차량 충돌하중을 받는 RC 압축부재의 성능기반형 저항성능 평가방법 개발

김장호^{1)*} · 이나현¹⁾ · 판덕형¹⁾ · 김성배¹⁾ · 이강원²⁾

¹⁾연세대학교 사회환경시스템공학부 ²⁾한국가스공사 연구개발원

Development of Performance Based Resistance Capacity Evaluation Method for RC Compression Member under Vehicle Impact Load

Jang-Ho Jay Kim,¹⁾ Na-Hyun Yi,¹⁾ Duc-Hung Phan,¹⁾ Sung-Bae Kim,¹⁾ and Kang-Won Lee²⁾

¹⁾Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²⁾LNG Tank Technology Center, KOGAS RND Division, Incheon 406-130, Korea

ABSTRACT Recently, the probability of collision accident between vehicles or vessels and infrastructures are increasing at alarming rate. Particularly, collision impact load can be detrimental to sub-structures such as piers and columns. The damaged pier from an impact load of a vehicle or a vessel can lead to member damages, which make the member more vulnerable to impact load due to other accidents which. In extreme case, may cause structural collapse. Therefore, in this study, the vehicle impact load on concrete compression member was considered to assess the quantitative design resistance capacity to improve, the existing design method and to setup the new damage assessment method. The case study was carried out using the LS-DYNA, an explicit finite element analysis program. The parameters for the case study were cross-section variation of pier, impact load angle, permanent axial load and axial load ratio, concrete strength, longitudinal and lateral rebar ratios, and slenderness ratio. Using the analysis results, the performance based resistance capacity evaluation method for impact load using satisfaction curve was developed using Bayesian probabilistic method, which can be applied to reinforced concrete column design for impact loads.

Keyword : compression member, vehicle impact load, Bayesian probabilistic method, satisfaction curve, performance based resistance capacity evaluation method

1. 서 론

최근 도로 및 도로시설물 등의 사회기반시설물이 복잡해짐에 따라 차량과 시설물 간의 충돌사고가 발생할 확률이 높아지게 되었다. 특히 지난 9.11테러 이후 구조물에 일종의 충격하중을 야기시킬 수 있는 폭발사고, 구조물 붕괴사고 등의 증가로 인하여 사회기반시설물에 대한 시민들의 불안인식이 증가되고 있는 것을 알 수 있으며, 결과적으로 현재 도시의 사회기반시설물은 과거에 비해 훨씬 더 높은 충돌과 같은 사고의 발생 가능성에 노출되어 있는 상태라고 할 수 있다.¹⁻³⁾

한편, 국토해양부의 “2008년도 도로교량 및 터널 현황조사”에 의하면 전년대비 교량이 1,118개가 증가하여 총 24,923개(연장 2,289 km)로 예년과 달리 최근 전국의 교량계획 및 건설이 급증한 것을 볼 수 있다. 더불어 최근 모노레일과 같은 경전철에 대한 시공계획이 구체화되면

서 Fig. 1과 같이 도로 위를 지나가게 되는 고가도로가 증가될 것으로 판단된다. 이와같이, 교량구조물은 충돌사고에 가장 빈번하게 노출될 수 있는 시설물이기도 하며 동시에 그 중요도로 인하여 가장 보호되어야 할 주요 시설물이라고 할 수 있다.^{4,5)}

교량을 구성하는 상부구조와 하부구조 중에서 충돌에 의한 영향은 주로 교각 등의 하부구조가 받을 가능성이 크다. 교각에 차량 혹은 선박이 충돌하게 되면 교량 하부구조에 국부적인 손상을 유발하게 되며, 이는 마치 지진과 같은 동적하중에 의하여 발생하는 손상이 아주 좁은 범위에 걸쳐 집중화되는 효과와 유사하다고 할 수 있다. 그러나 지진과는 달리 차량에 의한 충돌사고는 훨씬 더 순간적이고 강한 물리적인 질량의 충돌을 동반할 수 있으며, 극단적인 경우에는 Fig. 2와 같이 상부구조의 붕괴까지 유발할 수 있기 때문에 설계 시 추가적인 영향인자들이 고려되어야 한다.⁶⁻⁸⁾

현재 교량의 교각에 대한 설계 시 차량이나 선박의 충돌을 고려하기 위해 동적 하중을 정적으로 환산하여 고려하고 있으며, 이로 인해 충돌에 의한 순간적인 충격효과(impact effect)가 충분히 반영되지 못하고 있다. 또한,

*Corresponding author E-mail: jjhkim@yonsei.ac.kr

Received February 3, 2010, Revised March 31, 2010,

Accepted April 6, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

Fig. 1 Overpass bridges in downtown area

Fig. 2 Collapsed bridges by vehicle collision (NDOR)

충돌사고 후 충돌에 의해 발생한 구조물의 손상을 정량적으로 판단하여 이에 적합한 보수 및 보강을 수행해야 하지만, 현재까지 충돌에 의한 손상을 고려한 합리적인 보수 및 보강이 이루어지지 않고 있는 실정이다.^{9,10)}

그러므로 콘크리트 구조물인 교량의 교각에 대한 설계 시 차량 등에 의한 충돌을 고려하고, 충격하중에 의한 구조물의 저항을 정량적으로 평가하기 위해서는 기존의 설계방법을 개선하고 새로운 손상평가 방법을 정립해야 한다. 이에 이 연구에서는 설정한 가상의 시나리오에 따른 콘크리트 교각의 거동분석을 위해 LS-DYNA를 사용하여 충격하중을 받는 콘크리트 압축부재의 정밀한 해석을 수행하였다. 해석결과를 바탕으로 하여 확률론적 이론에 근거한 콘크리트 압축부재의 손상평가방법을 교량의 교각구조물에 적용하였고, 지진하중에 대한 구조물의 평가방법인 손상도 곡선(fragility curve)을 이용하여 재료 및 설계 특성을 고려한 만족도 곡선(satisfaction curve)을 작성하여 충돌하중을 받는 교량의 교각구조물의 성능기반형 저항성능 평가기법을 확립하고자 한다. 이 연구로부터 예상되는 연구 결과는 향후 선박 충돌이 예상되는 콘크리트 구조물, 고속도로의 콘크리트 중앙분리대, 홍수 시 부유물의 충돌이 예상되는 교량의 하부구조 등의 인제 및 자연재해에 의한 각종 충격하중을 받을 수 있는 각종 콘크리트 교각의 설계 및 보수보강을 위한 설계저항 평가에 적용될 수 있을 것이다.

2. 배경 이론

현재, 전 세계적으로 충격하중을 받는 콘크리트 구조물의 거동에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 충격하중의 특성상 실험적인 연구는 많이 수행되지 못하고 있는 실정이다. 또한, 아직까지 충격하중에 대한 정밀 계측 시스템이 구축되어 있지 않기 때문에 실험을 통해서도 충격하중을 받는 구조물의 거동을 세밀하고 정확하게 파악하기는 어려운 상황이다. 그러므로 정밀한 해석적 접근을 통해 충격하중을 받는 구조물의 거동을 파악하고 이를 구조물의 설계 및 설계저항 평가에 반영하여, 많은 비용의

소모 및 계측이 어려운 실험 충격실험을 대신함으로써 기존의 단순해석에 비해 높은 정확도를 확보할 수 있다. 특히, 폭발하중과 같이 짧은 시간에 구조물의 큰 변형을 변화를 일으키게 하는 경우, 변형률 속도에 따른 강도증가 현상을 고려해주어야 한다. 변형률 속도에 따른 콘크리트의 강도증가현상의 원인으로는 Nemat-Nasser와 Deng¹³⁾은 미세균열의 동적 진전과 관계있다고 하였으며, Ross 등¹⁴⁾은 콘크리트 내에 있는 수분과 밀접한 관계가 있다고 하였다. 한편 Li and Meng,¹⁵⁾ Cotsovos and Pavlovic,¹⁶⁾ Georgin and Reynouard,¹⁷⁾ Malvar 등,¹⁹⁾ Bischoff and Perry¹⁸⁾ 등은 관성력에 의한 구속효과로 파악할 수 있다고 하였다. 그러므로, 이 연구에서는 기존 연구 결과들을 바탕으로 하여 콘크리트와 철근의 변형률 증대효과를 반영한 modified concrete damage model과 piecewise linear plasticity model의 재료모델을 각각 적용하였으며, 이 연구에서 사용된 재료모델은 Nam 등,^{3,9,10)} 김호진 등^{11,12)}에 의한 해석 및 실험 결과와의 비교를 통해 전체적으로 검토되었다.

