

도로교의 성능기반 내진설계를 대비하며



김익현 | 울산대학교 건설환경공학부 교수

1. 서론

내진설계기준은 기본방침, 설계방법, 지진하중의 조합, 구조해석과 강도, 구조세목 등 많은 항목을 포함하고 있으며 그 구체적인 내용은 나라별로 서로 다르다. 우리나라의 도로교 설계기준의 내진성능목표는 지진에 의한 교량의 일부 또는 전체 붕괴를 방지하는 것을 목표로 하고 있다. 일본의 JSCE, 미국의 Caltrans와 유럽의 Eurocode 8 codes에서는 지진에 의하여 구조물의 제한적 손상을 허용하고 구조물 기능저하를 최소화함으로써 인간생명을 보호하는 것을 내진설계의 목표로 하고 있다. 한편 뉴질랜드에서는 지진 후에도 교통 소통의 기능을 안전하게 유지하는 것을 내진설계의 목표로 하고 있다.

설정된 내진성능목표를 달성하는 방법을 설계철학이나 설계방법 측면에서 보면 사양에 기반한 설계와 성능에 기반한 설계로 대별할 수 있다. 사양기반 내진설계는 내진성능목표를 달성할 수 있는 비교적 간단한 방법을 규정하고 이를 따르게 하는 설계법으로서 비교적 쉽고, 확실하게 내진성능목표를

달성할 수 있다는 장점이 있지만 다른 설계대안을 허용하지 않기 때문에 설계방법이 지나치게 경직되어 있어서 경제적인 설계를 할 수 없다는 단점이 있다. 이에 비해 성능기반 내진설계는 내진성능목표를 달성할 수 있는 구체적인 설계방법을 제시하기 보다는 이를 달성할 수 있는 기본적인 틀만 제공하고 설계자가 주어진 내진성능목표가 달성된다는 것을 검증한다면 다양한 설계방법을 허용하는 개념이다. 이러한 설계개념은 다양한 요구내진성능수준에 대해서도 설계가 가능하기 때문에 내진성능수준에 대한 발주자의 요구가 다양한 건물을 중심으로 발전하고 있다. 일본의 경우, 도로교에 이러한 설계기법을 도입하고 있으며 우리나라의 경우, 케이블교량에서도 이와 같은 개념을 도입하고 있다. 앞으로는 일반 도로교에서도 이와 같은 성능기반 내진설계를 도입하지 않으면 안 되는 환경변화가 일어나고 있다.

이 원고에서는 성능기반 내진설계에 대한 이해를 돕기 위하여 성능기반 내진설계의 개념과 국내외의 관련 설계기준을 소개한다.

2. 성능기반 내진설계의 개념

성능기반 내진설계의 개념을 이해하기 위해서는 사양기반 내진설계를 이해할 필요가 있다. 일반적으로 내진설계는 시설물의 설계수명 내에 발생할 가능성이 크지만 지진세기가 작은 지진에 대해서는 '기능수행수준', 발생할 가능성이 작지만 지진세기가 큰 지진에 대해서는 '붕괴방지구준'을 만족하도록 설계한다. 우리나라 일반 도로교의 경우에는 큰 지진에 대해서 '붕괴방지'를 목표로 하고 있다. 작은 지진에 대한 '기능수행수준'에 대해서는 별도로 고려하고 있지 않다. 일반 도로교의 경우 기능상의 중요성과 교량의 규모에 따라 내진II등급 및 내진I등급으로 구분하고, 내진II등급 교량은 재현주기 500년 지진, 내진I등급 교량은 재현주기 1,000년 지진에 대해서 붕괴가 되지 않도록 설계한다.

