

# ẢNH HƯỞNG CỦA NƯỚC NGẤM ĐẾN ĐỘ BỀN HÓA HỌC CỦA HỖN HỢP ĐẤT GIA CỔ

Trần Văn Quân<sup>1</sup>

## TÓM TẮT

Gia cố đất bằng các chất kết dính vô cơ được sử dụng ngày càng rộng rãi trong nhiều công trình xây dựng hiện nay. Xi măng là chất kết dính vô cơ được sử dụng nhiều trong việc gia cố đất hiện nay. Các sản phẩm thủy hóa xi măng đem lại khả năng cải tạo cường độ đất là C-S-H và C-A-S-H (Straelingite) có khả năng bị hòa tan trong môi trường xâm thực như nước ngầm với pH thấp có tính chất axit, làm ảnh hưởng đến độ bền của hỗn hợp đất gia cố. Do vậy, đã tập trung vào nghiên cứu độ bền của hỗn hợp đất gia cố có sử dụng vôi, xi măng và puzzolan tự nhiên. Mô hình truyền chất và phản ứng được sử dụng để mô tả cơ chế tương tác giữa nước ngầm và các khoáng trong hỗn hợp đất gia cố. Kết quả mô hình cho thấy độ rỗng của hỗn hợp đất gia cố tăng lên 20% sau 10 năm do sự hòa tan của khoáng C-A-S-H và Portlandite, đồng thời không có khoáng mới được kết tủa. Các khoáng cải thiện tính chất cơ học chủ yếu cho hỗn hợp đất gia cố là các khoáng C-S-H, các khoáng này vẫn bền sau 10 năm tiếp xúc với nước ngầm của hỗn hợp đất gia cố

**Từ khóa:** Đất gia cố, xi măng, mô hình truyền chất, phản ứng, độ bền, độ rỗng, nước ngầm.

### 1. MỞ ĐẦU

Các công trình xây dựng đều sử dụng đất hoặc làm nền móng, do đó gia cố đất thường được thực hiện trong quá trình xây dựng. Gia cố đất có hai mục đích chính là (1) cải thiện tính chất cơ lý của đất bản địa có bao gồm lực dính và các tính chất cường độ khác của đất nhằm phù hợp với yêu cầu kỹ thuật của công trình xây dựng; (2) cải thiện độ bền của vật liệu gia cố thông qua cải thiện hệ số thấm của hỗn hợp đất gia cố cũng như thành phần khoáng của hỗn hợp vật liệu được gia cố. Để gia cố đất, các hợp chất vô cơ xi măng, tro bay hoặc puzzolan tự nhiên để cải thiện tính chất cơ lý hóa của đất [1], [3]. Nguyễn và nnk [1], [2] đã sử dụng hỗn hợp xi măng, vôi và puzzolan tự nhiên để gia cố đất phục vụ làm nền đường nông thôn. Trong các nghiên cứu này, Nguyễn và nnk cũng đã cho thấy khả năng cải tạo tính chất cơ lý hóa của đất được gia cố thông qua hình thành các khoáng mang tính chất cơ học như canxi silicate thủy hóa C-S-H, C-A-S-H nhờ các phản ứng puzzolan hóa.

Tuy nhiên đất gia cố có độ rỗng cũng như hệ số thấm lớn hơn bề tổng rất nhiều do vậy độ bền hóa học của các khoáng chất cơ học như C-S-H và C-A-S-H sẽ bị suy giảm về thời gian nhanh chóng hơn so với trong môi trường bề tổng xi măng. Do vậy khi tiếp xúc với nước ngầm hoặc nước mưa, các khoáng giúp cải thiện tính chất cơ lý hóa của hỗn hợp đất gia cố có nguy cơ bị phá hủy từ đó làm suy giảm cường

độ (lực dính, góc nội ma sát, cường độ chịu nén) ảnh hưởng đến khả năng làm việc của công trình (khả năng công tác của nền đường). Do vậy nghiên cứu độ bền của thành phần khoáng trong hỗn hợp đất gia cố dưới các tác nhân của nước dưới đất, hoặc nước mưa là điều cần thiết để có thể dự đoán được thời gian cần để bảo trì công trình.

