교량의 효율적 유지관리를 위한 누수처리 시스템 도입 검토

제공처 : 한국도로공사 설계처

출처 : 2019년도 고속도로 설계 실무자료집(2020, 한국도로공사)

1. 일반현황

1.1 검토 배경

(1) 교량 구조물 열화는 염화물 사용과 누수로 인해 야기되며, 그간 우리공사는 누수로 인한 열화 예방을 위해 지속적으로 노력 중임

(2) 그간 추진경위

년도	구 분	비 고
1999	- 완전일체식교대 교량 시험시공 ·평촌1교 : 콘트리트교, L=90m	
2009	- 일체식교대 교량 설계지침 제정 ·최대 연장 : 강교 90m, 콘크리트교 120m ·사각 30° 이하	
2011	- 무조인트 교량 설계 적용 ·최대 연장 : 콘크리트교 225m ·사각 30° 이하	적용 연장 확대
	- 다경간 교량 신축이음장치 최소화를 위한 다점 고정방식 ·교각 변위를 이용하여 신축이음장치 개수 감소	누수 지점 최소화
2012	- 단경간교 Slab Extension 방안 검토 ·고정단 교대 적용, 사각 45° 이하	단순교 일부 교대 누수 예방
2018	- 연속교 슬래브 익스텐션 적용 방안 검토 ·콘크리트교 225m, 사각 45° 이하	연속교 양측 교대 누수 예방
	- 일체식교대 교량 설계지침 개정(2018년) ·최대 연장 : 강교 400m, 콘크리트교 500m ·사각 30° 이하	적용 연장 확대

(3) 신축이음장치 하부의 염화물 및 누수로 인한 구조물 열화 사례



(4) 무조인트 교량 도입으로 대부분 누수 예방 가능하나 취약한 교량 상존

(4.1) 교량 연장 500m 이상이거나 확폭되는 경우 누수 취약부(신축이음장치) 발생

(5) 신축이음장치 설치 위치의 누수 처리 방안 필요

2. 현황 및 문제점

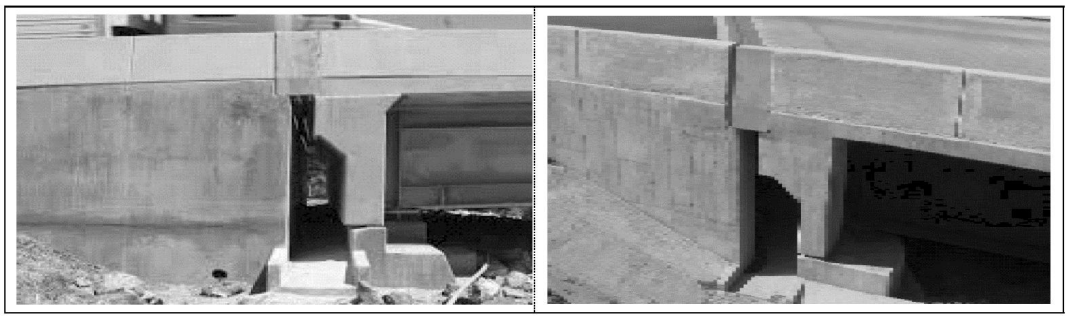
2.1 해외 사례 조사

(1) 버지니아 교대 · 교각

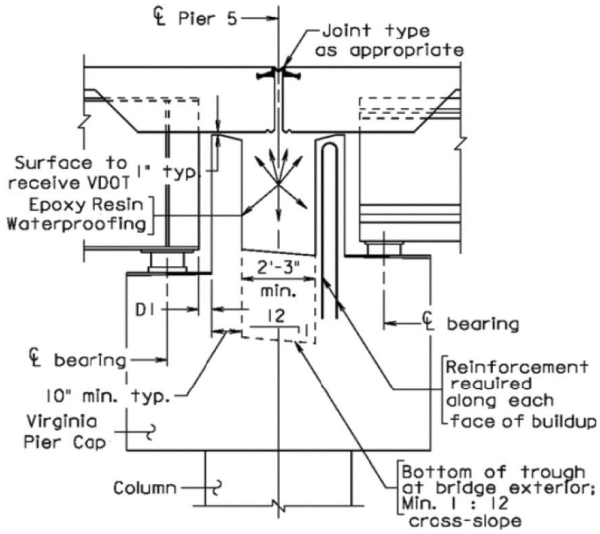
(1.1) 개요

(1.1.1) 신축이음부 누수가 교량받침에 이르지 못하도록 콘크리트 격벽 설치 - 신축이음장치 설치 부위의 누수 처리로 열화 예방 가능

(1.2) 시공사진



(1.3) 개요도 및 규정 (VDOT Manual of the Structure and Bridge Division)

