직접비탄성 슬래브 설계법의 개발

Direct Inelastic Slab Design

정원희* 박홍근**

Won-Hee Jung and Hong-Gun Park

Dept. of Architecture, Seoul National University, San 56-1, Shilim-dong, Kwanak-gu, Seoul, 151-742, Korea

ABSTRACT

A new slab design using secant stiffness, Direct Inelastic Slab Design , was developed. Since basically the proposed design method uses linear analysis, it is convenient and stable in numerical analysis. At the same time, the proposed design method can accurately estimate the inelastic strength and ductility demands of slab because it can analyzes the inelastic behavior of structure using iterative calculations for secant stiffness. In the present study, the procedure of the proposed design method was established, and a computer program incorporating the proposed method was developed. Design examples using the proposed method were presented, and compared with traditional nonlinear analysis, and experiments. The Direct Inelastic Slab Design, as an integrated analysis/design method, can directly address the design strategy intended by the engineer, such as moment strength and ductility limit. As a result, economical and safe design can be achieved.

Keywords : Inelastic Design, Nonlinear Analysis, Nonlinear Design, Secant Stiffness, Slab Design

1. 서 론

보편적으로 사용하는 슬래브 설계법으로는 직접설계법, 등가골조법, 유한요소법 등이 사용되고 있다. 이 방법들은 탄성해석을 기본으로 하고 있어서 비선형 거동이나 균열에 의하여 영향을 받는 휨강도 설계의 슬래브 처짐을 정확히 계산하기 힘들다. 특히 스팬의 길이나 기둥 및 보의 배치가 매우 불규칙한 경우에는 경제적이고 단순한 슬래브 설계를 위한 철근의 배치, 처짐, 균열 등의 검토가 불가능하다. 따라서 보다 합리적인 슬래브 설계를 위해서는 비탄성 해석을 사용할 수 있다. 기존의 비탄성 해석방법은 슬래브의 극한 거동 및 균열, 처짐을 고려할 수 있으므로, 슬래브의 비탄성 거동을 정확히 계산할 수 있다. 그러나 기존의 비탄성 해석방법은 단계별 계산을 사용하므로 사용이 매우 복잡하며 고도의 전문가가 아니면 사용이 어렵다. 또한 이 해석방법을 설계에 활용하기 위해서는 슬래브에 대한 초기설계 후, 슬래브의 성능을 검증하는 해석과 재설계를 반복적으로 수행하여야하므로 불편하다. 따라서 직접비탄성 설계라 불리우는 새로운 비탄성 설계법을 개발하였으며, 이 방법은 할선강성을 이용한 선형해석을 사용한다[1]. 이 설계법은 비탄성 거동도 고려하면서 요구강도를 직접 결정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본연구에서는 탄성 또는 비탄성해석을 사용하는 기존의 설계법의 단점을 개선하기위해, 직접비탄성 설계법을 슬래브 설계에 응용하는 슬래브 설계법을 개발하고자 한다.

2. 설계법의 원리와 방법

* 정회원, 서울대학교 건축학과 석사과정
** 정회원, 서울대학교 건축학과 부교수

직접비탄성 슬래브 설계의 기본원리는, 슬래브의, 비선형 거동으로부터 나타나는 강도와 변형요구량을, 할선강성(secant stiffness)의 선형해석을 통하여 결정하는 것이다. 슬래브의 하나의 유한요소(finite element)에서 종국휨강도(moment)와 변형량(곡률ϕ)의 대응점을 성능점(performance point)이라고 할때, 이 성능점에 의하여 정의되는 할선강성을 사용하여 선형해석을 수행하더라도 비선형 해석과 동일한 성능점을 정의할 수 있다. 그 이유는 외력인 하중의 크기나 분포가 동일하다면, 거동 경로가 다르다 하더라도 동일한 변형에 대하여 하나의 강도만 존재하기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 비탄성설계개념을 도입하여 직접비탄성 슬래브설계법(Direct Inelastic Slab Design)을 개발하였다. (Fig. 1)

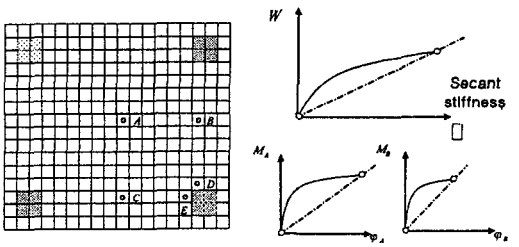


Fig. 1 Concept of the Direct Inelastic Design

경제적이고 안정적인 설계를 위해서는 할선강성에 의해 결정되는 성능점이 설계자가 의도하는 유효영역안에 존재하여야 한다. Fig.2는 이 유효영역을 나타내고있는데, 유효영역은 탄성강성, 최대 및 최소강도, 최대변형량에 의하여 정의된다. 탄성강도는 설계자가 가정한 슬래브 두께에 의하여 결정되며 최대 및 최소강도는 설계 기준에 의하여 결정된다. 최대 변형량은 휨에 의한 압축에서의 파괴(ε_c =0.003)에 의하여 계산된다. 실험결과에 근거하여 설계자가 결정할 수도 있다.

