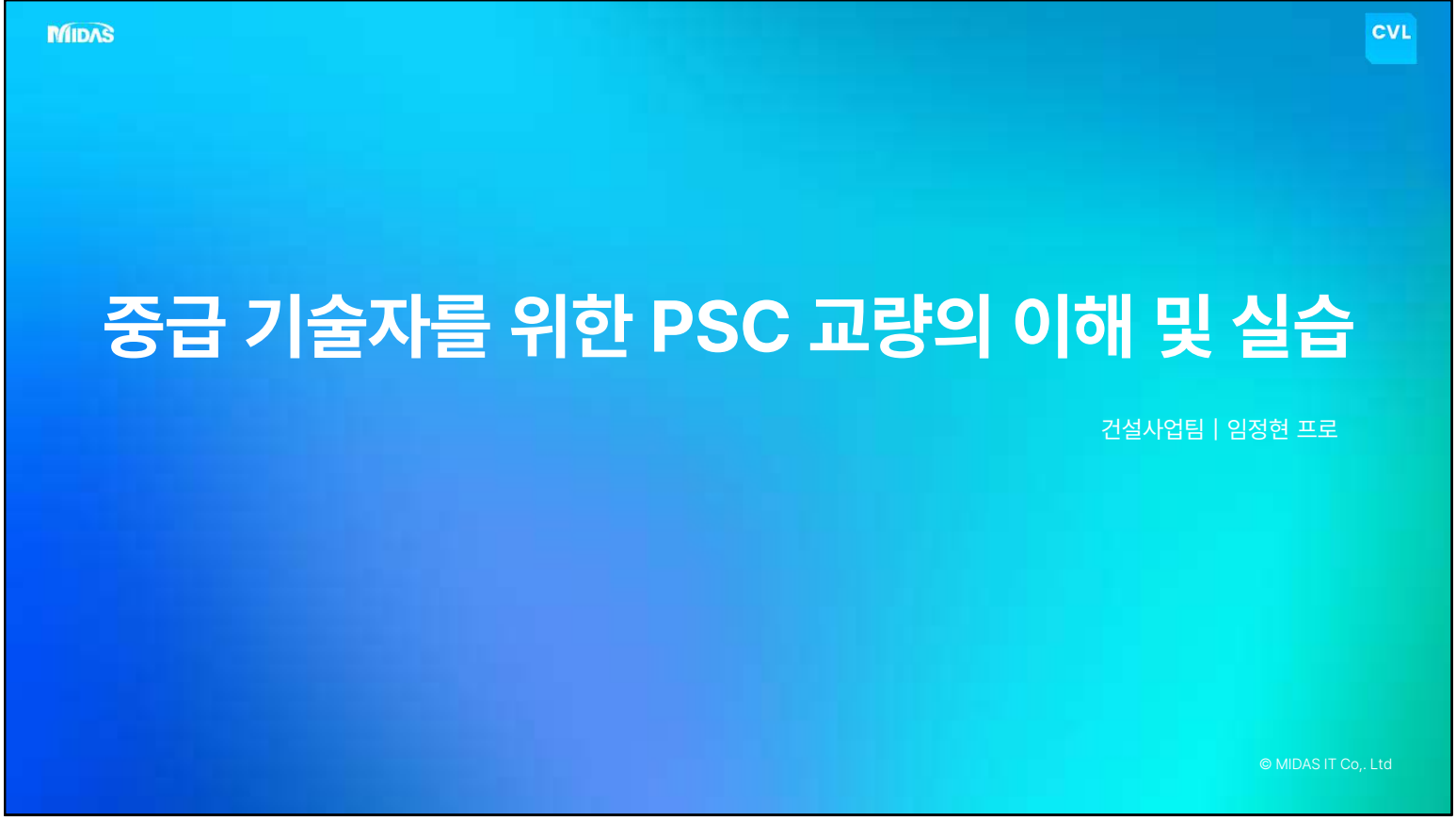
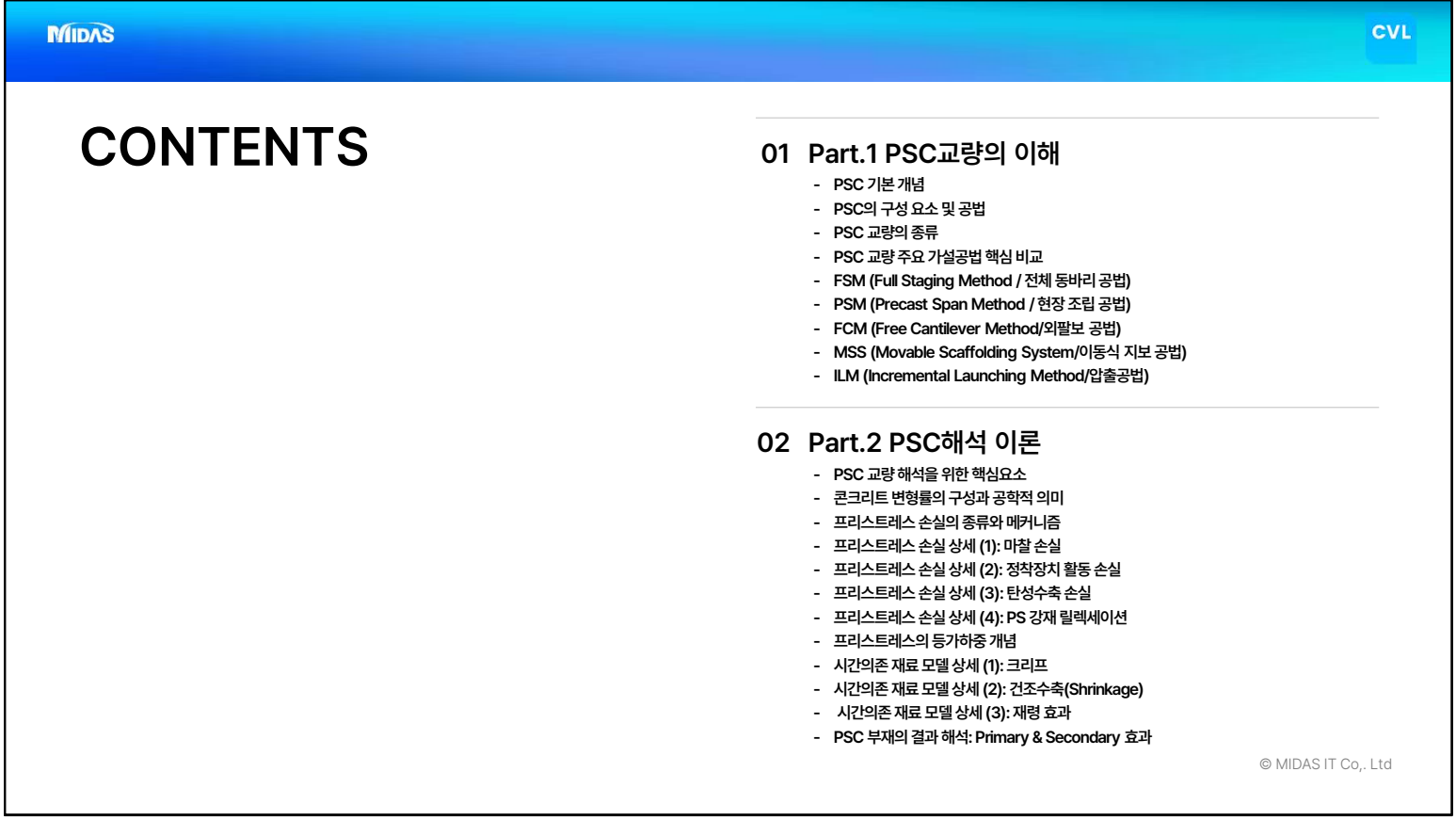


안녕하십니까. '중급 기술자를 위한 PSC 교량의 이해 및 실습' 교육 과정에 오신 것을 환영합니다.

오늘 교육을 진행할 마이다스 아이티 건설 사업팀 임정현 프로 입니다.

본 과정은 PSC 교량에 대한 실무 역량을 한 단계 높이고자 하는 엔지니어 여러분을 위해 준비되었습니다.



오늘 교육에서 다룰 내용을 간략히 소개해 드리겠습니다.

먼저 Part 1, 'PSC 교량의 이해'에서는 PSC의 기본 개념과 종류, 그리고 FSM, PSM, FCM과 같은 주요 가설 공법들을 비교하며 알아보겠습니다.

이후 Part 2, 'PSC 해석 이론'에서는 PSC 해석의 핵심요소와 프리스트레스 손실, 그리고 크리프, 건조수축과 같은 시간의존 효과에 대해 학습하고,

Primary와 Secondary 효과를 통해 결과를 분석하는 방법으로 마무리하겠습니다.

그럼, Part 1부터 시작하겠습니다."

MIDAS

CVL

Part.1 PSC교량의 이해

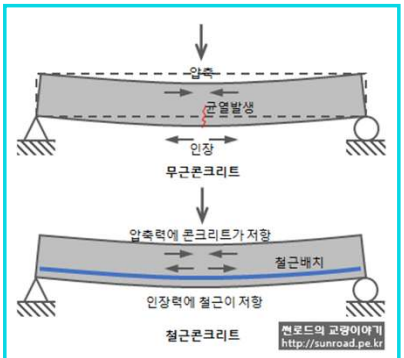
PSC 기본 개념

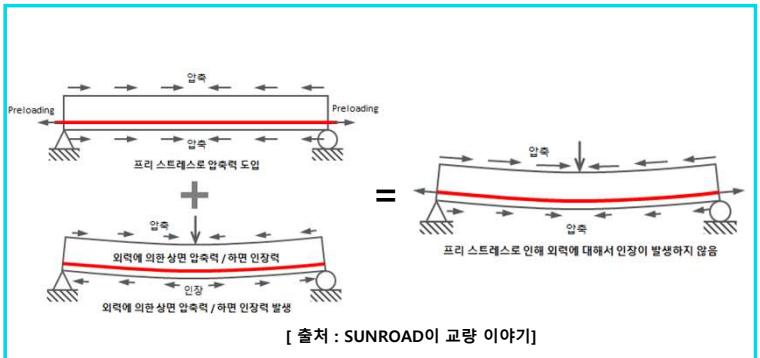
1. PSC (Prestressed Concrete)의 정의

- 외력(하중)에 의해 발생할 '인장 응력'을 상쇄시키기 위함.
- 고강도 강재(Tendon)를 이용, 콘크리트 단면에 미리 '압축 응력(Prestress)'을 인위적으로 도입한 콘크리트 구조.
- 콘크리트의 취약점인 인장 강도를 극복하는 가장 적극적인 방법.

2. RC(철근콘크리트) vs PSC(프리스트레스트 콘크리트)

- RC : 균열 발생을 '허용'하고, 인장부에 철근을 배치하여 저항하는 수동적(Passive) 개념.
- PSC : 균열 발생을 '원천적으로 억제'하기 위해 압축력을 미리 가하는 능동적(Active) 개념.





[출처 : SUNROAD이 교량 이야기]

© MIDAS IT Co., Ltd

2

처음으로, PSC의 가장 기본적인 개념부터 시작하겠습니다.

PSC, 즉 프리스트레스트 콘크리트란, 외력에 의해 필연적으로 발생하는 '인장 응력'을 상쇄시키기 위해, 고강도 강재인 텐던을 이용해 콘크리트 단면에 미리 강력한 '압축 응력'을 도입한 구조입니다.

이는 인장력에 취약한 콘크리트의 단점을 가장 적극적으로 극복하는 방법입니다.

우리가 흔히 아는 RC, 즉 철근콘크리트는 균열 발생을 '허용'하고 그 균열을 철근으로 제어하는 **수동적(Passive) 개념**입니다.

반면, PSC는 균열 발생 자체를 '원천적으로 억제'하기 위해 압축력을 미리 가하는 **능동적(Active) 개념**이죠.

이처럼 균열에 대한 근본적인 접근 방식의 차이가, PSC 구조물이 더 긴 경간, 더 얇은 단면을 가능하게 하는 핵심 원리입니다.

MIDAS

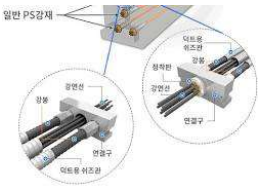
CVL

Part.1 PSC교량의 이해

PSC의 구성 요소 및 공법

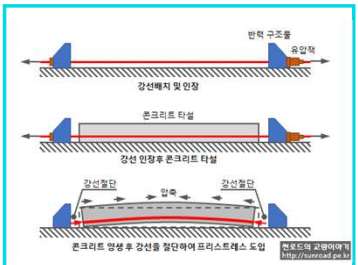
1. PSC의 핵심 구성 요소

- 고강도 강재(Tendon) : 일반 철근(400MPa) 대비 4~5배 높은 항복강도 (1,600~1,860MPa)를 가진 강선, 강봉, 강연선 사용.
- 고강도 콘크리트 : 최소 fck = 35~40MPa 이상의 높은 압축강도 요구.
- 쉬스관(Sheath) : 포스트텐션 방식에서 강재가 들어갈 통로를 확보하는 파형관.
- 정착구(Anchorage) : 긴장된 강재를 부재에 고정시켜 힘을 전달하는 장치.

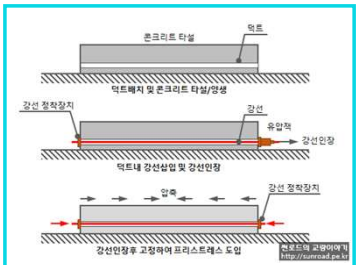


2. 프리스트레스 도입 방식

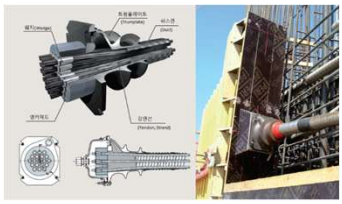
- 프리텐션 (Pre-tensioning) : 강재 긴장 → 콘크리트 타설 → 양생 → 긴장력 해제 순서. (주로 공장 제작)
- 포스트텐션 (Post-tensioning) : 콘크리트 타설/양생 → 강재 삽입 → 긴장 및 정착 → 그라우팅 순서. (대부분의 교량 현장 시공)



[프리텐션]



[포스트 텐션]



[포스트 텐던]

© MIDAS IT Co., Ltd

이러한 PSC를 구현하기 위해서는 특별한 재료가 필요합니다.

일반 철근보다 4~5배 강력한 '고강도 강재(텐던)'와, 그 강력한 힘을 견딜 수 있는 '고강도 콘크리트' 입니다.

그리고 포스트텐션 방식에서는 텐던이 지나가는 경로인 '쉬스관'과, 그 힘을 콘크리트에 전달하는 '정착구'가 핵심적인 역할을 합니다.

힘을 도입하는 방식은 크게 두 가지입니다.

왼쪽의 '프리텐션'은 공장에서 텐던을 먼저 긴장시킨 후 콘크리트를 타설하는 방식으로, 품질 관리가 용이하여 규격화된 거더 생산에 주로 사용됩니다.

오른쪽의 '포스트텐션'은 현장에서 콘크리트가 굳은 후 텐던을 삽입하여 긴장하는 방식으로, 복잡한 형상이나 장대 교량 등 현장 시공에 유연하게 적용할 수 있습니다.

우리가 앞으로 다룰 대부분의 교량은 바로 이 포스트텐션 방식을 사용합니다.

MIDAS

CVL

Part.1 PSC교량의 이해

PSC 교량의 종류

1. 단면 형상에 따른 분류

- **PSC I형 거더교**

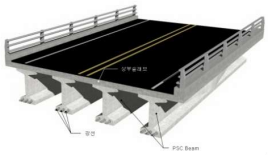
  I자형 단면의 거더를 공장에서 제작 후 현장에서 거치. 국내에서 가장 보편적인 중소경간 교량 형식.

- **PSC Box 거더교**

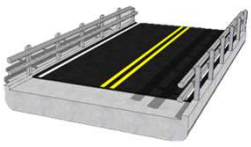
  상자형(Box) 단면으로 비틀림 강성이 우수. 곡선교, 장경간 교량에 주로 적용. 가설 공법에 따라 세분화.

- **PSC 슬래브교**

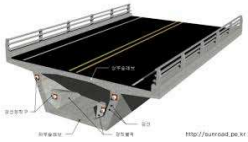
  주형 없이 슬래브만으로 구성. 단경간 또는 중공 형태로 적용.



[PSC I형 거더교]



[PSC 슬래브교]



[PSC Box 거더교]

[원효대교 & PSC Box 거더교 & FCM 공법]

© MIDAS IT Co., Ltd

이러한 PSC 기술은 단면 형상에 따라 우리에게 익숙한 **I형 거더교**부터, 비틀림에 대한 저항성이 우수하여 장경간이나 곡선교에 유리한 **박스 거더교**까지 다양하게 적용됩니다.

또한 한강의 주요 교량 중 하나인 원효대교에서도 PSC 기술이 사용되죠.

하지만 PSC 교량 기술의 본질은, 완성된 모양보다는 **'어떻게 건설하는가', 즉 가설 공법에 따라 그 특성과 해석 방법이 극명하게 달라진다**는 점입니다.

다음 장부터 이 가설 공법들을 비교하며 심도 있게 알아보겠습니다.

