

고성능 콘크리트에 대한 “Concrete Canada”의 연구업적 및 향후 방향

Achievements and Future Directions of “Concrete Canada” on High-Performance Concrete Research



조 순 호*

본인은 지난 1996. 12.29 - 1997. 2.23 까지 약 2달여에 걸쳐 한국과학재단 및 초대형 구조시스템 연구센터(STRESS, 한국과학재단 지정 우수연구센터, 한양대 소재)의 지원으로 캐나다의 McGill Univ. 및 Univ. of Toronto에서 단기연구를 수행할 수 있는 기회를 갖게 되었다. 캐나다를 방문지로 택한 주된 이유로는 본인이 McGill에서 학위를 마치고 귀국할 무렵 고성능 콘크리트(High-Performance Concrete, 이하 HPC) 연구센터가 발족된 관계로 이들의 HPC에 대한 구체적인 연구전략 및 내용 등을 상세히 파악할 기회를 갖지 못하였기 때문이었다. 하지만, 이미 초기단계인 4년의 연구기간(1990. 7.-1994. 6.)이 지나고 또 다른 4년의 2단계 연구가 종료되어 가고 있는 현시점에서 이들은 HPC에 대한 상당한 KNOW-HOW를 축적한 것으로 알려져 있으나, 아직은 공식적인 경로에서 핵심영역에 대한 공

개를 꺼려하고 있어 실질적인 접근이 매우 어려운 상태에 있다. 더우기, 국내에서는 미국 및 일본의 HPC 연구현황은 비교적 잘 알려져 있는 반면에, 캐나다에 대한 연구정보는 미비한 까닭에 본인은 캐나다 HPC 연구센터의 구조분야 주요 참여연구자인 M.P. Collins, F.J. Vecchio(Univ. of Toronto), D. Mitchell (McGill Univ.) 교수를 직접 방문, 면담하여 연구센터의 전반적인 현황과 구조 및 관련분야의 핵심연구 내용에 관한 정보를 습득하고자 하였다.

본 내용을 정리하는데 있어서 때로는 정확한 출처 및 충분한 내용이 기술되지 않은 이유는 비공개 자료로부터 획득하였기 때문이고, 또한 본인이 구조전공자인 관계로 가능한 한 구조분야 연구내용만을 보다 자세히 기술하고자 하였으며, 원어의 의미를 보다 정확히 유지하기 위하여 연구제목 및 핵심용어 등은 구

* 정회권, 광주대학교, 건축공학과 조교수

지 한글 번역을 피하였음을 밝혀둔다.

1. Concrete Canada의 연혁 및 구성

1988년 5월, 캐나다 정부는 향후 10-15개 정도의 연구센터를 설립하고 그로부터 4년간에 걸쳐 약 1560억원(Can \$240 Million)의 연구비를 투자하여 자연과학 및 공학, 의학, 사회과학 등의 분야에 집중적인 연구를 수행할 계획을 선포하였다. 이러한 연구 프로그램의 주된 목적은 국가적으로 중요한 첨단 장기 연구 프로젝트에 캐나다 최고 연구자들의 참여를 유도하는 것이며, 그 실행방법으로는 전 캐나다에 걸쳐 산업체, 정부 및 대학을 연결하는 연구센터를 설립하는 것이었다.

이러한 정부의 선포이후 6개월 동안 연구용모가 실시되었으며, 그 결과 전 캐나다에서 158개의 연구제이가 모집되었고 여기에 포함된 연구자의 수도 무려 4000여명에 달하였다. 그 후 각 분야로 부터 제의된 연구내용은 국제 전문가에 의해 평가되어 최종적으로 15개의 제이가 선택되었는데, 이중 5개가 의학, 3개가 전자분야이고 나머지는 우주공학, 펄프 및 제지, 해양공학 등인데 토목공학 분야로서는 유일하게 고성능 콘크리트가 선택되어 비로소 "고성능 콘크리트 연구센터(Network of Centre of Excellence on High-Performance Concrete)", 후에는 "Concrete Canada" 연구센터가 설립되게 되었다.

Concrete Canada는 여러 다른 학문적 배경에서 세계적 명성을 지닌 15-16명의 주요 연구자가 유기적 관계로 통합된 하나의 우수 연구집단으로서 세부적으로는 재료, 구조 및 시공그룹으로 나누어 지며, 이들은 각각 캐나다의 주요 7개대학, 2개의 시공회사에 소속되어 있고, 이외에도 20명의 협조연구자 및 200명 이상의 실무기술자, 과학자 및 대학원생 등이 이들을 보조하고 있다. Concrete Canada의 원대한 사명은 캐나다 콘크리트 기술을 첨단의 위치에 올려놓는 것이며 이와같은 사명은 본 연구센터로부터 개발된 기술을 캐나다 산업체가 보유하여 국제 경쟁력을 가질 때 비로소 달성되는 것으로 간주하고 있다.