2.1 충격하중 속도를 반영하는 콘크리트 부재의 파괴 규정

충격하중에 대한 콘크리트 구조물의 응답은 구조요소의 중요성, 파괴 모드, 그리고 사용한 해석과정 등에 따라 분류할 수 있다. 일반적으로 보와 슬래브는 같은 파괴 모드를 갖고, 슬래브와 벽체는 유사한 하중형태를 가진다. 즉, 교각과 벽체의 경우에는 P- Δ 효과 때문에 파괴 성향이 증가되지만 보나 슬래브에 비해 비교적 큰 전단 강도를 가지게 된다.²¹⁾ 특히 국지적인 파괴 성향은 충격물의 근접 정도와 구조물의 강도 및 강성에 영향을 받으며, 충격하중과 같이 탄성한계를 넘어설 수 있는 강한 동적하중을 받을 경우 콘크리트 구조물의 변위량은 휨변위량 뿐 만 아니라 전단변위량 및 부재 연결부에서의 지점(고정단) 회전량에 의해 지배될 수 있다. 더불어 충격하중을 받는 부재는 응력보다는 최대 변형에 기초하여 평가된다. 따라서, 손상정도에 따른 연성비 및 지점회전량으로 구조물의 응답한계 기준을 정리하면 Table 1과 Table 2와 같다.^{20,21)}

2.2 구조물의 저항성능 평가 및 성능기반형 성능평가 방법

성능평가형 저항성능 평가는 설계자가 요구하는 성능에 적합한 설계, 시공을 위하여 여러 방법을 통해 목적하는 바를 달성하고, 그 성능을 검증하는 체계로 Euro Code, Asian Concrete Model Code 등과 같은 디자인 코드에도 포함되어 있는 개념이다. 이 설계기법은 안전성의 척도를 구조물의 파괴될 확률 또는 신뢰성 이론에 의해 구조물이 파괴되지 않을 확률로 나타내는 설계법으로써, 구조물이 한계 상태에 도달하여 파괴가 일어나기 전까지의 연성적인 거동을 고려한 설계법이다.²²⁾

충격하중을 받는 콘크리트 구조물의 설계저항 평가를 위해 Shinozuka²³⁾ 등에 의한 손상도(fragility)개념을 도입하

Table 1 Failure criteria for RC members (ASCE, 1999)

Element type	Material properties	Failure type	Criteria	Damage		
				Light	Moderate	Severe
Beam	Reinforced concrete ($\rho > 0.5\%$ /face)	Global bending/Membrane response	δ / L	4%	8%	15%
		Shear	γ_v	1%	2%	3%
Slab		Bending / Membrane	δ / L	4%	8%	15%
		Shear	γ_v	1%	2%	3%
Column		Compression	$\Delta L / L$	1%	2%	4%
Load - bearing wall		Compression	$\Delta L / L$	1%	2%	4%
Shear wall		Shear	γ_v	1%	2%	3%

* δ/L : Ratios of center line deflection to span

γ_v : Average shear strain across section

$\Delta L/L$: Ratios of shortening to height

Table 2 Response criteria for RC members (ASCE,1997)

Element type	Controlling stress	μ	Support rotation, θ		
			Low	Medium	High
Beams	Flexure	N/A			
	Shear:				
	Concrete only	1.3	1	2	4
	Concrete + stirrups	1.6			
	Stirrups only	3.0			
	Compression	1.3			
Slabs	Flexure	N/A			
	Shear:				
	Concrete only	1.3	2	4	8
	Concrete + stirrups	1.6			
	Stirrups only	3.0			
	Compression	1.3			
Beam-columns	Flexure:				
	Compression (C)	1.3	1	2	4
	Tension (T)	(3)			
	Between C&T	10.0			
	Shear	1.3			
Shear walls, diaphragms	Flexure	3	1	1.5	2
	Shear	1.5			

*Ductility ratio, $\mu = 0.05(p - p') < 10$

여, 구조물의 재료 및 설계특성을 고려한 만족도 곡선 (satisfaction curve)을 작성하였다. 작용하는 외력의 크기에 따라 구조물의 취약성을 평가하는 손상도 이론에 비하여, 만족도 곡선은 구조물의 Bayesian 접근방법에 의해 구조물의 재료나 설계특성을 매개변수로 하여 구조물의 일정 기준 상태에 대한 만족여부를 판단하여 구조물의 저항성능을 확률분포로 나타낸 것이다.²³⁾ 따라서 불확실성의 통계적 접근에 바탕을 둔 성능기반형 성능평가기법에 적합한 방법이다. 이와 같은 만족도 곡선에 의한 Bayesian 성능기반설계의 단계를 간략하게 요약해 보면 Table 3과 같으며, 이러한 개념을 바탕으로 하여 충격하중을 받는 콘크리트 교각구조물의 성능을 평가하도록 한다.

3. 충격하중을 받는 콘크리트 교각구조물의 해석기법

실질적으로 차량에 관한 충격실험은 많았으나, 차량 충격에 따른 콘크리트 교각구조물의 거동분석에 대한 실험적 연구는 국내외적으로 미비하다. 그러므로 이 연구에

Table 3 Performance based resistance capacity evaluation procedure

Step	Description
1	Setup of the criteria for the parameter in consideration as “O” and “I” for fail and safe, respectively
2	Selection of the parameter for x-axis of satisfaction curve
3	Virtual data generation using lognormal, normal, etc for the limited number of current data
4	Classification of damage level as critical, major, normal and minimal
5	Determination of fail/safe status of each data point and development of satisfaction curve
6	Summation of various combination of satisfaction curves into a single satisfaction curve for observation of overall trend as total satisfaction curve = Σ (single parameter satisfaction curve)
7	Verification of precision of developed satisfaction curve using chi-square distribution method

서는 설정한 가상 시나리오에 따른 콘크리트 교각의 거동분석을 동적유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA로 수행하였다. LS-DYNA을 1976년 저속 충돌문제를 해석하기 위해 John O. H.에 의해 개발되었으며, 주로 폭발, 비선형 충돌, acoustic, 열, 유체 등의 광범위한 해석분야에 사용되고 있다. 이 연구에서는 LS-DYNA를 이용하여, 변형률 속도의존적인 콘크리트 재료모델로 충격하중을 받는 콘크리트 교각의 정밀 해석을 수행하였다.^{11-12,24)}

3.1 교각 단면의 설정

이 연구에서 사용된 철근 콘크리트 교각은 수도권 내의 고가도로 교각과 유사한 단면을 사용하기 위하여 경기도 가평군의 국도 상에 위치한 창촌교를 대상모델 교량으로 삼았다. 대상 교량은 8경간 연속 슬래브교로서 각 교각들은 π 형 원형 교각이며, 교각 중 Fig. 3과 같은 P4를 대상 교각으로 하였다.²⁵⁾

대상 교각 P4중 교각 높이가 3,300 mm인 것을 선택하였으며 Table 4와 같은 해석 형상과 제원을 사용하였다. 또한 유한요소모델과 경계조건은 Fig. 4와 같다. 이 연구에서는 충격하중을 받는 교각의 극한의 경우를 고려하기 위하여, 기초 및 지반부분의 상호작용을 무시하여 교각의 하부를 강결하였으며, 상부는 자유단의 조건을 주어,

Fig. 3 Detail drawing of targeted column

캔틸레버보와 같이 해석하였다. 즉, 이 연구에서는 실제 차량에 의한 충격하중을 받는 콘크리트 교각의 극한 재해시나리오를 구성하기 위하여 기초 및 소성힌지 부분을 제외한 교각부분만을 모델링하여 해석을 수행하였다.

