

# 구조 모델링 방법에 따른 지하철 정거장 구조물의 거동

## Structural Behavior of Underground Subway Structures According to Structural Model

박 익 태\*                      이 환 우\*\*                      김 광 양\*\*\*  
Park, Eik-Tae                  Lee, Hwan-Woo                  Kim, Kwang-Yang

---

### ABSTRACT

The structural analysis considering the soil-structure interaction is very important in the design process of underground structures located on the site with various soil conditions. In practice, simplified modelling techniques to obtain the approximate solution are used in accordance with the specifications. However, their details are insufficient for practical engineers to obtain the stable solutions and the analysis results of each engineer occasionally may be different in spite of the same problem. In this study, the sensitivity of structural behaviour on the underground structures is analyzed according to the structural modelling techniques of existing specifications. It is performed to obtain the fundamental informations to establish the guide to obtain the stable solutions in practical analysis of the underground structures such as subway structures.

---

### 1. 서 론

급속히 증가하는 교통량 및 토지의 지가상승으로 인한 보상비 및 공사비의 증가로, 각종 토목구조물의 평면시공은 지하 및 입체화 시공으로 변환되고 있으며, 지하철 구조물은 그 중 대표적인 시설물이다.

저판이 파일 등으로 기초 보강된 지하 구조물의 경우는 상부 구조물을 하부구조와 별개의 구조로 분리하여 해석하는 것이 가능하나, 그렇지 않은 박스구조의 형식에서는 기초지반의 거동이 직접 저판과 측벽에 영향을 미치기 때문에 기초지반 상태를 고려하는 구조해석이 보다 합리적이다<sup>[1-3]</sup>. 따라서 지하철 구조물의 설계시 부산지역과 같이 다양한 지반조건이 많은 지역에서는, 보다 정확한 구조거동의 예측을 위해서 지반과 구조물의 상호관계를 고려한 구조 모델링이 무엇보다 중요하다.

지하철 설계기준<sup>[4]</sup>을 중심으로 한 설계 실무에서는, 토사지반일 경우 설치간격 1m 이내의 스프링요소를 사용하여 모델링하는 방법과 암반일 경우 벽체나 기둥위치에 힌지 또는 이동지점의 경계조건을 설정하여 모

---

\* (주)KN 개발공사 이사

\*\* 부경대학교 건설공학부 교수

\*\*\* 부경대학교 건설공학부 박사수료

델링 하는 방법을 제시하고 있다. 그러나 토사지반과 암반의 경계가 불분명하고 설계자가 선택할 수 있는 스프링 상수의 결정 폭이 커서 설계 실무 시 구조모델링은 설계 실무자의 경험과 관례에 의존하고 있는 실정이다. 뿐만 아니라, 설계자에 따라 설계 데이터나 모델링 방법들의 적용이 서로 상이한 경우도 있다.

본 연구는 지하구조물의 설계실무에서 보다 합리적인 근사 구조모델링 방법의 선택을 위한 일련의 연구과정으로서, 현행 설계기준에 준한 지반조건과 모델링 방법의 변화에 따른 부재력의 변화를 분석하고자 한다.

## 2. 구조물 해석

### 2.1 구조물의 종류

본 논문에서 해석대상으로 적용한 지하철 구조물은 2층의 구형 단면 정거장으로 구조물 1은 폭원 17.60m, 높이 12.35m, 토피고 5.0m로 그림 1.(a)와 같고, 구조물 2는 폭원 26.20m, 높이 12.91m, 토피고 5.10m로 그림 1.(b)와 같으며, 구조물 3은 폭원 21.20m, 높이 14.85m, 토피고 8.0m로서 그림 1.(c)와 같다

