BÊ TÔNG CHO CÔNG TRÌNH CẦU VƯỢT BIỂN

Chu Ngọc Sủng - Công ty cổ phần Kỹ sư
và Tư vấn Việt nam (VE&C)

1. Các nguyên nhân làm giảm độ bền của bê tông theo thời gian trong môi trường biển.

Trong môi trường biển, kết cấu bê tông cốt thép chịu sự tác động đồng thời và phức tạp của nhiều yếu tố như sự ăn mòn các ion Clo^-, Ion Sulfat SO_4^{2-} xâm nhập; do phản ứng kiềm – cốt liệu trong bê tông hay do Sự nứt bê tông trước khi đưa vào khai thác. Trong các tác nhân đó **Ion Clo^-** và **Ion Sulfat SO_4^{2-}** là hai tác nhân chính gây suy giảm độ bền nghiêm trọng nhất.

1.1 Cơ chế ăn mòn do Ion Clo^- Phá hủy cốt thép

Ion Clo không làm suy yếu bê tông một cách trực tiếp nhưng lại là "kẻ thù" số một của cốt thép bên trong:

- *Phá hủy màng thụ động:* Trong môi trường kiềm cao của bê tông (pH trong khoảng 12.5 - 13.5), bề mặt cốt thép hình thành một màng oxit thụ động (Υ-Fe_2O_3) bảo vệ thép khỏi bị gỉ. Tuy nhiên, kích thước ion Cl^- rất nhỏ, dễ dàng khuếch tán qua các lỗ rỗng bê tông. Khi nồng độ Cl^- tại bề mặt thép vượt ngưỡng tới hạn (khoảng 0.4% - 1.0% so với khối lượng xi măng), nó sẽ xâm nhập và phá hủy cục bộ màng bảo vệ này.
- *Hình thành ăn mòn rỗ (Pitting Corrosion):* Quá trình ăn mòn diễn ra theo cơ chế điện hóa. Tại vùng màng thụ động bị phá hủy sẽ tạo thành cực Anode, nơi sắt bị oxy hóa

$\square_e \rightarrow \square^{2+} + 2\square^-$. Các vùng còn màng bảo vệ đóng vai trò Cathode. Ion Cl liên kết tạm thời với Fe^{2+} tạo thành $FeCl_2$, hợp chất này sau đó thủy phân giải phóng lại Cl^- và axit HCl, tiếp tục làm giảm pH tại chỗ và đẩy nhanh tốc độ ăn mòn sâu vào thân thép.

- *Gây nứt vỡ bê tông:* Sản phẩm gỉ sắt $Fe(OH)_2$ $Fe(OH)_3$, $Fe_2O_3.nH_2O$ có thể tích lớn gấp 2 đến 6 lần thể tích thép ban đầu. Sự gia tăng thể tích đột ngột này tạo ra ứng suất kéo nội tại cực lớn, dẫn đến hiện tượng nứt gãy, bong tróc lớp bê tông bảo vệ và lộ hẳn cốt thép ra ngoài.

1.2. Cơ chế ăn mòn do Ion Sulfat (SO_4^{2-}) – Phá hủy đá bê tông

Khác với Ion Clo, ion Sulfat tấn công trực tiếp vào cấu trúc nền đá xi măng (Cement Paste) thông qua các phản ứng hóa học tạo nở:

- *Tác dụng với Hydroxyt Canxi $Ca(OH)_2$:* Ion SO_4^{2-} khuếch tán vào bê tông tác dụng với $Ca(OH)_2$ có sẵn trong đá xi măng tạo thành thạch cao ($CaSO_4.H_2O$). Phản ứng này gây ra sự tăng thể tích nhẹ và làm tiêu hao lượng $Ca(OH)_2$, góp phần giảm độ kiềm của bê tông.
- *Tác dụng với Hydrat Canxi Aluminat (C_3A):* Thạch cao vừa tạo thành tiếp tục phản ứng với hợp chất aluminat hydrat hóa trong bê tông (C_3A) để hình thành khoáng *Ettringite thứ cấp* ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$). Việc tinh thể Ettringite phát triển mạnh mẽ kéo theo sự gia tăng thể tích đáng kể (gấp 2 - 3 lần thể tích các chất tham gia phản ứng), tạo ra ứng suất nứt vỡ xi măng đông cứng từ bên trong, làm giảm cường độ và biến bê tông thành dạng xốp, bở.

