

동적하중을 받는 콘크리트보의 파괴거동

Fracture Behavior of Concrete Beam Subjected to Dynamic Loading

강 성 후* 김 우** 박 선 준***

Kang, Sung Hoo Kim, Woo Park, Sun Joon

In this study, after concrete cylinders were made on the condition of varying water-to-cement ratio, and cured 80 days compressive strength and splitting tensile strength were performed and modulus of elasticity is obtained.

The fracture energy was obtained by acting three point bending on the 80cm in length. This test involved static loading test and dynamic loading test. In this work, the new interrelation of the material constants was obtained clearly and the property of the mixture was inspected, including the relation between the fracture energy and all kind of the material constants.

1장 서론

본 연구는 물-시멘트비(w/c ratio)를 변화시킨 경우와 일정 물-시멘트비의 조건하에서 Slump값을 변화시켜가면서 콘크리트의 공시체와 보 시편을 제작하였다. 80일간의 수중양생을 거친후 정적재하실험을 실시하여 콘크리트의 일축압축강도(f_c), 할렬인장강도(f_{sp}), 탄성계수(E_c)를 계산하였다. 또한 같은 배합조건하에서 지간길이 80cm (단면 10cm × 10cm 초기노치길이 5cm)인 보에 대해 정적하중재하실험(Static loading test)을 행하여 여기에서 얻어진 최대하중의 30%와 70%의 하중을 미리 재하시킨 다음 그 상태에서 ±5%에 해당하는 하중에 관한 변위를 동적변위로 하여 동적재하실험(Dynamic loading test)을 하였다. 여기에서 얻어진 각종 재료상수(f_c , f_{sp} , E_c)의 관계를 통하여 새로운 재료상수의 상관관계를 규명하고 배합의 타당성을 검토하였다.

2장 실험

2.1 실험재료 및 시편

3종류의 균열 방식중 가장 흔히 발생하며 재료의 강도 약화에 큰 영향을 주는 것은 Mode I (Opening mode) 균열방식으로써 보 시편은 이를 택하여 3점 휨 실험(Three-point bending test)으로 실험하였다⁵⁾. 시편의 제원은 그림.1 과 같다.

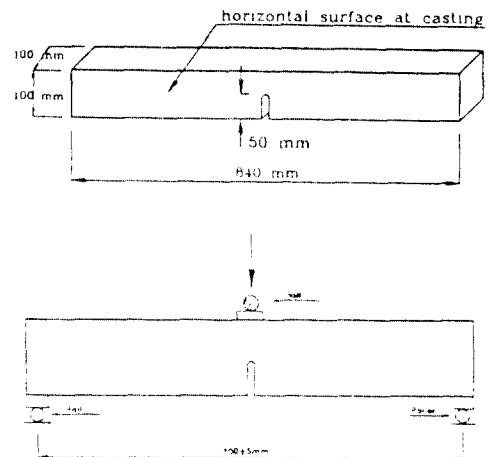


그림.1 Specimen and support condition

* 동신대학교 토목공학과 부교수 공학박사
** 전남대학교 토목공학과 부교수 공학박사
*** 동신대학교 대학원 토목공학과 석사과정

사용재료의 특성과 콘크리트 배합은 각각 표.1 과 .2에 기록하였다.

표.1 Material property

종류 특성	굵은골재(A)	잔골재 (B)	시멘트 (C)
최대치수 (mm)	9.5	2.4	보통 포틀랜드 시멘트 사용
조립율 (F.M)	6.74	2.63	
단위중량 (kg/m ³)	2680	2670	
흡수율 (%)	0.34	1.45	
비 고	배합비((B+C)/(A+B+C))는 항상 0.58로 유지시킴.		

표. 2 Mix proportions for fresh concrete

	mix1	mix2	mix3	mix4	mix5	mix6
시멘트 (kg/m ³)	478	398	329	282	306	484
잔골재 (kg/m ³)	765	866	929	976	1023	721
굵은골재 (kg/m ³)	902	920	914	911	961	875
물 (kg/m ³)	196	199	198	198	153	242
감힌공기 (vol%)	0.09	0.76	0.63	0.51	0.57	0.65
m	3.49	4.49	5.59	6.69	6.50	3.30
W/C	0.41	0.50	0.60	0.70	0.50	0.50
slump (cm)	5±1	5±1	5±1	5±1	<1	20±3
단위 중량 (kg/m ³)	2339	2365	2355	2355	2429	2307

* m=(잔 골재+굵은 골재)/(시멘트).

