

動的荷重을 받는 콘크리트의龜裂성장

Propagation of Crack in Concrete Subjected to Dynamic Loading

姜	馨	厚*
Kang,	Sung	Hoo
金		宇**
Kim,		Woo

Abstract

This study deals with the prediction of crack propagation in concrete mortar subjected to static and dynamic load. Total 54 CLWL-DCB(Crack-line-loaded-double-cantilever beam) concrete mortar specimens were tested to measure crack growth using ASTM 561-80. Main variables were sand to cement ratio and water to cement ratio.

The resulting load(P)-COD(Crack Opening Displacement; $2V_1$) curves and COD-CTOD (Crack Tip Opening Displacement; $2V_2$) curves were analyzed to calculate effective crack length and physical crack length by way of ASTM 561-80 proposed. Replica crack length were also obtained directly during the test. The differences in crack propagation between under static load and under dynamic load were investigated.

要 旨

本 研究은 材料의 配合이 단순한 mortar를 제작 그 균열발생을 관찰, 측정하여 靜的荷重에 의한 균열 및 일정진폭을 갖는 動的荷重에 의한 균열성장영역 예측을 시도한 것이다.

사용시편은 mortar의 配合比와 물-시멘트比를 달리하여 ASTM E 561-80에서 제안한 CLWL-DCB(crack-line-loaded-double-cantilever-beam)의 제 1 방법인 劈開型모드(opening mode)에 의거 균열성장거동을 측정하였다. 本 實驗에서는 X-Y recorder에 나타난 荷重(P)-균열개구변위($2V_1$), 균열개구변위($2V_1$)-균열선단개구변위($2V_2$)의 diagram을 해석하여 靜的荷重에 의한 균열선단의 비선형적인 미소균열을 포함하는 유효균열길이(effective crack length; a_e)와 균열선단의 미소균열을 제외한 물리적균열길이(physical crack length; a_m) 및 replica 필름으로 구한 균열길이(replica crack length; a_t)의 상관관계와 일정진폭을 갖는 반복하중에 의한 a_e , a_m , a_t 를 구하여 靜的荷重에 의한 균열특성과 動的荷重에 의한 균열특성을 조사한 것이다.

* 正會員·東新工科大学 專任講師

** 正會員·全南大學校 工科大学 專任講師

1. 序 論

콘크리트構造物은 실제 여러형태의 荷重을 받고 있다. 그중에서도 차량하중, 지진하중, 발파에 의한 진동 및 충격하중, 공장지대의 기계진동하중 등의 動的 荷重이 작용될 경우 콘크리트의 역학적 거동은 매우 복잡하다.

이러한 動的 荷重에 의한 콘크리트의 균열성장은 靜的 荷重에 의한 균열성장 거동과는 다른 양상을 나타내게 된다.

1928년 Richart, et al.⁽¹⁶⁾의 콘크리트 龜裂成長에 관한 研究論文이 發表된 후에 콘크리트의 龜裂 및 破壞에 관한 많은 연구가 수행되었고, Kaplan⁽¹⁴⁾(1961)은 콘크리트 보의 휨실험에 Griffith의 파괴 에너지理論을 최초로 도입하여 콘크리트 破壞力學實驗을 적용한 論文을 발표하였으며, 그후 많은 연구자에 의하여 콘크리트에 있어서 균열전파, 균열크기와 파괴하중과의 관계, 균열주위의 변형문제, 콘크리트의 파괴에너지(fracture energy) 등에 대한 研究結果를 發表하였다. 그러나 이러한 研究는 破壞力學概念의 사용으로 강도기준개념보다 진보된 結果를 얻었지만 이들 연구자들은 모든 콘크리트를 線型彈性材料로 간주하고 線型彈性破壞力學(linear elastic fracture mechanics)에 근거를 두기 때문에 한정된 경우를 제외하고는 실제의 實驗結果와 現狀을 충족시키주지 못하였다.

破壞以前의 콘크리트의 舉動을 살펴보면 龜裂이 서서히 增加(stable crack propagation)하여 非線型性이 나타나므로 臨界龜裂길이 보다 적은 균열에서는 古典破壞力學概念이 통용될 수 있으나 그 이상의 범주에서는 非線型破壞規準(none-linear fracture criterion)을 사용하는 것이 필요하다.

Bazant, et al. (1979)은 有限要素解析을 위하여 變形率軟化(strain softening)에 입각한 smeared crack model을 제안하였고 Bazant, et al.⁽¹⁷⁾(1984)은 crack band model^(6, 6)의 破壞에너지를 龜裂抵抗曲線解析(R-curve)으로부터 구하였다. Ingraffa^(11, 13, 17)(1984) 등은 fictitious crack model과 유사한 개념을 토대로 組合 model(mixed model)문제를 modeling 하였으며,

Wechartana, et al.^(18, 19) (1982)은 compliance 實驗값을 modeling 하여 균열성장영역(crack process zone)을 계산하였다.

한편 Baker, et al.⁽⁸⁾ (1984)은 CLWL-DCB 試片⁽²⁾의 compliance로 구한 유효균열길이(effective crack length)와 物理的균열길이(physical crack length)로부터 破壞成長領域(fracture process zone)과 臨界龜裂을 開口變位를 구하여 파괴모형을 제안하고 同一試片에 對해서 數值解析을 수행하여 model의 적합성을 검토하였다.