MIDAS

CVL

Part.1
PSC교량의 이해

PSC 교량 주요 가설공법 핵심 비교

구분 항목	FSM (동바리 공법)	FCM (현장타설 외팔보 공법)	MSS (이동식 지보 공법)	ILM (압출 공법)	PSM (프리캐스트 분절 공법)
공법 개념	지상에서부터 동바리를 설치하여 상부구조 전체를 현장 타설	교각에서 이동식 작업차(Form Traveller)로 좌우 평형을 맞추며 현장 타설	한 경간 단위의 이동식 장비(MSS) 상에서 상부구조를 현장 타설	교대 후방 제작장에서 제작한 세그먼트를 유압잭으로 밀어내는 방식	공장에서 제작한 PSC 세그먼트를 현장에서 조립/연결하는 방식
시공 단위	1개 경간 또는 전체	1개 세그먼트 (Segment, 3~5m)	1개 경간 (Span, 30~60m)	1개 세그먼트 (Segment, 15~30m)	1개 세그먼트 (Segment, 2~4m)
주요 장비	동바리 (Scaffolding, System Support)	폼 트래블러 (Form Traveller)	이동식 비계 시스템 (Movable Scaffolding System)	런치 노즈 (Launching Nose), 유압잭 (Jack), 제작장	런치 갠트리 (Launching Gantry), 크레인, 운반 장비
장점	• 시공이 간단하고 공사비 저렴 • 특수 장비 불필요	• 동바리 불필요 (해상/계곡 유리) • 장경간 시공 가능 • 하부 조건 제약 없음	• 기계화 시공으로 공기 단축 • 품질 관리 용이 (반복 작업) • 높은 시공 안전성	• 고품질 확보 (공장식 제작) • 기상 영향 적고 안전성 최상 • 하부 환경 훼손 최소화	• 초고품질 확보 (공장 제작) • 현장 공기 획기적 단축 • 현장 작업 최소화 (안전, 환경)
단점	• 하부 교통/지형 제약 큼 • 공기가 길고 안전에 취약 • 고교각, 해상/하천 적용 불가	• 고가의 특수 장비 필요 • 정밀한 구조 해석 및 시공 관리 • 공정이 복잡하고 기상 영향 큼	• 초고가의 장비 투자비 • 다경간 교량이 아니면 비경제적 • 급곡선, 경사 변화에 제약	• 직선 또는 등곡선 선형만 가능 • 넓은 제작장 부지 필요 • 압출 중 부가 응력 발생	• 세그먼트 제작/운반/보관 비용 • 대규모 제작장 및 특수 운송장비 • 세그먼트 간 접합부 관리 중요
적정 경간장	30m 이하	80m ~ 250m	40m ~ 70m	40m ~ 70m	40m ~ 60m (경간 단위 가설 시) ~ 150m (캔틸레버 가설 시)
주요 적용처	저교각의 평지 육상 구간	깊은 계곡, 하천, 해상 횡단 교량, 장경간 교량	다경간이 연속되는 고속도로, 고속철도, 접속교	직선 또는 완만한 곡선의 계곡/하천 횡단 장대교량	도심지, 환경보호구역, 해상 교량 등 현장 작업 최소화가 필요한 곳
선형 제약	비교적 자유로움	자유로움 (곡선, 경사 변화 가능)	완만한 곡선/경사 가능	매우 제약적 (직선 또는 등곡선만 가능)	자유로움 (사전에 세그먼트 제작 시 반영)

© MIDAS IT Co., Ltd

PSC 교량 건설에 사용되는 대표적인 5가지 공법을 하나의 표로 정리했습니다.

절대적으로 우월한 공법은 없으며, 각 프로젝트의 지형, 경간장, 공기, 예산, 선형 등 모든 조건을 종합적으로 분석해서 최적의 공법을 선정하는 것이 엔지니어의 핵심 역량입니다.

가장 전통적인 **FSM**은 저렴하지만 하부 조건의 제약을 받고, 이를 극복한 **FCM**은 동바리 없이 시공 가능해 장경간에 유리하지만 정밀한 해석과 관리가 필요합니다.

MSS와 **PSM**은 시스템을 이용한 고속 시공법인데, MSS는 '움직이는 현장 공장'처럼 한 경간씩 현장 타설하고, PSM은 '레고 블록 조립'처럼 공장에서 만든 조각을 현장에서 조립하여 공기를 획기적으로 단축시킵니다.

마지막으로 **ILM**은 교량 뒤편에서 완성품을 밀어내는 독특한 방식으로 품질과 안전성이 뛰어나지만, 직선또는 등곡선에 선형에만 적용 가능한 명확한 한계가 있습니다.

MIDAS

CVL

Part.1 PSC교량의 이해

FSM (Full Staging Method / 전체 동바리 공법)

1. 공법 개요

- 교량의 상부구조 전체를 지지하는 임시 지지 구조물(동바리)을 지상에서부터 설치.
- 설치된 동바리 위에서 거푸집 조립, 철근 배근, 콘크리트 타설을 통해 상부구조를 완성하는 가장 전통적인 현장타설 공법.

2. 주요 특징

- Advantages -

- 구조 해석 및 시공 방법이 단순하고 기술적 위험 부담이 적음.
- 고가의 특수 장비가 필요 없어, 적용 조건만 맞으면 가장 경제적임.

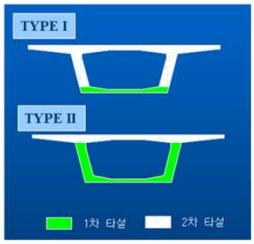
- Disadvantages -

- 동바리 설치/해체에 많은 공사 기간과 비용, 인력이 소요됨.
- 하부 지형/교통/환경 조건에 절대적인 제약을 받음 (고교각, 하천, 해상, 도심지 적용 불가).
- 동바리 구조물의 안전사고 및 품질 저하 위험 상존.

[FSM 공법]

3. 주요 적용 대상

- 교각 높이가 낮고(통상 15m 이하) 지반이 안정된 평탄한 육상 구간에 한정적으로 적용.



[FSM 공법]

© MIDAS IT Co., Ltd

다음은 각 공법에 대한 상세 설명입니다.

첫번째는 FSM공법 입니다. 즉 전체 동바리 공법은 사진처럼 교량 하부를 임시 구조물로 완전히 받쳐놓고 상부구조를 만드는 가장 전통적인 방식입니다.

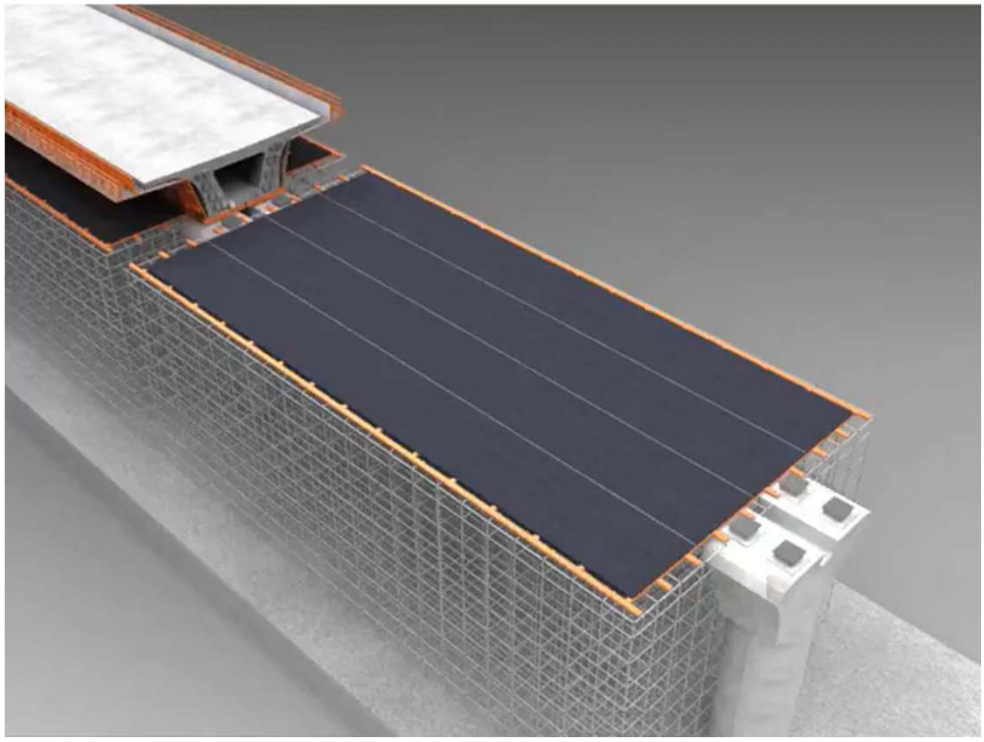
고가의 특수 장비가 필요 없어 조건만 맞으면 가장 경제적이지만, 동바리를 설치할 수 없는 깊은 계곡이나 하천, 도심지 등 하부 조건에 절대적인 제약을 받는다는 명확한 한계가 있습니다.

MIDAS

CVL

Part.1
PSC교량의 이해

FSM
(Full Staging Method / 전체 동바리 공법)



[출처 : 국가철도공단]

© MIDAS IT Co., Ltd

FSM공법의 시공 과정을 영상으로 시청하겠습니다.

MIDAS

CVL

Part.1 PSC교량의 이해

PSM (Precast Span Method / 현장 조립 공법)

1. 공법 개요

- 교량 상부구조를 공장 또는 현장 인근 제작장(Precast Yard)에서 미리 제작.
- 제작된 세그먼트(Segment) 또는 한 경간 단위의 거더(Span)를 현장으로 운반하여 조립/연결하는 공법.
- 가설 방식에 따라 대형 크레인 방식과 론칭 거더(Launching Gantry) 방식으로 나뉨.

2. 주요 특징

- Advantages -

- 공장 제작을 통한 균일한 고품질/고강도 확보 및 하부공사와 동시 제작으로 공사기간 획기적 단축
- 현장 위험 작업 및 환경 영향 최소화 / 도심지 및 운행 도로상 교통 통제 최소화

- Disadvantages -

- 제작장, 운반/가설 장비 등 높은 초기 투자비 발생
- 중량/대형 세그먼트 운반에 따른 경로 및 시간 제약
- 세그먼트 간 접합부의 높은 정밀도 및 시공 난이도 요구

[PSM 제작장]

3. 주요 적용 대상

- 도심지 교량, 해상 교량, 공기 단축이 절대적으로 필요한 프로젝트.
- 동일한 경간이 반복되는 장대 교량 및 접속교 구간.

[PSM 공법]

© MIDAS IT Co., Ltd

8

그 다음은 PSM공법입니다. 미리 만들어 현장에서 조립'하는 공법입니다.

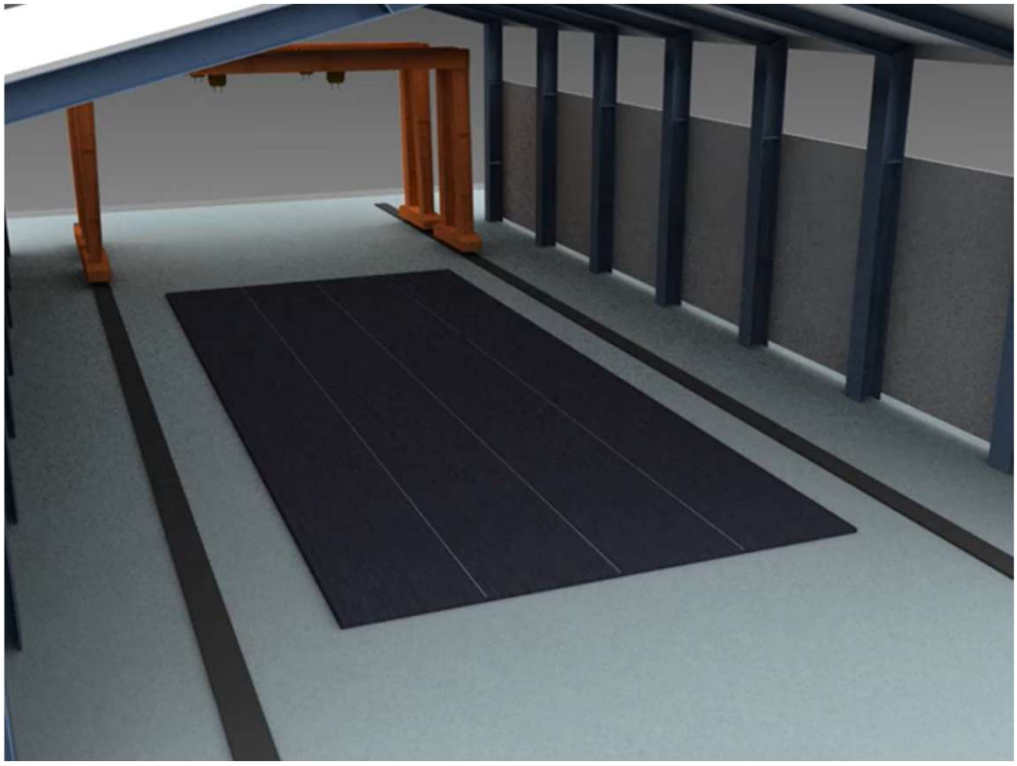
통제된 환경의 제작장에서 PSC 세그먼트를 사전 제작한 뒤, 현장에서는 론칭 갠트리 같은 특수 장비로 조립만 하는 방식이죠.

공장 제작을 통해 품질을 확보하고, 하부 공사와 동시에 상부를 제작하여 현장 공기를 획기적으로 단축할 수 있어 도심지나 해상 교량에 매우 효과적입니다.

MIDAS

Part.1
PSC교량의 이해

PSM
(Precast Span Method / 현장 조립 공법)



[출처 : 국가철도공단]

CVL

© MIDAS IT Co, Ltd

PSM공법의 시공 과정을 영상으로 시청하겠습니다.

MIDAS

CVL

Part.1 PSC교량의 이해

FCM (Free Cantilever Method/ 외팔보 공법)

1. 공법 개요

- 교각 위에 주두부(Pier Table)를 제작한 후, 이동식 작업차인 폼 트래블러(Form Traveller)를 이용하여 좌우 평형을 유지하며 한 세그먼트(Segment, 3~5m)씩 순차적으로 시공.
- 캔틸레버(외팔보) 상태로 양쪽에서 뻗어 나온 구조물을 중앙에서 연결(Key Segment)하여 한 경간을 완성.

2. 주요 특징

- Advantages -

- 가설 동바리가 전혀 필요 없어 하부 지형 조건에 제약이 없음 (깊은 계곡, 해상 최적).
- 80m ~ 250m의 장경간 시공에 매우 효율적.

- Disadvantages -

- 폼 트래블러 등 고가의 특수 장비 필요.
- 시공 단계별로 구조계가 계속 변하므로, 처짐과 응력에 대한 정밀한 해석 및 시공 관리 필수.
- 공정이 다소 복잡하고 기상(특히 바람)의 영향을 많이 받음.

3. 주요 적용 대상

- 원효대교, 서해대교, 인천대교 접속교 등 다수.

[Form Travler (F/T)]

[FCM 공법]

© MIDAS IT Co, Ltd

그 다음은 오늘 실습에서 다룰 외팔보 공법입니다. 이 공법의 핵심은 '폼 트래블러'라는 이동식 작업차입니다.

교각 위 주두부를 시작으로, 이 장비를 이용해 좌우 평형을 맞추며 한 세그먼트씩 캔틸레버 형태로 교량을 뻗어나가는 방식입니다.

동바리가 필요 없어 깊은 계곡이나 해상 장경간 교량에 최적화되어 있지만 ,

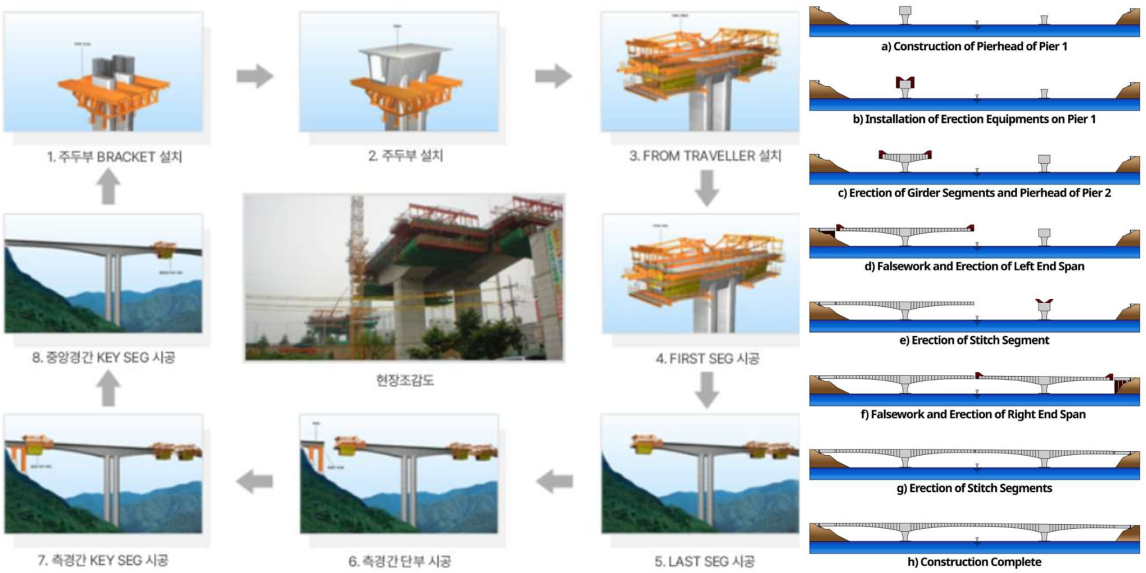
시공 중 구조계가 계속 변하므로 정밀한 처짐 및 응력 관리가 필수적인, 고도의 기술력이 요구되는 공법입니다.

MIDAS

CVL

Part.1
PSC교량의 이해

FCM
(Free Cantilever Method/ 외팔보 공법)



[출처 : 한국교량]

© MIDAS IT Co., Ltd

FCM공법의 시공 프로세스 이며,

MIDAS

CVL

Part.1
PSC교량의 이해

FCM
(Free Cantilever Method/ 외팔보 공법)

[출처 : 리얼스튜디오]

© MIDAS IT Co, Ltd

영상으로 시청하겠습니다.

MIDAS

CVL

Part.1 PSC교량의 이해

MSS (Movable Scaffolding System/ 이동식 지보 공법)

1. 공법 개요

- 한 경간 길이의 거대한 이동식 비계(Scaffolding)를 교각에 거치.
- 비계 내부에서 한 경간 전체의 상부구조를 일괄 타설한 후, 다음 경간으로 이동하여 시공을 반복하는 공법.
- 장비 형태에 따라 상부 이동식(Overhead), 하부 이동식(Underslung)으로 구분.

