

철근콘크리트 깊은 보의 내하력에 대한 신뢰도 평가

천주현¹⁾·김태훈²⁾·이상철³⁾·신현목^{1)*}

¹⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 ²⁾ (주)대우건설기술연구소 ³⁾ 한국시설안전기술공단

(2005년 4월 18일 원고접수, 2005년 10월 31일 심사완료)

Reliability of Load-Carrying Capacity of RC Deep Beams

Ju-Hyun Cheon¹⁾, Tae-Hoon Kim²⁾, Sang-Cheol Lee³⁾, and Hyun-Mock Shin^{1)*}

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-476 Korea

²⁾ Daewoo Institute of Construction Technology., Suwon, 440-210 Kore

³⁾ Korea Infrastructure Safety & Technology Co., Koyang, 411-807 Korea

(Received April 18, 2005, Accepted October 31, 2005)

ABSTRACT

Still no accurate theory exists for predicting ultimate shear strength of deep reinforced concrete beams because of the structural and material non-linearity after cracking. Currently, the load capacity assesment is performed for the upper structure of the bridges and containing non-reliability in the applications and results. The purpose in this study is to evaluate analytically the complex shear behaviors and normal strength for the reinforced concrete deep beams and to offer the accuracy load capacity assesment method based on the reliability theories. This paper presents a method for the load capacity assesment of reinforcement concrete deep beams using nonlinear finite element analysis. A computer program, named RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of reinforced concrete structures was used. Material non-linearity is taken into account by comprising tensile, compressive and shear models of cracked concrete and a model of reinforcing steel. From the results, determine the reliability index for the failure base on the Euro Code. Then, calculate additional reduction coefficient to satisfy the goals from the reliability analysis. The proposed numerical method for the load capacity assesment of reinforced concrete deep beams is verified by comparison with the others methods.

Keywords : reinforced concrete deep beams, nonlinear finite element analysis, reliability index, reliability analysis

1. 서 론

휨 작용이 지배적인 일반 철근콘크리트 보와 달리 철근 콘크리트 깊은 보(Deep beam)의 구조거동은 상부에 작용하는 하중의 많은 부분이 하중점과 지지점 및 휨인장 철근 사이에 형성되는 트러스 작용에 의하여 전달되기 때문에 철근콘크리트 깊은 보의 파괴는 주로 전단거동에 의하여 지배받게 된다. 특히, 콘크리트에 균열이 발생 한 후의 구조 및 재료의 비선형성으로 인하여 아직까지 그 구조거동에 대한 명확한 이론적 해석방법이 확립되어 있지 않은 상태이며, 대부분의 설계공식 또한 실험 결과에 근거를 두고 있다¹⁾. 최근 각국의 설계기준에서는 전단설계에 스트럿-타이 모델 등과 같이 보다 발전된 설계 방법을 반영 하고 있으나, 여러 연구자의 연구 결과 아직까지 그 적용성

과 방법에 많은 문제점이 지적되고 있다²⁾. 따라서 철근콘크리트 깊은 보의 거동 특성 및 전단강도를 해석적으로 평가하기 위한 기법의 개발이 요구되고 있는 실정이다. 한편, 현재까지 구조물에 대한 내하력 평가는 주로 전체구조물로서 교량 상부구조에 대하여 허용응력이론(WSD), 하중-저항계수이론(LRFD), 그리고 신뢰성지수에 의한 내하력 판정 방법 등이 사용되고 있지만, 일관성 없는 기준과 각기 다른 연구결과에 의존하여 수행되는 등 적지 않은 문제점을 포함하고 있다³⁾.

이에 이 연구에서는 전체 구조물이 아닌 개별 부재로서 그 구조적 중요성이 큰 철근콘크리트 깊은 보에 대하여 그 특수성이 잘 반영되고, 재료적 비선형성을 고려한 해석모델로부터 전단거동특성을 예측하고, 이러한 결과를 바탕으로 신뢰성 해석을 수행하여 적절하고 합리적인 내하력 평가방안⁴⁾을 수립하는 것을 목적으로 한다. 이를 통해 철근콘크리트 깊은 보에 대하여 합리적이면서 경제적인 설계기준의 개발에 필요한 전반적인 기초 자료를 제시하고자 한다.

* Corresponding author

E-mail : hmshin@skku.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

2. 비선형유한요소해석 프로그램

철근콘크리트 깊은 보의 전단거동 특성을 예측하기 위한 재료적 비선형성을 고려한 재료모델과 비선형유한요소해석 프로그램은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델^{5,6)}과 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소 그리고 탄성요소 등^{5,6)}을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁷⁾에 이식하여 모듈화된 비선형유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)^{5,6)}을 사용한다.

