การศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยคัดขนาด

ชัยชาญ โชติถนอม[1] บพิธ บุปผโชติ[1]

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต. ขามเรียง อ. กันทรวิชัย จ. มหาสารคาม 44150

และ ปริญญา จินดาประเสริฐ[2]

มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

รับเมื่อ 12 พฤษภาคม 2548 ตอบรับเมื่อ 30 พฤศจิกายน 2548

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสมบัติด้านความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีความละเอียดแตกต่างกัน การทดลองใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง เถ้าลอย 3 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอยไม่คัดขนาด เถ้าลอยคัดขนาดละเอียดสุดร้อยละ 45 และเถ้าลอยคัดขนาดละเอียดสุดร้อยละ 10 โดยใช้ปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยต่อสารซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 30 ในทุกส่วนผสม การต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ใช้การวัดการ ไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C 1202 และการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 จากการทดสอบพบว่าความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อวัดโดยการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมเถ้าลอยและเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้น และการทดสอบการแช่คอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ใช้เวลา 3-6 เดือน ให้ผลที่สอดคล้องกัน

คำสำคัญ : การแทรกซึมของคลอไรด์ / การไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า / สารละลายโซเดียมคลอไรด์ / เถ้าลอยคัดขนาด / คอนกรีต

---

[1] *อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์*

[2] *รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา*

A Study of Chloride Penetration of Concrete Containing Classified Fly Ash

Chaicharn Chotetanorm[1] Bopit Bubphachot[1]
Mahasarakham University, Khamriang Sub-district, Kantarawichai District,
Maha Sarakham 44150
and Prinya Chindaprasirt[2]
Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

Received 12 May 2005 ; accepted 30 November 2005

Abstract

The objective of this research was to determine the resistance of chloride penetration of concrete containing fly ashes with different fineness. Ordinary Portland cement and three types of fly ash viz., original fly ash and classified 45% and 10% fine fly ash portions were used. The percentage of fly ash replacement in cement was fixed at 30% for all mixes. The Coulomb charge test in accordance with ASTM C 1202 and the chloride immersion tests in 3% NaCl solution were performed for investigating the chloride penetration resistance of concrete. The results showed that the resistance of chloride penetration of concrete measured by the Coulomb charge increased when fly ash was used in concrete and the fly ash fineness increased. The results of the chloride immersion test for 3-6 months confirmed the finding.

Keywords : Chloride Penetration / Coulomb Charge / Sodium Chloride Solution / Classified Fly Ash / Concrete

---

[1] *Lecturer, Faculty of Engineering.*

[2] *Associate Professor, Department of Civil Engineering.*

1. บทนำ

ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีต วิศวกรผู้ออกแบบจะคำนึงถึงสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเป็นหลัก แต่ในความเป็นจริง คอนกรีตเหล่านี้จะอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีการทำลายอยู่ตลอดเวลา ทำให้สมบัติเชิงกลลดต่ำลงในระยะยาวได้ และเป็นผลให้ต้องมีการบำรุงรักษาตลอดจนการบูรณะและซ่อมแซมเพื่อให้โครงสร้างดังกล่าวสามารถใช้งานต่อไปได้อีก ดังนั้นถ้าหากคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติของคอนกรีตตามอายุการใช้งานในการออกแบบแล้ว ก็จะสามารถช่วยให้การวางแผนการบำรุงรักษาซ่อมแซมกระทำได้รัดกุมยิ่งขึ้น ตลอดจนลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมลงไปได้ โดยการยืดอายุของโครงสร้างคอนกรีตจากการเสื่อมสภาพออกไปได้อีก [1]

โครงสร้างซึ่งตั้งอยู่ในบริเวณชายฝั่งทะเลอาจเกิดการเสื่อมสภาพได้จากหลายสาเหตุ เช่น การกัดเซาะ การชะล้าง และการทำลายโดยซัลเฟต แต่คลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม [2] เนื่องจากน้ำทะเลประกอบด้วยสารประกอบประเภทซัลเฟตและคลอไรด์ของโซเดียมและแมกนีเซียม แต่โซเดียมคลอไรด์มีปริมาณสูงสุดคือ 27,000 พีพีเอ็ม การป้องกันสามารถกระทำได้โดยการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม หรือโดยอาศัยกระบวนการทางไฟฟ้า [1] และการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยการใช้สารปอซโซลานและสารเคมีผสมเพิ่ม [3]