Concrete Canada의 제 1단계(1990.7-1994.6.) 주요 연구목표는 고강도 콘크리트 제작/생산 기술 향상, 구조설계 기술 개발, 시공기술 개발 등이며 이 기간중에도 이미 압축강도 1200kg/cm²의 Ready-Mixed 콘크리트가 개발되어 부분적으로 실무에 적용되었다(Scotia Plaza 건물, 5개의 교량, IBM Marathon 건물, Hibernia Offshore Oil Platform-\$5.3 Billion Project 등). 재료그룹 6명, 구조그룹 3명, 시공그룹 2명 등 전체 11명의 주요연구자가 참여하였으며, 4년간의 연구비는 41억원(Can \$6.4 Million) 정도이다. 이중 1/4은 기자재 구입비에 할당된다.

제 2단계 연구(1994.7.-1998.6.)의 최종 목표는 1단계 및 기 개발된 기술을 실무에 전파/적용하는 것이며, 구체적으로는 사회 간접시설의 보수 및 보강을 위한 기술 개발, 내구성 향상, 저렴한 구조물 개발, 신소재 및 이의 생산기술 개발 등의 내용을 포함하고 있다. 재료그룹 8명, 구조그룹 5명, 시공그룹 3명 등 전체 16명의 주요 연구자가 참여하고 있으며, 4년간의 연구비는 36억원(Can \$5.5 Million) 정도이다. 여기서 몇가지 흥미로운 사실은 - 이들은 앞으로 1000년간 사용될 신재료로서 고성능 콘크리트를 지목하고 있는 점과 캐나다의 경우 사회 간접시설의 수명이 거의 극에 달하여 이를 새로운 시설로 대체할 경우 그 비용이 천문학적인 숫자(Can \$600 Billion)가 되므로 경제적인 보수/보강 기술의 개발이 필연적이란 점이며, 이와 같은 보수/보강을 위한 하나의 방법으로 고성능 콘크리트를 사용하겠다는 의지를 표출하고 있는 것이다. 또 한 가지 주목할 사실은 1994년 제 2단계 연구를 채용모할 당시, 기존의 15개의 연구센터중 5개는 탈락하였으며, 현재는 또 다른 4년간의 3단계 연구(1998.7.-2002.6.)를 지속적으로 수행하기 위하여 연구제의 준비 중에 있다.

한편, Concrete Canada는 원활하고 조직적인 운영을 위하여 2개의 소장단 및 1개의 기술 위원회가 수직, 수평으로 연결되어 각 연구그룹과 직접적인 관계를 갖는 독특한 업무체계를 가지고 있으며, 상기에 언급한 연구프로그램 이외에도 실무자들을 위한 수

Table 1 Structure of Concrete Canada

	Groups	Principal Researchers	Research Areas
Phase 1 (1990-1994)	Materials	Pierre-Claude Aitcin, Univ. of Sherbrooke Gerard Ballivy, Univ. of Sherbrooke Carmel Jolicoeur, Univ. of Sherbrooke Jim Beaudoin, Univ. of Ottawa & NRC Sidney Mindess, Univ. of British Columbia Michel Pigeon, Laval Univ.	Concrete Materials and Microstructures Grouts and Rock Materials Physical Chemistry Concrete Microstructure Fiber Reinforced Concrete, Impact Strength Durability
	Structures	Michael Collins, Univ. of Toronto Jim MacGregor, Univ. of Alberta Denis Mitchell, McGill Univ.	Structural Properties of Reinforced Concrete Structural Research and Safety Requirements Bond Strength and Seismic Research
	Construction	John Bickley, J. Bickley and Associates Rusty Morgan, HBT Agra Ltd.	Use of HPC in Construction HPC Shotcrete
Phase 2 (1994-1998)	Structures	*Water H. Dilger, Univ. of Calgary *Robert E. Loov, Univ. of Calgary	
	Construction	*Phil Seabrook, LEVELTON Associates	
	Materials	*Theodore W. Bremner, Univ. of New Brunswick *Carolyn M. Hansson, Univ. of Waterloo	

*Additional Researchers Participating from Phase 2

Scientific Director: P.C. Aitcin

Administrative Center: Univ. of Sherbrooke, Dept. of Civil Engrg., <http://www.usherb.ca/concrete>

많은 세미나 및 발표회 개최, 혹은 교육프로그램을 제공하고 있다. 각 단계별 인적 구성 및 관련 분야는 Table 1과 같다.