3. 비선형유한요소해석 프로그램의 검증

3.1 대상 실험체 I

이 연구에서 적용한 해석기법과 재료적 비선형성을 고려한 해석 모델의 타당성을 검증하기 위한 대상 실험체로 Clark⁸⁾이 실험한 총 50개의 철근콘크리트 깊은 보 실험체를 선정하였다. Fig. 1에 나타나 있는 것과 같이 이 실험체는 다양한 전단지간비(a/d)에 따라 콘크리트의 압축강

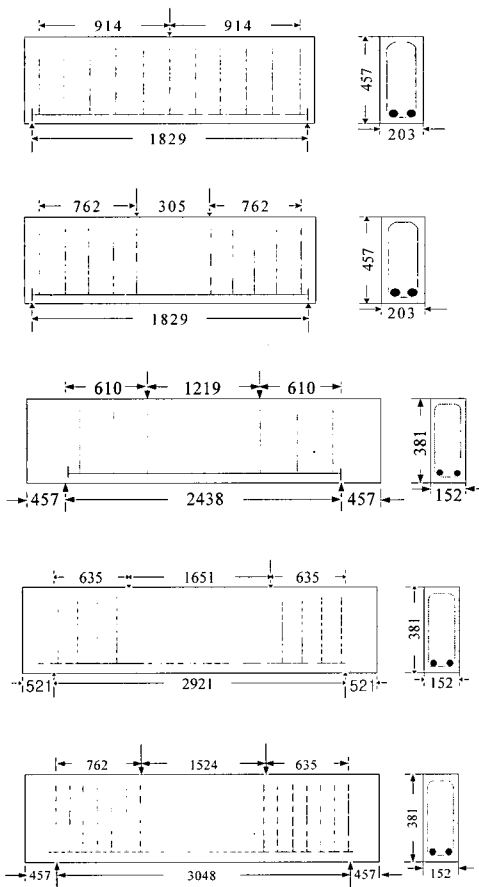


Fig. 1 Dimensions of series(unit: mm)

도, 수직 그리고 수평전단 철근이 그 전단거동특성에 미치는 영향을 파악하고, 그 전단강도를 예측하기 위한 실험이다. 이 실험체에 대한 재료 물성은 Table 1과 같다.

3.2 대상 실험체 II

3.1에서와 같이, 이 연구에서 적용한 해석 기법과 재료적 비선형성을 고려한 해석모델의 타당성을 검증하기 위한 두 번째 대상 실험체로 Smith 등⁹⁾이 실험한 총 52개의 철근콘크리트 깊은 보 실험체를 선정하였다. Fig. 2와 같이, 이 실험체 역시 다양한 전단지간비(a/d)에 따라 콘크리트의 압축강도, 수직 그리고 수평 전단철근이 그 거동특성과 전단강도에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험이다. 실험체에 대한 재료 물성을 Table 1에 나타내었다.

3.3 실험 및 해석 결과와의 비교·분석

철근콘크리트 깊은 보(Deep beam)의 내하력 평가에 앞서, 그 거동특성 및 전단강도를 해석적으로 평가하기 위해 이 연구에서 적용한 비선형유한요소해석 프로그램과 앞의 두 연구자가 실험한 총 102개의 철근콘크리트 깊은 보

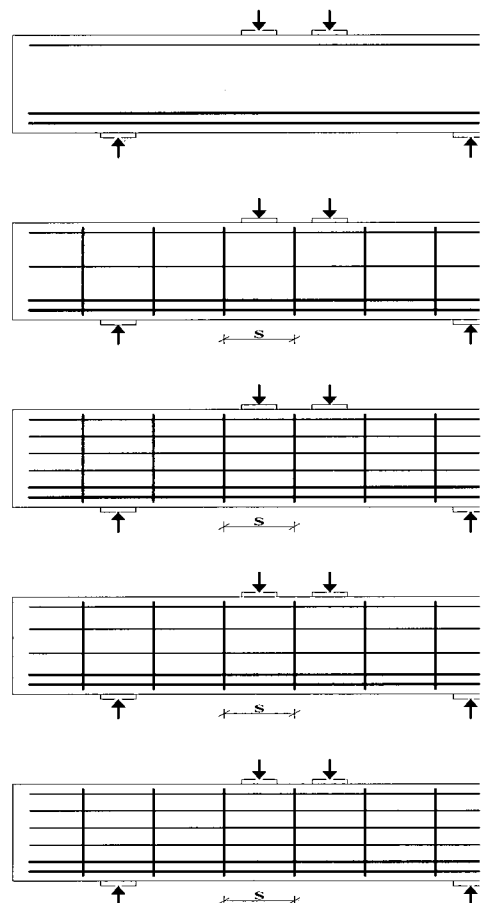


Fig. 2 Dimensions of series(unit: mm)