2. 주요 특징

- Advantages -

- 한 경간 단위의 반복 작업으로 공정이 단순하고 기계화 시공이 가능하여 공기 단축에 매우 유리.
- 지상 작업이 최소화되어 안전성이 높고, 전천후 시공이 가능.

- Disadvantages -

- 수백억 원에 이르는 고가의 장비 제작 및 설치 비용.
- 최소 7~8경간 이상의 장대교량이 아니면 비경제적.
- 장비의 규모가 커서 급한 곡선이나 경사 변화 구간에는 적용이 어려움.

[Overhead]

[Underslung]

3. 주요 적용 대상

- 고속도로, 고속철도 등 경간 구성이 일정한 다경간 연속 교량.

© MIDAS IT Co., Ltd

그 다음으로는 이동식 지보 공법은 '움직이는 교량 공장'으로 비유할 수 있습니다.

사진의 거대한 장비가 한 경간 전체를 감싼 뒤, 그 안에서 상부구조를 일괄 타설하고 다음 경간으로 이동하여 시공을 반복하는 방식입니다.

기계화된 반복 작업으로 공기 단축과 안전성 확보에 매우 유리하여 , 경간이 일정한 고속도로나 고속철도 교량에 주로 사용됩니다.

MIDAS

CVL

Part.1
PSC교량의 이해

MSS (Movable Scaffolding System/ 이동식 지보 공법)

[출처 : 한국교량]

© MIDAS IT Co., Ltd

MSS공법의 시공 프로세스 이며,

MIDAS

Part.1
PSC교량의 이해

MSS (Movable Scaffolding System/ 이동식 지보 공법)

CVL

[출처 : 국가철도공단]

© MIDAS IT Co, Ltd

영상으로 시청하겠습니다.

MIDAS

CVL

Part.1 PSC교량의 이해

ILM (Incremental Launching Method/ 압출공법)

1. 공법 개요

- 교량 한쪽 끝(교대 후방)에 고정된 제작장(Casting Yard)을 설치.
- 제작장에서 상부구조를 일정한 길이(15~30m)의 세그먼트로 나누어 제작.
- 완성된 세그먼트를 유압잭으로 밀어내고, 그 뒤에 다음 세그먼트를 이어 붙여 연속적으로 압출하는 공법.

2. 주요 특징

- Advantages -

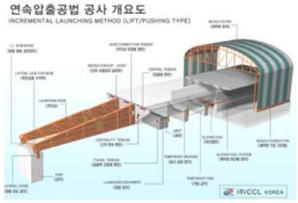
- 고정된 제작장에서 작업하므로 품질 관리가 완벽하고 기상 영향을 거의 받지 않음.
- 동바리가 불필요하고, 모든 작업이 지상에서 이루어져 안전성이 매우 높으며, 환경훼손 최소화

- Disadvantages -

- 교량의 선형이 직선이거나 반지름이 일정한 원곡선이어야만 적용 가능.
- 압출 시 캔틸레버 상태로 밀려나가며 발생하는 부가적인 휨모멘트와 전단력을 견디도록 단면 설계가 필요하여 비경제적일 수 있음.
- 넓은 제작장 부지 확보가 필수적.

3. 주요 적용 대상

- 서강대교, 금곡천교 등.



[ILM 공법]

[ILM 공법]

© MIDAS IT Co., Ltd

16

마지막으로 즉, 압출 공법입니다. 교대 뒤편의 고정된 제작장에서 한 세그먼트씩 제작하여, 유압잭을 통해 전방으로 밀어내는 방식입니다.

모든 작업이 통제된 지상에서 이루어져 / 품질과 안전성이 매우 높고 환경 훼손을 최소화할 수 있다는 장점이 있습니다.

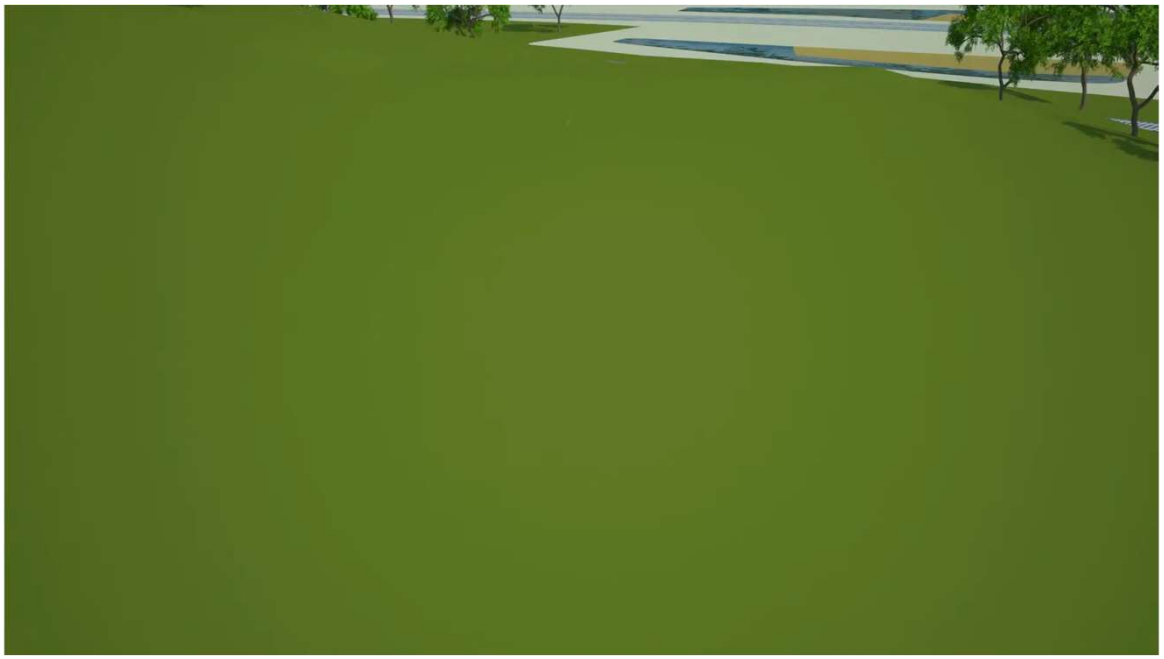
다만, 밀어서 시공해야 하므로 교량의 선형이 직선이거나 일정한 곡률을 가져야 한다는 명확한 적용 한계가 있습니다.

MIDAS

CVL

Part.1
PSC교량의 이해

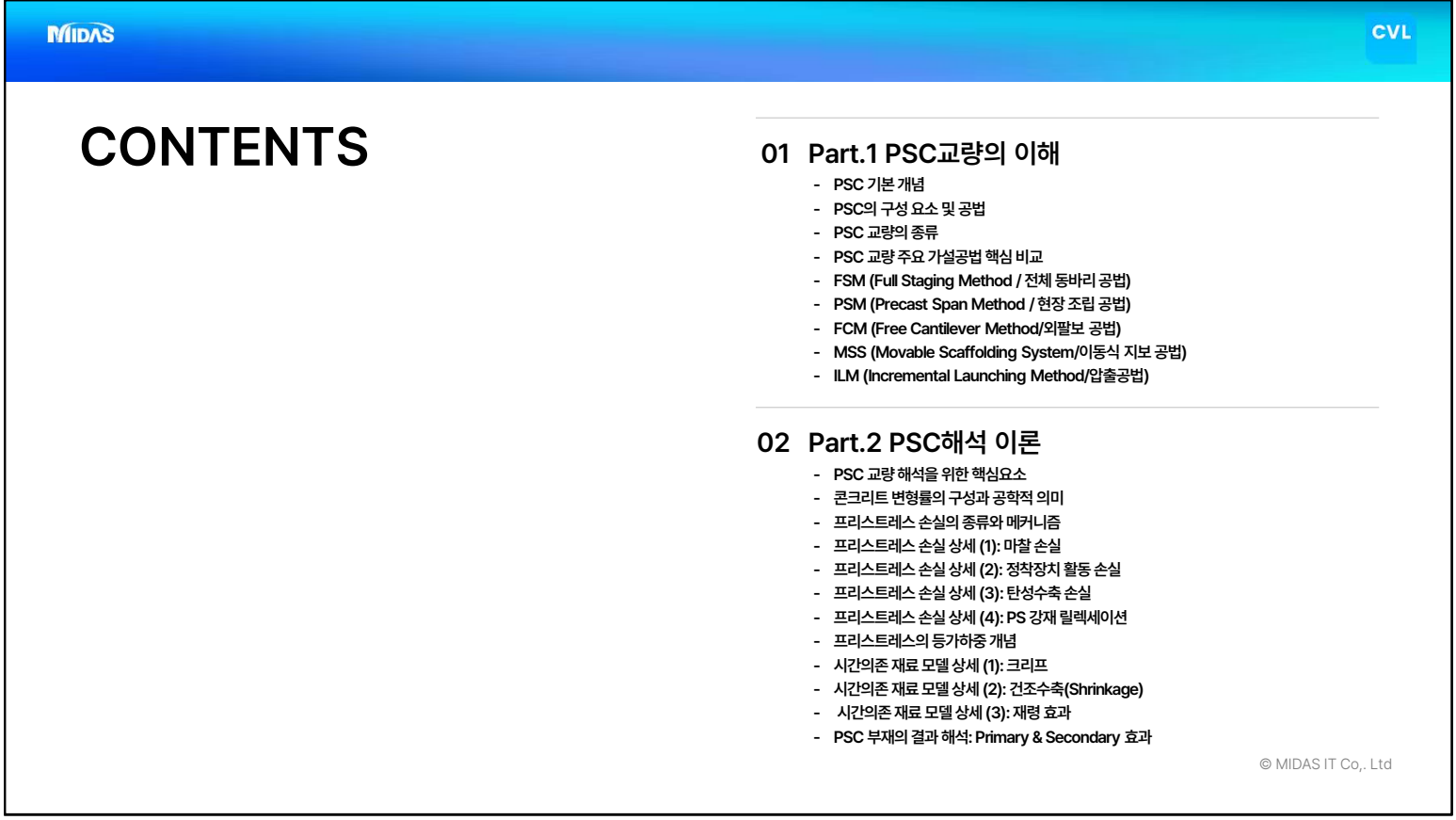
ILM (Incremental Launching Method/ 압출공법)



[출처 : M & M Civil Engineer]

© MIDAS IT Co, Ltd

ILM공법의 시공 과정을 영상으로 시청하겠습니다.



지금부터는 본 교육의 핵심이라 할 수 있는 **'PSC의 해석 이론'** 파트로 넘어가겠습니다.

앞서 저희가 다양한 가설 공법들을 살펴본 이유는, PSC 교량의 해석이 단순히 완성된 다리의 모양만 가지고는 절대 불가능하기 때문입니다.

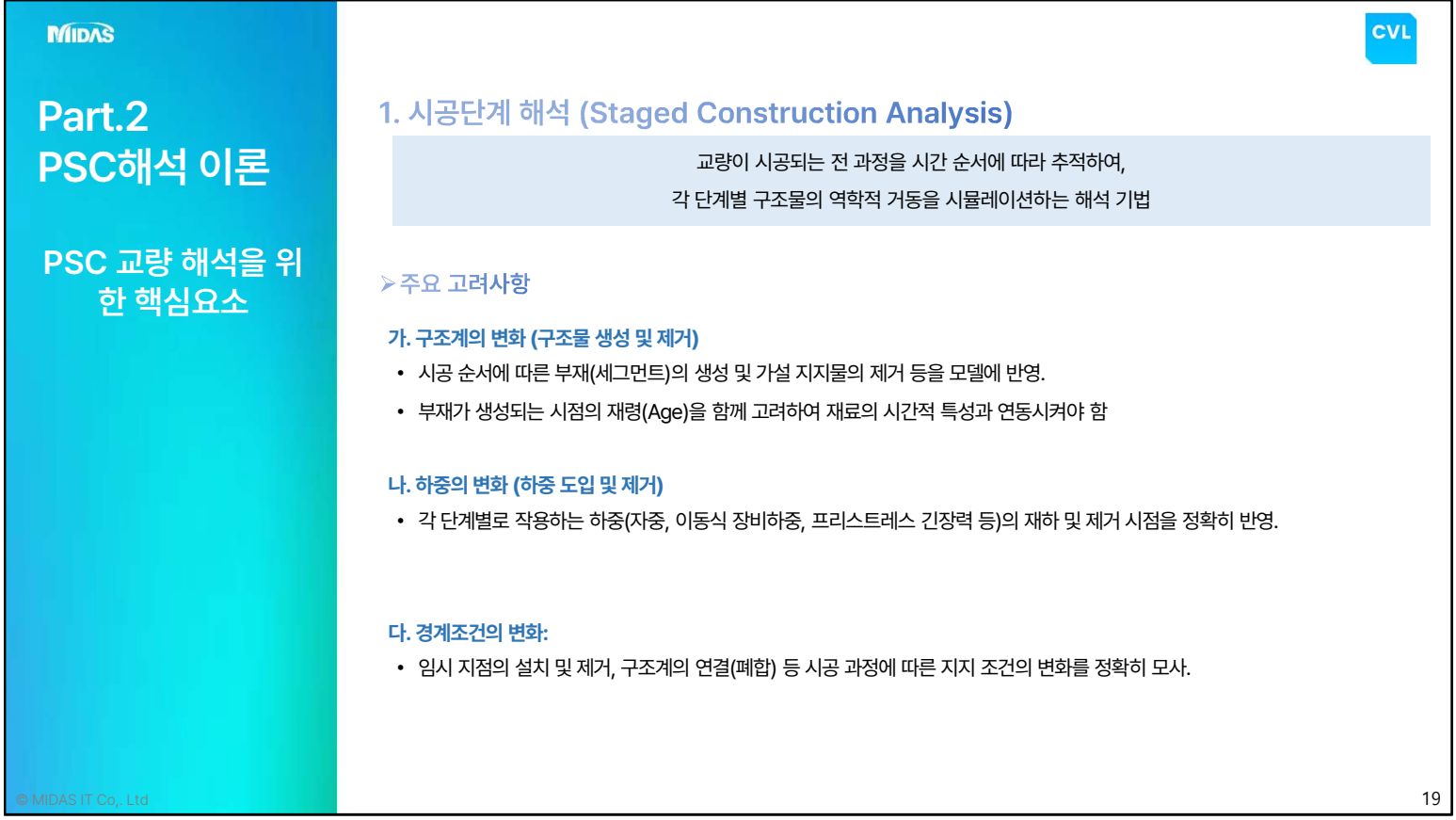
PSC 교량의 최종 거동은 어떤 시공 과정을 거쳤는지, 그리고 수십 년의 시간 동안/ 재료가 어떻게 변해가는지에 따라 완전히 달라집니다.

따라서 PSC 해석은, 이 모든 과정을 종합적으로 고려하는 매우 정교한 시뮬레이션에 가깝습니다.

다음 페이지부터 우리는 이 정밀 해석을 위해 반드시 이해해야 할 세 가지 핵심요소를 하나씩 심도 있게 다루겠습니다.

7.

바로, **시공단계 해석, 프리스트레스 해석, 그리고 시간의존 재료 모델**입니다. 이 세 가지가 PSC 해석의 알파이자 오메가라고 할 수 있습니다.



첫 번째 핵심요소, '시공단계 해석'입니다. 이것은 PSC 해석의 가장 근간이 되는 해석의 '틀'이자 '엔진'입니다.

PSC 교량의 최종 응력과 변위는 어떤 순서로 시공했는지에 따라 완전히 달라지는 **'경로 의존적'** 특성을 가지는데, 바로 이 특성을 구현하는 유일한 방법이 시공단계 해석입니다.

이를 위해 엔지니어는 실제 공사와 똑같이, 컴퓨터 모델 안에서 시간의 흐름에 따라 다음 세 가지를 정확히 정의해야 합니다.

첫번째는 구조계의 변화입니다. 각 단계별로 어떤 세그먼트가 새로 만들어지고, 역할을 다한 가설 지지물은 언제 사라지는지를 정의합니다.

여기서 중요한 점은, 부재가 생성되는 시점의 나이, 즉 **'재령'을 함께 고려**하여, 뒤에서 다룰 재료의 시간적 특성과 연동시켜야 한다는 것입니다.