2. 연구내용 및 업적

당초, Concrete Canada의 주요 연구자는 제 1 단계 총괄과제 연구영역으로서 i) 신소재 건물재료 개발, ii) 고강도 콘크리트 구조의 설계, iii) 제품개발 등을 제시하였으며, 이에 따라 총 44개의 세부과제를 발의, 수행하였으나, 그로부터 2년 뒤에는 유사과제를 통/폐합하고 핵심과제로 재편성하는 과정을 거쳐 최종적으로 4개의 총괄과제 하에 18개의 세부과제를 결정, 수행하였다. 보다 자세한 내용은 Table 2와 같다.

한편, 2단계 연구과제는 1단계 연구수행후 그 결과에 대한 각계 각층의 실무자들과 다각적인 검토/토의로부터 도출하였는데 과제를 선별하는 센터의 기본원칙은 i) 보수/보강기술과 같이 캐나다 정부에 최대의 이익을 줄수 있어야 하며, ii) 이미, 다른나라에서 수행 혹은 착수된 연구내용은 절대적으로 배제하며, iii) 센터의 서로 다른 학문적 배경 및 전문성

을 지니고 있는 연구원들이 공동으로 참여하여 그 효과를 극대화 할 수 있는 통합과제이어야 하며, 또한 iv) 실무에서 절대적으로 필요로하는 기술인 동시에 미래 지향적이어야 한다는 점이 매우 흥미롭다. 이와 같은 절차를 걸쳐 최종적으로 선정된 4개의 총괄과제의 연구영역은 i) 사회간접 시설의 보수/보강 기술 개발, ii) 내구성이 우수하고 값이 저렴한 구조체 개발, iii) 신소재 및 제품 개발, iv) 직접적인 실무 적용 등이다. 보다 자세한 내용은 Table 3과 같다.

압축강도 10-10,000kg/cm²까지의 HPC를 제작하고자 하는 Concrete Canada의 노력에서도 알 수 있듯이 제 1 및 2단계 연구의 핵심영역은 재료분야 인데(그 결과 연구소장도 P.C. Aitcin임), 그럼에도 불구하고 Table 2 및 3의 과제배치를 조사해보면 구조분야가 점차 그 비중이 높아가고 있음을 짐작할 수 있다. 또한, 여기서 특별히 주목할 사실은 아래 나열된 모든 과제들이 현재를 기준으로 이미 완료되었거나 완료 시점에 와있다는 점이다.

2.1 1단계 연구내용

Table 2 Research Subjects at Phase 1

Project 1 Development of a New Generation of Building Materials		
Activity	Title	Related Topics
M1	Superplasticizer Interaction in HPC Systems	Particle-Solution Interaction
M2	HPC Binder/Aggregate/Rock Interfaces	Interface Stress Transfer Mechanism Cement-Aggregate Bond
M3	Durability of HPC	Reducing Permeability and Porosity Kinetics of Chemical Attack Freeze-Thaw Resistance of HPC Deicing Salt Scaling Resistance Study of Externally/Internally Induced Microcracking on Durability Fatigue Resistance of HPC
M4	Fibre-Reinforced HPC	Influence of Fibre Type and Dosages on Concrete Strength
M5	Optimization of HPC Composition	Materials Selection Criteria Economic/Technological Optimization of HPC
M6	Advanced Composite Repair Materials	Chemical Reactions in Very Low Porosity Systems Interface Stress Transfer Mechanism
Project 2 Design of High-Strength Concrete Structures		
Activity	Title	Related Topic
S1	Analytical Modeling of 3D Concrete Structures	<ul style="list-style-type: none"> • Formulate 3D Constitutive Model for Cracked Concrete • Test Shell Elements for 3D Constitutive Response • Formulate 3D Nonlinear Finite Element Models • Test Shell Elements in Punching Shear
S2	Bond Strength of HPC	<ul style="list-style-type: none"> • Test Single Bar and Multiple Bar Pullout Specimens • Formulate Analytical Model for Bond and Anchorage • Test Lap Splices in Biaxially Stressed Specimens
S3	Flexural Mechanics of HPC	<ul style="list-style-type: none"> • Scale Effects on Rotation Capacity of HPC Beam • Strain Localization on HPC • Analyze and Test Columns • Define Column Strength Under Sustained Load • Investigate High-Strength Reinforcement • Column Load Transfer Through Low Strength Floors • Early Age Tests of Beams
Project 3 Applications and Development of New Products and Technologies		
Activity	Title	Related Topic
A1	Precast, Prestressed Structural Elements	• Precast, Prestressed Concrete Products
A2	Nonstructural Uses of HPC	<ul style="list-style-type: none"> • HPC as a Granite Substitute • HPC as a Substitute for Ceramic and • Cast-Iron Moulds
A3	High-Performance Grouts	<ul style="list-style-type: none"> • High-Performance Grout Injection Techniques • Long-Term Durability of HP Grouts • New Concrete Mixing Techniques
A4	Fibre-Reinforced Applications of HPC	<ul style="list-style-type: none"> • Fibre-Reinforced Shotcrete • Incorporating Abestos Fibres in HPC • Impact Resistance of Railroad Ties
A5	Testing and Monitoring	<ul style="list-style-type: none"> • Instrumentation of Existing Structures or • Structures Under Construction • Monitoring Concrete Structures