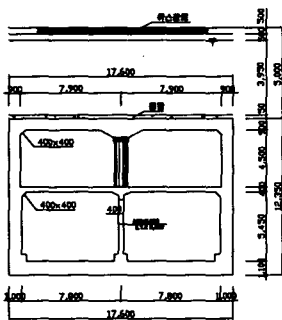


그림 (a) 구조물 1

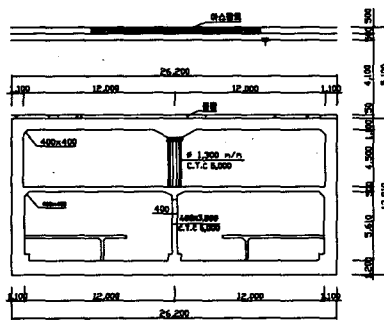


그림 (b) 구조물 2

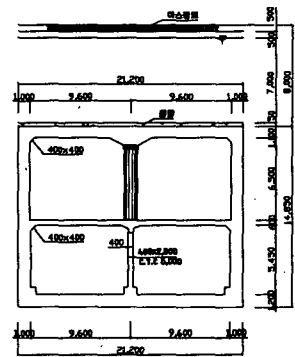


그림 (c) 구조물 3

그림 1. 해석 구조물의 종류

### 2.2 모델링 방법

#### 2.2.1 스프링 요소를 설치한 모델링

현행 설계 기준에서는 지반을 스프링요소로 모델링 할 경우 스프링 간격을 1m 이내로 설치하도록 추천하고 있으나 본 논문에서는 스프링 간격에 따른 각 부재의 부재력 변화를 분석코자 각 구조물에 4가지 경우의 스프링 간격을 가정하여 해석하였다. 스프링 설치 등분수를 조정하여 스프링 간격을 동일하게 되도록 하여 표 1에 정리하였다.

표 1. 등분수와 스프링간격

구분	구조물 1		구조물 2		구조물 3	
	등분수	간격(m)	등분수	간격(m)	등분수	간격(m)
스프링	70	0.24	100	0.25	86	0.24
	40	0.42	60	0.42	50	0.40
등분및 간격	20	0.84	30	0.84	24	0.81
	10	1.67	14	1.67	12	1.68

### 2.2.2 경계 지점조건을 설치한 모델링

현행 지하철 설계기준<sup>[4]</sup>에서는 가능한 지반을 스프링 요소로 사용하여 모델링 하는 것을 추천하고 있으나, 구조물의 벽체나 기둥위치에 힌지나 롤러의 경계지점을 설치하여 모델링 하는 방법도 허용하고 있다. 단, 지반이 암반조건일 때는 지반반력 하중이 지판에 전달되지 않는 것으로 하고 토사지반의 경우는 지반반력 하중이 전달되는 것으로 고려할 것을 제시하고 있다. 그러나 암반과 토사지반의 경계가 설계자의 경험과 기준의 관례에 의존하다보니, 구조해석을 위한 모델링시 경계지점을 설치하는 경우는 지반반력의 재하여부가 설계자마다 상이한 경우가 종종 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이에 따른 영향을 분석하기 위하여 대상 구조물마다 두 가지 모두의 경우에 대하여 해석하였다.

## 2.3 지반조건

### 2.3.1 대상 구조물의 지반조건

지반을 스프링 요소로 모델링하기 위해서는 지반반력계수(Kv)가 필요하고 지반반력계수의 결정을 위해서는 여러 토질정수 중에서 탄성(변형)계수(Eo)<sup>[5-7]</sup>의 결정이 무엇보다 중요하다. 구조해석을 위한 설계실무에서는 지질 주상도와 관련문헌을 참고로 탄성계수를 결정하고 있으나 동일 지반에서도 탄성계수의 선택폭이 넓게 분포되어 있어서 구조해석을 수행하는 설계 실무자가 정확한 탄성계수를 결정하기는 매우 어려운 현실이다.

표 2. 해석 구조물들의 지반조건

토질정수	단 위	지반조건 A	지반조건 B	지반조건 C	비 고
$\gamma_t (\gamma_{sat})$	t/m <sup>3</sup>	2.0 (1.0)	1.8 (1.0)	1.6 (1.0)	
점 착 력	t/m <sup>2</sup>	5.0	1.0	0	
내부마찰력	DEG	35	30	20	
탄성계수(Eo)	t/m <sup>2</sup>	20,000	3,000	500	
포와송 비	-	0.25	0.35	0.45	
강 성 비	-	6.7	1	1/6	지반 B기준

본 연구에서는 표 2에서와 같이 3가지 경우의 탄성계수를 가정하였다. 지반조건 A는 기초지반이 풍화암에 가깝도록 가정된 조건이며, 지반조건 B는 토사지반, 지반조건 C는 연약지반에 가깝도록 가정된 조건이다.