내진설계의 기본개념은 지진 시에 발생하는 지진력을 부재의 충분한 강도로 버티게 설계하는 것이 아니고 지진력에 비해 강도는 작지만 충분한 연성을 확보하도록 하여 지진에 견디게 하는 것이다. 이렇게 함으로써 교량의 경제적인 내진설계가 가능하다. 그림 1은 교량의 소성내진설계의 기본개념을 나타낸 것이다. 단일기동 형식을 갖는 캔틸레버 교각의 경우 설계지진에 대한 탄성지진력(휨모멘트)의 1/3 ($R=3$ 을 채택)을 설계지진력으로 하여 단면을 설계한다. 이 경우 교각은 설계지진에 대해서 소성거동을 하게 되고 만약 충분한 연성을 갖고 있지 않으면 교각은 붕괴에 이르게 된다. 따라서 충분한 연성을 확보하는데 필요한 심부구속 철근량과 내진상세를 규정하고 있다. 설계지진에 대해 교량이 붕괴되지 않도록 설계할 수 있는 간단하면서도 구체적인 설계방법을 규정하고 있다. 소성 내진설계방법에서는 이 방법을 따르지 않는 다른 설계방법을 허용하고 있지 않다. 이런 설계방법이 사양기반 내진설계법이다. 우리나라 교량의 경우 이러한 내진설계법을 적용하면 매우 비경제적인 설계가 되는 경우가 많기 때문에 현 내진설계기준에서는 설계지진에 대해서 교각

에 요구되는 소요연성도만을 확보하는데 필요한 횡구속 철근량을 산정할 수 있는 연성도 설계방법도 채택하고 있지만 이 또한 완벽한 성능기반 내진설계법은 아니다.

이에 비해 성능기반 내진설계방법은 다양한 요구 내진성능수준에 대해서도 설계가 가능하여야 한다는 것을 전제로 한다. 이를 위해서는 요구 내진성능수준에 대한 교량 구성요소의 설계거동 한계가 구체적으로 설정되어야 하며 설계자는 자신이 설계한 교량의 구성요소가 설계지진에 대해서 이 거동 한계를 초과하지 않는다는 것을 보여야 한다. 앞서 기술한 바와 같이 내진설계의 기본개념이 소성거동을 하는 부재에 큰 연성변형 능력을 부여하는 것이고 이는 구성요소(교각)의 심부구속으로 실현 가능하다. 따라서 성능기반 내진설계를 위해서는 횡구속 콘크리트의 응력-변형률의 모델을 제공하는 것이 전제되어야 한다. 이를 재료단계의 설계라고 부르기도 한다. 사양기반 내진설계에서는 부재의 성능실험을 통해서 요구 내진성능수준을 만족하는데 필요한 심부구속 철근량을 정의하고 있어서 부재단계의 설계에 해당한다.

따라서 성능기반 내진설계를 위해서는 요구 내진성능수준에 부합되는 구성요소의 설계거동한계가 정의되어야 하고, 설계지진에 대해서 교량 구성요소의 설계거동을 확인할 수 있는 재료의 역학모델이 제공되어야 한다.

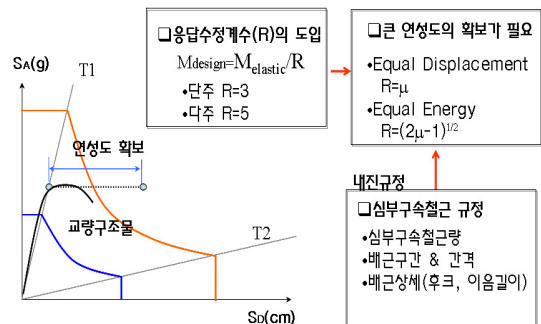


그림 1. 교량의 소성 내진설계의 기본개념

3. 국내·외 교량의 성능기반 내진설계

표 1. 내진성능목표(일본 도로교)

3.1 일본 도로교시방서·동해설

1) 내진성능목표

일본 도로교의 내진성능목표는 표 1과 같다.