Project 4 Code Implications		
Activity	Title	Related Topics
C1	Books on HPC: Materials, Design, and Construction	
C2		
C3		National Aggregate Characterization Program
C4	Development of Standards and Test Procedures for HPC	<ul style="list-style-type: none"> • Developing Standards for Testing HPC • Testing and Evaluation of HPC Toughness • Test Parameters
	Code Clause Change	<ul style="list-style-type: none"> • Liaison with Authorities Establishing New • Materials and Testing Codes and Clauses • Develop and Implement Code Changes for • Design of HPC Structures • Liaison with Industry on the Use and • Specification of HPC • Derive Material Resistance Factors

2.2 2단계 연구내용

Table 3 Research Subjects at Phase 2

Project 1 Infrastructure Rehabilitation (Leader: Sidney Mindess)	
Title	Related Topics
Rehabilitaion	<ul style="list-style-type: none"> • Develop Diagnostic and Evaluation Methods to Determine the Residual Capacity of Existing Concrete Structures • Develop Models to Simulate the Influence of Corrosion on Structural Elements • Refinement of Nondestructive Methods of Instrumentation • Systematic Study of the Durability of Shotcrete Structures and of Hydraulic and Marine Structures Repaired with Shotcrete
Development of New Repair Materials and Methods	<ul style="list-style-type: none"> • Develop Reinforced Microfibre Concrete • Characterization, Optimization and Durability Testing of Matrices Containing Wollastonite, Carbon, and Steel Fibres • Develop and Evaluate Underwater Concreting Techniques and Their Durability • Re-evaluation of Existing Test Standards for Repair Materials • Develop a system of Adequate Mechanical Grout-Injected Anchorages • Study of Concrete Rock-Socketed Piers
Project 2 Durability and Optimization of HPC Structures(Leader: Denis Mitchell)	
Title	Related Topics
Durability	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluate Impacts by Penetration and Diffusion of Aggressive Ions in HPC • Tests on Loaded HPC Elements in Aggressive Environments • Investigate the Larger Thermal Gradient Occurred in Some HPC During Hydration
Structural Behaviour and Design of HPC Elements	<ul style="list-style-type: none"> • Determination of Minimum Reinforcement for HPC Elements • Determine the Necessary Confinement for HPC Columns • Use of T Headed Bars in Structural Elements • Behaviour of HPC Elements and Structural Systems During Earthquakes • Use of HPC in Two Way Slabs • Creep and Shrinkage Behaviour of HPC
Economies Related to Using HPC	<ul style="list-style-type: none"> • To Reduce the Unit Cost of HPC, Study of • Compatibility Between Cement and Superplasticizers • Use of Supplementary Cementitious Materials • Optimization of Functional Properties and Applications of Admixtures