3.2 배합 및 양생

보 시편은 1종류의 배합에서 10개씩 총 60개의 보를 제작하였고, 실린더 시편은 1종류의 배합에서 9개씩 총 54개의 공시체를 제작하였다. 그리고 보의 노치는 거푸집에 노치형상의

철편을 부착하여 Opening mode 실험을 위한 시편을 제작하였다. 또한 시편은 20 ± 2°C 의 수중양생조에서 80일간 양생되었다.

3.3 실험방법

일축압축강도는 KS F 2405에 의해서 그리고 할렬강도는 KS F 2423에 따라서 결정되었고 탄성계수는 공시체의 평균길이 방향의 변형을 Strain gauge로 측정하여 구하였다. 그리고 모든 보의 실험은 실험장치의 Stroke mode 로 제어하여 시험하였으며, 하중재하장치는 미국 Instron 社의 25ton 용량의 구조용피로시험기 (Servohydraulic fatigue testing machine)를 사용하였으며 정적하중의 조작이나 반복하중등 기타조작은 실험기에 장치된 Controllers로 제어하였다.

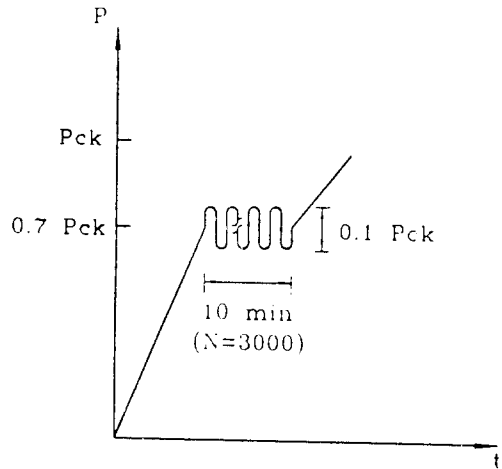


그림.2 Loading history

동적하중(70%)에 의한 실험은 최대하중이 Pck라면 0.7Pck까지 정적하중에 의해서 실험을 실시하고 그림.2에 나타낸것 처럼 최대하중의 10%동적하중에 대한 변위로써 300cpm sine파 하중을 10분(N=3000회) 동안 가한후 Unloading 하여 정적재하실험으로 하중과 변위곡선을 구하였다. 그리고 탄성계수를 구하기 위한 변형률을 구하기 위해서는 만능실험기를 이용하여 공시체 표면에 Strain gauge를 부착하여 압축강도의 평균하중에서 50%을 가하였을 경우의 변형률을 구한 다음 탄성계수를 구하였다. 보의 실험은 30~60초안에 최대하중에 도달하도록 하였고 여기에서 하중과 변위곡선의 면적을 구하여 콘크리트 파괴특성중 파괴에너지를 구하였고, 특성길이 l_{ch}는 공식 (l_{ch} = EGF/f_{sp}²)에 따라 계산되었다.

3장 결과 및 고찰

80일 압축강도, 탄성계수, 할열인장강도, 파괴 에너지 G_F 그리고 특성길이 l_{ch} 등을 표 3에 나타냈다.

표.3 Fracture energy and characteristic length results

특성 종류	특성	f_c kg/cm ²	f_{sp} kg/cm ²	E_c kg/cm ²	G_F kg/m	l_{ch} mm
mix 1	정적	323	32.0	262614	19.03	468
	30%				13.94	343
	70%				12.22	301
mix 2	정적	288	30.4	256171	17.67	470
	30%				12.78	340
	70%				10.23	272
mix 3	정적	250	26.6	238541	14.41	474
	30%				12.35	407
	70%				10.88	358
mix 4	정적	200	24.7	223246	13.61	478
	30%				12.53	434
	70%				11.58	382
mix 5	정적	292	27.4	263621	16.57	485
	30%				11.93	349
	70%				10.41	305
mix 6	정적	281	28.9	250504	16.79	472
	30%				14.84	418
	70%				13.32	375

3.1 하중과 변위곡선의 고찰

하중과 변위곡선의 변화는 정적재하실험, 30%동적재하실험 그리고 70%동적재하실험을 통해 비교분석하였다.