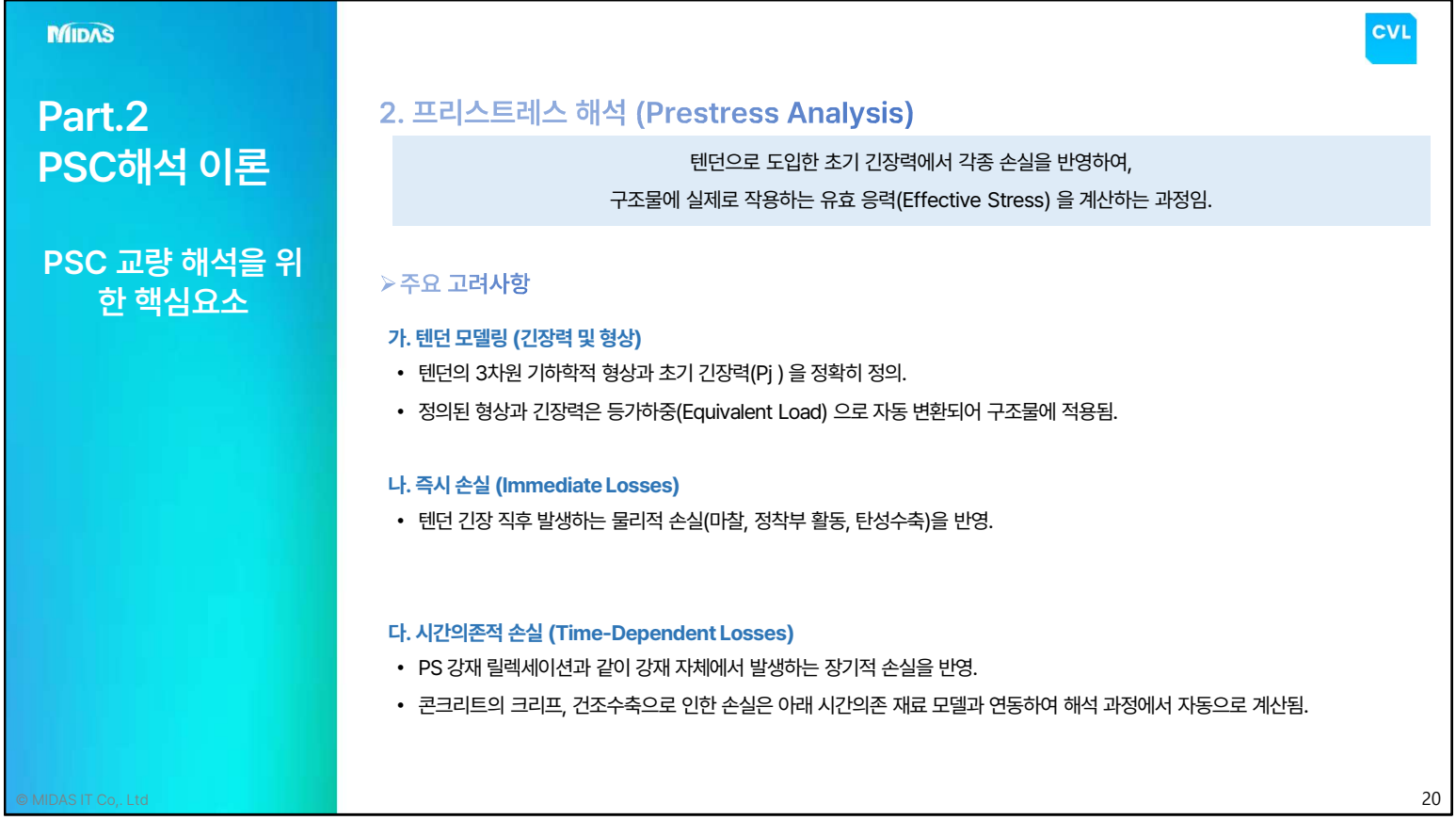
두번째는 하중의 변화입니다. 각 단계별로 작용하는 모든 하중의 이력을 추적해야 합니다.

세그먼트의 자중, 폼 트래블러와 같은 장비 하중, 그리고 특정 단계에서 가해지는 프리스트레스 긴장력 등, 모든 하중의 재하 및 제거 시점을 정확히 반영해야 합니다.

마지막으로 경계조건의 변화입니다. 구조물의 지지 상태가 어떻게 변하는지를 모사합니다.

시공 중에는 임시 받침으로 지지되다가, 중앙부가 연결되면서 독립된 캔틸레버에서 하나의 연속보로 구조 시스템 자체가 바뀌는 극적인 변화까지 정확히 모델링해야 합니다.

이 순간에 발생하는 **응력 재분배** 현상을 예측하는 것이 시공단계 해석의 핵심 중 하나입니다.



두 번째 핵심요소는 PSC의 심장이라 할 수 있는 '프리스트레스 해석'입니다.

이 해석의 최종 목표는, 우리가 텐던에 가해준 초기 긴장력에서 각종 손실을 모두 제외한, 구조물에 진짜로 남아있는 힘, 즉 '유효 프리스트레스'를 정확히 산정하는 것입니다.

이를 위해 고려해야 할 사항은 다음과 같습니다.

첫번째는 텐던 모델링입니다. 먼저, 텐던의 3차원 기하학적 형상과 초기 긴장력을 정확히 정의해야 합니다.

우리가 입력한 이 정보는 CIVIL NX에 의해 '등가하중'이라는 개념으로 자동 변환됩니다.

이는 텐던이 콘크리트에 가하는 압축력과 상향력을 실제 하중처럼 적용하여 해석하는 원리입니다.

두번째는 즉시 손실입니다. 텐던을 긴장하는 그 순간, 물리적인 원인으로 발생하는 손실입니다.

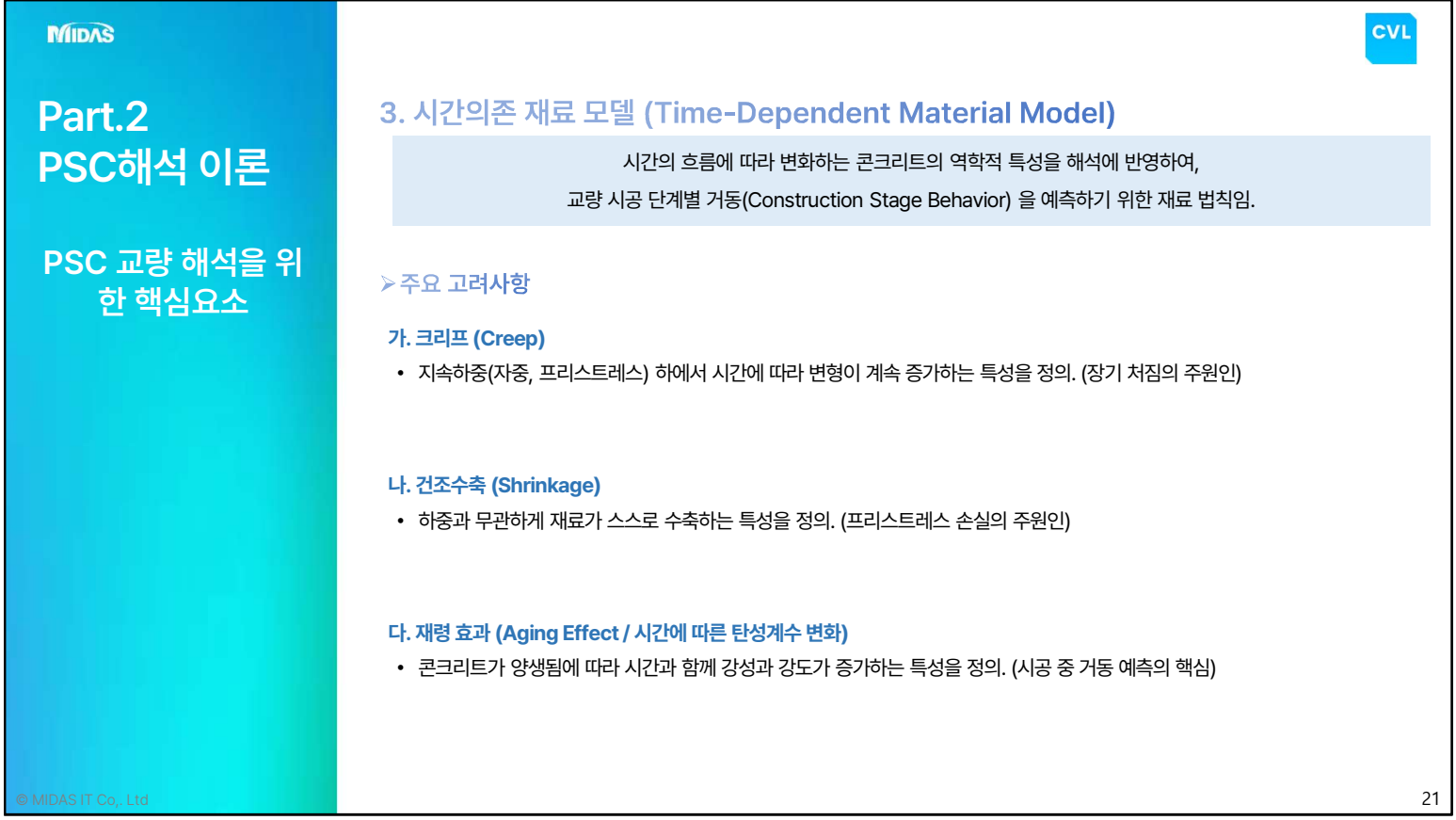
텐던과 쉬스관의 **마찰**, 정착장치의 미세한 활동으로 인한 **정착부 손실**, 그리고 콘크리트가 압축되면서 텐던을 느슨하게 만드는 **탄성수축 손실**이 여기에 해당됩니다.

마지막으로 시간의존적 손실입니다. 이것은 장기간에 걸쳐 재료의 특성 변화로 인해 발생하는 손실입니다.

팽팽하게 당겨진 강재가 시간이 지나며 스스로 느슨해지는 'PS 강재 릴렉세이션'이 대표적입니다.

여기서 매우 중요한 점은, 콘크리트의 크리프나 건조수축으로 인해 발생하는 손실은 이 항목에서 직접 다루는 것이 아니라,

바로 다음 페이지에서 배울 **'시간의존 재료 모델'과의 상호작용**을 통해 시공단계 해석 과정에서 자동으로 계산된다는 사실입니다.



마지막 세 번째 핵심요소는 '시간의존 재료 모델'입니다. 이것은 콘크리트라는 재료 자체가 시간이 지나면서 변하는 특성을 정의하는 것으로,

교량의 수십 년 후 미래, 실무에서는 10000일이라고 하죠, 즉 **장기 거동을 예측**하는 근간이 됩니다.

여기에는 세 가지 주요 현상이 포함됩니다.

첫번째는 크리프 입니다. 지속적인 하중, 자중과 프리스트레스 아래에서 콘크리트의 변형이 시간에 따라 계속 증가하는 현상입니다.

이는 교량의 **장기 처짐을 유발**하고, 프리스트레스 손실을 일으키는 가장 지배적인 요인입니다.

두번째는 건조수축입니다. 하중과 무관하게 콘크리트가 건조하면서 스스로 체적이 줄어드는 현상입니다.

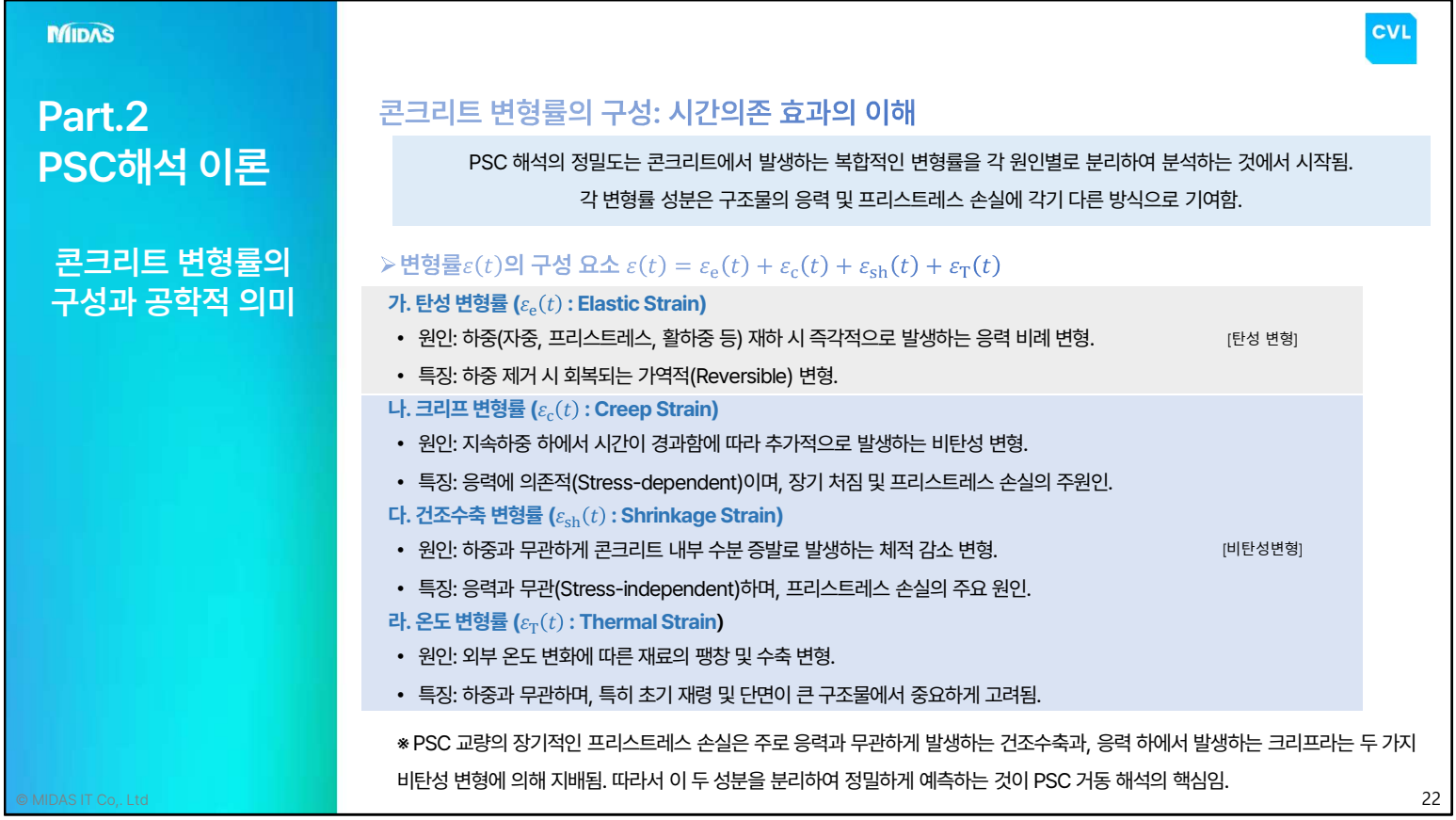
이 역시 **프리스트레스의 장기 손실**을 유발하는 주요 원인 중 하나입니다.

세번째는 재령 효과입니다. 콘크리트가 양생되면서 시간과 함께 강성과 강도가 증가하는 특성입니다.

시공단계 해석 시, 타설한지 3일 된 콘크리트와 28일 된 콘크리트의 강성을 다르게 적용해야 **시공 중 발생하는 변위를 정밀하게 예측**할 수 있습니다.

결론적으로, 이 세 가지 핵심요소는 별개가 아닙니다. ' 시공단계 해석 ' 이라는 큰 틀 안에서,

시간에 따라 변하는 ' 재료 모델 ' 로 구성된 구조물에, 시간에 따라 손실되는 ' 프리스트레스 ' 가 가해지는 복합적인 현상을 시뮬레이션하는 것이 바로 PSC 교량 해석의 본질이라 할 수 있습니다.



네, 앞서 PSC 해석의 3대 핵심요소를 개괄적으로 살펴보았습니다.

지금부터는 그 중에서도 가장 근본이 되는 '콘크리트의 변형'에 대해 깊이 있게 알아보겠습니다.

PSC 해석의 정밀도는, 이 슬라이드에서 보시는 것처럼 콘크리트에 발생하는 복합적인 변형을 각 원인별로 얼마나 잘 분해해서 분석하는지에 달려있습니다.

각 변형률 성분은 구조물의 응력과, 우리가 가장 중요하게 생각하는 프리스트레스 손실에 각기 다른 방식으로 기여하기 때문입니다.

화면 중앙의 공식을 보시면, 임의의 시간 t에서 콘크리트가 겪는 총 변형률(ε(t))은 크게 네 가지 요소의 합으로 구성됩니다.

하나씩 살펴보겠습니다.

첫 번째, **가. 탄성 변형률**입니다. 가장 직관적인 변형으로, 하중 재하 시 즉각적으로 발생하는 응력 비례 변형이며, 하중을 제거하면 회복되는 **가역적 변형**입니다.

두 번째는 **나. 크리프 변형률**입니다. 이것은 지속하중하에서 시간이 경과함에 따라 추가적으로 발생하는 **비탄성 변형**입니다.

슬라이드에 명시된 것처럼 가장 중요한 특징은 '응력에 의존적'이라는 점입니다. 즉, 지속적인 하중이 있어야만 발생하며,

이것이 바로 교량의 **장기 처짐과 프리스트레스 손실을 유발하는 첫 번째 주범**입니다.

세 번째는 **다. 건조수축 변형률**입니다. 하중과 무관하게 콘크리트 내부 수분 증발로 발생하는 체적 감소 변형입니다.

가장 큰 특징은 '응력과 무관'하다는 것입니다. 즉, 힘을 주지 않아도 재료 스스로가 변하는 것입니다. 이것이 **프리스트레스 손실을 유발하는 두 번째 주범**입니다.