교각	
	- 격벽의 두께는 최소 **10in(25.4cm)** 적용 - 누수 침투와 슬라브 처짐을 고려하여 격벽~슬라브 간격을 **1in(2.54cm)** 이격 - 신축이음부 하부 내부공간 에폭시 레진 방수 처리 - 배수로 폭은 최소 **2ft 3in(68.58cm)** 적용, 구배는 최소 **1:12** 적용 등

3. 개선내용

3.1 누수처리 시스템 검토

3.1.1 인주2교 누수처리 교각 설계

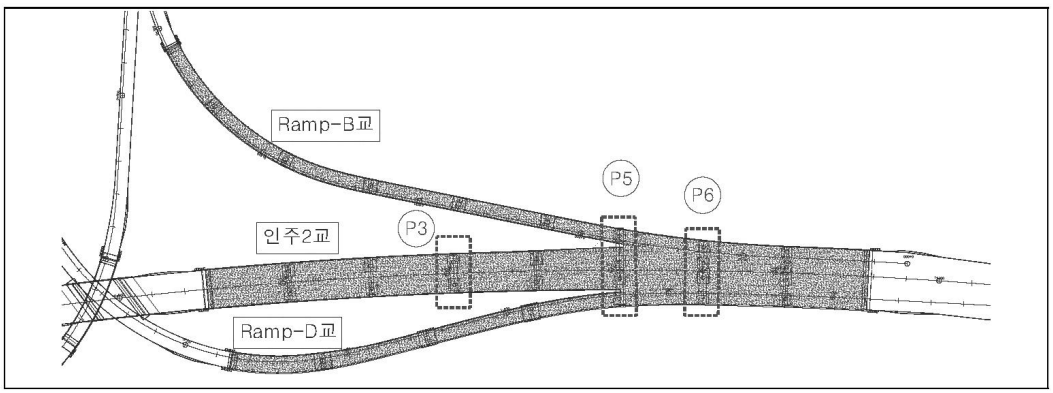
(1) 인주2교 (rec거더+강교)

