

준정적실험에 의한 접이음된 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가

Quasi-Static Test for Seismic Performance of R/C Bridge Piers with Lap Splices

정 영 수*
Chung, Young Soo

이 재 형**
Lee, Jae Hyung

김 용 곤**
Kim, Yong Gon

김 훈***
Kim, Hoon

ABSTRACT

Lap splice in plastic hinge region of RC bridge piers is inevitable because of the constructional joint between footing and column. RC circular columns with lap-splice in plastic hinge region are widely used in Korean highway bridges. It is, however, believed that there are not many experimental research works for nonlinear behavior of these columns subjected to earthquake motions.

This study has been performed to verify the effect of axial force, lap splice and confinement steel ratio for the seismic behaviour of reinforced concrete bridge piers. Quasi-static test have been done to investigate the physical seismic performance of RC bridge piers, such as displacement ductility and energy absorption.

1. 서론

근래에 히로시마 지진과 인도의 지진을 계기로 지진에 대한 사회적 관심이 고조되고 있으며 여러 역사적 기록과 근래에 국내에서 발생하는 지진은 한반도에서의 지진에 대한 인식을 전환하는 계기를 마련하고 있다. 따라서, 사회기반시설의 하나인 기존교량의 RC교각에 대한 내진성능 향상 및 보수보강기법에 관한 연구는 시급한 실정이라 할 수 있다. 특히 현행 세계 각국의 내진설계규정에서는 교각의 소성힌지구간에서의 주철근접침이음을 엄격히 금지하고 있는데 반해 1992년 내진설계규정도입 이전의 국내의 기존 비내진 설계교각의 상당수는 주철근 접침이음 시공되었으리라 판단되며, 주철근 접침이음에 대한 명확한 도면이 없는 탓에 실제 건설당시 시공현장에서 소성힌지구간에서의 주철근 접침이음없이 시공되었는지는 판단할 수가 없다. 또한 EC8, ATC32, NZS 등에서는 축방향력을 설계에 고려 하지만, 국내의 경우는 아직 설계에 반영하지 못하고 있는 실정이다.

본 연구는 RC교각의 내진성능에 영향을 미치고 있는 변수들로서 주철근 접이음 정도, 축방향력, 횡방향철근비 등에 대한 준정적(Quasi-static)실험을 실시하여 이들 변수에 의한 RC교각의 내진성능을 평가하고자 하였다. 이러한 결과는 장래 시공상의 문제로 시행되고 있는 소성힌지구간에서의 접이음에 대한 시방규정을 제시하고자 한다.

2. 연구내용

대상 모델은 국내의 내진 1등급으로 설계된 수원시의 하갈교를 대상으로 비내진, 중저진, 내진설계를

* 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

** 정회원, 한경대학교 안전공학과 교수

*** 정회원, 중앙대학교 대학원 석사과정

실시한 교각을 1/2.8의 축소모델로 원형 콘크리트 교각시험체를 제작하였다.

2.1 재료의 특성

콘크리트는 기둥 하단부의 원활한 타설을 위하여 슬럼프 18cm로 굵은 골재 최대치수는 13mm골재의 레미콘을 사용하였다. 주철근은 KS D 3504에 규정된 SD40을 사용하였으며 띠철근은 D6을 사용하였으며 KS B 0820에 따라 각각 3개의 시편에 대한 인장시험을 실시하여 5600kg/cm^2 과 4400kg/cm^2 의 항복강도를 얻었다. 기둥본체를 타설한 콘크리트의 압축강도는 KS F 2405에 따라 압축강도를 측정하여 296kg/cm^2 를 얻었다. 아래의 표 1.은 콘크리트의 배합표이다.