Table 1 Properties of test series

Clark(1951)						Smith and vantsiotis(1982)							
Beam	Length (mm)	a/d	A_s (mm ²)	f_{ck} (MPa)	s (mm)	Beam	a/d	A_s (mm ²)	f_{ck} (MPa)	A_v (mm ²)	s_v (mm)	A_{vh} (mm ²)	s_{vh} (mm)
Series A beams						Series A beams							
A1-1	1829	2.35	2457	24.65	182.88	0A0-44	0.77	1000	20.48	-	-	-	-
A1-2	1829	2.35	2457	23.65	182.88	0A0-48	0.77	1000	20.93	-	-	-	-
A1-3	1829	2.35	2457	23.41	182.88	1A1-10	0.77	1000	18.68	64.52	22.86	32.26	13.97
A1-4	1829	2.35	2457	24.75	182.88	1A3-11	0.77	1000	18.03	64.52	22.86	32.26	6.99
Series B beams						1A4-12	0.77	1000	16.06	64.52	22.86	64.52	9.40
B1-1	1829	1.95	2457	23.36	190.5	1A4-51	0.77	1000	20.55	64.52	22.86	64.52	9.40
B1-2	1829	1.95	2457	25.37	190.5	1A6-37	0.77	1000	21.06	64.52	22.86	64.52	6.99
B1-3	1829	1.95	2457	23.68	190.5	2A1-38	0.77	1000	21.68	64.52	10.16	32.26	13.97
B1-4	1829	1.95	2457	23.30	190.5	2A3-39	0.77	1000	19.75	64.52	10.16	32.26	6.99
B1-5	1829	1.95	2457	24.61	190.5	2A4-40	0.77	1000	20.34	64.52	10.16	64.52	9.40
B2-1	1829	1.95	2457	23.24	95.25	2A6-41	0.77	1000	19.13	64.52	10.16	64.52	6.99
B2-2	1829	1.95	2457	26.34	95.25	3A1-42	0.77	1000	18.41	64.52	5.08	32.26	13.97
B2-3	1829	1.95	2457	24.92	95.25	3A3-43	0.77	1000	19.24	64.52	5.08	32.26	6.99
B6-1	1829	1.95	2457	42.13	182.88	3A4-45	0.77	1000	20.82	64.52	5.08	64.52	9.40
Series C beams						3A6-46	0.77	1000	19.93	64.52	5.08	64.52	6.99
C1-1	1829	1.56	1640	25.65	203.2	Series B beams							
C1-2	1829	1.56	1640	26.34	203.2	0B0-49	1.01	1000	21.68	-	-	-	-
C1-3	1829	1.56	1640	23.95	203.2	1B1-01	1.01	1000	22.06	64.52	26.67	32.26	13.97
C1-4	1829	1.56	1640	29.03	203.2	1B3-29	1.01	1000	20.10	64.52	26.67	32.26	6.99
C2-1	1829	1.56	1640	23.65	101.6	1B4-30	1.01	1000	20.82	64.52	26.67	64.52	9.40
C2-2	1829	1.56	1640	24.99	101.6	1B6-31	1.01	1000	19.51	64.52	26.67	64.52	6.99
C2-3	1829	1.56	1640	24.13	101.6	2B1-05	1.01	1000	19.17	64.52	15.24	32.26	13.97
C2-4	1829	1.56	1640	26.96	101.6	2B3-06	1.01	1000	19.00	64.52	15.24	32.26	6.99
C3-1	1829	1.56	1640	14.07	203.2	2B4-07	1.01	1000	17.48	64.52	15.24	64.52	9.40
C3-2	1829	1.56	1640	13.79	203.2	2B4-52	1.01	1000	21.79	64.52	15.24	64.52	9.40
C3-3	1829	1.56	1640	13.93	203.2	2B6-32	1.01	1000	19.75	64.52	15.24	64.52	6.99
C4-1	1829	1.56	2457	24.48	203.2	3B1-08	1.01	1000	16.24	64.52	10.16	32.26	13.97
C6-2	1829	1.56	2457	45.23	203.2	3B1-36	1.01	1000	20.41	64.52	8.26	32.26	13.97
C6-3	1829	1.56	2457	44.68	203.2	3B3-33	1.01	1000	19.00	64.52	8.26	32.26	6.99
C6-4	1829	1.56	2457	47.57	203.2	3B4-34	1.01	1000	19.24	64.52	8.26	64.52	9.40
Series D beams						3B6-35	1.01	1000	20.65	64.52	8.26	64.52	6.99
D1-1	1829	1.17	1292	26.20	152.4	4B1-09	1.01	1000	17.10	64.52	5.08	32.26	13.97
D1-2	1829	1.17	1292	26.13	152.4	Series C beams							
D1-3	1829	1.17	1292	24.54	152.4	0C0-50	1.34	1000	20.68	-	-	-	-
D2-1	1829	1.17	1292	23.99	114.3	1C1-14	1.34	1000	19.24	64.52	35.56	32.26	13.97
D2-2	1829	1.17	1292	25.89	114.3	1C3-02	1.34	1000	21.89	64.52	35.56	32.26	6.99
D2-3	1829	1.17	1292	24.79	114.3	1C4-15	1.34	1000	22.68	64.52	35.56	64.52	9.40
D2-4	1829	1.17	1292	24.48	114.3	1C6-16	1.34	1000	21.79	64.52	35.56	64.52	6.99
D3-1	1829	1.17	1934	28.20	76.2	2C1-17	1.34	1000	19.86	64.52	20.32	32.26	13.97
D4-1	1829	1.17	1292	23.10	57.15	2C3-03	1.34	1000	19.24	64.52	20.32	32.26	6.99
D1-6	1829	1.94	1633	27.65	203.2	2C3-27	1.34	1000	19.31	64.52	20.32	32.26	6.99
D1-7	1829	1.94	1633	28.00	203.2	2C4-18	1.34	1000	20.44	64.52	20.32	64.52	9.40
D1-8	1829	1.94	1633	27.79	203.2	2C6-19	1.34	1000	20.75	64.52	20.32	64.52	6.99
E1-1	1829	2.02	1633	30.16	127	3C1-20	1.34	1000	21.03	64.52	11.43	32.26	13.97
D2-6	1829	2.43	1633	29.51	152.4	3C3-21	1.34	1000	16.55	64.52	11.43	32.26	6.99
D2-7	1829	2.43	1633	28.41	152.4	3C4-22	1.34	1000	18.27	64.52	11.43	64.52	9.40
D2-8	1829	2.43	1633	26.13	152.4	3C6-23	1.34	1000	19.00	64.52	11.43	64.52	6.99
D4-1	1829	2.43	1633	27.38	190.5	4C1-24	1.34	1000	19.58	64.52	8.26	32.26	13.97
D4-2	1829	2.43	1633	25.65	190.5	4C3-04	1.34	1000	18.55	64.52	10.16	32.26	6.99
D4-3	1829	2.43	1633	22.06	190.5	4C3-28	1.34	1000	19.24	64.52	8.26	32.26	6.99
D5-1	1829	2.43	1633	27.72	254	4C4-25	1.34	1000	18.51	64.52	8.26	64.52	9.40
D5-2	1829	2.43	1633	29.03	254	4C6-26	1.34	1000	21.24	64.52	8.26	64.52	6.99
D5-3	1829	2.43	1633	27.10	254	Series D beams							
						0D0-47	2.01	1000	19.51	-	-	-	-
						4D1-13	2.01	1000	16.06	64.52	15.24	32.26	13.97