(1.1) (PSC 거더) 본선 : L=(3@50)+(2@50)+50+(2@50)=400m, R=2,800

(1.2) (강교) R-B교 : L=45+4@55+45=310m, R= 완화곡선+160

R-D교 : L=55+2@65+55=240m, R= 완화곡선+160

(2) 평면도

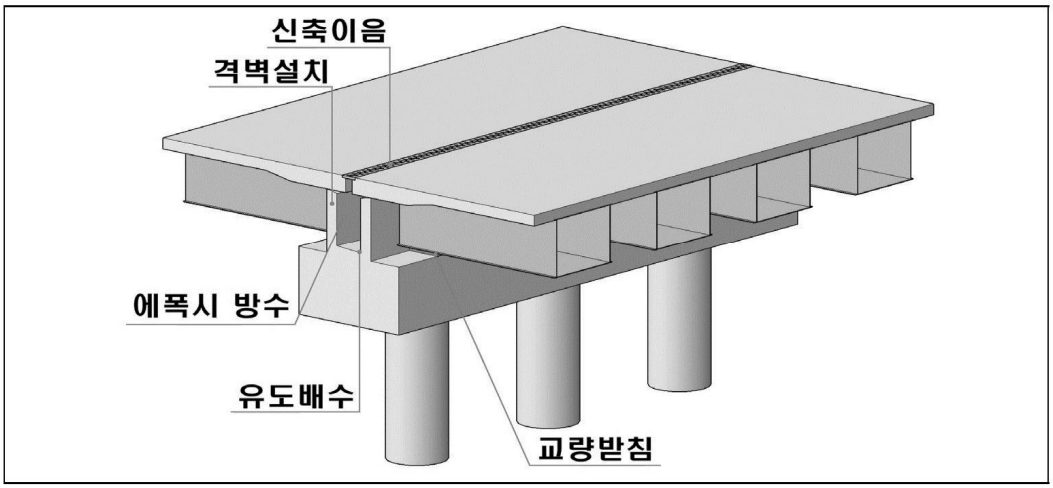


(3) 누수예방 교각 적용 사유

(3.1) P5 : 확폭 및 강교, PSC거더교 상존에 따른 신축이음장치 설치

(3.2) P3, P6 : PSC거더교 확폭으로 인한 신축이음장치 설치

(4) 개요도



3.2 기술 자문 추진

해외 사례 준용에 따른 시공 시 문제점, 구조검토 적정성 등 자문

3.2.1 설계 자문 개요

(1) 자문위원 : WSP USA 이승우 박사 외 5인

(2) 자문요청 내용

(2.1) 상기 개발 기술의 실무적용 및 구조검토 적정성

(2.2) 배수흐름의 적정성, 시공성 및 기타 제언 등

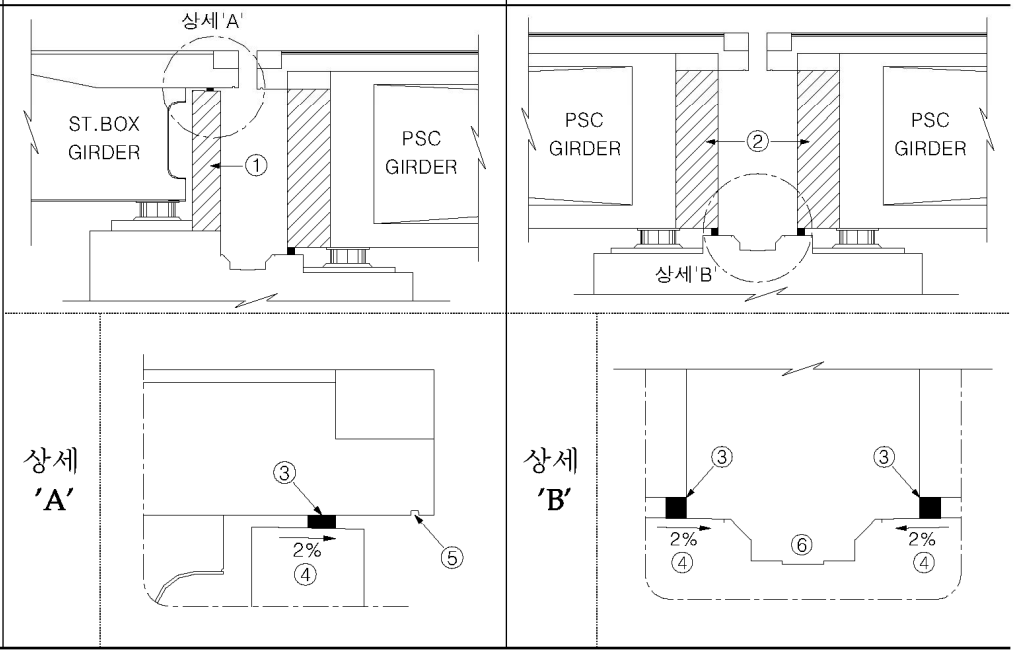
3.2.2 설계 자문 주요 내용

구분	주요 내용	조치계획 및 검토결과
1	- 단부 격벽과 상부 박스거더의 협착 방지를 위해 상시 및 지진시 이동량을 고려한 여유 간격 규정 필요	- 상시 및 지진시 이동량 검토를 통해 거더와 격벽사이의 충분한 간격을 확보하겠음
2	- 물막이 격벽측으로의 누수 흐름 방지를 위해 바닥판 하단에 물끊기 홈 설치 검토	- 바닥판 연장 단부 하단에 차수 Notch를 설치하겠음
3	- 구조물 열화예방 및 내구성 증진을 위해 누수 시 예상 접촉면에 대한 방수처리 필요	- 격벽 내측면에 적정한 방수 공법을 적용하겠음
4	- 배수로에 U형 채널 설치 등으로 바닥면 열화 및 체수 방지 방안 필요	- 배수로에 부식에 강한 스테인레스 재질 등으로 U형 채널을 설치하겠음
5	- 배수로 연결부에 누수를 예방할 수 있는 상세 검토 필요	- U형 채널 이음부와 집수정 연결부 등의 누수예방 상세를 반영하였음
6	- 코핑 폭원이 넓어 미관 고려 대상 교량 적용 시 검토 필요	- 미관 적용 대상 교량의 경우 연단거리 최소화 방안을 검토하겠음
7	- 바닥판 두께를 다소 증가시키는 방법 등으로 전단 철근을 생략하는 방법 검토 필요	- 단부 바닥판 연장부 두께를 증가시켜 전단철근이 필요 없도록 반영하겠음