กำลังของคอนกรีตเป็นสมบัติที่สำคัญเบื้องต้น แต่สำหรับโครงสร้างคอนกรีตภายใต้สภาวะการใช้งานแล้ว ความทนทานเป็นปัญหาที่สำคัญที่สุด เถ้าลอย ซิลิกาฟูม ตะกรันเตาถลุง และเถ้าแกลบเป็นสารปอซโซลานที่สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ จากการเลือกปริมาณการผสมที่ดี สารเหล่านี้สามารถเพิ่มความทนทาน ต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์และลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ความต้านทานการทำลายของซัลเฟตก็ดีขึ้นด้วย แต่คาร์บอเนชั่นจะสูงขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ ดังนั้นจึงต้องเลือกปริมาณและชนิดของวัสดุที่ใช้ และส่วนผสมที่ดี เพื่อให้สมบัติด้านความทนทานโดยรวมดีขึ้นและการคาร์บอเนชั่นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ภายใต้สภาวะการใช้งาน [4]

สำหรับประเทศไทย เถ้าลอยเป็นสารปอซโซลานที่ใช้กันแพร่หลายที่สุด จากการศึกษาพบว่าเถ้าลอยขนาดเล็กที่ผ่านการคัดขนาดสามารถปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตได้ดีกว่าเถ้าลอยขนาดใหญ่หรือที่ไม่ได้คัดขนาด เนื่องจากเถ้าลอยขนาดเล็กมีความกลมมากกว่า สามารถทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ดีขึ้น เถ้าลอยที่ขนาดเล็กสามารถกระจายตัวและแทรกตัวในซีเมนต์เพสต์ได้ดีขึ้น เป็นผลให้ทำปฏิกิริยาได้มากขึ้นด้วย [5] สมบัติทางด้านกำลังรับแรงและการต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตดีขึ้นเมื่อใช้เถ้าลอยละเอียดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากขนาดเฉลี่ยของโพรงจะลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยที่ละเอียดขึ้น [6]

เถ้าลอยจึงเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตเนื่องจากมีอยู่ในประเทศ ราคาถูก และมีอยู่ในปริมาณที่มากพอ โดยเฉพาะที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เถ้าลอยที่ได้มีปริมาณสูงถึง 3 ล้านตันต่อปี หากสามารถนำเถ้าลอยไปใช้ประโยชน์ในปริมาณมาก ก็จะเป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ตามมาตรฐาน มอก. 80-2517

2) เถ้าลอย ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง แบ่งเป็น เถ้าลอยที่ไม่คัดขนาด (100FA) เถ้าลอยคัดขนาดส่วนละเอียดสุด 45% (45FA) และเถ้าลอยคัดขนาดส่วนละเอียดสุด 10% (10FA) จากการคัดขนาดโดยใช้แรงลม สมบัติของเถ้าลอยได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

3) ทราย ใช้ทรายแม่น้ำ โมดูลัสความละเอียด 2.97 และ ถ.พ.(สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง) 2.57

4) หิน ใช้หินปูนย่อย (crushed limestone) ขนาด 3/4 นิ้ว และ ถ.พ.(สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง) 2.66

5) น้ำ น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตใช้น้ำประปา ส่วนน้ำที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1202 ทั้งขั้นตอนการแช่ตัวอย่างคอนกรีตให้อิ่มตัวด้วยน้ำและการเตรียมสารละลายใช้น้ำกลั่น

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดของเถ้าลอย

เถ้าลอย	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOI	ถ.พ.	B.F.
100FA	45.03	23.98	10.68	13.34	3.39	0.080	2.41	1.55	0.54	2.06	2700
45FA	44.35	23.37	10.31	14.46	3.30	0.045	2.72	1.05	0.97	2.21	3900
10FA	44.39	23.36	10.36	13.08	3.37	0.085	2.66	1.29	0.98	2.28	4500

หมายเหตุ B.F. หมายถึง ความละเอียดแบบเบลน (Blaine fineness) ซม^2/กรัม ส่วนประกอบทางเคมี มีหน่วยเป็นร้อยละ