Để có thể dự đoán được độ bền của hỗn hợp khoáng có trong đất gia cố, cần mô tả được các hiện tượng vật lý hóa học diễn ra trong môi trường đất gia cố. Với giả thiết hỗn hợp đất gia cố được sử dụng làm nền đường, trong môi trường bão hòa nước hoàn toàn do đó trao đổi chất giữa hỗn hợp đất gia cố và môi trường ngoài là không áp. Hỗn hợp đất gia cố sẽ đồng thời diễn ra quá trình trao đổi chất với môi trường nước dưới đất thông qua hiện tượng khuếch tán và đồng thời tương tác giữa nước dưới đất và đất gia cố cũng sẽ diễn ra. Để đồng thời tính toán được hai hiện tượng này, một mô hình số tên gọi "truyền chất và phản ứng" sẽ được phát triển dựa trên nghiên cứu để xuất mô hình nhiệt động học của Nguyễn và nnk. [1], [4]. Mô hình truyền chất và phản ứng sẽ kết hợp đồng thời mô hình nhiệt động học và mô hình đồng lực phản ứng để có thể xét đến sự thay đổi theo thời gian của các khoáng trong hỗn hợp. Do đó trong nghiên cứu này sẽ xem xét độ bền hóa học của hỗn hợp khoáng đã được nêu trong nghiên cứu của Vu và nnk [3] khi tiếp xúc với nước dưới đất. Các phương trình cơ bản, kết quả mô hình và thảo luận sẽ được trình bày trong những phần tiếp theo.

<sup>1</sup> Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải  
E.mail: quantv@ut.edu.vn

**2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT MÔ HÌNH TRUYỀN CHẤT VÀ PHẢN ỨNG, HÌNH HỌC MÔ HÌNH**

**2.1. Lý thuyết mô hình truyền chất theo định luật 2 của Fick**

Trong môi trường bão hòa, tuân theo định luật bảo toàn khối lượng và định luật 2 của Fick, nồng độ một chất j tuân theo phương trình sau:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + p_i \quad (1)$$

Trong đó,  $C_i$  là nồng độ ion  $i$  có trong dung dịch;  $D_i$  hệ số khuếch tán hiệu quả trong môi trường hỗn hợp đất gia cố;  $x$  là chiều sâu;  $p_i$  là phản nồng độ các ion có mặt trong thành phần khoáng tham gia phản ứng,  $p_i$  dương nếu là phản ứng hòa tan và âm nếu phản ứng kết tủa.  $p_i$  được xác định thông qua các cơ chế cân bằng nhiệt động học phản ứng và động lực học phản ứng.

**2.2. Lý thuyết nhiệt động học phản ứng**

Sự tương tác của các ion với các khoáng dẫn đến sự hòa tan khoáng cũ và kết tủa các khoáng mới. Độ bão hòa  $\Omega_m$  của khoáng  $m$  được biểu diễn bởi phương trình 2:

$$\Omega_m = K_{s,m}^{-1} \prod_{j=1}^{N_c} (y_j C_j)^{\nu_{mj}} \quad m = 1, \dots, N_p \quad (2)$$

Trong đó,  $K_{s,m}$ : hằng số cân bằng của khoáng  $m$ ;  $\nu_{mj}$ : hệ số cân bằng;  $y_j$ : hệ số độ hoạt động của chất cơ bản  $j$ ;  $C_j$ : nồng độ chất  $j$  trong dung dịch (mol/kg nước);  $N_c$ : số lượng chất cơ bản;  $N_p$ : số lượng khoáng dưới cân bằng nhiệt động học.

$$k = k_{s,n}^{n_s} \exp \left[ \frac{-E_{s,n}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right) \right] + \sum_j k'_{j,s} \exp \left[ \frac{-E'_{j,s}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right) \right] a_j^{n_{j,s}} \quad (5)$$

Trong đó,  $n$  là cơ chế trung tính với pH=7;  $a$  là độ hoạt động của các ion mà tốc độ phản ứng phụ thuộc;  $n$  là hệ số mũ;  $E_n$  là năng lượng kích hoạt;  $T$  là nhiệt độ.

**2.4. Hình học mô hình**

Đất gia cố trong nghiên cứu của Vu và nnk [3] có thành phần là các khoáng thủy hóa xi măng, thành phần còn lại của puzzolan tự nhiên khi tham gia phản ứng puzzolan hóa và các thành phần khoáng khác của đất, các khoáng này được trình bày trong bảng 1.