3.3 누수처리 시스템 상세 설계(안)

3.3.1 관련 내용 상세

(1) 인주2교 확폭부 적용 (인주-염치간 고속도로)

<table>
<tr><th>구 분</th><th>ST.BOX Girder</th><th>PSC Girder</th></tr>
<tr><td>적용
위치</td><td>P5</td><td>P3, P5, P6</td></tr>
<tr><td>단
면
도</td><td colspan="2">
</td></tr>
</table>

(2) 적용 상세 사항

(2.1) 교각 코핑 상단 격벽 설치 (ST.BOX거더)

(2.2) 단부 가로보 하단 격벽 설치 (PSC거더)

(2.3) 방수형 봉함재 설치

(2.4) 배수로 벽체 상면은 내측으로 2% 경사 적용

(2.5) 물끊기 홈(30x20x20㎜) 단부에서 5㎝ 이격*

(2.5.1) 콘크리트 바닥판 단부 상세설계 개선(안) 검토[구조물연구실-157('16.3.11)]

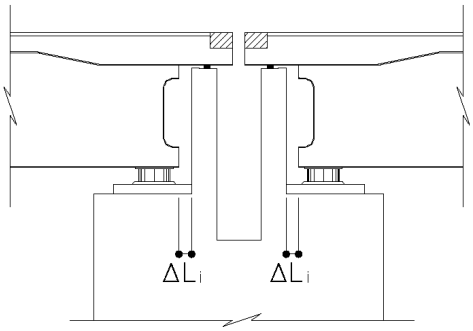
(2.6) 코핑 중앙부 배수로 설치(배수 상세도, 재질 및 규격 5.1절 참조)

※ 기타 : 신축이음장치 하부 공간 콘크리트 표면 방수재 적용

3.3.2 상부구조 이동량 검토

(1) 상시 및 지진시 이동량 검토를 통해 거더~격벽 사이에 공간 확보

(1.1) 교량 상부형식별 이동량 검토(5.2정 참조)



- 상　시 : $\Delta L_i \geq \Delta L_t + \Delta L_r$
- 지진시 : $\Delta L_i \geq d + 0.4\Delta L_t$

여기서,

- ΔL_t = 온도변화로 인한 이동량
- ΔL_r = 활하중 거더 처짐 이동량
- d = 지반에 대한 상부구조 총변위

※ 건조수축 및 크리프 이동량은 공간 확보에 영향을 미치지 않으므로 고려하지 않음

4. 결론

4.1 설계 적용 방안

(1) 부득이하게 신축이음장치가 필요한 곳에 적용

(1.1) 반일체식교대 적용 불가한 교량(연장 500m, 도로교각5 ° 초과)의 중간 교각

(1.2) 복합 상부구조를 갖는 교량의 교각

(1.3) 확폭 교량 사이의 교각

(2) 설계 중 노선(대산~당진, 동광주~광산)부터 적용

※ 필요시 건설사업단 시험 시공(건설처 협조)

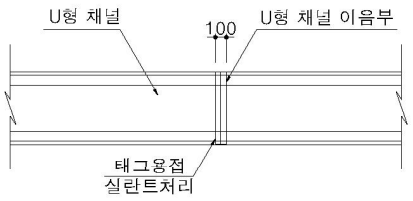
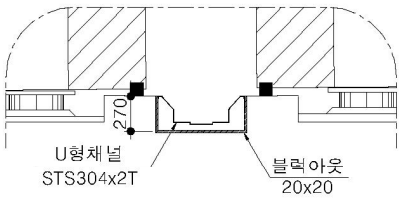
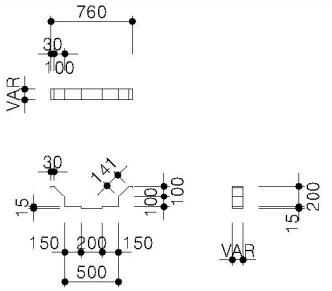
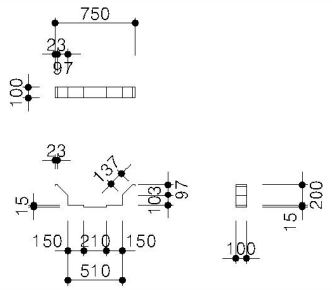
4.2 기대효과

