

보-거더 시스템 슬래브에서 지지부 처짐영향에 관한 연구

Support Deflection Effects in Slabs with Beam and Girder

곽효경* · 송종영**
Kwak, Hyo-Gyoung Song, Jong-Young

Abstract

The support deflection effects in slabs with beams and girders are reviewed for both cases of the uniformly distributed and concentrated wheel loads. The differences in structural behavior according to the variation of support stiffness, namely, the moment of inertia of beam and girder, and the slab thickness, are calculated using the finite element method. Besides, the correction factors which can consider the support deflection effects in slab design are proposed by regression based on the obtained numerical results. Through the comparison studies of slabs with different boundary conditions, the importance for the consideration of support deflection effects in design are emphasized.

1. 서론

지금까지 보-거더 시스템에 존재하는 슬래브는 통상적으로 슬래브의 단변 대 장변의 비인 변장비가 2보다 큰 값을 갖으므로 설계시에 일방향 슬래브로 간주하여 하중이 주로 전달되는 단변 방향에 대해서만 설계하였다. 그러나 일방향으로 설계된 슬래브에 하중이 작용하게 되면 지지부가 되는 중간 보와 거더에 일정한 처짐이 유발되어 설계 가정과는 다른 거동을 나타내게 된다. 따라서 비록 슬래브의 변장비가 2이상이어도 일방향 슬래브의 범주에 속하나 슬래브의 단변방향과 장변방향 동시에 적지 않은 부재력이 발생하여 예기치 않은 휨 균열이 유발되기도 한다. 우리나라 콘크리트 시방서²⁾에 규정된 슬래브의 설계 방법에는 평형조건과 기하학적인 적합조건을 만족시킬 수 있는 어떠한 방법에 의하여 설계할 수 있다는 대전제 아래 직접법과 등가골조법 등이 명시되어 있으나 이 방법들은 보를 가진 슬래브에서 보가 네 기둥사이에 존재하는 패널의 가장자리에 위치한 경우, 즉 양방향 슬래브나 보가 패널 모서리의 기둥 또는 처짐이 일어나지 않는 지지부에 의하여 지지되는 경우에만 적용할 수 있으며, 연직하중의 작용아래 지지부에 일정한 처짐이 유발되는 보-거더 시스템 슬래브의 경우에는 적용시키기가 곤란하다. 비록 콘크리트 표준시방서에 보가 어느 한방향으로만 위치하고 이와 직각방향에 위치한 거더에 의해 보와 슬래브 모두 지지되는 이방향 슬래브도 시방서의 규정을 적용시킬 수가 있으며 이 때에는 지지보와 거더의 처짐 현상에 적합한 해석에 의거하여 설계해야 한다고 규정되어 있으나 그 구체적인 방법은 제시되어 있지 않은

* 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 조교수

** 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

실정이다. 본 연구에서는 이와같은 보-거더 시스템 슬래브에 일반적인 구조물의 설계 활하중인 분포하중 $w=500kg/m^2$ 이 작용하는 경우와 주차장 구조물의 주요하중인 2.4 ton 설계기준차량하중¹⁾이 작용하는 경우, 지지부가 처짐을 일으킬 때 슬래브 부재력에 미치는 영향을 살펴보고 설계 시 이를 효과적으로 고려할 보정계수를 제시하고자 한다.

2. 보-거더 시스템 슬래브의 설정

보-거더 시스템은 그림 1과 같이 널리 사용되고 있는 One-Beam 시스템 슬래브와 Two-Beam 시스템 슬래브가 있으며 일반적으로 슬래브 설계시 단변방향과 장변방향에 대하여 각각 설계하므로 One-Beam 시스템과 Two-Beam 시스템에 존재하는 슬래브는 지지부의 조건에 따라 그림 1의 ㉠, ㉡, ㉢ 슬래브로 나뉠 수 있다.