Project 3 Development of New Materials and Products(Leader:Carmel Jolicoeur)	
Title	Related Topics
Cement/Admixture Compatibility	<ul style="list-style-type: none"> • Study of Interactions Between Cements and Chemical Admixture, and Investigate Their Influences on the Properties of Fresh and Hardened Concrete, and Grouts.
Development and Fine-Tuning of New Cementitious Products	<ul style="list-style-type: none"> • Develop Formulations Incorporating High Alumina Cements and Others for Expansive and Repair Materials • Develop Modified Type 20 Cements Incorporating Silica Fume and Limestone Fillers for Mass Concrete
Development of New Application Technologies	<ul style="list-style-type: none"> • Develop Field Trial and Control Program to Evaluate Rheological Behaviour and Stability of HP, Self-Placing Concretes and Grouts
Design of Innovative Products	<ul style="list-style-type: none"> • Develop Reactive Powder Concrete (RPC, Compressive Strength Ranging 200 to 800MPa, Flexural Strengths From 30 to 65MPa, and Toughness Varying from 20,000 to 60,000 J/m², See Fig. 1) • Replacing Steel Moulds by HPC • Art Works By HPC
Project 4 Demonstraion Projects and Practical Applications(Leader:John Bickley)	
Title	Related Topics
Mining, Road and Bridges	<ul style="list-style-type: none"> • Develop 1MPa HPC Prepared From Mining Tailings for Filling Underground Excavation Sites. • Under Construction of Highway 409 Containing 590 Lane km of Concrete Pavement and 120 Bridges • Rehabilitation of the Jacques Cartier Bridge in Sherbrooke with Air Entrained HPC
Agriculture	<ul style="list-style-type: none"> • Pattering Houses for Piglets to Reduce Bacterial Contamination
Industrial	<ul style="list-style-type: none"> • Large Holding Tanks for the Treatment of Their Plant Effluents in Pulp and Paper Industry • Utility Buildings for Electrical Distribution • High Pressure Pipes
Housing	<ul style="list-style-type: none"> • Develop Guidelines for Improving the Construction of Concrete Basements
Bridges and Canals	<ul style="list-style-type: none"> • Stoney Creek Bridge • Prince Edward Island Bridge(\$700 Million HPC Project) • Restoration of the Rideau Canal by HPC Grouts • Sherbrooke Pedestrian Bridge with Confined RPC • Rebuilding the Webster Street Parking Garage in Sherbrooke with Composite Materials and Air-Entrained Shotcrete
Modifications to Canadian Codes of Practice	<ul style="list-style-type: none"> • Many Amendments are Incorporated in 1994 Version of • CSA Standards A23.1-94(Concrete Materials and Methods of Concrete Construction) • CSA Standards A23.3-94(Design of Concrete Structures)

2.3 발표된 논문 목록

은 별도로 추가하여 이해하여야 함을 밝혀둔다.

아래의 목록은 1991-92, 1993-94 연례 보고서에
서 발췌하여 정리하였으므로, 최근에 발표된 논문들

Table 4 List of Publications

Sources	Authors	Titles
ACI, MJ	P.C. Aitcin & A. Neville	High-Performance Concrete Demystified
CJCE, Vol.18, No5, 1991, pp.885-889	W.A. Bickley, et al.	Some Characteristics of High-Strength Structural Concrete
HPCC Seminar, Taipei, Nov., 1992	P.C. Aitcin	How to Make High-Performance Concrete
ACI Convention, Vancouver, March, 1993	J.A. Bickley	Prequalification Requirements for the Supply and Testing of Very High Strength Concrete
ACI	M. Lessard, et al.	Testing High-Strength Concrete Compressive Strength
ACI	P.C. Aitcin, et al.	Effects of Cylinder Size and Curing on the Compressive Strength of High Performance Concretes
ACI, Montreal "Progress in Concrete" 24-25 Nov. 1992	Carmel Jolicoeur, et al.	Cement-Superplasticizer Compatibility in High-Performance Concretes: The Role of Sulfates
HPCC Seminar, Toronto, Oct. 6, 1992	D.R. Morgan & Michel Pigeon	High Performance Shotcrete
University-Industry Workshop on FRC, Sainte-Joy Quebec, Oct. 28-29, 1991	D.R. Morgan	Use of Steel Fibre Reinforced Techniques in Canada
CCR, Vol. 23 (3), 1993, pp. 531-540	Ping Gu, Zhongzi Hu, Pi ng Xie & J.J. Beaudoin	Application of A.C. Impedance Techniques in Studies of Porous Cementitious Materials
CCR, Vol. 23 (4), 1993	Zhongzi Xu, et al.	Application of A.C. Impedance Techniques in Studies of Porous Cementitious Materials
ACI, CI	M.P. Collins, et al.	Structural Design Considerations for High-Strength Concrete
Conference, hosted by Thomas Hsu, Texas	Michael P. Collins	The Response of Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear
ACI, MJ, Jan-Feb., 1992	W.D. Cook, et al.	Thermal Stresses in Large High-Strength Concrete Columns
ACI, MJ, March-April, 1992	H.H. Abrishami, et al.	Simulation of Uniform Bond Stress
"Advances in Concrete Technology", Edited by U.M. Malhotra, Ottawa, 1992, pp.471-502	C. Jolicoeur & M.A. Sima rd, et al.	Chemical Activation of Blast-Furnace Slag: An Overview and Systematic Experimental Investigations
ASCE, GTdiv., Feb., 1992 pp. 588-600	G. Ballivy, J.C. Colin & T. Mnif	Effectiveness of Injected Cement Grout Under Harsh Environmental Conditions
ASCE, GTdiv., Feb. 1992 pp. 614-625	G. Ballivy, et al.	Rehabilitation of Concrete Dams: Laboratory Simulation of Cracking and Injectability
ACBM, 1994:17 pp.224-236	J.J. Beaudoin, et al.	Pore Structure of Hardened Cement Pastes and Its Influence on Properties
CONTECH 94 International Rilem Workshop, Barcelona, Spain, Nov., 1994	P.C. Aitcin & M.Baalbaki	Admixtures-Key Components of Durable Concrete
ACI SP-148, Montreal, Oct., 1994	C. Jolicoeur, et al.	Progress in Understanding the Functional Properties of Superplasticizers in Fresh Concrete
ACI, CI, May, 1994	P.C. Aitcin, et al.	Superplasticizers: How They Work and Why They Occasionally Don't
ACI, SP 144-8 Concrete Technology	J.A. Bickley, et al.	Thaumatise Related Deterioration of Concrete Structures