Trạng thái cân bằng hay không cân bằng của các khoáng trong dung dịch được mô tả thông qua chỉ số bão hòa IS (Index of Saturation):

$$IS_m = \log \Omega_m = 0 \quad (3)$$

Đối với một khoáng, nếu  $IS=0$ , dung dịch ở trạng thái bão hòa, khoáng cân bằng không kết tủa, không hòa tan. Nếu  $IS<0$ , dung dịch ở trạng thái dưới bão hòa, khoáng tiếp tục bị hòa tan. Trong trường hợp cuối cùng,  $IS > 0$ , dung dịch trên bão hòa, hiện tượng kết tủa khoáng xảy ra.

**2.3. Lý thuyết động lực học phản ứng**

Động lực học phản ứng là lý thuyết mô tả tốc độ phản ứng, như phản ứng hòa tan hoặc kết tủa của một chất. Trong mô hình truyền chất và phản ứng, mô hình mô tả tốc độ phản ứng của Lasaga và nnk [5] được đề xuất:

$$r_n = f(c_1, c_2, \dots, c_{N_c}) = \pm k_n A_n \left| 1 - \Omega_n^{\theta} \right|^n \quad (4)$$

$$n = 1 \dots N_q$$

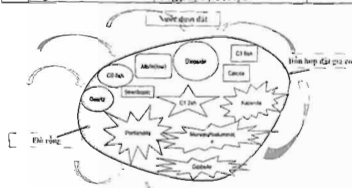
Trong đó, các giá trị dương của  $r_n$  biểu thị sự hòa tan và giá trị âm là kết tủa,  $k_n$  là hằng số tốc độ phản ứng (số mol trên một đơn vị diện tích bề mặt khoáng và đơn vị thời gian),  $A_n$  là diện tích bề mặt phản ứng cụ thể trên mỗi kg H<sub>2</sub>O. Có thể thấy phương trình 4 phụ thuộc vào độ bão hòa của khoáng  $\Omega_n$  được xác định trong phương trình 1.

Hằng số tốc độ phản ứng  $k$  phụ thuộc vào nhiệt độ và độ hoạt động hóa học các ion khác được biểu diễn thông qua phương trình 5:

Hình 1 mô tả cơ chế tương tác giữa nước dưới đất và các khoáng có trong hỗn hợp đất gia cố. Thông qua cơ chế truyền chất, nước trong đất xâm thực vào hỗn hợp đất gia cố thông qua các lỗ rỗng và bắt đầu tạo ra quá trình mất cân bằng giữa các khoáng và dung dịch nước dưới đất, từ đó khiến các khoáng bị hòa tan và một số khoáng mới sẽ kết tủa. 12 khoáng ban đầu (Bảng 1) sẽ tham gia vào quá trình cân bằng được biểu diễn trong hình 1, một số khoáng có khả năng kết tủa là Brucite Mg(OH)<sub>2</sub>, Etringite Ca<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>2</sub>.(H<sub>2</sub>O)<sub>26</sub>, Thaumastite CaSiO<sub>3</sub>.CaCO<sub>3</sub>.CaSO<sub>4</sub>.15H<sub>2</sub>O

Bảng 1. Thành phần khoáng có trong 1dm<sup>3</sup> hỗn hợp đất gia cố

Stt	Khoáng	Công thức	Tỷ lệ thể tích
1	Albite (low)	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0,0158
2	Diopside	CaMg(SiO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,0136
3	Quartz(alpha)	SiO <sub>2</sub>	0,0414
4	Kaolinite	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (OH) <sub>4</sub>	0,2395
5	Gibbsite	Al(OH) <sub>3</sub>	0,5844
6	Portlandite	Ca(OH) <sub>2</sub>	0,0473
7	Calcite	CaCO <sub>3</sub>	0,0031
8	Monosulfoaluminate	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>11</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,0027
9	C1.6sh	Ca <sub>1,6</sub> (SiO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>2,58</sub>	0,0325
10	C1.2sh	Ca <sub>1,2</sub> (SiO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>2,06</sub>	0,0145
11	C0.8sh	Ca <sub>0,8</sub> (SiO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>1,54</sub>	0,0038
12	Straetlingite	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (OH) <sub>10</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>13</sub>	0,0168
13	Hydrotalcite	Mg <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (OH) <sub>10</sub> H <sub>2</sub> O	0,1408