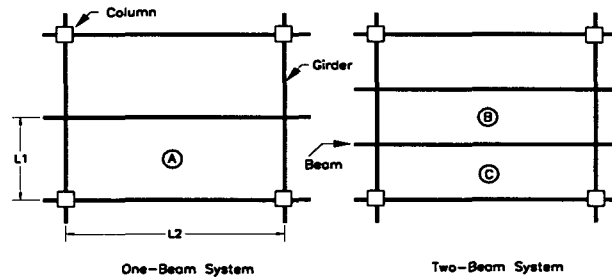


그림 1 보-거더 시스템의 슬래브

슬래브 지지부의 강성은 다음과 같이, One-Beam 시스템의 경우 슬래브의 단변길이를 4m와 6m, Two-Beam 시스템의 경우에는 3m와 5m인 경우를 고려하였으며 이 때 변장비를 2와 3으로 변화시켰다. 또한 슬래브의 지지부가 되는 구조부재의 단면은 표 1과 같이 거더와 중간 보의 단면 깊이와 넓이를 각각 $1.2m \times 1.5m$, $0.8m \times 1.0m$, $0.5m \times 0.6m$ 로, 각각 슬래브의 두께를 0.1m, 0.2m, 0.3m로 변화시키면서 차량하중과 등분포하중이 작용할 때 부재력의 거동을 살펴보았다.

표 1 구조부재의 단면

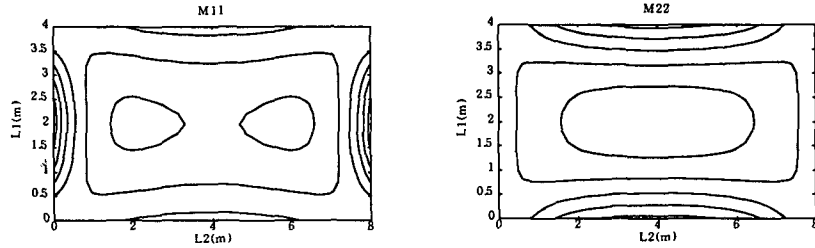
(단위:m)

Case	Girder(B × D)	Beam(B × D)	Slab(t)
A1, A2, A3	0.5 × 0.6	0.5 × 0.6	0.1, 0.2, 0.3
B1, B2, B3	0.8 × 1.0	0.5 × 0.6	0.1, 0.2, 0.3
C1, C2, C3	0.8 × 1.0	0.8 × 1.0	0.1, 0.2, 0.3
D1, D2, D3	1.2 × 1.5	0.5 × 0.6	0.1, 0.2, 0.3
E1, E2, E3	1.2 × 1.5	0.8 × 1.0	0.1, 0.2, 0.3
F1, F2, F3	1.2 × 1.5	1.2 × 1.5	0.1, 0.2, 0.3

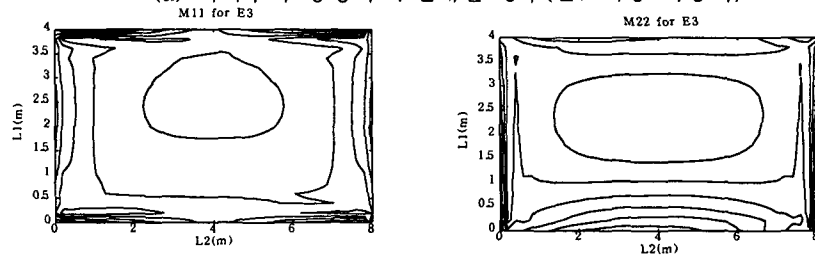
3. 구조해석 및 결과분석

슬래브 ㉠의 경우 등분포하중 $w=500kg/m^2$ 이 작용하는 경우와 차량하중 2.4(1+0.3)ton이 작용하는 경우에 지지부 강성변화에 따른 단변방향 부재력과 장변방향 부재력에 대한 등고선도를 살펴

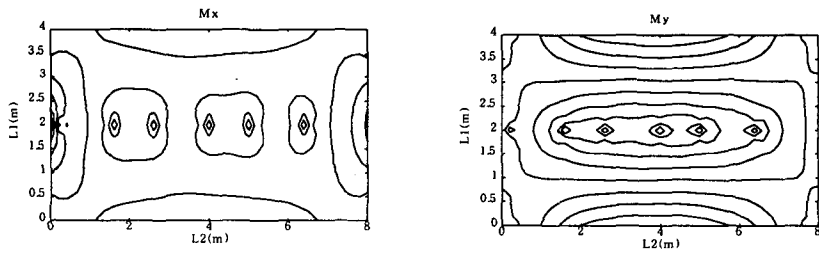
보면 분포하중에 비하여 차량하중의 경우에는 좁은 면적의 차륜을 통해 하중이 전달되므로 차륜 하중의 작용점 아래에 큰 부재력이 유발되어 상대적으로 지지부 강성변화에 의한 영향이 적게 나타남을 알 수 있다.