(1) 신축이음장치 부위의 누수 처리로 구조물 장수명化 실현

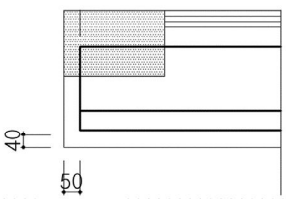
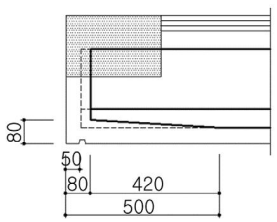
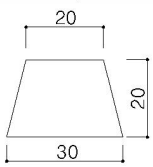
5. 기타

5.1 누수처리 교각 관련 상세도

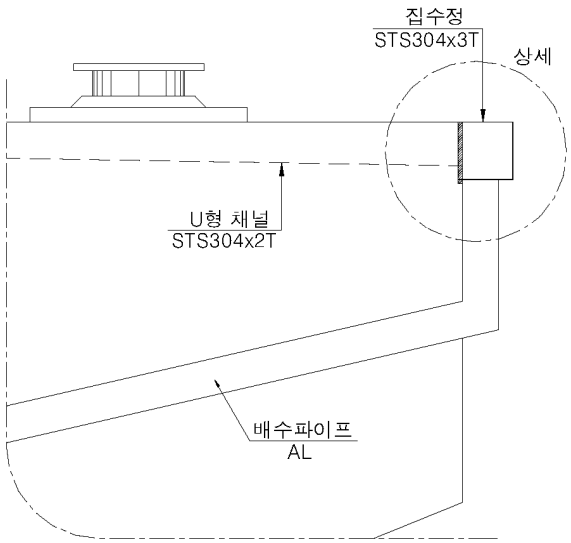
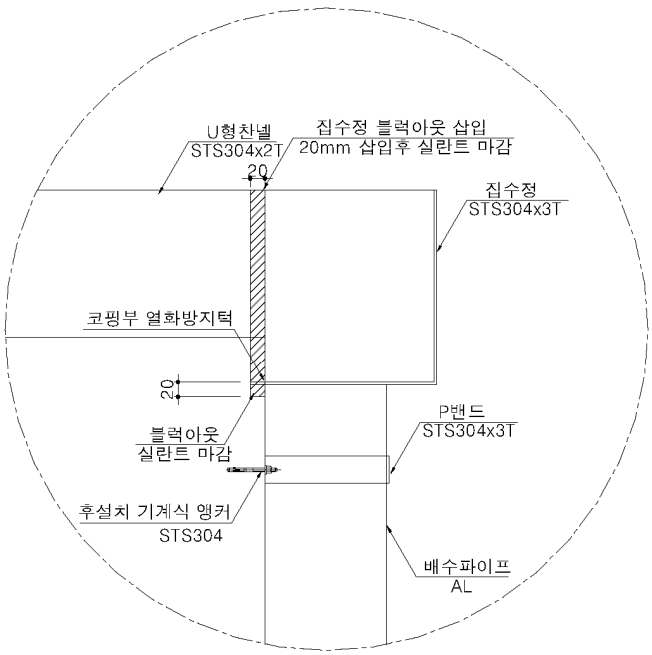
1-1 U형 채널 및 이음부의 상세도, 재질, 설치 형상

U형 배수로 평면도	U형 배수로 단면도
	
U형 채널(STS304×2T)	**U형채널 이음부(STS304×2T)**
	

1-2 물끊기 홈 상세도 및 규격 ※ 구조물연구실-157('16.3.11)

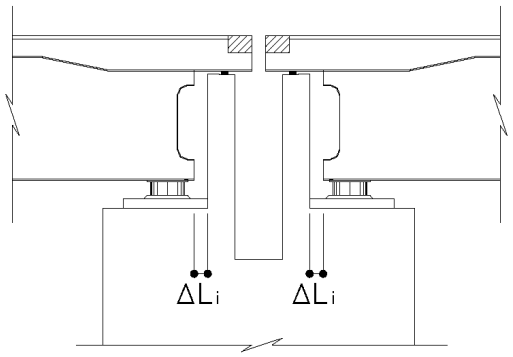
구분	기 존	개 선 (안)
신축 이음부		
	① 단부 피복두께 : 40mm ② 물끊기 홈 : 미설치	① 단부 피복두께 : 70mm ② 물끊기 홈 : 단부에서 50mm
물끊기 홈 규격		

1-3 U형 배수로와 배수홈통의 연결지점 상세

배수로 및 배수홈통 연결부	
연결 상세	

5.2 상시 및 지진 시 이동량 검토

(1) 상시 및 지진시 이동량 산정 방법



- 상 시 : $\Delta L_i \geq \Delta L_t + \Delta L_r$
- 지진시 : $\Delta L_i \geq d + 0.4\Delta L_t$