먼저 일정슬럼프(5±1cm)의 조건하에서 물-시멘트비를 변화시켰을 경우 파괴에너지의 크기는 하중재하 조건에서 정적>동적(30%)>동적(70%)로, 배합종류 에서는 Mix1>Mix2>Mix3>Mix4 순서로 결과값이 얻어졌다.

다음으로 일정 물-시멘트비(w/c=0.5)의 조건하에서 슬럼프를 변화시켰을 경우 파괴에너지값의 크기는 하중재하 조건에서 정적>동적(30%)>동적(70%)로, 배합종류에서는 슬럼프가 1cm이하>5±1cm>20cm이상의 순서로 나타났다.

FRACTURE ENERGY TEST #A1

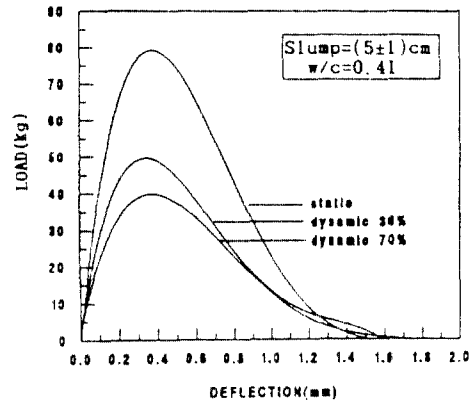


그림. 3 Load-deflection curve by Mix. 1

FRACTURE ENERGY TEST #A2

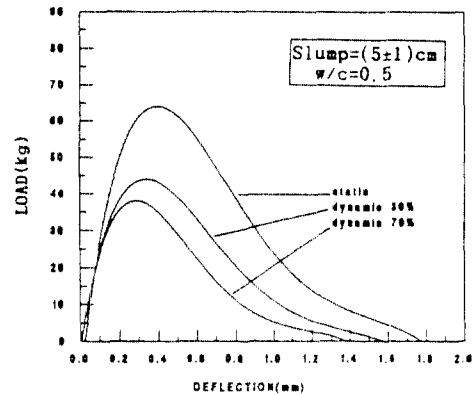


그림. 4 Load-deflection curve by Mix. 2

FRACTURE ENERGY TEST #A3

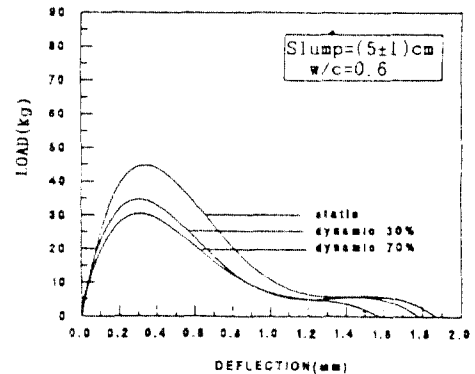


그림. 5 Load-deflection curve by Mix. 3

위의 결과에서 일정한 슬럼프값 (5±1cm)의 조건하에서 물-시멘트비의 증가는 파괴에너지

(G_F) 값을 감소시키고, 파괴시 시편(보)의 처짐량과 특성길이를 증가시키는 원인이 됨을 알 수 있었고, 또한 높은 파괴강도를 갖는 시료일수록 파괴시 처짐량은 감소함을 알 수 있었다.

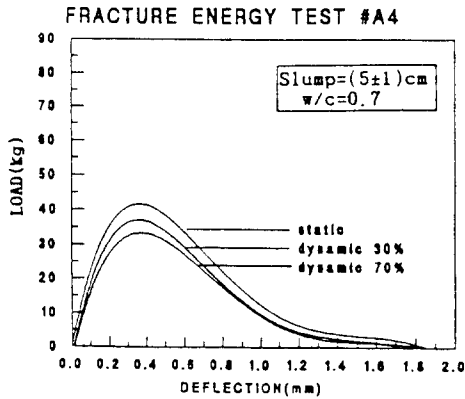


그림. 6 Load-deflection curve by Mix. 4

3.2 물-시멘트비의 영향

콘크리트 특성에 대한 물-시멘트비의 영향은 표.2.3으로 부터 각각의 결과치를 plotting 하여 얻을 수 있다. 이 결과치에서 각각 파괴에너지(G_F), 압축강도(f_c), 탄성계수(E_c)에 대한 물-시멘트비의 영향을 나타냈다(그림.7-12). 3가지 재료상수 공히 콘크리트 슬럼프가 일정할 경우 그 값은 시멘트량에 의존한다는 것을 보여준다.

