuyển vị của vòm theo thời gian

Hình 7 biểu diễn lịch sử thời gian của chuyển vị và gia tốc của chuyển động tại các vi trí được đánh giá (mặt mặt cắt cửa vòm: đỉnh vòm và thân vòm) chịu kích thích động đất theo phương dọc vòm (phương Z). Như có thể thấy từ các hình, về tổng thể, có một độ trễ hơn trong phản ứng của kết cấu vòm ở so với kích thích đầu vào. Nguyên nhân của độ trễ lớn này có thể là: thứ nhất là kết cấu công trình lớn, quán tính lớn; thứ hai là vật liêu truyền động lên kết cấu vòm là đất nền có độ cứng thấp và có tính cản nhớt lớn. Tuy nhiên, gia tốc chuyển đông của kết cấu vòm đat được lớn hơn PGA của sóng kích thích. Ngoài ra, kết cấu hầu như không có phản ứng phương ngang (phương X). Ngoài ra, độ dịch chuyển không gian tại nút đỉnh miệng vòm khác so với nút tai vi trí giữa vòm. Cu thể, nút đỉnh miệng vòm dịch chuyển dọc theo phương dọc và dịch chuyển xuống dưới, trong khi nút đỉnh giữa vòm lai dich chuyển lên trên. Chuyển vị theo phương dọc vòm (Uz = U3) tại đỉnh vòm bởi kích thích theo phương dọc gần như gấp đôi tại thân vòm, trong khi chuyển vị theo phương thẳng đứng (Uy = U2) gần như tương đồng nhau [xem Hình 7(c) và (d)].



(a) Gia tốc lớn nhất tại nút đỉnh vòm, góc 90 độ



(b) Gia tốc lớn nhất tại nút thân vòm, góc 45 độ



(c) Chuyển vị lớn nhất tại nút đỉnh vòm, góc 90 độ



(d) Chuyển vị lớn nhất tại nút thân vòm, góc 45 độ



Trong trường hợp kích thích ngang, Hình 8 cho thấy lịch sử thời gian của chuyển vị và gia tốc không gian tại các vị trí được đánh giá (mặt mặt cắt cửa vòm: đỉnh vòm và thân vòm) chịu kích thích động đất theo phương ngang vòm (phương X). Khác với phản ứng của vòm khi chiu kích thích theo phương dọc, phản ứng của vòm được đánh giá tương đối cùng pha với chuyển động mặt đất đầu vào; tuy nhiên, độ lớn gia tốc phản ứng tối đa nhỏ hơn PGA. Bên cạnh đó, phản ứng theo phương dọc (phương Z) là nhỏ hơn nhiều lần so với hai phương khác. Không có nhiều khác biệt giữa phản hồi của vị trí cửa vòm và các vị trí giữa vòm. Ngược lại với những điều ghi nhận được bởi kích thích theo phương dọc: Chuyển vị theo phương dọc vòm (Uz = U3) tại đỉnh và thân vòm bởi kích thích theo phương ngang

gần như tương đồng nhau. Hơn nữa, chuyến vị theo phương thẳng đứng (Uy = U2) tại đỉnh vòm bởi kích thích theo phương ngang gần gấp 1,75 lần so với tại thân vòm [xem Hình 8(c) và (d)].



(a) Gia tốc lớn nhất tại nút đỉnh vòm, góc 90 độ



(b) Gia tốc lớn nhất tại nút thân vòm, góc 45 độ



(c) Chuyển vị lớn nhất tại nút đỉnh vòm, góc 90 độ



(d) Chuyển vị lớn nhất tại nút thân vòm, góc 45 độ

Hình 8. Gia tốc và chuyển vị lớn nhất trên đỉnh vòm dưới tác động của động đất theo phương ngang vòm

## 4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Phản ứng chuyển vị của kết cấu vòm BPAS dưới kích thích địa chấn được đánh giá thông qua cả phân tích tĩnh và động bằng cách sử dụng ABAQUS [9], xem xét tác động tương tác/liên kết giữa các phân đoạn và giữa các khối vật liệu khác nhau. Vì vậy, nghiên cứu này trình bày một cách tiếp cận khả thi để đánh giá chuyển vị của vòm. Nhìn chung, ABAQUS là một công cụ thiết thực để điều tra nhiều khía cạnh của kết cấu vùi. Các kết luận chính có thể được rút ra từ nghiên cứu này như sau:

(1) Kết quả phân tích mô hình cho thấy rằng chuyển vị của vòm không giống nhau khi chịu kích thích động đất khác nhau đối với các hướng khác nhau. Điều này có thể nhận định rằng độ cứng kháng chấn tổng thể của phương dọc và phương ngang vòm là không giống nhau.

(2) Kích thích địa chấn theo phương dọc cho thấy những tác động đáng kể và có nguy cơ gây hư hại cao hơn đối với kết cấu vòm với kích thích địa chấn theo phương ngang, đặc biệt đối với hầm vòm có chiều dài ngắn. Do đó, thiết kế kháng chấn của BPAS nên được xem xét theo tất cả các hướng tác động. Thậm chí, cần có sự xem xét các trường hợp chịu kích thích đồng thời cả hai phương tác động.

(3) Đỉnh miệng vòm có xu thế dịch chuyển dọc theo phương dọc và dịch chuyển xuống dưới, trong khi nút đỉnh giữa vòm lại dịch chuyển lên trên khi chịu tác động của địa chất theo phương dọc. Trong khi đó, không có nhiều khác biệt giữa phản hồi của vị trí cửa vòm và các vị trí giữa vòm nếu tải tác động theo phương ngang vòm. Đặc biệt, có phần trái ngược nhau đối với chuyển vị (Uy và Uz) tại đỉnh và thân vòm bởi hai phương kích thích: theo phương ngang và phương dọc.