Table 2 Comparisons of experiment results, analysis and code

Beam	V_{TEST} (kN)	$V_{ANALYSIS}$ (kN)	V_{CODE} (kN)	$V_{ANALYSIS}/$ V_{TEST}	$V_{CODE}/$ V_{TEST}	Beam	V_{TEST} (kN)	$V_{ANALYSIS}$ (kN)	V_{CODE} (kN)	$V_{ANALYSIS}/$ V_{TEST}	$V_{CODE}/$ V_{TEST}		
Clark's A series beams						Smith's A series beams							
A1-1	222.48	208.88	151.52	0.94	0.68	0A0-44	279.10	319.38	139.55	1.14	0.44		
A1-2	209.13	204.96	150.25	0.98	0.72	0A0-48	272.23	319.38	141.07	1.17	0.44		
A1-3	222.48	203.98	149.94	0.92	0.67	1A1-10	322.54	333.27	186.07	1.03	0.56		
A1-4	244.72	208.59	151.64	0.85	0.62	1A3-11	296.75	319.38	182.78	1.08	0.57		
Clark's B series beams						1A4-12	282.43	305.50	172.53	1.08	0.57		
B1-1	278.80	264.78	155.25	0.95	0.56	1A4-51	341.86	347.15	195.12	1.02	0.56		
B1-2	256.59	286.35	157.94	1.12	0.62	1A6-37	368.14	361.04	197.56	0.98	0.55		
B1-3	284.82	263.60	155.69	0.93	0.55	2A1-38	349.02	374.93	200.45	1.07	0.54		
B1-4	268.14	263.60	155.18	0.98	0.58	2A3-39	341.17	361.04	191.32	1.06	0.53		
B1-5	241.44	274.59	156.94	1.14	0.65	2A4-40	343.82	374.93	194.14	1.09	0.52		
B2-1	301.08	297.14	200.64	0.99	0.67	2A6-41	323.81	361.04	188.29	1.12	0.52		
B2-2	322.20	318.71	204.74	0.99	0.64	3A1-42	322.05	361.04	184.69	1.12	0.51		
B2-3	334.85	307.93	202.91	0.92	0.61	3A3-43	345.49	374.93	188.80	1.09	0.50		
B6-1	379.37	362.84	177.06	0.96	0.47	3A4-45	357.06	402.70	196.43	1.13	0.49		
Clark's C series beams						3A6-46	336.27	388.81	192.15	1.16	0.49		
C1-1	277.72	297.14	196.19	1.07	0.71	Smith's B series beams							
C1-2	311.07	297.14	197.49	0.96	0.64	0B0-49	298.02	277.72	143.60	0.93	0.52		
C1-3	245.95	274.59	188.78	1.12	0.77	1B1-01	294.88	319.38	207.23	1.08	0.65		
C1-4	285.96	307.93	202.40	1.08	0.71	1B3-29	287.14	291.61	199.55	1.02	0.68		
C2-1	289.98	285.57	235.08	0.99	0.81	1B4-30	280.67	305.50	203.12	1.09	0.67		
C2-2	301.06	296.65	237.70	0.99	0.79	1B6-31	306.65	291.61	196.62	0.95	0.67		
C2-3	323.81	285.57	236.03	0.88	0.74	2B1-05	258.01	305.50	194.88	1.18	0.64		
C2-4	288.22	307.93	241.40	1.07	0.84	2B3-06	262.42	305.48	194.00	1.16	0.64		
C3-1	223.69	197.11	170.95	0.88	0.76	2B4-07	252.23	291.61	186.09	1.16	0.64		
C3-2	200.30	197.11	170.24	0.98	0.85	2B4-52	299.79	333.27	207.77	1.11	0.62		
C3-3	188.09	197.11	170.59	1.05	0.91	2B6-32	290.47	305.50	197.83	1.05	0.65		
C4-1	309.30	307.93	221.88	1.00	0.72	3B1-08	261.54	277.72	179.36	1.06	0.65		
C6-2	423.84	449.14	256.04	1.06	0.60	3B1-36	317.93	319.38	201.09	1.01	0.63		
C6-3	435.02	449.14	255.25	1.03	0.59	3B3-33	316.75	319.38	194.00	1.01	0.61		
C6-4	428.65	456.99	259.34	1.07	0.61	3B4-34	310.09	319.37	195.23	1.03	0.61		
Clark's D series beams						3B6-35	332.25	333.27	202.27	1.00	0.61		
D1-1	301.06	339.30	258.99	1.13	0.86	4B1-09	306.95	291.61	184.06	0.95	0.63		
D1-2	356.67	339.30	258.72	0.95	0.73	Smith's C series beams							
D1-3	256.64	323.62	252.50	1.26	0.98	0C0-50	231.34	208.29	116.59	0.90	0.56		
D2-1	289.98	329.50	269.30	1.14	0.93	1C1-14	238.01	222.18	170.75	0.93	0.77		
D2-2	312.24	340.29	276.79	1.09	0.89	1C3-02	246.83	249.95	214.64	1.01	0.86		
D2-3	334.50	336.37	272.46	1.01	0.82	1C4-15	262.03	263.84	221.64	1.01	0.84		
D2-4	334.90	329.50	271.23	0.98	0.81	1C6-16	244.68	249.95	217.22	1.02	0.87		
D3-1	394.91	417.76	323.56	1.06	0.82	2C1-17	248.21	249.95	184.92	1.01	0.74		
D4-1	312.24	329.50	315.17	1.06	1.09	2C3-03	207.31	249.97	204.11	1.21	0.82		
D1-6	174.75	198.09	126.56	1.13	0.72	2C3-27	230.65	249.97	204.47	1.08	0.82		
D1-7	179.17	198.09	126.83	1.01	0.64	2C4-18	249.09	249.95	210.41	1.00	0.84		
D1-8	185.84	198.09	126.67	1.07	0.68	2C6-19	248.21	263.84	212.00	1.06	0.80		
E1-2	201.82	219.66	169.10	1.09	0.84	3C1-20	281.55	277.72	210.68	0.99	0.76		
D2-6	168.38	174.56	155.24	1.03	0.92	3C3-21	249.97	236.06	189.31	0.94	0.80		
D2-7	167.99	173.38	154.47	1.03	0.92	3C4-22	255.36	249.95	198.92	0.98	0.80		
D2-8	157.30	175.54	152.84	1.12	0.97	3C6-23	274.49	249.95	202.83	0.91	0.81		
D4-1	168.48	175.54	136.46	1.04	0.81	4C1-24	293.12	263.84	205.93	0.90	0.78		
D4-2	157.30	164.75	135.20	1.05	0.86	4C3-04	257.13	249.95	200.42	0.97	0.80		
D4-3	165.05	153.96	132.46	0.93	0.80	4C3-28	304.69	249.95	204.11	0.82	0.82		
D5-1	146.22	174.56	119.42	1.19	0.82	4C4-25	305.18	249.97	200.23	0.82	0.80		
D5-2	157.30	174.56	120.34	1.11	0.77	4C6-26	318.91	277.72	214.46	0.87	0.77		
D5-3	157.30	161.81	118.97	1.03	0.76	Smith's D series beams							
						0D0-47	146.81	152.75	136.21	1.04	0.89		
						4D1-13	174.85	166.63	202.90	0.95	1.22		
Mean					1.03	0.75	Mean					1.03	0.67
Standard deviation					0.08	0.13	Standard deviation					0.09	0.15
Variation					0.08	0.17	Variation					0.09	0.22
$V_{ANALYSIS}/V_{TEST}$						V_{CODE}/V_{TEST}							
Total mean				1.03		Total mean				0.71			
Standard deviation				0.09		Standard deviation				0.14			
Variation				0.08		Variation				0.20			

