



LNG 외조 저장탱크의 구조적 특성을 고려한 상태평가 기준 개발

최경재 · 서창주 · 김영구 · 조영도 · †김정훈

한국가스안전공사

(2017년 8월 30일 접수, 2017년 10월 16일 수정, 2017년 10월 17일 채택)

A Development of Condition Evaluation Standard Considering Structural Characteristic for Members of LNG Outer Storage Tanks

Kyoung-Jae Choi · Chang-Joo Seo · Young-Gu Kim · Young-Do Jo · †Jung-Hoon Kim

Korea Gas Safety Corporation, Eumseong, 369-811, Korea

(Received August 30, 2017; Revised October 16, 2017; Accepted October 17, 2017)

요약

한국은 세계 2위의 LNG 수입국이고 2017년 기준 약 70기의 LNG 저장탱크가 상업운전 중에 있다. LNG산업의 핵심설비인 LNG 저장탱크는 1986년 상업운전 이후 설계보증 연한인 30년이 경과 되면서 도시가스사업법 개정을 통해 2014년부터 정밀안전진단을 수행하고 있다. 정밀안전진단 시 LNG 저장탱크의 외조 콘크리트에 대해서 상태평가를 할 수 있는 기준이 부재한 상태이다. LNG 저장탱크의 구조적 특성과 기존 토목구조물 상태평가 기준 분석을 통해 저장탱크의 대표부재에 대한 상태평가기준을 개발하였다. 개발된 객관적 상태평가 기준은 LNG 저장탱크의 안전성 및 신뢰성을 향상시키고 보수기준을 제시할 수 있다.

Abstract - South Korea is the world's second-largest importer of LNG and possess about 70 tanks which are in operation by 2017. Thirty years as the design warranty period have exceeded since LNG storage tanks as the core facility of LNG industry were constructed in 1986. The LNG storage tank is under precision safety diagnosis from 2014 due to urban gas business act amendment . There is no criteria of condition evaluation for outer tank of LNG storage tank at the time of precision safety diagnosis. Through analysis of structural characteristic of LNG storage tank and civil structure condition evaluation standards, the criteria of condition evaluation for main members was developed. The criteria of objective condition evaluation can improve safety and reliability of LNG storage tank and suggest matenance criteria.

Key words : LNG outer storage tank, condition evaluation method, criteria of condition evaluation, structural characteristic, precision safety diagnosis

1. 서론

한국은 세계 2위의 LNG 수입국이고 또한 LNG 저장탱크 보유국으로 2017년 기준 약 70기의 LNG 저장탱크가 상업운전중에 있다. LNG 외조 저장탱크 콘크리트에 균열, 철근부식 등 결함이 발생할 경우,

손상 종류 및 정도에 따라 구조물의 붕괴 등 대형 사고 발생 위험이 존재하고 있다. LNG 산업의 핵심설비인 LNG 저장탱크는 1986년 상업운전 이후 설계보증 연한인 30년이 경과 되면서 계속운전 및 발전증지를 통한 개보수에 대하여 많은 관심을 갖게 되었으며 이에 한국가스안전공사에서는 도시가스사업법 개정 및 KGS Code FP451 개정을 통해 2014년부터 정밀안전진단을 수행하고 있다.

LNG 저장탱크 정밀안전진단 구조물 상태평가 방

†Corresponding author:jhkim223@kgs.or.kr

Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas

법은 “시설물의 안전관리에 관한 특별법”(시특법)의 터널 구조물의 점검방법 및 상태평가 기준을 준용하여 평가를 실시하였다[1]. 그러나 터널 구조물과 LNG 저장탱크는 설계하중조건 등의 구조적 특성 및 대표부재가 다르기 때문에 상태평가 기준 수립이 필요하다. 기타 토목구조물(댐, 터널, 교량 등)에는 점검시에 사용되는 상태평가기준이 정립되어 있으나 LNG 저장탱크의 외조 콘크리트에 대한 관련 기준이 국내·외에 부재한 상태이다 [2-3].

본 연구는 정밀안전진단 시 LNG 외조 저장탱크의 구조물에 대해서 보다 합리적으로 상태평가를 할 수 있도록 각 주요 부재 기준을 개발하였다.