Sources	Authors	Titles
CJCE, 21, 1084-87, 1994	J.A. Bickley, et al.	Some Characteristics of High-Strength Structural Concrete Part 2
CCA, Vol.16, No.2 Dec., 1994	P. Rougeron & P.C. Aitcin	Optimization of the Composition of a High Performance Concrete
ACI, MJ, Sept.-Oct., 1994	F.M. Bartlett, et al.	Effects of Core Diameter on Concrete Core Strengths
ACI, MJ, July-Aug., 1994	P.C. Aitcin, et al.	Effects of Size and Curing on Cylinder Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete
CANMET/ACI, June 11-14, 1995, Las Vegas	W.H. Dilger & C. Wang	Shrinkage and Creep of High Performance Concrete (HPC): A Critical Review
Cement and Concrete Research, Vol. 24, No.2 pp.250-258, 1994	N.M.P. Low & James J. Beaudoin	The Flexural Toughness and Ductility of Portland Cement based Binders Reinforced with Wollastonite Micro-Fibres
ACI Fall Convention, Tampa Springs, Florida, Oct. 21, 1994	Dudley R. Morgan	Applications of Fiber Reinforced Shotcrete
ACI, CI, Sept., 1994	B. Katsensteiner, et al.	Dynamic Tests of Steel fiber Reinforced Concrete Frames
CJCE, 21, pp.89-100, 1994	C Yan & S. Mindess	Bond Between Epoxy coated Reinforcing Bars and Concrete Under Impact Loading
ACI, MJ, Nov.-Dec., 1994	C. Talbot, et al.	Influence of Surface Preparation on Long-term Bonding of Shotcrete
ACI, MJ, Sept.-Oct., 1994	D. Beaulpre, et al.	Deicer Salt Scaling Resistance of Dry and Wet process Shotcrete
CJCE, 31 pp.407-419, 1994	B. Benmokrane, et al.	Laboratory Investigation of Shear Resistance of Rock socketed Piers Using the Constant Normal Stiffness Direct Shear Test
ACI	M.P. Collins	A General Shear Design Method
ACI, SJ, May-June, 1994 Vol. 91, No.3	P. Alebar & M.P. Collins	Shear Design of Concrete Offshore Structures
PCI, Jan.-Feb., 1994	R.E. Looy & A.K. Patnaik	Horizontal Shear Strength of Composite Beams with a Rough Interface
ACI, SJ, Vol. 91, No.1 Jan.-Feb., 1994	M.G. Ghannin & J.G. Magregor	Tests of Reinforced Concrete Plates Under Combined Inplane and Lateral Load

상기에 사용된 약어의 설명은 아래와 같다.

ACI : American Concrete Institute

MJ-Material Journal

SP-Special Publication

ST-Structural Journal

CI-Concrete International

ACBM : Advanced Cement-Based Materials

ASCE : American Society of Civil Engineers

SE-Structural Engineering

EM-Engineering Mechanics

GT Geotechnology

CANMET : Canada Center For Mineral and Energy Technology

CCR : Cement & Concrete Research

CJCE : Candian Journal of Civil Engineering

PCI : Prestressed Concrete Institute

4. 구조분야의 핵심 이슈

3D 콘크리트 구조물의 해석모델 개발(Collins & Mitchell) : 20년간의 집중적인 연구결과로 탄생하게 된 (수정)압축응력장 이론을 향상/확장 시킬 목적으로 제시된 본 연구는 i) 종래 관계식의 적용범위를 콘크리트 압축강도 200-400kg/cm²에서 1500kg/cm² 까지 증가시키기 위하여 고강도 콘크리트의 균열면에 발생하는 응력전달 기구의 규명, ii) 3D 균열된 고강도 콘크리트의 인장력 전달 기구 규명, iii) i) 및 ii)의 실험결과를 근거로한 3D 비선형 유한요소 해석모델 개발 등이다. 이를 위하여 특수하게 제작된 Univ. of Toronto의 Membrane 및 Shell Element Tester (Fig. 2 및 3)로 이미 40여개의 실험 Shell 요소의 실험이 수행된바 있다.