고려하는 설계지진은 교량의 설계수명 내에 발생 확률은 크지만 세기가 작은 '레벨1 지진동'과 발생 확률은 작지만 세기가 큰 '레벨2 지진동' 2단계이다. '레벨2 지진동'은 지진원에 따라서 '타입1 지진동'과 '타입2 지진동' 2종류를 고려한다. 교량은 중요도에 따라 일반교량인 'A종 교량'과 중요 교량인 'B종 교량' 2종류로 나눈다. 내진성능수준은 작은 지진에 대한 '내진성능 1'과 큰 지진에 대한 '내진성능 2'와 '내진성능 3'의 3가지 성능수준을 정의하고 있다. '내진성능 2'는 설계지진에 대해서 발생하는 손상수준이 크지 않은 수준을 의미하고 '내진성

설계 지진동		A종 교량	B종 교량
레벨1 지진동		지진으로 인해 교량으로서 건전성이 손상되지 않는 성능 (내진성능 1)	
레벨2 지진동	타입 I의 지진동 (플레이트 경계형의 대규모 지진)	지진에 의한 손상이 교량에 치명적이지 않는 성능 (내진성능 3)	지진에 의한 손상이 제한적이고, 신속한 기능회복이 가능한 성능 교량으로서 기능을 신속히 회복할 수 있는 성능 (내진성능 2)
	타입 II의 지진동 (효고현 남부 지진과 같은 내륙 직하형 지진)		

능 3'은 손상이 크지만 치명적이지 않은 손상수준으로 우리나라의 '붕괴방지구준'에 해당한다.

2) 구성요소(부재)의 설계거동한계

큰 지진('레벨2 지진동')에 대한 '내진성능 2'와 '내진성능 3'에 대한 부재의 설계거동한계는 표 2 및 표 3과 같다. 부재의 소성화와 에너지의 흡수를

표 2. 내진성능 2에 대한 부재의 한계상태

소성화부재 한계상태	교 각	교 각 (상부구조에 부차적 소성화)	기 초	면진반침과 교각
교각	손상의 복구를 쉽게 할 수 있는 상태	손상의 복구를 쉽게 할 수 있는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	한정적인 소성화에 그치는 상태
교대	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태
반침부	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	면진 반침에 의한 에너지 흡수를 확보할 수 있는 상태
상부 구조	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	부차적인 소성화에 그치는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태
기초	부차적인 소성화에 그치는 상태	부차적인 소성화에 그치는 상태	신속한 기능 회복에 지장이 되는 변형이나 손상이 생기지 않는 상태	부차적인 소성화에 그치는 상태
	확대 기초	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태
적용하는 교각의 예	면진교 이외의 일반적인 거더교 등	라멘교	교각 구체가 설계 지진력에 대해 충분히 큰 내력을 갖는 경우나 액상화의 영향이 있는 경우	면진교

표 3. 내진성능 3에 대한 부재의 한계상태

소성화부재 한계상태	교 각	교 각 (상부구조에 부차적 소성화)	기 초	면진받침과 교각
교각	교각의 수평 내력을 유지할 수 있는 상태	교각의 수평 내력을 유지할 수 있는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	한정적인 소성화에 그치는 상태
교대	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태
받침부	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	면진 받침에 의한 에너지 흡수를 확보할 수 있는 상태
상부 구조	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	부차적인 소성화에 그치는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태
기초	부차적인 소성화에 그치는 상태	부차적인 소성화에 그치는 상태	신속한 기능 회복에 지장을 주는 변형이나 손상이 생기지 않는 상태	부차적인 소성화에 그치는 상태
	확대 기초 역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태	역학적 특성이 탄성 영역을 넘지 않는 상태
적용하는 교각의 예	내진성능2의 경우와 동일			

고려하는 부재의 종류에 따라 각 부재의 설계거동한계를 설정하고 있다. '내진성능 2'는 소성화를 고려하는 부재에만 소성변형이 발생하고 변형크기는 부재의 복원이 용이한 범위이며, '내진성능 3'은 변형의 크기가 부재의 소성변형 성능을 초과하지 않는 범위이다.