3.3 파괴에너지에 대한 시멘트량의 영향

파괴에너지에 대한 시멘트량의 영향을 2가지 조건(일정 슬럼프 조건과 물-시멘트비가 일정한 조건)을 기준으로 하여 고찰하였다. 그림.7-10에 경화된 콘크리트의 일정 슬럼프 조건 하에서 파괴에너지(G_F), 특성길이(l_{ch}), 압축강도(f_c), 탄성계수(E_c)의 변화를 나타냈다. 그림.7은 시멘트량이 증가함에 따라 파괴에너지(G_F)도 같이 증가한다는 것과 피로손상을 크게 입을 수록 파괴에너지(G_F) 값의 증가정도는 감소해 간다는 것을 의미한다. 또한 압축강도(f_c), 탄성계수(E_c)는 시멘트량이 증가함에 따라 증가하고 특성길이는 시멘트량의 증가에 따라 감소해 간다는 것을 나타내고 있다.

또한 일정 물-시멘트비 조건하에서 파괴에너지(G_F)와 특성길이(l_{ch})는 그림.11과 12에 나타나 있는 것 처럼 정적하중재하실험의 경우에는 시멘트량의 증가에 대해 큰 변화가 없으나 동

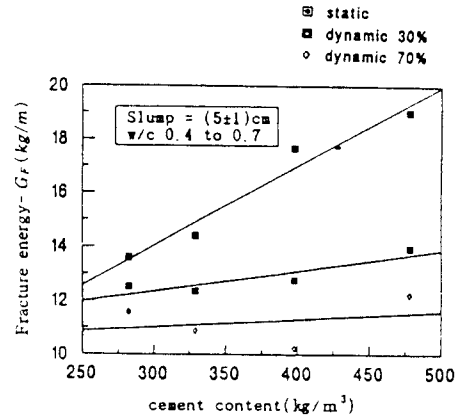


그림. 7 Effect of cement content on the fracture energy for a constant consistency

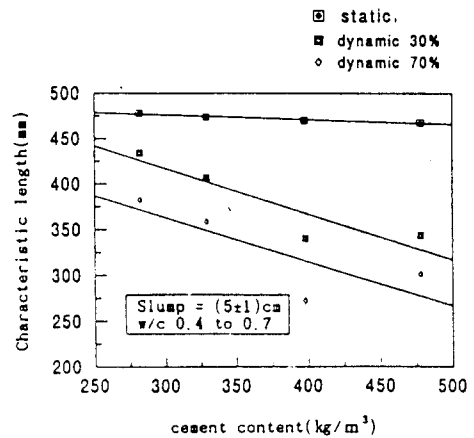


그림. 8 Effect of cement content on the characteristic length for a constant consistency

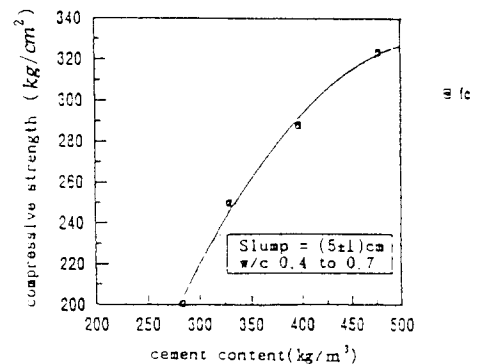


그림. 9 Effect of cement content on the compressive strength for a constant consistency

적하중재하실험의 경우에는 시멘트량이 증가해

감에 따라 파괴에너지(G_F)와 특성길이(l_{ch})의 값도 같이 증가하였다.