3.2 차량모델의 설정

교각에 충격하중을 가해줄 수 있는 실제 차량 모델 중에서 극한 충격 하중을 나타내기 위하여 Fig. 5와 같이 8톤 트럭을 차량모델로 선정하였다. 이와 같이 국내외에서 많이 사용되는 트럭 차량모델은 미국 차량 충돌 연구 센터인 NCAC (National Crash Analysis Center)에서 제공 받았으며, Table 5에서 보는 것과 같이 트럭 몸체와 내부 부품은 19,479개의 쉘 요소(shell element)와 1,248개의 솔리드 요소로 각각 구성하였다. 차량의 모든 모델들은 실제 차량과 동일하게 모델링 하였으며, 엔진 및 변속기와 같은 부품은 탄성재료로, 서로 다른 부품들을 연

Table 4 Analysis geometry of targeted pier section

Classification	Circular section	Rectangular section
Section size (mm)	D = 1,200	1,200 × 1,200
Height (mm)	3,300	3,300
Main rebar dia. (mm)	D25(25.4) @36	D25(25.4) @36
Main rebar ratio	0.0161	0.0127
Main rebar spacing (mm)	86.47	111.11
Lateral tie dia. (mm)	D13(12.7)	D13(12.7)
Lateral tie spacing (mm)	300	300
f_{ck} (MPa)	24	24
f_y (MPa)	300	300

Fig. 4 Finite element models and boundary conditions

결해주는 부분은 강체로, 차량 몸체와 같이 비탄성 부품들은 속도의존적인 등방성 탄소성재료로 모델링 하였다.^{5,24,26)} 여기서 차량의 충격속도는 국토해양부에서 규정한 설계속도 중 고속도로의 최대설계속도인 120 km/h와 최저설계속도 80 km/h의 평균속도인 100 km/h로 설정하였다.

짧은 시간에 큰 변형이 발생 가능한 충격문제에서는 충격차량과 교각의 충격면에서의 적합한 경계면 처리가 필요하다. 이 연구에는 접촉 알고리즘(contact algorithm)을 이용하여, automatic contact surface to surface를 사용하여 콘크리트 교각과 충격차량의 경계면을 구성하였다.

3.3 해석조건

충격하중을 받는 콘크리트 교각의 거동분석을 바탕으로 설계저항 평가 및 성능 기반형 설계를 하기 위한 데이터를 형성하기 위하여 해석조건 및 변수는 Table 6과 같이 고려하였다.

3.3.1 교각 단면

최근 들어, 세굴 방지 및 단면 형상의 효율성 등에 의해 원형단면의 교각 설계가 점점 증가하고 있다. 그러나 기존의 교량 및 육교(overpass bridge)에서는 사각단면의 교각이 많으므로, 앞서 선정한 평촌교의 원형단면의 교각뿐만 아니라, 동일한 직경을 가지는 사각단면 또한 고려하였다.

3.3.2 차량의 충돌각에 따른 충격도

현재 차량방호 안전시설에 대한 성능은 등급에 따른 충격도를 실물차량 실험을 통해 평가하고 있다.²⁷⁾ 여기서 충격도(IS: index of severity)는 차량 충돌시 발생하는 운동에너지로 Fig. 6과 식 (1)과 같은 충돌 조건에 따라 발생하게 된다.

Fig. 5 Finite element model of truck

Table 5 Characteristic of truck FEM model

Classification		Truck model
Number of element	Shell	19,479
	Solid	1,248
	Beam	124
Weight of car (kN)		80
Yield stress (MPa)		270
Elastic modulus (MPa)		205,000
Impact velocity of car (km/h)		100
Car geometry (B × H × L, mm)		2,400 × 3,200 × 8,500

Table 6 Analysis conditions of circular and rectangular sections

Case	D (mm)	L (mm)	AR ¹⁾	f _{ck} (MPa)	Impact angle (°)	IS ²⁾ (kJ)	Axial force (kN)	Axial force ratio	Longitudinal steel		Confining steel			$\frac{\rho_l}{\rho_s}$	k	$\frac{kl}{r}$
									Size	ρ_l (%)	Size	ρ_s (%)	Space (mm)			
Control	1,200	3,300	2.75	24	90	3,086	1,868	0.0686 (0.0539) ³⁾	36-D25	1.613 (1.27)	D13	0.178	300	9.06 (7.135)	2	22 (18.3)
AVC30	1,200	3,300	2.75	24	30	771.6	1,868	0.0686	36-D25	1.613	D13	0.534 0.178 0.107	100 300 500	3.03(2.378) 9.06(7.135) 15.07(11.87)	2	22 (18.3)
AVC45					45	1,543.2										
AVC60					60	2,314.8										
AVC75					75	2,879.7										
AVC90					90	3,086										
ARS30-R	1,200	3,300	2.75	24	30	771.6	1,868	0.0539	36-D25	1.27	D13	0.534 0.178 0.107	100 300 500	2.378 7.135 11.87	2	18.3
ARS45-R					45	1,543.2										
ARS60-R					60	2,314.8										
ARS90-R					90	3,086										
UAL18-CS18	1,200	3,300	2.75	18	90	3,086	1,868	0.0915 (0.0719) 0.0686 (0.0539) 0.0588 (0.0462) 0.0515 (0.0404)	36-D25	1.613 (1.27)	D13	0.534 0.267 0.178 0.133 0.107	100 200 300 400 500	3.03(2.378) 6.04(4.756) 9.06(7.135) 12.13(9.549) 15.07(11.87)	2	22 (18.3)
UAL18-CS24				24												
UAL18-CS28				28												
UAL18-CS32				32												
UALR68-CS18	1,200	3,300	2.75	18	90	3,086	1,397 (1,778) 1,863 (2,371) 2,172 (2,766) 2,483 (3,161)	0.0686	36-D25	1.613 (1.27)	D13	0.534 0.267 0.178 0.133 0.107	100 200 300 400 500	3.03(2.378) 6.04(4.756) 9.06(7.135) 12.13(9.549) 15.07(11.87)	2	22 (18.3)
UALR68-CS24				24												
UALR68-CS28				28												
UALR68-CS32				32												
VLS44-US	1,200	3,300	2.75	18	90	3,086	1,868	0.0686 (0.0539)	36-D44.4	4.937	D13	0.545	100	9.06 (7.135)	2	22 (18.3)
VLS31-US				24					36-D31.2	2.433		0.2685	200			
VLS25-US				28					36-D25.0	1.613		0.178	300			
VLS22-US				32					36-D22.0	1.204		0.1329	400			
VLS19-US				32					36-D19.6	0.961		0.106	500			
VCS07-US	1,200	3,300	2.75	18	90	3,086	1,868	0.0686 (0.0539)	36-D25	1.613 (1.27)	D13	D7.37	100	9.06 (7.135)	2	22 (18.3)
VCS10-US				24								D10.4	200			
VCS13-US				28								D13	300			
VCS14-US				32								D14.6	400			
VCS16-US				32								D16.3	500			
L1650-SR11-C	1,200	1,650	1.38	18	90	3,086	1,868	0.0915 0.0686 (0.0539) 0.0588 0.0515	36-D25	1.613	D13	0.534 0.178 0.107	100 300 500	3.03 9.06 15.07	2	11
L2700-SR18-C		2,700	2.25													18
L3300-SR22-C		3,300	2.75													22
L3750-SR25-C		3,750	3.125													25
L4500-SR30-C		4,500	3.75													30
L6000-SR40-C		6,000	5													40
CEL05-SR55	1,200	3,300	2.75	18 24 28 32	90	3,086	1,868	0.0915 (0.0719) 0.0686 (0.0539) 0.0588 (0.0462) 0.0515 (0.0404)	36-D25	1.613 (1.27)	D13	0.534 0.178 0.107	100 300 500	3.03(2.378) 9.06(7.135) 15.07(11.87)	0.5	5.5 (4.58)
CEL07-SR77															0.7	7.7 (6.42)
CEL10-SR11															1.0	11 (9.17)
CEL20-SR22															2.0	22 (18.3)

¹⁾ AR : Aspect ratio, L/D, ²⁾ IS : Index of Severity, ³⁾ () : In case of rectangular section

AVC : variation of the vehicle collision angular to pier

ARS-R : variation of the rectangular section angular to pier center line (Just for rectangular section pier)

UAL(R)-CS : variation of uniform axial load (ratio) to compressive strength

VLS-US : variation of longitudinal steel section to uniform stirrup spacing

VCS-US : variation of confining steel section to uniform stirrup spacing

L-SR-C : slenderness ratio and aspect ratio as to length (Just for circular section pier)

CEL-SR : slenderness ratio as to variation the effective length coefficient

$$IS = \frac{1}{2} m \left(\frac{V}{3.6} \sin \theta \right)^2 \quad (1)$$

여기서 IS는 충격도(kJ), m은 충돌차량의 중량(tonf), V는 충돌속도(km/h), θ 는 구조물과 차량의 충돌각(°)을 의미한다.