2.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

2.2.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต ได้ออกแบบส่วนผสมโดยใช้วิธีของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน (ACI) และปรับส่วนผสมที่มีเถ้าลอยโดยวิธีของ Building Research Establishment [7] โดยใช้ค่าประสิทธิผลของเถ้าลอย (efficiency factor, k) เท่ากับ 0.3 และทำการปรับน้ำให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัว 75±25 มม. ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

2.2.2 การทดสอบกำลังอัด ใช้คอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 100 x 200 มม. ทำการบ่มในน้ำและทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 39 ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน และผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีต

ชนิดคอนกรีต	ค่าการยุบตัว (มม.)	อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์	น้ำหนัก (กก./ม^3)				
			ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน	น้ำ
OPC	70	0.54	328	0	830	1,000	177
100FA	80	0.48	261	112	810	975	180
45FA	90	0.46	261	112	815	980	172
10FA	70	0.44	261	112	820	980	163

2.3 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

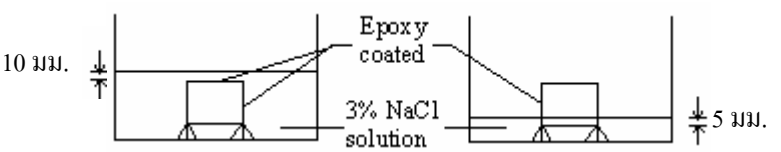
ตัวอย่างสำหรับการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ได้จากการตัดแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 100x200 มม. ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของความสูงให้เป็นทรงกระบอกแบนขนาด 100x50 มม. จำนวน 2 ชิ้นต่อแท่งตัวอย่าง หลังจากตัดเสร็จปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ 24 ชั่วโมง จึงเคลือบผิวด้านข้างด้วยอีพอกซี (epoxy) และตัวอย่างสำหรับการทดสอบแบบจมในสารละลายทั้งหมดจะเคลือบผิวด้านบนด้วย ทิ้งไว้ในอากาศอีก 24 ชั่วโมง

2.3.1 การทดสอบความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต โดยการวัดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าทำโดยการวัดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ใช้คอนกรีตทรงกระบอกแบนขนาด 100x50 มม. 2 ตัวอย่าง ในการทดสอบแต่ละครั้ง

2.3.2 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

2.3.2.1 การทดสอบแบบจมในสารละลายทั้งหมด การทดสอบนี้เป็นการจำลองโครงสร้างคอนกรีตจมใต้น้ำทะเลตลอดเวลา (Submerged zone) โดยที่อายุ 28 วัน ทำการแช่ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกแบนขนาด 100x50 มม. ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 ให้สารละลายท่วมเหนือผิวบนที่ทาอีพอกซี 10 มม. เมื่อแช่เป็นระยะเวลา 3 และ 6 เดือน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปผ่าและหาระยะแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยจาก 2 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 1(ก)

2.3.2.2 การทดสอบแบบจมในสารละลายบางส่วน การทดสอบนี้เป็นการจำลองโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่บริเวณผิวน้ำทะเล (Tidal or splash zone) แต่ไม่รวมถึงผลของการขึ้นลงของน้ำและคลื่น โดยที่อายุ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกแบนขนาด 100x50 มม. ไปปรับเสถียรในห้องความชื้นสัมพัทธ์ 50% ที่อุณหภูมิ 23$\pm$2 $^{\circ}$C เป็นเวลา 7 วัน จึงนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 ให้มีระยะจม 5 มม. ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) เมื่อแช่เป็นระยะเวลา 3 และ 6 เดือน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปผ่าและหาระยะแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยจาก 2 ตัวอย่าง



(ก) แบบจมในสารละลายทั้งหมด (ข) แบบจมในสารละลายบางส่วน

รูปที่ 1 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยแช่ในสารละลาย NaCl เข้มข้น 3%