(4) Từ những vấn đề ở trên, có thể rút ra một khuyến nghị cho việc thiết kế cốt thép dự ứng lực là cần đặc biệt chú ý đến những vùng trong kết cấu vòm dễ xuất hiện biến dạng hoặc chuyển vị lớn. Các khu vực dễ bị tổn thương như đỉnh vòm; đặc biệt là khu vực cửa vòm (lối vào) nên được bố trí nhiều thanh cốt thép dự ứng lực hơn các khu vực khác.

Hơn nữa, việc phát triển nghiên cứu thực nghiệm trên bàn rung trong tương lai có thể

nên xem xét để đánh giá ứng xử của BPAS.

# TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. Abe and M. Nakamura, "The use of and the caution in the application of the culvert constructed by large pre-cast element in the expressway construction," *Found Eng Equip*, vol. 42, no. 4, pp. 8-11, 2014.
- [2] Y. Miyazaki, "Fundamental study on seismic behavior of hinge types of precast arch culverts in culvert longitudinal direction," Doctoral dissertation, Kyoto University, 2019.
- [3] V.-T. Nguyen, J. Seo, J.-H. Ahn, A. Haldar, and J. Huh, "Finite element analysis-aided seismic behavior examination of modular underground arch bridge," *Tunnelling Underground Space Technology*, vol. 118, p. 104166, 2021.
- [4] Y. M. Hashash, J. J. Hook, B. Schmidt, I. John, and C. Yao, "Seismic design and analysis of underground structures," *Tunnelling Underground Space Technology*, vol. 16, no. 4, pp. 247-293, 2001.
- [5] H. Yu, J. Chen, A. Bobet, and Y. Yuan, "Damage observation and assessment of the Longxi tunnel during the Wenchuan earthquake," *Tunnelling Underground Space Technology*, vol. 54, pp. 102-116, 2016.
- [6] W. Wang, T. Wang, J. Su, C. Lin, C. Seng, and T. Huang, "Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake," *Tunnelling underground space technology*, vol. 16, no. 3, pp. 133-150, 2001.
- [7] V.-T. Nguyen, J.-H. Ahn, A. Haldar, and J. Huh, "Fragility-based seismic performance assessment of modular underground arch bridges," *Structures*, vol. 39, pp. 1218-1230, 2022/05/01 2022.
- [8] Y. Miyazaki, Y. Sawamura, K. Kishida, and M. Kimura, "Elasto-plastic 3D FE analysis of the seismic behavior in culvert longitudinal direction of three-hinge type of precast arch culverts," in *Advances in Computer Methods and Geomechanics*: Springer, 2020, pp. 223-235.
- [9] V. Abaqus, *6.20 Documentation* (Dassault Systemes Simulia Corporation). Dassault Systemes Simulia Corporation, 2020.

- [10] B. Dastjerdy, R. Hasanpour, and H. Chakeri, "Cracking Problems in the Segments of Tabriz Metro Tunnel: A 3D Computational Study," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 1959-1974, 2018/08/01 2018.
- [11] Z. Zhong, Y. Shen, M. Zhao, L. Li, X. Du, and H. Hao, "Seismic fragility assessment of the Daikai subway station in layered soil," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 132, p. 106044, 2020.
- [12] C. Zhao, N. Yu, Y. Oz, J. Wang, and Y. L. Mo, "Seismic fragility analysis of nuclear power plant structure under far-field ground motions," *Engineering Structures*, vol. 219, p. 110890, 2020/09/15 2020.
- [13] C. Zhang, M. Zhao, Z. Zhong, and X. Du, "Seismic Intensity Measures and Fragility Analysis for Subway Stations Subjected to Near-fault Ground Motions with Velocity Pulses," *Journal of Earthquake Engineering*, pp. 1-27, 2021.
- [14] F. I. Shalabi, E. J. Cording, and S. L. Paul, "Concrete segment tunnel lining sealant performance under earthquake loading," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 31, pp. 51-60, 2012/09/01/ 2012.
- [15] C. Shi, C. Cao, M. Lei, L. Peng, and J. Shen, "Time-dependent performance and constitutive model of EPDM rubber gasket used for tunnel segment joints," *Tunnelling* and Underground Space Technology, vol. 50, pp. 490-498, 2015/08/01/ 2015.
- [16] D. H. Tavares, J. E. Padgett, and P. Paultre,

"Fragility curves of typical as-built highway bridges in eastern Canada," *Engineering Structures*, vol. 40, pp. 107-118, 2012.

- [17] J. Pan, Y. Xu, F. Jin, and J. Wang, "Seismic stability assessment of an arch damfoundation system," *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, vol. 14, no. 3, pp. 517-526, 2015/09/01 2015.
- [18] L. P. Rogers and J. Seo, "Vulnerability sensitivity of curved precast-concrete I-girder bridges with various configurations subjected to multiple ground motions," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 22, no. 2, p. 04016118, 2017.
- [19] Y. Sawamura, H. Ishihara, Y. Otani, K. Kishida, and M. Kimura, "Deformation behavior and acting earth pressure of three-hinge precast arch culvert in construction process," *Underground Space*, vol. 4, no. 3, pp. 251-260, 2019.
- [20] S. Argyroudis and K. Pitilakis, "Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits," *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, vol. 35, pp. 1-12, 2012.
- [21] D. G. Anderson, G. R. Martin, I. P. Lam, and J. N. J. Wang, "NCHRP REPORT 611: Seismic analysis and design of retaining walls, buried structures, slopes, and embankments," Transportation Research Board0309117658, 2008, vol. 611.
- [22] AASHTO, "LRFD Seismic Analysis and Design of Bridges Reference Manual," in American Association of State Highway and Transportation Officials, ed. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2017.