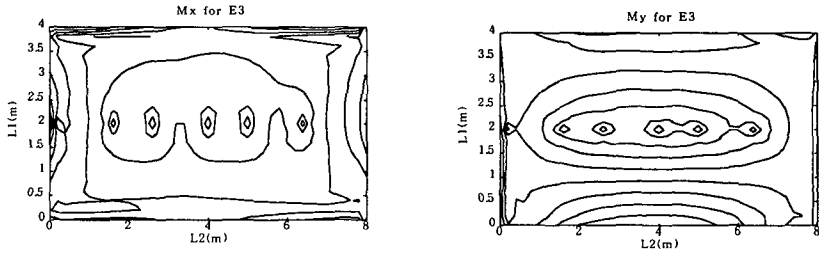
(a) 지지부의 강성이 무한대인 경우(분포하중 작용시)



(b) 지지부의 강성이 E3 case인 경우(분포하중 작용시)



(c) 지지부의 강성이 무한대인 경우(차량하중 작용시)

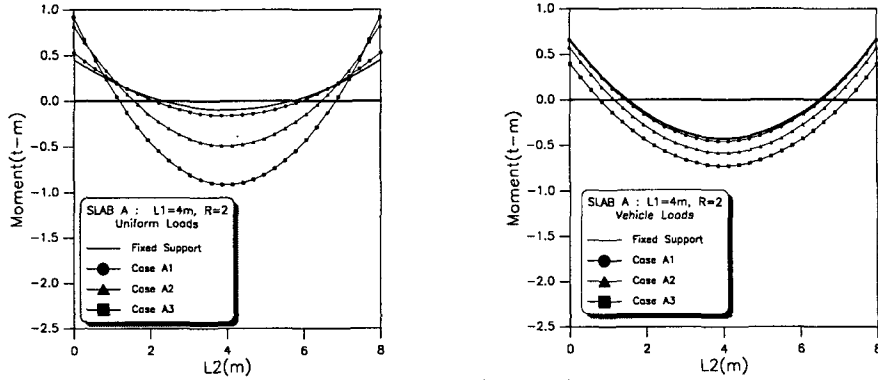


(d) 지지부의 강성이 E3 case인 경우(차량하중 작용시)

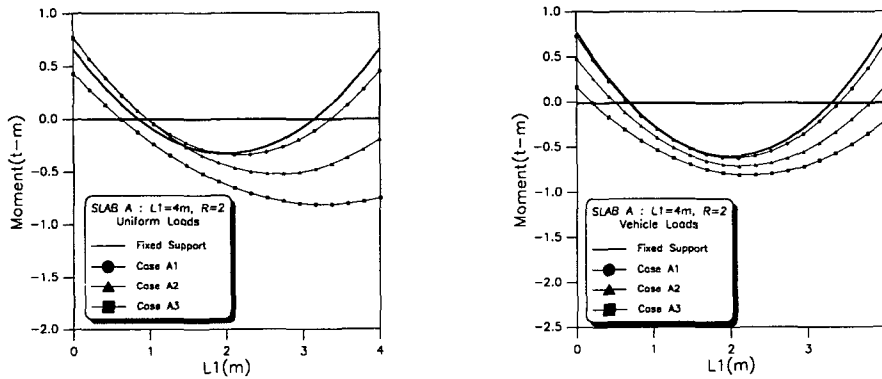
그림 2 지지부 강성변화에 따른 부재력의 등고선도

지지부의 강성이 상대적으로 슬래브의 강성에 비하여 큰 경우인 A1의 경우는 분포하중이 작용하는 경우와 차량하중이 작용하는 경우 모두 고정단 지지부를 갖는 경우와 거의 동일한 부재력을 갖음을 알 수 있다. 그러나 슬래브의 두께가 0.1m(A1의 경우)에서 0.2m(A2의 경우), 0.3m(A3의 경우)로 점점 증가함에 따라 상대적으로 지지부의 강성이 작아져서 하중의 작용아래 지지부의 처