실험체에 대한 실험과 해석으로부터의 결과를 Table 2에 나타내었다. 여기에, 현행의 콘크리트 구조설계기준¹⁰⁾에 의한 결과와도 비교하여 나타내었다. 이에 대한 상관관계를 Figs. 3과 4에 각각 나타내었다. 아래의 결과에서 보는 바와 같이 총 102개의 대상 실험체에 대한 해석과 실험으로부터의 극한강도 비(比)에 대한 평균은 약 1.03%로서, 해석이 실험에 의한 극한강도에 비하여 다소 크게 평가하고 있으나, 표준편차와 변동계수가 각각 9%와 8%정도이다. 이는 이 연구에서 적용한, 재료적 비선형성을 고려한 비선형유한요소해석 프로그램이 비교적 큰 신뢰도를 나타냄을 알 수 있다. 이에 반해, 콘크리트 구조설계기준¹⁰⁾과 실험에 의한 극한강도 비(比)는 평균이 71%정도로서, 콘크리트 구조설계기준이 전단강도에 대하여 상당히 보수적인 평가를 하고 있음을 알 수 있다. 또한, 그 표준편차와 변동계수가 각각 14%와 20%이상으로서, 그 결과에 대한 신뢰도가 비교적 작다고 할 수 있다. 특히, 4D1-13 실험체에 대한 결과를 볼 때, 설계기준이 오히려 실험에 의한 결과보다 그 강도를 더 크게 평가하고 있음을 알 수 있으며, 이는 여러 연구자의 연구 결과에서와 같이 콘크리트 구조설계기준이 그 강도에 있어서 수평절근에 대해 과대평가를 하고 있기 때문이다. 이와 같은 결과를 종합해 볼 때, 철근콘크리트 깊은 보에 대하여, 이 연구에서 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램은 그 거동 특성 및 전단강도를 비교적 정확히 예측하고 있으며, 이러한 결과를 바탕으로 신뢰성 있는 내하력 평가 방안에 충분히 활용될 수 있음을 알 수 있다.