표 1 시험체 배합설계표

구분	W/C (%)	공기량 (%)	슬럼프 (cm)	단위량(kgf/m^3)					28일강도 (kgf/m^2)
				물	시멘트	굵은골재	혼화제	혼화제	
기둥본체	50.8	6.5	21	208	409	762	46	1.37	296

2.2 시험체 제작

Quasi-static 실험에 사용된 총 7기의 시험체의 단면과 띠철근 및 Cross tie제원은 그림 1에 나타내었다. 상세한 실험변수에 따른 띠철근 간격 및 축하중은 다음 표 2에 나타내었다. 축하중비는 축하중에 의한 내진성능의 영향을 평가하기 위해 $0.1f_{ck}A_g$, $0.15f_{ck}A_g$, $0.2f_{ck}A_g$ 의 축하중비를 선택하였으며 주철근의 겹침이음은 기존 연구결과³⁾로부터 주철근의 파단이 처음으로 발생된 부분(기초상단 0.28D)을 겹침이음 중심으로 하여 그림 2와 같이 배근하였으며, 주철근의 겹침이음 종류를 50%와 100%의 2가지로 채택하였다. 겹침이음 길이는 다음 식(1)과 같이 결정하였다.¹⁾ 내진시험체의 보강띠철근 및 후프 띠철근의 갈고리의 연장길이는 40mm, 겹침이음길이는 190mm이고 중저진(EC8)시험체의 보강띠철근 및 후프띠철근의 갈고리의 연장길이는 65mm, 겹침이음길이는 190mm이고 비내진시험체는 후프띠철근에 갈고리없이 겹침이음이 190mm만 있게 설계하였다.

$$l_d = 0.007 f_y d_b = 0.007 \times 4000 \times 0.953 = 26.684 \text{ cm} \approx 27 \text{ cm} \quad (1)$$

표 2 실험변수 및 시험체명

Classification	Nomenclature	Confinement Steel Space		Axial Force	Remark	
		PHR	NPHR			
Nonseismic	$P/f_{ck}A_g=0.1$	N-SP00-P1-R0	12.2 cm	16.8cm	67.8 ton	$\rho = 1.1\%$
	$P/f_{ck}A_g=0.15$	N-SP00-P2-R0	12.2 cm	16.8cm	135.7 ton	
	$P/f_{ck}A_g=0.2$	N-SP00-P3-R0	12.2 cm	16.8cm	203.6 ton	
	50% splice	N-SP05-P1-R0	12.2 cm	16.8cm	67.8 ton	
	100% splice	N-SP10-P1-R0	12.2 cm	16.8cm	67.8 ton	
Seismic	S-SP00-P1-R0	3 cm	4.5 cm	67.8 ton		
Limited Seismic	L-SP00-P1-R0	5 cm	6 cm	67.8 ton		

※註 : S : Seismic Design, L : Limited Ductile Design, N : Nonseismic Design
 SP00 : 0% Lap-splice, SP05 : 50% Lap-splice, SP10 : 100% Lap-splice
 P1 : Axial Load (67.8ton), P2 : Axial Load (101.7ton), P3 : Axial Load (135.7ton)
 R0 : Non-retrofit PHR : Plastic Hinge Region, NPHR : Non-plastic Hinge Region

2.3 계측장비

시험체의 주철근, 띠철근, Cross Tie의 변형률, 기둥부위의 횡방향변위 및 시험체의 예기치못한 slip이나 들림현상을 측정하기위해 LVDT를 다음 그림 3과 같이 설치하였다.