침변형이 커지게 되므로 중앙부의 정모멘트는 증가하고 지점부의 부모멘트는 감소하는 현상이 발생함을 알 수 있다. 차량하중이 작용하는 경우에 비하여 분포하중이 작용하는 경우에 큰 부재력이 발생하는 이유는 기둥과 기둥사이에 존재하는 패널이 분포하중 작용시 마치 한판의 슬래브처럼 거동하여 전체 부재력이 증가하기 때문이며 이러한 현상은 슬래브의 강성이 지지부에 비하여 커질수록 증가함을 알 수 있다(그림 3 (a)).



(a) 장변방향 부재력

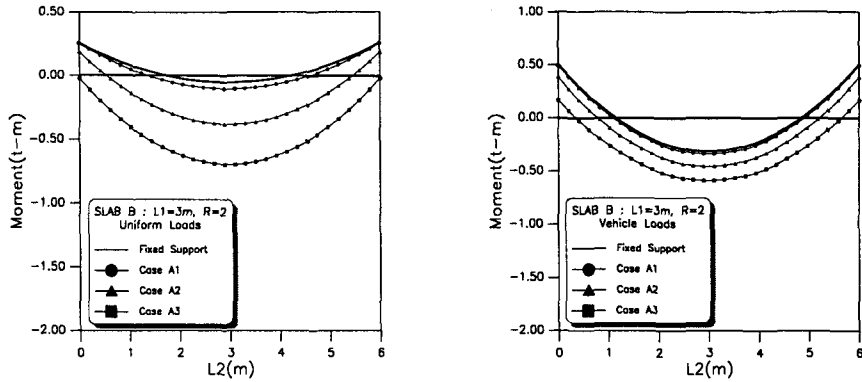


(b) 단변방향 부재력

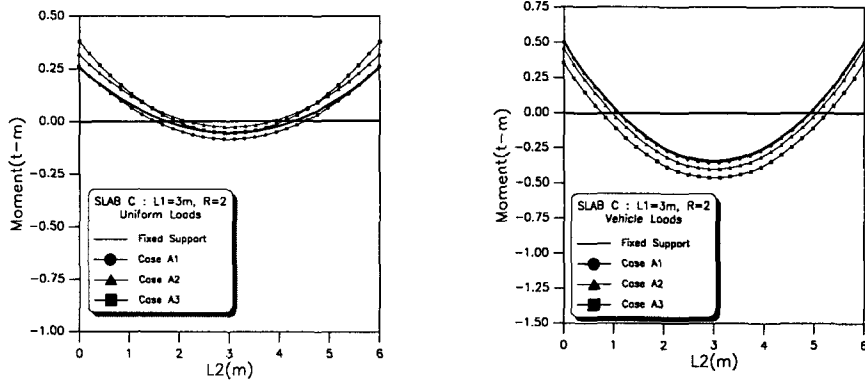
그림 3 L1=4m, R=2인 경우 분포하중과 차량하중 작용시 슬래브 ㉠의 부재력

그림 3 (b)의 단변방향 부재력의 거동을 살펴보면 슬래브의 강성이 지지부에 비하여 커지게 되면 중간 보가 위치하는 지점부에서 고정단인 경우와 같이 부모멘트 부재력이 발생하는 것이 아니라 정모멘트 부재력(그림에서 (-) 부호)이 발생함을 알 수 있으며 분포하중 작용시 그 값이 더 커짐을 알 수 있다.