여기서,

- $\triangle I_i$ = 교량의 여유 간격(mm)
- $\triangle I_t$ = 온도변화로 인한 이동량(mm) = $\triangle T \bullet a \bullet L$
- $\triangle I_r$ = 활하중으로 인한 거더 처짐에 의한 이동량(mm) = $\sum(h_i \bullet \theta_i)$
- $\triangle T$ = 온도변화(℃) : 콘크리트교 40℃, 강교 50℃
- L = 신축거더 길이(mm)
- a = 열팽창계수
  - 콘크리트 : 1.0×10^{-5}
  - 강재 : 1.2×10^{-5}
- h_i = 거더의 중립축으로부터 받침의 회전중심까지의 거리(mm) = $2h/3$
- θ_i = 받침 상부의 거더 회전각(rad)
  - 콘크리트교 : $1/300$
  - 강교 : $1/150$
- d = 지진 시 지반에 대한 상부구조 총변위 = $d_i + d$

(2) 콘크리트교 상시 및 지진시 이동량 산정 예시

- 교량형식 : PSC Beam교
- 신축거더길이(L) : 150,000㎜
- 거더높이 : 1,800㎜
- 지진 시 상부구조 총변위(d) : 100㎜
- $\triangle I_t = \triangle T \bullet a \bullet L = 40\times1.0\times10^{-5}\times150{,}000 = 60$㎜
  (격벽과 상부구조의 협착에 의한 검토이므로 신장량만 고려하면 되나 시공시 온도 보정에 대한 오차를 감안하여 보수적으로 40℃ 적용)
- $\triangle I_r = \sum(h_i \bullet \theta_i) = 2/3\times1{,}800\times1/300 = 4$㎜

- 상시 여유 이동량($\triangle_0$) $= \min(50 \cdot a \cdot L, 50\text{㎜}) = 50\text{㎜}$
- 상시 이동량

  $\triangle L_i = \triangle L_t + \triangle L_r + \triangle_0 = 60 + 4 + 50 = 114\text{㎜}$
- 지진시 이동량

  $\triangle L_i = d + 0.4\triangle L_t = 100 + 0.4 \times 60 = 124\text{㎜}$

  ∴ 교량의 여유 간격($\triangle L_i$)은 124㎜ 이상 확보하여야 한다.

(3) 강합성교 상시 및 지진시 이동량 산정 예시

- 교량형식 : ST.Box교
- 신축거더길이(L) : 150,000㎜
- 거더높이 : 1,800㎜
- 지진 시 상부구조 총변위(d) : 100㎜
- $\triangle L_t = \triangle T \cdot a \cdot L = 50 \times 1.2 \times 10^{-5} \times 150{,}000 = 90\text{㎜}$
- $\triangle L_r = \sum(h_i \cdot \theta_i) = 2/3 \times 1{,}800 \times 1/300 = 4\text{㎜}$
- 상시 여유 이동량($\triangle_0$) $= \min(50 \cdot a \cdot L, 50\text{㎜}) = 50\text{㎜}$
- 상시 이동량

  $\triangle L_i = \triangle L_t + \triangle L_r + \triangle_0 = 90 + 4 + 50 = 144\text{㎜}$
- 지진시 이동량

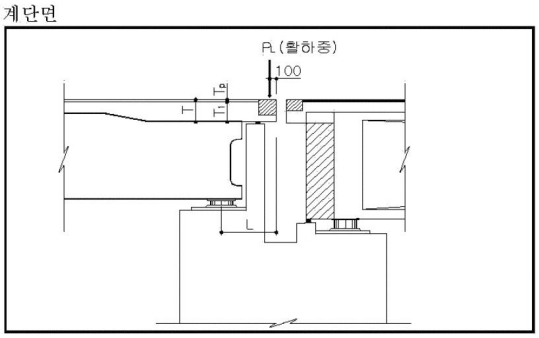
  $\triangle L_i = d + 0.4\triangle L_t = 100 + 0.4 \times 90 = 136\text{㎜}$

  ∴ 교량의 여유 간격($\triangle L_i$)은 144㎜ 이상 확보하여야 한다.

