

재생콘크리트의 동결융해저항성과 변형특성

Freezing-and-Thawing Resistance and Strain Characteristics of Recycled Concrete

김 광 우* 이 봉 학** 도 영 수***
Kim, Kwang-Woo Lee, Bong-Hak Doh, Young-Soo

요 약

파쇄 폐콘크리트를 재활용한 재생콘크리트의 강도특성을 천연골재를 사용한 일반콘크리트와 비교하였다. 동결융해 처리후의 압축강도와 3점휨 재하시험하의 변형율을 측정하였다. 재생콘크리트는 동결융해 처리 후 압축강도 보존율이 더 높았다. 재생콘크리트는 또한 높은 변형율과 처짐에 민감함을 보였으나 파괴와 관련된 다른 성질들은 일반콘크리트와 유사하거나 더 좋은 것으로 나타났다. 그러므로 폐콘크리트를 구조용 콘크리트 제조에 재 사용이 가능할 것으로 보여진다. 그러나 실제 사용을 위하여는 콘크리트에 있어서 중요한 성질인 압축강도가 더 증진되어야 하며 최대 변형율도 보다 자세히 점검되어야 한다.

Abstract

Selected strength characteristics of recycled concrete using crushed waste concrete were compared with those of conventional concrete using natural aggregate. Compressive strength following freezing-and-thawing treatments and strains under three-point bending were the characteristics evaluated. Compressive strength of conventional concrete following freezing-and-thawing treatments was generally higher than that of the recycled concrete. However, the strength retaining ratios of recycled concretes were higher than those of conventional concretes. Strains of recycled concrete were larger than those of conventional concrete and sensitive to deflection under the same load. Sensitivity to notch of the recycled concrete prepared in this study were found to be better than or identical with conventional concrete. Therefore, it may be possible to recycle the waste concrete in structural concrete manufacture. However, the compressive strength which is one of the most important load carrying capacities of concrete should be improved, and maximum strain must be further examined for practical use.

Keywords : Recycled Concrete, recycling, waste concrete, Freezing and-thawing, fracture, compressive strength, strain

* 정회원, 강원대학교 농공학과 조교수

** 강원대학교 토목공학과 부교수

*** 우성엔지니어링 연구원

1. 서 론

도심지역에서의 건설공사는 대부분이 기존 콘크리트 구조물의 철거를 필요로 하고 있으며 그것의 운반은 물론 처리가 점차적으로 곤란해져 가는 실정이다. 이러한 사실은 값비싼 골재를 구입함과 함께 비싸게 폐기물을 처리해야 하는 이중고로 건설단가를 상승시키는 하나의 요인이 되고 있다.

1970년대 부터 미국등 구미에서는 골재의 수요와 공급관계 및 콘크리트 폐기물을 골재로서 이용할 수 있을지의 가능성에 대한 포괄적인 조사연구가 실시되고 있으며⁽²⁻⁵⁾ 골재의 대체물로 콘크리트 폐기물을 재이용하는 문제에 대한 필요성을 지적하고 있다. Itoh⁽⁶⁾의 보고는 미국의 콘크리트 폐기물의 양을 조사해서 이를 참고로 하여 플랜트를 설계하고 원가계산을 하여 천연골재의 원가와 비교해서 경제적인 이용가치가 있음을 시사했다. 또한 금년도 미국토목학회에서는 건설재료 재활용에 관한 분과를 학술대회에 포함시켜 콘크리트뿐 아니라 건설폐기물 전분야에 대한 국제적인 학술회의를 개최하였다.^(6, 9)

선진국의 이러한 추세에 비추어 볼 때 우리나라와 같이 자원이 부족한 나라에서 폐콘크리트를 유용하게 재이용하는 실용화 방안이나 연구에 보다 많은 관심을 가질 필요가 있다. 특히 근래에 와서는 콘크리트 구조물들을 그 수명이 다해서라기보다 용도상 형태 변경등을 위하여 철거를 하고 그 자리에 새로운 콘크리트 구조물을 건설하고 있어 폐콘크리트의 활용 가능성은 훨씬 높다하겠다. 그러므로 본 연구는 건설재료 재활용의 일환으로 구조물의 철거시 나오는 다량의 폐콘크리트를 재활용하기 위한 기초적 자료를 제시하기 위하여 수행되었다.