1.3 Mức độ ảnh hưởng của ion Clo (Cl^-) và ion Sulfat (SO_4^{2-})

Tuy nhiên khác biệt về mức độ ảnh hưởng giữa ion Clo (Cl^-) và ion Sulfat (SO_4^{2-}) xuất phát từ bản chất cơ chế phá hủy cũng như sự chênh lệch rõ rệt về nồng độ của chúng trong môi trường biển. Trong nước biển tự nhiên, hàm lượng ion Clo lớn hơn gấp bảy lần ion Sulfat (ion Cl^- chiếm khoảng 19,000 mg/L, trong khi ion SO_4^{2-} chỉ khoảng 2,700mg).

Chính sự chênh lệch này khiến mức độ, nguy cơ và tiến trình ảnh hưởng của hai ion lên công trình bê tông cốt thép có những đặc điểm khác nhau rõ rệt:

i). Ion Clo (Cl^-) – Tác nhân gây hư hỏng phổ biến và nguy hiểm nhất

Do hàm lượng cực lớn trong nước biển kết hợp với đặc tính động lực học cao, ion Clo được đánh giá là mối đe dọa hàng đầu và xuất hiện sớm nhất đối với tuổi thọ công trình:

- *Tốc độ xâm nhập vượt trội:* Kích thước bán kính ion Clo rất nhỏ, giúp chúng khuếch tán qua các lỗ rỗng mao dẫn của bê tông nhanh hơn nhiều so với ion Sulfat. Với nồng độ đậm đặc ở bên ngoài, áp suất khuếch tán của Clo cực kỳ lớn, nhanh chóng chạm ngưỡng tới hạn tại bề mặt cốt thép.
- *Tác động "triệt hạ" kết cấu chịu lực:* Clo tấn công trực tiếp vào cốt thép – thành phần chịu ứng suất kéo chính của kết cấu. Việc thép gỉ, giảm tiết diện chịu lực và gây nứt vỡ lớp bê tông bảo vệ thường diễn ra sớm và quyết định đến sự sụp đổ hoặc hư hỏng công trình trước khi đá bê tông kịp bị vữa mục.
- *Tác hại không bị suy giảm theo thời gian:* Ion Clo đóng vai trò như chất xúc tác trong phản ứng ăn mòn điện hóa; sau khi giải phóng Fe^{2+}, ion Cl^- lại tiếp tục chu trình phá hủy màng thụ động ở vị trí khác.

ii). Ion Sulfat (SO_4^{2-}) – Tác nhân phá hủy diễn ra chậm hơn và bị khống chế

Mặc dù phản ứng của Sulfat gây ra sự nở thể tích lớn, nhưng trên thực tế ở môi trường biển, mức độ ảnh hưởng trực tiếp của nó thường ít cấp thiết hơn ion Clo:

- *Khả năng thâm nhập hạn chế hơn:* Bán kính ion Sulfat lớn hơn ion Clo, làm giảm tốc độ khuếch tán tự nhiên vào bê tông. Hàm lượng Sulfat trong nước biển thấp hơn khiến độ chênh lệch nồng độ để đẩy ion này vào sâu bên trong bê tông không mạnh mẽ như Clo.
- *Tác động từ từ, mang tính dài hạn***:** Phản ứng tạo thạch cao và Ettringite cần thời gian tích tụ đủ lớn để tích tụ ứng suất gây nứt đá xi măng. Do đó, hiện tượng vữa mục đá bê tông thường xuất hiện muộn hơn so với hiện tượng nứt gãy do gỉ cốt thép.
- *Bị ức chế bởi sự có mặt của ion Clo:* Đây là một hiện tượng hóa học đặc biệt trong nước biển. Sự có mặt của nồng độ ion Clo cao làm tăng độ hòa tan của khoáng Ettringite và thạch cao, từ đó giảm bớt sự nở thể tích do Sulfat gây ra so với khi bê tông chỉ tiếp xúc với môi trường Sulfat thuần túy.