### 2.3.2 스프링상수 결정

스프링상수 결정을 위한 지반반력계수(Kv)는 각종의 조사, 시험 결과에 의해 얻어진 탄성(변형)계수를 써

서 기초의 재하폭 등의 영향을 고려해서 정하는 것이 원칙이나 설계실무 당시에는 정확한 시험 결과를 얻기가 어려우므로 간략식 또는 간접적인 방법으로 설계실무에 적용하는 경우가 많다. 한편, 지반반력계수를 결정하기 위해 적용공식 또한 연구결과<sup>[5~7]</sup>에 따라 차이가 있으나, 보통 지하철 설계기준에서는 도로교 설계기준<sup>[8]</sup> 식을 준용하고 있다. 따라서 본 논문에서도 도로교 설계기준 식을 사용하여 표 3과 같이 지반반력계수를 결정하였다.

표 3. 지반반력계수

(단위 : t/m)

스프링 등분	지반조건	지반조건 A	지반조건 B	지반조건 C	스프링 간격
구조물 1	70등분	2,240	336	56	0.24m
	40등분	3,920	588	98	0.42m
	20등분	7,840	1,176	196	0.84m
	10등분	15,680	2,351	392	1.67m
구조물 2	100등분	2,023	305	50	0.25m
	60등분	3,371	508	84	0.42m
	30등분	5,742	1,015	168	0.84m
	14등분	14,447	2,175	360	1.67m
구조물 3	86등분	2,053	308	51	0.24m
	50등분	3,532	530	88	0.40m
	24등분	7,358	1,103	184	0.81m
	12등분	14,715	2,207	369	1.68m

## 2.4 하중조건

대상 구조물의 구조해석을 위한 하중조건은 부산 지하철 설계기준의 하중재하 및 조합 지침에 따라서 결정하였다. 각각의 모델은 지하수가 있을 때와 없을 때를 고려하였다. 그리고 경계지점의 모델인 경우는 상부 하중에 대한 저판의 하중평형을 고려하여 지반반력의 재하와 비재하를 적용하여 해석을 수행 하였다.

### 2.4.1 구조모델링의 하중조건

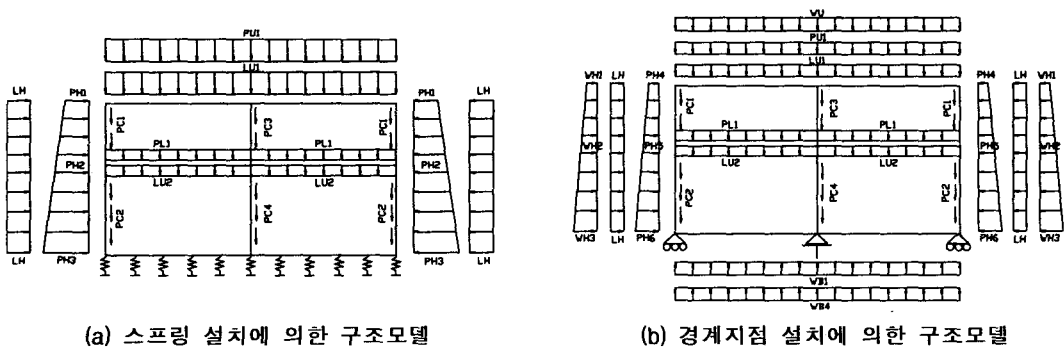


그림 2. 구조모델링의 하중조건

### 3. 결과분석

#### 3.1 스프링 간격에 따른 고찰

본 절에서는 현행 지하철 설계기준에서 구조물과 기초지반의 상호작용을 효과적으로 모사하기 위하여 실무설계에서 추천하고 있는, 기초지반을 스프링 요소로 사용하여 모델링하는 경우에 있어서 그 설치간격에 따른 구조적인 거동의 민감도를 분석하고자 한다. 이를 위하여 2.1절의 대상 구조물 1, 2, 3에 대하여 그림 2와 같이 그 기초지반을 스프링 요소로 사용하여 모델링하고 스프링 설치간격을 가장 좁은 0.24m에서 가장 넓은 1.67m로 변화시킨 4가지 경우를 고려하였다. 하중조합조건은 하부슬래브 부재력에 가장 불리하게 작용할 경우인 지하수가 고려될 때의 하중조합을 선택하여 분석하였다.