실제 차량과 구조물간의 사고에서 차량이 구조물에 정면으로 돌진하는 경우에 비해 차량의 충돌각을 가지고

구조물에 충격하중을 가하는 경우가 많다. 이 연구에서는 교각에 차량이 정면으로 충돌하는 경우(충돌각 90°)에 대하여 기본적인 해석을 수행하였으며, 충돌각의 변화에 따른 교각의 거동은 각 단면별로 교각에 대한 차량의 진행방향 각을 변경(Fig. 7(a))하며 해석하였다. 더불어 사각단면 교각의 경우에는 차량 정면과 교각과의 충돌각에 따른 교각구조물의 거동의 변화를 측정하기 위

하여 추가적으로 Fig. 7(b)와 같이 충돌각을 변화하며 사각단면에서의 위험도를 평가하였다.

3.3.3 축력(axial force)과 축력비(axial force ratio)

교각과 같이 축방향 압축을 받는 부재의 경우 축방향 압축력에 의한 휨모멘트를 동시에 받게 된다. 특히, 충격하중을 받는 압축부재의 경우는 축력과 띠철근 및 나선철근의 간격과 압축강도에 따라 거동차이가 나타날 것이라고 판단하여, 식 (2) 및 기존 연구 결과²⁸⁾을 만족하도록 축력을 $P = 1,868 \text{ kN}$ 으로 두어 각 콘크리트 강도를 원형 및 사각단면별로 해석을 수행하였다.

$$\text{Axial force ratio: } \frac{P}{A_g f_{ck}} \geq 0.1 \sim 0.05 \quad (2)$$

Table 6 UAL-CS의 해석조건과 같이, 축력을 일정하게 유지하여 콘크리트 강도를 변화시켜 해석한 경우에는 축력비가 계속 변화하는 것을 알 수 있다. 그러므로 기존 단면인 창촌교의 원형단면 제원과 설정한 압축력 $P = 1,868 \text{ kN}$ 에 의해 계산된 축력비 0.0686 을 일정하게 두어 각 시험체별로 가해지는 압축력을 변화해 가며 해석을 추가적으로 수행하였다(Table 6의 UALR-CS).

3.3.4 콘크리트 강도에 따른 교각구조물의 거동

주철근의 좌굴방지를 위해 조립되는 띠철근은 축하중을 받는 콘크리트 교각의 구속효과를 증가시킨다. 이와 같은 현상은 횡구속 효과(confining effect)라고 하며 횡방향 철근의 단면적 이외에도 횡방향 철근의 간격이 좁아질수록 교각의 연성은 더욱 증가한다. 아래 식 (3),(4)와 같이 횡방향 철근에 의한 교각 심부 콘크리트의 압축강도 증가는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_c^* - 0.85f_{cu} = 4.0f_c' \quad (3)$$

$$f_c' = \frac{2A_{sp}f_y}{d_c s} \quad (4)$$

여기서 f_c^* 는 횡방향 철근에 의해 횡구속을 받는 심부 콘크리트의 압축강도이며, f_{cu} 는 횡구속 받지 않은 콘크리트의 압축강도, f_c' 는 횡방향 철근에 의해 심부 콘크리트에 가해지는 횡구속 응력, A_{sp} 는 횡방향 철근의 단면적, d_c 는 교각 심부의 직경, s 는 횡방향철근의 간격을 나타낸다.

이와 같이 횡방향 철근에 의해 횡구속을 받는 콘크리

Fig. 6 Index of severity based on car impact angle

Fig. 7 Impact angle between car and structure

트의 압축강도는 콘크리트 압축강도의 증가와 더불어 횡방향 철근에 따른 횡구속 효과에 의해 영향을 받는다. 그러므로 이 연구에서는 콘크리트의 압축강도를 18 MPa , 24 MPa , 28 MPa , 32 MPa 으로 나눠 압축강도에 의한 횡구속 효과의 상관관계를 통한 저항성능을 평가하고자 한다.

3.3.5 종방향 철근비와 횡방향 철근비에 따른 교각의 거동

충격하중을 받는 콘크리트의 교각의 거동은 종방향 철근 및 횡방향 철근에 의한 구속효과에 연관성이 있다. 이 연구에서는 Table 6의 VLS(VCS)-US와 같이 종방향 철근비에 대한 횡방향 철근비를 해석 모델인 창촌교의 철근비로 고정하여 종방향 철근비 및 횡방향 철근비를 변화시켜 각 단면별 및 횡방향 철근의 간격 별로 해석을 수행하였다. 여기서 횡방향 철근비 및 종방향 철근비는 횡방향 철근의 단면적을 변화시킴으로써 철근비에 따른 충격하중을 받는 콘크리트 교각의 거동을 확인하고자 한다.

3.3.6 교각의 높이변화 및 구속조건에 따른 세장비의 변화

일반적인 경우의 교각의 설계에서는 장주의 경우가 많기 때문에 세장에 대한 영향을 고려해야 한다. 횡방향 상대변위가 있는 압축부재라고 고려하면 다음과 같이 식 (5)와 같은 경우에는 단주로 볼 수 있다.

$$\frac{kl}{r} < 22 \quad (5)$$

여기서 k 는 교각의 유효길이 계수, l 은 교각의 비지지 길이를 의미하며, r 은 단면의 회전반경으로 $\sqrt{I/A}$ 와 같다. 그러므로 이 연구에서는 교각의 높이를 변경시켜 세장비 변화에 따른 콘크리트 교각의 거동을 원형단면과 사각단면에 대하여 각각 살펴 보고자한다. 변화시킨 교각의 길이는 $1,650 \text{ mm}$, $2,700 \text{ mm}$, $3,750 \text{ mm}$, $4,500 \text{ mm}$, $6,000 \text{ mm}$ 으로 변화시켰으며, 경계조건의 변화를 통하여 교각의 유효길이 계수값인 k 를 0.5 , 0.7 , 1.0 , 2.0 와 같이 변화시켰다.

4. 충격하중을 받는 교각의 해석 결과 및 성능기반을 바탕으로 한 저항성능 평가

4.1 기본 단면의 해석 결과

창촌교의 스트럿 간격과 콘크리트 강도는 각각 300 mm ,

24 MPa이며, 이에 대한 원형단면과 사각형 단면의 시간에 따른 해석 결과를 살펴보면 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 사각단면에 비하여 원형단면이 비교적 더 많은 손상을 받는 것을 확인할 수 있다. 이는 원형단면에 비하여 사각단면의 순단면적이 1.27배가 더 크기 때문이라고 판단된다. 동일한 순단면 및 단면 2차모멘트에 대하여 normalized된 최대 처짐의 경우에도 사각단면에 비해 원형 단면에서 1.42, 1.46배 크게 발생한 것을 확인하였다. 또한 최대처짐 발생지점의 시간이력곡선(Fig. 9)에서 알 수 있듯이 충격하중이 순간적으로 가해지면서 처짐이 발생하였으며, 차량의 속도에 의해 충격하중이 지속적으로 가해지면서 최대처짐 뿐 만 아니라 일정 잔류변형이 발생하였다.

교각 높이에서 발생하는 각각의 최대처짐을 Fig. 10과 같이 나타내보면, 원형단면의 경우, 충격하중이 가해지는 트럭의 높이인 1,500 mm 정도에서 100 mm 이상의 최대처짐이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 ASCE²¹⁾에서 규정하고 있는 moderate 이상의 손상이 발생한 것으로 볼 수 있다.

원형교각에 발생하는 von-Mises stress분포는 Fig. 11과 같으며, 차량충돌시($t=0$)를 제외하면 가장 큰 회전각은 Fig. 11(c)와 같이 지면부분에서 큰 응력과 함께 손상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이 부분은 소성힌지와 같이 거동하는 부분이므로 이와 같이 집중 응력을 받는 부분에 대한 보강이 필요하다고 판단된다.

4.2 해석 결과의 정확도 판단

이 연구의 해석 결과에 대한 정확도는 Zaouk 등²⁹⁾이 제시한 것과 같이, 수행된 해석에 대한 에너지의 손실량을 확인함으로써 정확도를 평가 할 수 있다. 이는 에너지 보존법칙에 의하여 차량의 모든 운동에너지는 잔류 운동에너지(residual kinetic energy), 마찰에 의한 손실, 변형된 차량과 교각 내부에너지와 유한요소해석시간의 효율성을 위해 사용되는 hourglass mode에 의해 발생하는 에너지의 총합과 같다.