3) 내진성능 검증

설계지진동에 대해서 각 부재의 거동이 한계상태를 넘지 않는지 조사하여야 한다. 여기에서는 교각의 검증에 대해서만 기술한다. 교각이 설계지진동에 대해서 붕괴되지 않으려면('내진성능 3') 기본적으로 전단파괴가 발생하지 않아야 한다. 또한 소성거동을 하는 경우 지진동에 의해서 발생하는 소성변위(응답소성율)이 교각에 허용되는 변위연성도(허용소성율) 이하가 되어야 한다. 따라서 '내진성능 3'을 만족하기 위해서는 교각의 응답소성율이 허용소성율 이하여야 한다. '내진성능 2'는 손상이 제한적이어야 한

다. 따라서 '내진성능 2'의 요구조건에 추가하여 지진 시 교각의 응답변위의 크기가 교각 높이의 1/100 이하이어야 한다.

한편, 이러한 교각의 응답소성율과 응답변위를 산정하기 위해서는 횡구속된 콘크리트의 응력-변형률 모델이 필요하며 일본 도로교 시방서에서는 이를 제공하고 있다. 즉, 재료의 역학적 모델을 사용해서 내진성능을 검증할 수 있는 툴을 제공하고 있다.

3.2 우리나라 케이블교량의 내진설계기준(한계상태설계법)

1) 내진성능목표

케이블 교량의 내진성능목표는 표 4와 같다. 설계지진의 크기는 단순하게 재현주기로 정의하지 않고 교량의 설계수명 내 초과확률로 정의하고 있다. 내진성능수준은 기능수행수준, 인명보호수준 및 붕괴방지수준의 3단계로 구분된다.

표 4. 내진성능목표(케이블교량)

내진성능수준	설계지진	재현주기(년)	
		설계수 100년	설계수명 200년
기능수행수준	설계수명 내 초과확률 63 % 수준	100	200
인명보호수준	설계수명 내 초과확률 8 %~10 % 수준	1,000	2,400
붕괴방지수준	설계수명 내 초과확률 4 % 수준	2,400	4,800

2) 구성요소의 설계거동한계

내진성능수준에 대한 각 구성요소의 허용손상수준은 표 5와 같다. 교량이 사용성 한계상태와 강도 한계상태를 만족한다면 '기능수행수준' 과 '인명보호수준' 은 만족하는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 '붕괴방지수준' 에 대해서 구성요소의 손상수준이 허용손상수준을 만족하는지 검증하면 된다. '붕괴방지수준' 에 대한 허용손상수준의 정량적인 값은 공학적 판단하에 적절하게 정의하는 것이 필요하지만 표 6 과 같이 설정할 수 있다.

표 5. 구성요소의 허용손상수준

구성요소		부재중요도	기능수행수준	인명보호수준	붕괴방지수준
파일 및 파일캡		주부재	무손상	최소손상	최소손상
주탑 및 측경간 교각		주부재	무손상	최소손상	복구가능손상
상부구조의 구조요소		주부재	무손상	최소손상	최소손상
상부구조의 비구조요소		부부재	무손상	최소손상	중대손상
버퍼	내진기능 유	주부재	무손상	무손상	무손상
	내진기능 무	부부재	무손상	중대손상	중대손상
받침 및 전단키		부부재	무손상	최소손상	복구가능손상
신축이음장치		부부재	무손상	복구가능손상	중대손상
케이블시스템 (앵커부 및 구조요소 포함)		주부재	무손상	무손상	최소손상
케이블시스템 (비구조요소 포함)		부부재	무손상	최소손상	복구가능손상

표 6. 붕괴방지수준에 대한 허용손상수준의 정량값

구성요소		부재종류	붕괴방지수준	정량값
파일 및 파일캡		주부재	최소손상	$\epsilon_{c,max} \leq \epsilon_{c0}, V_{max} \leq V_n$
주탑 및 측경간 교각		주부재	복구가능손상	$\epsilon_{c,max} \leq \epsilon_{cu,c}, V_{max} \leq V_n$
상부구조의 구조요소		주부재	최소손상	$F \leq F_y$
상부구조의 비구조요소		부부재	중대손상	-
버퍼	내진기능 유	주부재	무손상	제품사양서의 허용값 이하
	내진기능 무	부부재	중대손상	-
받침 및 전단키		부부재	복구가능손상	받침부:- 앵커부 : 앵커강도 이하
신축이음장치		부부재	중대손상	-
케이블시스템 (앵커부 및 구조요소 포함)		주부재	최소손상	$F \leq F_{p0.2k}$ (2% 율셋강도)
케이블시스템 (비구조요소 포함)		부부재	복구가능손상	-