나아가 기둥과 기둥사이에 두 개의 중간 보가 존재하는 Two-Beam 슬래브에서 지지부 처짐의 영향을 살펴보면 다음과 같다. 그림 4의 중앙부 슬래브 ㉡의 장변방향 부재력을 살펴보면 지지부의 처짐이 커질수록, 중앙부 정모멘트는 증가하고 지점부 부모멘트는 감소하는 현상이 크게 나타남을 알 수 있으며 차량하중에 비하여 분포하중이 작용할 때 그 영향이 더 큼을 알 수 있다. 동일한 지지부 조건인 경우 하부 슬래브 ㉢는 중앙부 슬래브 ㉡에 비하여 지지부 처짐의 영향을 작음을 알 수 있다. 이는 슬래브 ㉢가 슬래브 ㉡보다 기둥과 기둥을 잇는 선상에 가깝게 위치하여 지지부의 구속조건이 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다.

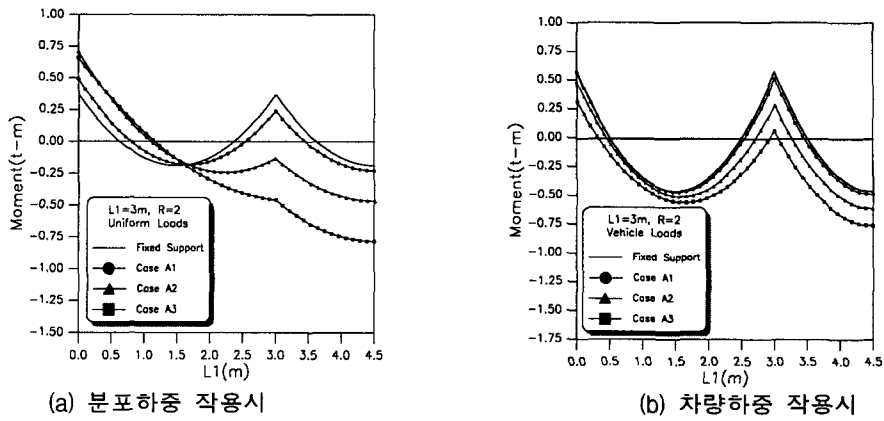


(a) 슬래브 ㉔의 경우



(b) 슬래브 ㉕의 경우

그림 4 Two-Beam 슬래브의 장변방향 부재력



(a) 분포하중 작용시

(b) 차량하중 작용시

그림 5 Two-Beam 슬래브의 단변방향 부재력

그림 5의 단변방향 부재력을 살펴보면 지지부의 강성이 슬래브에 비하여 상대적으로 강한 구속조건을 갖는 A1의 경우에는 고정단인 경우와 유사한 부재력을 갖으나 A2, A3인 경우에는 다른 거동을 나타낼을 알 수 있다. 특히 분포하중이 작용하는 경우(그림 5 (a))에 이러한 지지부 처짐의 영향이 크게 나타나서 중간 보가 위치하는 지점부(L1이 3m인 지점)에 부모멘트가 발생하지 않고 정모멘트가 유발되는데 이는 앞에서 살펴본 바와 같이 지지부의 강성이 작은 경우에는 전체 패널에 존재하는 슬래브가 마치 한 개의 슬래브처럼 거동을 하기 때문인 것으로 판단된다.

4. 보정계수의 산정

구조해석의 결과를 토대로 지지부의 강성을 고려하는 보정계수는 사변이 고정단인 경우에 발생하는 부재력 M_{∞} 에 대한 유한한 강성을 갖을 때의 부재력 $M_{elastic}$ 의 비로써 정의할 수 있다.

$$F = \frac{M_{elastic}}{M_{\infty}} \quad (1)$$

여기서, F 는 보정계수를, M_{∞} 은 고정단인 경우의 부재력을, $M_{elastic}$ 사변이 유한한 강성을 갖을 때의 부재력을 각각 의미한다.

위와 같이 정의되는 보정계수는 슬래브의 규격, 슬래브 두께, 중간 보 그리고 거더의 단면적 등에 따라 변하게 되며 특히 지지부의 강성이 작은 경우에는 슬래브의 강성변화에 의한 영향이 매우 크게 나타남으로 이러한 슬래브 두께와 중간 보, 거더의 강성에 대한 교호작용을 고려하기 위하여 다음 식 (2)와 같이 보정계수를 제시하였다.

$$F = at + bG + cB + dL1 + eR + f\frac{t}{G} + g\frac{t}{B} + h \quad (2)$$

여기서, F 는 보정계수를, t 는 슬래브의 두께(m)를, G 는 거더의 깊이(m)를, B 는 보의 깊이(m)를, $L1$ 은 슬래브의 단변길이(m)를, a, b, c, d, e, f, g, h 는 회귀분석을 통하여 산정되는 비례상수이다.