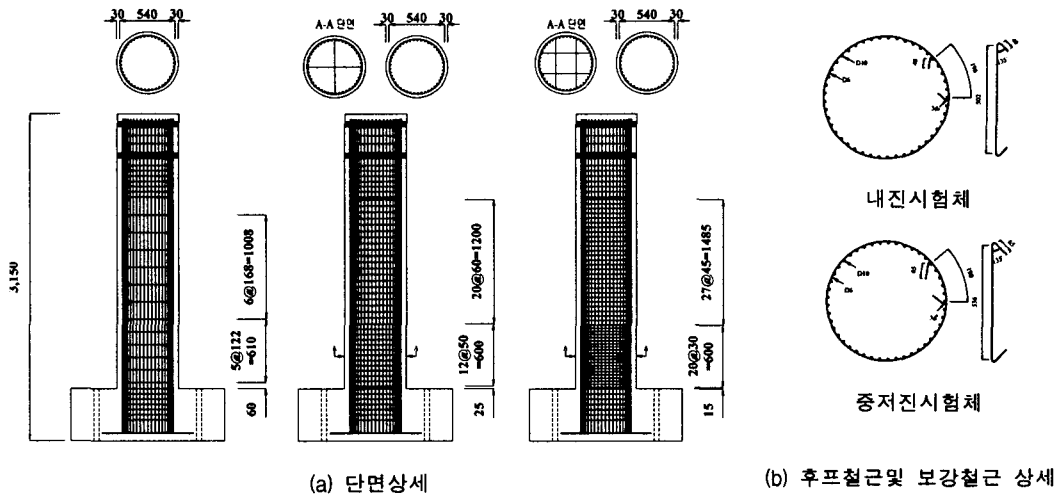


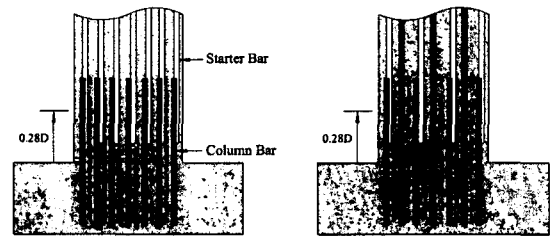
그림 1 시험체 상세

3. 실험개요 및 하중

Quasi-Static 실험을 위하여 그림 5에서와 같이 축하중을 300ton Oil jack을 이용하여 재하하고 횡방향 변위가 발생하더라도 일정한 축하중이 재하될 수 있도록 일정한 하중을 유지할 수 있는 유압기를 이용하였다. 횡방향의 반복하중은 사진 1과 같은 1000kN hydraulic actuator를 이용하여 변위제어 방식으로 가력하였다.

3.1 항복변위

기둥시험체의 항복변위, Δ_y ,는 탄성해석을 통하여 이론적인 휨응력에 상응하는 횡방향 하중에 대한 주철근의 변형률이 0.002의 75%에 도달시까지 하중제어방식으로 1 cycle 재하한 후 그때 측정된 양방향 변위의 평균값($\Delta_y = \frac{|\Delta_{y1}| + |\Delta_{y2}|}{2}$)을 항복변위로 규정하였다. 횡방향 하중형태는 실험을 통하여 얻은 Δ_y 에 대하여 그림 5(b)와 같이 $1.0\Delta_y$, $1.5\Delta_y$, $2.0\Delta_y$, $2.5\Delta_y$, $3.0\Delta_y$, $4.0\Delta_y$, ...로 초기에는 변위를 $0.5\Delta_y$ 씩 증가시켜 초기 교각의 연성도를 상세하게 관측하고 $3.0\Delta_y$ 이후로 $1.0\Delta_y$ 씩 증가시키는 2cycle형태의 피로거동으로 반복 재하하여 동일진폭에 대한 교각의 거동특성의 차이를 비교 분석하였다.