본 연구의 기본 목적은 폐콘크리트를 콘크리트용 골재로서 사용하여 천연골재로 만든 일반콘크리트와 비교하여 구조재료로서의 강도특성을 점검하는 데 있다. 우선 기초적인 연구로써 기본적인 압축강도와 부착력 파괴 및 변형특성을 일반콘크리트와 비교하고 재생콘크리트를 구조용 재료로 사용하는데 있어서 강도상 제기될 문제점을 점검하였다. 본 연구에서는 동결융해에 따른

압축강도 변화와 변형특성에 대한 결과를 제시하였으며 재생골재의 부착 및 파괴특성 등은 문헌 6에 제시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료

본 연구에서는 천연골재(Virgin Aggregate)와 폐콘크리트를 파쇄하여 얻어진 재생골재(Recycled Aggregate)를 사용하였다. 천연 굵은골재로는 레미콘 제조용 쇄석을 춘천지역의 한 레미콘 공장에서 공급받았으며 천연 잔골재로는 신연강의 모래를 채취하여 사용하였다. 재생골재로는 건물의 폐콘크리트(약 25년 됨)와 옹벽 붕괴로 인한 폐콘크리트(약 15년 됨)를 이용하였다.

사용된 천연 굵은골재의 최대수치는 40mm이며 재생골재는 폐콘크리트를 파쇄하여 #4체로 체가름한 후 재생 굵은골재와 재생 잔골재로 나누었다. 여기서 재생 굵은골재란 파쇄된 혹은 본래의 자갈에 기존 몰탈이 부분 또는 전체적으로 달라 붙어있는 파쇄콘크리트 덩어리들이며 최대치수는 40mm로 제한하였다. 무근콘크리트용 골재입도규정을 모든 골재에 적용하였다.

시멘트는 S사의 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다. 사용된 각 골재의 물리적 성질은 표 1과 같으며 골재의 입도분포곡선은 그림 1에서 보여주고 있다. 재생 잔골재는 유기 불순물을 많이 포함하고 있어 흡수율이 매우 높았고 워커빌리티 저하

Table 1. Physical Properties of Aggregates

Type	ASG	SSDSG	ABP(%)	F.M.
VFA	2.654	2.548	2.347	2.603
VCA	2.690	2.630	1.034	
RFA	2.666	2.300	10.569	3.093
RCA	2.660	2.476	4.692	

VFA : Virgin Fine Aggregate,

VCA : Virgin Coarse Aggregate,

RFA : Recycled Fine Aggregate,

RCA : Recycled Coarse Aggregate,

ASG : Apparant Specific Gravity,

SSDSG : Saturated Surface Dry Specific Gravity,

ABP : Absorption(%),

F.M : Fineness Modulus.

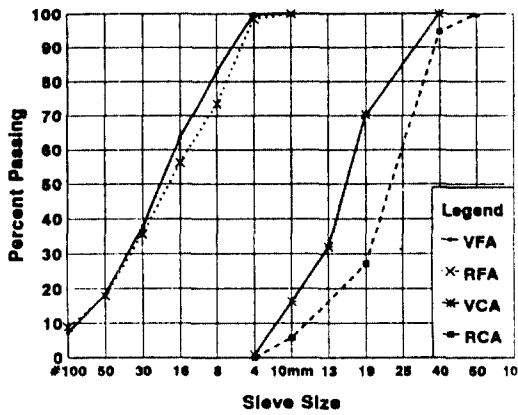


Fig. 1 Gradations of Aggregates Used

요인이 되어 변형측정에서는 이를 제외하였다. 변형을 측정을 위하여 길이 67mm 콘크리트용 Strain Gage(Gage Factor=2.09)를 사용하였다.