LNG 저장탱크의 구조적 특성을 분석하고 정밀안전진단 데이터 검토를 통해 상태평가 대상 저장탱크의 대표부재 및 손상종류를 분류하였다. 기존 토목구조물의 상태평가기준을 분석하고 LNG 저장탱크에 대한 적용성 검토를 통해 가장 적합한 상태평가기준을 선정하였고, LNG 저장탱크의 특성에 맞게 수정 및 보완하여 LNG 저장탱크 상태평가 기준을 개발하였다. 또한, 터널기준을 준용한 기준에 사용된 상태평가 기준과 개발된 LNG 저장탱크 상태평가 기준을 동일 구조물 부재에 대해 적용하여 타당성을 확인하였다.

II. LNG 저장탱크 구조적 특성 분석

국내 LNG 저장탱크는 주로 BS-code와 Euro-code에 의거하여 설계되고 있으며 Fig. 1에서 벽체 바닥판 부분은 외조탱크와 내조탱크로 구분되어있다.



Fig. 1. Form of LNG Storage Tanks.

외조탱크는 콘크리트와 강연선 쉬스관으로 설계(Prestressed concrete, PSC)되었으며, 내조탱크는 맴브레인 또는 9% NI로 구성되어있다. 외조탱크 설계 절차는 설계기준정립, 단면가정, 구조해석, 하중조합, 단면설계, 설계도면작성 및 수량산출로 이루어진다. 외조탱크 설계조건은 Table. 1과 같이 영구하중, 프리스트레스하중, 가변하중의 일반하중뿐만 아니라 비상시 하중에서 내조 누출시 하중, 미사일하중 등과 같은 외부 충돌하중 및 붕괴방지수준지진에 대해 견디도록 설계되었다. LNG와 직접 접하는 내조는 정상 운전 시, LNG의 액압 하중 및 온도하중을 견디게 설계 및 시공된다. 외조탱크의 설계 및 시공에서는 원환 방향의 인장력과 수직방향의 휨모멘트에 대한 안전성을 확보하기 위해 프리스트레스(긴장력)를 도입하였으며 원형 저장탱크에 프리스트레스를 도입하는 경우 저장탱크 단면이 작아져 철근콘크리트를 적용할 때보다 보다 경제적이고 안전한 구조물 건설이 가능하다[4-5].

외조는 돔형 지붕, 링빔, 벽체, 바닥판, 파일 기초 등으로 이루어져 있으며, 돔형 지붕은 철골조 지붕 위에 약 5mm의 Roof Plate를 거치하고 그 위에 약 500mm 두께의 철근콘크리트를 타설하여 완성된다. 돔형 지붕과 벽체 사이에는 지붕에서 전달된 수평

Table 1. Loads of LNG Storage Tank

Division	Applied Load at Outer Tank
A. permanent load	dead load
	load due to drying shrinkage of concrete
B. prestressed load	friction, relaxation, drying shrinkage, creep loss
C. variable load	hydro-test load
	operational LNG load
	load of inner gas
	load according to outer temperature variation
	wind load
	live load applied at the roof(including snow load)
	operating Basis Earthquake
D. emergency load	spillage load
	collision load(missile load)
	Safe Shutdown Earthquake

력을 지지할 수 있도록 링빔이 설치된다[6].

벽체는 두께에 따라 두 부분으로 나눌 수 있다. 상부벽체는 두께가 일정한 완전 원통형이며 하부벽체는 외측의 지름이 아래 방향으로 증가하여 벽체가 두꺼워지는 형상이다. 벽체는 프리스트레스 기법을 도입, 긴장재를 이용하여 수평과 수직 방향으로 긴장된다. 말뚝기초의 직경과 배열은 벽체 하단부와 바닥판 하부에서 상대 부등 침하가 발생하지 않도록 선정해야한다.

III. LNG 외조저장탱크의 대표부재 분류

외조콘크리트 부재는 복합적 요인(콘크리트 열화, 부식, 크리프, 건조수축 및 피로, 환경 등)의 영향을 받고 부재의 재료, 구조적 특성 등에 따라 상이하게

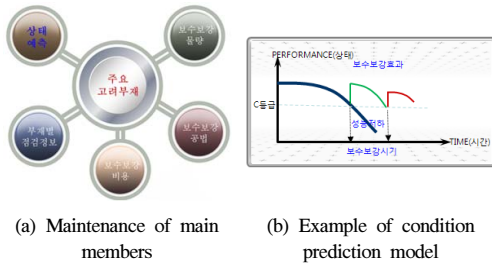


Fig. 2. Importance of main member classification for LNG storage tank.