Hình 1. Cơ chế tương tác nước dưới đất và các khoáng có trong hỗn hợp đất gia cố

Ngoài ra thành phần hóa học nước dưới đất được trình bày trong bảng 2 được lấy từ nghiên cứu của Jacques và nnk [6]:

Bảng 2. Thành phần hóa học của nước ngầm được hình thành từ nước mưa [6]

Thành phần ion	Nồng độ (mol/l)
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	2,67x10 <sup>-4</sup>
Ca <sup>2+</sup>	5,35x10 <sup>-5</sup>
Cl <sup>-</sup>	1,82x10 <sup>-4</sup>
K <sup>+</sup>	2,94x10 <sup>-5</sup>
Na <sup>+</sup>	1,79x10 <sup>-4</sup>
Mg <sup>2+</sup>	2,27x10 <sup>-5</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,67x10 <sup>-3</sup>
Al <sup>3+</sup>	1,02x10 <sup>-5</sup>
pH	3,34

### 2.5. Tham số tốc độ phản ứng

Các tham số tốc độ phản ứng được trích dẫn từ các nghiên cứu của Tran và nnk [7], Baur và nnk

[8], Palandri và nnk [9]. Bảng 3 liệt kê các tham số của tốc độ phản ứng các khoáng sử dụng trong mô hình.

Bảng 3. Các tham số cho mô hình động lực học phản ứng

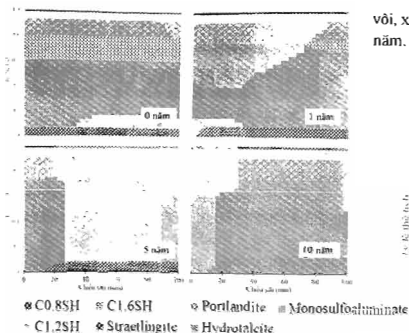
Stt	Khoáng	k(mol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )	A(m <sup>2</sup> /g)
1	Albite (low)	2.75x10 <sup>-13</sup>	0.00098
2	Diopside	7.76x10 <sup>-12</sup>	0.00098
3	Quartz(alpha)	3.98x10 <sup>-14</sup>	0.00098
4	Kaolinite	6.61x10 <sup>-14</sup>	0.00098
5	Gibbsite	3.16x10 <sup>-12</sup>	0.00098
6	Portlandite	2.24x10 <sup>-8</sup>	16.5
7	Calcite	1.55x10 <sup>-6</sup>	0.00098
8	Monosulfoaluminate	6.76x10 <sup>-12</sup>	5.7
9	C1.6sh	2.75x10 <sup>-12</sup>	41
10	C1.2sh	2.75x10 <sup>-12</sup>	41
11	C0.8sh	2.75x10 <sup>-12</sup>	41
12	Straetlingite	2.75x10 <sup>-12</sup>	41
13	Ettringite	7.08x10 <sup>-14</sup>	9.8
14	Thaumasite	Tức thì	-
15	Brucite	Tức thì	-
16	Hydrotalcite	Tức thì	-

Các khoáng được giả sử có tốc độ hòa tan bằng với tốc độ kết tủa. Hydrotalcite, Thaumasite và Brucite có tốc độ phản ứng nhanh, tuân theo lý thuyết nhiệt động học phản ứng.

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Xét đến 10 cm chiều sâu lớp hỗn hợp đất gia cố bảo hòa trong môi trường nước ngầm ở nhiệt độ 25°C. Kết quả mô phỏng trong 10 năm được trình bày trong phần tiếp theo. Hình 2 cho thấy sự thay đổi rõ rệt của một số khoáng xi măng thủy hóa có trong hỗn hợp đất.

Nhận thấy khoáng portlandite bị hòa tan với lượng lớn trong năm đầu tiên, chiều sâu bị hòa tan lên đến 60 mm từ mặt tiếp xúc với nước ngầm. Điều này là do hiện tượng rửa trôi gây ra bởi môi trường nước ngầm có pH thấp và nồng độ Ca<sup>2+</sup> thấp, dẫn đến khoáng portlandite có hệ số cân bằng thấp nên dễ bị hòa tan đầu tiên. Sau 5 năm, khoáng portlandite bị hòa tan hoàn toàn cùng với monosulfoaluminate.