충돌모사에 있어서 운동에너지와 내부에너지의 상관관계는 중요하며, 이러한 모사에 있어서 유한요소모델의 강성행렬(stiffness matrix)을 구하기 위한 형상함수(shape function)의 수치적분이 필요하며, 이 연구에서는 reduced Gaussian 적분법을 사용하였다. 그러나 이 경우, 적분계산 시간이 줄어드는 대신 변형에너지가 없어도 변형이 발생하는 문제점이 발생하며, 이를 hourglass (spurious zero energy) mode라고 한다. 이러한 모드의 발생을 억제하기 위해 가상의 에너지를 적용하게 되는데 이 때 사용되는 에너지를 hourglass 에너지라고 한다. 충돌모사에 있어서 내부에너지의 계산은 변형에너지와 이 hourglass 에너지의 합으로 계산되므로 비정상적인 충돌 모사인 경우 내부에너지는 발생한 hourglass 에너지만큼 과도하게 증가하게 된다. 따라서 총에너지의 과도한 증가가 발생하면, 충돌해석 결과의 정확성이 떨어진다고 판단할 수 있다. Zaouk²⁹⁾와

Fig. 8 Behavior of impacted concrete column

Fig. 9 Sectional displacement-time history at a center point

Sherif⁶⁾에 의한 연구에 의하면, 총에너지에 대한 hourglass 에너지가 적게 발생하였다면 해석결과의 신뢰도가 높으며, 동일한 차량에 대하여 총에너지의 17%의 hourglass 에너지가 발생하여 적절한 해석을 수행하였다고 판단하고 있다. 이 연구의 해석모델에서는 Fig. 12과 같이 과도한 변형에 의해 발생한 hourglass 에너지는 총에너지의 15.2%이며, 차량모델이 교각에 충돌하면서 과도한 변형으로 인해 발생한 hourglass 에너지가 최대 $4.3 \times 10^8 (\text{g} \cdot \text{mm}^2/\text{msec}^2)$ 이며, 실제 교각구조물에 발생한 hourglass 에너지는 $3.384 \times 10^7 (\text{g} \cdot \text{mm}^2/\text{msec}^2)$ 로 차량의 hourglass 에너지에 비해 10배 이하로 미비하다. 그러므로, 이 연구는 기존 연구들을 통해 적절한 충돌 해석이 수행되었다고 판단할 수 있다.

Fig. 10 Maximum displacement distribution of column height

Fig. 11 Distribution of von mises stress on circular column

4.3 해석조건에 따른 해석 결과

충격하중을 받는 철근콘크리트 교각의 해석조건 및 변수에 따라 해석을 수행한 결과를 정리하면 Table 7과 같다.

4.3.1 충돌각 변화에 따른 교각구조물의 거동

Table 7의 AVC를 보면, 충돌각에 따른 교각의 최대 처짐과 지점회전각은 횡방향 철근의 간격이 늘어날수록 즉, 횡방향 철근비가 감소할수록 최대처짐 및 지점회전각은 대략 1.4~1.9배 증가하며, 충돌각이 증가할수록 원형단면의 최대처짐 및 지점회전각은 77~160배 증가하는 등 큰 변형이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 사각단면의 경우에는 손상정도가 4.9~14.7배 증가하며, 동시에 충돌각이 60°일 경우, 충돌하는 트럭과 교각의 접촉면이 증가하여, 큰 변형이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. ARS-R의 해석 결과에서 알 수 있듯이 차량정면을 중심으로 하여 교각의 각도를 변경한 경우에는 충돌각이 줄어들수록 최대 처짐 및 지점회전각이 1.7~2.01배 증가하였다. 충돌각에 따라 국토해양부에서 제안한 충격도를 계산하면, 충격도가 작아짐에 따라 큰 변형이 발생된다. 즉, 이 연구의 해석 결과와 상이한 충격도 계산값을 통해 차량방호 안전시설의 등급을 충돌각에 따라 충격도를 산정하는 방법이 교각의 경우에 동일하게 적용할 수 없음을 확인하였다. 특히 사각단면의 교각의 경우에는 차량정면과 교각의 각도가 줄어들수록 처짐이 증가하였는데, 이는 각도가 감소됨에 따라 교각과 가장 큰 충격하중이 발생하는 차

량정면부분의 충격면적이 증가하기 때문이다. 그러므로, 교각에 대한 충격도는 구조물에 대한 차량단면과의 충격면적에 대해서도 고려되어야 한다고 판단된다.

4.3.2 축력과 축력비에 따른 교각구조물의 거동

해석조건에서 제시한 바와 같이 축력비의 변화에 따른 구조물의 거동을 확인하기 위하여 콘크리트 압축강도를 달리하여 동일한 축력에 대한 축력비의 변화를 유도하였고, 횡방향 철근의 간격을 넓혀가며, 즉 횡철근비를 줄여가며 충격하중을 받는 교각의 거동을 살펴보았다. UAL-CS 해석 결과에서 알 수 있듯이 횡철근비가 감소할수록 큰 손상을 받지만, 축력비가 증감(압축강도의 증감)에 대한 교각의 거동은 불규칙적으로 발생된 것을 확인할 수 있었다. 이는 콘크리트 강도가 증가함에 따라 축력비가 감소하기 때문에 큰 손상을 받을 수도 있으며, 적절한 횡방향 철근의 간격과 콘크리트 강도의 영향으로 횡방향 구속효과가 발생할 경우에는 상대적으로 교각의 손상이 적게 발생할 수 있기 때문이다. 이와 같은 해석 결과는 UALR-CS의 경우에도 비슷한 결과를 나타내었다. 즉, 압축강도의 증가 및 축력의 증가가 교각에 적은 손상을 가하는 것이 아니며, 두 변수의 상관관계를 통해 적절한 설계가 이루어져야 할 것이다.

4.3.3 종 · 횡방향 철근에 따른 교각구조물의 거동

각 단면별로 주철근비의 단면적 및 횡방향 철근비를 변화시켜 일정한 횡방향 철근비에 대한 주철근비(ρ_l / ρ_s)를 유지시키며 변수연구를 수행하였다. 대체적으로 주철근비의 단면적이 증가할수록 교각구조물의 저항성능은 1.1~2.0배 증가하였다(VLS-US해석 결과). 또한 횡방향 철근비를 변화시키기 위하여 횡방향 철근의 단면적을 변화시켜 충격하중을 받는 콘크리트의 거동을 확인하여 보면(VCS-US해석결과) 압축강도와 철근 단면적에 따른 교각의 거동이 불규칙하게 발생한 것을 확인할 수 있었다.