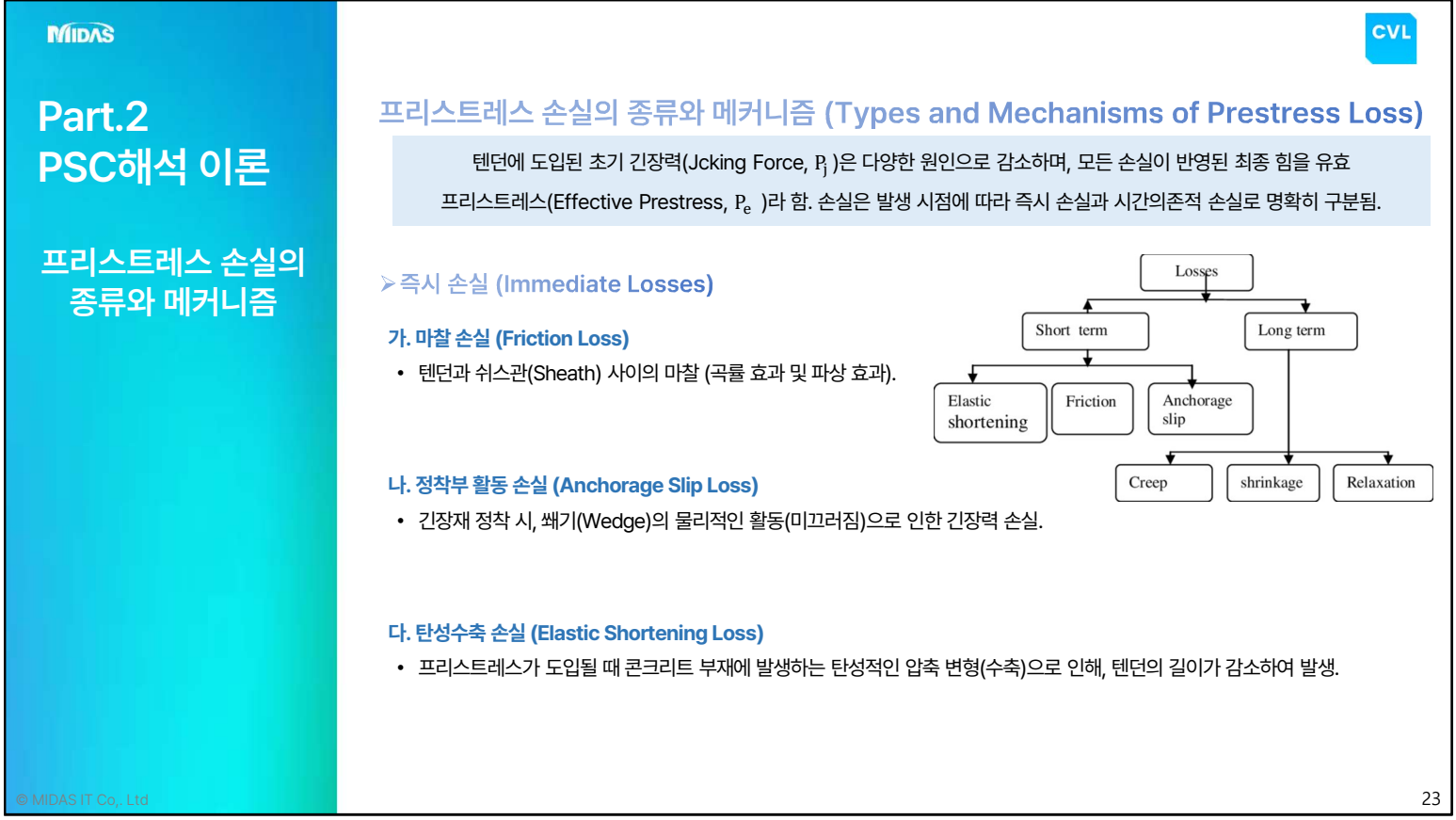
마지막으로 **라. 온도 변형률**은 온도 변화에 따라 재료가 팽창하고 수축하는 현상입니다.

완공 후에는 계절이나 일교차 때문에 중요하게 고려됩니다.

결론적으로, 이 복잡한 변형들 중에서 PSC 교량의 장기적인 성능을 좌우하는 '프리스트레스 손실'은,

결국 스스로 줄어드는 **건조수축**과, 하중을 받으며 추가로 줄어드는 **크리프**, 이 두 가지 비탄성 변형이 지배합니다.

따라서 우리의 해석 모델이 이 두 가지를 얼마나 정밀하게 분리해서 예측하는지가 PSC 교량 거동 해석의 핵심이라 할 수 있습니다.



이번 슬라이드에서는 PSC 해석의 가장 중요한 계산과정 중 하나인 '프리스트레스 손실'의 종류와 원인에 대해 체계적으로 알아보겠습니다.

우리가 텐던에 가하는 힘은 여러 가지 이유로 100% 보존되지 않습니다.

프리스트레스 손실은 발생 시점에 따라 크게 두 가지로, 힘을 주는 그 순간에 발생하는 '즉시 손실'과, 수십 년에 걸쳐 서서히 발생하는 '시간의존적 손실'로 나눌 수 있습니다.

먼저 '즉시 손실'부터 보겠습니다. 이것은 텐던 긴장 작업 중 또는 직후에 발생하는 물리적, 역학적 원인에 의한 손실입니다.

여기에는 텐던과 쉬스관의 **마찰** 때문에 생기는 손실, 정착장치가 미끄러지면서 생기는 **정착부 활동 손실**, 그리고 콘크리트가 압축되면서 텐던을 느슨하게 만드는 **탄성수축 손실**이 포함됩니다.

이 세 가지는 모두 시공 직후에 발생이 완료됩니다.

Part.2
PSC해석 이론

프리스트레스 손실의 종류와 메커니즘

프리스트레스 손실의 종류와 메커니즘 (Types and Mechanisms of Prestress Loss)

➢ 시간의존적 손실 (Time-Dependent Losses)

가. 콘크리트 크리프 (Creep of Concrete)

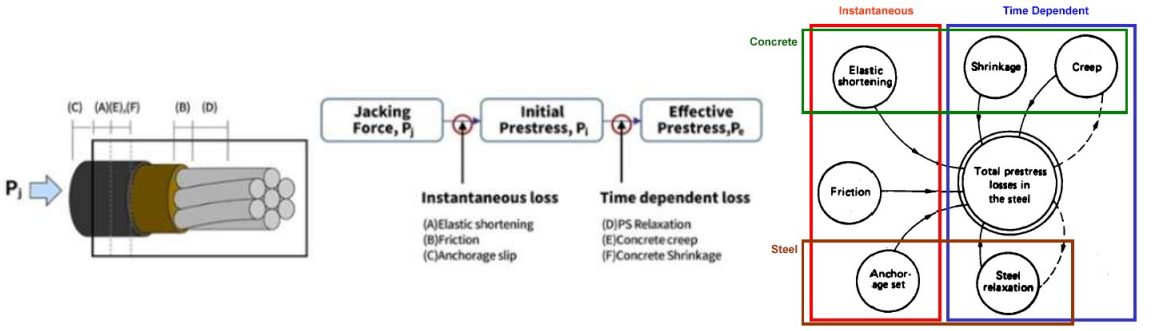
- 지속적인 압축응력을 받는 콘크리트의 소성(비탄성) 변형.

나. 콘크리트 건조수축 (Shrinkage of Concrete)

- 하중과 무관하게 콘크리트가 건조하면서 발생하는 체적 감소.

다. PS 강재의 릴렉세이션 (Relaxation of Steel)

- 고인장 상태를 유지하는 강재 자체에서, 시간이 지남에 따라 응력이 스스로 이완(감소)되는 현상.



© MIDAS IT Co., Ltd

다음으로 '시간의존적 손실'은 콘크리트와 강재라는 재료 자체의 특성 때문에 장기간에 걸쳐 발생합니다.

여기에는 지속하중 하에서 콘크리트가 서서히 추가로 변형하는 **크리프**, 콘크리트가 마르면서 스스로 수축하는 **건조수축**, 그리고 팽팽하게 당겨진 강재가 시간이 지나며 스스로 느슨해지는 **릴렉세이션**이 있습니다.

결론적으로, 우리는 이 모든 즉시 손실과 시간의존적 손실을 정확히 예측하고 계산해야만,

교량의 수명 동안 실제로 작용할 '유효 프리스트레스'를 알 수 있으며, 이를 바탕으로 안전한 설계를 할 수 있습니다.

다음 장부터는 각 손실 항목에 대해 하나씩 상세히 살펴보겠습니다.

MIDAS

CVL

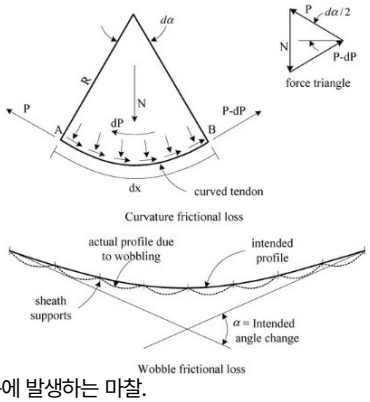
Part.2 PSC해석 이론

프리스트레스 손실 상세 (1): 마찰 손실

즉시 손실 상세 (1): PS 텐던과 쉬스 사이의 마찰 손실

마찰 손실은 포스트텐션(Post-tension) 공법에서 발생하는 대표적인 즉시 손실임. 긴장재(Tendon)를 긴장시킬 때, 쉬스(Sheath, 덕트)와의 마찰 저항으로 인해 긴장력(Jacking Force)이 텐던 전체에 동일하게 전달되지 못하고 거리에 따라 감소하는 현상.

➢ 마찰 손실의 두 가지 원인



가. 곡률 마찰 (Curvature Friction)

- 원인: 설계된 텐던의 곡률, 즉 의도된 꺾임 때문에 발생하는 마찰.
- 특징: 텐던의 경로가 직선에서 많이 벗어날수록(곡률이 클수록) 손실이 증가함.
- 관련 계수: 각도 마찰계수 (μ [단위: /rad])

  ※ 텐던이 1 라디안(약 57.3도) 꺾일 때마다 발생하는 마찰의 정도를 나타냄.

나. 파상 마찰 (Wobble Friction)

- 원인 : 쉬스관 설치 시 발생하는 미세한 시공 오차나 변형 등, 비의도적인 경로 변화 때문에 발생하는 마찰.
- 특징 : 텐던의 전체 길이가 길수록 미세한 오차가 누적되어 손실이 증가함.
- 관련 계수: 길이 마찰계수 (k [단위: /m])

  ※ 텐던 길이 1m 당 발생하는 마찰의 정도를 나타냄.

© MIDAS IT Co., Ltd

즉시 손실의 첫 번째 항목인 '마찰 손실'에 대해 상세히 알아보겠습니다.

마찰 손실은 포스트텐션 공법에서 필연적으로 발생하는 손실로, 텐던을 당길 때 쉬스관과의 마찰 때문에 힘이 끝까지 100% 전달되지 못하는 현상입니다.

마찰의 원인은 크게 두 가지입니다.

첫째는 '곡률 마찰'입니다. 우리가 의도적으로 텐던을 곡선으로 배치했기 때문에, 그 꺾이는 부분에서 마찰이 발생합니다.

둘째는 '파상 마찰'입니다. 아무리 정밀하게 시공해도 쉬스관이 미세하게 구불구불하게 설치되기 때문에, 의도치 않게 경로 변화 때문에 마찰이 발생합니다.

MIDAS

CVL

Part.2
PSC해석 이론

프리스트레스 손실 상세 (1): 마찰 손실

즉시 손실 상세 (1): PS 텐던과 쉬스 사이의 마찰 손실

➢마찰 손실 계산 공식

- $P_x = P_0 \cdot e^{-(\mu\alpha+k)}$
- P_x = 긴장단으로부터 거리 L, 각도 변화 α인 지점에서의 긴장력
- P_0 = 긴장단에서의 초기 긴장력 (Jacking Force)
- μ = 곡률 마찰계수
- α = 거리 L까지의 총 각도 변화량 (단위: Radian)
- k = 파상 마찰계수
- L = 긴장단으로부터의 거리 (단위: m)

마찰계수(μ,k)는 텐던, 쉬스의 종류 및 상태(윤활 여부 등)에 따라 달라지므로, 프로젝트에 적용되는 설계기준(콘크리트구조기준, 도로교설계기준 등)을 반드시 확인하고 적절한 값을 적용해야 함.

긴 장 재 의 종 류			k(/m)	μ (/rad)
부착시킨 긴장재		강선	0.0033 ~ 0.0050	0.15 ~ 0.25
		강봉	0.0003 ~ 0.0020	0.08 ~ 0.30
		고강도 스트랜드	0.0015 ~ 0.0066	0.15 ~ 0.30
부착시키지 않은 긴장재	수지방수피복	강선	0.0033 ~ 0.0066	0.05 ~ 0.15
		고강도 스트랜드	0.0033 ~ 0.0066	0.05 ~ 0.15
	그리스 도포	강선	0.0010 ~ 0.0066	0.05 ~ 0.15
		고강도 스트랜드	0.0010 ~ 0.0066	0.05 ~ 0.15

[콘크리트구조기준 (KDS 14 20)]

긴장재의 종류	덕 트 의 종 류	k(/m)	μ (/rad)
PS 강선 및 PS 강연선	금속쉬스	0.0066	0.30
	아연도금 금속쉬스	0.0050	0.25
	그리스 또는 아스팔트로 코팅하고 또 피복된 것	0.0066	0.30
	아연도금된 강성덕트(rigid duct)	0.0007	0.25
PS 강봉	금속쉬스	0.0010	0.20
	아연도금 금속쉬스	0.0007	0.15

[도로교설계기준(KDS 24 14 21)]

© MIDAS IT Co., Ltd

이 두 가지 효과를 모두 고려한 것이 바로 이 공식입니다.

여기서 **P0는 우리가 가해준 초기 힘**이고, **Px는 거리가 멀어짐에 따라 마찰로 인해 손실되고 남은 힘**을 의미합니다.

그리고 공식 안의 μ(뮤)와 k가 바로 곡률과 파상 마찰을 나타내는 계수입니다.

그렇다면 이 μ와 k값은 어떻게 정할까요? 바로 **설계기준**에 나와 있습니다.

보시는 것처럼 콘크리트구조기준이나 도로교설계기준에, 사용하는 텐던과 쉬스의 종류에 따라 적용해야 할 값들이 명시되어 있습니다.

따라서 엔지니어는 자신이 설계하는 구조물의 조건과 기준을 정확히 확인하고,

이 표에서 올바른 마찰계수를 찾아 해석 모델에 적용해야 합니다. 이것이 마찰 손실 해석의 핵심입니다.

MIDAS

CVL

Part.2
PSC해석 이론

프리스트레스 손실 상세 (2): 정착장치 활동 손실

즉시 손실 상세 (2): 정착장치 활동 손실 (Anchorage Slip Loss)

정착장치 활동 손실은 텐던 긴장 작업의 마지막 단계에서 발생하는 대표적인 즉시 손실임.
인장 작업 완료 후 유압잭을 제거하면, 쐐기(Wedge)가 텐던을 완전히 고정하기 위해 자리를 잡는 과정(Seating)에서 미세한 활동(Slip, Δl) 이 발생하여, 그만큼 텐던의 긴장력이 풀리는 현상.

➢ 손실 발생 메커니즘

가. 텐던수축 (Retraction of Tendon)

- 정착장치의 활동량(Δl)만큼 텐던이 쉬스관 안으로 되돌아오게 됨.
- 이로 인해, 힘들여 늘려놓았던 텐던의 총 신장량(Elongation)이 감소함.

나. 긴장력 손실 (Loss of Tensioning Force):

- 텐던의 신장량 감소는 곧 인장력의 감소(ΔP)로 이어짐.
- 이 긴장력 손실은 그래프와 같이 정착단에서 가장 크고, 마찰 저항으로 인해 내력으로 갈수록 점차 감소하여 0이 됨.
- 영향 길이(lset): 정착장치 활동의 영향이 미치는 거리.

© MIDAS IT Co., Ltd

즉시 손실의 두 번째 항목인 '정착장치 활동 손실'에 대해 알아보겠습니다.

이 현상은 텐던 긴장 작업의 맨 마지막에 발생합니다.

텐던을 팽팽하게 당기고 있던 유압잭을 제거하는 순간, 쐐기 형태의 정착장치가 텐던을 '꽉' 물면서 최종 고정합니다.

바로 이 '물고 들어가는' 짧은 순간에, 텐던이 미세하게 안으로 딸려 들어가는데, 이것을 '활동(Slip)'이라고 합니다.

이 미세한 미끄러짐(Δl)이 왜 중요할까요? 텐던이 안으로 딸려 들어간 만큼, 우리가 애써 늘려놓았던 텐던의 길이가 줄어들기 때문입니다.

길이가 줄어들면 당연히 인장력도 풀리게 되겠죠.

이 힘의 손실은 정착단에서 가장 크고, 마찰 저항 때문에 정착단에서 멀어질수록 점차 줄어들어 일정 거리까지만 영향을 미칩니다.

MIDAS

CVL

Part.2 PSC해석 이론

프리스트레스 손실 상세 (2): 정착장치 활동 손실

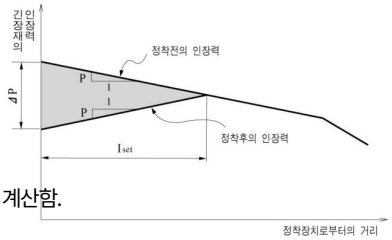
즉시 손실 상세 (2): 정착장치 활동 손실 (Anchorage Slip Loss)

➢ 마찰 손실과의 관계

가. 영향 길이(l set)는 마찰 손실의 크기에 반비례함.

- 마찰이 큰 경우: 텐던의 되돌아옴에 대한 저항이 크므로, 활동의 영향이 멀리 전달되지 못하고 짧은 길이(l_{set} ↓)에 걸쳐 급격한 손실(ΔP↑) 이 발생함.
- 마찰이 작은 경우: 저항이 작으므로, 활동의 영향이 긴 길이(l_{set} ↑)에 걸쳐 완만한 손실(ΔP↓) 을 유발하며 전달됨.

➢ 손실량 산정 및 실무 적용



가. 손실량 산정

- 텐던의 총 신장량 감소(Δl)는 힘-거리 그래프에서 삼각형 면적에 해당.
- $\Delta l = \frac{0.5 \cdot \Delta P \cdot l_{set}}{A_p \cdot E_p}$ 의 관계식을 이용하여 인장력 손실량(ΔP)과 영향길이(l_{set})를 계산함.
- (여기서 A_p : 텐던의 단면적, E_p : 텐던의 탄성계수)

다. 실무 적용

- 활동량(Δl)은 상수: 텐던 정착 시스템 제조사가 제공하는 고유값(예: 6mm, 8mm 등)을 설계에 적용함.
- 초과 긴장 (Overstressing): 설계 시 예상되는 활동 손실량을 미리 보상하기 위해, 긴장 작업 시 의도적으로 목표치보다 약간 더 강하게 긴장시킨 후 정착함.

© MIDAS IT Co., Ltd

여기서 재미있는 점은 마찰 손실과의 관계입니다. 만약 텐던이 빡빡해서 마찰이 크다면, 활동의 영향이 멀리 못가고 짧은 구간에 걸쳐 큰 힘의 손실이 발생합니다.

반대로 마찰이 작다면, 그 영향이 더 긴 구간에 걸쳐 완만하게 나타납니다.

실무에서는 이 활동량을 어떻게 다룰까요? 다행히 이 값은 정착장치 제조사에서 '우리 제품은 활동량이 약 6mm 발생합니다'라고 정확히 알려줍니다.