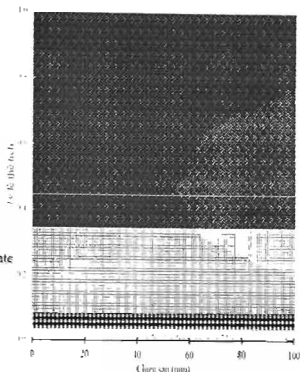
Hình 2. Sự thay đổi của các khoáng xi măng thủy hóa trong hỗn hợp đất gia cố

Xét đến các thành phần cải thiện tính chất cơ học của hỗn hợp đất gia cố là C-SH và C-A-SH (Straelingite). Sau 5 năm, straelingite mới chỉ bị hòa tan ở gần 20 mm đầu tiên từ mặt tiếp xúc với nước ngầm. Tuy nhiên 5 năm sau, khoáng straelingite đã bị hòa tan hoàn toàn ở năm thứ 10 trong môi trường nước ngầm. Các khoáng C-SH vẫn tương đối ổn định, lượng hòa tan rất thấp. Cũng tương tự vậy, các khoáng còn lại của đất gia cố tương đối ổn định với lượng khoáng bị hòa tan tương đối thấp dù sau 10 năm tiếp xúc với nước ngầm (Hình 3), điều này phù hợp với bản chất của các khoáng. Có thể nhận thấy gibbsite, kaolinite, quartz (alpha), diopside và albite là các thành phần khoáng tồn tại trong đất và puzolan tự nhiên. Các khoáng này trở hóa học trong quá trình thủy hóa xi măng và puzolan hóa diễn ra.

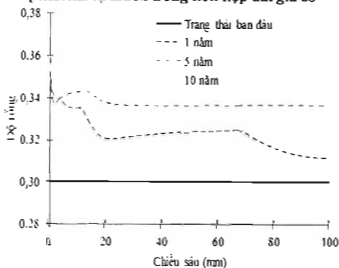
Hình 4 cho thấy việc các khoáng portlandite, straelingite bị hòa tan gây ra việc tăng độ rỗng tại bề mặt, khoảng 2 mm từ mặt tiếp xúc với môi trường nước ngầm. Ngoài ra theo thời gian độ rỗng của hỗn hợp đất gia cố tăng dần từ 0,30 lên 0,36 sau 10 năm, tăng 20%. Điều này là do các khoáng như portlandite, straelingite bị hòa tan mà không có các khoáng mới được kết tủa bổ sung.

Việc straelingite bị hòa tan ảnh hưởng phần nào tới cường độ của hỗn hợp đất gia cố, tuy nhiên khoáng đóng góp lớn vào khả năng cải thiện cường độ của hỗn hợp đất là các khoáng nhôm C-SH. Các khoáng này vẫn bền sau 10 năm bảo hòa trong môi trường nước ngầm có pH thấp 3,34. Do vậy, kết quả của mô hình số cho thấy đất gia cố sử dụng hỗn hợp

vôi, xi măng, puzolan tự nhiên là bền hóa học sau 10 năm.



Hình 3. Sự thay đổi của các khoáng của đất và puzolan tự nhiên trong hỗn hợp đất gia cố



Hình 4. Độ rỗng của hỗn hợp đất gia cố thay đổi theo độ sâu và thời gian

#### 4. KẾT LUẬN

Độ bền hóa học của hỗn hợp đất gia cố dưới sự tương tác của nước ngầm đã được nghiên cứu bằng mô hình số truyền chất và phản ứng. Các kết quả của mô hình số đã cho thấy sự hòa tan hoàn toàn khoáng Portlandite, C-A-SH (Straelingite) trong môi trường nước ngầm. Đồng thời, không có các khoáng mới được kết tủa từ đó gây ra tăng độ rỗng của hỗn hợp tới 20% sau 10 năm, điều này ảnh hưởng không nhỏ đến tính chất cường độ của hỗn hợp đất gia cố. Bên cạnh đó, nhóm khoáng đóng góp cường độ chủ yếu cho hỗn hợp đất gia cố là các khoáng C-SH vẫn luôn