4.3.4 세장비 변화에 따른 교각구조물의 거동

본 연구에서는 세장비의 변화를 교각의 총 높이변화와 경계조건을 달리하여 유효좌굴길이계수, k 를 변화시켜 세

Fig. 12 Energy results from the analysis model

Table 7 Summary of analysis results

Case		Circular section										Rectangular section									
		100 mm		200 mm		300 mm		400 mm		500 mm		100 mm		200 mm		300 mm		400 mm		500 mm	
		$\Delta_{max}^{(5)}$ (mm)	$\theta_{support}^{(6)}$ (°)	$\Delta_{max}^{(5)}$ (mm)	$\theta_{support}^{(6)}$ (°)	$\Delta_{max}^{(5)}$ (mm)	$\theta_{support}^{(6)}$ (°)	$\Delta_{max}^{(5)}$ (mm)	$\theta_{support}^{(6)}$ (°)	$\Delta_{max}^{(5)}$ (mm)	$\theta_{support}^{(6)}$ (°)	$\Delta_{max}^{(5)}$ (mm)	$\theta_{support}^{(6)}$ (°)	$\Delta_{max}^{(5)}$ (mm)	$\theta_{support}^{(6)}$ (°)	$\Delta_{max}^{(5)}$ (mm)	$\theta_{support}^{(6)}$ (°)	$\Delta_{max}^{(5)}$ (mm)	$\theta_{support}^{(6)}$ (°)	$\Delta_{max}^{(5)}$ (mm)	$\theta_{support}^{(6)}$ (°)
AVC	CA ⁽¹⁾ ρ_s	0.534	-	-	-	0.178	-	-	-	0.107	-	0.534	-	-	-	0.178	-	-	-	0.107	-
	30°	1.066	0.02	-	-	1.549	0.03	-	-	1.191	0.02	14.81	0.26	-	-	6.135	0.11	-	-	19.64	0.34
	45°	1.822	0.03	-	-	2.212	0.04	-	-	1.424	0.02	22.59	0.39	-	-	32.89	0.57	-	-	39.96	0.69
	60°	3.409	0.06	-	-	6.112	0.11	-	-	3.913	0.07	72.21	1.25	-	-	89.94	1.56	-	-	95.89	1.66
	75°	102.2	1.77	-	-	118	2.05	-	-	135.5	2.35	57.3	0.99	-	-	76.35	1.33	-	-	87.79	1.52
	90°	95.27	1.65	-	-	133.2	2.31	-	-	184.7	3.20	48.78	0.85	-	-	71.71	1.24	-	-	95.12	1.65
ARS-R	CA ⁽¹⁾ ρ_s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.534	-	-	-	0.178	-	-	-	0.107	-
	30°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	98.43	1.71	-	-	136.4	2.37	-	-	163.5	2.84
	45°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	87.5	1.52	-	-	126.5	2.20	-	-	160.4	2.78
	60°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80.34	1.39	-	-	105.0	1.82	-	-	126.6	2.20
	90°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48.78	0.85	-	-	71.71	1.24	-	-	95.12	1.65
UAL18-CS	f_{ck}	Axial force = 1,868 kN																			
	18 MPa	91.18	1.58	120.29	2.09	133.5	2.32	163.3	2.83	182.6	3.17	51	0.89	59.28	1.03	68.33	1.19	72.37	1.26	80.63	1.40
	24 MPa	95.27	1.65	115.9	2.01	133.2	2.31	157.1	2.73	184.7	3.20	48.78	0.85	64.12	1.11	71.71	1.24	71.74	1.25	95.12	1.65
	28 MPa	99.96	1.74	121.4	2.11	137.5	2.39	163.4	2.83	174	3.02	48.15	0.84	56.69	0.98	71.74	1.25	78.1	1.36	105.3	1.83
	32 MPa	93.82	1.63	135.7	2.35	144.4	2.51	156	2.71	168.4	2.92	45.89	0.80	60.09	1.04	64.51	1.12	80.24	1.39	107.4	1.86
UALR68-CS	f_{ck}	Axial force ratio = 0.0686																			
	18 MPa	101.3	1.76	126.2	2.19	118.6	2.06	154.4	2.68	193.3	3.35	37.02	0.64	56.69	0.98	65.83	1.14	72.9	1.27	86.08	1.49
	24 MPa	95.27	1.65	115.9	2.01	133.2	2.31	157.1	2.73	184.7	3.20	49.5	0.86	59.28	1.03	70.46	1.22	79.6	1.38	87.11	1.51
	28 MPa	90.55	1.57	125.4	2.18	171	2.97	169.8	2.95	203.2	3.52	45.92	0.80	53.94	0.94	73.53	1.28	83.01	1.44	97.11	1.69
	32 MPa	96.71	1.68	121.7	2.11	163.2	2.83	165.3	2.87	230.5	4.00	40.19	0.70	50.39	0.87	61.85	1.07	77.91	1.35	99.04	1.72
VLS-US ⁽²⁾	f_{ck} A_s	44.4 mm ²	31.2 mm ²	25.0 mm ²	22.0 mm ²	19.6 mm ²	16.3 mm ²	14.6 mm ²	13 mm ²	11.8 mm ²	10.4 mm ²	9.3 mm ²	8.3 mm ²	7.3 mm ²	6.3 mm ²	5.3 mm ²	4.3 mm ²	3.3 mm ²	2.3 mm ²	1.3 mm ²	0.3 mm ²
	18 MPa	75.44	1.31	116.4	2.02	133.5	2.32	172.7	3.00	220.8	3.83	37.06	0.64	56.81	0.99	68.33	1.19	75.59	1.31	93.01	1.61
	24 MPa	81.6	1.42	136.3	2.37	133.2	2.31	193.9	3.36	212.8	3.69	37.43	0.65	77.24	1.34	71.71	1.24	90.14	1.56	99.11	1.72
	28 MPa	74.33	1.29	111.9	1.94	137.5	2.39	160	2.78	168.9	2.93	32.59	0.57	66.5	1.15	71.74	1.25	76.15	1.32	98.32	1.71
	32 MPa	84.83	1.47	112.1	1.94	144.4	2.51	152.6	2.65	225.8	3.91	31.58	0.55	54.15	0.94	64.51	1.12	90.21	1.57	106.1	1.84
VCS-US ⁽²⁾	f_{ck} A_s	7.37 mm ²	10.4 mm ²	13 mm ²	14.6 mm ²	16.3 mm ²	18.0 mm ²	19.6 mm ²	21.3 mm ²	23.0 mm ²	24.7 mm ²	26.4 mm ²	28.1 mm ²	29.8 mm ²	31.5 mm ²	33.2 mm ²	34.9 mm ²	36.6 mm ²	38.3 mm ²	40.0 mm ²	41.7 mm ²
	18 MPa	150.3	2.61	136.7	2.37	133.5	2.32	138.2	2.40	139.3	2.42	62.02	1.08	72.58	1.26	68.33	1.19	63.35	1.10	67.23	1.17
	24 MPa	160.2	2.78	142.6	2.47	133.2	2.31	146.8	2.55	151.4	2.63	68.08	1.18	71.8	1.25	71.71	1.24	71.39	1.24	74.82	1.30
	28 MPa	142.9	2.48	145.7	2.53	137.5	2.39	140.2	2.43	154.5	2.68	66.02	1.15	72.61	1.26	71.74	1.25	74.55	1.29	77	1.34
	32 MPa	132.8	2.30	136.5	2.37	144.4	2.51	137.5	2.39	158.5	2.75	65.21	1.13	67.75	1.18	64.51	1.12	74.4	1.29	78.4	1.36
L-SR-C	H(SR) ⁽³⁾																				
	1600(11)	113.9	4.07	-	-	174.3	6.22	-	-	259.6	9.22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2700(18)	97.27	2.06	-	-	155.4	3.29	-	-	192.9	4.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3300(22)	95.27	1.65	-	-	133.2	2.31	-	-	184.7	3.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3800(25)	82.92	1.25	-	-	117.2	1.77	-	-	176.4	2.66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4500(30)	83.94	1.07	-	-	113.7	1.45	-	-	146.6	1.87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEL-SR	6000(40)	72.52	0.69	-	-	109.4	1.04	-	-	159.3	1.52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	k(SR) ⁽⁴⁾																				
	0.5(5.5)	55.02	0.96	-	-	95.27	1.65	-	-	102.0	1.77	26.72	0.46	-	-	41.71	0.72	-	-	53.28	0.92
	0.7(7.7)	58.42	1.01	-	-	78.37	1.36	-	-	97.62	1.69	28.23	0.49	-	-	43.45	0.75	-	-	51.7	0.90
	1.0(11)	83.76	1.45	-	-	152.7	2.65	-	-	193.4	3.35	48.5	0.84	-	-	66.11	1.15	-	-	98.38	1.71
	2.0(22)	95.27	1.65	-	-	133.2	2.31	-	-	184.7	3.20	48.78	0.85	-	-	71.71	1.24	-	-	95.12	1.65

¹⁾CA : Just for rectangular section pier, ²⁾Uniform steel ratio ρ_s/ρ_s (longitudinal confining steel ratio) = 9.06(Circular), 7.135(Rectangular)

³⁾H(SR) : H means height(mm), SR means slenderness ratio, ⁴⁾(SR) : means effective length factor, SR means slenderness ratio

⁵⁾ Δ_{max} : Maximum displacement at center point ⁶⁾ $\theta_{support}$: Support rotation

AVC : variation of the vehicle collision angular to pier

ARS-R : variation of the rectangular section angular to pier center line (Just for rectangular section pier)

UAL(R)-CS : variation of uniform axial load (ratio) to compressive strength

VLS-US : variation of longitudinal steel section to uniform stirrup spacing

VCS-US : variation of confining steel section to uniform stirrup spacing

L-SR-C : slenderness ratio and aspect ratio as to length (Just for circular section pier)

CEL-SR : slenderness ratio as to variation the effective length coefficient

장비의 영향을 확인하여 보았다. L-SR-C의 해석 결과에서 보는 것과 같이 비록, 교각의 높이가 증가할수록 세장비는 증가하나, 일정한 높이의 트럭이 교각에 가하는 충격하중의 위치가 동일하며, 세장비에 따른 좌굴하중에 비하여 자중의 증가가 더 크기 때문에 교각의 높이가 증가할수록 최대 처짐은 감소하였다. 또한, 유효좌굴길이계수를 변화시키기 위하여 교각의 경계조건을 변화시켜 해석한 결과(CEL-SR해석결과), 유효좌굴길이계수가 클수

록, 즉 세장비가 증가할수록 발생하는 교각의 손상이 크게 발생되었다. 특히 본 연구의 해석 결과에 의하면 세장비가 11, 유효좌굴길이계수가 1인 경우, 즉 회전전에 대하여 구속되어 있는 경우가 큰 변형이 발생하였다.