특히 최근에는 動的 荷重에서의 콘크리트의 균열성장에 관한 연구가 시도되고 있으나 荷重의 조건, 진폭의 변화 등이 다양하여 명확한 파괴 기준이 설정되지 못하고 있다.

따라서 本研究는 재료의 배합이 콘크리트보다 단순한 mortar의 試片을 제작 균열발생을 관찰 측정하여 靜的 荷重에 의한 균열 및 일정진폭을 갖는 動的 荷重에 의한 균열성장영역 예측을 시도한 것이다.

2. 實 驗

2.1 使用材料 및 試片

本 實驗에 使用된 試片은 4번제를 통과한 조립을 2.84인 점진강 모래를 使用하였고 시멘트와 모래의 배합비는 3종류(1:1, 1:2, 1:3), 각배합비에 대한 물-시멘트比는 3종류 그리고 각 물-시멘트比에 대한 試片은 6개씩 모두 54개를 제작하였다.

試片은 그림 1과 같은 CLWL-DCB형이고 가

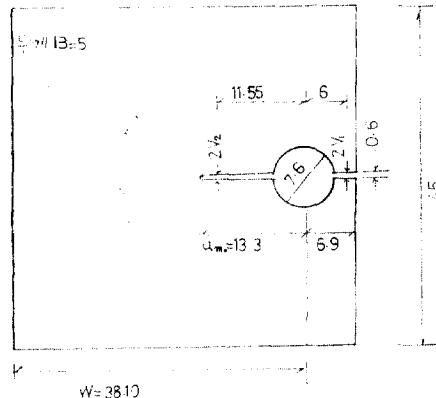


그림 1. Configuration of CLWL-DCB specimens

로 45cm, 세로 45cm, 두께 $B=5\text{cm}$ 이며 시편에 荷重을 가하기 위해 미리 뚫어놓은 원의 中心에서 試片의 가장자리까지 거리 $w=38.1\text{cm}$, 龜裂을 유도하기 위해 만들어 놓은 초기노치길이 $a_0=13.3\text{cm}$ 로 ASTM E 561-80 규정에 의해 $a_0/w=0.35$ 가 되게 하였다. 이와같이 제작한 試片은 하루동안 습윤양생후 50일간 수중양생을 하고 실험시작 하루전에 龜裂先端에 replica film 을 붙일 수 있도록 試片表面을 균일하고 매끄럽게 연마한 후 실험전까지 습윤양생한다.

2.2 實驗方法

ASTM E 561-80 規定에 의거 균열개구부면 위(COD; $2V_1$), 균열선단개구부면위(CTOD; $2V_2$) 를 測定하기 위하여 아크릴 knife edge 를 시편에 부착한다. 그림 2 와 같은 試片을 피로시험기에 부착된 썰기를 통하여 加壓하면 試片에 뚫린 $\phi 7.6\text{cm}$ 의 원이 확장되어 초기노치 길이를 따라 새로운 균열이 발생한다.

이때 $2V_1$ 과 $2V_2$ 를 測定하기 위해 그림 3 에 보인 350Ω strain gage 4 개를 인칭동에 부착시켜 제작한 clip gage 두개를 knife edge 에 끼운다.

加壓장치는 30t 용량의 구조용 피로시험기(日本, Saginomiya 社) 載荷장치에서 軸方向으로 加壓되도록 한다.

龜裂의 測定은 clip gage 에 연결된 X-Y recorder 를 통해 기록이 되고 동시에 龜裂發生이 예상되기 전부터 시시각각으로 초기노치길이 선단부에 아세톤 용액을 바른후 replica film 을 부착시켜 균열을 印刻시킨다. 또한 動的荷重에 의한 실험은 최대하중이 P_{ck} 라면 $0.75P_{ck}$ 까지 靜的荷重에 의해서 실험을 실시하고 그림 4 에 보인 것처럼 300 cpm sine wave loading 을 6분가한 후($N=1800$ 회) reloading 을 시켜 加壓 靜止상태에서 replica film 을 印刻시켜 균열길이를 측정한다.

반복하중의 진폭은 시편의 두께 및 시험시간의 효율을 기하기 위하여 진폭이 약 $0.15P_{ck}$ 의 일정하중진폭으로 반복하중을 가한다.

이와같이 계속 荷重을 증가시키면서 試片이 파괴될 때까지 반복시험을 한다.

mortar 에 대한 一軸압축강도 측정을 위한 공

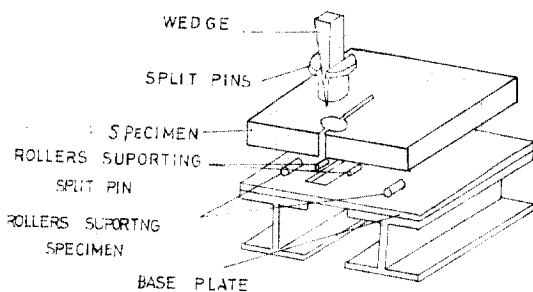


그림 2. Transverse wedge loading assembly

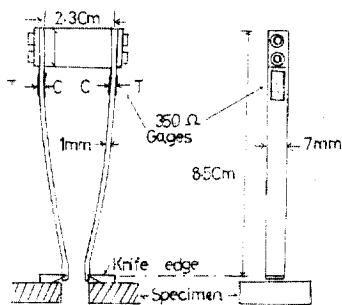


그림 3. Clip gage

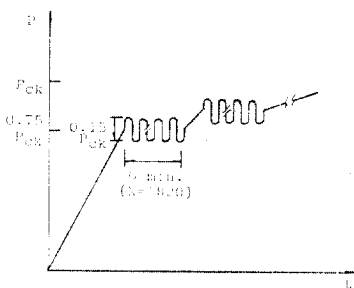


그림 4. Loading history

시체는 한번의 길이가 5cm 인 정육면체로서 w/c 比마다 6개의 공시체를 만들었고 이 시편을 28일간 수중양생을 한후 수직면의 中央에 strain gage 를 각면에 부착시키고 荷重載荷장치에 load cell 을 연결하여 universal digital measuring system 인 UCAM-5A(日本, Kyowa 社)를 利用하여 荷重(P)—變形率값(ϵ)을 계산하여 σ_{ck} 및 E_c 의 값을 실제 測定하여 구하였다.