(a) 50% Lap Splice (b) 100% Lap Splice

그림 2 겹이음 상세

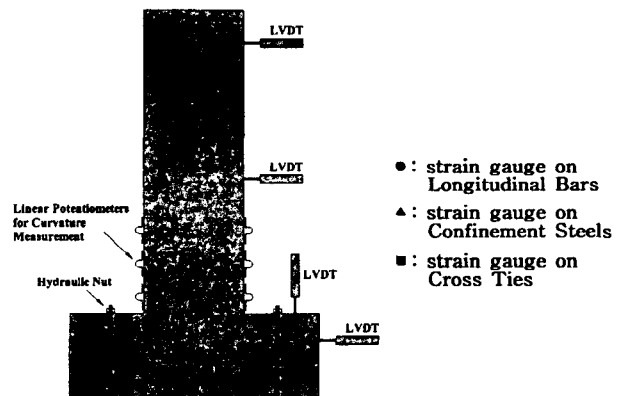


그림 3 측정장치 부착도

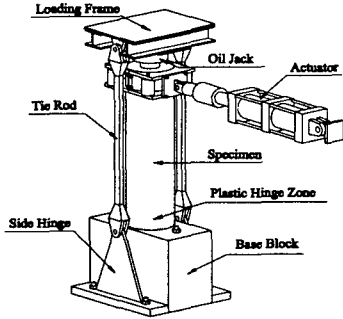


그림 4 실험개요

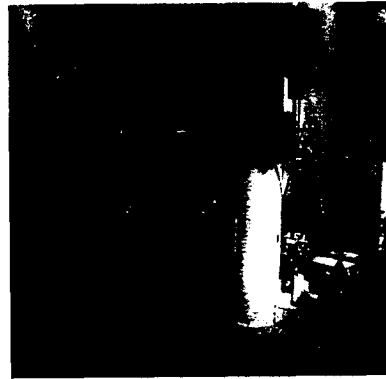
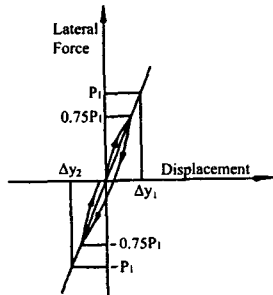
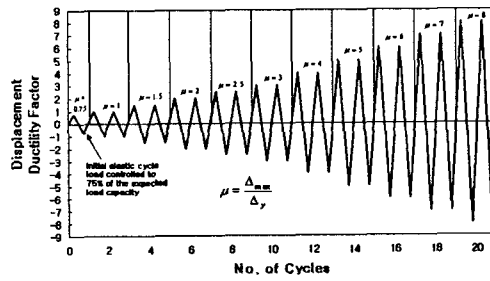


사진 1 Test Setup



(a) Δ_y 의 계산방법



(b) 하중 Pattern

그림 5 하중재하

4. 실험결과 분석

4.1 변위연성도

지진과 같은 과도한 변형에 대해 구조물이 안전하려면 충분한 변형에너지의 소산능력이 필요하며 이는 구조시스템에서 충분한 연성도를 갖고 있어야 한다. 콘크리트와 같은 복합구조물을 이용한 실험에서 구조물의 항복변위와 극한변위를 결정하기는 매우 어려우므로 Park, R.이 제안한 그림 6에서와 같이 간접적인 방법으로 구할 수 있다.²⁾ 구조물의 수평하중이 최대하중에 비해 15%정도 저하되었을 때의 변위를 극한변위로 정의하고 항복변위는 하중-변위곡선의 원점과 최대내력의 75%에 해당하는 변위점을 이은 직선이 최대내력점에 도달하였을 때의 수평변위로 정의한다.

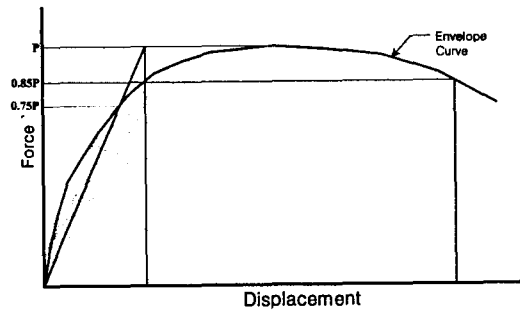


그림 6 항복변위와 극한변위의 정의

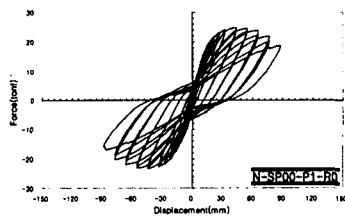
본 연구에서 변위연성도(μ)의 평가는 파괴변위, Δ_f 와 항복변위, Δ_y 와의 관계식으로 변위연성도를 평가하였다. 먼저 합리적인 연성도의 정의를 위하여 항복변위를 실험적으로 구한 결과와 Park, R.이 제안한 방법 그리고 최대변위는 최대내력의 저하가 85%인 시점에서의 변위와 최초의 주철근의 파괴가 발생할때의 변위를 이용하여 연성도를 구하였다.

본 실험에서 접이음이 있는 시험체의 경우 주철근의 좌굴에 의한 파단이 발생하지 않았다. 따라서 주철근의 파괴에 따른 최대변위를 측정할 수 없었다. 우선, Park, R이 제안한 경우와 주철근의 파괴에