표 2 등분포하중 작용시 슬래브 ㉠의 보정계수식

위치		$F = at + bG + cB + dL1 + eR + f\frac{t}{G} + g\frac{t}{B} + h$								
		a	b	c	d	e	f	g	h	R^2
단변 방향	중앙부	-4.7283	0.62691	0.10185	0.03856	0.35949	7.3173	0.82817	-1.2505	0.80
	단부(상)	2.6279	-0.15901	0.01888	-0.09473	-0.43525	-2.1314	-5.7059	3.0938	0.93
	단부(하)	5.4401	-0.77732	-0.18242	-0.00106	0.13099	-10.010	3.6341	1.9329	0.77
장변 방향	중앙부	-32.231	4.0685	0.32046	0.39572	2.8174	49.661	10.205	-15.436	0.85
	지점부	-3.9352	-0.16865	0.54362	0.72995	1.2446	3.0285	7.0436	-6.1870	0.77

표 3 차량하중 작용시 슬래브 ㉠의 보정계수식

위치		$F = at + bG + cB + dL1 + eR + f\frac{t}{G} + g\frac{t}{B} + h$								
		a	b	c	d	e	f	g	h	R^2
단변 방향	중앙부	-1.2419	0.13707	0.01385	0.050128	0.14597	2.1884	0.43156	0.09822	0.80
	단부(상)	1.9652	-0.16861	-0.01325	-0.02711	-0.17087	-0.90819	-3.9587	2.0061	0.96
	단부(하)	3.1058	-0.34795	-0.16776	0.049645	0.23334	-6.0324	1.5016	0.90375	0.84
장변 방향	중앙부	-2.8669	0.29128	0.069649	0.11524	0.17605	4.3612	1.3161	-0.6605	0.87
	지점부	0.40765	-0.13411	0.03332	-0.04659	0.31533	-0.74057	0.83586	0.40949	-

표 4 등분포하중 작용시 슬래브 ㉔의 보정계수식

위치		$F = at + bG + cB + dL1 + eR + f\frac{t}{G} + g\frac{t}{B} + h$								
		a	b	c	d	e	f	g	h	R^2
단변	중앙부	-11.857	0.59250	1.0170	0.19215	0.82923	11.499	8.3979	-4.3480	0.84
방향	지점부	-1.9291	0.87136	-0.36763	-0.00988	-0.31365	4.4680	-6.6756	1.4788	-
장변	중앙부	-48.273	2.0208	4.6028	0.81507	4.3463	33.130	49.339	-23.527	0.83
방향	지점부	4.0627	-1.2583	0.66854	0.004712	0.61298	-15.745	11.076	0.19096	0.84

표 5 차량하중 작용시 슬래브 ㉔의 보정계수식

위치		$F = at + bG + cB + dL1 + eR + f\frac{t}{G} + g\frac{t}{B} + h$								
		a	b	c	d	e	f	g	h	R^2
단변	중앙부	-1.9710	0.10545	0.13658	0.07549	0.16257	1.9425	1.7964	-1.2771	0.88
방향	지점부	1.3926	-0.01373	-0.09394	-0.11160	-0.22353	-0.69176	-3.4426	2.3261	0.95
장변	중앙부	-2.9597	0.09027	0.30607	0.13308	0.20303	1.6893	3.9081	-0.71448	0.89
방향	지점부	2.4160	-0.46150	0.08998	0.015578	0.07878	-5.7796	2.2935	1.2684	0.89