주탑 및 측경간 교각은 상부구조를 지지하는 주부재로서 지진 시 상부구조의 관성력을 교량의 다른 구성요소로 전달한다. 지진 시 상당한 크기의 소성변형을 경험할 수 있는 부재로서 지진에 의한 콘크리트 단면의 압축변형률이 극한한계변형률($\epsilon_{cu,c}$)을 초과하게 되면 파괴에 이르기 때문에 극한한계변형률 이내(복구가능 손상수준)로 제한할 필요가 있다.

파일 및 파일캡은 지중 또는 수중에 건설되어 손상이 발생하면 복구가 어렵기 때문에 손상수준을 작게(최소손상수준) 제한할 필요가 있다. 또한 주탑 및 측경간 교각보다 먼저 파괴에 이르지 않도록 설계하는 것이 중요하다. 허용손상수준을 최소손상수준으로 제한하기 위해서는 콘크리트에 발생하는 균열을 미세 균열 정도로 제한할 필요가 있다. 압축을 받는 콘크리트는 최대압축강도에 이른 후에는 응력 저하가 발생하면서 변형률이 증가한다. 이는 콘크리트 내부에 균열이 진전되기 때문이다. 따라서 압축을 받는 콘크리트의 허용변형률은 최대압축강도 시의 압축변형률(ϵ_{c0})이하로 제한하는 것이 좋다.

보강형과 같은 상부구조의 구조요소는 주부재이므로 지진 시 항복을 초과하는 손상을 경험하면 영구변형이 남아서 부재의 보수, 복구가 어려우므로 항복을 넘지 않도록 손상수준을 제한하는 것이 바람직할 것이다.

케이블시스템(구조요소)인 경우도 동일하다고 생각할 수 있다. 다만 케이블시스템의 경우 항복점이 뚜렷하지 않아서 항복강도를 특정짓기 힘들다. 따라서 이런 경우에는 0.2% 오프셋강도를 항복강도로 정의하고 케이블에 발생하는 단면력이 이 강도 이하가 되도록 할 필요가 있다. 케이블시스템(비구조요소)는 부부재로 분류 가능하므로 항복은 허용할 수 있고 단면력이 인장강도를 초과하지 않으면 파괴가 발생하지 않으므로 이를 허용손상수준으로 할 수 있을 것이다.

교량의 받침부는 받침본체와 앵커부로 구성된다.

받침본체가 파손되는 경우에는 상대적으로 쉽게 교체할 수 있으므로 특별하게 손상수준을 제한할 필요는 없다. 다만 앵커부가 파괴되면 이를 복구하는데 많은 어려움이 있으므로 파괴가 발생하지 않도록 제한할 필요가 있다. 즉 받침부에 전달되는 하중이 앵커부의 강도를 초과하지 않아야 한다. 앵커부의 파괴는 앵커볼트의 파괴와 앵커부가 매입된 주변콘크리트부의 파괴가 있으며, 파괴형태는 크게 인장파괴와 전단파괴가 있으므로 이에 대해 충분히 안전하지를 검토하여야 한다.

버퍼의 경우, 내진기능을 지니고 있다면 파괴 시 교량 전체의 내진안전성에 문제가 발생할 수 있으므로 손상이 발생하지 않도록 하는 것이 바람직할 것이며 내진기능을 지니고 있지 않는 경우라면 부부재에 해당되므로 손상을 제한할 필요는 없을 것이다.

3) 내진성능검증

설계완료된 교량은 설계수명 내 초과확률 4%의 지진에 대해 붕괴방지수준의 내진성능을 만족하는지 검증하여야 한다. 붕괴방지수준의 내진성능 검증은 비선형 시간이력해석법으로 수행하며 각 구성요소의 최대응답값(단면력 및 변형률)이 표 6에 기술된 허용손상수준을 초과하지 않아야 하며, 상부구조의 낙교가 발생하지 않아야 된다.