5.3 바닥판 단부 구조계산서

1. 단부 슬래브 연장부 설계

□ 설계단면



L	1.400 m	
L'	1.404 m	(skew 고려)
T_P	0.050 m	
T_1	0.420 m	
T	0.470 m	
skew	4.2 °	

(1) 하중산정

1) 고정하중(DC)

○ P_{dc} = 1.404 × 0.420 × 25.0 = 14.740 kN

○ M_{dc} = 14.740 × 0.702 = 10.345 kN-m

2) 고정하중(DW)

○ P_{dw} = 1.404 × 0.050 × 23.5 = 1.649 kN

○ M_{dw} = 1.649 × 0.702 = 1.158 kN-m

3) 활하중 (주철근방향이 차량진행방향에 평행한 경우)

① 1축 후륜하중

○ 분 포 폭 E = 0.35 X + 0.98 < 2.100 m

= 0.35 × 1.300 + 0.98 = 1.435 m **O.K!**

○ 충격계수 i = = 0.25

○ 폭 1m 당 M_L = P X / E × (1 + i) = 108.711 kN-m

V_L = = 66.899 kN

② 2축 텐덤하중(바닥판 연장부 지간이 1.2m를 넘을 경우 검토)

○ 바닥판 연장부 지간이 1.2m를 넘으므로 2축 텐덤하중 고려

○ 분 포 폭 E = 0.35 X + 0.98 < 2.100 m

= 0.35 × 0.700 + 0.98 = 1.225 m **O.K!**

○ 충격계수 i = = 0.25

○ 폭 1m 당 M_L = P X / E × (1 + i) = 96.429 kN-m

V_L = = 110.204 kN-m

∴ M_L = 108.711 kN-m , V_L = 110.204 kN-m 적용

(2) 하중조합 (단위 : kN-m)

구 분	DC	DW	LL(IM)		휨모멘트	전단력
극한 한계상태 I	1.25	1.50	1.80		210.348	219.266
사용한계상태 V	1.00	1.00	0.00		11.503	16.389

(3) 극한한계상태 휨강도 검토

1) 설계조건

M_u = 210.348 kN-m	f_{ck} = 35.0 MPa	f_y = 500.0 MPa
b = 1000.0 mm	d = 360.0 mm	d' = 60.0 mm
Φ_c = 0.65	Φ_s = 0.90	β_1 = 0.801

○ 콘크리트 강도에 따른 응력-변형률 곡선 계수

- n (상승곡선부 형상지수) = 2.00
- ε_{co} (최대응력에 처음 도달할 때의 변형률) = 0.0020
- ε_{cu} (극한 변형률) = 0.0033
- α (압축합력 크기 계수) = 0.800
- β (작용점 위치계수) = 0.400

2) 필요 휨철근량 산정

○ $c = \Phi_s \times A_s \times f_y / (\alpha \times \Phi_c \times 0.85 \times f_{ck} \times b)$ = 0.02909 A_s

○ $M_r = \Phi_s \times A_s \times f_y \times (d - \beta \times c)$

$= -5.2359\ A_s^2 + 162000.00\ A_s$ = 2.10E+08 N-mm

○ $A_{s,req}$ = 1358.1 mm^2

○ 최소철근량 검토

ⓐ $= A_{s,req} \times 1.2$ = 1629.7 mm^2

ⓑ $= 1.4 / f_y \times b \times d$ = 1008.0 mm^2

ⓒ $= 0.25 \sqrt{(f_{ck})} / f_y \times b \times d$ = 1064.9 mm^2

ⓓ $= 0.75 \times A_g / f_y$ = 630.0 mm^2

○ $A_{s,min}$ = min(ⓐ,max(ⓑ,ⓒ,ⓓ)) = 1064.9 mm^2

○ $A_{s,use}$ = H 16 @ 125 × 1 단 = 1588.8 mm^2 ∴ O.K

3) 허용최대 중립축 깊이

○ δ = = 1.00

○ c_{max} = ($\delta \times \varepsilon_{cu} / 0.0033 - 0.6$) × d = 144.00 mm

○ c = $\Phi_s \times A_s \times f_y / (\alpha \times \Phi_c \times 0.85 \times f_{ck} \times b)$ = 46.22 mm

○ c_{max} = 144.00 mm > c = 46.22 mm ∴ O.K

4) 인장철근 변형률 검토(항복여부 검토)

○ $\varepsilon_s = (d - c) / c \times \varepsilon_{cu}$ = 0.0224 > ε_{yd} = 0.002 ∴ O.K