따라서 엔지니어들은 이 손실량을 미리 계산하고, 그만큼을 보상하기 위해 긴장 작업 시 의도적으로 약간 더 강하게 당기는 '초과 긴장'을 수행하여 최종적으로 목표한 힘이 남도록 합니다.

MIDAS

CVL

Part.2
PSC해석 이론

프리스트레스
손실 상세 (3):
탄성수축 손실

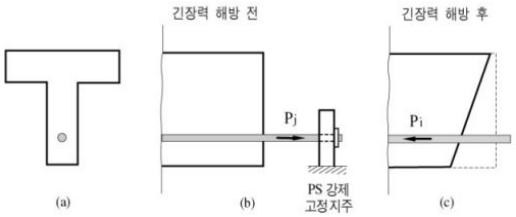
즉시 손실 상세 (3): 콘크리트 탄성수축 손실 (Elastic Shortening Loss)

프리스트레스가 도입되어 콘크리트에 압축응력이 발생하면, 콘크리트는 재료 특성에 따라 탄성적으로 수축함.
이 콘크리트의 줄어듦이 그 안에 정착된 텐던의 길이를 감소시켜 인장력을 손실시키는 현상. 발생 시점에 따라 명백한 '즉시 손실'임.

➢ 프리텐션 방식 (Pre-tensioned Method)

가. 발생 메커니즘

- 정착단에 긴장시켜 놓은 텐던 주위에 콘크리트를 타설하고 양생함.
- 텐던을 절단하는 순간, 모든 긴장력이 콘크리트로 한 번에 전달되면서 콘크리트 전체가 탄성적으로 수축함.
- 이 때, 콘크리트와 완전히 부착된 텐던의 인장력도 동시에 감소함.



나. 해석 시 고려사항

- 공장 생산 단계에서 발생 및 완료됨.따라서, 현장에 반입되는 PSC 거더는 탄성수축 손실이 이미 반영된 상태임.
- 결론: 교량 전체 구조 해석 시에는 이 손실이 이미 반영된 유효 긴장력을 사용하므로, 해석 모델에서 별도로 고려하지 않는 것이 일반적임. ※ 현장 생산 경우, 조건에 따라 고려해야함

© MIDAS IT Co., Ltd

29

이번에는 즉시 손실의 마지막 항목인 '탄성수축 손실'에 대해 알아보겠습니다.

이 손실은 PSC 제작 방식에 따라 그 의미와 해석 방법이 완전히 달라지므로, 두 가지를 명확히 구분해서 이해해야 합니다.

먼저 **프리텐션 방식**입니다. 공장에서 텐던을 미리 당겨놓고 콘크리트를 붓죠.

그리고 텐던을 '땅' 하고 끊는 순간, 모든 힘이 콘크리트로 전달되면서 콘크리트가 확 줄어듭니다. 이때 탄성수축 손실이 발생합니다.

하지만 중요한 점은, 이 모든 과정이 공장에서 끝난다는 것입니다. 우리가 현장에서 받는 거더는 이미 탄성수축 손실이 발생한 제품입니다.

따라서 **교량 전체를 해석할 때는 이 손실을 별도로 모델링하지 않습니다.**

MIDAS

CVL

Part.2
PSC해석 이론

프리스트레스 손실 상세 (3): 탄성수축 손실

즉시 손실 상세 (3): 콘크리트 탄성수축 손실 (Elastic Shortening Loss)

➢ 포스트텐션 방식 (Post-tensioned Method)

가. 발생 메커니즘

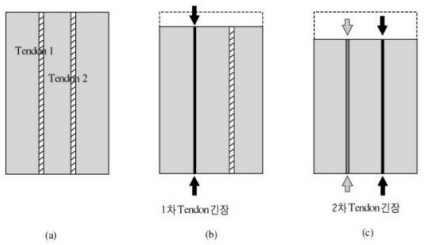
- 여러 개의 텐던을 '순차적으로(Sequentially)' 긴장시킬 때 발생하는 상호작용이 핵심.
- 선행 긴장된 텐던이 있는 상태에서, 후행 텐던을 긴장시키면 콘크리트 부재 전체에 추가적인 압축 변형이 발생함.
- 이 추가 변형으로 인해, 이미 정착되어 있던 선행 텐던의 길이가 강제로 줄어들어 인장력 손실이 발생함. (첫 번째 긴장된 텐던이 가장 큰 손실을, 마지막 텐던은 0의 손실을 겪음)

나. 해석 시 고려사항

- 시공 과정 중에 발생하는 매우 중요한 손실이므로 반드시 해석에 고려해야 함.
- 결론: 시공단계 해석(Staged Construction Analysis) 시, 텐던의 긴장 순서(Tensioning Sequence)를 정확히 정의하면 해석 프로그램이 각 단계별 응력 변화를 계산하여 자동으로 손실량을 반영함.

다. 계산 원리

- $\Delta\sigma = E_s/\Delta\varepsilon_c = n \cdot \Delta\sigma_s$
- $\Delta\sigma$= 텐던의 응력 손실
- n = 강재와 콘크리트의 탄성계수비 E_s/E_c
- Δf_c = 후행 텐던 긴장으로 인해 선행 텐던 위치에서 발생한 콘크리트의 응력 변화



© MIDAS IT Co., Ltd

하지만 **포스트텐션 방식**은 완전히 다릅니다. 여기서 핵심은 '순서'입니다. 그림처럼 텐던 1번을 먼저 당겨놓았다고 가정해 봅시다.

그 다음에 텐던 2번을 당기면, 콘크리트 전체가 추가적으로 더 압축됩니다. 그럼 어떻게 될까요?

이미 1번 텐던은 콘크리트에 고정되어 있기 때문에, 콘크리트가 줄어드는 만큼 1번 텐던도 강제로 길이가 줄어들면서 힘이 빠지게 됩니다.

이것이 포스트텐션에서의 탄성수축 손실입니다.

따라서 이 손실은 **반드시 해석에 고려**해야 하며, **시공단계 해석 시 텐던의 긴장 순서를 정확하게 입력**하면, CIVIL NX가 이 복잡한 상호작용을 자동으로 계산해 줍니다.

MIDAS

CVL

Part.2
PSC해석 이론

프리스트레스
손실 상세 (4):
PS 강재 릴렉세이션

시간의존적 손실 상세 (4): PS 강재의 릴렉세이션 (Relaxation of Steel)

릴렉세이션은 콘크리트가 아닌 PS 강재 자체에서 발생하는 시간의존적 손실임. 고인장 상태의 강재가 일정한 변형률(길이)로 고정되어 있을 때, 강재 내부의 미세 조직 재배열로 인해 시간이 경과함에 따라 응력이 스스로 감소(이완) 하는 현상.

➢ 릴렉세이션에 영향을 미치는 주요 인자

가. 초기 응력 수준 σ_{si}:

- 릴렉세이션 손실에 가장 큰 영향을 미치는 요인.
- 초기 긴장력이 강재의 항복강도(σ_y)에 가까울수록 손실량이 비선형적으로 급격히 증가함.

나. 시간 (t):

- 손실량은 시간의 로그(log)에 비례하여 증가함.
- 이는 초기에 대부분의 손실이 발생하고, 시간이 지날수록 손실률이 점차 둔화됨을 의미함.

다. 강재의 종류 (Type of Steel)

- 일반 강재 (Normal Relaxation Steel): 초기 응력의 약 10% 내외의 손실 발생 가능.
- 저릴렉세이션 강재 (Low Relaxation Steel): 특수 열처리 과정을 통해 릴렉세이션 성능을 대폭 개선한 강재. 손실량이 일반 강재의 약 1/4 ~ 1/5 수준 (약 2.5%)으로 매우 작음.

© MIDAS IT Co., Ltd

이번에는 프리스트레스트 손실의 마지막 항목인 'PS 강재의 릴렉세이션'에 대해 알아보겠습니다.

릴렉세이션은 팽팽하게 당겨진 강재 자체에서 발생하는 손실입니다.

개념은 간단합니다. 고무줄을 아주 팽팽하게 당겨서 나무 기둥에 묶어놓고 며칠 뒤에 만져보면, 처음보다는 약간 느슨해진 것을 느낄 수 있습니다.

이처럼, 높은 인장 상태의 강재가 시간이 지나면서 스스로 응력을 조금씩 풀어버리는 현상을 릴렉세이션이라고 합니다.

이러한 릴렉세이션은 초기 응력이 높을수록, 그리고 시간이 오래 지날수록 손실이 커집니다. 하지만 가장 중요한 것은 **강재의 종류**입니다.

MIDAS

CVL

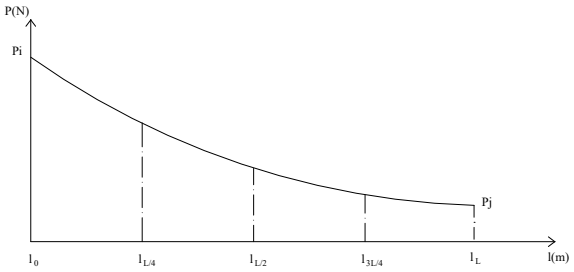
Part.2 PSC해석 이론

프리스트레스 손실 상세 (4): PS 강재 릴렉세이션

시간의존적 손실 상세 (4): PS 강재의 릴렉세이션 (Relaxation of Steel)

➢ 손실량 산정 (Magura 공식 예시)

$$\frac{f_s}{f_{si}} = 1 - \frac{\log t}{C}\left(\frac{f_{si}}{f_y} - 0.55\right)$$



- 초기 응력비 f_s/f_{si}가 높을수록, 그리고 시간(t)이 경과할수록 응력 감소가 커지는 것을 보여줌.
- f_s = 시간 t경과 후 남은 응력
- f_{si} = 초기 응력
- f_y = 항복응력
- t = 시간 (hour)
- C = 강재 종류에 따른 상수
  - 일반 강재 : C = 10
  - 저릴렉세이션 강재 : C= 45 (C값이 크므로 동일 조건에서 손실이 훨씬 적게 계산됨)

➢ 실무 적용 및 핵심 고려사항

- Midas Civil에서 재료 입력 시, 반드시 이 '저릴렉세이션' 스펙을 정확히 확인하고, 선택

© MIDAS IT Co., Ltd

손실량을 계산하는 데는 여러 공식이 있는데, 그 중 하나가 이 '마구라(Magura) 식'입니다.

여기서 주목할 부분은 상수 C입니다. '저릴렉세이션 강재'는 이 C값이 45로, 일반 강재 10보다 훨씬 큽니다.

따라서 공식에 따라 계산해보면 손실이 훨씬 적게 발생합니다.

이것이 실무적으로 가장 중요한 포인트로 이어집니다.

요즘 건설되는 **거의 모든 PSC 교량에는 손실이 훨씬 적은 '저릴렉세이션' 강재를 사용하는 것이 표준**입니다.

따라서 엔지니어는 해석 모델을 만들 때, 우리가 사용하는 강재가 어떤 종류인지 정확히 선택하여 재료 특성을 입력하는 것이 매우 중요합니다. MIDAS CIVIL이 그 선택에 맞춰 올바른 손실량을 계산하기 때문입니다.

MIDAS

CVL

Part.2
PSC해석 이론

프리스트레스의 등가하중 개념

프리스트레스의 등가하중(Equivalent Load) 개념과 적용

유한요소 해석 프로그램은 텐던 자체를 구조 부재로 해석하는 것이 아님. 대신, 텐던이 콘크리트 부재에 가하는 힘을 컴퓨터가 인식할 수 있는 등가적인 절점하중(Nodal Load) 및 부재하중(Member Load)으로 자동 변환하여 구조 해석을 수행함.

➢ 등가하중의 구성 요소

가. 정착단 하중 (Anchorage Zone Forces / End Forces)

- 원리 : 텐던 양 끝단의 정착장치에서 콘크리트에 직접적으로 힘을 전달하는 효과.
- 축방향 압축력 (Axial Compression) : 콘크리트 단면 전체에 압축력을 가함.
- 휨 모멘트 (Bending Moment) : 텐던이 단면의 도심과 일치하지 않을 경우(편심), 그 편심 거리만큼의 모멘트를 발생시킴.

나. 부재 길이방향 분포하중 (Distributed Loads along the Member)

- 원리 : 곡선 형상의 텐던이 직선으로 펴지려는 힘이 콘크리트 부재 전체에 분포하중으로 작용하는 효과.
- 상향 분포하중 (Upward Distributed Load) : 텐던의 곡률로 인해 발생하며, 교량의 자중과 같은 연직하중을 효과적으로 상쇄시키는 핵심적인 역할을 수행함.
- 축방향 분포하중 (Axial Distributed Load): 텐던과 부재축의 경사 및 마찰 손실 효과로 인해 발생.

© MIDAS IT Co., Ltd

이번 슬라이드에서는 PSC 해석에서 가장 중요하고 흥미로운 개념 중 하나인 '등가하중'에 대해 알아보겠습니다.

이 원리를 이해하면 프리스트레스가 어떻게 그 무거운 교량을 들어 올리는지 명확히 알 수 있습니다.

핵심은, MIDAS CIVIL이 텐던 자체를 부재로 인식하지 않는다는 점입니다.

대신, ' 텐던이 콘크리트를 밀고 당기는 힘 ' 을 컴퓨터가 이해할 수 있는 일반적인 하중의 형태로 바꿔서 적용하는데, 이것을 바로 ' 등가하중 ' 이라고 합니다.

등가하중은 크게 두 가지로 구성됩니다.

첫째는 텐던의 양 끝, 즉 **정착단에서 콘크리트를 직접 꽉 누르는 힘**입니다.

이 힘은 부재에 압축력과 휨모멘트를 발생시킵니다.

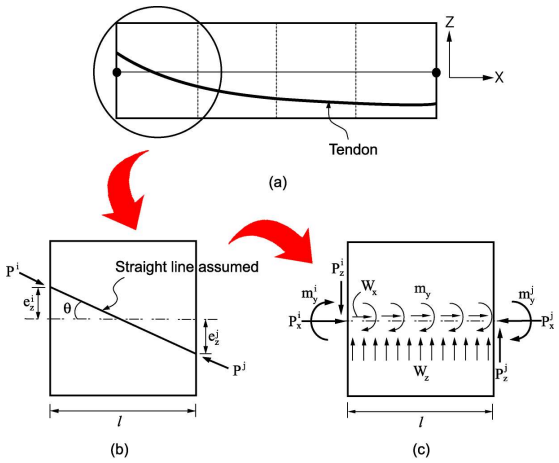
MIDAS

CVL

Part.2 PSC해석 이론

프리스트레스의 등가하중 개념

프리스트레스의 등가하중(Equivalent Load) 개념과 적용



$$p_x^i = p^i \cos\theta \qquad p_z^i = p^i \sin\theta \qquad m_y^i = p_x^i \cdot e_z^i$$

$$p_x^j = p^j \cos\theta \qquad p_z^j = p^j \sin\theta \qquad m_y^j = p_x^j \cdot e_z^j$$

$$\sum F_x = p_x^i + w_x l - p_x^j = 0$$

$$\sum F_z = -p_z^i + w_z l + p_z^j = 0$$

$$\sum M_y^i = m_y^i - p_z^i l + w_z \frac{l^2}{2} + m_y^j + m_y l = 0$$

$$w_x = \frac{p_x^j - p_x^i}{l} \qquad w_z = \frac{p_z^i - p_z^j}{l}$$

$$m_y = p_z^i - w_z \frac{l}{2} - \frac{m_y^i + m_y^j}{l}$$

단부하중 (p_i, p_j) 과 등가의 분포하중 (w_x, m_y, w_z) 으로 변환하여 계산

© MIDAS IT Co., Ltd

둘째는 **길이방향 분포하중**입니다.

그림처럼 아래로 볼록한 포물선 텐던은, 마치 활시위처럼 위로 펴지려는 성질이 있습니다.

이 힘이 콘크리트 보를 지속적으로 위로 들어 올리는 '상향 분포하중'으로 작용하여, 교량의 무거운 자중을 상쇄시켜주는 마법 같은 역할을 합니다.

다행히도, 우리가 이 복잡한 공식들을 이용해 분포하중을 직접 계산할 필요는 없습니다.

CIVIL NX는 우리가 텐던의 형상과 긴장력만 정확하게 입력하면,

내부적으로 이 모든 등가하중을 자동으로 계산해서 콘크리트 부재에 적용해 줍니다

.

따라서 엔지니어로서 우리의 역할은, 이 등가하중의 원리를 명확히 이해하고, 그 근간이 되는 텐던의 형상과 긴장력을 설계 의도에 맞게 정확하게 모델링하는 것입니다.

MIDAS

CVL

Part.2 PSC해석 이론

시간의존 재료 모델 상세 (1): 크리프

시간의존 재료 모델 상세 (1): 크리프(Creep)

구조물에 작용하는 일정한 응력에 의해,
시간의 흐름에 따라 변형률이 점진적으로 증가하는 비탄성 변형 현상.

➢ 크리프에 영향을 미치는 주요 인자 (Influencing Factors)

- 콘크리트 강도: 강도가 낮을수록 크리프 증가 (↑)
- 환경 조건: 주변 상대습도(낮을수록↑), 온도(높을수록↑)
- 부재 조건: 부재 크기(작을수록↑), 하중 재하 시점의 재령(낮을수록↑)

➢ 크리프 계수 (ϕ) (Quantification: Creep Coefficient)

- 특정 시점(t_0)에 발생한 탄성 변형률(ε_{el}) 대비, 시간(t) 경과 후 추가적으로 발생한 크리프 변형률(ε_{cr}) 의 비율.

$$\Phi(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{cr}(t, t_0)}{\varepsilon_e(t_0)}$$

➢ PSC 교량에 미치는 영향 (Engineering Significance)

- 장기 처짐 및 캠버 변화 : 교량의 장기적인 수직 처짐(Sagging)을 유발하는 가장 지배적인 요인.
- 프리스트레스 손실: 콘크리트의 크리프 변형이 PS 강재의 긴장력을 감소시키는 주요 원인 중 하나.