2.2 콘크리트 배합

콘크리트 표준시방서('89 건설부)에 따라 콘크리트를 제조하였으며 각각의 단위배합량은 아래의 표 2와 같다(혼화재료는 사용치 않음). 배합시 폐콘크리트가 포함된 콘크리트를 재생콘크리트(Recycled Concrete), 천연골재만을 사용한 것을 일반콘크리트(Conventional Concrete)라 명명하였다. 여기서 A와 A1차이는 사용된 굵은골재 배치(batch)의 차이에 기인한 것이다. 콘크리트의 혼합은 실험실용 전동믹서를 사용하였으며 배합시 재생콘크리트의 Workability가 다소 좋지 않음을 알 수 있었다.

Table 2. Mix Proportion for Each Type of Concrete

Type	Slump (cm)	Unit Weight (kg/m ³) of Concrete					
		W	C	S	RFA	G	RCA
A	10	178.0	368.5	650.0		1176.8	
B	10	178.0	368.5	308.0	308	564.8	564.8
C	10	178.0	368.5	650.0		558.4	558.4
A1	10	188.2	289.7	717.0		1030.1	

A : Mix of Conventional Concrete for Compressive Strength under F/T Treatment and Air Dry.

B : Mix of Recycled Concrete for Compressive Strength under F/T Treatment and Air Dry.

C : Mix of Recycled Concrete for Bending Test.

A1 : Mix of Conventional Concrete for Bending Test.

2.3 실험방법

2.3.1 동결융해 및 대기상태에서의 압축강도

폐 콘크리트는 다년간 기후변화에 노출되어 왔기 때문에 재생콘크리트에 대한 반복 동결융해(Freezing-and-Thawing)처리는 재생 굵은골재 자체의 시멘트 몰탈의 골재 결합력과 조직의 이완을 일으키리라 기대되었다. 그런 까닭에 동결융해처리 후 재생콘크리트의 압축강도를 일반콘크리트의 압축강도와 비교하였다. 동결융해처리를 위한 각각의 공시체수는 표 3과 같다. 동결융해 1사이클은 4시간으로 -16℃에서의 동결과 +4℃에서의 융해를 한번씩 반복하였다.

Table 3. Number of Specimens for Compressive Strength Test after Freezing-and-Thawing Treatments (φ 10×20cm)

F/T Cycles (day)	Type of Concretes			
	Conventional		Recycled	
	Air	F/T	Air	F/T
48(8)	3	3	3	3
96(16)	3	3	3	3
192(32)	3	3	3	3

동결융해실험에서 공시체는 제작후 7일 동안 수중양생하여 무작위로 두 그룹으로 나누어 동결융해상태와 대기상태에 배치하였다. 동결융해용 공시체는 방습을 위하여 비닐로 완전 포장하여 동결융해실험기에 넣었으며 대기상태처리용 공시체는 양지의 노천(건물 옥상)에 방치하였다. 동결융해실험은 각 48, 96, 192 사이클 후에 각 사이클 당 3개씩 임의로 뽑아 압축강도를 측정하였고, 대기상태에서는 상기 사이클에 해당하는 기간인 8, 16, 32일 후에 임의로 3개씩 선정하여 압축강도를 측정하였다.