그림 3과 그림 4는 한 스프링 요소의 간격을 표 1에서와 같이 4가지 경우로 변화시켜 해석한 결과로 지반 조건 C에 대한 상부 슬래브와 하부 슬래브의 휨모멘트도이다. 그림들에서 MA-70은 스프링 설치간격을 70등분하였다는 의미이다. 그림 4에서 보는 바와 같이 상부 슬래브의 경우 스프링설치 간격에 따른 차이는 발생하지 않음을 알 수 있었다.

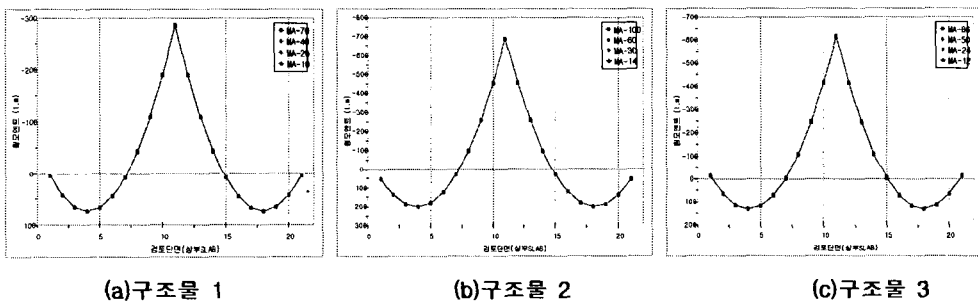


그림 3. 스프링간격에 따른 상부슬래브의 휨모멘트도

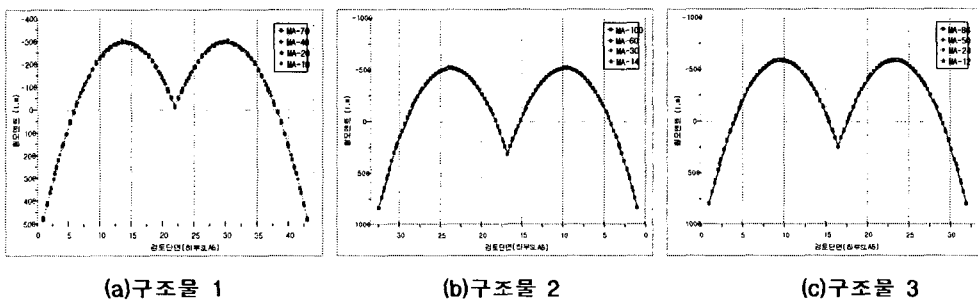


그림 4. 스프링간격에 따른 하부슬래브의 휨모멘트도

그림5는 구조물 1의 스프링 설치간격이 가장 조밀한 경우를 기준하여 스프링 간격에 따른 하부 슬래브 내부 단면에 대한 부재력 변화를 상세하게 분석한 것이다. 그 결과 가장 조밀하게 설치된 70등분(0.24m)과 가장 넓게 설치된 10등분(1.67m)일 경우와 비교할 때 약 2~3%의 부재력의 차이를 확인 하였다. 이와 같은 결과는 다른 지반조건 및 하중조합 조건에서도 비슷한 결과를 보였다.

위와 같은 결과로부터 기초지반을 스프링 요소로 모델링 할 때 스프링 간격이 1.0m 이내로 설치될 경우 부재력의 변화는 거의 없을 것으로 생각된다. 따라서 현행 설계기준에서 추천하는 스프링 설치간격(1m이내)

은 매우 적절한 기준으로 판단된다.

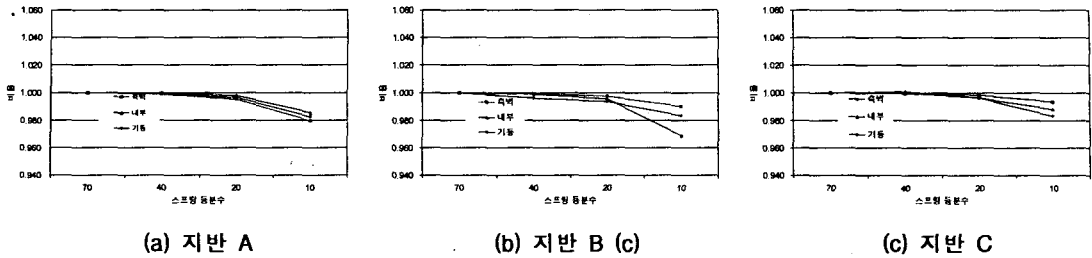


그림 5. 스프링간격에 따른 하부슬래브의 부재력 비율

### 3.2 지반조건에 따른 고찰

지반조건에 따른 해석 결과의 분석은 각 구조물 (1, 2, 3)별로 스프링 설치간격 가장 조밀하게 모델링 된 경우를 기준으로 하여 서로 다른 지반조건(A, B, C)에서 부재력의 변화를 분석하였다. 하중조합 조건은 기초 지반과 구조물과의 상호작용에 대한 영향을 분석할 목적으로 양압력이 고려되지 않는 하중조합에 대하여만 분석하였으며 분석 결과는 표 4와 같다.