靜的荷重에 의해서 recorder 에 나타난 結果는 그림 5(a)에 나타낸다.

실험순서

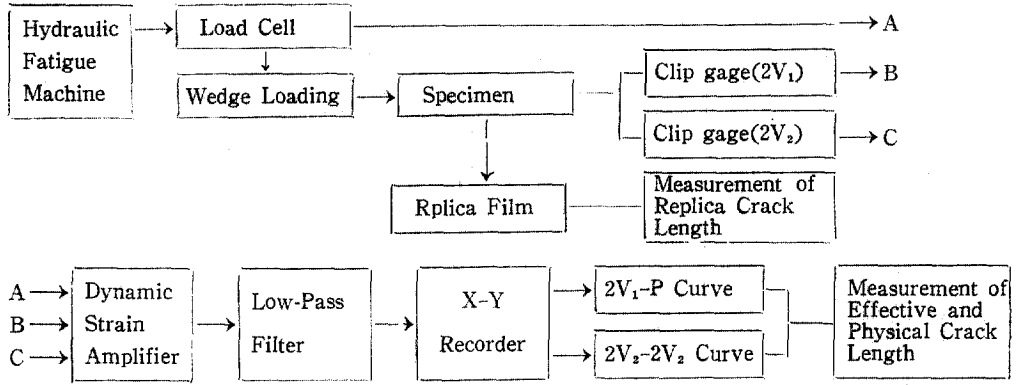


표 1. Dimensionless stress intensity factors and compliance in plane stress for the recommended CS & CLWL specimens.

a/w	KBW ^{1/2} /P	EB2V ₁ /P			a/w	KBW ^{1/2} /P	EE2V ₁ /P		
		CLWL	C	S			CLWL	C	S
0.350	6.392	22.83	25.82	0.480	9.093	41.52	44.31		
0.355	6.475	23.35	26.33	0.485	9.230	42.52	45.30		
0.360	6.558	23.88	26.85	0.490	9.369	43.55	46.33		
0.365	6.644	24.43	27.38	0.495	9.512	44.61	47.38		
0.370	6.730	24.99	27.94	0.500	9.659	45.70	48.48		
0.375	6.818	25.57	28.50	0.505	9.810	46.83	49.60		
0.380	6.906	26.16	29.08	0.510	9.964	47.99	50.76		
0.385	6.998	26.76	29.68	0.515	10.123	49.18	51.95		
0.390	7.090	27.38	30.29	0.520	10.286	50.42	53.19		
0.395	7.183	28.02	30.91	0.525	10.453	51.70	54.47		
0.400	7.279	28.67	31.55	0.530	10.625	53.02	55.78		
0.405	7.376	29.33	32.21	0.535	10.802	54.38	57.15		
0.410	7.475	30.01	32.88	0.540	10.984	55.79	58.56		
0.415	7.576	30.71	33.57	0.545	11.172	57.24	60.01		
0.420	7.678	31.42	34.27	0.550	11.364	58.75	61.52		
0.425	7.783	32.15	34.99	0.555	11.563	60.31	63.08		
0.430	7.890	32.90	35.73	0.560	11.767	61.92	64.70		
0.435	7.990	33.67	36.49	0.565	11.978	63.60	66.37		
0.440	8.110	34.45	37.27	0.570	12.1955	65.32	68.10		
0.445	8.223	35.25	38.07	0.575	12.420	67.12	69.89		
0.450	8.340	36.08	38.89	0.580	12.651	68.97	71.74		
0.455	8.458	36.93	39.73	0.585	12.890	70.89	73.66		
0.460	8.580	37.80	40.60	0.590	13.136	72.88	75.65		
0.465	8.704	38.69	41.49	0.595	13.391	74.94	77.72		
0.470	8.830	39.61	42.40	0.600	13.654	77.07	79.85		
0.475	8.960	40.55	43.34						

Polynomial expressions fit to the above compliance values are:

Compact Specimen: EB 2V₁/P=103.8-930.4(a/w)+3610(a/w)²-5930.5(a/w)³+3979(a/w)⁴

CLWL: EB2V₁/P=101.9-948.9(a/w)+3691.5(a/w)²-6064.0(a/w)³+4054(a/w)⁴

표 2. Double compliance elastic calibration curve-CS and CLWL specimens note-applicable only to the V_1 and V_2