표 6 등분포하중 작용시 슬래브 ㉕의 보정계수식

위치		$F = at + bG + cB + dL1 + eR + f\frac{t}{G} + g\frac{t}{B} + h$								
		a	b	c	d	e	f	g	h	R^2
단변	중앙부	-3.0098	0.69484	-0.17380	-0.00095	0.09672	5.4529	-1.9652	0.07871	-
방향	지점부	5.2267	-1.2233	0.20589	0.04771	0.41947	-9.3876	6.3333	0.88692	0.80
장변	중앙부	-36.246	3.9822	1.2112	0.67737	2.9619	46.779	14.509	-17.277	0.72
방향	지점부	-7.3354	0.60263	0.27606	0.14142	0.54386	6.2181	3.7262	-2.1369	0.72

표 7 차량하중 작용시 슬래브 ㉕의 보정계수식

위치		$F = at + bG + cB + dL1 + eR + f\frac{t}{G} + g\frac{t}{B} + h$								
		a	b	c	d	e	f	g	h	R^2
단변	중앙부	-1.0204	0.084215	0.04098	0.03612	0.09648	1.3945	0.46964	0.40488	0.73
방향	지점부	2.1953	-0.27024	-0.03526	-0.08452	-0.06102	-4.4831	0.84107	1.9590	0.79
장변	중앙부	-2.4674	0.2483	0.076766	0.08841	0.15328	3.3219	0.99907	-0.26256	0.78
방향	지점부	0.36558	-0.09329	-0.02688	0.02854	0.06415	-0.97360	0.41438	0.89409	-

본 연구에서 제시한 보정계수는 중간 보와 거더의 너비 대 깊이의 비가 표 1과 같이 0.8인 경우를 기준으로 하였으며 임의의 너비(rD) 대 깊이(D) 비 r 을 갖는 단면에 적용시킬 경우에는 다음 식을 이용하여 등가의 깊이 D_{eff} 를 산정하면 된다.

$$D_{eff} = \sqrt[4]{\frac{r}{0.8}} D \quad (3)$$

여기서, D_{eff} 는 등가 깊이(m)를 r 은 임의의 너비 대 깊이 비를 D 는 깊이(m)를 각각 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 주차장 구조물과 같이 평면계획의 특수성상 기둥과 기둥간격이 넓은 슬래브 구조가 적합한 구조물에서 많이 사용되고 보-거더 시스템 슬래브의 설계시 지지부 처짐 영향을 고려하는 보정계수를 분포하중이 작용하는 경우와 차량하중이 작용하는 경우에 대하여 각각 제시하였다. 이를위해 보-거더 시스템 가운데에 중간 보가 한 개 존재하는 One-Beam 슬래브와 중간 보가 두 개 존재하는 Two-Beam 슬래브에 대하여 지지부가 되는 중간 보와 거더 슬래브의 강성을 변화시키면서 유한요소해석을 수행하였으며 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 1) 분포하중이 작용하는 경우에 비하여 좁은 면적의 차륜을 통하여 하중이 전달되는 차량하중이 작용하는 경우에는 지지부 처짐 영향이 적게 나타났다; 2) 일반적으로 지지부 처짐에 의하여 중앙부 정모멘트 부재력은 증가하고 지점부 부모멘트는 감소하였다; 3) 그러나, 지지부의 강성이 슬래브 강성에 비하여 현저하게 작은 경우에는 중간 보를 포함한 전체 패널이 한 판의 슬래브처럼 거동하여 정, 부모멘트 부재력 모두 크게 증가함을 알 수 있었다.

6. 참고문헌

1. 광효경, 송종영, "주차장 구조물 슬래브의 등가차량하중계수에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제 17권, 제 1-4호, pp. 529-540., 1997.
2. 콘크리트 표준시방서, 건설교통부제정, 1996.
3. Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI 318-95.
4. C. P. Siess and N. M. Newmark, "Moments in Two-way Concrete Floor Slab", 1950.
5. M. Hetenyi, Beams on Elastic Foundation, 1976.
6. R. Park, and W. L. Gamble, Reinforced Concrete Slabs, 1980.
7. R. J. Cope and L. A. Clark, Concrete Slabs Analysis and Design, 1984.
8. Rudolph Szilard, Theory and Analysis of Plates, 1974.
9. S. P. Timoshenko and S. Woinwsky-Krieger, Theory of Plates and Shells, 2nd. Ed., 1959.
10. William L. Gamble, "Moments in Beam Supported Slabs", Proc. ACI, Vol. 69, March, 1972.