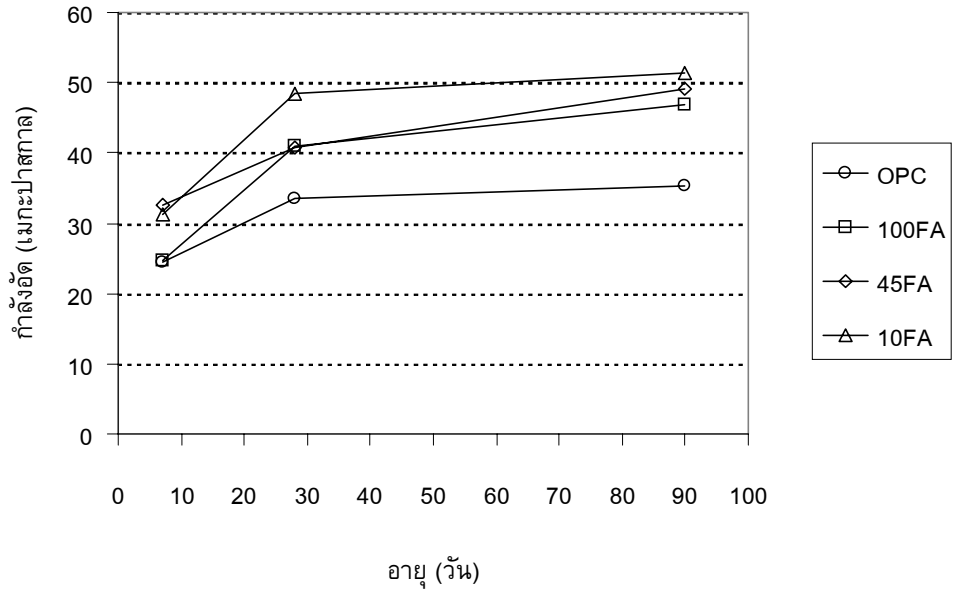
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 สมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย

ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดของเถ้าลอย เถ้าลอย 100FA, 45FA และ 10FA มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.06, 2.21 และ 2.28 ตามลำดับ และมีความละเอียดแบบเบลนเท่ากับ 2,700, 3,900 และ 4,500 ซม.^{2}/ก. ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะมีค่ามากขึ้นเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดสูงขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยขนาดเล็กจะมีโพรงอากาศอยู่ภายในน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยอื่น [8, 9] ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ไม่คัดขนาดและที่ผ่านการคัดขนาดจะไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เป็นร้อยละ 79.7, 78.0 และ 78.1 สำหรับเถ้าลอย 100FA, 45FA และ 10FA ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 โดยที่ปริมาณ SO_3 น้อยกว่าร้อยละ 5 และการสูญเสียจากการเผา (loss on ignition, LOI) น้อยกว่าร้อยละ 6 ดังนั้นจึงจัดอยู่ใน class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618-85

3.2 ความต้องการน้ำและกำลังอัดของคอนกรีต

คอนกรีตธรรมดามีค่าอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ (w/b) เท่ากับ 0.54 และคอนกรีตผสมเถ้าลอยมี w/b เท่ากับ 0.48, 0.46 และ 0.44 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 ความต้องการน้ำของคอนกรีตลดลงเนื่องจากเถ้าลอยละเอียดมีความกลมและผิวเรียบมากกว่าเถ้าลอยหยาบ [4] ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 กำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาจะต่ำกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เนื่องจากการลดปริมาณน้ำเมื่อใช้เถ้าลอยโดยเฉพาะเมื่อเป็นเถ้าลอยละเอียด การพัฒนากำลังของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในช่วงหลังจากอายุ 7 วัน จะสูงกว่าของคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นสมบัติของเถ้าลอย