© MIDAS IT Co., Ltd

네, 이제 시간의존 특성의 첫 번째 '크리프'에 대해 상세히 알아보겠습니다. PSC 해석에서 가장 복잡하면서도 중요한 현상 중 하나입니다.

먼저 크리프의 개념입니다. 크리프란, 하중을 계속 받고 있는 콘크리트가 시간이 지나면서 서서히 추가적으로 변형하는 현상입니다.

마치 무거운 짐을 계속 지고 있으면 허리가 점점 더 굽는 것과 같은, **지속하중에 대한 시간의존적 응답**이라고 할 수 있습니다.

이러한 크리프는 보시는 바와 같이 콘크리트 강도, 주변 습도, 부재의 크기, 그리고 하중을 받는 시점의 재령 등 매우 여러 요인에 복합적으로 영향을 받습니다.

엔지니어들은 이 복잡한 크리프의 정도를 정량화하기 위해 '크리프 계수(Phi, ϕ)'라는 지표를 사용합니다.

이 공식에서 보시는 것처럼 , 크리프 계수는 초기 탄성 변형 대비 얼마나 많은 변형이 추가로 생기는지를 나타내는 비율입니다.

예를 들어 크리프 계수가 2.0이라면, 초기 변형의 2배만큼의 변형이 수십 년에 걸쳐 추가적으로 발생한다는 의미로, 장기 변형을 예측하는 핵심 지표입니다.

이 크리프가 PSC 교량에서 가장 중요한 이유는, 두 가지 치명적인 영향을 미치기 때문입니다.
첫째, 교량의 **장기 처짐**을 유발하는 가장 큰 원인이며 ,

둘째, 콘크리트가 크리프 변형으로 줄어들면서 텐던을 느슨하게 만들어 **프리스트레스 손실**을 일으키는 핵심 원인이기 때문입니다.

MIDAS

CVL

Part.2 PSC해석 이론

시간의존 재료 모델 상세 (1): 크리프

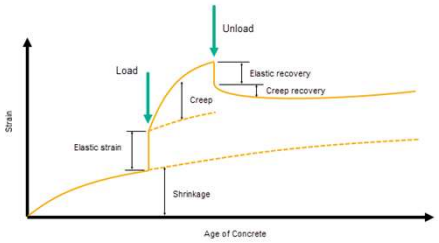
시간의존 재료 모델 상세 (1): 크리프(Creep)

➢크리프 함수 (Creep Function) 및 특성 크리프 (Specific Creep)

- 크리프 함수 $J(t,t_0)$: 재하 시점 t_0 에 작용한 단위 응력(1 MPa)에 의해 시간 t에서 발생하는 총 변형률(탄성+크리프). 재료의 크리프 특성을 나타내는 고유 함수.
- 특성 크리프 $C(t,t_0)$ 단위 응력(1 MPa)에 의해 발생하는 순수 크리프 변형률.

$$J(t,t_0)=\frac{1}{E(t_0)}+\frac{\varphi(t,t_0)}{E(t_0)}=\frac{1}{E(t_0)}+C(t,t_0)$$

$$\varepsilon(t,t_0)\ =J(t,t_0)$$



➢ 응력 이력(Stress History) 고려 방법 : 선형 중첩의 원리

- 개념: 시공단계별로 응력이 계속 변하는 PSC 구조물의 총 크리프는, 각 응력 증분(Stress Increment)에 의해 독립적으로 발생하는 크리프 변형들의 합으로 계산함.

$$\varepsilon_c(t)=\int_0^t C(t_0,t-t_0)\frac{\partial\sigma(t_0)}{\partial t_0}dt_0$$

▶ 적분 형태의 계산법

시간에 따라 변하는 응력 전체 이력을 적분하여, 총 크리프 변형률을 계산

$$\varepsilon_{c,n}=\sum_{j=1}^{n}\Delta\sigma_j C(t_j,t_{n-j})$$

▶수치 해석적 계산법

시공단계를 작은 시간 단계로 나누어, 각 단계의 응력 변화(Δσ)가 유발하는 크리프를 모두 더하여 계산

© MIDAS IT Co., Ltd

재료의 크리프 특성은 '크리프 함수'라는 고유의 값으로 정의됩니다. 이것은 그 재료의 크리프 성능을 나타내는, 일종의 재료 특성과도 같습니다.

하지만 실제 교량은 시공 중에 하중이 계속 변하기 때문에, '선형 중첩의 원리'라는 것을 사용합니다.

이 그래프처럼, 각 시점에서 응력이 변할 때마다 새로운 크리프가 독립적으로 발생해서 기존의 크리프에 더해진다고 가정하는 것입니다.

이론적으로는 아래와 같이 복잡한 적분식으로 표현할 수 있고 , 우리가 사용하는 CIVIL NX에서는 이 적분을 잘게 나눈 합산,

즉 이 summation 형태로 총 크리프를 자동으로 계산해 줍니다.

MIDAS

Part.2 PSC해석 이론

시간의존 재료 모델 상세 (1): 크리프

CVL

[도로교 설계기준, KDS 24 14 00:2024]

1. 기본식

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t - t_0)$$

t_0 :하중 작용 시 재령 (일)
t: 재령 (일)
φ_0 :최종 크리프 계수
$\beta_c(t - t_0)$:시간에 따른 크리프 발달 함수

2. 최종 크리프 계수

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \varphi_{f_{cm}} \cdot \varphi_{t_0}$$

습도 영향	콘크리트 강도 영향	재령 영향
$\varphi_{RH} = 1 + \frac{(1 - RH/100)}{0.1 \cdot h_0^{1/3}}$ RH :상대습도 h_0 :유효 두께 mm	$\varphi_{f_{cm}} = \frac{16.8}{\sqrt[3]{f_{cm}}}$ f_{cm} :콘크리트 평균 압축강도, MPa	$\varphi_{t_0} = \frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}}$

3. 시간 경과 함수

$$\beta_c(t - t_0) = \left(\frac{t - t_0}{\beta_H + (t - t_0)}\right)^{0.3}$$

여기서

$$\beta_H = 1500 \cdot \left(1 + 1.2 \cdot e^{-0.004 \cdot h_0^2}\right) \cdot \frac{1}{h_0^2}$$

$$\varphi(t, t_0) = \left(\frac{16.8}{\sqrt[3]{f_{cm}}} \cdot \frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}} \cdot \left(1 + \frac{1 - RH/100}{0.1 \cdot h_0^{1/3}}\right)\right) \cdot \left(\frac{t - t_0}{\beta_H + (t - t_0)}\right)^{0.3}$$

[CEB-FIP 90 CODE]

1. 기본식

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t - t_0)$$

φ_0 :최종 크리프 계수 (infinity에서 수렴하는 값)
$\beta_c(t - t_0)$:시간 경과에 따른 함수 (크리프 발달 함수)

2. 최종 크리프 계수

$$\varphi_0 = \varphi(R, H, f_{cm} t_0)$$

보통은 아래와 같이 수분조건과 콘크리트 강도, 재령에 따라 정의됩니다

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \varphi_f \cdot \varphi_{t_0}$$

φ_{RH} :상대습도 RH의 영향
φ_f :콘크리트 평균 압축강도 f_{cm}의 영향
φ_{t_0} :하중재령 t_0의 영향

3. 시간 경과 함수

$$\beta_c(t - t_0) = \left(\frac{t - t_0}{\beta_H + (t - t_0)}\right)^{0.3}$$

여기서 β_H는 구조 부재의 유효 두께(humidity parameter) 및 상대습도(RH)에 따른 함수입니다.

따라서 CEB-FIP 90의 크리프 계수는 다음과 같이 정리됩니다

$$\varphi(t, t_0) = \varphi(R, H, f_{cm} t_0) \cdot \left(\frac{t - t_0}{\beta_H + (t - t_0)}\right)^{0.3}$$

© MIDAS IT Co., Ltd

지막으로, 실무에서는 크리프를 어떻게 예측하는지 보겠습니다. 우리는 이 '크리프 함수'를 알기 위해 매번 실험을 할 수는 없습니다.

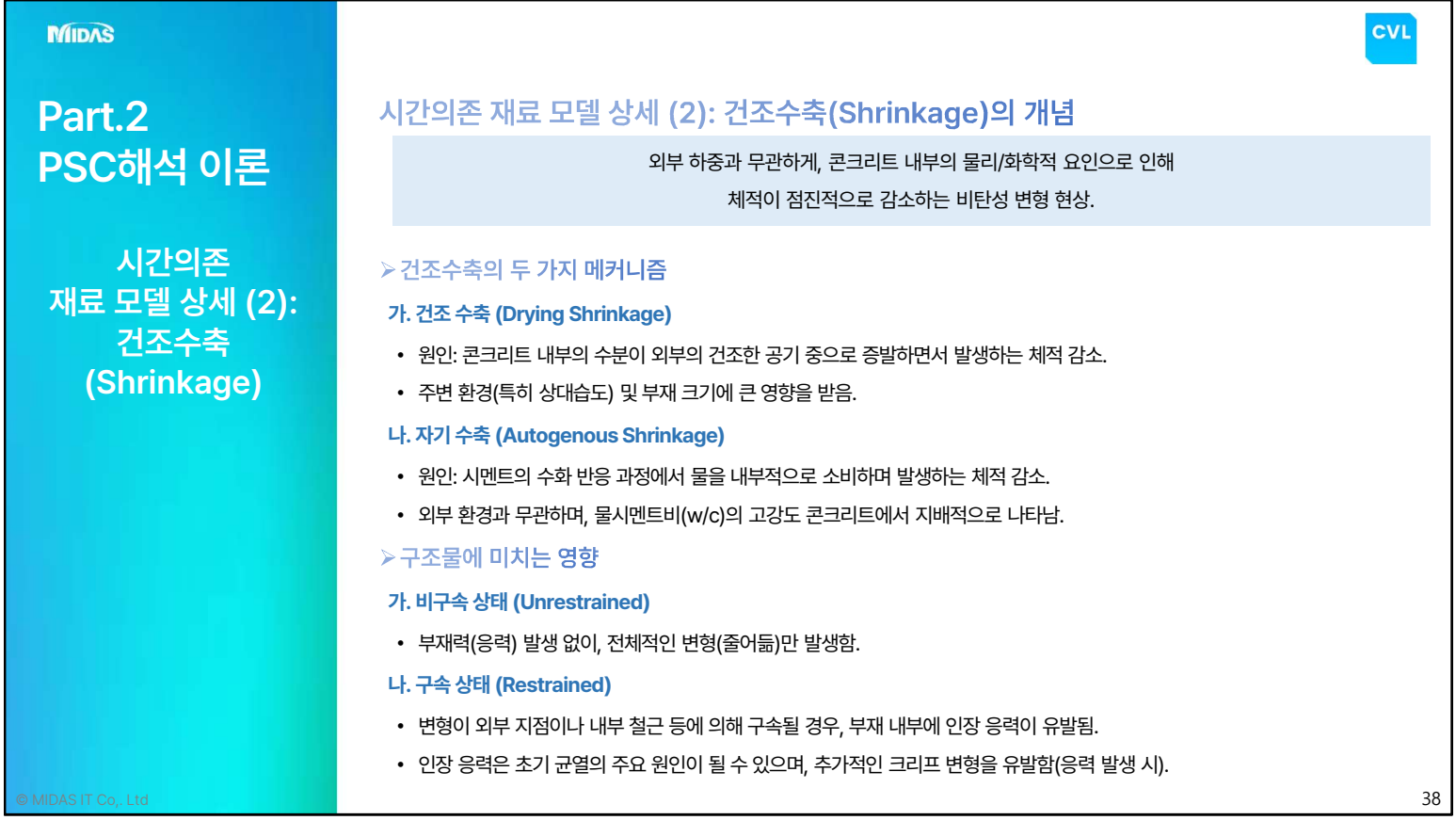
그래서 **설계기준**이 존재합니다. 이 슬라이드는 대표적인 두 설계기준인 국내 도로교 설계기준(KDS)과 국제 표준 모델인 CEB-FIP 코드의 예측 공식을 보여줍니다.

보시는 것처럼 공식들은 매우 복잡하지만, 자세히 들여다보면 모두 콘크리트 강도(fcm) , 주변 습도(RH) , 부재의 크기(h0) , 그리고 하중을 받는 시점의 재령(t0) 등,

우리가 앞서 배운 크리프 영향 인자들로 구성되어 있습니다.

엔지니어의 역할은 이 공식들을 외우는 것이 아니라, 우리가 사용하는 MIDAS CIVIL에서 어떤 설계기준을 적용할지 선택하고, 그 기준이 요구하는 이 핵심 변수들을 프로젝트 조건에 맞게 정확하게 입력하는 것입니다.

그러면 소프트웨어가 이 내장된 기준식들을 바탕으로 신뢰성 있는 크리프 거동을 자동으로 예측하고 해석에 반영해 주는 것입니다.



크리프에 이어 두 번째 시간의존 특성인 '건조수축'에 대해 알아보겠습니다.

건조수축은 이름 그대로 콘크리트가 마르면서 줄어드는 현상으로 , 가장 큰 특징은 하중과 상관없이 스스로 발생한다는 점입니다.

건조수축은 두 가지 원인으로 발생합니다.

첫째, '건조 수축'은 콘크리트 속의 물이 공기 중으로 증발하면서 발생하며 , 주변 환경(특히 상대습도)에 큰 영향을 받습니다.

둘째, '자기 수축'은 고강도 콘크리트에서 시멘트가 물과 반응하며 물을 내부적으로 소비하여 쪼그라드는 현상으로 , 외부 환경과는 무관합니다.

실제 총 수축량은 이 두 가지의 합으로 나타납니다.

이러한 수축이 구조물에 어떤 영향을 미칠까요? 만약 아무런 방해가 없다면 그냥 크기만 작아지고 맙니다.

하지만 실제 구조물은 지점이나 내부 철근에 의해 구속되어 있죠.

이 때문에 줄어들고 싶은데 줄어들지 못하면서, 내부에 잡아당기는 힘,

즉 **'인장 응력'이 발생**하게 되고 , 이것이 균열의 원인이 되기도 합니다.

결론적으로, 건조수축은 PSC 교량에서 두 가지 큰 문제를 일으킵니다.

콘크리트가 줄어들면서 텐던을 느슨하게 만들어 '프리스트레스 손실'을 유발하고 , 구속될 경우 원치 않는 '균열'을 유발할 수 있습니다.

따라서 이 현상을 정확히 예측하는 것이 매우 중요합니다.

MIDAS

CVL

Part.2 PSC해석 이론

시간의존 재료 모델 상세 (2): 건조수축 (Shrinkage)

시간의존 재료 모델 상세 (2): 건조수축(Shrinkage)의 개념

➢ PSC 교량 해석에서의 중요성

- 프리스트레스 손실: 콘크리트의 수축 변형이 PS 강재의 긴장력을 감소시키는 주요 원인 중 하나임.
- 균열 제어: 구속에 의해 발생하는 인장 응력에 대한 검토가 필요함.

[도로교 설계기준, KDS 24 14 00:2024]

1. 총 건조수축 변형률

$$\varepsilon_{cs}(t) = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_{ds}(t)$$

ε_{cs0} :최종 건조수축 변형률
$\beta_{ds}(t)$:시간 의존 함수

2. 최종 건조수축 변형률

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_s \cdot \beta_{RH}$$

$$\varepsilon_s = 0.85 \cdot (220 + 110\alpha_1) \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{f_{cm}}}$$

$$\beta_{RH} = \left[1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^3\right]$$

여기서 α_1은 시멘트 종류에 따른 보정계수.

3. 시간 경과 함수

$$\beta_{ds}(t) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.04 \cdot h_0^2}$$

[CEB-FIP 90 CODE]

1. 총 건조수축 변형률

$$\varepsilon_{cs}(t) = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_{ds}(t)$$

ε_{cs0} :최종 건조수축 변형률
$\beta_{ds}(t)$:시간 의존 함수

2. 최종 건조수축 변형률

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_s \cdot \beta_{RH}$$

$$\varepsilon_s = 160 \times 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt[3]{f_{cm}}}\right)$$

$$\beta_{RH} = 1.55\left[1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^3\right]$$

(f_{cm} :평균 압축강도, RH: 상대습도)

3 시간 경과 함수

$$\beta_{ds}(t) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.04 \cdot h_0^2}$$

t_s :건조 시작 재령 (일)
h_0 :유효두께(mm), $h_0 = 2A_c/u$)단면적/노출 둘레)

© MIDAS IT Co., Ltd

예측 방법은 크리프와 마찬가지로 **설계기준**에 제시된 예측 모델을 사용합니다.

보시는 것처럼 도로교설계기준과 CEB-FIP CODE 기준 모두 이를 계산하기 위한 복잡한 공식들을 제공하고 있으며 ,

엔지니어의 역할은 이 공식들이 필요로 하는 핵심 입력 변수, 즉 콘크리트 강도, 현장의 상대습도, 그리고 부재의 크기를 정확히 파악하여 MIDAS CIVIL에 입력하는 것입니다.

MIDAS

CVL

Part.2
PSC해석 이론

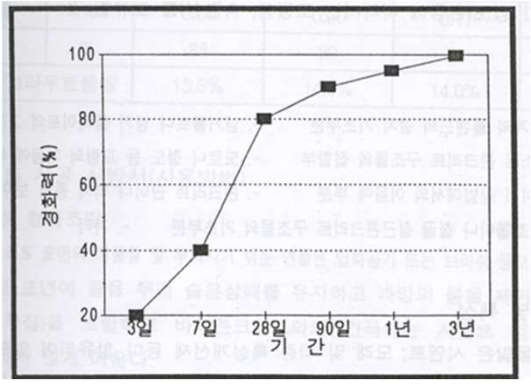
시간의존
재료 모델 상세 (3):
재령 효과

시간의존 재료 모델 상세 (3): 재령 효과 (시간에 따른 탄성계수 변화)

콘크리트가 시멘트의 수화 반응(Hydration)을 통해 시간이 지남에 따라
강도(Strength)와 강성(Stiffness, 탄성계수)이 점진적으로 증가하는 현상.