Có thể tóm tắt mức độ ảnh hưởng cuả các tác nhân ion Cl và ion Sulfat tới độ bên của bê tông trong môi biển theo bảng sau.

Bảng so sánh mức độ ảnh hưởng ion Clo vaf ion Sulfat đến độ bền bê tông

Tiêu chí	**Ion Clo (Cl^-)**	**Ion Sulfat (SO_4^{2})**
Nồng độ trong nước biển	Cực cao (19,000 mg/L)	Trung bình(2,700 mg/L)
Đối tượng tấn công chính	Cốt thép (gây ăn mòn điện hóa)	Đá xi măng (gây biến dạng, nở thể tích)
Mức độ ưu tiên kiểm soát	Mức độ 1 (Tối cấp thiết)	Mức độ 2 (Dài hạn)
Dấu hiệu hư hỏng sớm nhất	Vết nứt dọc theo phương cốt thép, gỉ sắt chảy ra bề mặt	Bê tông bị bong tróc bề mặt, mủn bở, nứt đa phương

Tiêu chí	Ion Clo (Cl^-)	Ion Sulfat (SO_4^{2})
Tác động đến an toàn kết cấu	Gây suy giảm nhanh khả năng chịu lực chính của dầm, cột	Gây giảm độ bền uốn, nén của bê tông theo thời gian

Trong môi trường biển, ion Clo là tác nhân chi phối và quyết định tuổi thọ vận hành ngắn/trung hạn của kết cấu do hàm lượng áp đảo và tác động trực tiếp lên cốt thép. Trong khi đó, ion Sulfat đóng vai trò là tác nhân làm suy giảm độ bền dài hạn của nền bê tông, đồng thời đóng vai trò "mở đường" cho Clo xâm nhập sâu hơn ở các giai đoạn sau.

iii) Tác động tương hỗ

Trong nước biển, hai tác nhân này không hoạt động riêng rẽ mà hỗ trợ lẫn nhau làm gia tăng tốc độ phá hủy:

- Ion Sulfat tấn công làm suy yếu và gây nứt nẻ cấu trúc bê tông, vô tình mở ra các "đường cao tốc" cho ion Clo thâm nhập sâu và nhanh hơn tới bề mặt cốt thép.
- Ngược lại, sự xâm nhập của Clo tạo ra gỉ thép làm nứt lớp bảo vệ bên ngoài, giúp nước biển chứa nồng độ Sulfat cao dễ dàng tràn vào xói mòn đá bê tông bên trong.

Kết hợp lại, sự cộng hưởng giữa Clo và Sulfat làm suy giảm nghiêm trọng tuổi thọ và khả năng chịu lực của các công trình biển nếu không có giải pháp kỹ thuật thích hợp bảo vệ.

2. Thành phần cấp phối bê tông của các công trình trên biển và ven biển

Muốn đảm bảo độ bền của bê tông cho các công trình trên biển nói chung và công trình cầu nói riêng cần phải chú ý đến các yêu cầu: chống lại sự xuống cấp bê tông vì ăn mòn do Ion Clo, sự sâm nhập của Ion Sulfat như trên trình bày. Các yếu tố khác cũng cần được xem xét như:

i) *Phản ứng Kiềm-cốt liệu* dẫn đến sự hư hỏng bê tông là kết quả của phản ứng giữa hydroxit kiềm trong bê tông với một số dạng silica nhất định thường có trong cốt liệu. Phản ứng này dẫn đến sự hình thành một lớp gel nở ra khi có sự xuất hiện của nước, gây ra ứng suất kéo trong bê tông và có thể dẫn đến nứt nẻ. Các biện pháp chung để giảm thiểu nguy cơ xảy ra phản ứng kiềm – cốt liệu (AAR) cần xem xét bao gồm: sử dụng xi măng có hàm lượng kiềm thấp, bê tông

có độ thấm thấp, cốt liệu không tạo phản ứng akali với vữa xi măng, bổ sung chất kết dính (SCMs), và giảm thiểu sự tiếp xúc bề mặt với độ ẩm.

ii) *Kiểm soát nứt trước khi công trình đưa vào sử dụng*. Sự nứt bê tông trước khi đưa vào khai thác (đặc biệt là bản mặt cầu bê tông) gây ra do sự cản trở biến dạng thể tích xảy ra trong bê tông ở tuổi sớm. Sự biến dạng thể tích này do cả hiệu ứng nhiệt (kết quả từ sự sụt giảm nhiệt độ sau quá trình thủy hóa) và sự co ngót (bao gồm co ngót tự sinh, co ngót do khô và co ngót dẻo). Khi các biến dạng thể tích này bị cản trở bởi dầm, hệ dầm ngang, gối đỡ, v.v.tạo ra ứng suất kéo làm nứt bê tông. Các biện pháp chung để giảm thiểu nguy cơ nứt ở tuổi sớm cần được xem xét bao gồm: sử dụng phụ gia puzolan (để giảm tỏa nhiệt thủy hóa), giảm nước và các kỹ thuật dưỡng hộ thích hợp.

Để có được bê tông dễ thi công (độ sụt tốt) và có độ bền cao cho các công trình bê tông tron môi trường biển, cần lưu ý đến các đặc tính sau của bê tông:

- Loại xi măng
- Các loại chất dính kết cùng xi măng
- Tỷ lệ nước – chất dính kết (chất có tính xi măng) (w/cm)
- Kiểm soát hàm lượng clo (Chloride) trong bê tông

2.1 Bê tông cho cầu trên biển dùng xi măng thường hay xi măng bền Sulfat

Trong một số hồ sơ thiết kế của cấc tư vấn, khi thiết kế công trình trong vùng ven biển nhiễm mặn đều ghi yêu cầu " dùng xi măng bền Sulfat". Xi măng có hàm lượng C_3 A từ 5% đến 8% được gọi là bê tông bền sulfat. Hàm lượng tricalcium aluminate (C_3 A) trong xi măng là yếu tố quan trọng để bảo vệ bê tông khỏi sự tấn công của sunfat. Hàm lượng C_3 A thấp giúp tăng khả năng kháng sunfat cho bê tông. Trước kia bê tông bền Sulfat thường được khuyến nghị sử dụng trong môi trường biển để giảm nguy cơ ăn mòn cốt thép. Nhưng ngày nay đã thay đổi.

Các kết quả nghiên cứu thực nghiệm đã thay đổi ý tưởng này. Năm 1990 các tác giả Rasheeduzzafar; Dakkil, F. H.; Al-Gahtani, A. S.; Al-Seadoun, S. S.; and Bader, M. A., công bố kết quả nghiên cứu qua bài báo *" Ảnh hưởng thành phần xi măng tới gỉ cốt thép"*. Kết quả chính của nghiên cứu được công bố như sau:

i) Khả năng chống ăn mòn cốt thép: Xi măng Type I (xi măng thông thường) có C_3 A = 9.5% cho thời gian khởi đầu ăn mòn cốt thép dài hơn khoảng 1.7 lần so với xi măng Type V (xi măng bền sulfat) có C_3 A = 2.8%. Thực chất, hàm lượng C_3 A trong xi măng cao hơn có thể giúp giảm nguy cơ ăn mòn cốt thép vì thành phần này liên kết với các ion clo xâm nhập vào bê tông làm giảm hàm lượng Ion Clo đến ngưỡng phá hoại màng bảo vệ cốt thép.

ii) Khả năng kháng sunfat: Xi măng Type I chứa 14% C_3 A nhưng bổ sung 20% silica fume có khả năng kháng sunfat tốt hơn khoảng 1.4 lần so với xi măng Type V có 1.88%

C_3 A.