Table 2. Main members of Outer tank according to tank types

Position	Foundation	Inner tank	Main members	
ground	elevated	9% Ni tank, Membrane tank	upper structure	roof
				wall(including buttress)
			slab	
	lower structure	pedestal		
		foundation		
		bearings	tank bearing	
Bottom heating system	9% Ni tank, Membrane tank	upper structure	roof	
			wall(including buttress)	
		lower structure	foundation	
underground	9% Ni tank, Membrane tank	upper structure	roof	
			wall(including buttress)	

상태변화가 발생하게 된다. 형식별 구성 부재들의 표준화를 통해 다수의 대상 탱크에 대한 방대한 정보처리 시 체계적인 관리 및 분석을 수행한다.

Fig. 2와 같이 주요고려부재 단위로 부재별점검 정보, 보수보강비용 데이터, 보수보강공법, 보수보강물량 및 상태예측모델 개발 등을 수행할 수 있다.

추후 상태등급 DB가 확보되면 보수시점을 예측할 수 있는 상태예측모델을 부재별로 개발 할 수 있고 전체상태등급 산정방법을 통해 전체 LNG저장탱크에 대한 상태도 예측 가능하다.

LNG저장탱크 외조탱크의 구조적 특성을 고려하여 Table. 2와 같이 주요부재를 지상식과 지중식에 따라 구분하였다.

IV. LNG 저장탱크의 손상종류 조사 및 분석

LNG저장탱크에서 실제로 발생하고 있는 손상종류를 확인하기 위해서 2014년도에 정밀안전진단을

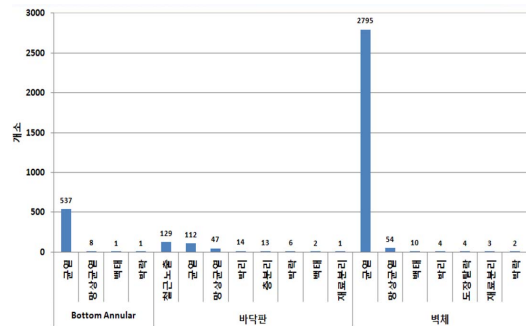


Fig. 3. Distribution for kinds of damage in each member of LNG storage tank.



Fig. 4. Kinds of damages for the wall of LNG storage tank.

LNG 외조 저장탱크의 구조적 특성을 고려한 상태평가 기준 개발



Fig. 5. Kinds of damages for slab and support equipment of LNG storage tank.

완료한 저장탱크 11기(인천 5기, 통영 2기, 평택 4기)의 정밀안전진단 보고서를 이용하였다.

기준에 상태평가는 터널 상태평가기준을 기본으로 적용하고 벽체는 PSC거더 부재의 균열 관련 상태평가기준을 이용하였다. Fig. 3은 부재별 손상종류 개소 분포를 보여주며, Fig. 4와 Fig. 5는 벽체, 바닥판 및 받침에서 발생하는 손상사례이다. 조사된 손상종류가 모두 포함 되도록 상태평가 개발시 고려하였다.

V. LNG 저장탱크 부재별 상태평가 기준 개발

LNG 저장탱크의 부재별 상태평가 기준 개발을 위해서 Fig. 6과 같이 국내 터널, 웅벽, 댐, 건축물, 교량, 원자력발전소 토목구조물의 상태평가기준을 분석하였고 LNG 저장탱크에 대한 적용성 검토를 하였다. 터널, 웅벽 및 댐 구조물의 상태평가의 경우 저장탱크의 벽체 형상과 유사하지만 PSC 구조물이 아닌 철근콘크리트로 구성되어 있는 차이가 있다. 건축물의 경우도 구성요소가 지붕, 벽체, 바닥판으로 유사하지만 PSC 구조물이 아니고 용도 및 환경조건이 다르다. 원전의 경우는 형상 및 구성이 거의 유사한 구조물 형태이지만 상태평가기준이 마련되어 있지 않고 심각한 손상 부위에 대해서 집중관리하는 방식으로 하고 있다. 교량의 경우 형상 및 부재구성이 거의 동일하고 PSC 구조를 이루는 구조적 특성도 유사하여 LNG 저장탱크 상태평가 기준을 개발에 필요한 기초자료로 선정하였다. 교량의 경우 차량하중을 안전하게 견디도록 유지관리하기 위해 보수적인 평가로 되어 있는데,