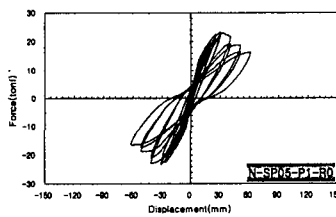
의한 연성도는 상당히 일치하는 것으로 평가되며 연성도가 실험에서 구한 경우에 비해 상당히 작은 것으로 평가된다. Park, R의 제안에 의한 연성도의 경우 내진설계로 제작된 시험체가 내진설계 미적용 시험체에 비하여 증저진시험체의 경우 약 10%, 내진시험체의 경우 45%정도의 연성도 증가현상이 나타났다. 또한 축하중이 증가할 경우 소성힌지부에서 휨 모멘트의 증가로 연성도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 본 연구에서 채택한 실험변수 중 가장 연성도에 큰 영향을 미치는 변수는 겹이음의 정도이며 주철근을 50%겹이음한 경우는 겹이음이 없는 시험체에 비해 63%, 100%겹이음한 경우 41%의 연성도를 보이고 있다. 실험적으로 구한 변위 연성도는 상당히 크게 나타나며 내진설계의 경우 10이상의 연성도를 보이고 있다. 하지만 겹이음이 있는 시험체의 경우 연성도 현저히 떨어지는 것으로 평가되었다.

표 3 변위연성계수(μ)

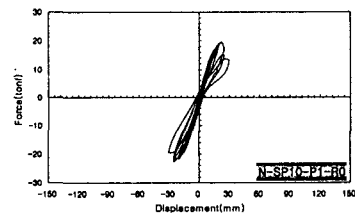
Specimen	Yield Displacement		Failure Displacement		Ductility Factor(μ)			
	Experimental (1)	Analytical (2)	Strength 15% drop(3)	Rebar Buckling (4)	(3)/(1)	(4)/(1)	(3)/(2)	(4)/(2)
N-SP00-P1-R0	11	19.973	79.810	66.469	7.25	6	4.00	3.33
N-SP00-P2-R0	11.9	21.905	73.764	62	6.198	5.2	3.367	2.83
N-SP00-P3-R0	13.5	22.812	75.890	Without	5.62	-	3.33	-
N-SP05-P1-R0	10	18.719	46.928	Without	4.69	-	2.5	-
N-SP10-P1-R0	10	15.700	25.753	Without	2.57	-	1.64	-
S-SP00-P1-R0	12	21.339	123.724	117	10.31	9.75	5.80	5.48
L-SP00-P1-R0	11.9	22.339	97.902	71	8.22	5.96	4.38	3.18



(a) N-SP00-P1-R0



(b) N-SP05-P1-R0



(c) N-SP10-P1-R0

그림 7 하중-변위 이력곡선

미국 ASSHTO와 도로교 시방서에서 사용되는 응답수정 계수(Response modification factor) R에 대하여 요구되는 연성도를 그림 9와 같이 Blume에 의하여 탄성영역과 소성 영역사이의 Potential Energy가 같다는 가정에 의하여 제안되었으며 이는 철근콘크리트 기둥의 내진설계시 정적 또는 동적 구조해석의 방법으로 선형탄성해석을 사용하는 경우에 재료 및 단면성질에 의해 비선형 거동을 보이는 철근 콘크리트 기둥에 대하여 선형탄성해석을 수행함으로써 발생하는 차이를 수정하기 위한 계수이므로 소성거동을 고려하는 재료비선형해석을 수행하는 경우에는 필요하지 않으나, 탄성해석을 사용하여 설계할 때 필요한 계수로서 연성 능력을 나타내주는 계수이다. 현행 도로교 시방서의 규정인 $R = \sqrt{2\mu - 1}$ 은 응답수정계수와 연성도의 관계를 나타내며 단일주의 경우 응답수정계수($R=3$)에 대하여 연성능력을 구하면 $\mu = 5$ 를 나타낸다. 본 연구결과에 의하면 비내진 시험체의 경우 연성능력이 미흡하고 특히, 주철근이 겹이음된 시험체의 경우는 심각한 연성능력의 저하를 보인다.

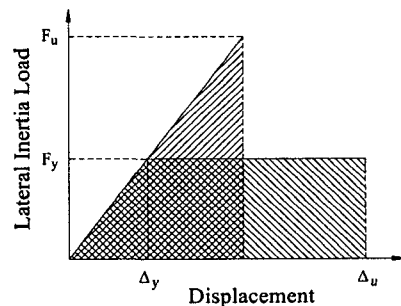


그림 8 응답수정계수와 연성도와의 관계

$R = \sqrt{2\mu - 1}$ 은 응답수정계수와 연성도의 관계를 나타내며 단일주의 경우 응답수정계수($R=3$)에 대하여 연성능력을 구하면 $\mu = 5$ 를 나타낸다. 본 연구결과에 의하면 비내진 시험체의 경우 연성능력이 미흡하고 특히, 주철근이 겹이음된 시험체의 경우는 심각한 연성능력의 저하를 보인다.