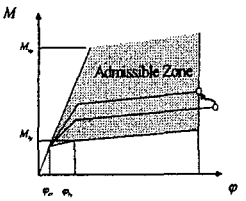


Fig. 2 Admissible zone of performance point

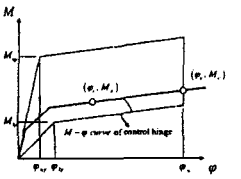
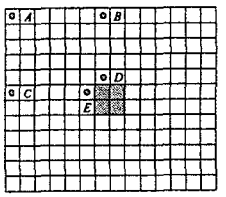


Fig. 3 Admissible zone of subsidiary plastic hinges

슬래브 설계는 다양히 배근할 수 있는데, 통상적으로 근래에는 설계 기준에서와 같이 주열대 중간대로 나누어 그룹배근을 한다. 직접비탄성 설계시 이와 같은 그룹배근을 설계에 적용할 수 있다. 설계자의 의도에 따라서 그룹배근 영역을 설정한 후 그룹배근의 배근량을 결정하는 제어요소(control element)를 지정한다. 제어요소는 설계자가 지정하거나 해석결과에 따라서 자동적으로 결정될 수 있다. 동일한 그룹내에서 철근량은 제어요소의 성능점에 의하여 결정되며, 동일그룹에 속한 그 이외의 요소는 종속요소(subsidiary element)로서 종속요소의 M-ϕ 거동경로는 제어요소의 성능점에 의하여 결정된다.(Fig. 3)



Allocation of Control Elements

	Longitudinal direction	Transverse direction
M_C^-	E	D
M_C^+	C	B
M_M^-	B	C
M_M^+	A	A

M_C^-, M_C^+ : Negative and Positive moment of Column strip

M_M^-, M_M^+ : Negative and Positive moment of Middle strip

Fig. 4 selecting control elements

Fig. 4는 직접 설계법에 대한 제어요소의 위치를 나타내고 있다.[2] 횡방향 주열대의 상부근은 E요소에 의하여 결정되며 하부근은 C요소에 의하여 결정된다. 같은 방법으로 중간대 상부근은 B요소에의하여 결정되며 하부근은 ,A요소의 성능점에 의하여 결정된다. 4개의 종속요소의 횡방향, 종방향, 상부, 하부의 4가지 철근은 4개의 제어요소에 의하여 결정된다. 그룹은 설계자의 배근 의도에 따라 다양히 결정할 수 있다. 이를테면 슬라브 설계에 있어서 직접설계법에서와 같이 정,부모멘트와 중간대,주열대 별로 4가지의 배근형식을 선택할 수도 있고, 더 다양한 형식으로 배근할 수있으며, 불규칙한 기둥의 설계도 가능하다 하겠다.

3. 설계법의 절차

본 연구에서 제안한 할선강성을 이용한 직접비탄성 슬래브 설계법(Direct Inelastic Slab Design)의 해석 및 설계의 절차는 다음과 같다.

① 슬래브를 유한요소로 나누고, 동일한 배근을 하고자 하는 요소들을 묶어 그룹으로 구분한다. 횡방향, 종방향과 상부, 하부 철근의 4가지로 그룹들이 구성되어야 한다. 그리고 각 그룹에서 가장 부재력이 클 것으로 예상되는 요소를 제어요소로 정한다.

② 슬래브의 한계변형율(곡률ϕ_u), 최저한계 휨 및 최대한계 휨모멘트를 사용하여 유효영역을 정한다. 최저 및 최대한계강도는 설계기준에서 규정하는 최소 및 최대철근비로 정할 수도 있고, 설계자가 설계의도에 따라 임의로 정할 수 있다.

③ 각 요소의 초기 할선강성을 가정하여 선형해석을 수행한다. 최저한계강도를 최대한계변형율로 나눈 값을 초기 할선강성으로 사용한다.
④ 해석결과, 각 요소의 성능점이 유효영역에서 벗어난 경우 할선강성을 수정한다. 각 그룹에서 제어요소에만 할선강성 수정방법을 적용하며, 종속요소는 제어요소에 의해서 결정되는 휨-곡률 이력곡선에 따라 할선강성을 수정한다.
⑤ 모든 요소의 성능점이 유효영역에 존재할때까지 할선강성을 수정하며 반복해석을 수행한다.
⑥ 부가적인 하중조건, 설계기준을 고려한 경우에는 제안된 강도를 최저한계강도로 정하며 설계자가 원하는 균열이나 처짐을 위한 변형량을 한계변형량으로 입력하여 ③~⑤의 과정을 반복한다.
⑦ 결정된 성능점을 이론으로 하여 배근량을 결정한다.