3.4 비선형유한요소해석 프로그램에 대한 신뢰도 산정

철근콘크리트 깊은 보에 대하여 신뢰성 있는 내하력 평가를 수행하기 위해서, 이 연구에서 사용한 비선형유한요소해석 프로그램(RCAHEST)에 대한 신뢰 수준을 통계학적인 추론방법으로부터 산정한다. 이를 위해, Fig. 5에 실험과 해석으로부터 얻은 극한강도 비(比)에 대한 상대도수분포와 평균 μ 와 표준편차 σ 에 의해 식 (1)과 같은 종형(Bell shape)의 확률밀도함수를 갖는 정규분포(Normal distribution)로 근사화시켜 나타내었다. 여기서, 확률밀도함수는 표준편차 0과 평균 1을 가지는 표준정규분포로 수정하였다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, -\infty < X < \infty \quad (1)$$

$$\left(\bar{X} - z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{X} + z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad (2)$$

위의 내용과 식 (2)을 바탕으로, 95% 신뢰수준에서

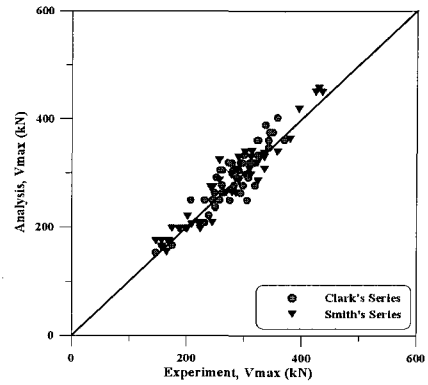


Fig. 3 Comparison of experimental and analytical ultimate shear strength

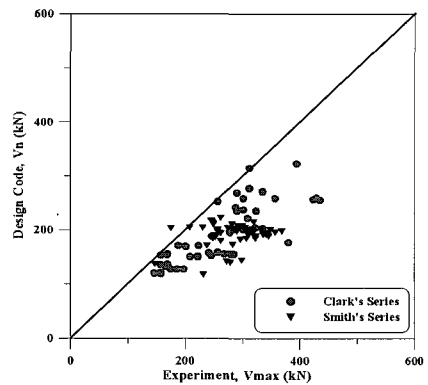


Fig. 4 Comparison of experimental and code ultimate shear strength

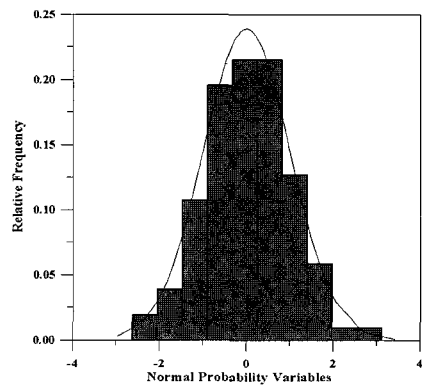


Fig. 5 Relative frequency diagram and probability density function

이 연구에서 사용한 비선형유한요소해석 프로그램(RCAHEST)에 대한 신뢰도를 산정한 결과, 실험과 해석으로부터의 결과가 일치하는 기준값 1에 대하여 $\pm 17.0\%$ 의 신뢰 수준을 산정할 수 있었다. 이는 균열 후의 복잡한 비선형성과 전단거동 특성을 나타내는 철근콘크리트 깊은 보의 극한강도가 비선형유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 통한 극한강도의 83.0% 보다 작은 확률이 2.5%미만이 된다는 것이다. 이렇게 산정한 감소계수 0.83을 Table 3의 해석 결과에 다시 적용한 상관관

계를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 비선형 유한요소해석으로부터의 극한강도에 감소계수 0.83을 적용한 경우, 실험 결과가 이보다 작을 확률이 약 2%이다. 이는 95%신뢰수준에서 산정한 비선형 유한요소해석 결과에 적용할 감소계수 0.83은 타당함을 알 수 있다. 하지만, 철근콘크리트 깊은 보에 대하여 보다 신뢰성 있는 내하력 평가를 수행하기 위해서는 해석 결과에 대한 추가적인 감소계수가 필요함을 알 수 있다.