2.3.2 3점 휨 시험

총 10개의 보를 제작하여 50일 동안 20℃에서 수중양생하였다. 폭 1mm인 초기 균열을 공시체 제작시 보 바닥의 지간 중앙에 만들었다. 초기균열의 깊이와 보의 높이의 비(a/W)는 0.2, 0.4로 하였다. 각 조건에 따른 공시체의 수는 표 4와 같고 이 실험의 개략도는 그림 2와 같다. 스트레인 게이지는 각 공시체당 압축측과 인장측에 한개씩

Table 4. Number of Test Beams for Each Treatment for Bending Test

a/w	Type of Concretes	
	Conventional	Recycled
0	1	1
0.2	2	2
0.4	2	2

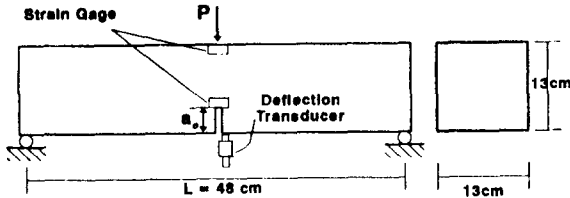


Fig. 2 Instrumentation of Three-Point Bending Test

부착하였다. 또한 같은 배치의 콘크리트에서 활렬 인장 강도와 탄성계수를 측정하기 위하여 원통형 공시체를 제작하였다.

초기균열의 존재가 어떤 재료의 강도저하를 일으킨다면 그 재료는 흠에 대하여 민감한 것으로 간주된다.^(1, 7, 8) 이것은 초기균열과 같은 흠이 있는 콘크리트의 하중수행능력에 대한 중요한 지수이므로 재료의 초기균열의 민감성을 평가하였다. 이를 위하여 초기 균열보들의 흠(초기균열)으로 인한 응력집중영향을 무시하고 보의 실제의 휨응력을 감소된 횡단면에 대하여 계산하였고 하중-처짐 형태와 극한하중 등을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 동결융해 및 대기상태에서의 압축강도

동결융해 및 대기상태에서의 재생콘크리트와 일반콘크리트의 압축강도를 비교한 결과는 표 5와 같다. 공기중에서 전체 재생콘크리트의 평균강도비는 일반콘크리트의 약 0.82 정도였다. 48cycles 과 192cycles F/T 처리 후 재생콘크리트의 평균강도비는 각각 일반콘크리트의 0.88과 0.89이나 96cycles에서는 1.13으로 오히려 더 높았다.

대기 노출상태에서 재생콘크리트 및 일반콘크리트의 압축강도는 동결융해 처리한 것들보다 대체

Table 5. Results of Compressive Strength(kg/cm²) Test Following F/ T Treatment and Curing in the Air

F/T Cycle (day)	Type of Concrete						Recy. Conv. Ratio
	Conventional			Recycled			
	In Air (Control)	F/T Treated	Reduc. Ratio	In Air (Control)	F/T Treated	Reduc. Ratio	Air F/T
48 (8)	212.7	173.7		196.3	145.5		0.82
	221.8	181.7	23.1%	186.1	155.9	16.9%	
	234.0	191.4		188.3	156.0		
	M 222.8	M 171.6		M 183.6	M 152.5		
96 (16)	218.9	146.8		215.8	30.2		0.84
	250.9	163.6	32.1%	-	170.6	9.1%	
	242.3	177.3		198.0	173.1		
	M 234.4	M 162.6		M 201.9	M 183.6		
192 (32)	245.7	22.3		214.0	171.0		0.81
	250.3	193.7	21%	234.4	166.3	14.7%	
	254.7	234.0		193.8	190.3		
	M 253.2	M 200		M 206.1	M 173.9		

Note: M=Mean Value of 3 Samples.

로 높은 강도를 보였다. 동결융해 후 압축강도의 비교에서 두 콘크리트는 모두 동결융해 사이클의 증가에 따른 압축강도의 감소가 나타나지 않았다. 오히려 사이클 증가로 재생콘크리트는 강도의 증가경향을 보였는데 이는 공기함량이 큰 폐콘크리트를 사용함으로써 동결시 발생하는 내부응력을 흡수하여 쪼름과 동시에 지속적인 경화가 이루어지는 때문인 것으로 보여진다. F/T 96사이클 후 재생콘크리트의 강도가 천연콘크리트 보다 높은 것도 이와같은 원인과, 제한된 수의 공시체 사용으로 인한 통계적인 우연에 기인하는 것으로 사료된다. 표 5의 감소비(Reduction Ratio)는 동결융해 처리후의 강도를 대기상태에서와 비교하여 동결융해로 인한 강도의 감소를 나타내는 비율이다. 여기서 보여주듯이 동결융해로 인한 압축강도 감소비는 재생 콘크리트가 오히려 더 작아서 재생콘크리트가 동결융해에 따른 강도 저항성이 더 강함을 보여주고 있다. 이러한 면에서 볼 때, 재생콘크리트는 시험전에 생각했던 것과 달리 동결융해로 인한 몰탈의 골재 구속력과 조직의 이완이 오히려 일반콘크리트보다 적게 일어났다는 것을 알 수 있었다.