a/w	$2V_1/2V_2^A$		a/w	$2V_1/2V_2^A$		a/w	$2V_1/2V_2^A$		a/w	$2V_1/2V_2^A$	
	CLWL	CS		CLWL	CS		CLWL	CS		CLWL	CS
0.350	4.74	5.56	0.415	3.27	3.67	0.480	2.72	2.96	0.545	2.42	2.56
0.355	4.55	5.25	0.420	3.22	3.59	0.485	2.70	2.92	0.550	2.40	2.53
0.360	4.36	5.00	0.425	3.16	3.53	0.490	2.67	2.88	0.555	2.38	2.50
0.365	4.24	4.78	0.430	3.11	3.46	0.495	2.64	2.85	0.560	2.36	2.48
0.370	4.09	4.62	0.435	3.06	3.39	0.500	2.62	2.81	0.565	2.34	2.46
0.375	3.97	4.47	0.440	3.02	3.33	0.505	2.59	2.78	0.570	2.32	2.44
0.380	3.85	4.33	0.445	2.97	3.27	0.510	2.57	2.74	0.575	2.31	2.42
0.385	3.74	4.22	0.450	2.93	3.22	0.515	2.54	2.71	0.580	2.29	2.40
0.390	3.64	4.11	0.455	2.89	3.17	0.520	2.52	2.68	0.585	2.27	2.38
0.395	3.55	4.01	0.460	2.85	3.13	0.525	2.50	2.66	0.590	2.25	2.36
0.400	3.47	3.91	0.465	2.82	3.08	0.530	2.48	2.63	0.595	2.24	2.35
0.405	3.39	3.82	0.470	2.79	3.04	0.535	2.46	2.60	0.600	2.23	2.33
0.410	3.33	3.75	0.475	2.76	3.00	0.540	2.44	2.58			

^A $2V_1/2V_2$ is moderately affected by clip gage span with less than $V_1\%$ error introduced by using 0.8-in (20.3mm) span instead of measurements on the crack line.

그림 5(a)에서 원점 O와 A점을 이은 割線 OA의 기울기 $2V_1/P$ 를 표 1에 적용시켜 a/w 를 구하면 a_e 를 알 수 있다. 또 reloading curve 전체의 길이 1/4과 3/4의 割線 BC의 기울기 $2V_1/P$ 를 표 1에 적용하여 구하면 a_m 을 구할 수 있다. 또한 $2V_1/2V_2$ 의 기울기 및 reloading curve 전체길이의 1/4과 3/4의 割線 BC의 기울기도 표 2에 의해서 a_e 와 a_m 을 구할 수 있다. 또한 動的荷重에 의해서 recorder에 나타난 結果는 그림 5(b)에 나타냈고 a_e 및 a_m 을 구하는 方法도 靜的荷重에 의해서 구한 균열길이에 측방법과 同一하게 구하였다.

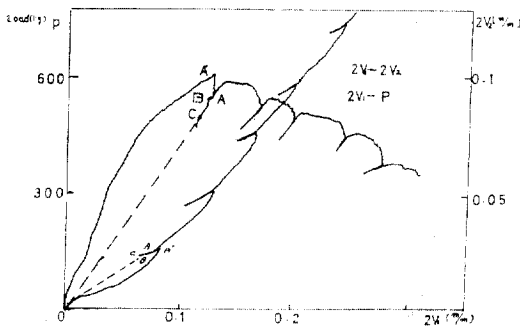


그림 5. (a) Load-displacement and double displacement compliance record (by static loading test)

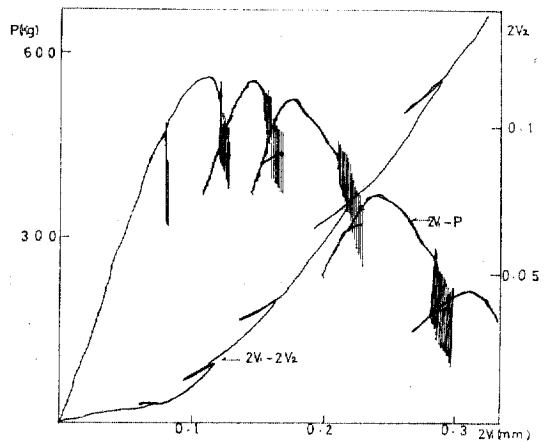


그림 5. (b) Load-displacement and double displacement compliance record (by dynamic loading test)

3. 實驗結果 및 考察

mortar의 일축압축강도(σ_{28}) 및 탄성계수(E_c)는 표 3에 표시하였다.

또한 P(쇄기하중)- $2V_1$ (변위), $2V_1-2V_2$ 곡선 및 균열을 확대해석할 수 있는 투영검사기(PJ 300)를 利用한 replicafilm에 나타난 균열

표 3. Property of mortar

Cement-Sand Ratio (C : S)	Water-Cement Ratio (w/c%)	Compressive Strength (kg/cm ²)	Modulus of Elasticity (E : kg/cm ²)	Finess Modulus (F.M)
1 : 1	34~40	366~468	1.79×10 ⁸ ~2.28×10 ⁸	2.84
1 : 2	38~42	296~362	1.75×10 ⁸ ~2.14×10 ⁸	2.84
1 : 3	50~55	282~317	2.03×10 ⁸ ~2.16×10 ⁸	2.84

길이는 靜的實驗과 動的實驗에 의해서 얻어진 곡선을 해석하여 ASTM E 561-80에서 제안한 표 1을 이용한 P-2V₁ 곡선식에서 a_e/w , a_m/w 을 얻고 또한 표 2를 이용한 2V₁-2V₂ 곡선식에서 얻은 a_e/w , a_m/w 를 표 4(a), (b), (c)에 나타냈다. 또한 위의 結果를 회귀분석하여 표 5(a), (b)에 나타냈고 회귀분석 結果를 회귀직선식으로 나타나면 그림 6, 7과 같다.