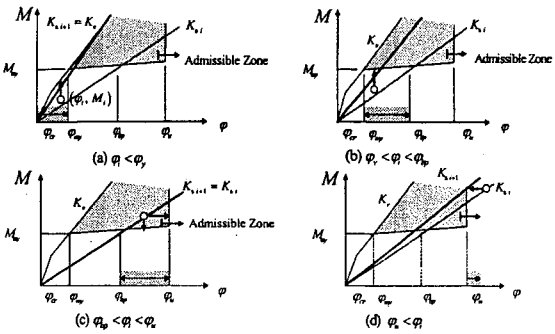


Fig. 5 Strategy for updating secant stiffness at plastic hinge

설계절차 ④에서 반복계산을 위한 할선강성 수정방법이 필요하다. 원칙적으로 각 요소의 성능점은 설계자가 지정한 유효영역에 존재하여야 한다. 또한 부재(구조체)의 변형능력을 평가하기 위하여, 그리고 경제적인 설계를 위하여 각 제어요소의 성능점은 가능한한 최대변형과 최소강도를 갖도록 결정되어야 한다. Fig. 5 에 나타난 음영부분은 성능점의 유효영역이며, n번째 할선강성에 대하여 해석을 수행한 후 이 해석결과 산출된 성능점으로부터 n+1번째 할선강성을 결정하는 방법을 제시하고 있다.

① $\phi_i \leq \phi_y$ 인 경우.

부재의 곡률변형량이 항복변형보다 작으므로, 할선강성을 그림에서와 같이 실존하는 휨,곡률 선상의 할선강성으로 수정한다.

② $\phi_y \leq \phi_i \leq \phi_b$ 인 경우

성능점이 유효영역 아래 존재하여 최저한계강도보다 작은 경우. 할선강성을 증가시킨다.

③ $\phi_b \leq \phi_i \leq \phi_u$ 인 경우

성능점이 유효영역 안에 존재하나 휨강성(stiffness)을 낮추어서, 한계강도나 또는 한계변형에 이르도록 한다. 두 가지 중 강성의 변화가 더 적은 것을 택한다.원칙적으로 각 요소의 각 제어요소의 성능점은 설계자가 지정한 유효영역에 존재하여야 한다. 또한 부재(구조체)의 변형능력을 평가하기 위하여, 그리고 경제적인 설계를 위하여 각 요소의 성능점은 가능한한 최대변형과 최소강도를 갖도록 성능점이 결정되어야 한다.

음영부분은 성능점의 유효영역이며, n번째 할선강성에 대하여 해석을 수행한 후 이 해석결과 산출된 성능점으로부터 n+1번째 할선강성을 결정하는 방법을 제시하고 있다.(Fig. 5)

④ $\phi_u \leq \phi_i$ 인 경우

성능점이 한계변형률을 벗어난 경우 휨강성을 높이고 변형률을 줄이는 새로운 휨강성 K_{n+1}을 할선강성으로 정한다.

4. 설계프로그램의 개발 및 설계법의 검증

앞서 소개된 직접 비탄성 슬래브 설계를 위하여 컴퓨터해석 프로그램을 개발하였다. 유한요소법은 Mindline plate를 사용하였다.[3] 앞서 소개한 설계법의 원리와 절차를 사용하였으며 이론과 프로그램을 검증하기 위하여 기존의 비선형 해석 프로그램 결과와 비교하였다.[4]

비선형 해석 프로그램과의 비교를 위한 예제는 Fig. 6 에 나타는 바와같이 규칙적인 기둥을 가진 연속 슬래브이다. 대칭형이므로 해석상의 편의를 위하여 그림과 같이 축소 도면에 대하여 설계하였다. Table 1은 재료의 특성을 나타낸다. 슬래브에 분포하중을 주었는데 고정하중 W_D= 4.32 KPa ,