3.2 3점 휨 시험

시편에 사용된 콘크리트의 역학적 성질들을 표 6에서 보여주고 있다. 할열인장 강도실험은 KS F2423⁽¹¹⁾에 따라, 탄성계수 및 압축강도의 측정은 KS F2438⁽¹²⁾에 따라 수행되었다. 압축강도의 시험

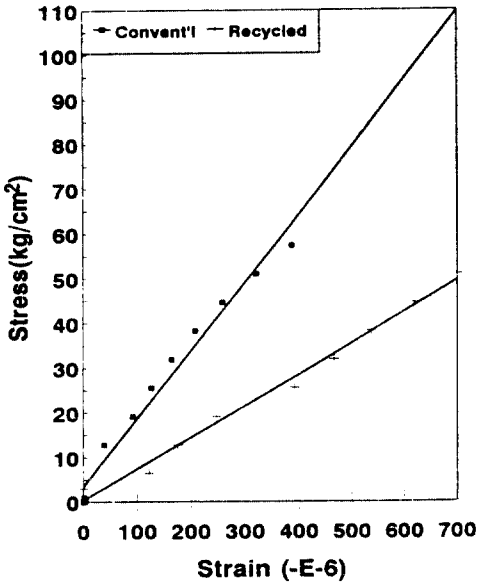


Fig. 3 Stress-Strain Curves at Linear Portion

Table 6. Comparison of Mechanical Properties

Concrete Type	Splitting Tensile Strength (kg/cm ²)	Elastic Modulus (kg/cm ²)
Conventional	35.79	190192.5
Recycling	33.87	98583

Table 7. Comparison of Three-Point Bending Test Results

Type	Ultimate Load (kg)	Flexural Strength (kg/cm ²)
Conventional		
c 0	2125	55.76
c-0.2	1350	53.35
c-0.2	1550	63.55
c 0.4	800	58.31
c 0.4	800	58.31
Recycled		
R 0	1800	47.23
R 0.2	1300	53.43
R-0.2	1200	49.20
R 0.4	850	61.95
R 0.4	800	58.31

시 파괴하중의 약 40%를 구하여, 선형부분의 응력-변형률 관계에서 탄성계수를 구하였고, 이를 그림 3에 나타내었다. 표 6의 값들은 평균치이고, 할열인장강도 그리고 탄성계수는 재생콘크리트가 일반콘크리트보다 낮음을 보였다. 특히 탄성계수는 재생콘크리트가 많이 낮았는데, 이것은 재생콘크리트가 같은 응력 상태에서 변형율이 크다는 것을 나타낸다. 재생콘크리트와 일반콘크리트의 파괴시의 극한하중과 실 휨강도(True Flexural Strength)를 표 7에 나타내었다.