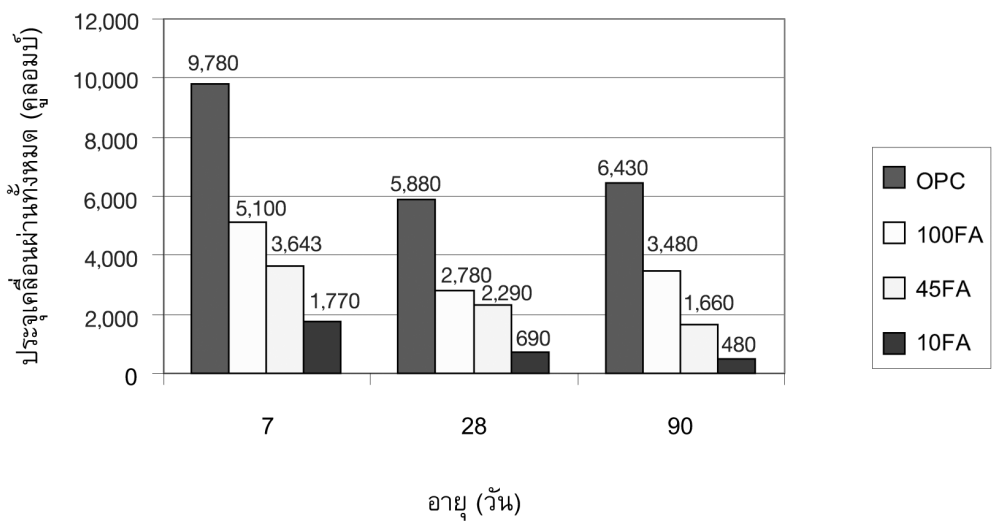


รูปที่ 2 กำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ของส่วนผสมต่างๆ

3.3 การแทรกซึมของคลอไรด์

3.3.1 ความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์โดยการวัดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า

ที่อายุ 7 วัน ค่าประจุเคลื่อนผ่านตัวอย่าง OPC, 100FA, 45FA และ 10FA คอนกรีตมีค่าเท่ากับ 9,780, 5,100, 3,640 และ 1,770 คูลอมบ์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 และตารางที่ 3 ค่าประจุเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดจะลดลง เมื่อผสมด้วยเถ้าลอยและเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้น



รูปที่ 3 ประจุเคลื่อนผ่านทั้งหมดของคอนกรีตส่วนผสมต่างๆ

ตารางที่ 3 ประจุเคลื่อนผ่านทั้งหมดเฉลี่ยของคอนกรีตส่วนผสมต่างๆ

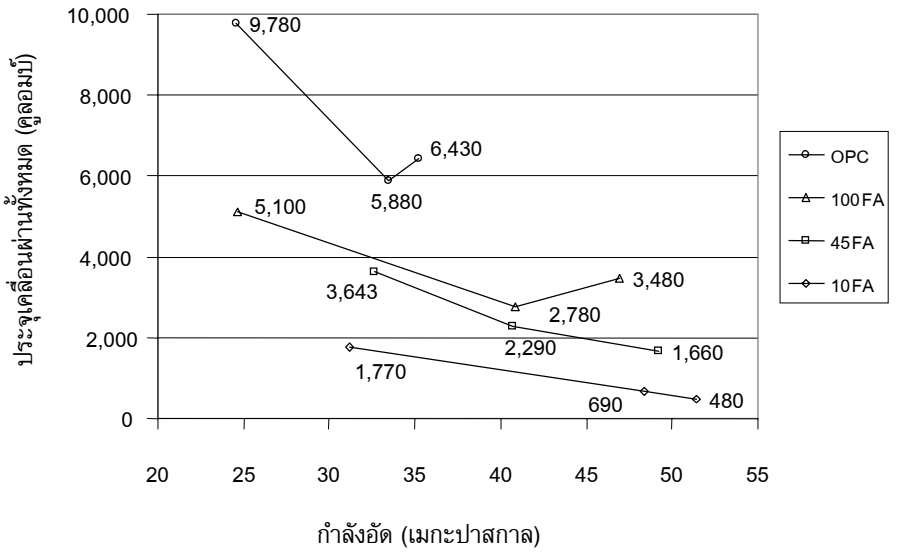
อายุ (วัน)	OPC คอนกรีต		100FA คอนกรีต		45FA คอนกรีต		10FA คอนกรีต	
	ประจุ * (คูลอมบ์)	ระดับชั้น **	ประจุ * (คูลอมบ์)	ระดับชั้น **	ประจุ * (คูลอมบ์)	ระดับชั้น **	ประจุ * (คูลอมบ์)	ระดับชั้น **
7	9,780	สูง	5,100	สูง	3,643	ปานกลาง	1,770	ต่ำ
28	5,880	สูง	2,780	ปานกลาง	2,290	ปานกลาง	690	ต่ำมาก
90	6,430	สูง	3,480	ปานกลาง	1,660	ต่ำ	480	ต่ำมาก

หมายเหตุ * เป็นปริมาณประจุเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดเฉลี่ย