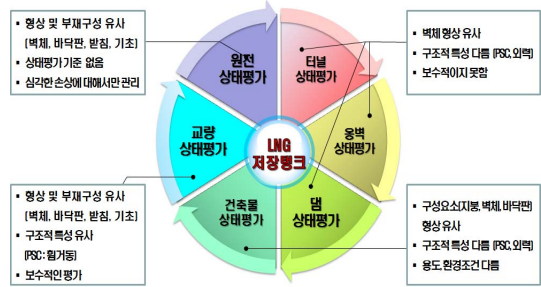


Fig. 6. Domestic Standard Application Analysis.

Table 3. Roof and slab Evaluation Criteria

Criteria	Cracks	Deterioration and Damage
a	○ crack width under 0.1mm	○ no damage
b	○ crack width over 0.1mm ~ under 0.3mm ○ crack rate under 2%	○ damaged surface area under 2%
c	○ crack width over 0.3mm ~ under 0.5mm ○ crack rate over 2% ~ under 10%	○ damaged surface area over 2% ~ under 10% ○ damaged area due to steel corrosion under 2%
d	○ crack width over 0.5mm ~ under 1.0mm ○ crack rate over 10% ~ under 20%	○ damaged surface area over 10% ○ damaged area due to steel corrosion over 2%
e	○ crack width over 1.0mm ○ crack rate over 20%	○ stability decrease due to section reduction of steel corrosion

LNG 저장탱크도 위험물을 저장하는 곳으로 보수적으로 관리할 필요가 있다는 측면도 유사하다[7-10].

따라서, 기존 구조물인 교량 구조물의 상태평가 기준에 대한 적용방안을 LNG 저장탱크의 특성에 맞게 수정 및 보완하여 LNG 저장탱크 상태평가 기준(안)을 개발하였다.

Table.3의 LNG 저장탱크의 주요부재인 상부구조(지붕, 벽체), 하부구조(페데스탈, 기초), 받침의 6개 부재와 콘크리트 재료 내구성 관련 탄산화 및 염화물에 대한 상태평가 기준을 개발하였으며 이중 대표 부재인 지붕, 바닥판, 벽체 부재에 대한 개발내용을 설명한다.

LNG 저장탱크의 지붕과 바닥판은 교량 구조물에서 슬래브(바닥판) 구조물과 유사하기 때문에 교량의 콘크리트 바닥판 상태평가 기준을 준용하였다. 교량구조물과 다르게 저장탱크 바닥판 하부의

받침장치간 거리가 가까워 휨거동에 영향을 받지 않기 때문에 망상균열에 대한 균열폭을 열화 및 손상으로 가정하여 표면손상으로 포함하였다. 교량 구조물의 슬래브(바닥판)는 탱크의 지붕 및 바닥판과 비교하여 상시적으로 차량의 하중을 반복적으로 받는 구조물이기 때문에 보다 보수적으로 기준을 설정했다고 볼 수 있다고 판단된다.

Table. 3은 지붕 및 바닥판 상태평가 기준이며, 평가의 기본이 되는 개별부재는 평가의 최소부재 단위로서 지붕의 원모양에서 1/4인 90도 부채꼴 구분 단위의 지붕을 개별부재로 본다(예, 탱크1의 지붕A, B, C, 및 D). 개별부재의 대표등급은 평가항목 중 최소등급으로 결정한다. 지붕의 대표등급은 4개의 개별부재 중 평균등급으로 한다.