4. 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수

4.1 신뢰도 지수

철근콘크리트 깊은 보의 신뢰성 있는 내하력 평가를 위해, 이 연구에서 적용한 비선형 유한요소해석으로부터의 결과에 추가적으로 적용할 감소계수를 신뢰성 해석을 통하여 산정한다. 신뢰도 지수 산정에는 식 (3)과 같은 일계 이차모멘트법(First-Order Second-Moment method)¹¹⁾을 적용하였다. 이는 정규분포 확률변수 X_i 의 평균과 표준편차가 각각 μ_i, σ_i 일 때, 확률변수 X_i 의 선형 합으로 정의되는 한계상태식으로 나타낼 수 있다.

$$g = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_n X_n \quad (3)$$

이러한 한계상태식 g 의 값을 새로운 확률변수 G 라고 하면, 확률변수 G 의 확률분포는 정규분포가 된다. 따라서 한계상태식 g 에 대한 파괴확률은 새롭게 정의된 정규분포 확률변수 G 가 0보다 작을 확률이므로 식 (4)과 같이 계산할 수 있다.

Table 3 Target reliability index in Euro Code

Very small	○				
Small	○				
Medium		○			
Large			○		
Very large				○	
Consequence probability	>0.1	>0.01	>0.001	>0.0001	>0.00001
Reliability index	1.282	2.326	3.090	3.719	4.270

Table 4 Calculation of the reliability index

Item	Standard deviation	Variation	Reliability index	Failure probability
1.50(concrete)	0.071	0.092	3.289	5.01×10^{-4}
1.15(reinforcement)	0.144	0.202	2.010	2.22×10^{-2}
ϕV_n	0.115	0.202	3.748	8.91×10^{-5}
$V_{ANALYSIS} \times 0.83 \times 0.80$	0.059	0.089	5.602	9.40×10^{-9}
$V_{ANALYSIS} \times 0.83 \times 0.85$	0.063	0.089	4.634	1.79×10^{-6}
$V_{ANALYSIS} \times 0.83 \times 0.90$	0.067	0.089	3.774	8.04×10^{-5}

$$P_f = P[G \leq 0] = \phi\left(\frac{0 - \mu_G}{\sigma_G}\right) = \phi\left(-\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right) \quad (4)$$

그리고 한계상태식의 표준편차에 대한 평균의 비인 μ_G/σ_G 을 신뢰도지수(Reliability index) β 라 정의하며, 파괴확률 P_f 는 식 (5)과 같다.

$$P_f = \phi(-\beta), \text{ where } \beta = M_G/\sigma_g \quad (5)$$

4.2 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수 산정

철근콘크리트 깊은 보의 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수를 Table 3에서와 같이 Euro Code에서 정의하고 있는 구조물의 중요도에 따른 목표 신뢰도 지수 기준을 바탕으로, 구조물의 중요도 Very Large에 해당하는 신뢰도 지수 이상을 확보할 수 있도록 하였다. 신뢰성 이론과 해석 결과를 바탕으로 신뢰성 해석을 수행한 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4에는 해석 결과에 추가적으로 적용할 수 있는 적절한, 합리적인 감소계수를 결정하기 위하여 콘크리트 구조설계기준과 Euro Code에서 적용하고 있는 철근과 콘크리트에 대한 부분안전계수 1.15와 1.5를 적용한

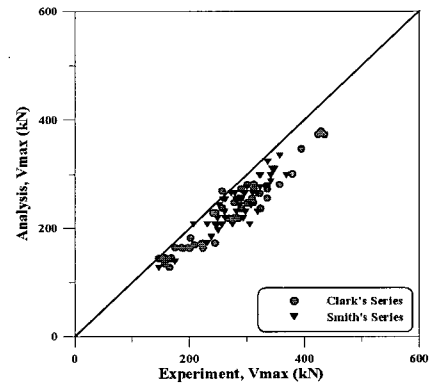


Fig. 6 The trust level($V_{ANALYSIS} \times 0.83$)

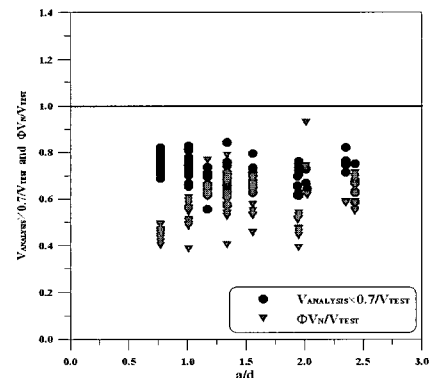


Fig. 7 Load-carrying assesment between analysis and code with respect to a/d

결과를 각각 비교하여 나타내었다. Table 4의 결과를 볼 때, 이 연구에서 적용한 비선형유한요소해석으로부터의 결과에 해석 프로그램(RCAHEST)에 대한 신뢰 수준 0.83과 추가적인 감소계수 0.85를 적용한 경우, 신뢰도 지수는 4.6 정도로서 목표 신뢰도 지수 3.72이상을 확보하고 있으며, 표준편차와 변동계수 또한 다른 결과에 비하여 그 신뢰도가 큼을 알 수 있다. 특히, 콘크리트 구조설계기준에 의한 극한강도에 대한 신뢰도 지수는 3.75정도로서, 목표 신뢰도를 만족하고 있으나, 그 결과에 대한 표준편차와 변동계수가 각각 11%와 20%로서, 결과에 대한 신뢰도가 비교적 작음을 알 수 있다. 따라서 철근콘크리트 깊은 보의 내하력 평가 시, 비선형유한요소해석 프로그램(RCAHEST)으로부터의 극한강도에 추가적인 감소계수 0.7($\approx 0.83 \times 0.85$)을 적용하여 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 Fig. 7에는 각 실험체의 전단지간비(a/d)에 따라 비선형 유한요소해석으로부터의 극한강도에 이 연구에서 산정한 감소계수 0.7을 적용한 경우와 콘크리트 구조설계기준에 의한 극한강도를 각각 실험 결과와 비교하여 나타내었다.