4.4 성능중심을 활용한 구조물의 저항성능 평가

본 연구에서 수행된 해석 결과들을 바탕으로 성능기반

설계개념을 도입하여, 성능기반설계를 바탕으로 한 충격하중을 받는 콘크리트 교각구조물의 저항성 평가를 실시하였다. 앞서 설명한 손상도(fragility) 이론을 바탕으로 하여 Bayesian방법의 만족도 곡선(satisfaction probability curve)을 작성하였다. 작성된 만족도 곡선을 설계에 적용함으로써 요구확률에 대한 설계 요소 값을 수월하게 결정할 수 있게 된다. 특히 지금까지의 설계에서는 충격하중에 대한 설계가 이뤄지지 않은 만큼 충격하중을 받는 콘크리트 구조물의 성능기반중심의 저항성능 평가시스템 제안은 앞으로의 설계기법에 중요한 기반이론이 될 것이라고 생각한다. 이 연구에서 변형률 속도를 고려한 충격하중을 받는 콘크리트의 저항성능 평가는 Table 8과 같이 기존 ASCE²⁰⁾와 ASCE²¹⁾에서 제안된 최대 처짐과 지점회전각을 중심으로 수행하였다.

본 연구에서 2개의 매개변수에 대하여 각각 구한 해석결과를 바탕으로 약 10,000개의 데이터로 증가시켜 정규분포화 하여, 각 데이터에 적합한 기준(criteria)을 정하여 로그정규분포를 각 매개변수에 따라 만족도 곡선을 그리면 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 저항성능 가능성(resistance probability)이 0에 도달하게 되면 파괴가 되며, 1에 도달하면 안전한 것으로 설정하였다. 각 단면별, 해석조건 중 설계 시 크게 영향을 미치는 매개변수를 선정하여 만족도 곡선을 분류하였다.

Fig. 13(a)와 (d)에서 보는 것과 같이 충돌각에 따른 만족도 곡선에 의하면 충돌각이 증가함에 따라 높은 수준의 손상을 받을 확률이 증가하였다. 더불어 최대 처짐에 의한 손상기준²¹⁾의 저항성능 보다 지점회전각에 의한 손상기준²⁰⁾의 저항성능이 높은 것을 확인할 수 있다. 이는, 상대적으로 처짐에 의한 손상기준에 비하여 지점회전각에 의한 손상기준이 높게 설정되어 있다고 판단할 수 있다. 그러므로 설계를 할 때에 사용자가 원하는 저항성능에 맞춰 충돌각에 따른 충격도에 해당하는 하중을 설계에 반영할 수 있을 것이라고 판단된다. 또한 Fig. 13(d)와 같이 사각단면의 경우, 45° 이하의 충돌각에서는 moderate한 손상을 받을 확률이 좀 더 높은 것을 볼 수 있다. 이는 낮은 각도에서는 충돌면적이 넓어짐에 따라 손상이 더 증가함을 확인할 수 있다.

Fig. 13(b)와 13(e)에서 볼 수 있듯이 동일한 축력비에 대하여 횡방향 철근비와의 관계를 살펴보면 압축강도가 증가하더라도 횡철근 간격에 따라 저항성능이 결정됨을 확인할 수 있다. 또한 교각의 저항 수준에 따라 사각단면보다 원형단면에서 큰 변형이 발생된다. 더불어 일정

한 주철근비에 대한 횡방향 철근비의 비율을 일정하게 하면서, 주철근 단면적을 감소시켜 주철근비를 감소시킨 결과 원형단면에 비하여 사각단면에서는 비교적 작은 변형이 발생하였다(Fig. 13(c), (f)). 이는 사각단면에 비해, 원형단면에서는 저항성능이 주철근의 단면적 변화에 크게 영향 받음을 확인할 수 있었다.

교각 높이가 증가할수록 높은 수준의 큰 변형이 발생할 가능성이 높아지며(Fig. 13(g)), Fig. 13(j)에서 확인할 수 있는 것과 같이 좌굴의 영향에 의해 medium criteria의 손상이 발생하는 것에 비하여 severe damage가 더 높은 확률로 발생할 수 있음을 확인할 수 있었다. 더불어, Fig. 13(i), (l)와 같이 경계조건의 변화에 따른 유효좌굴길이계수를 변경하여 세장비를 변화시킨 경우에도 유효좌굴길이 계수를 1을 중심으로 계수가 커질수록, 높이 변화를 시킨 경우와 마찬가지로 light damage보다 medium criteria에 해당되는 손상의 발생정도가 더 높은 것을 확인할 수 있다. 그러므로 교각의 높이의 변화와 유효좌굴길이계수를 변경할 때에는 세장비와 더불어 좌굴의 영향여부 등을 고려하여 충격하중을 받는 콘크리트 교각에 설계되어야 한다고 판단된다.

5. 결론 및 분석

이 연구에서는 충격하중을 받는 교각의 저항성능평가 및 성능기반형 평가시스템을 구축하였다. 이 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 성능기반 저항성능 평가를 위하여 동일한 직경을 가지는 원형과 사각형 단면을 가진 교각에 대하여 차량과 교각의 충돌각의 변화, 축력 및 축력비의 변화, 주철근비 및 횡방향 철근비의 변화, 높이 및 경계조건에 따른 세장비의 변화 등을 주어 해석적 변수연구를 수행하였다.
- 2) 차량은 트럭이 시속 100 km/h로 충격하중을 가할 경우에 대한 기본적인 콘크리트 교각의 거동을 분석하였으며 해석결과, 원형단면의 경우에는 133 mm, 사각단면의 경우에는 71 mm 등 비교적 큰 변형이 발생하였다. 이는 ASCE(1999)기준에 따르면 각각 severe damage와 moderate damage에 해당한다.
- 3) 수행된 해석 결과는 Bayesian 통계적 개념을 바탕으로 교각구조물의 성능기반형 저항성능을 확률적으로 평가하여 제시하였다. 이때 설계 기준은 ASCE(1997, 1999)에서 규정하고 있는 처짐 및 지점회전각을 채택하였으며, 각 매개변수별 만족도 곡선을 통해 저항성 평가하였다.
- 4) 해석적 변수연구의 결과, 해석조건에 의하여 원형단면에 비하여 사각단면에서 더 큰 저항성능을 나타내며, 충돌각 변화로부터 교각에 대한 충격도는 차량 충격단면과 구조물의 충격면적에 대해 고려해야 한다. 동일한 축력비가 작용할 경우에는 압축강도의 증가와는 상관없이, 횡철근 간격에 따라 저항

Table 8 Damage criteria of column

ASCE (1999)		ASCE (1997)	
Criteria	Shortening/height	Criteria	Support rotation, θ
Light damage	1%	Low criteria	1°
Moderate damage	2%	Medium criteria	2°
Severe damage	4%	High criteria	4°

Fig. 13 Damage satisfaction curve

성능이 결정되며, 교각의 높이 및 유효좌굴길이계수를 변경하며 충격하중에 대한 저항성능을 고려하기 위해서는 세장비와 더불어 좌굴 등을 고려하여 충격하중에 대한 설계에 반영해야 한다.

- 5) 만족도 곡선을 바탕으로 하여 충격하중에 대한 교각의 저항성능을 평가할 수 있으며, 사용자가 원하는 저항성능에 필요로 하는 단면 및 철근비 등을 산정할 수 있는 신뢰성을 기반으로 한 성능기반 저항성능 평가방법을 제안하였다.