표 5에 나타난 test data는 配合比 1 : 1인 경우 w/c(%)가 34~40, 1 : 2인 경우 w/c(%)가 38~40, 1 : 3인 경우 w/c(%)가 50~55%의 조건에서 mortar의 시편을 50일간 수중 양생을

거친후 각 w/c(%)마다 static loading test와 dynamic loading test를 시행하여 實驗結果를 ASTM E 561-80에 의거 a_e/w 과 a_i/w 및 a_m/w 과 a_i/w 의 상관관계를 나타낸 것이다. 本實驗에서 나타난 회귀직선식은 같은 試片에 대해서 static loading test의 結果보다는 dynamic loading test의 結果의 회귀직선식이 크게 나타난다. a_e/w 와 a_i/w 의 회귀분석에서 static loading test의 경우 상관계수(r)는 0.815~0.892, 표준편차(S_x)는 0.079~0.090, (S_y)는 0.09~0.091이었고 dynamic loading test의 경우 상관계수(r)는 표준편차(S_x)는 0.073~0.105, (S_y)

표 4. (a) Crack length ratio (a/w)

(1 : 1)

Group	No.	Crack Lenth Ratio (a/w)				
		Replica	Double-Disp. Plot		Load-Disp. Plot	
			Eff(a_e/w)	Phy(a_m/w)	Eff(a_e/w)	Phy(a_m/w)
Static Loading (M1-23)	1	0.384	0.355	0.350	0.356	0.353
	2	0.449	0.381	0.375	0.471	0.450
	3	0.556	0.415	0.400	0.515	0.510
	4	0.576	0.465	0.460	0.563	0.555
Static Loading (M1-32)	1	0.388	0.380	0.375	0.362	0.355
	2	0.418	0.398	0.376	0.381	0.360
	3	0.452	0.406	0.398	0.413	0.380
	4	0.574	0.443	0.403	0.572	0.446
Dynamic Loading (M1-23)	1	0.350	0.351	0.350	0.350	0.350
	2	0.350	0.385	0.356	0.385	0.350
	3	0.376	0.425	0.395	0.391	0.385
	4	0.393	0.450	0.440	0.429	0.400
	5	—	—	—	—	—
Dynamic Loading (M1-32)	1	0.350	0.385	0.375	—	—
	2	0.354	0.413	0.400	—	—
	3	0.379	0.470	0.430	0.350	0.350
	4	0.464	0.505	0.485	0.399	0.399
	5	0.568	0.570	0.550	0.530	0.530

表 4. (b) Crack length ratio(a/w)

(1 : 2)

Group	No.	Crack Length Ratio (a/w)				
		Replica	Double Disp. Plot		Load Disp. Plot	
			Eff	Phy	Eff	Phy
Static Loading (M1-12)	1	0.350	—	—	—	—
	2	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350
	3	0.480	0.387	0.360	0.373	0.350
	4	0.517	0.420	0.400	0.505	0.392
	5	0.602	0.485	0.460	0.592	0.492
Static Loading (M2-31)	1	—	—	—	—	—
	2	0.405	0.355	0.352	0.350	—
	3	0.475	0.407	0.400	0.370	0.350
	4	0.550	0.486	0.525	0.462	0.385
	5	0.608	0.580	0.550	0.582	0.505
Dynamic Loading (M2-12)	1	0.358	0.350	0.350	0.350	0.350
	2	0.374	0.360	0.359	0.372	0.360
	3	0.376	0.372	0.367	0.462	0.430
	4	0.447	0.424	0.424	0.600	0.545
	5	0.606	0.545	0.540	—	0.568
Dynamic Loading (M2-31)	1	0.382	—	—	—	—
	2	0.420	0.410	0.350	—	0.357
	3	0.451	0.440	0.390	0.370	0.400
	4	0.511	0.462	0.405	0.515	0.510
	5	0.616	0.520	0.525	0.600	0.580
	6	0.689	0.600	0.600	—	0.600

表 4. (c) Crack length ratio (a/w)

(1 : 3)

Group	No.	Crack Length Ratio (a/w)				
		Replica	Double-Disp. Plot		Lona-Disp. Plot	
			Eff(a_s/w)	Phy(a_m/w)	Eff(a_s/w)	Phy(a_m/w)
Static Loading (M3-11)	1	0.356	0.350	0.350	0.350	0.350
	2	0.377	0.445	0.350	0.357	0.350
	3	0.435	0.500	0.370	0.387	0.395
	4	0.538	0.547	0.400	0.490	0.440
Static Loading (M3-32)	1	0.353	0.350	0.350	0.350	0.355
	2	0.386	0.387	0.355	0.441	0.365
	3	0.431	0.465	0.365	0.550	0.370
	4	0.560	0.545	0.434	0.535	0.495
	5	0.593	0.600	0.470	0.600	0.541
Dynamic Loading (M3-11)	1	0.365	—	—	0.380	0.360
	2	0.446	0.390	0.360	0.496	0.446

	3	0.563	0.590	0.470	0.600	0.460
Dynamic Loading (M3-21)	1	0.350	0.360	0.350	0.350	0.350
	2	0.382	0.410	0.355	0.410	0.370
	3	0.535	0.562	0.430	0.540	0.475
Dynamic Loading (M3-33)	1	0.363	0.430	0.350	0.360	0.350
	2	0.430	0.499	0.360	0.440	0.353
	3	0.448	0.600	0.432	0.475	0.420
	4	0.591	—	0.482	0.580	0.485