고성능 콘크리트의 부착성능(Mitchell &

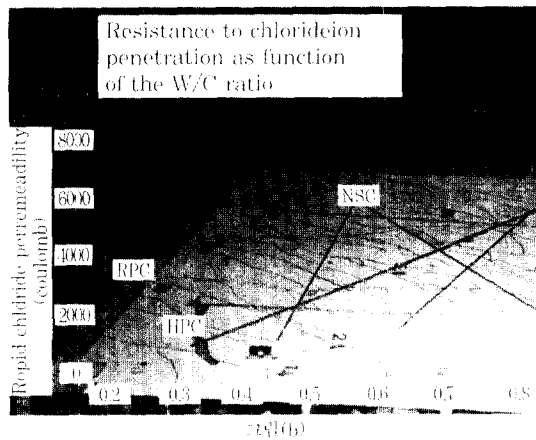
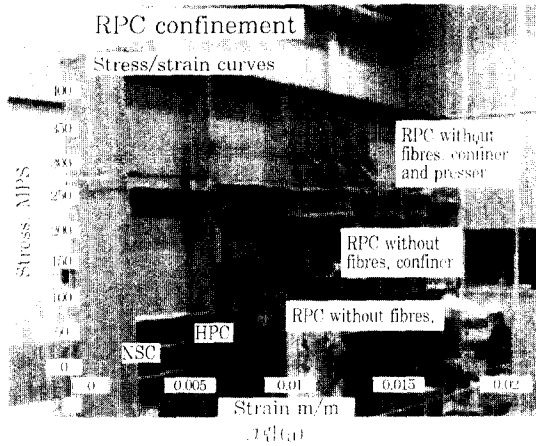


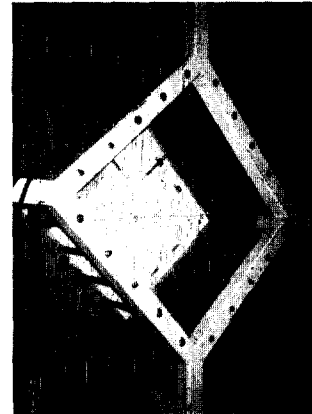
Fig.1 Reactive Powder Concrete($f_c' = 2,000-8,000\text{kg/cm}^2$)

Collins) : 현재 사용하고 있는 부차 관계식은 물/시멘트 비가 높은 콘크리트에서나 발생할 수 있는 Top Bar 효과를 고려하여 실험적으로 유도된 제안 사항으로서, 상대적으로 조밀한 특성을 나타내는 고강도 콘크리트의 경우에는 이들의 개평가가 필요하며, 아직도 부차거동에 대해서는 합리적인 해석모델이 존재하지 않는 것으로 알려져 있다. 이에, 본 연구에서 제시하는 접근 방법은 i) 부차에 대한 합리적인 거동 해석 모델 개발, ii) 내부 균열을 Mapping할 수 Imaging 기술 개발, iii) 비선형 유한요소해석 및 ii)를 병행한 관련 실험의 수행 등이다.

고성능 콘크리트의 휨 거동(MacGregor, Collins & Mitchell) : i) 휨응력 분포는 일반적으로 고강도 콘크리트는 고응력층의 수직부재로 사용되는데 휨 수준에서 제시하는 휨응력 분포는 큰 변형도 기울기



(a) Overall View



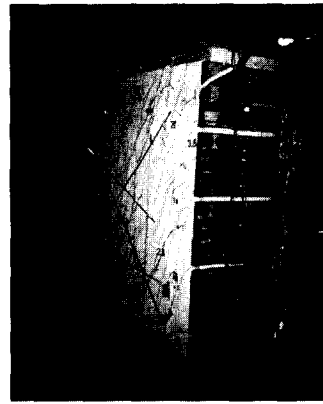
(b) Close-Up Rear View

Fig. 2 Membrane Element Tester in Univ. of Toronto (37 Actuators for In-plane Loading; Each 100 tonf)