5) 휨강도 계산

○ C = $\alpha \times \Phi_c \times 0.85 \times f_{ck} \times b \times c$ = 714960 N-mm

○ T = $\Phi_s \times A_s \times f_y$ = 714960 N-mm

C = T 이므로 O.K

○ $M_r = \Phi_s \times A_s \times f_y \times (d - \beta \times c)$ = 244.169 kN-m

○ M_u = = 210.348 kN-m ∴ O.K

6) 배력철근량 산정

○ 주철근량의 20%이상 배치 = 317.8 mm^2

○ 건조수축 및 온도변화에 대한 보강철근 = 630.0 mm^2

○ $A_{s,min}$ = = 630.0 mm^2

○ $A_{s,use}$ = H 16 @ 200 × 1 단 = 993.0 mm^2 ∴ O.K

(4) 전단강도 검토

1) 설계조건

V_u =	219.266	kN	f_{ck} =	35	MPa	f_y =	500	MPa
b =	1000.0	mm	d =	360.0	mm	d' =	60.0	mm
Φ_c =	0.65		Φ_s =	0.90		f_{ctk} =	2.4	MPa

2) 전단강도 검토

○ V_{cd} = $[0.85 \cdot \Phi_c \cdot \kappa \cdot (\rho \cdot f_{ck})^{\wedge(1/3)} + 0.15 f_n] \cdot b_w \cdot d$ = 186264 N

○ $V_{cd,min}$ = $(0.4 \cdot \Phi_c \cdot f_{ctk} + 0.15\ f_n) \cdot b_w \cdot d$ = 226050 N

○ κ = $1 + \sqrt{(\ 200 / d\ )} \leq 2.0$ = 1.745

○ ρ = $A_s / (\ b_w \cdot d) \leq 0.02$ = 0.00441

○ f_n = $(N_u - A_s \times \Phi_s / f_y) / A_c$ = 0.0

○ A_s = 1589 mm^2

○ N_u = $f_{m,t} \times A_p$ = 0 N

○ A_c = 420000 mm^2

○ ν = $0.6 \cdot (1 - f_{ck} / 250)$ = 0.516

○ V_{cd} = 186 kN < $V_{cd,min}$ = 226 kN 이므로

○ V_{cd} = 226 kN > V_u = 219 kN

∴ O.K 전단보강 필요 없음

(5) 사용한계상태 검토

1) 균열검토(간접균열제어)

① 단면 균열여부 검토

○ 비균열 가정시 인장 연단 응력

- f_t = M / Z

= M / (b x h^2 / 6)

= 0.312 MPa < fctk = 2.415 MPa **∴ 비균열 단면 검토**

② 철근에 발생하는 응력

○ M_s = 11503201 N-mm

○ n = E_s / E_c = 6.127

○ x = $[b \cdot h^2/2 + (n-1) \cdot A_s \cdot d] / [b \cdot h + (n-1) \cdot A_s]$ = 340.376 mm

○ I = $b \cdot h^3/12 + b \cdot h \cdot (x-h/2)^2 + (n-1) \cdot A_s \cdot (d-x)^2$ = 5.75E+07 mm^4

○ f_s = $n \cdot M_s \cdot (d - x) / I$

= 24.050 MPa < $0.8 \cdot f_y$ = 400.000 MPa **∴ O.K**

③ 균열 검토

○ 비균열 단면이므로 균열검토 생략

(6) 단부슬래브 연장부 처짐량 검토

1) 슬래브 익스텐션부 재하하중에 의한 처짐

○ 바닥판 콘크리트 탄성계수(E) : 32,640 MPa

○ 단부슬래브 연장부 단면2차모멘트(I) : 6,174,000,000 mm^4 (폭 1.0 m)

○ 자중에 의한 처짐 (δ_d)

$WL^4 / 8EI$ = 25 × 0.47 × 1404 ^{4} / (8 EI)

= 0.028 mm

○ 단부슬래브 연장부 재하 윤하중에 의한 처짐 (δ_L)

$PL^3 / 3EI$ = 96 × 1000 × 1304 ^{3} / (3 EI)

= 0.352 mm

∴ 단부슬래브 연장부 재하하중에 의한 처짐 = $\delta_d + \delta_L$

= 0.380 mm

2) 처짐량 검토

○ 단부슬래브 연장부 총 처짐량 (δ_t) = 0.380 mm

○ 격벽 상단부 방수형붕함재 두께 (T_R) = 10.000 mm

δ_t = 0.380 mm < T_R = 10.000 mm ∴ O.K