표 4. 지반조건에 따른 해석결과 분석표

구조물의 종류	검토부재 부재력 지반조건	상부 슬래브			하부슬래브			측벽 축력	기둥 축력	비고 지반의 강성비
		정 (내부)	부		정	부				
			측벽	기둥		측벽	기둥			
구조물 1	지반조건 A	1.00 <sup>D)</sup>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	6.7
	지반조건 B	1.02	0.41	1.33	1.21	0.39	1.21	0.93	1.15	1
	지반조건 C	1.21	+	1.75	1.45	-	1.51	0.91	1.20	1/6
구조물 2	지반조건 A	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	6.7
	지반조건 B	1.08	0.17	1.46	1.44	0.95	1.48	0.93	1.12	1
	지반조건 C	1.27	+	1.79	1.66	0.75	1.69	0.89	1.20	1/6
구조물 3	지반조건 A	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	6.7
	지반조건 B	1.02	0.12	1.55	1.38	0.76	1.30	0.92	1.31	1
	지반조건 C	1.10	+	1.81	1.53	0.59	1.42	0.89	1.38	1/6

주) +, - : 휨 모멘트 부호가 변화되는 영역

표 4에서 보는바와 같이 상부슬래브의 측벽부 부모멘트 영역은 지반강성이 상대적으로 작게 평가 될수록 그 크기가 급속히 감소하다가 지반강성이 아주 연약하게 평가될 경우는 휨 모멘트의 방향이 정모멘트로 바뀌는 현상을 나타냈다. 상부슬래브의 중간 기둥부 부모멘트 영역에서는 지반조건 B의 조건일 때, A의 조건일 때에 비하여 30%~55%정도 크게 나타났다.

하부슬래브의 측벽부 정모멘트 영역에서는 지반조건 B의 조건일 때, A의 조건일 때에 비하여 20%~45% 정도 크게 나타났으며, 중간 기둥부 정모멘트 영역은 지반강성이 상대적으로 작게 평가 될수록 그 크기가 급속히 감소하다가 지반강성이 아주 연약하게 평가될 경우는 휨 모멘트의 방향이 부모멘트로 바뀌는 현상을

나타냈다. 한편, 하부 슬래브의 내부단면에서의 부모멘트는 지반조건 B의 조건일 때, A의 조건일 때에 비하여 20%~50%정도 크게 나타났다.

그림 6은 표 4를 기준으로 지반의 상대적인 강성평가에 따라 부재력 분포를 나타낸 것이다. 기초 지반상태가 연약할수록 하부슬래브는 지반에 대하여 상대적으로 강체(剛體)역할을 하여, 스프링축력, 즉, 지반반력이 구조물에서 전달되는 하중의 크기와 관계없이 하부슬래브에 균등하게 작용하게 된다. 이에 따라, 중간 기둥 위치에서의 반력이 축벽보다 크게 되고 이 반력은 주로 정 모멘트가 발생하는 중간 기둥위치에서 하부 슬래브의 휨 모멘트를 점차 감소시켜, 경우에 따라서는 부 모멘트 영역으로 변환하기도 한다. 또한, 중간 기둥부재의 축력도 상대적으로 커지게 되는 것이다. 이 영향은 상부 슬래브까지 전달되는 것으로 판단된다. 이에 따라, 일반적으로 상부하중에 의해 부 모멘트가 발생하는 중간기둥위치에서의 부 모멘트는 더욱 증가되고, 상부 슬래브의 상부하중에 의해 부 모멘트가 주로 발생하는 축벽부는 중간 기둥위치에서의 부 모멘트가 증가된 영향으로 정 모멘트 영역 쪽으로 부재력이 이동되는 것으로 판단된다.