(Stain Gradient)를 갖는 보의 거동으로 부터 유도 되었으므로, 상대적으로 적은 변형도 기울기를 갖는 고강도 콘크리트 거동의 경우에는 이의 재평가가 요구된다. ii) 지속적 하중에 의한 고성능 콘크리트의 거동- 큰 변형도 기울기를 갖는 경우 및 부정형의 경우. iii) 기둥과 슬래브 교차 지역의 거동 - 보통 콘크리트로 슬래브를 먼저 타설한 후 고강도 콘크리트로 기둥을 타설하는 것이 일반적인 시공법인데 이러한 경우 슬래브와 교차하는 기둥 지역에는 보통 콘크리트가 삽입되므로 이에의한 접합지역의 구조적 거동 규명이 요구된다. iv) 최소 철근비- 휨 및 전단보강근, 띠철근, 지진하중이 발생할 경우. v) 압축력을 지지하는 콘크리트의 파괴기구- 국부변형 (Strain Localization)효과로 인한 크기효과(Size Effect) 및 응력-변형도 인화현상(Softening Effect) 규명. vi) 보의 초기 강도-고성능 콘크리트의 매력적인 점중의 하나는 초기 발현강도가 높다는 점이다. 따라서 초기 하중재



(a) Overall View



(b) Close-Up Rear View

Fig.3 Shell Element Tester in Univ. of Toronto(40 Actuators for In-plane, and 20 for out-of-Plane Loading:Each 100 tonf)

하에 의한 장기거동을 규명하는 것이 요구된다. vii) 고강도 보강근 사용-항복강도 $6000\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도가 현 재료로서는 경제적인 것으로 판단되고 있다.

이와같은 연구결과로 1994년 캐나다 콘크리트 구조설계 표준인 CSA-A23.3은 압축강도 $800\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지의(내진 설계의 경우에는 $550\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지 허용) HPC 설계를 포함하기 위하여 상당한 수정을 가하였는데 그내용은 아래와 같다.

- 1) Chapter 7 Details of Reinforcement : Ties for Compression Members
- 2) Chapter 8 Design: Limit States, Load Combinations and Material Properties : Design Strength of Concrete, Modulus of Elasticity
- 3) Chapter 10 Flexure and Axial Loads: Maximum Concrete Strain, Concrete Stress-Strain Relationship, Equivalent Rectangular Concrete Stress Distribution, Maximum Axial Load Resistance, Minimum Reinforcement, Limit of c/d for Yielding of Tension Reinforcement, Columns- Transmission of Loads Through Floor System
- 4) Chapter 11 Shear and Torsion: Minimum Shear Reinforcement
- 5) Chapter 12 Development of Reinforcement: Provision 12.1.1

vi) Chapter 13 Precast Concrete: Provision 16.1.3

6) Chapter 21 Special Provisions for Seismic Design : Provision 21.2.4.1

5. 향후 연구방향 및 맺음말

현재까지의 Concrete Canada의 연구는 재료분야가 주요부분을 차지 하였으나, 향후에는 구조분야가 핵심이 될 것이며 이에 따라 연구소장도 현재의 P.C. Aitcin(재료)에서 Denis Mitchell(구조)로 바뀔 예정에 있다. 이미, 이러한 사실이 현 소장으로부터 공식적으로 표명되어 제 3단계(1998-2002) 연구용모를 준비하는 현시점에서 연구제의 작성 및 기타 센터의 향후 연구방향 설정 등에 Denis Mitchell이 주도적으로 관여하고 있다. Denis Mitchell과의 면담 결과, 이번 10월쯤 연구센터에 대한 정부의 3단계 지원여부가 결정되며, 제의된 3단계 구조분야의 주요 내용중의 하나는 고강도 콘크리트와 철골을 능동적으로 사용하는 혼합구조의 개발인 것으로 알려져 있다.

지금까지 Concrete Canada에 대한 전반적인 내용을 알아보았다. 현재 경쟁적으로 고강도 콘크리트 연구가 열을 올리고 있는 국내사정을 감안할 때 적어도 연구의 중복성 만이라도 배제하는데, 본 고가 참고가 되었으면 하는 바램이다.

참고 문헌

1. J.G. MacGregor, Canadian Network of Centres of Excellence on High-Performance Concrete, (Concrete International, 1993, 2), pp.60-61.
2. P.C. Aitcin, 1991-92 Annual Report of the NCE-HP
3. P.C. Aitcin, 1993-94 Annual Report of the NCE-HP4, Newsletters of the NCE-HP, 1996 Issues
4. Newsletters of the NCP-HP, 1996 Issues
5. Brouchers for the NCE-HP and Concrete Canada 