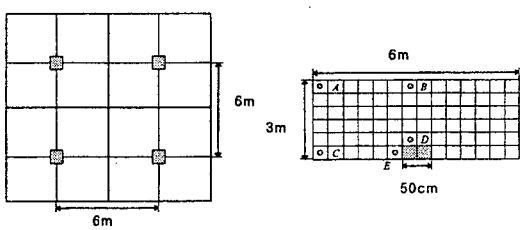


Fig. 6 Sketch of Specimen

적재하중 W_L= 5 KPa , 여기에 계수를 곱한 총 계수하중 W_T= 14.55 KPa 를 가하였다. 배근방식은 설계자가 임의로 결정할 수 있으나 여기서는 일반적으로 사용되는 직접설계법의 방식을 사용하며, 이 배근 형식에 따른 그룹 배근 및 제어요소은 Fig. 4 에 나타낸 바와같다. 제어요소의 최대한계변형을 ϕ_U=0.0003 , 최소강도 M_{ly}= 20 KN · m/m를 사용하였다. Fig. 7 은 횡방향 철근에 대한 4개의 성능점(E,C,B,A)를 나타냈다. Fig. 7 에 나타난 것과 같이 제어요소의 성능점은 최소강도 또는 최대한계변형에 위치하고 있었다. 설계결과를 검토하기 위하여 기존의 비선형 해석 프로그램[4]를 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 8 는 설계결과와 비선형 해석결과를 비교하고 있다.

Table 1 Material properties

Concrete		Steel	slab	
Elastic Modulus E_c	Compressive Strength f_{ck}	Yield Strength f_y	h	d
23000 MPa	24 MPa	400 MPa	0.18 m	0.144 m

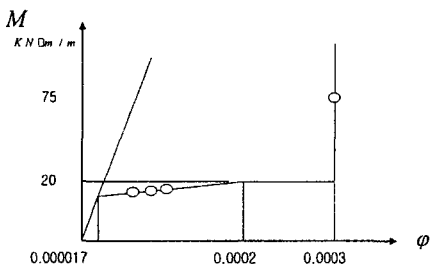


Fig. 7 Design Results by the Direct Inelastic Slab Design

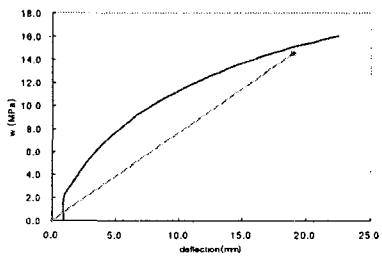


Fig. 8 Measured Center Deflection in specimen

6.결론

본 연구는 경제적이고 안정적으로 비탄성 설계를 수행할 수 있는 해석 및 설계방법을 개발하였다. 직접비탄성설계법의 순서를 정립하였으며, 이를 적용하여 해석과 설계를 통합적으로 수행할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 또한 제안된 방법을 비선형 해석 프로그램, 실험논문 등과 비교하여 검증하였다. 본 연구에서 제안하는 설계방법은 기존의 설계방법과 비교하여 다음과 같은 장점을 지니고 있다.

1) 설계시 비탄성 거동의 장점을 설계안에 직접적으로 반영할 수 있다.

탄성해석을 기본으로 하고있는 기존의 슬래브 설계법은 비탄형 거동을 정확히 예측할 수 없다. 계획된 설계안에 대하여서는 비선형 해석을 통하여 비선형 거동 및 균열,처짐 등을 고려할 수 있으나, 비탄성 거동을 설계에 직접적으로 반영할 수는 없었다. 그러나 본 연구는 할선강성을 이용한 선형해석을 통하여, 비탄성거동에 대해 설계와 동시에 해석을 함으로써, 비탄성거동을 설계시 직접적으로 반영할 수 있다.

2) 설계자가 의도하는 배근방식을 직접적으로 설계에 반영할 수 있다.

기존의 슬래브 설계법들은 설계방식이 정해져 있어서 설계자의 설계의도가 반영되기 힘들거나, 또는 기둥의 위치가 불규칙하거나 슬래브의 모양이 일반적이지 않은 경우 등의 특수한 상황에서는 설계를 하고 이를 해석하는데 어려움이 있다. 그러나 직접비탄성 설계법에서는 설계자가 슬래브를 구성하는 유한요소들을 grouping함으로써 의도하는 배근을 직접적으로 설계에 반영하게된다. 그리고 제시된 배근방식 내에서 유효영역(휨강도나 균열 처짐에 대한 제한영역)을 만족시키는 가장 경제적인 설계안을 제시하게 된다.

참고문헌

1. 박홍근, 엄태성, "할선강성을 이용한 직접내진설계",지진공학회 학술발표회 논문집, Vol. 7, No. 2, 2003
2. James G. Macgregor, "Reinforced concrete", Prentic hall international editions, 1997
3. William Weave Jr., PaulT. Johnston, "Finite elements for structural analysis", Prentic hall, INC, 1984
4. 최경규,황영현,박홍근,"불균등휨모멘트를 받는 플랫플레이트",한국콘크리트학회논문집,제14권6호,