bền hóa học sau 10 năm tiếp xúc với nước ngầm, do đó khả năng cải thiện cường độ của đất gia cố do các khoáng C-S-H không bị ảnh hưởng bởi nước ngầm sau 10 năm. Các khoáng còn lại của hỗn hợp đất gia cố bằng vôi, xi măng và pozzolan tự nhiên vẫn tồn tại trong môi trường nước ngầm điều này phù hợp với tính chất các khoáng trong thực tế. Tuy nhiên với việc sau 10 năm độ rỗng tăng 20%, lớp đất gia cố làm nền cần được duy tu đầm chặt lại. Mô hình cần được kiểm chứng với kết quả thí nghiệm để nâng cao tính chính xác trong dự đoán thời gian duy tu bảo dưỡng của đất gia cố.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.99-2018.337.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. H. N. Nguyen, V. Q. Tran, A. Q. Ngo, and C. T. Ngo (2019). Application of thermodynamic model to mix design of stabilized soils. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 1295–1300, 2019.
2. H. N. Nguyen, V. Q. Tran, A. Q. Ngo and Q. H. Nguyen (2019). Using Natural Pozzolan, Cement and Lime for Stabilizing Soil in Earth Dams. *IJITEE*, vol. 8, no. 10, pp. 2809–2814, Aug. 2019, doi: 10.35940/ijitee.J9595.0881019.
3. B. T. Vu *et al.* (2018). A geochemical model for analyzing the mechanism of stabilized soil incorporating natural pozzolan, cement and lime. In

*Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering*, 2018, pp. 852–857.

4. H. N. Nguyễn, “Mô hình nhiệt động lực học và ứng dụng trong nghiên cứu sử dụng các chất kết dính vôi co,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, vol. 58, pp. 63–70.

5. A. C. Lasaga (1998). *Kinetic theory in the earth sciences*. Princeton, N. J: Princeton University Press, 1998.

6. D. Jacques, L. Wang, E. Martens, and D. Mallants (2010). Modelling chemical degradation of concrete during leaching with rain and soil water types. *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 8, pp. 1306–1313, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.02.008.

7. V. Q. Tran, A. Soive, and V. Baroghel-Bouny (2018). Modélisation of chloride reactive transport in concrete including thermodynamic equilibrium, kinetic control and surface complexation. *Cement and Concrete Research*, vol. 110, pp. 70–85, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.007.

8. I. Baur, P. Keller, D. Mavrocordatos, B. Wehrli, and C. A. Johnson (2003). Dissolution-precipitation behaviour of ettringite, monosulfate, and calcium silicate hydrate. *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 2, pp. 341–348, Feb. 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.08.016.

9. J. L. Palandri and Y. K. Kharaka (2004). A compilation of rate parameters of water-mineral interaction kinetics for application to geochemical modeling. U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2004–1068, Mar. 2004.

## EFFECT OF GROUNDWATER ON THE DURABILITY OF STABILIZED SOILS

Tran Van Quan

### Summary

Nowadays, using the inorganic binders for soil stabilization is increasingly developed in many construction projects. Cement is an inorganic binder used importantly in soil stabilization today. Cement hydration products that improve soil strength are CSH and C-A-S-H (Straelingite), which are capable of being dissolved in aggressive environments such as groundwater with low acidic pH, which affects the durability of stabilized soils. Therefore, the paper focuses on the durability of stabilized soils using lime, cement and natural pozzolan. The reactive transport model is used to describe the mechanism of interaction between groundwater and stabilized soil minerals. The numerical results show that the porosity of the stabilized soils increases by 20% after 10 years due to the dissolution of C-A-S-H and Portlandite, and no new minerals are precipitated. The minerals that improve the mechanical properties of the stabilized soil are C-S-H group, which are stable after 10 years of exposure to groundwater.

**Keywords:** Soil stabilization, cement, reactive transport model, durability, porosity, groundwater.

Người phản biện: GS.TS. Ngô Tri Viêng

Ngày nhận bài: 14/02/2020

Ngày thông qua phản biện: 16/3/2020

Ngày duyệt đăng: 23/3/2020