주탑이나 교각의 경우, 붕괴방지수준의 내진성능을 만족하기 위해서는 휨과 전단에 대해 안전하여야 한다. 전단에 의해 파괴되지 않고 휨에 대해 안전하기 위해서는 단면의 변형성능(극한한계변형률 $\epsilon_{cu,c}$)이 설계지진에 의해 요구되는 변형률(최대압축변형률, $\epsilon_{c,max}$)보다 커야 된다. 극한한계변형률의 크기는 콘크리트의 압축강도에도 영향을 받지만 콘크리트를 횡구속하는 횡방향 철근량에 크게 영향을 받는다. 따라서 지진 시 응답압축변형률이 무구속 콘크리트의 극한한계변형률보다 크다면 콘크리트 단면에 횡방향 철근을 배치하여 극한한계변형률을 증가시킴으로써 허용손상수준을 만족시킬 수 있다.

4. 맺음말

현행 도로교 설계지진에서는 교량을 중요도에 따라서 내진I등급과 내진 II등급으로 구분하고 설계지진의 재현주기를 각각 500년, 1000년으로 설정하고 있다. 요구하는 내진성능수준은 '붕괴방지수준' 단일 내진성능수준이다. 이러한 설계개념은 교량의 중요도에 따라 지진하중의 크기를 달리할 뿐 동일한 설계방법과 내진상세를 적용할 수 있기 때문에 매우 간편하다. 그러나 하나의 기준지진에 대해서, 예를 들어 재현주기 500년 지진을 기준으로 한다면 내진 II등급 교량은 붕괴가 발생하지 않는 정도의 손상이 발생하지만 내진I등급 교량은 재현주기 1000년 지진에 대해서 붕괴방지가 일어나지 않도록 설계되었으므로 재현주기 500년 지진에 대해서는 이보다 작은 손상이 발생하게 된다. 그러나 어느 정도의 손상이 발생하는지는 알 수가 없다. 따라서, 이러한 설계개념은 국가적 차원에서 지진재난을 합리적으로 관리하기 어려운 단점이 있다.

합리적으로 지진재난을 관리하기 위해서는 하나의 기준지진에 대해서 교량의 손상수준이 특정되어야

한다. 이를 위해서는 교량의 요구내진성능수준을 '붕괴방지수준'이 아닌 교량의 내진등급에 따라 다른 손상수준으로 정의할 필요가 있다. 이를 반영하여 지진·화산재해대책법에서는 기존의 '기능수행수준'과 '붕괴방지수준'에 추가하여 '즉시복구수준'과 '장기복구수준/인명보호수준'을 새롭게 규정하는 고시(안)을 공표할 예정이다. 따라서, 앞으로는 이러한 손상수준을 구현할 수 있는 새로운 설계방법과 설계절차가 확립되어야 한다. 현행의 사양기반 내진설계법으로 이를 구현하기는 어려우며 재료의 역학모델을 이용하는 성능기반 내진설계만이 이를 구현할 수 있다. 따라서 일반교량에 대해서도 일본의 도로교나 케이블 교량에서와 같은 설계방법을 하루 빨리 확립하는 것이 필요하다.

참고문헌

1. 도로교통협회(2015), 도로교설계기준(한계상태설계법)-케이블교량편.
2. 日本道路協會(2012), 道路橋示方書·同解説, 耐震設計編.

학회지 광고접수 안내

본 학회지에 게재할 광고를 모집합니다. 우리 학회지는 계간으로 매회 2,100부를 발간하여 회원과 건설관련 기관에 배포하고 있습니다. 회사 영업신장과 이미지 제고를 원하시는 업체는 우리 학회지에 광고를 실어주시기 바랍니다.

광고료 : 표2 · 표3 · 표4(300만원) · 간지(200만원)

※ 상기금액은 연간(4회)광고료임.

사단법인 한국도로학회

전화 (02) 3272-1992 전송 (02) 3272-1994