파괴결과 초기균열비(a/W)0, 0.2에서 재생콘크리트의 극한하중과 휨응력은 일반 콘크리트의 극한하중과 휨응력의 약 85% 정도였고, 초기균열비 0.4에서는 거의 유사함을 볼 수 있었다. 그림 4와 5는 일반콘크리트와 재생콘크리트의 하중과 압축변형과의 관계를 나타내었다. 각 초기균열비에 대해 두 개의 시편을 시험하였으며 각 곡선은 시편당의 시험결과를 나타내는 것이다. 초기균열비 0.2에 있어서 하중이 1200kg이었을 때까지는 재생 및 일반콘크리트의 압축변형은 유사하였다. 그 이상의 하중이 재하될 때에 재생콘크리트는 곧 파괴가 일어났고, 일반콘크리트는 그 후 계속 하중 및 변형도 증가하였다. 초기균열비 0.4에서는 약 800kg의 파괴하중에서 재생콘크리트의 압축변형

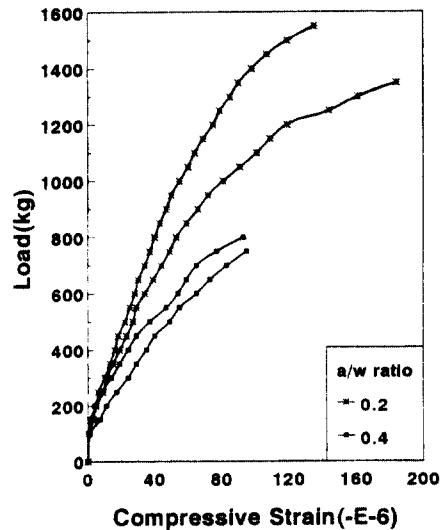


Fig. 4 Load-Compressive Strain Curves for Conventional Concrete

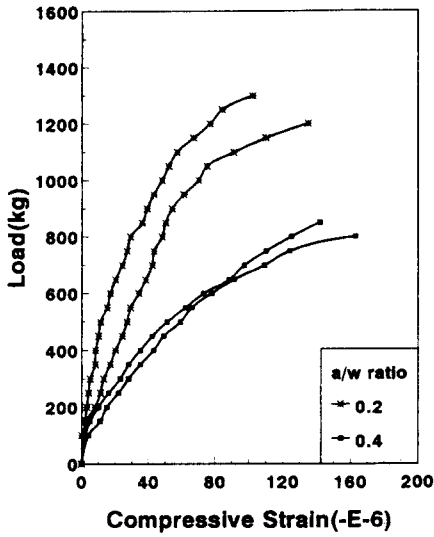


Fig. 5 Load-Compressive Strain Curves for Recycled Concrete

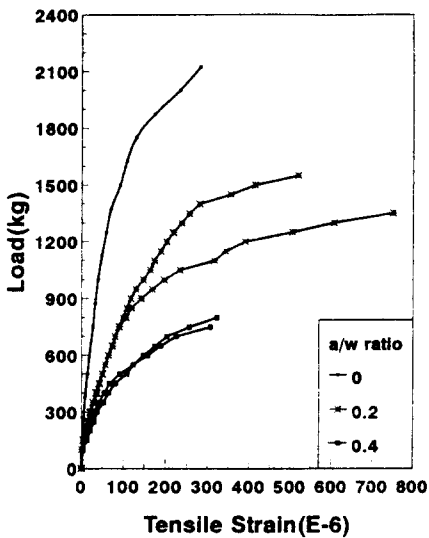


Fig. 6 Load-Tensile Strain Curves for Conventional Concrete

이 일반콘크리트의 압축변형보다 훨씬 더 큼을 보였다.

그림 6과 7은 일반 및 재생콘크리트의 하중과 인장변형의 관계를 나타내었다. 재하하중이 1500kg일 때의 무균열 보의 인장변형을 비교하여 보면 재생콘크리트가 훨씬 큼을 알 수 있었다. 초기균열비 0.2일 때 재생콘크리트의 극한하중은