Table. 4는 콘크리트 벽체(버트레스) 상태 평가방법은 프리스트레스트 콘크리트 벽체의 경우에는 텐던으로 인해 철근콘크리트 거더 보다 균열발생 가능성이 적으므로 균열의 평가 기준을 버트레스부(정착부 부근) 균열 등으로 구분하지 않고 하나의 평가 기준을 적용한다. 균열의 경우 LNG 저장탱크 벽체는 외부에 도장이 되어 있어 육안으로 상태점검이 어려움점과 교량과 같이 휨거동을 크게 받지 않는 등의 이유로 균열에 대한 균열폭 기준이 LNG 저장탱크에 적합하도록 개선되었다. 벽체 버트레스 콘크리트가 파손이 심하거나 정착부 파손으로 안정성이 저하되는 경우 평가기준을 “e”로 평가하며, 즉시 보강 또는 개축을 실시한다. PSC 부재는 균열

이 발생하지 않도록 설계하므로, 상태평가의 기본이 되는 개별부재는 평가의 최소부재 단위로서 벽체의 경우 버트레스간 사이의 영역으로 구분하고 각 개별부재에서 수직방향으로 4m씩 점검단위영역으로 나누어 상태평가를 수행한다. 점검단위영역의 등급은 평가항목 중 최소등급으로 한다. 한 개별부재의 등급은 점검단위영역의 등급 중 평균으로 결정한다. 벽체의 대표등급은 개별부재 등의 평균으로 한다.

VI. LNG 저장탱크 상태평가 기준 적용성검토

개발된 LNG 저장탱크 상태평가 기준과 기존 기준에 대하여 2014년 LNG 저장탱크 정밀안전진단 결과를 이용해서 비교 분석하였다. 2014년 정밀안전진단의 상태평가는 LNG 저장탱크 상태평가 기준(안)이 개발되기 전으로 국내 터널 구조물의 상태평가기준과 교량의 PSC 콘크리트 상태평가 기준을 적용하여 정밀안전진단을 수행하였다. 비교 대상시설은 인천 LNG 저장탱크 및 평택 LNG 저장탱크로 선정하였다.

인천 LNG 저장탱크의 벽체 상태등급평가 적용성 검토는 고상식 저장탱크 10만 kl 탱크 6기를 기준으로 비교하였으며, LNG 저장탱크의 상태평가 단위를 구조적으로 구분되는 부벽으로 나누어 6개 영역(2개 부벽 중심 사이의 거리)으로 구분하였다. 기존 정밀안전진단에서 사용하는 상태평가는 벽체부와 바닥판에 대해서 수행하였으며 LNG 저장탱크 상태평가 기준(안)과 기존 상태평가 기준의 각 손상이벤트별 상태등급 차이를 검토하였다.

인천기지 6개 저장탱크에 대해 분석한 결과 총 533 손상 중 43개 손상의 차이가 발생하였다. Fig. 7와 같이 손상차이는 망상균열, 박리, 철근노출 및 층분리에서 발생하였으며, LNG 저장탱크 상태평가 기준으로 적용시 기존 손상에 대한 등급변화가

Table. 4. Con'c Wall Evaluation Criteria

Criteria	Cracks	Deterioration and Damage
a	○ no crack	○ no damage
b	○ crack width under 0.2mm	○ damaged surface area under 2%
c	○ crack width over 0.2mm~under 0.4mm	○ damaged surface area over 2%~under 10% ○ damaged area due to steel corrosion under 2%
d	○ crack width over 0.4mm~under 0.5mm ○ excess occurrences of bending cracks due to reduced load carrying capacity	○ damaged surface area over 10% ○ damaged area due to steel corrosion over 2%
e	○ crack width 0.5mm이상 ○ stability decrease due to excess occurrences of bending cracks or severe deflection	○ stability decrease due to severe damage of concrete or damage of tendon anchorage zone

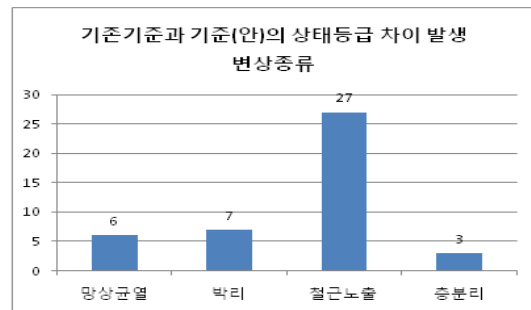


Fig. 7. Compare Existing Criteria(Inchon).

b등급 -> c등급으로 하향하였다. 이것은 개발된 상태평가 기준의 경우 철근부식 손상면적 2%미만이 c등급으로 조정되어 차이가 발생 한 것이다. 평택의 LNG 저장탱크도 유사한 결과를 얻었다.