이와 같이 콘크리트 교각을 대상으로 충격하중에 대한 성능기반형 저항성능 평가개념을 고려한 연구는 전 세계적으로 진행되지 않았으며 본 연구를 통해 성능기반형 저항성능 평가개념 및 기법을 구축하였다. 더불어 이 연구를 기반으로 하여 실질적으로 실무에서 사용될 수 있는 충격하중을 받는 성능기반형 저항성능 평가에 대하여 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 학술연구재단(과제번호 D00792), 국토해양

부 가스플랜트사업단의 연구비 지원을 통해 이뤄졌으며, 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. 이나현, 김성배, 김장호, 최종권, “폭발하중을 받는 콘크리트 구조물의 실험적 거동분석 : (I) 실험수행절차,” 대한토목학회논문집, 29권, 5A호, 2009, pp. 557~564.
2. 이나현, 김성배, 김장호, 조윤구, “폭발하중을 받는 콘크리트 구조물의 실험적 거동분석 : (II) 초고강도 콘크리트 및 RPC 구조물의 실험 결과,” 대한토목학회논문집, 29권, 5A호, 2009, pp. 565~575.
3. Nam, J. W., Kim, H. J., Kim, S. B., Yi, N. H., and Kim, J. H. J., “Numerical Evaluation of the Retrofit Effectiveness for GFRP Retrofitted Concrete Slab subjected to Blast Pressure,” *Composite Structures*, Vol. 92, No. 5, 2010, pp. 1212~1222.
4. Krauthammer, T., Shanaa, H. M., and Assadi-Lamouki, A., “Response of Reinforced Concrete Structural Elements to Severe Impulsive Loads,” *Computers and Structures*, Vol. 53, No. 1, 1994, pp. 119~130.
5. Sherif El-Tawil, Edward Severino, and Priscilla Fonseca, “Vehicle Collision with Bridge Piers,” *Journal of Bridge*

- Engineering, ASCE, Vol. 10, No. 3, 2005, pp. 345~353.
6. Consolazio, G. R. and Cowan, D. R., "Numerically Efficient Dynamic Analysis of Barge Collisions with Bridge Piers," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 8, 2005, pp. 1256~1266.
 7. Dutta, A. and Mander, J. B., "Rapid and Detailed Seismic Fragility Analysis of Highway Bridges," Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, NY, USA, 2002.
 8. Consolazio, G. R. and Cowan, D. R., "Numerically Efficient Dynamic Analysis of Barge Collisions with Bridge Piers," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 8, 2005, pp. 1256~1266.
 9. Nam, J. W., Kim, H. J., Kim, S. B., Kim, J. H. J., and Byun, K. J., "Analytical Study of Finite Element Models for FRP Retrofitted Concrete Structure under Blast Loads," *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 18, No. 5, 2009, pp. 461~490.
 10. Nam, J. W., Kim, H. J., Yi, N. H., Kim, I. S., Kim, J. H. J., and Choi, H. J., "Blast Analysis of Concrete Arch Structures for FRP Retrofitting Design," *Computers and Concrete*, Vol. 6, No. 4, 2009, pp. 305~318.
 11. 남진원, 김호진, 김성배, 변근주, "폭발하중을 받는 콘크리트 벽체구조의 HFPB 해석," 대한토목학회논문집, 27권, 3A호, 2007, pp. 433~442.
 12. 김호진, 남진원, 김성배, 김장호, 변근주, "폭발하중을 받는 콘크리트 벽체 구조물의 보강성능에 대한 해석적 분석," 콘크리트학회 논문집, 19권, 2호, 2007, pp. 241~250.
 13. Nemat-Nasser, S. and Deng, H., "Microcrack Interaction and Shear Fault Failure," *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 3, No. 1, 1994, pp. 3~37.
 14. Ross, C. A., Tedesco J. W., and Kuennen S. T., "Effects of Strain Rate on Concrete Strength," *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No.1 1995, pp. 37~47.
 15. Li, Q. M. and Meng, H., "About The Dynamic Strength Enhancement of Concrete-like Materials in a Split Hopkinson Pressure Bar Test," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, 2003, pp. 343~360.
 16. Cotsovos, D. M. and Pavlovic, M. N., "Numerical Investigation of Concrete Subjected to High Rates of Uniaxial Tensile Loading," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 5, 2008, pp. 319~335.
 17. Georgin, J. F. and Reynouard J. M., "Modeling of Structures Subjected to Impact: Concrete Behavior under High Strain Rate," *Cement Concrete Composites*, Vol. 25, 2003, pp. 131~143.
 18. Bischoff, P. H. and Perry, S. H., "Compressive Behaviour of Concrete at High Strain Rates," *Materials and Structures*, Vol. 24, 1991, pp. 425~450.
 19. Malvar, L. J., Crawford, J. E., Wesevich J. W., and Simons D., "A Plasticity Concrete Material Model for DYNA 3D," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 19, 1997, pp. 847~873.
 20. ASCE Task Committee on Blast Resistant Design, Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, Task Committee Report on Blast Resistant Design of the Petrochemical Committee of ASCE, 1997, pp. 5-1~5-22.
 21. ASCE Structural Design for Physical Security: State of the Practice Report, Task Committee on Physical Security, American Society of Civil Engineers, New York, 1999, pp. 4-1~4-53.
 22. 판덕형, 이근성, 이나현, 김성배, 김장호, "Bayesian 통계법을 활용한 성능기반형 콘크리트 배합설계방법 개발," 콘크리트학회 논문집, 22권, 2호, 2010, pp. 171~177.
 23. Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J. H., and Naganuma, T., "Statistical Analysis of Fragility Curves," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 12, 2000, pp. 1224~1231.
 24. 조판규, 차량충돌에 의한 복합소재 가드레일의 거동 연구, 세종대학교 대학원, 석사학위논문, 2008, pp. 21~39.
 25. 한국건설기술연구원, 교각 내진성능평가 및 교량 비선형 내진해석프로그램 개발, 2001, pp. 12~31.
 26. NCAC (National Crash Analysis Center), www.ncac.gwu.edu.
 27. 국토해양부, 차량방호 안전시설 실험충돌시험 업무편람, 2001.
 28. 정영수, 이재훈, 김재관 등, 고속도로 기존교량의 유형별 내진성능 평가를 위한 실험적 연구, 한국도로공사, 2001.
 29. Zaouk, A. K., Bedewi, N. E., Kan, C. D., and Marzoughi, D., "Validation of a Non-Linear Finite Element Vehicle Model Using Multiple Impact Data," *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Crash-worthiness and Occupant Protection in Transportation Systems*, ASME, AMD-Vol. 218, New York, 1996, pp. 91~106.

요약 최근 교량구조물의 증가와 더불어 차량 및 선박과 시설물 간의 충돌사고가 발생할 확률이 높아지고 있다. 특히 교량을 구성하는 상부구조와 하부구조 중에서 충돌에 의한 영향은 주로 교각 등의 하부구조가 받을 가능성이 크다. 교각에 차량 혹은 선박이 충돌하게 되면 교량 하부구조에 국부적인 손상을 유발하게 되며, 충돌사고는 훨씬 더 순간적이고 강한 물리적인 질량의 충돌을 동반할 수 있으며, 극단적인 경우 상부구조의 붕괴까지 유발할 수 있다. 그러므로 이 연구에서는 콘크리트 구조물인 교량의 교각과 같은 압축부재에 대한 설계 시 차량 등에 의한 충돌을 고려하고, 차량 충돌하중에 의한 손상지수를 정량적으로 평가하기 위해서 기존의 설계방법을 개선하고 새로운 구조물의 저항성능 평가방법을 정립하기 위하여 동적유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 교각단면, 차량의 충돌각에 따른 충격도, 축력 및 축력비, 콘크리트 강도, 주철근비와 횡방향 철근, 세장비 등을 변화시켜 케이스별 해석을 수행하였다. 이 연구 결과를 통해 콘크리트 구조물의 거동해석 및 설계기법을 Bayesian 통계방법을 이용한 만족도 곡선을 통해 충격하중을 받을 시의 성능 기반형 저항성능 평가방법을 개발하였으며, 이는 실제 충격하중에 의한 구조물의 방호성능 및 설계 시에 적절하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 : 압축부재, 차량 충돌하중, Bayesian 통계방법, 만족도 곡선, 성능기반 저항성능 평가방법