** จำแนกตามความสามารถในการแทรกซึมของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C 1202

OPC คอนกรีตให้ค่าประจุเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดสูงสุด เนื่องจากมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์สูงสุดคือ 0.54 ทำให้มีปริมาณน้ำเหลือในคอนกรีตมาก เกิดเป็นโพรงขนาดใหญ่และต่อเนื่อง ประจุของคลอไรด์จึงเคลื่อนผ่านได้มาก ส่วนผสมที่มีเถ้าลอยให้ค่าประจุเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดลดลงตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยมีขนาดอนุภาคเล็กและกลม สามารถเข้าไปแทรกทำให้ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง [6] ประกอบกับปฏิกิริยาปอซโซลานที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อความละเอียดมากขึ้นเพราะมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์มากขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า 100FA, 45FA และ 10FA คอนกรีตมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ลดลงเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดเพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้เถ้าลอยและอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยทำให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์มากขึ้น

ผลการทดสอบที่อายุ 28 และ 90 วัน มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับกรณีที่อายุ 7 วัน กล่าวคือค่าประจุลดลงเมื่อผสมเถ้าลอยและเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้น โดย OPC, 100FA, 45FA และ 10FA คอนกรีตให้ค่าประจุผ่านที่อายุ 28 และ 90 วันเท่ากับ 5,880, 2,780, 2,290 และ 690 คูลอมบ์ และ 6,430, 3,480, 1,660 และ 480 คูลอมบ์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C 1202 ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า OPC คอนกรีตมีค่าประจุผ่านอยู่ในเกณฑ์สูงเนื่องจากมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์สูงสุด การผสมด้วยเถ้าลอยธรรมดาให้ค่าประจุผ่านในเกณฑ์ปานกลาง เถ้าลอยละเอียด 45FA ให้ค่าประจุผ่านลดลงอยู่ในเกณฑ์ปานกลางและต่ำ และเถ้าลอยละเอียด 10FA ให้ค่าประจุผ่านลดลงอยู่ในเกณฑ์ต่ำและต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบค่าประจุผ่านที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน พบว่าเมื่ออายุมากขึ้น ค่าประจุผ่านลดลงสำหรับทุกส่วนผสม ทั้งนี้เมื่ออายุเพิ่มขึ้นจาก 28 เป็น 90 วัน ปริมาณประจุผ่านแตกต่างกันไม่มากนัก



รูปที่ 4 กำลังอัดและประจุเคลื่อนผ่านทั้งหมดของคอนกรีตส่วนผสมต่างๆ

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับประจุเคลื่อนผ่านทั้งหมด ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าประจุเคลื่อนผ่านทั้งหมดขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ด้วย และแสดงให้เห็นว่าประจุเคลื่อนผ่านทั้งหมดลดลงเมื่อคอนกรีตมีเถ้าลอยผสมอยู่ด้วย โดยส่วนผสมที่มีเถ้าลอยที่ละเอียดจะให้ค่าประจุเคลื่อนผ่านทั้งหมดต่ำลง

3.3.2 ความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

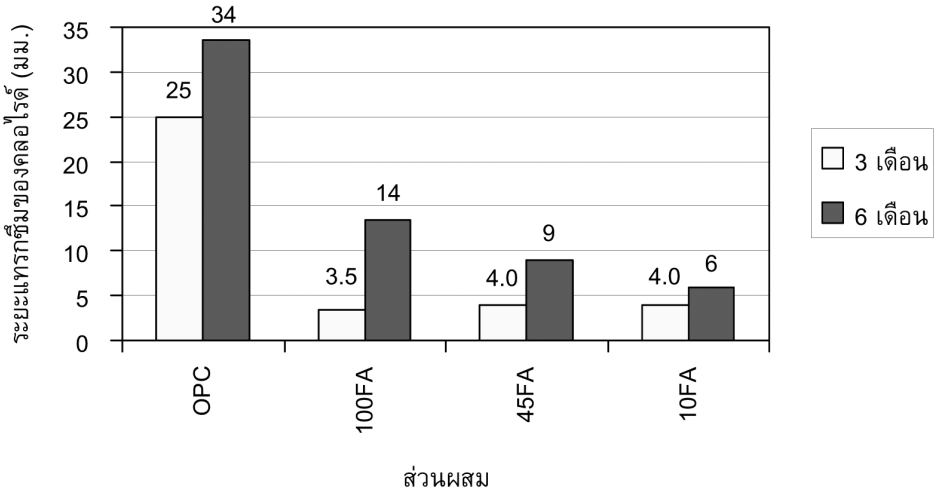
3.3.2.1 ตัวอย่างจมในสารละลายบางส่วน

เมื่อแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 3% เป็นระยะเวลา 3 เดือน ระยะแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าเป็น 25, 3.5, 4.0 และ 4.0 มม. สำหรับ OPC, 100FA, 45FA และ 10FA คอนกรีตตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดย OPC คอนกรีตให้ระยะแทรกซึมของคลอไรด์สูงสุดเป็น 25 มม. เนื่องจากไม่มีสารปอซโซลานผสมและมีกำลังอัดต่ำสุด ระยะแทรกซึมลดลงอย่างมากเมื่อผสมเถ้าลอยและเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้น