5. 결 론

이 연구에서는 균열 후의 구조 및 재료의 비선형성으로 인하여 복잡한 전단거동특성을 나타내는 철근콘크리트 깊은 보에 대하여 그 전단거동특성 및 전단강도를 해석적으로 평가하고, 이를 신뢰성 이론을 바탕으로 적절하고 합리적인 내하력 평가를 수행할 수 있는 방안을 제시하였다. 이에 대한 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 철근콘크리트 깊은 보의 전단거동특성 및 전단강도를 해석적으로 평가하기 위하여 이 연구에서 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 기존의 신뢰성 있는 실험체에 적용하여 그 타당성을 검증하였다.
- 2) 철근콘크리트 깊은 보의 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수를 Euro Code을 바탕으로 설정한 후, 이를 만족하도록 하는 새로운 감소계수 0.7을 신뢰성 해석을 통하여 산정하였다.
- 3) 이 연구에서 적용한 내하력 평가 방안을 Euro Code와 콘크리트 구조설계기준에 의한 결과와의 비교 및 분석을 통하여 그 타당성을 검증하였다.
- 4) 이러한 결과를 바탕으로 하여, 철근콘크리트 깊은 보에 대하여 합리적이고 경제적인 설계기준의 개발에 필요한 기초 자료를 제시하였다.

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단(KBRC)을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 이루어 졌으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김태훈, 이종우, 정영수, 신현목, “연속된 철근콘크리트 깊은 보의 전단거동에 관한 해석적 연구”, 대한토목학회논문집, 제24권, 제5A호, 2004, pp.1065~1072.
2. 이정운, “ACI 318-02 기준의 Strut-and-tie 모델 설계법을 이용한 깊은 보의 설계”, 콘크리트학회 논문집, Vol.15, No.6, 2003, pp.64~69.
3. 오병환, 신호상, 한승환, 이상민, 이태규, “교량 내하력 평가사례의 비교 고찰 및 분석”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, Vol.7, No.1, 1995, pp.391~395.
4. 이상철, “비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각 코핑부의 소요강도 기반 안전성 평가”, 박사학위논문, 성균관대학교, 2005.
5. 김태훈, “비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가”, 박사학위논문, 성균관대학교, 2003.
6. Kim, T. H., Lee, K. M., Yoon, C. Y., and Shin, H. M., “Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake. I: Theory and Formulation”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.129, No.9, 2003, pp.1199~1207.
7. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2 User Manual, Vol.2, 2000, pp. 16~112.
8. Clark, A. P., “Diagonal Tension in Reinforced Concrete Beams”, *ACI Journal*, Vol.23, No.2. 1951, pp.145~156.
9. Smith, K. N. and Vantsiotis, A. S., “Shear Strength of Deep Beams”, *ACI Journal*, Vol.21, No.6, 1982, pp.201~213.
10. 건설교통부, 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2003, pp.179~181.
11. Singiresu S. Rao, *Reliability-Based Desing*, McGraw-Hill, 1992, pp.189~262.

요 약

철근콘크리트 깊은 보(deep beam)는 균열 후의 구조 및 재료적 비선형성으로 인하여 아직까지 명확한 이론적인 해석 방법과 설계 방법이 정립되어 있지 않은 상태이다. 현재 내하력 평가는 주로 교량 상부 구조물에 대하여 수행되어 왔고, 그 평가 방법에 대한 적용성과 결과에 많은 불합리성을 포함하고 있다. 이 연구에서는 철근콘크리트 깊은 보의 복잡한 전단거동 특성 및 전단강도를 해석적으로 평가하고, 이를 신뢰성 이론을 바탕으로 적절하고 합리적인 내하력 평가를 수행할 수 있는 방안을 제공하는데 그 목적이 있다. 정확하고 올바른 평가를 하기 위하여 비선형유한요소해석 프로그램 RCAHEST를 사용하였다. 재료적 비선형성에 대해서는 균열콘크리트에 대한 인장, 압축, 전단모델과 콘크리트 속에 있는 철근모델을 조합하여 고려하였다. 이에 대한 콘크리트의 균열 모델로서는 분산균열모델을 사용하였다. 이 연구에서 제안한 해석 기법과 재료적 비선형성을 고려한 해석 모델을 신뢰성 있는 연구자의 실험 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 이러한 결과를 바탕으로, Euro Code기준으로부터 철근콘크리트 깊은 보의 파괴에 대한 목표신뢰도지수를 설정하였다. 신뢰성 해석을 통하여 파괴에 대한 목표신뢰도 지수를 만족하도록 하는 감소계수를 산정하였다. 이 연구에서 제안된 철근콘크리트 깊은 보의 내하력 평가 방안을 콘크리트 구조설계기준에 의한 평가 결과와의 비교 및 분석을 통하여 타당성을 검증하였다.

핵심용어 : 철근콘크리트 깊은 보, 비선형유한요소해석, 신뢰도 지수, 신뢰성 해석