➢ 해석에서의 필요성

- 시공단계 해석 시, 각기 다른 시점에 타설된 콘크리트 부재들은 재령(Age)이 다름.
- 따라서, 각 부재의 실제 재령에 맞는 강성을 적용해야 실제 구조물의 거동을 정밀하게 모사할 수 있음. (예: 3일차 콘크리트와 28일차 콘크리트는 다른 재료로 취급해야 함)



➢ 콘크리트의 시간의존 특성 공식

가. 시간에 따른 압축강도 발현식

$$f_{cm}(t) = (f_{ck} + \Delta f) \cdot \exp\left[s\left(1 - \left(\frac{28}{t_{eq}}\right)^{0.5}\right)\right]$$

f_{cm} : 평균 압축 강도
f_{ck} : 표준재령(28일) 압축강도 (MPa)
Δf : 평균강도 보정항
s : 시멘트 종류별 계수 (보통 0.25 정도, 시멘트 종류 따라 변함)
t_{eq} : 등가재령 (days), 양생온도/조건 반영

이 식은 CEB-FIP 90 강도발현 모델이며, 국내 도로교 설계기준도 같은 형태 사용.

© MIDAS IT Co., Ltd

네, 시간의존 재료 모델의 마지막 주제인 **'재령 효과'**, 즉 시간에 따른 탄성계수의 변화에 대해 알아보겠습니다.

재령 효과란, 콘크리트가 시멘트의 수화 반응을 통해 시간이 지나면서 점점 더 단단해지고 강해지는 현상을 말합니다.

이것이 해석에서 왜 중요할까요? 시공단계 해석에서는 각기 다른 날에 타설된 콘크리트들이 함께 존재하기 때문입니다.

상식적으로 생각해봐도, 3일 된 콘크리트와 28일 된 콘크리트는 단단한 정도가 완전히 다릅니다.

따라서 각 부재의 실제 나이, 즉 재령에 맞는 강성을 적용해야만 실제 구조물의 거동을 정밀하게 예측할 수 있습니다.

이러한 재령 효과는 '압축강도 발현 공식'을 통해 콘크리트 탄성계수에 반영됩니다.

이 공식은 28일 강도를 기준으로, 시멘트 종류나 양생 조건에 따라 특정 시간(t)에서의 콘크리트 강도를 예측하는 모델이며, 국내외 설계기준에서 공통적으로 사용하고 있습니다.

MIDAS

CVL

Part.2 PSC해석 이론

시간의존 재료 모델 상세 (3): 재령 효과

시간의존 재료 모델 상세 (3): 재령 효과 (시간에 따른 탄성계수 변화)

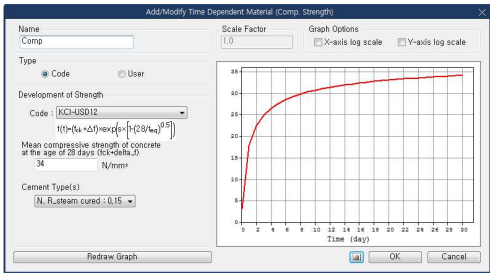
나. 정적 탄성계수 (28일 기준)

$$E_c = 0.077 m_c^{1.5} \sqrt{f_{cm}} \text{ (MPa)}$$

m_c: 콘크리트 단위용적질량 (kg/m^3)/1000 (즉, ρ = 2400 → $m_c = 2.4$)
f_{cm}: 평균 압축강도 (MPa) ※일반적으로 보통콘크리트의 $E_c \approx 29{,}000 \sim 35{,}000$ MPa

다. 시간의존 탄성계수

$$E_c(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)} \cdot E_c$$



•$\beta_{cc}(t)$: 시간 경과 함수 (강도 발현률 반영)

라. 크리프용 초기탄성계수

$$E_{ci} = 1.18 E_c$$

CEB-FIP 90에서 크리프 해석 시 사용하는 초기접선 탄성계수.
(실무에서는 $E_{ci}(t_0) = \sqrt{\beta_{cc}(t_0)}\, E_{ci}$형태로 하중재령 반영)

마. 크리프용 초기탄성계수

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left[\beta_{sc}\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right]$$

•β_{sc}: 시멘트 종류별 계수
- 4 : 천천히 경화 (slow hardening)
- 5 : 보통/빠른 경화 (normal / rapid)
- 8 : 고강도 빠른 경화 (rapid hardening high strength)

© MIDAS IT Co., Ltd

41

계산 순서는 간단합니다.

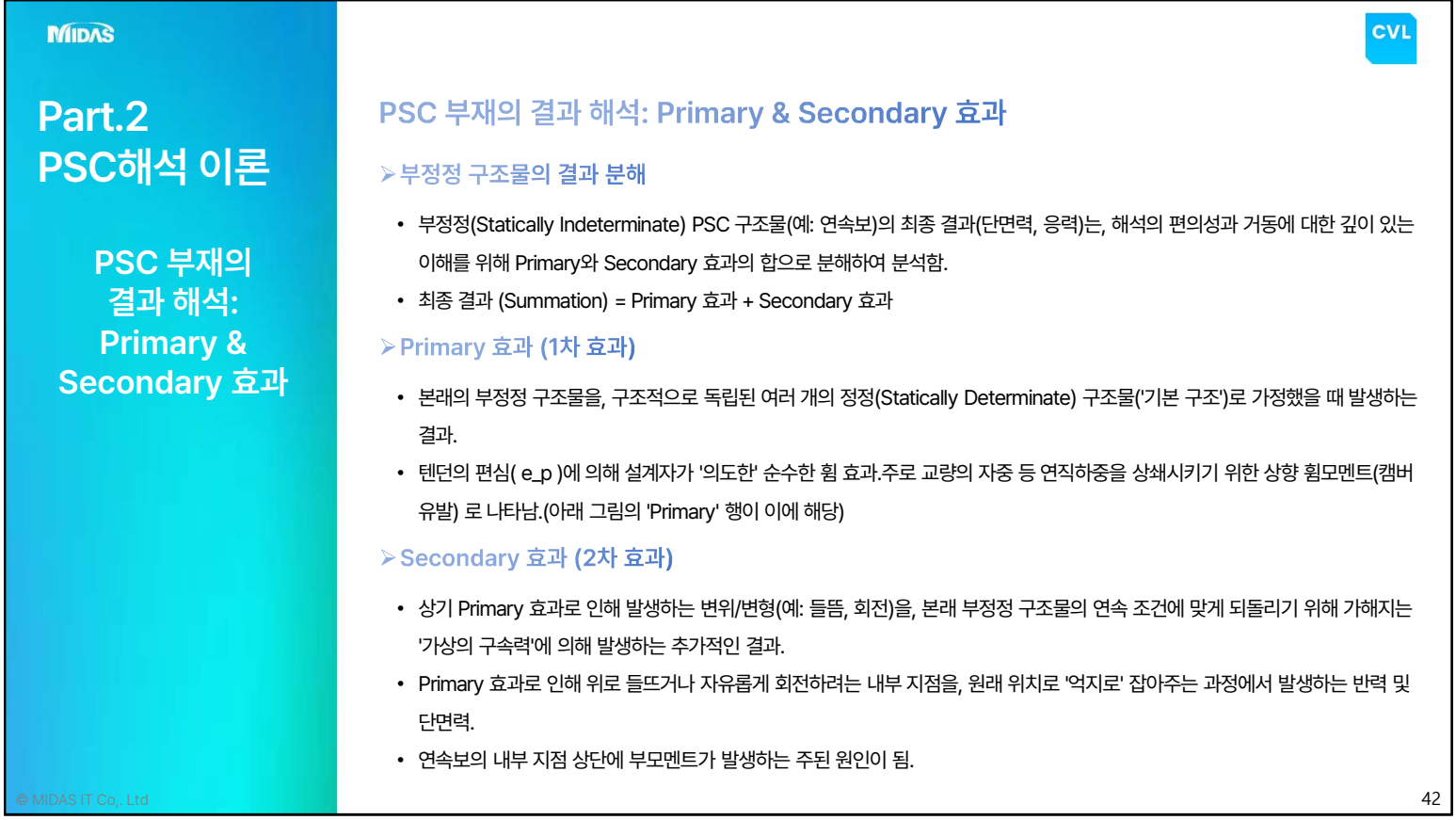
먼저, 우리가 알고 있는 28일 강도를 바탕으로 기준이 되는 '정적 탄성계수(Ec)'를 구합니다.

그리고 바로 이 기준 값에, 앞서 본 강도 발현 함수(βcc(t))를 적용하여, 우리가 원하는 특정 시간 t에서의 '시간의존 탄성계수' Ec(t)를 최종적으로 구하는 것입니다.

이때, 강도가 얼마나 빨리 강해지는지를 결정하는 것이 바로 시멘트 종류 계수, (βsc)입니다.

결론적으로, 엔지니어는 28일 강도와 시멘트 종류만 정확히 알면, MIDAS CIVIL에서 이 모든 과정을 통해 각 시공단계에 맞는 탄성계수를 자동으로 계산하고 적용해 줍니다.

이것이 재령 효과 해석의 핵심입니다.



해석 이론의 마지막 주제입니다. PSC 해석 결과를 분석할 때 반드시 이해해야 하는 **'Primary'와 'Secondary' 효과**에 대해 알아보겠습니다.

특히 연속보와 같은 부정정 구조물에서 매우 중요한 개념입니다.

간단히 말해, 우리가 해석 프로그램을 통해 얻는 최종 결과(Summation)는, 설계자가 '의도한 효과(Primary)'와, 구조물이 연속보이기 때문에 어쩔 수 없이 발생하는 **'부수적인 2차 효과(Secondary)'**, 이 두 가지의 합으로 이루어져 있습니다.

'Primary 효과'란, 교량이 만약 여러 개의 독립된 단순보로 이루어져 있다고 가정한 상태, 즉 정정 구조물일 때 발생하는 순수한 결과입니다.

프리스트레스의 경우, 우리가 텐던을 구부려 놓음으로써 의도적으로 만들어낸, 자중을 상쇄시키기 위한 '상향 휨모멘트'가 바로 Primary 효과입니다.

'Secondary 효과'는 실제 교량은 독립된 보가 아니라 하나로 이어진 연속보입니다.

Primary 효과 때문에 중간 지점에서 위로 들뜨려는 보를, 연속보의 지점이 원래 위치에 있도록 **억지로 구속하면서 생기는 추가적인 힘**이 바로 Secondary 효과입니다.

Part.2
PSC해석 이론

PSC 부재의
결과 해석:
Primary &
Secondary 효과

PSC 부재의 결과 해석: Primary & Secondary 효과

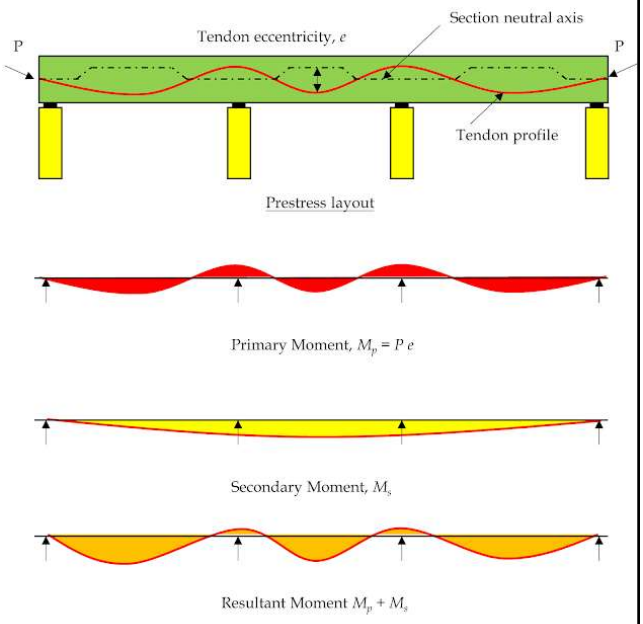
➢적용 범위 및 해석

가. 적용 하중

- 긴장력 뿐만 아니라, 변형을 유발하는 모든 하중(크리프, 건조수축, 온도변화, 지점침하 등)에 대해, 부정정 구조물에서는 Primary 및 Secondary 효과가 모두 발생함.

나. 공학적 해석

- Primary와 Secondary 효과를 분리하여 검토함으로써, 설계자가 의도한 효과와 구조 시스템의 구속으로 인해 부수적으로 발생한 효과를 명확히 구분하여 구조물의 거동을 깊이 있게 파악할 수 있음.

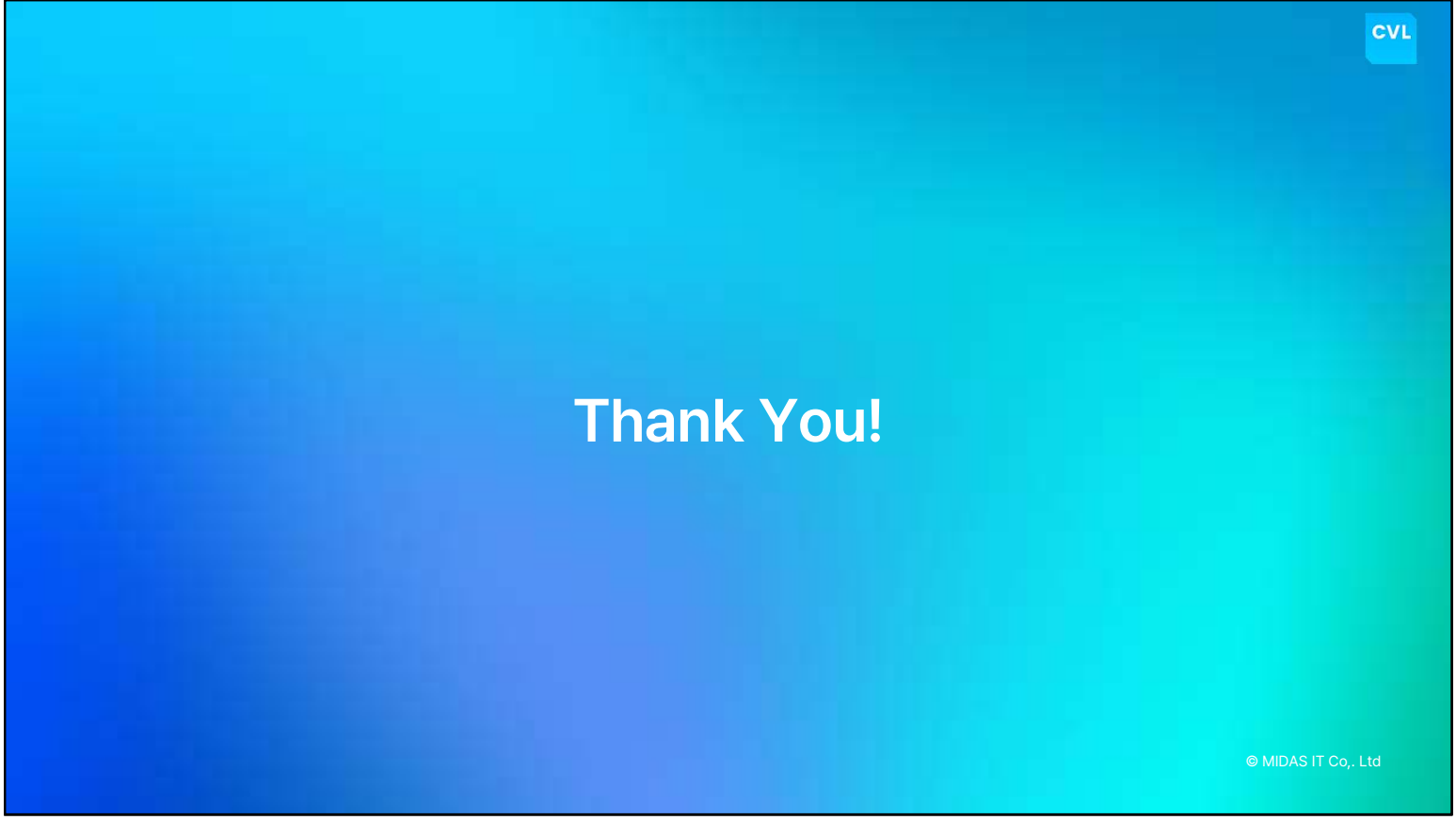


© MIDAS IT Co., Ltd

이 '구속력' 때문에 그림처럼, 연속보의 내부 지점에는 아래로 처지게 만드는 부모멘트가 발생하게 됩니다.

결국 우리가 실제로 보는 최종 휨모멘트는, 우리가 의도한 Primary 효과와, 연속보이기 때문에 필연적으로 발생하는 Secondary 효과가 합쳐진 결과입니다.

이러한 개념은 프리스트레스 뿐만 아니라, 변형을 유발하는 크리프, 건조수축 등 모든 효과에 동일하게 적용되며 , 이 두 가지를 구분해서 볼 수 있어야 PSC 구조물의 거동을 깊이 있게 이해할 수 있습니다.



네, 여기까지 PSC 교량의 기본 개념부터 다양한 가설 공법의 특징, 그리고 정밀 해석을 위해 반드시 알아야 할 시간의존 특성과 부정정 구조물의 거동 원리까지, PSC 교량의 이론적 배경 전반을 살펴보았습니다.

다소 복잡하고 어려운 이론들이었지만, 이 개념들이야말로 PSC 교량의 거동을 깊이 있게 이해하고 올바른 해석 모델을 구축하는 데 필수적인 근간이 됩니다.

이제, 복잡한 이론을 바탕으로 수행되는 해석 및 설계 작업을 어떻게 하면 더 효율적으로 자동화할 수 있는지에 대해 알아보겠습니다.

다음 파트에서는 MIDAS API, 즉 **MAPI**의 개념과 실제 활용 방안에 대해 설명드리도록 하겠습니다.