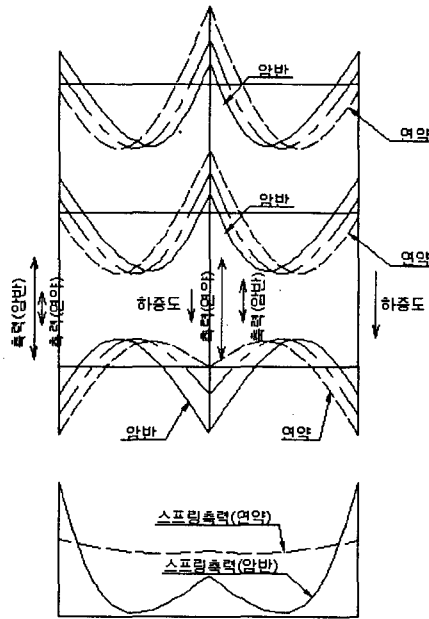


그림 6. 지반조건에 따른 부재력 분포도

### 3.3 구조모델링 방법에 따른 고찰

본 절에서는 현행 지하철 설계기준에서 제시되고 있는 구조모델링 방법에 따라서 2.2절에서 설명되어진바 있는 3가지의 구조모델링 방법에 따른 부재력의 변화를 분석하고자 한다.

기초지반을 스프링 요소를 사용하여 모델링하는 경우에 그 설치간격은, 경계지점을 설치하는 경우와의 비교를 위하여, 현행 설계기준에 제시되는 최대 폭인 1m정도가 되도록 구조물 1, 2, 3 에 대하여 각각 1m에 근접한 20등분(0.84m), 30등분(0.84m), 24등분(0.81m)을 기준으로 하여 부재력의 변화를 분석하였다. 표 5는 지하수가 고려될 때의 하중조합에 대한 결과이다.

표 5. 모델링방법에 따른 해석결과 분석표

구조물 종 류	검토부재		상부 슬래브									하부 슬래브								
	지반조건		A			B			C			A		B		C				
	휨모멘트 해석방법	(내부)	정	부		정	부		정	부		정	부		정	부				
			(내부)	측벽	기둥	(내부)	측벽	기둥	(내부)	측벽	기둥	(내부)	측벽	기둥	(내부)	측벽	기둥			
구조물 1	스프링 요소		1.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	+	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-	1.00	
	지 반 반 력	비재하	1.19	1.69	0.51	1.13	7.10	0.33	1.03	-	0.29	0.43	0.77	0.27	0.33	3.28	0.20	0.30	+	0.18
		재 하	1.19	1.69	0.51	1.13	7.10	0.33	1.03	-	0.29	0.60	2.01	0.72	0.46	8.53	0.52	0.43	+	0.46
		재하/비재하	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	1.40	2.61	2.67	1.39	2.60	2.60	1.43		2.56
구조물 2	스프링 요소		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	+	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
	지 반 반 력	비재하	1.06	1.41	0.74	0.95	8.71	0.50	0.84	-	0.41	0.44	0.71	0.50	0.31	0.75	0.34	0.27	0.96	0.29
		재 하	1.06	1.41	0.74	0.95	8.71	0.50	0.84	-	0.41	0.76	1.60	1.14	0.54	1.70	0.77	0.47	2.18	0.66
		재하/비재하	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	1.73	2.25	2.28	1.74	2.27	2.26	1.74	2.27	2.28
구조물 3	스프링 요소		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
	지 반 반 력	비재하	1.25	1.48	0.53	1.33	4.10	0.33	1.21	21.3	0.28	0.38	0.59	0.32	0.28	0.80	0.24	0.26	1.05	0.22
		재 하	1.25	1.48	0.53	1.33	4.10	0.33	1.21	21.3	0.28	0.63	1.51	0.83	0.47	2.03	0.63	0.43	2.68	0.57
		재하/비재하	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.66	2.56	2.59	1.68	2.54	2.63	1.65	2.55	2.59

주) +, - : 휨 모멘트 부호가 변화되는 영역

먼저, 표 5로부터 경계지점조건 설치하여 모델링하는 경우에, 상부 슬래브는 하부의 지반반력에는 영향을 받지 않고 상부하중에 의한 부재력 분포를 보였다. 그러나 하부 슬래브의 경우는 지반반력을 재하한 경우가 재하하지 않는 경우에 비하여, 측벽부의 정모멘트 영역에서는 대략 40%~75%정도, 중간 기둥부의 정모멘트 영역에서는 125%~160%정도, 그리고 하부슬래브의 내부단면의 부모멘트 영역에서는 130%~170%정도로 큰 부재력을 보였다.