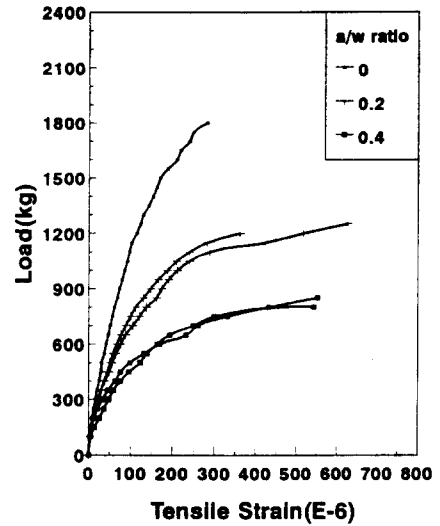


Fig. 7 Load-Tensile Strain Curves for Recycled Concrete

1250kg 정도에 비하여 일반콘크리트의 극한하중은 1500정도였다. 그리고 하중이 1200kg일 때의 각 인장변형에서도 또한 재생콘크리트가 큼을 보였다. 초기균열비 0.4에서는 재생콘크리트와 일반콘크리트의 극한하중은 비슷하였으나 인장변형은 재생콘크리트가 현저하게 컸다.

위의 결과에서와 같이, 재생콘크리트의 압축변형과 인장변형이 일반콘크리트보다 큰 이유는 재생 굵은 골재와 새로운 몰탈과의 부착부분의 약화, 또는 재생 굵은 골재의 원석보다 상대적으로 강도가 낮고 공극이 크며 장기간 하중을 받아온 기존 몰탈의 존재 때문이라고 추정된다. 그러므로 실제 구조물에 사용을 위하여는 변형률에 대한 보다 상세한 점검이 있어야 할 것으로 사료된다.

그림 8, 9의 하중-처짐곡선에서 보듯이 파괴시각 보들은 공히 치명적 파괴형태(Catastrophic fracture mode⁽⁷⁾)를 보였다. 초기균열이 없는 경우 재생콘크리트는 일반콘크리트에 비하여 매우 큰 처짐을 보였다. 그러나 a/w=0.4 경우에는 두 콘크리트가 매우 유사한 형태를 보였다. 따라서 초기균열이 증가할수록 재생콘크리트의 파괴특성은 일반콘크리트와 유사하고 파괴인성도 유사함을 알 수 있었다⁽⁶⁾.