เมื่อแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลาย NaCl เป็นระยะเวลา 6 เดือน ระยะแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าเป็น 34, 14, 9 และ 6 มม. สำหรับ OPC, 100FA, 45FA และ 10FA คอนกรีต ตามลำดับ ระยะแทรกซึมลดลงเมื่อผสมเถ้าลอยและเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้น และ OPC คอนกรีตยังคงให้ค่าสูงสุดคือ 34 มม. ระยะเวลาที่แช่ในสารละลาย 6 เดือน สามารถทำให้เห็นระยะแทรกซึมของคลอไรด์ต่างกัน สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยที่ความละเอียดต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่แช่ 3 และ 6 เดือน พบว่าระยะแทรกซึมของคลอไรด์เพิ่มขึ้นทุกส่วนผสม โดยเฉพาะเมื่อผสมเถ้าลอย ระยะแทรกซึมมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด การวัดโดยการแช่คอนกรีต

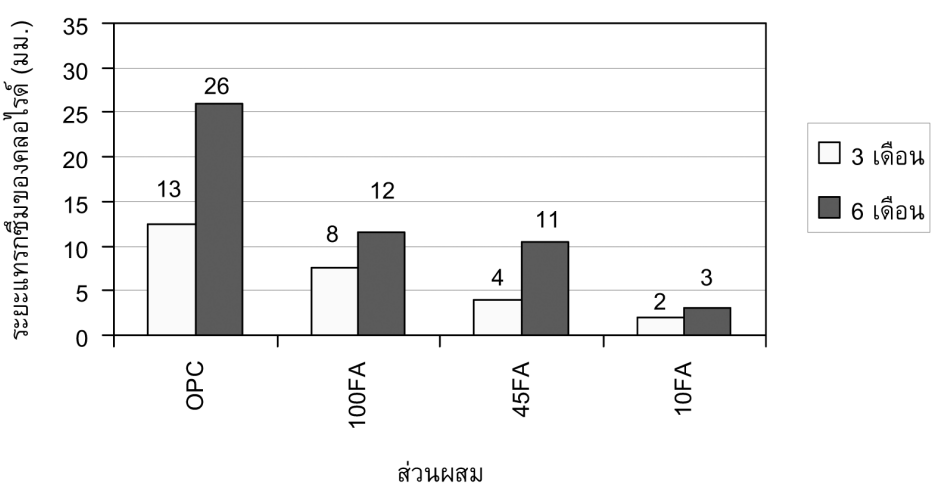
ในสารละลาย NaCl จึงต้องการเวลาถึง 6 เดือนเป็นอย่างน้อย สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ค่อนข้างมีความต้านทานการซึมของคลอไรด์สูง เช่น คอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยเฉพาะเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดสูง



รูปที่ 5 ระยะแทรกซึมของคลอไรด์แบบตัวอย่างจมในสารละลายบางส่วน

3.3.2.2 ตัวอย่างจมในสารละลายทั้งหมด

ที่ระยะเวลาแช่ 3 เดือน ระยะแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าเป็น 13, 8, 4 และ 2 มม. สำหรับ OPC, 100FA, 45FA และ 10FA คอนกรีต ตามลำดับ โดย OPC คอนกรีตให้ค่าสูงสุด และระยะแทรกซึมลดลงเมื่อผสมเถ้าลอย และเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6 เมื่อเพิ่มระยะเวลาที่แช่เป็น 6 เดือน ระยะแทรกซึมของคลอไรด์ มีค่าเป็น 26, 12, 11 และ 3 มม. สำหรับ OPC, 100FA, 45FA และ 10FA คอนกรีตตามลำดับ แนวโน้มยังเป็นเช่นเดิม ความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อผสมเถ้าลอยและเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้น