한편, 표5에서 기초지반을 스프링으로 모델링한 경우와 경계 지점조건을 도입하고 지반반력을 재하한 경우를 비교하면 다음과 같다. 지반강성이 매우 높게 평가된 지반 조건 A의 경우에, 측벽부 휨모멘트는 상부슬래브에서는 스프링으로 모델링 한 경우가 50%~70%정도 작게, 하부슬래브에서는 30%~40%정도 크게 나타났다. 그러나, 중앙 기둥부에서는 반대의 결과를 보였다. 즉, 상부슬래브에서는 30%~50%정도 크게, 하부슬래브에서는 50%~100%정도 작게 나타났다.

슬래브 내부 단면의 경우는 스프링을 설치하여 해석한 결과가, 지반조건에 따라 상부는 10%~30% 작게, 하부는 20%~50% 크게 나타났다. 지반이 연약 할수록 부재력의 차이는 더욱 크게 발생하는 것을 표 5에서 확인 할 수 있었다.

이상의 결과로부터, 암반지반과 토사지반 구분 없이 지반을 스프링으로 모델링한 경우와 경계지점을 설치하여 모델링하는 경우의 해석결과가 큰 차이를 보이는 바, 지하구조물의 해석시에 지반조건이 전혀 고려되지 않는 경계지점을 설치하여 모델링하는 해석방법의 적용은 지반반력의 재하여부에 관계없이 지양되어야 할 것으로 본다.



## 4. 결 론

지반 및 하중 조건, 스프링 간격과 구조모델의 방법에 따른 지하철 정거장 구조물의 거동에 관한 연구를 수행한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다..

1) 지반조건의 영향을 고려하기 위하여 지반을 스프링으로 모델링하는 경우, 지반강성의 크기에 따라 상부 슬래브의 측벽부와 하부 슬래브의 중앙 기둥부의 휨모멘트는 매우 민감한 영향을 받는 것으로 나타났다. 경우에 따라서는 부재력의 부호가 바뀌었다. 따라서 설계자에 따라 지반강성의 크기가 다르게 평가될 수 있는 것을 감안하여 구조해석 결과에 따른 부재력 부호에 관계없이 상, 하부의 철근배근을 동일하게 처리하는 것이 보다 안전할 것으로 판단된다.

2) 스프링의 설치간격에 따른 부재력 분포의 변화를 분석한 결과 스프링 설치간격이 1m 이내로 더욱 조밀하게 설치하더라도 부재력의 변화는 거의 없었다. 따라서 현행 설계기준에서 추천하는 스프링간격 1m이내는 적합한 기준으로 판단된다.

3) 가정된 지반조건에서 구조 모델링 방법에 따른 부재력의 차이는 크게 발생 하였고 지반이 연약 할수록 더욱 증가하였다. 따라서 설계자가 구조모델을 선정함에 있어 연암이상의 확실한 암반층을 제외하면 지반의 조건의 특성을 고려 할 수 없는 경계지점 구조모델은 지양 되어야 할 것으로 본다.

## 참 고 문 헌

1. 이인모, 김동현, “지하구조물의 합리적인 지반계수 추정 연구”, 대한토목학회 논문집, 1996, pp.423~431
2. 김재민, 최준성, 이종세, “비선형 지반-구조물 상호작용해석을 위한 새로운 복합법”, 한국지진공학회 논문집, 2003, pp.1~7
3. 오병환, 이명규, 전세진, 김광수, “모형실험에 의한 지하박스구조물의 안전도 평가 연구”, 대한토목학회가을 학술발표회 논문집, 1996.11, pp.509~512
4. 부산교통공단, 부산 지하철 3호선 설계기준, 1997
5. B.M. Das, *Principle of Foundation Engineering*, PWS-KENT Publishing Company, 2nd Ed., 1990, pp.160~163, pp.240~245
6. H.F. Winterkorn and H. Y. Fang, *Foundation Engineering Hand Book*, Van Nostrand Reinhold Company, 1975, pp.516~518, pp.567
7. J.E. Bowles, *Analytical and Computer Methods in Foundation Engineering*, McGraw-Hill Inc, 1974, pp.52~62
8. 대한토목학회, 도로교 설계기준, 2003