결국 재생콘크리트는 압축강도, 탄성계수, 변형률 특성이 일반콘크리트보다 좋지 않다. 특히 낮

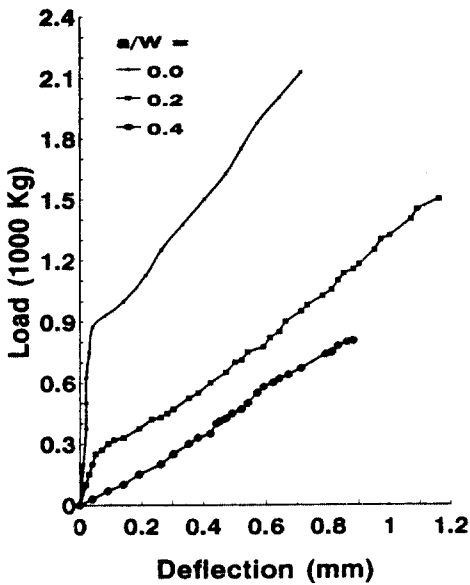


Fig. 8 Load-Deflection Curves for Conventional Concrete

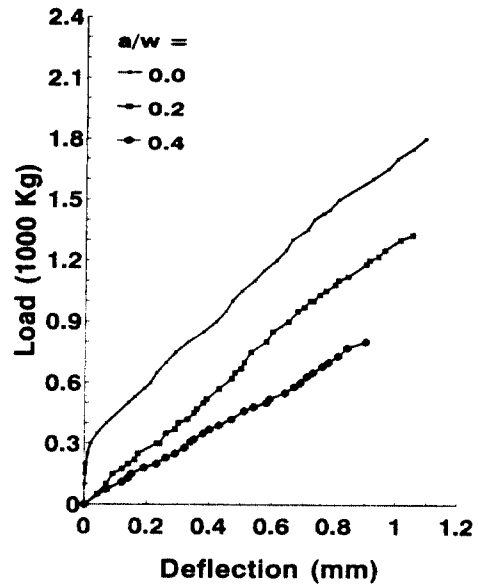


Fig. 9 Load-Deflection Curves for Recycled Concrete

은 압축강도는 재생골재의 취약함보다는 재생골재와 새로운 몰탈과의 접착면에서의 빈약한 부착력 때문인 것으로 보여진다(이에 대한 보다 상세한 설명은 문헌 6참조). 그러나 재생콘크리트의 동결융해처리후의 강도저하비와 흠에 대한 민감성 등은 일반콘크리트보다 좋거나 비슷했다.

4. 결 론

본 연구는 콘크리트 파쇄물을 콘크리트용 골재로서 그 성능을 판정하기 위하여 파쇄된 폐콘크리트를 골재로써 사용하여 제조한 재생콘크리트의 중요한 강도특성을 실험적으로 규명하였다. 측정된 성질은 동결융해처리 후 압축강도 그리고 변형특성이며, 그 결과를 천연골재를 사용하여 제조한 일반콘크리트와 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

대기상태에서 재생콘크리트의 강도는 일반콘크리트의 강도의 약 82%의 정도로 낮았으며, 동결융해처리 후에도 일반콘크리트의 강도보다 다소 낮음을 보였다. 그러나 동결융해에 의한 압축강도저하 비율에 있어서는 재생콘크리트가 일반콘크리트보다 더 낮으므로 유리함을 보였다. 휨실험

결과, 같은 하중하에서 재생콘크리트는 일반콘크리트보다 변형율이 크고 처짐에 민감함을 보였으며, 초기균열비 0, 0.2에서 재생콘크리트의 극한하중과 휨응력은 일반콘크리트의 극한하중과 휨응력의 약 85% 정도였다. 하지만 초기균열비 0.4에서는 처짐, 변형률 등이 일반콘크리트와 유사하였다.

따라서 본 연구에서 조사된바에 의하면 재생콘크리트는 동결융해 저항성, 흠에 대한 민감성이나 일부의 파괴특성 등의 성질이 일반콘크리트보다 좋거나 비슷하다는 것을 알 수 있었다. 하지만, 실용적인 사용을 위하여는 콘크리트의 가장 중요한 하중수행능력의 하나인 압축강도를 보다 증진시켜야하며 변형률에 대한 보다 자세한 점검도 필요한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. ASTM E399 "Test Method for Plain-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials," ASTM, 1989.
2. Buck, A. D., "Recycled Concrete," Highway Research Record 430, 1973, pp.1-8.

3. Buck, A.D., "Recycled Concrete as a Source of Aggregate," ACI Journal, Vol. 74, No.5, 1977.
4. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, "Recycling Portland Cement Concrete," Demonstration Project Program DP #47, 1985.
5. Itoh, T. and Frondistou-Yannas, S., "Economic Feasibility of Concrete Recycling," ASCE Journal of the Structural Division, Vol. 103, April, 1977.
6. Kim, K. W., Lee, B. H., Park, J. S. and Doh, Y. S. "Performance of Crushed Waste Concrete as Aggregate in Structural Concrete," Utilization of Waste Materials in Civil Engineering Construction, ASCE, New York, NY, 1992.
7. Moavenzadeh, F., Kuguel, R., and Keat, L. B., "Fracture of Concrete," Research Report R68-5, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, March, 1968.
8. Ratanalert, S. and Wecharatana, M., "Evaluation of Existing Fracture Models in Concrete," ACI SP118-5, pp.113-147, 1988.
9. 1992 International Convention & Exposition, Final Program, ASCE, New York, NY, Sept. 1992.
10. "콘크리트 휨강도 시험법," KS F2408
11. "콘크리트의 인장강도 시험방법," KS F 2423
12. "콘크리트 원주공시체의 정탄성계수 및 포아슨비 시험방법," KS F 2438

(접수일자 : 1992. 8. 6.)