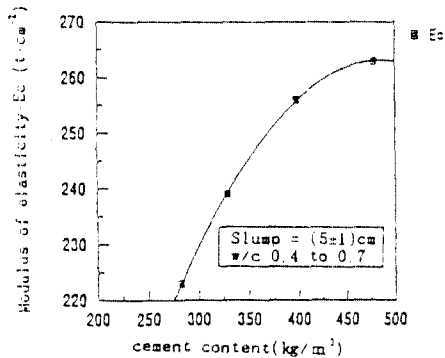


그림. 10 Effect of cement content on the modulus of elasticity for a constant consistency

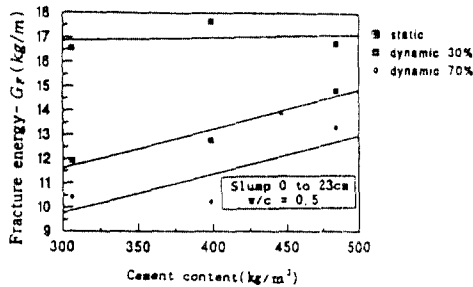


그림. 11 Effect of cement content on the fracture energy for a constant w/c ratio

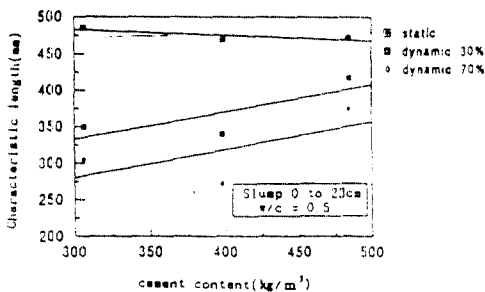


그림. 12 Effect of cement content on the characteristic length for a constant w/c ratio

3.4 파괴에너지에 대한 골재-시멘트비의 영향

그림.13과 14는 일정 슬럼프 조건하에서 파괴에너지(G_F)와 특성길이(l_{ch})에 대한 골재-시멘트비의 영향을 나타내고 있다. 이와같은 일정 슬럼프 조건하에서는 골재-시멘트비의 증가가

물-시멘트비의 증가를 의미하므로 압축강도, 탄성계수(E_c), 파괴에너지(G_F)의 감소원인이 된다. 또한 그림.13은 일단 외부 하중에 의해 손상을 입은 시료는 골재-시멘트비의 변화에 대해서 파괴에너지(G_F) 값의 변화가 거의 없음을 말해준다. 그러나 특성길이(l_{ch})는 골재-시멘트비의 증가에 따라 같이 증가한다는 것을 그림.14에 의해 파악 할 수 있다.

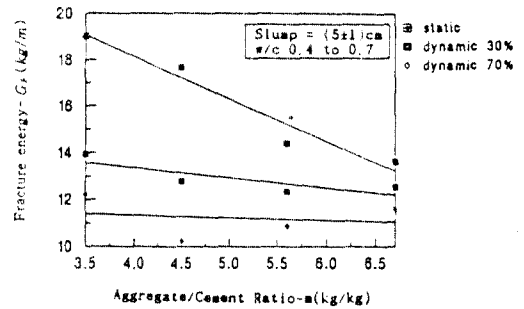


그림. 13 Effect of aggregate-to-cement ratio on the fracture energy for a constant consistency

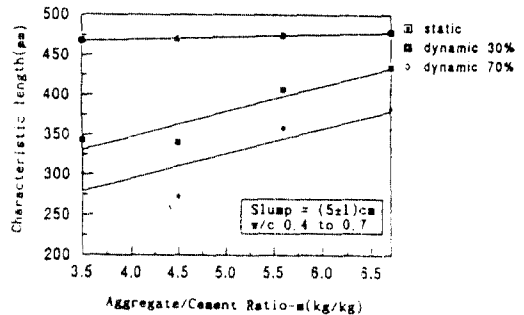


그림. 14 Effect of aggregate-to-cement ratio on the characteristic length for a constant consistency

위의 조건과는 달리 그림.15와 16은 물-시멘트비를 일정하게 유지하는 조건하에서 파괴에너지(G_F)와 특성길이(l_{ch})에 대한 골재-시멘트비의 영향을 나타내고 있다.

이와같은 조건하에서는 정적하중재하실험의 경우 파괴에너지(G_F)와 특성길이(l_{ch})는 골재-시멘트비의 증가에 별다른 영향을 받지 않음을 알 수 있고, 동적하중재하실험에서는 골재-시멘트비가 증가함에 따라 파괴에너지(G_F)와 특성길이(l_{ch}) 모두가 감소하였다.