4.2 하중-변위 포락곡선 및 에너지 흡수

다음 그림 9는 하중-변위포락곡선을 나타내고 있으며 실험변수에 따른 연성도의 차이는 겹이음에 따른 변화가 가장크며 내진설계유무, 축하중의 차이에 따라 연성도의 차이를 보이고 있다.

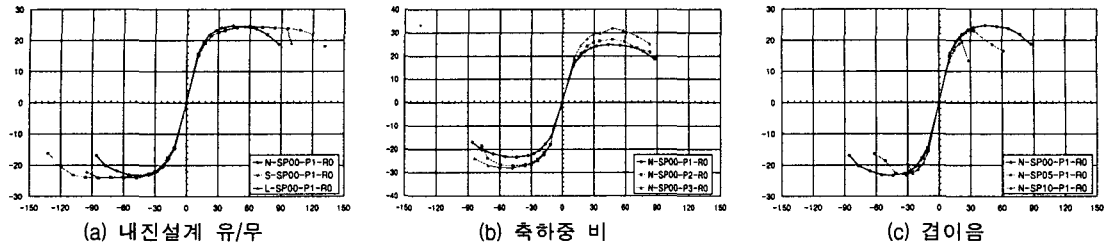


그림 9 Lateral Force-Displacement Envelope Curve

다음 그림 10은 각 실험변수에 따른 시험체의 에너지 흡수능력을 나타내고 있다. 겹이음에 의한 에너지 흡수능력의 차이가 가장 크며 다음으로 내진설계유무, 축하중의 차이에 따라 에너지 흡수능력의 차이를 보이고 있다.

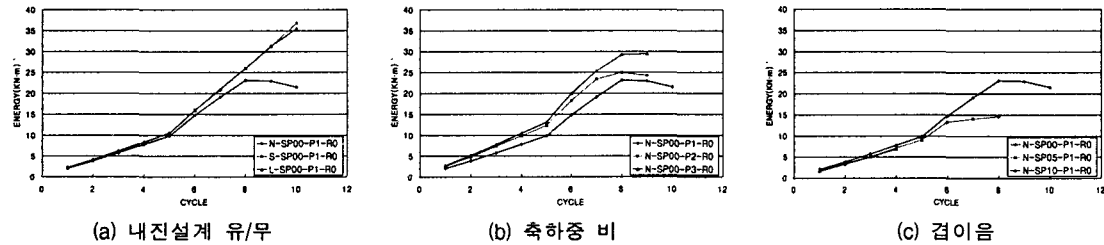


그림 10 Energy Absorption Curve

5. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 실험변수로 채택한 겹이음, 축하중 비, 내진설계 유/무에 따른 연성도의 평가에서 겹이음에 의한 연성도의 저하가 가장 두드러지는 것으로 평가되어 철근콘크리트 기둥의 주철근 겹이음에 대한 내진규정이 시급히 마련되어야 하리라 판단된다.
- 2) 축하중비에 따라 연성도 및 에너지 흡수능력의 차이를 보이므로 내진규정에 축하중을 고려하여야 하리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지진공학연구소(2000G0302) 및 (주)콘크리닉의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Reference

1. 도로교설계기준(2000), 한국도로교통협회
2. 김태훈, 유영화, 신현목, "지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동 및 연성능력에 관한 해석적 연구", 한국지진공학회 논문집, Vol.4, No.4, 2000.12
3. K.K.Lee, G.H.Han, Y.S.Chung, D.H.Lee, E.S. Hwang, "Quasi-Static Tests for Seismic Performance of R.C Bridge Piers," Proceedings of the Korea Concrete Institute, V.10, No.2, 1988, pp615~620
4. L.E. Aycardi, J.B. Mander, A.M. Reinhorn, "Seismic Resistance of Reinforced Concrete Frame Structures Designed Only for Gravity Loads : Part(II)," Experimental Performance of Subassemblages, Technical Report NCEER-92-0028, December1, 1992