Điều này cũng có thể giải thích bằng tác dụng của Silica fume trong quá trình hình thành bê tông. Silica fume đóng vai trò là hoạt chất tham gia phản ứng Puzzolan tiêu hao $Ca(OH)_2$ theo cơ chế: SiO2+Ca(OH)2→C−S−H. Chất keo (gel) này bền vững giúp tăng cường độ kháng nén và ngăn cản ion Clo và ion Sulfat xâm nhập vào bê tông. Đồng thời làm giảm lượng $Ca(OH)_2$ tự do, là thành phần dễ phản ứng với sunfat để tạo thạch cao gây nứt bê tông. Hơn thế nữa Silica fume với kích thước hạt siêu mịn (thường kích thước nhỏ hơn 100 lần kích thước hạt xi măng thông thường), chèn vào giữa các hạt xi măng làm đặc chắc cấu trúc vi mô và vùng liên kết giữa đá xi măng với cốt liệu làm bê tông có độ đặc cao làm giảm độ thấm của bê tông ngăn cản các ion Clo có kích thước nhỏ từ nước biển xâm lấn vào trong bê tông tạo ra gỉ cốt thép như mô tả ở mục 1.1.

Vì một lý do khác, trong mục 4.2.1 Báo cáo ACI 3573r của Viện bê tông Mỹ - (Thiết kế và thi công kết cấu bê tông vùng biển) đã khuyến nghị "Do trong môi trường biển, sự tấn công bởi ion sunfat ít phổ biến hơn so với sự xâm nhập của ion clo, nên xi măng Portland loại V (Xi măng bền Sulfat -loại có hàm lượng C_3 A thấp) thường không được khuyến nghị sử dụng cho bê tông trong môi trường biển."

Cho nên có thể khẳng định không dùng xi măng bền Sulfat cho bê tông công trình cầu trong vùng biển. Năm 2018 Bộ xây dựng đã ban hành quyết định Số: 1536/QĐ-BXD "Hướng dẫn sử dụng Silica fume trong bê tông" với phạm vi áp dụng " *Các loại bê tông ưu tiên sử dụng silica fume bao gồm: bê tông cường độ cao, bê tông trong môi trường xâm thực sulfat và bê tông trong môi trường biển".*

2.2 Các loại chất dính kết có tính xi măng

Việc sử dụng tro bay (theo ACI 232.2R), Xỉ lò cao nghiền mịn hoặc silica fume (ACI 234R) là các khoáng chất Puzzolan như một phần của vật liệu tính xi măng có thể giúp giảm độ thấm của bê tông, giảm phản ứng kiềm–silic (alkali-silica reactivity) và giảm sự tấn công hóa học của sunfat đặc biệt là ngăn ngừa sự thâm nhập cuả ion Clo trong môi trường biển vào bê tông làm tác nhân gỉ cốt thép. Xỉ hạt lò cao nghiền mịn (ground-granulated blast-furnace slag - GGBFS), được bổ sung riêng vào bê tông trong quá trình trộn, có thể làm tăng đáng kể tuổi thọ của bê tông trong môi trường có sunfat.