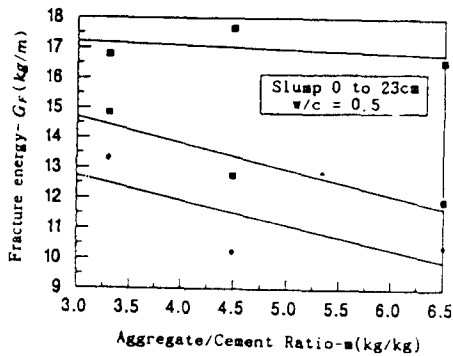


그림. 15 Effect of aggregate-to-cement ratio on the fracture energy for a constant consistency

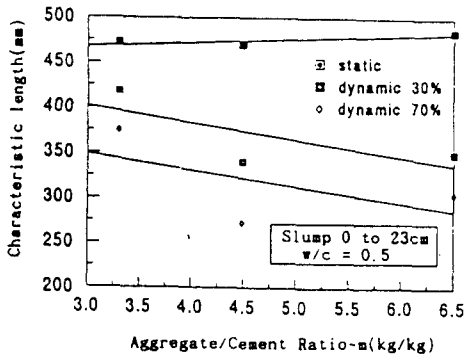


그림. 16 Effect of aggregate-to-cement ratio on the characteristic length for a constant w/c ratio

5장 결론

본 연구는 일정한 Slump의 조건하에서 물-시멘트비의 변화와 일정한 물-시멘트비의 조건하에서 Slump값을 변화시킨 무근콘크리트의 특성을 조사하기 위하여, 원통형 공시체를 제작하고 정적 및 동적하중하의 파괴에너지를 구하기 위한 3점 휨 시험중 균열의 가장 일반적인 형태인 Mode I (Opening mode)에 대해 하중조건을 변화시켜 실험하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 일정한 슬럼프값(5±1cm)하에서 물-시멘트비의 증가는 파괴에너지(G_F)값을 감소시키고, 파괴시 시편(보)의 특성길이를 증가시키는 원인이 됨을 알 수 있었고, 높은 파괴강도를 갖는 시료 일수록 파괴시 처짐량을 감소함을 알 수 있었다.

- 2) 일정한 슬럼프값의 조건하에서 파괴에너지(G_F)값은 시멘트량이 증가함에 따라 같이 증가하고, 피로손상을 크게 입은 시료일수록 파괴에너지(G_F)값의 증가율은 감소한다. 또한 일정 물-시멘트비의 조건하에서 파괴에너지(G_F)값은 정적하중재하실험의 경우에는 시멘트량의 증가에 대해 큰 변화가 없으나 동적하중재하실험의 경우에는 시멘트량이 증가해 감에 따라 파괴에너지(G_F)값도 증가한다.
- 3) 일정한 슬럼프값의 조건하에서 파괴에너지(G_F)값은 골재-시멘트비가 증가해 감에 따라 감소하지만 일단 외부하중에 의해 손상을 입은 시료는 골재-시멘트비의 변화에 대해서 거의 변화가 없다. 일정 물-시멘트비의 조건하에서 파괴에너지(G_F)값은 정적하중재하의 경우에 골재-시멘트비의 변화에 거의 영향을 받지 않고, 그 이외의 경우에는 골재-시멘트비가 증가함에 따라 파괴에너지(G_F)값은 감소한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구사업(핵심전문과제)연구비로 수행된 일부 연구로서 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Hillerborg, A., "The Theoretical Basis of a Method to Determine the Fracture Energy G_F of Concrete", Mater.Struct., Vol.18, No.106, pp. 291-296, 1985.
2. Hillerborg, A., "Concrete Fracture Energy Test Performed by 9 Laboratories according to a Draft RILEM Recommendation, Report TVBM-3015, Lund, Sweden, 1983.
3. Power, T.C., "The Properties of Fresh Concrete", Wiley, New York, 1968.
4. RILEM 50-FMC Committee, "Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Tests on Notched beams", Draft Recommendation. Ibid, Vol.18, No.106, pp.285-290, 1985.
5. S.H. Kang, et al. "Designing Concrete Mixtures for Strength, Elastic Modulus and Fracture Energy", Mater.Struct., Vol.26, No.162, pp.443-452, 1993.