표 5. (a) Test data

구 분	배 합 비 (C : S)	w/c (%)	회 귀 적 선 식	상관계수 (r)	표준편차 (S_x)	표준편차 (S_y)
Static Loading	1 : 1	34~40	$a_e/w=0.7209a_i/w+0.0860$	0.815	0.079	0.069
	1 : 2	38~42	$a_e/w=0.9003a_i/w-0.0078$	0.892	0.087	0.088
	1 : 3	50~55	$a_e/w=0.8983a_i/w+0.0561$	0.887	0.090	0.091
Dynamic Loading	1 : 1	34~40	$a_e/w=0.7455a_i/w+0.1235$	0.838	0.073	0.065
	1 : 2	38~42	$a_e/w=0.7121a_i/w+0.1217$	0.819	0.105	0.091
	1 : 3	50~55	$a_e/w=0.9810a_i/w+0.0356$	0.881	0.081	0.090

a_e/w =Effective crack length ratio

a_i/w =Replica crack length ratio

표 5. (b) Test data

구 분	배 합 비 (C : S)	w/c (%)	회 귀 적 선 식	상관계수 (r)	표준편차 (S_x)	표준편차 (S_y)
Static Loading	1 : 1	34~40	$a_m/w=0.5799a_i/w+0.1340$	0.7597	0.0790	0.0603
	1 : 2	38~42	$a_m/w=0.6637a_i/w+0.0798$	0.802	0.0860	0.0720
	1 : 3	50~55	$a_m/w=0.5872a_i/w+0.1318$	0.9113	0.0898	0.0578
Dynamic	1 : 1	34~40	$a_m/w=0.7417a_i/w+0.1080$	0.8844	0.0737	0.0619
	1 : 2	38~42	$a_m/w=0.7587a_i/w+0.0827$	0.898	0.1130	0.0960
	1 : 3	50~55	$a_m/w=0.5781a_i/w+0.1395$	0.9271	0.0864	0.0538

a_m/w =Physical crack length ratio

a_i/w =Replica crack length ratio

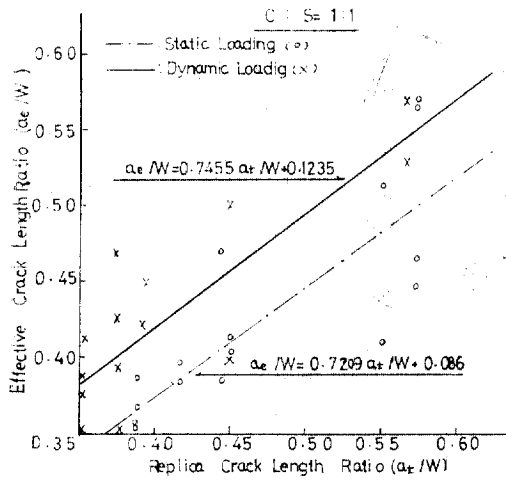
는 0.065~0.091 을 나타내었다.

표 5(b)의 a_m/w 와 a_i/w 의 상관관계는 static loading test 에서 상관계수(r)는 0.7597~0.9113, 표준편차(S_x)는 0.0790~0.0898, (S_y)는 0.0578~0.0720 이고, dynamic loading test 의 경우 상관계수(r)는 0.8844~0.9271, 표준편차(S_x)는 0.0737~0.1130 (S_y)는 0.0538~0.0960 을 나타

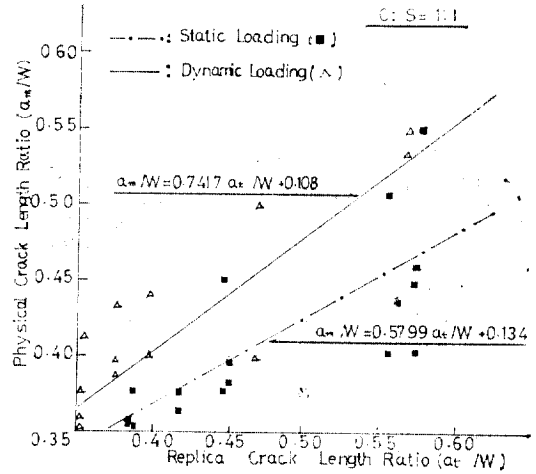
냈다.

또한 3 종류의 配合比에 대한 회귀분석식을 考察하여 보면 a_e/w 와 a_i/w 의 상관관계에서는 static loading test 의 결과가 신뢰도가 높고 a_m/w 와 a_i/w 의 신뢰도는 거의 비슷한 값을 나타냈다.

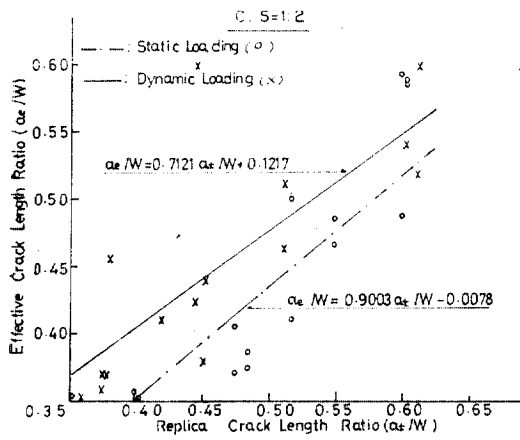
그림 6, 7 을 考察하여 보면⁽³⁾ static loading



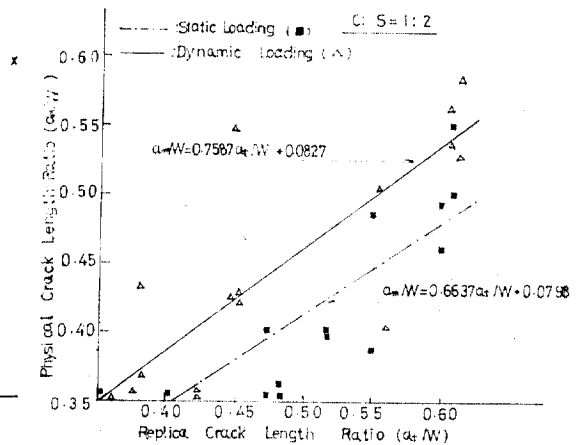
(a)



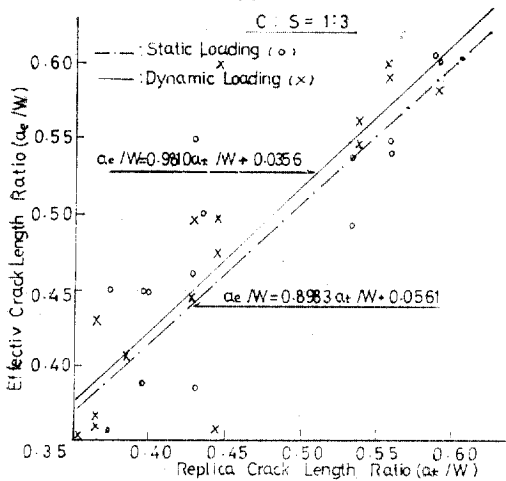
(a)



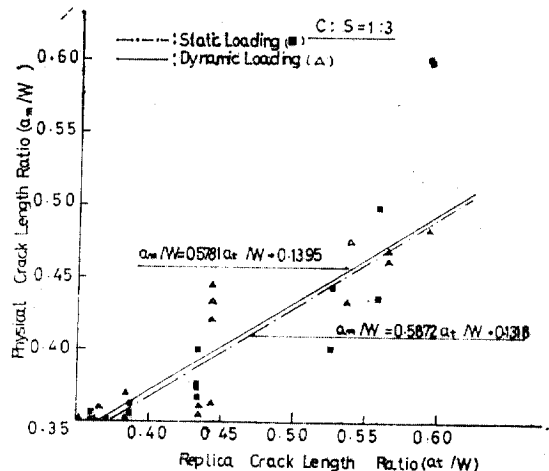
(b)



(b)



(c)



(c)

그림 6. Effective v.s replica crack length ratio

그림 7. Physical v.s replica crack length ratio

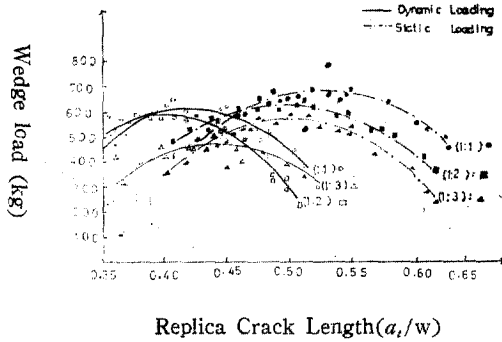


그림 8. Wedge load v.s replica crack length

test의 경우龜裂比는 $a_i/w > a_e/w > a_m/w$ 순으로 나타났고, dynamic loading test에서의 a_i/w 에 대한 a_e/w 및 a_m/w 의 값이 static loading test에서의 a_e/w 및 a_m/w 값보다 크게 나타났으며 각 경우 모래의 配合比가 증가할수록 static loading test 및 dynamic loading test에서의 a_i/w 에 대한 a_e/w 및 a_m/w 의 값이 접근함을 보였다. 이러한 이유는 모래의 配合比가 증가하면 시편자체가 갖고 있는 점성이 점차 감소하고 취성체가 되어 하중재하시 나타나는 미소균열이 점차 감소되기 때문이라 생각된다.

dynamic loading test의 경우는 static loading test를 시행할 경우의 최대荷重이 P_{ck} 라면 $P/P_{ck} \approx 0.75$ 부터 일정진폭(0.15 P_{ck})을 가진 300 cpm sine 파의 반복하중을 6분간(N=1800회) 가하고 계속하여 시편이 파괴될 때까지 단계적으로 하중을 증가시켜 가면서 반복실험을 시행한 것이다.

그림 8은 썬기荷重(P)과 replica crack length ratio (a_i/w)의 관계를 mortar의 배합비(1:1, 1:2, 1:3)에 대하여 나타낸 것이다.

그림 8은 mortar의 試片이 static loading test의 경우 (a_i/w)의 값이 0.5 부근에서 최대하중이 되고 2V₁의 값이 0.1mm(그림 4(a) 참조)근방에서 荷重(P)이 감소한다.

일정진폭을 가진 dynamic loading test에 있어서는 (a_i/w)가 0.5 보다 작은 0.425 근방에서 최대하중이 나타나고 또한 모래(S)의 配合比가 증가할수록 최대하중에 대한 (a_i/w)의 값이 감

소하였다.

4. 結 論

本實驗은 배합비를 달리한 mortar의 試片을 50일간 수중양생하여 ASTM E 561-80에서 제안한 CLWL-DCB 試片을 제작 劈開型모드(opening mode)시험방법에 의하여 static loading에 의한 균열길이 a_e , a_m , a_i 를 구하고 일정진폭을 가진 動的荷重(dynamic loading)에 의한 균열길이 a_e , a_m , a_i 를 구하여 각 균열길이에 대한 상관관계식을 제시하였고 썬기荷重(P)과 replica crack length ratio (a_i/w)의 상관곡선을 考察한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 균열길이는 replica film에서 얻은 균열길이 a_i 가 가장 크고 유효균열길이(a_e), 물리적 균열길이(a_m) 순으로 크기가 나타난다는⁽³⁾ 理論에 의하여 일정진폭을 가진 動的荷重에 의한 균열측정을 한 結果같은 理論이 적용됨을 알 수 있었다.

2) dynamic loading test에서의 a_i/w 에 대한 a_e/w 및 a_m/w 의 값이 static loading test에서의 a_e/w 및 a_m/w 의 값보다 크게 나타났다.

3) 각 實驗의 경우 시멘트에 대한 모래의 배합비가 증가될수록 static loading test의 회귀직선식과 dynamic loading test에서의 회귀직선식이 접근하였다. 이유는 모래의 배합비가 증가하면 시편자체가 갖고 있는 점성이 점차 감소하고 취성체가 되어 하중재하시 나타나는 미소균열이 점차 감소되기 때문이라 생각된다.

4) 썬기荷重(P)과 (a_i/w)에서는 static loading test에 의한 균열예측실험의 경우 양생기간에 관계없이 (a_i/w)=0.5 근방에서 荷重이 감소하였고 dynamic loading test의 경우 (a_i/w)=0.425 근방에서 최대하중이 감소하였다.

5) 시멘트에 대한 모래(S)의 배합비가 증가할수록 최대썬기荷重(P)에 대응하는 (a_i/w)의 값이 감소하였다.

參 考 文 獻

1. Arrea, M., and Ingraffea, A.R., "Mixed Mode Crack Propagation in Mortar and Concrete", Report, No. 81-13, Dept. of structural Eng.,

- Cornell University, February, 1982.
2. ASTM E561-80 "Standard Recommended Practice for R-curve Determination", ASTM, Annual Book of Standards, 1980.
 3. Barker, D.B., Hawkins, N.M., Jeong, F.L., Cho, K.Z., and Kobayashi, A.S., "Concrete Fracture in CLWL Specimen", *Journal of Engineering Mechanics Div.*, ASCE, Vol. 111, No. 5, May, 1985, pp.623~638.
 4. Bazant, Z.P., and Cedolin, L., "Blunt Crack band Propagation in Finite Element Analysis", *Journal of the Engineering Mechanics Div.*, ASCE, Vol. 105, No. EM2, April, 1979, pp.337~342.
 5. Bazant, Z.P., and Cedolin, L., "Fracture Mechanics of Concrete", *Journal of Engineering Mechanics Div.*, ASCE, Vol. 106, No. EM6, December 1980, pp.1287~1306.
 6. Bazant, Z.P., "Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal", *Journal of Engineering Mechanics Div.*, ASCE, Vol. 106, No. EM6, 1984, pp.518~535.
 7. Bazant, Z.P., Kim, J.K., and Pfeiffer, P., "Nonlinear Fracture Properties from Size Effect Test", Report No. 84-5/428n, The Technological Institute, Northwestern University, May, 1984.
 8. Broek, D., "Elementary Engineering Fracture Mechanics", Sijhoff & Noordhoff, 1978.
 9. Chen, W.F. and Saleeb, A.F., "Constitutive Equations for Engineering Materials: Elasticity and Modeling, Volume 1", John Wiley & Sons, 1982.
 10. Chen, W.F., "Plasticity in Reinforced Concrete", McGraw Hill, 1982.
 11. Cho, K.Z., Kobayashi, A.S., Hawkins, N.M., Barker, D.B., and Jeang, F.L., "Fracture Process Zone of Concrete Cracks", *Journal of Engineering Mechanics Div.*, ASCE, Vol. 110, No. 8, August, 1984, pp.1174~1184.
 12. Hellan, K., "Introduction to Fracture Mechanics", McGraw-Hill, 1984.
 13. Jenq, Y.S., and Shah, S.P., "A Fracture Toughness Criteria for Concrete", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, No. 5, 1985, pp.1055~1069.
 14. Kaplan, M.F., "Crack Propagation and the Fracture of Concrete", *Journal of ACI*, Vol. 58, No. 11, Nov., 1961, pp.591~610.
 15. Owen, E.R.J., and Fawkes, A.J., "Engineering Fracture Mechanics", Pineridge Press, United Kingdom, 1983.
 16. Richart, F.E., Brandtzaeg, A., and Brown, R.L., "A Study of Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses," Bulletin No. 185, Eng. Exp. Station, University of Illinois, 1928.
 17. Saouma, V.E., Ingraffea, A.E., and Catalano, D.M., "Fracture Toughness of Concrete Kic Revisited", Report 80~9, Cornell University, October, 1980.
 18. Wecharatana, M., and Shah, S.P., "Experimental Method to Determine Fracture Parameters for Concrete", Dept. of Civil Eng., Northwestern Univ., Evanston, Illinois, U.S.A., 1982.
 19. Wecharatana, M., and Shah, S.P., "Predictions of Nonlinear Fracture Process Zone in Concrete", *Journal of Engineering Mechanics Div.*, ASCE, Vol. 109, No. 5, October, 1983, pp.1231~1246.

(接受: 1988. 3. 28)