VII. 결론

LNG 저장탱크 외조콘크리트 부재는 콘크리트 열화, 부식, 크리프, 건조수축 및 피로, 환경 등의 영향을 받고 부재의 특성에 따라 상이하게 상태변화가 발생하게 되기 때문에 구조적 특성에 따라서 주요 부재로 구분하는 것이 필요하다. LNG 저장탱크 형식별로 주요부재를 구분하여 상태평가기준 종류를 분류하였다.

국내의 토목구조물에 대해서 상태평가 기준을 분석 및 검토를 수행하였다. NATM터널(철근콘크리트 라이닝), 콘크리트 옹벽 구조물, 콘크리트 댐의 댐체-댐마루, 콘크리트 건축물, 교량 구조물에 대해서 구조특성과 상태평가방법 및 적용성 검토를 하였다.

상태평가기준 개발은 국내 기존 토목구조물의 평가기준을 분석을 통해 구조물 형상과 부재구성이 유사한 교량 구조물의 상태등급을 준용하였다. 세부평가 내용에서 LNG 저장탱크에 특성에 맞도록 수정하였고 일반적인 콘크리트 손상양상에 대해서는 참고하여 적용하였다. 부재별 상태평가 기준은 상부구조, 하부구조, 받침 및 기타부재로 분류하고, 콘크리트의 탄산화와 염화물에 대한 평가항목을 포함하였다.

개발된 부재별 상태평가 기준의 적합성 및 타당성을 검토하기 위해서 실제 손상 데이터를 적용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 벽체와 바닥판에 대해서 콘크리트 손상 데이터를 이용하여 두 부재에 대해서 검토하였다.

검토대상은 인천지와 평택지의 10개 저장탱크 800여개의 손상을 비교 하였으며 그 결과 인천은 533개중 38개, 평택은 278개중 15개의 상태평가 결과가 차이가 나타났다. 손상차이 분석결과 땅상 균열, 박리, 철근노출 및 층분리 등에서 평가결과 차이가 발생하였으며 LNG 저장탱크 상태평가 기준(안)으로 적용시 기존 손상에 대한 등급변화가 b등급 → c등급으로 하향 되었다. 개발된 상태평가 기준(안)은 기존 터널의 상태평가방법 보다 보수적인 측면으로 작용하는 점이 있으나, 철근부식과 같은 다른 손상에 비해 위험성이 있는 결함이 발생한 경우에 상태등급을 저평가하게 되는데 이런 점은 합리적인 평가라고 판단되며 부재에 대한 상태평가

등급도 손상을 고려했을 때 적절한 수준으로 평가 되었다.

이 연구로 통해서 상태평가기준(안)이 마련되었고 향후 연구로는 부재별 상태평가등급 데이터가 확보가 된 후에 전체 LNG 저장탱크 구조물의 상태평가 방안에 대해서 개발할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 플랜트기술고도화사업 LNG 플랜트사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] Special Act on the Safety Management of the facility, 2016.
- [2] American Petroleum Institute, Tank Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction, 2003.
- [3] ACI 201.1R, Guide for Making a Condition Survey of Concrete in Service, 1992.
- [4] British Standards Institution, Flat-bottomed, Vertical, Cylindrical Storage Tanks for Low Temperature Service, BS 7777, 1993
- [5] Medhat A. Haroun and George W. Housner, "Dynamic Characteristics of Liquid Storage Tanks, Journal of Engineering Mechanics Division", ASCE, Vol. 188, No. EM5, pp 783~800, 1982
- [6] Reg. Guide 1.199, Anchoring Components and Structural Supports in Concrete, US NRC.
- [7] ACI 349.3R, Evaluation of Existing Nuclear Safety -Related Concrete Structures, 1996.
- [8] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea Infrastructure Safety Corporation, Detailed guidelines manual of safety inspection and precision safety diagnosis(commonness), 2011
- [9] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea Infrastructure Safety Corporation, Detailed guidelines manual of safety inspection and precision safety diagnosis(facility), 2011
- [10] Japan Construction Civil Institute, inspection know-how of road structure(civil structure), 1985