รูปที่ 6 ระยะแทรกซึมของคลอไรด์แบบตัวอย่างจมในสารละลายทั้งหมด

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการแช่ทั้งสองแบบ พบว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย มีระยะแทรกซึมของคลอไรด์สำหรับการแช่แบบจมในสารละลายบางส่วนสูงกว่าแบบจมในสารละลายทั้งหมด เนื่องจากการทำให้แห้งในห้องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ทำให้คอนกรีตสำหรับการทดสอบแบบจมในสารละลายบางส่วนมีสภาพแห้งมากกว่า จึงดูดสารละลายขึ้นไปได้มากกว่า สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน แต่ต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีระบบโพรงที่มีขนาดเล็ก ทำให้เกิดความแตกต่างของระยะแทรกซึมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่แช่แบบจมในสารละลายบางส่วนไม่ต่างจากที่แช่ในสารละลายทั้งหมดมากนัก ทั้งนี้ความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ขึ้นอยู่กับระบบโพรงของคอนกรีตมากกว่ากำลังรับแรง แต่โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีความทึบน้ำจะมีระบบโพรงที่มีขนาดเล็กและมีกำลังรับแรงดีด้วย

4. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

1. ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยมีค่าสูงขึ้นเมื่อเถ้าลอยละเอียดขึ้น เถ้าลอยที่ไม่คัดขนาด (100FA) เถ้าลอยคัดขนาดละเอียดสุด 45% (45FA) และเถ้าลอยคัดขนาดละเอียดสุด 10% (10FA) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.06, 2.21 และ 2.28 ตามลำดับ

2. เถ้าลอยละเอียดให้กำลังรับแรงของคอนกรีตสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเถ้าลอยที่หยาบกว่า เนื่องจากความสามารถในการลดปริมาณน้ำ การแทรกตัว และการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่ดีขึ้นของเถ้าลอยที่ละเอียด

3. จากการวัดการความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์โดยการวัดการไหลผ่านของประจุเถ้าลอยทำให้ความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ดีขึ้น โดยที่เถ้าลอยที่ละเอียดให้ความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เถ้าลอยที่หยาบ

4. การศึกษาความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีการแช่ตัวอย่างในสารละลาย NaCl 3% เป็นเวลา 3 และ 6 เดือน ทั้งแบบจมบางส่วน และจมในสารละลายทั้งหมด ให้ผลที่สอดคล้องกับการวัดประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่าง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้สนับสนุนใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ

6. เอกสารอ้างอิง

1. คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543, *ความคงทนของคอนกรีต*, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

2. Thompson, N. G. and Lankard, D. R., 1997. "Improved Concrete for Corrosion Resistance [unpublished]," Georgetown Pike, McLean VA: US Department of Transportation, Federal Highway Administration.

3. Papadakis, V. G., 2000, "Effect of Supplementary Cementing Materials on Concrete Resistance Against Carbonation and Chloride Ingress," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 291-299.

4. Chindaprasirt, P., Cao, H. T., and Sirivivatnanon V., 1999, "Blended Cement Technology for Durable Concrete Structures," *First Asia-Pacific Conference on Harmonization of Durability Standards and Performance Tests for Components in Buildings and Infrastructure,* CSIRO, TISTR, Bangkok, Thailand, p. 13.

5. Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., and Sirivivatnanon, V., 2004, "Influence of Fly Ash Fineness on Strength, Drying Shrinkage and Sulfate Resistance of Blended Cement Mortar," *Cement and Concrete Research,* Vol. 34, No. 7, pp. 1087-1092.

6. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T., 2005, "Effect of Fly Ash Fineness on Compressive Strength and Pore Size of Blended Cement Paste," *Cement and Concrete Composites,* Vol. 27, No. 4, pp. 425-428.

7. Building Research Establishment, 1988, *Design of Normal Concrete Mixes,* Watford: Building Research Establishment.

8. Erdogdu, K. and Tucker, P., 1998, "Effect of Fly Ash Particle Size on Strength of Portland Cement Fly Ash Mortars," *Cement and Concrete Research,* Vol. 28, pp. 1217-1222.

9. Lee, S. H., Sakai, E., Diamond, M., and Bang, W. K., 1999, "Characterization of Fly Ash Directly from Electrostatic Precipitator," *Cement and Concrete Research,* Vol. 29, pp. 1791-1797.