Việc sử dụng tro bay, đặc biệt sỉ lò cao nghiền mịn (GGBFS) còn giúp giảm sinh nhiệt trong quá trình thủy hóa đối với các khối bê tông, từ đó giảm nguy cơ nứt nhiệt. Nguyên nhân là:

- Xi măng Portland, đặc biệt là các khoáng C_3 S và C_3 A, phản ứng rất nhanh với nước và sinh nhiều nhiệt. Nhưng GGBFS có tính chất thủy lực tiềm ẩn (latent hydraulic), phản ứng chậm hơn và cần môi trường kiềm do xi măng tạo ra để hoạt hóa. Do đó Khi thay thế một phần xi măng bằng GGBFS, lượng khoáng phản ứng nhanh giảm đi nên:nhiệt độ đỉnh trong khối bê tông thấp hơn Tốc độ tăng nhiệt chậm hơn.

- Từ đó chênh lệch nhiệt độ giữa phần lõi và bề mặt bê tông giảm,

Ngoài ra, việc sử dụng tro bay hoặc silica fume cũng có thể giảm thiểu tác động của phản ứng kiềm - cốt liệu (AAR), và hiệu quả này được kiểm chứng thông qua các phương pháp thử ASTM C441/C441M và C311.

Tro bay tồn tại dưới hai dạng loại F và loại C, tùy thuộc vào loại than mà nó được tạo ra; cả hai loại này đều đã được sử dụng trong các công trình bê tông môi trường biển. Tro bay loại F thường được ưu tiên sử dụng hơn vì các lợi ích về độ bền của bê tông trong môi trường biển. Loại F cho thấy khả năng chống lại phản ứng kiềm–cốt liệu và tấn công của sunfat tốt hơn so với tro bay loại C.

2.3 Tỷ lệ nước với chất dính kết (W/CM)

Tỷ lệ nước trên chất kết dính khác với tỷ lệ nước xi măng w/c (chỉ tính xi măng), w/cm tính tổng khối lượng nước chia cho tổng khối lượng xi măng + các phụ gia khoáng như tro bay , xỉ lò cao (GGBS), silica fume. Để đảm bảo tăng độ chặt cho bê tông bịt kín các đường rỗng mao dẫn góp phần ngăn ngừa sự thâm nhập của Ion Clo vào kết cấu bê tông, các tiêu chuẩn thiết kế yêu cầu khống chế tỷ lệ W/CM trong gía trị khoảng 0,35 đến 0,4.

2.4 Kiểm soát hàm lượng ion Clo^- trong bê tông.

Như trình bày về cơ cấu gây rỉ cốt thép do ion Cl^-, khi Ion Cl^- sẵn trong bê tông do nhiễm trong cốt liệu và các thành phần của bê tông cùng với Ion Cl^- từ môi trường biển xâm nhập vào trong bê tông tích đến một ngưỡng nhất định sẽ phá vỡ màng bảo vệ của cốt thép gây ra gỉ và gỉ rỗ cốt thép. Tỷ lệ tổng lượng clo hiện diện trong dung dịch lỗ rỗng có khả năng gây phá hủy lớp màng thụ động bảo vệ thép phụ thuộc vào nhiều thông số, bao gồm hàm lượng tricalcium aluminate (C_3A) và tetracalcium aluminoferrite (C_4AF), độ pH và tỷ lệ w/cm. Theo Liên đoàn bê tông quốc tế (CEB 2000) ngưỡng này tương đương đương khoảng 1,4 kg/m^3 bê tông, còn theo Hoa Kỳ ngưỡng này ở mức 0,6 đến 0,9 kg/m^3 bê tông.

Chính vì thế để đảm bảo độ bền bê tông trong môi trường biển, ngoài các giải pháp tăng cường độ đặc của bê tông ngăn ngừa sự thâm nhập của Ion Cl^-từ bên ngoài môi trường, còn phải giảm thiểu hàm lượng Cl^- trong bản thân bê tông. Việc sử dụng các chất dính kết tính xi măng gốc Puzzolan trong cấp phối là biện pháp khống chế hàm lượng Ion Clo^-, ngoài ra phải chú trọng lựa chọn các thành phần cấp phối như:

- *Nước trộn bê tông:* Tuyệt đối không dùng nước biển hoặc nước lợ để trộn bê tông cốt thép; Chỉ sử dụng nước ngọt đạt tiêu chuẩn (như TCVN 4506), kiểm tra hàm lượng ion Cl trong nước trộn không vượt quá 500 mg/L.
- *Cốt liệu (Cát, đá, sỏi):* không nên sử dụng cát biển hay đá khai thác gần khu vực ngập mặn

- *Phụ gia hóa học:* Tuyệt đối không dùng phụ gia tăng nhanh đông kết chứa muối clorua (như {$CaCl_2$);
- *Phải s*ử dụng phụ gia giảm nước cao cấp (Superplasticizer) để giảm lượng nước dùng mà vẫn đảm bảo độ sụt, giúp bê tông đặc chắc.

3. Kiến nghị

Các nghiên cứu hiện đại và kinh nghiệm quốc tế đã chỉ ra rằng bê tông dùng cho công trình cầu vượt biển hoặc các công trình ven biển khác có nguy cơ sâm thực bởi ion Clo và ion Sulfat không cần sử dụng bê tông bền Sulfat (có thành phần C_3A thấp từ 5% đến 8%). Kiến nghị Bê tông cho công trình cầu vượt biển cũng như các công trình trong môi trường biển chỉ sản xuất với Xi măng thông thường cùng với chất kết dính gốc Puzzolan và phụ gia Silica fume. Ở Việt Nam dã có đủ hệ Tiêu chuẩn để thực hiện thiết kế cấp phối và sản xuất bê tông loại này như:

- TCVN 10302: 2014 Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng.
- TCVN 11586: 2016- Xỉ hạt lò cao nghiền mịn dùng cho bê tông và vữa
- Hướng dẫn sử dụng silica fume trong bê tông (QĐ 1536/QĐ-BXD 2018).

Chúng tôi xin nêu ví dụ một kết quả thiết kế cấp phối bê tông cho cầu vượt biển với các thành phần xi măng thông thường, tro bay, sỉ lò cao nghiền mịn và phụ gia Silica fume. Cơ sở thiết kế loại bê tông này theo nguyên tắc:

- Tổng chất dính kết (binder): 420–500 kg/m³
- Tỷ lệ nước/chất kết dính (w/cm): tùy theo cường độ kháng nén của bê tông
    - 40 MPa → 0.35–0.38
    - 45 MPa → 0.30–0.34
- Silica fume: 5–10% (tăng độ đặc chắc, giảm thấm Cl^-)
- Tro bay: 15–25% (cải thiện thi công, giảm nhiệt)
- Xỉ lò cao: 20–40% (tăng độ bền lâu dài, kháng sulfate)
- Bắt buộc dùng phụ gia siêu dẻo (HRWR) để giảm nước tăng độ chặt nhưng tăng độ linh động của bê tông. Sau đây là cấp phối cho 1 m^3 bê tộng với f_c = 40 MPa (mẫu lăng trụ).

	Thành phần cấp phối

	Xi măng PCB40	Tro bay	Xỉ lò cao (GGBFS)	Silica fume	Nước	cát	Đá (10-20mm)	Phụ gia siêu dẻo
Khối lượng (Kg)	260	80	100	30	160	750	1050	0,8-1,2% chất dính kết

Với 1 m^3 tổng lượng chất dính kết là 470 Kg ; tỷ lệ x/cm ; 0,34; độ sụt có thể đạt tới 150 đến 200mm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Rasheeduzzafar; Dakkil, F. H.; Al-Gahtani, A. S.;Al-Seadoun, S. S.; and Bader, M. A., 1990,

Influence of Cement Composition on the Corrosion of Reinforcement and Sulfate Resistance of Concrete,

2. Design and construction of waterfront and coastal concrete marine structures (ACI 357.3R-14)

3. AASHTO Guide Specification for Service Life Design of Highway Bridges 1st Edition 2020

4. ACI 211.4R- 98 Guide for Selecting Proportion for High- Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash