제5장 측방이동 교대의 분석

5.1 개요

연약지반상에 축조된 교대의 측방 이동량에 영향을 미치는 요인은 2.2절에 소개한 바와 같이 성토고, 성토재의 단위중량, 연약층 전단강도, 연약층 두께, 교대 형식, 기초 형식, 기초의 강성 등이 있고 교대 측방이동 판정법은 2.3절에 언급한 바와 같이 1)사면안전율과 압밀침하량에 대한 판정, 2)측방유동지수(F)에 의한 판정, 3)측방이동 판정식에 의한 판정, 4)캐나다법에 의한 판정, 5)말뚝효과를 고려한 사면안전율에 대한 판정 등이 있다.

2), 3)의 판정식은 상기 영향 요소중의 3 4개를 조합하여 판정기준을 정하는 방법으로 표 5.1 표 5.3에 사례 현장에 대한 판정 결과를 나타냈으며, 이 결과를 분석하여 이들 판정식이 국내 적용성에 적합한지 점검하게 될 것이다.

보다 합리적인 방법은 교대 기초 말뚝의 설계를 실용적으로 고려하고 지반의 안정성을 극한평형 문제로 취급하는 접근 방식이 바람직하리라 생각된다. 즉, 지반의 측방유동 판정은 상기의 8가지 영향요소를 종합적으로 반영할 수 있는 지표로 사면의 안전율을 고려하여 측방이동 발생여부를 검토하는 것이 가장 효과적이라 판단된다. 이 판정 기준은 사면안전율이 어떤 기준 안전율보다 큰 경우 측방유동은 발생하지 않을 것이고 기준 안전율보다 적다면 측방유동이 발생되어 수동말뚝으로 설계, 검토되어져야 할 것이다.

따라서, 측방토압의 판정 및 실용적 설계를 위하여 상기의 기준 안전율의 정립이 필요하게 된다. 본 연구에서는 기발표된 12교대 사례[22]를 포함하는 국내의 34개 교대 현장을 분석하여 측방이동 판정에 대한 기준 안전율을 재정리코자 한다.

이를 위하여 국내 교대 변위 사례에 대하여 말뚝효과를 고려한 경우와, 말뚝 효과를 무시한 경우에 대한 각각의 사면안전율을 구하여 현장에서 실측된 측방변위와의 비교 분석을 실시하고 또한, 사면안전율과 기존의 판정법과도 비교 분석하여 측방유동시 말뚝의 영향과 국내 변위 사례에 부합하는 판정기준을 유도하려 한다.

사면안정해석은 중앙대학교에서 개발된 교대 기초말뚝 해석전용 프로그램인 "CHAMP "를 사용하여 실시하였다. 본 프로그램은 수동말뚝의 사면안정효과를 무시한 경우의 사면안전율과 수동말뚝의 사면안정효과를 고려한 경우의 사면안전율을 모두 구할 수 있게 개발되었다. 또한 수동말뚝의 효과를 무시한 사면안정해석은 영국의 Geosolve사에서 개발한 "SLOPE"프로그램을 사용하였다.

"SLOPE"프로그램으로는 사면안정해석법중 Bishop법과 Fellenius법에 의한 사면안전율을 모두 구하여 비교하였다.

또한 사면안전율과 측방변위와의 관계, 사면안전율과 측방유동지수와의 관계, 사면안전율과 측방이동 판정지수와의 관계, 사면안전율과 안정수와의 관계, 측방변위와 측방유동지수 및 측방이동 판정지수의 관계 등을 분석하여 기존의 판정식에 대한 국내에 적용성에 대한 검토하고 어떤 판정방법이 가장 합리적이지도 검토하여 그 기준을 마련하고자 한다.

표 5.1 교대의 측방이동 판정(좌)

NO.	교대명	교 량 제 원							연 약 지 반		
		A	B	L	∑b	총본수	직경 (㎜)	두께 (㎜)	점착력 (C)	깊 이 (D)	(C/D)
1	D11	5.0	18.5	24.7	7.315	72	406.4	9	2.5	20.1	0.124
2	D12	5.0	18.5	17.6	7.315	72	406.4	9	2.5	14.1	0.177
3	Y11	3.8	44.3	30.0	12.19	90	406.4	9	2.5	14.0	0.179
4	Y12	3.8	46.4	30.0	12.19	90	406.4	9	4.45	12.0	0.371
5	Y13	5.7	33.8	12.0	13.41	112	406.4	9	2.5	7.3	0.342
6	Y14	12.7	10.3	21.5	3.66	63	406.4	9	1.25	13.1	0.095
7	Y15	5.7	33.8	12.0	13.41	112	406.4	9	4.37	7.3	0.599
8	Y16	44.1	10.3	21.5	3.66	297	406.4	9	4.25	13.1	0.324
9	Y21	5.3	12.1	50.4	9.14	72	508	9	4.18	40.1	0.104
10	Y22	5.3	12.1	49.2	9.14	72	508	9	2.19	40.1	0.055
11	Y23	6.5	12.1	30.2	9.144	66	508	9	4.45	9.0	0.494
12	Y24	3.0	12.1	34.2	6.096	24	508	9	3.85	5.0	0.770
13	Y25	5.0	17	40	5.080	30	508	9	3.84	35.0	0.110
14	Y26	5.0	17	40.2	5.080	30	508	9	4.15	33.0	0.126
15	Y27	5.3	12.1	50.4	9.14	72	508	9	5.11	40.1	0.127
16	Y28	5.3	12.1	49.2	9.14	72	508	9	4.13	40.1	0.103
17	Y31	5.0	24.2	59.4	7.315	16	914.4	14	4.49	25.2	0.178

표 5.1 교대의 측방이동 판정(우)

성 토			F	$I_L(\mu_1\mu_2\mu_3\gamma H/c)$					교대변위 (㎝)	비고
단위중량 (γ)	성토고 (H)	(γH)	(%)	μ_1	μ_2	μ_3	$\mu_1\mu_2\mu_3$	I_L		
2.00	4.20	8.4	1.48	0.814	0.395	3.00	0.965	3.24	6.0	
2.00	5.10	10.2	1.74	0.801	0.395	2.82	0.893	3.64	5.0	
1.80	5.97	10.7	1.66	0.467	0.275	3.00	0.385	1.66	0.6	
1.80	7.94	14.3	2.59	0.400	0.263	3.00	0.315	1.01	0.4	
1.80	9.75	17.6	1.95	0.608	0.397	1.28	0.309	2.17	3.0	
1.80	9.41	16.9	0.56	0.609	0.355	1.03	0.223	3.03	6.0	
0.91	10.75	9.78	6.12	0.608	0.397	1.28	0.309	0.69	0.5	EPS
1.80	13.19	23.7	1.37	0.609	0.355	0.30	0.064	0.36	0.8	PILE
1.80	8.56	15.4	0.68	0.796	0.755	3.00	1.803	6.65	8.1	
1.80	10.16	18.3	0.30	0.815	0.755	3.00	1.847	15.42	23.4	
1.80	9.951	17.9	2.76	0.298	0.756	1.38	0.312	1.26	0.9	
1.80	8.878	16	4.82	0.146	0.504	1.67	0.123	0.51	0.3	
0.71	7.13	5.06	2.17	0.875	0.299	3.00	0.784	1.03	0	EPS
0.95	8.45	8.03	1.57	0.821	0.299	3.00	0.744	1.44	0	EPS
0.76	8.40	6.38	2.00	0.796	0.755	3.00	1.803	2.55	0	EPS
0.67	9.60	6.43	1.60	0.815	0.755	3.00	1.847	2.88	0	EPS
0.73	7.50	5.48	3.25	0.424	0.302	3.00	0.447	0.54	0	EPS

표 5.2 교대의 측방이동 판정(좌)

NO.	교대명	교 량 제 원							연 약 지 반		
		A	B	L	∑b	총본수	직경 (㎜)	두께 (㎜)	점착력 (C)	깊 이 (D)	(C/D)
18	Y32	7.0	30.4	37.4	10.67	92	508	14	4.84	16.7	0.290
19	Y33	7.0	29.6	34.0	10.67	92	508	14	4.84	16.0	0.303
20	Y34	3.0	39.2	29.0	8.128	28	508	14	3.94	9.6	0.410
21	Y51	5	28.2	45.5	9.75	60	812.8	16	2.1	11.4	0.184
22	Y52	5	8.91	43.0	2.438	6	812.8	16	3.9	12.0	0.325
23	Y53	5	8.91	44.2	2.438	6	812.8	9	3.2	15.8	0.203
24	O11	8.5	25.2	27.0	6.5	48	406.4	9	1.96	8.0	0.245
25	O12	4.5	27.1	30.0	6.5	48	406.4	9	1.96	4.8	0.408
26	N11	7.5	19.2	23.0	9.6	16	1500	현	1.6	9.0	0.178
27	N12	7.5	19.2	22.0	9.6	16	1500	장	1.6	9.6	0.167
28	N13	10	12.7	36.0	9.0	18	1500	타	1.5	9.5	0.158
29	N14	10	12.7	30.0	9.0	18	1500	설	2.5	15.7	0.159
30	N21	4	43.6	27.5	17.88	122	406.4	9	1.8	12.2	0.148
31	N22	4	43.6	30.5	17.88	122	406.4	9	1.85	11.9	0.155
32	N23	4	29.4	35.2	11.38	84	406.4	9	2.0	14.4	0.139
33	N24	4	29.4	31.9	10.16	74	406.4	9	2.0	14.4	0.139
34	N25	4	39.1	37.2	14.63	102	406.4	9	2.0	20.5	0.098

표 5.2 교대의 측방이동 판정(우)

성토			F	$I_L(\mu_1\mu_2\mu_3\gamma H/c)$					교대변위 (㎝)	비고
단위중량 (γ)	성토고 (H)	(γH)	(%)	μ_1	μ_2	μ_3	$\mu_1\mu_2\mu_3$	I_L		
1.83	10.95	20	1.45	0.447	0.351	2.39	0.374	1.55	1.6	
1.83	10.84	19.8	1.52	0.471	0.360	2.29	0.388	1.59	1.0	
1.83	11.49	21	1.95	0.331	0.207	3.00	0.206	1.10	1.6	
1.90	9.35	17.8	1.04	0.251	0.346	2.28	0.198	1.67	2.5	
1.90	10.49	19.9	1.63	0.279	0.274	2.40	0.183	0.94	0.7	
1.90	7.09	13.5	1.50	0.357	0.274	3.16	0.309	1.30	1.2	
1.80	8.40	15.1	1.62	0.296	0.258	0.94	0.072	0.55	0.3	
1.80	7.05	12.7	3.22	0.160	0.240	1.07	0.041	0.27	0.4	
1.80	5.45	9.81	1.81	0.391	0.500	1.20	0.235	1.44	3.6	
1.80	5.45	9.81	1.70	0.436	0.500	1.28	0.279	1.71	3.9	
1.80	7.25	13.1	1.21	0.264	0.709	0.95	0.178	1.55	1.5	
1.80	6.14	11.1	1.44	0.523	0.709	1.57	0.582	2.57	1.7	
1.80	6.35	11.4	1.29	0.444	0.410	3.00	0.546	3.47	1.5	
1.80	6.0	10.8	1.44	0.390	0.410	2.98	0.476	2.78	1.2	
1.80	6.5	11.7	1.19	0.409	0.387	3.00	0.475	2.78	1.0	
1.80	6.5	11.7	1.19	0.451	0.346	3.00	0.468	2.74	4.2	
1.80	6.0	10.8	0.90	0.551	0.374	3.00	0.619	3.34	2.5	

표 5.3 교대의 측방이동 판정(좌)

NO.	교대명	교 량 제 원							연 약 지 반		
		A	B	L	∑b	총본수	직경 (㎜)	두께 (㎜)	점착력 (C)	깊 이 (D)	(C/D)
35	N26	4	39.1	30.1	14.63	102	406.4	9	2.0	21.2	0.094
36	S41	9.1	27	24.3	9.652	114	508	9	3.2	19.5	0.164
37	S42	9.1	27	24.3	10.16	114	508	9	3.2	19.2	0.167
38	S43	8.6	30.6	29.0	10.16	120	508	9	6.0	15.5	0.387
39	S44	8.6	29	26.8	9.652	114	508	9	3.5	16.7	0.210
40	S11	4.4	25.5	29.8	9.144	36	508	9	3.36	16.5	0.204
41	S12	4.4	25.5	29.8	9.144	36	508	9	2.97	12.0	0.248
42	K01	9.1	28.5	25.0	9.652	114	508	9	5.5	18.7	0.294
43	K02	8.6	29.5	29.0	10.66	126	508	9	4.4	17.7	0.249
44	K03	4.4	25.5	22.0	8.636	34	508	9	4.0	17.0	0.235
45	NS1	2.95	24.8	29.0	9.744	32	609	9	1.98	11.0	0.180
46	NS2	3.4	25.4	29.0	6.496	48	406	9	2.38	13.3	0.179
47	NS3	4.0	25.4	29.0	7.308	54	406	9	3.46	24.6	0.141
48	J01	4.4	8.9	36.5	2.436	18	406	9	1.55	28.8	0.054
49	J02	4.4	9.6	33.5	2.842	21	406	9	0.62	26.3	0.024
50	J03	4.4	8.9	34	2.436	18	406	9	0.83	29.3	0.028
51	R01	4.4	8.5	21	6.902	68	406	9	2.02	4.8	0.421

표 5.3 교대의 측방이동 판정(우)

성 토			F (%)	$I_L(\mu_1\mu_2\mu_3\gamma H/c)$					교대변위 (㎝)	비고
단위중량 (γ)	성토고 (H)	(γH)		μ_1	μ_2	μ_3	$\mu_1\mu_2\mu_3$	I_L		
1.80	7.4	13.3	0.71	0.684	0.374	3.00	0.768	5.11	1.9	
1.78	12.71	22.6	0.73	0.802	0.357	2.14	0.615	4.35	3.8	
1.78	12.21	21.7	0.77	0.790	0.376	2.11	0.627	4.26	7.5	
1.83	11.65	21.3	1.82	0.534	0.332	1.80	0.32	1.14	0.6	
1.83	11.35	20.8	1.01	0.623	0.333	1.94	0.403	2.39	6.5	
1.74	5.55	9.66	2.11	0.554	0.359	3.00	0.596	1.71	3.7	
1.74	5.96	10.4	2.39	0.403	0.359	2.73	0.394	1.38	1.0	
1.80	12.45	22.4	1.31	0.748	0.339	2.05	0.521	2.12	10.0	
1.80	8.67	15.6	1.59	0.610	0.362	2.06	0.454	1.61	3.2	
1.80	5.03	9.05	2.60	0.773	0.339	3.0	0.785	1.78	1.0	
1.90	5.00	9.5	1.89	0.379	0.392	3.0	0.446	2.14	7.0	
1.90	7.30	13.9	1.29	0.459	0.255	3.0	0.351	2.05	23.95	
1.90	4.10	7.79	1.81	0.848	0.288	3.0	0.732	1.65	1.00	
1.80	8.54	15.4	0.35	0.789	0.274	3.0	0.648	6.43	22.25	
1.80	11.00	19.8	0.12	0.785	0.296	3.0	0.697	22.27	9.50	
1.80	8.54	15.4	0.18	0.862	0.274	3.0	0.708	13.11	19.75	
2.00	7.30	14.6	2.88	0.229	0.812	1.09	0.202	1.46	5.00	

5.2 사면안전율

5.2.1 사면안전율 계산 (“SLOPE”사용)

일본 수도 고속도로공단에서는 사면 안전율과 압밀침하량에 의한 교대의 측방 이동 판정 방법을 제시하고 있으나 교대의 말뚝효과를 무시한 사면안전율이다.

본 연구에서는 보편적으로 사용되고 있는 사면안정 프로그램인 “SLOPE”를 사용하여 말뚝효과를 무시한 경우의 사면안전율을 Bishop법과 Fellenius방법으로 구하여 비교, 분석하였다.

" SLOPE " 프로그램으로 구한 34교대의 최소안전율은 표 5.4와 같으며 이들 해석결과에 따른 대표적인 가상파괴면을 D11교대에 대하여 그림 5.1에 나타내었다.

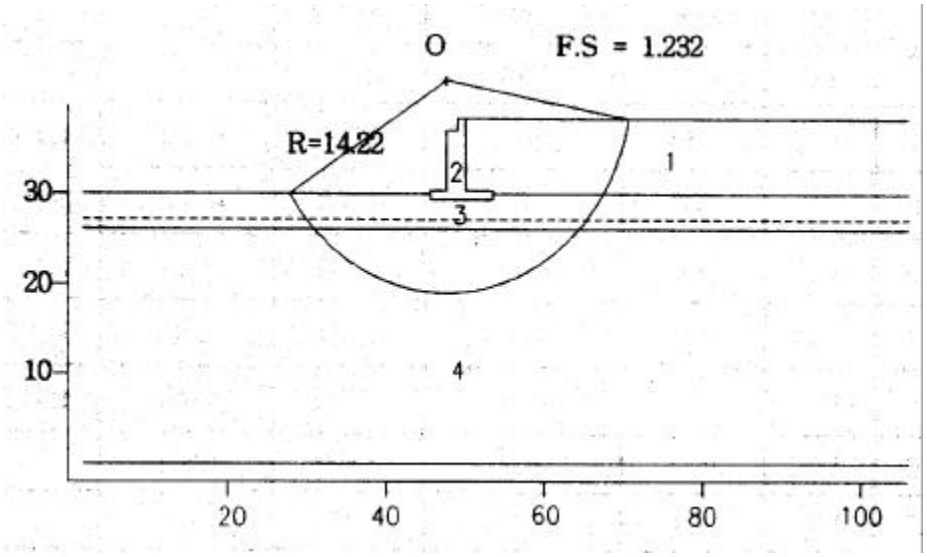


그림 5.1 가상 파괴면

표 5.4 “SLOPE” 프로그램에 의한 사면 안전율

NO.	교량명	성토고(m)	발생변위(Cm)	안 전 율		비 고
				Bishop법	Fellenius법	
1	D11	4.2	6.0	1.604	1.232	
2	D12	5.1	5.0	1.268	1.065	
3	Y11	5.97	0.6	1.542	1.303	
4	Y12	7.94	0.4	1.526	1.402	
5	Y13	9.75	3.0	1.193	0.872	
6	Y14	9.41	6.0	0.799	0.511	
7	Y15	10.75	0.5	1.842	1.533	E.P.S
8	Y16	13.19	0.8	1.592	1.362	Pile
9	Y21	8.56	8.1	1.150	1.103	
10	Y22	10.16	23.4	0.594	0.552	
11	Y25	7.13	0	1.596	1.421	E.P.S
12	Y26	8.45	0	1.503	1.313	E.P.S
13	Y27	8.4	0	2.385	2.197	E.P.S
14	Y28	9.6	0	1.753	1.613	E.P.S
15	Y31	7.5	0	2.995	2.422	E.P.S
16	Y51	9.35	2.5	1.199	0.821	
17	Y52	10.49	0.7	1.478	1.010	
18	Y53	7.09	1.2	1.780	1.336	
19	S41	12.71	3.8	0.782	0.714	
20	S42	12.21	7.5	0.790	0.719	

표 5.4(계 속)

NO.	교량명	성토고(m)	발생변위(Cm)	안 전 율		비 고
				Bishop법	Fellenius법	
21	S43	11.65	0.6	1.53	1.395	
22	S44	11.35	6.5	0.921	0.838	
23	S11	5.55	3.7	0.918	0.762	
24	S12	5.96	1.0	0.678	0.62	
25	K01	12.45	10.0	0.751	0.659	
26	K02	8.67	3.18	1.028	0.897	
27	K03	5.03	1.0	1.588	1.394	
28	J01	8.54	22.25	1.200	0.866	
29	J02	11.0	9.5	1.085	0.712	
30	J03	8.54	19.75	0.976	0.709	
31	S01	5.0	7.0	1.400	1.260	
32	S02	7.30	23.95	1.097	0.894	
33	S03	4.10	1.0	1.355	1.193	
34	R01	7.3	5.0	1.314	0.904	

해석결과 사면안전율은 보강공법을 제외하고 Bishop법에서 F.S=0.6 1.78의 분포를 나타내며 Fellenius법은 F.S=0.5 1.40의 분포를 나타내고 있다.

그리고 Bishop법과 Fellenius법에서 구한 사면안전율의 차이는 10 30% 정도 차이를 나타내며 보다 정확한 해석을 위해서는 지하수위 관계, 토질정수 등의 설계입력 자료를 면밀히 분석하여 설계정수를 정하여야 할 것이다.

설계정수 산정시 다소의 오차가 있을 수 있으므로 기준사면 안전율을 제시코자 할 경우 이를 보정해야 한다.

5.2.2 사면안전율 계산 ("CHAMP"사용)

연약지반상 교대 기초말뚝의 설계시 측방유동이 발생할 경우 수동말뚝으로 검토하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 교대 기초말뚝의 지지효과를 고려할 수 있는 프로그램인 "CHAMP"를 사용하여 해석하였다.

프로그램 "CHAMP"는 말뚝효과를 고려한 사면안정 해석과 말뚝효과를 무시한 사면안정 해석을 각각 실시할수 있으며 말뚝효과를 무시한 경우는 Fellenius법에 의한 해석방법으로 되어 있다.

해석대상 교대의 표4.2 지반조사 현황을 참조하였고 교대 및 지층에 대한 단면도는 부록에 수록하였다. 그 중 대표단면으로 D11교대에 대한 입력자료는 그림 5.2와 같으며, 해석결과 얻은 최소 안전율시의 가상파괴면 및 각 Grid별 사면안전율은 각각 그림 5.3 및 그림 5.4와 같다.

또한 해당 sliding circle에 대하여 말뚝효과에 대한 계산을 병행하여 말뚝의 소요안전율을 구할 수 있으며 그 결과는 그림 5.4와 같이 말뚝의 측방변위, Bending Moment, Shear Force등이 산출된다. 따라서 각 Pile의 변위 및 안전도등을 검토하는데 이용할 수 있다.

로그램 "CH프AMP"으로 각 교대단면에 대해 해석하여 말뚝효과를 고려한 경우와 말뚝효과를 무시한 경우에 대한 34개 교대의 최소 사면안전율 결과를 표 5.5에 나타내었다.

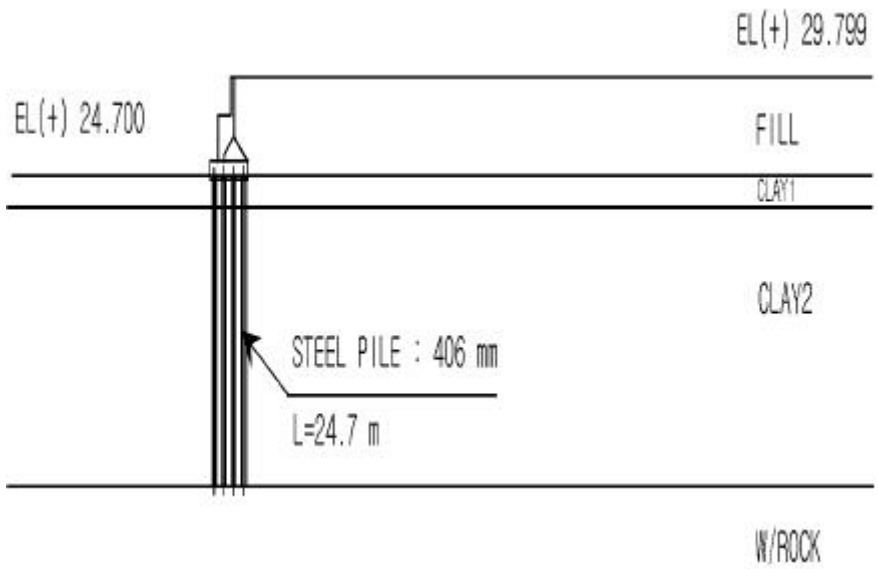


그림 5.2 **입력자료 단면**

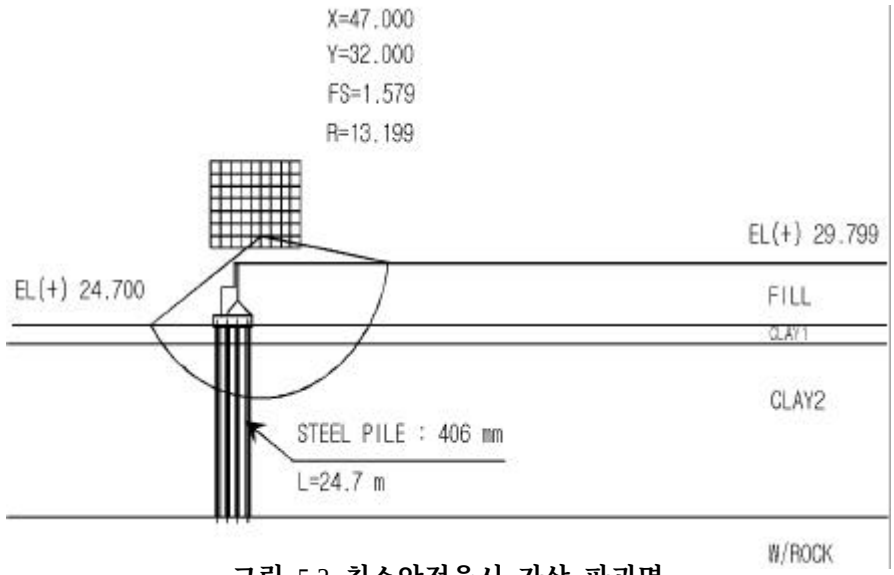


그림 5.3 **최소안전율시 가상 파괴면**

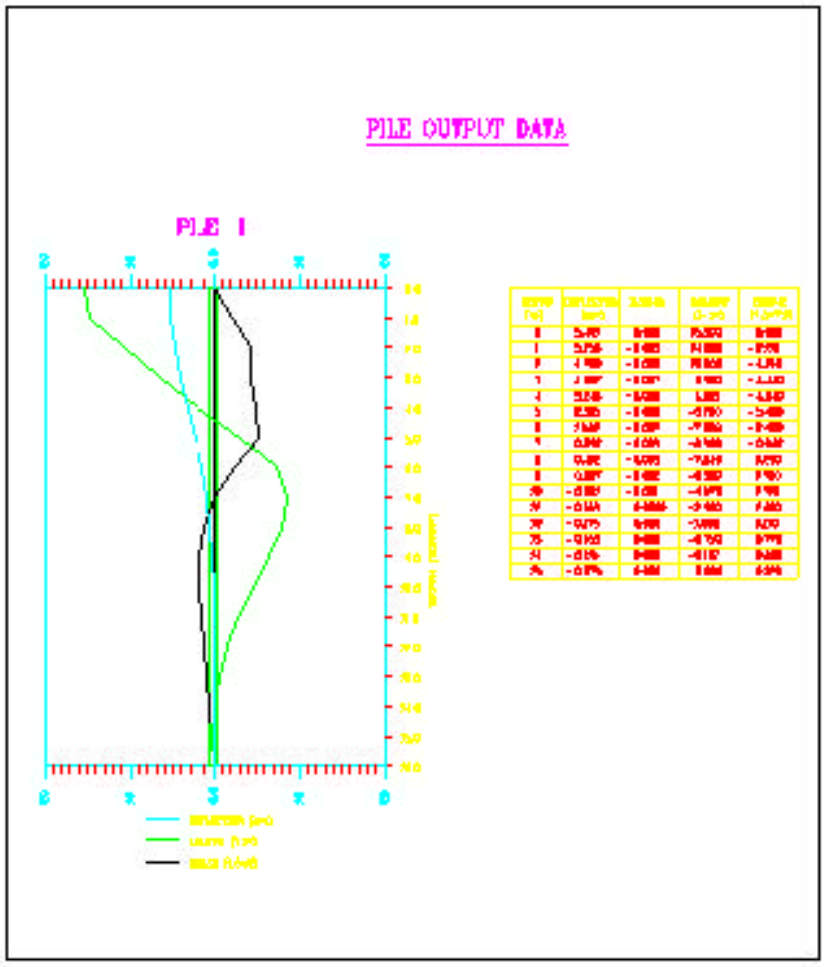


그림 5-4 파일 해석 결과 DATA

표 5.5 CHAMP ”프로그램에 의한 사면안전율

NO.	교량명	성토고(m)	발생변위(Cm)	안 전 율		비 고
				말뚝고려	말뚝무시	
1	D11	4.2	6.0	1.865	1.333	
2	D12	5.1	5.0	1.579	1.113	
3	Y11	5.97	0.6	1.581	1.265	
4	Y12	7.94	0.4	1.591	1.453	
5	Y13	9.75	3.0	0.923	0.776	
6	Y14	9.41	6.0	0.739	0.405	
7	Y15	10.75	0.5	2.011	1.775	E.P.S
8	Y16	13.19	0.8	1.365	1.244	Pile
9	Y21	8.56	8.1	1.205	1.017	
10	Y22	10.16	23.4	0.599	0.548	
11	Y25	7.13	0	1.906	1.375	E.P.S
12	Y26	8.45	0	1.994	1.363	E.P.S
13	Y27	8.4	0	2.408	2.071	E.P.S
14	Y28	9.6	0	1.609	1.565	E.P.S
15	Y31	7.5	0	3.254	2.204	E.P.S
16	Y51	9.35	2.5	0.999	0.836	
17	Y52	10.49	0.7	1.204	1.068	
18	Y53	7.09	1.2	1.696	1.427	
19	S41	12.71	3.8	0.969	0.682	
20	S42	12.21	7.5	0.987	0.698	

표 5.5(계 속)

NO.	교량명	성토고(m)	발생변위(Cm)	안 전 율		비 고
				말뚝고려	말뚝무시	
21	S43	11.65	0.6	1.728	1.356	
22	S44	11.35	6.5	0.982	0.771	
23	S11	5.55	3.7	1.019	0.797	
24	S12	5.96	1.0	0.932	0.720	
25	K01	12.45	10.0	0.954	0.682	
26	K02	8.67	3.18	1.146	0.871	
27	K03	5.03	1.0	1.698	1.391	
28	J01	8.54	22.25	1.107	0.853	
29	J02	11.0	9.5	0.924	0.714	
30	J03	8.54	19.75	0.998	0.702	
31	S01	5.0	7.0	1.570	1.315	
32	S02	7.30	23.95	1.103	0.872	
33	S03	4.10	1.0	1.374	1.103	
34	R01	7.3	5.0	1.162	0.921	

프로그램 "CHAMP" 해석결과 사면안전율은 보강공법을 제외하고 말뚝효과를 무시한 경우 F.S=0.4 1.45의 분포를 나타내며 말뚝효과를 고려한 겨우에는 F.S=0.6 1.86의 분포를 나타내고 있다.

정확한 해석을 위해서는 지하수위 관계, 토질정수 등의 설계입력 자료를 면밀히 분석하여 설계정수를 정해야 하며 설계정수 산정시 다소의 오차가 있을 수 있으므로 기준사면 안전율을 제시코자 할 경우 이를 보정해야 한다.

5.3 해석 결과에 대한 분석

5.3.1 사면안전율과 측방변위와의 관계

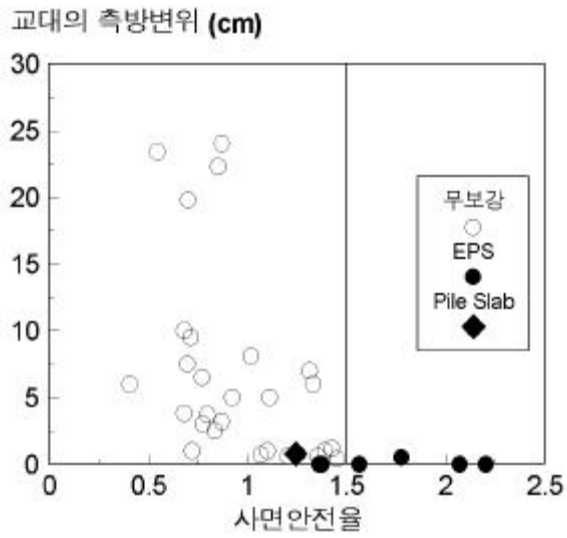
본 연구는 측방변위가 발생한 53개의 교대(표4.1)중 사면안전율 계산에 필요한 토질정수 조사가 가능한 34개 교대에 대하여 표 4.2의 지반조건을 근거로 하여 사면안정 해석을 실시하였다. 해석 결과 산출된 사면안전율과 현장에서 실측한 교대의 측방변위량의 관계는 그림 5.5와 그림 5.6과 같다.

그림 5.5는 프로그램"CHAMP"를 사용하여 구한 사면안전율과 측방변위와의 관계이며 말뚝효과를 고려한 경우와 말뚝효과를 무시한 경우를 각각 해석하여 분석한 결과 말뚝효과를 무시한 경우에는 사면안전율 1.5이하에서, 말뚝효과를 고려한 경우에는 사면안전율 1.8이하에서 측방이동 가능성이 있는 것으로 판정되었다. 또한 교대의 허용이동량을 1.5㎝라 하면 말뚝효과를 무시한 경우에는 사면안전율이 1.4이상, 말뚝효과를 고려한 경우에는 사면안전율이 1.6이상이면 측방이동에 대해 교대는 안전한 것으로 나타났다.

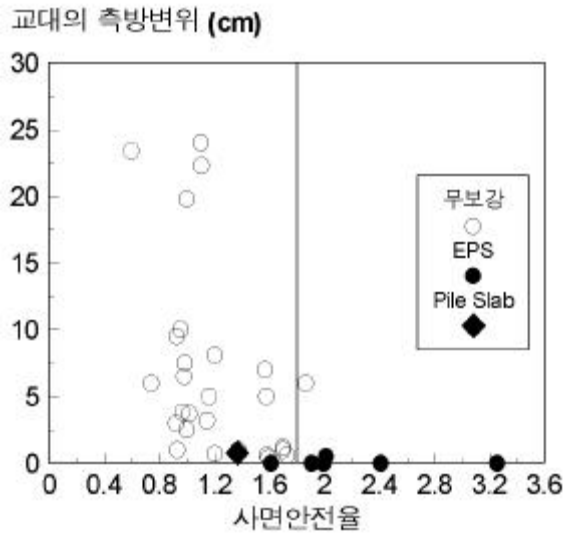
그림 5.6은 프로그램 "SLOPE"를 사용하여 구한 사면안전율과 측방변위와의 관계이며 사면안정 해석방법 중 Bishop법과 Fellenius법으로 각각 해석하여 분석한 결과, Bishop법에서는 사면안전율이 1.8이하, Fellenius법에서는 사면안전율이 1.5이하이면 측방이동 가능성이 있는 것으로 판정되었다. 또한 교대의 허용이동량을 1.5㎝라 하면 Bishop법에서는 사면안전율이 1.6이상, Fellenius법에서는 사면안전율이 1.4이상이면 측방이동에 안전한 것으로 나타났다.

Bishop법과 Fellenius법의 사면안정 해석결과 사면안전율의 차이가 10% 30%정도이므로 설계 입력변수 선정시 신중을 기하여 안정해석을 수행하여야 할 것이다.

본 연구에서 측정된 교대의 측방 변위량은 몇몇 교대의 경우, 준공이후의 변위량으로 그 값이 다소 과소하게 산정된 것으로 판단된다. 그러나 전체적인 해석결과는 홍원표등(1994)에 의해 제안된 기준안전율과 거의 일치하는 것으로 판명되었다.

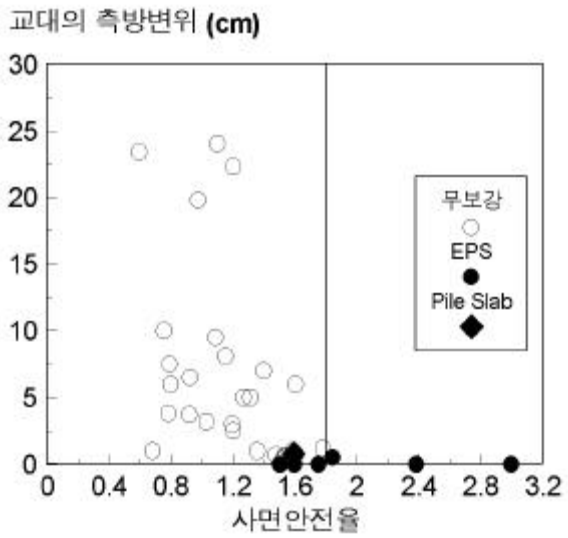


(a) Program "CHAMP" : **말뚝효과무시**

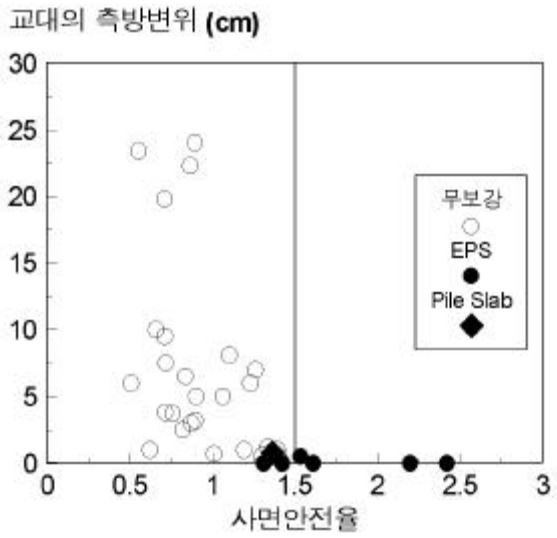


(b) Program "CHAMP" : **말뚝효과고려**

그림 5.5 사면안전율과 측방변위와의 관계



(a) Program "SLOPE" : Bishop Method



Program "SLOPE" : Fellenius Method

그림 5.6 사면안전율과 측방변위와의 관계

5.3.2 사면안전율과 측방유동지수(F)의 관계

일본도로공단이 발표한 측방유동지수(F)와 “SLOPE", "CHAMP"프로그램을 이용한 사면안전율과의 관계를 도시하면 그림 5.7 및 그림 5.8과 같다.
측방유동지수는 2.3.2절에서 설명한 바와 같이 교대배면의 성토고, 교대배면 성토재의 단위중량, 연약층의 전단강도, 연약층 깊이의 함수로 F치가 $4x10^{-2}$이면 측방유동의 우려가 있다고 판정하고 있다[54,55]

본 연구에서는 기존의 판정법인 측방유동지수와 사면안전율의 관련성을 비교하고, 국내 연약지반상의 교대에 기존 판정법이 적합한지 분석하였다.

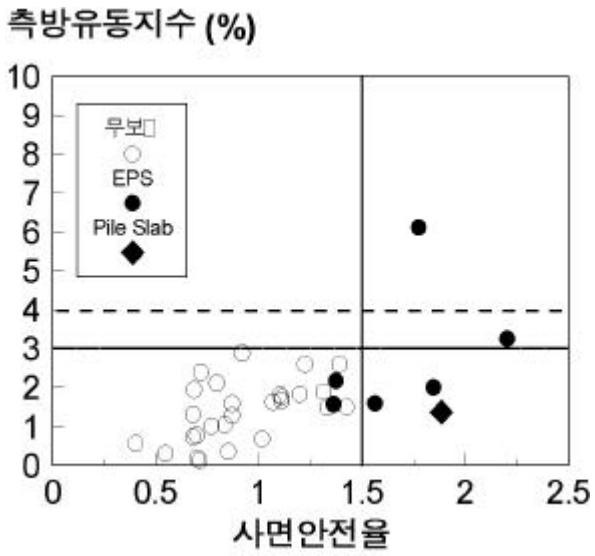
$$F = \frac{c}{\gamma H} \times \frac{1}{D} \qquad (2.1)$$

여기서, c는 연약층의 평균 점착력이며 γ는 성토재의 단위중량이고 H와 D는 각각 성토고와 연약층의 두께이다.

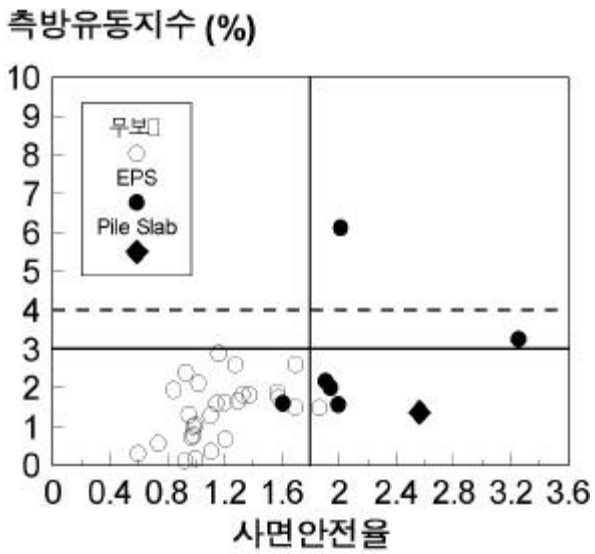
그림 5.7은 “CHAMP" 프로그램을 사용하여 구한 사면안전율과 측방유동 지수(F)와의 관계이며 보강공법을 시행한 교대를 제외하고는 전 교대의 측방유동지수가 4×10^{-2} 이하로 나타나 기존 판정법과 일치하나, 본 연구결과에서는 점선으로 표시한 바와 같이 측방유동지수가 3×10^{-2}을 기준으로 나타났다.

그림 5.8은 “SLOPE" 프로그램를 사용하여 구한 사면안전율과 측방유동지수(F)와의 관계이며 그 결과는 "CHAMP"의 경우와 유사하게 나타났다.

또한 그림 5.7 및 그림 5.8에서와 같이 표 5.6에 나타낸 측방이동 판정기준 사면안전율(CHAMP사용시 말뚝무시1.5, 말뚝고려1.8, SLOPE사용시 Bishop법 1.8, Fellenius법1.5)과 유동지수(F)의 관계를 명확하게 보여주고 있으며, 보강공법을 시공한 교대를 제외하고는 일본도로공단에서 제시한 측방유동지수보다 작은 3×10^{-2}으로 나타나 국내 연약지반상 교대의 측방유동지수로 이 기준치를 제시할 수 있을 것이다.

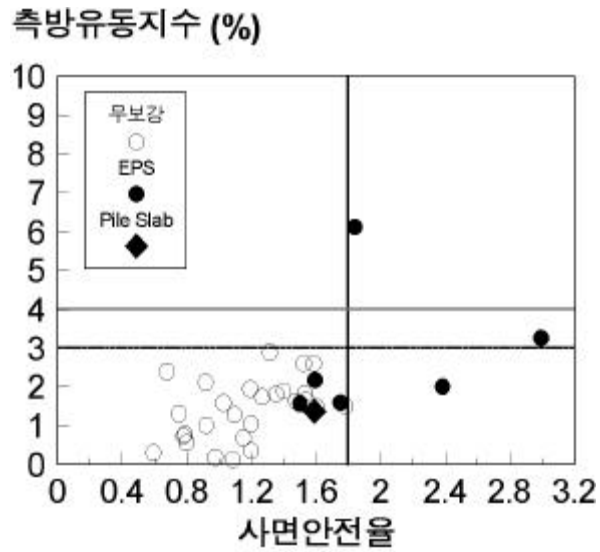


(a) Program "CHAMP" : **말뚝효과무시**

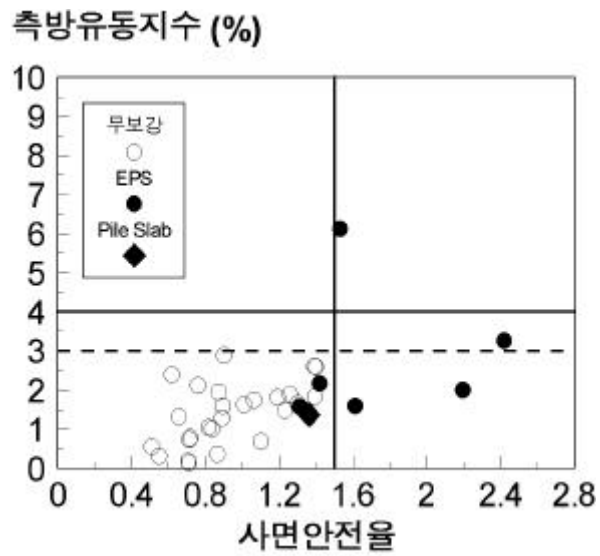


(b) Program "CHAMP" : **말뚝효과고려**

그림 5.7 **사면안전율과 측방유동지수**(F)**의 관계**



(a) Program "SLOPE" : Bishop Method



(b) Program "SLOPE" : Fellenius Method

그림 5.8 사면안전율과 측방유동 지수(F) 의 관계

5.3.3 사면안전율과 측방이동 판정식(I_L)의 관계

일본 건설성 토목연구소에서는 교대의 측방이동에 관련된 요인으로 교대제원, 기초말뚝, 지반에 관련한 요인이 고려된 측방이동 판정식(I_L)을 정의했다.

$$I_L = \mu_1 \mu_2 \mu_3 \frac{\gamma H}{c} \qquad (2.2)$$

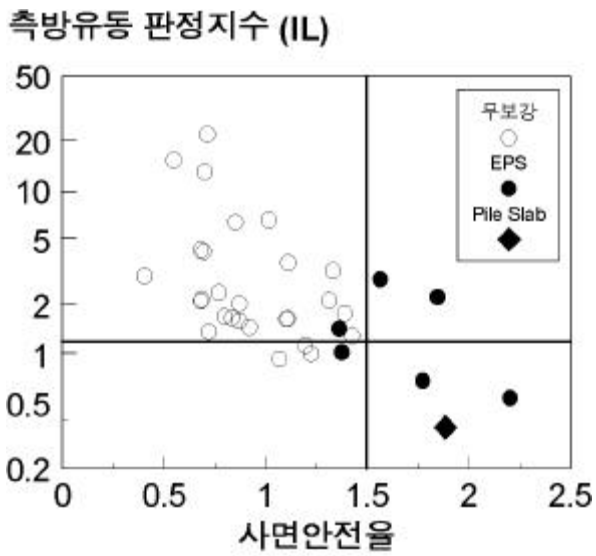
여기서, $I_L < 1.2$: 측방이동 없음

$I_L > 1.2$: 측방이동 우려

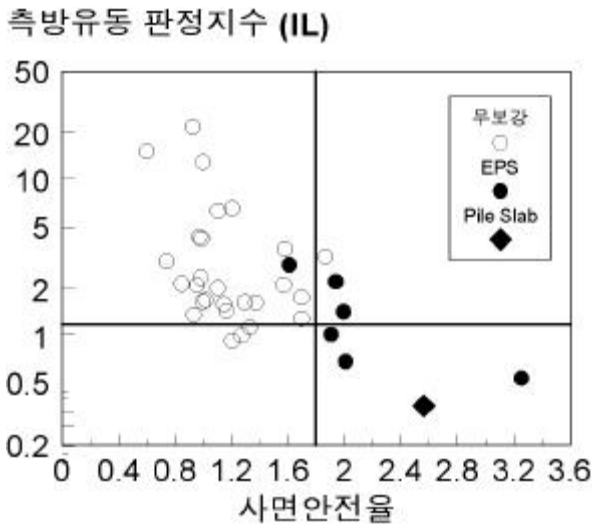
그림 5.9는 "CHAMP" 프로그램을 사용하여 구한 사면안전율과 측방이동 판정지수(I_L)와의 관계이며 보강공법을 시행한 교대를 제외하고는 전 교대의 측방이동 판정지수(I_L)가 기존 판정법과 일치하는 1.2경계부에서 나타나 기존식이 국내 연약지반상 교대의 판정방법으로 적정한 것으로 판단된다.

그림 5.10은 "SLOPE" 프로그램을 사용하여 구한 사면안전율과 측방이동 판정지수(I_L)와의 관계이며 그 결과는 "CHAMP"에 의한 결과와 유사하게 나타났다.

그림 5.9과 그림 5.10에서 보는바와 같이 표 5.6에 나타낸 측방이동 판정기준사면안전율(말뚝무시1.5, 말뚝고려1.8, Bishop법1.8, Fellenius법1.5)과 측방이동 판정지수(I_L)와의 관계를 명확하게 보여주고 있으며, 보강공법을 시공한 교대를 제외하고는 일본 건설성 토목연구소의 제안수치와 거의 일치한다. 하지만 이 판정식만으로는 교대의 측방이동을 판단할 수 없으므로 말뚝의 효과를 고려한 사면안전율과 비교하여 판단하여야 할 것이다.

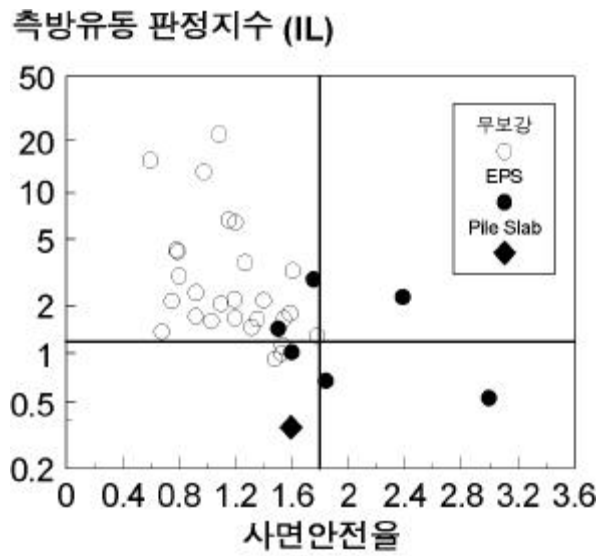


(a) Program "CHAMP" : **말뚝효과무시**

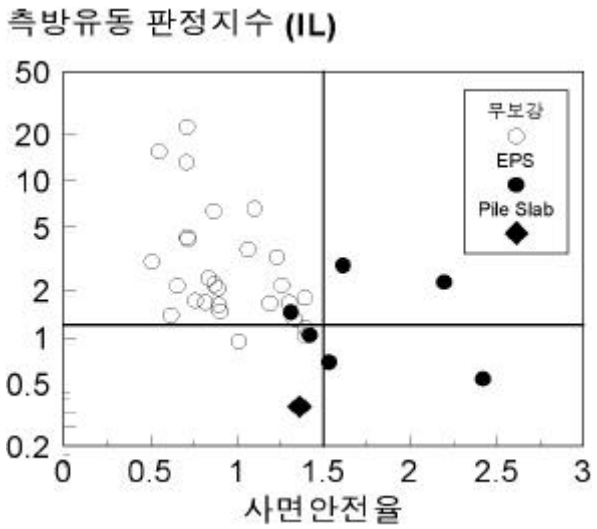


(b) Program "CHAMP" : **말뚝효과고려**

그림 5.9 사면안전율과 측방이동 판정지수(I_L) 의 관계



(a) Program "SLOPE" : Bishop Method



(b) Program "SLOPE" : Fellenius Method

그림 5.10 사면안전율과 측방이동 판정지수(I_L) 의 관계

5.3.3 사면안전율과 안정수(Ns)의 관계

그림 5.11과 그림 5.12는 CHAMP 및 SLOPE 프로그램으로 구한 사면안전율과 안정수(Ns)와의 관계를 도시한 것이다. Tschebotarioff는 안정수가 3.0이상이면 측방유동 현상의 우려가 있다고 발표한 바 있다.

$$N_s = \frac{\gamma H}{c} \qquad (5.1)$$

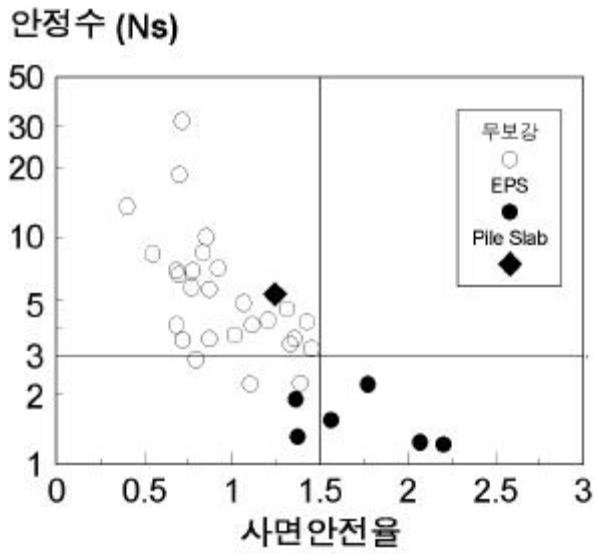
여기서 γ는 교대배면 성토재의 단위중량이며 H와 c는 각각 교대배면의 성토고와 연약층의 평균점착력이다.

그림 5.11과 그림 5.12 에서 보는바와 같이 표 5.6에 나타낸 측방이동 판정기준 사면안전율(말뚝무시1.5, 말뚝고려1.8, Bishop법1.8, Fellenius법1.5)과 안정수(Ns)의 관계에서 안정수(Ns)≥3인 경우 교대의 측방이동이 발생한 것으로 나타났으며 측방이동 방지공법을 사용한 교대의 경우 판정할수 있는 방법이 못된다.

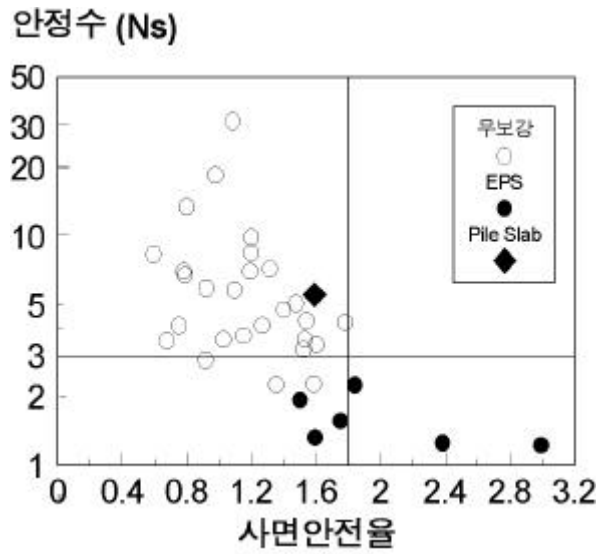
본 연구의 분석결과 측방이동 방지 대책공법을 시공한 교대를 제외하고는 거의 Tschebotarioff 제안식과 일치하고 있다.

하지만 안정계수를 사용하는 방법이 측방유동의 발생을 예상할 수는 있으나 측방이동량은 연약층의 두께 및 말뚝의 강성과 매우 관련성이 있기 때문에 이를 무시한 Tschebotarioff의 안정수에 의한 판정방법은 정성적 판정이고 정량적으로 판단하기에는 부족하다.

따라서 지반의 측방유동 판정 및 교대측방 이동량의 예상은 사면안전율을 근간으로 하여 측방유동의 발생이 예상될 경우 수동말뚝해석을 하는 것이 가장 현실에 가장 가까운 방법이 될 것이다.

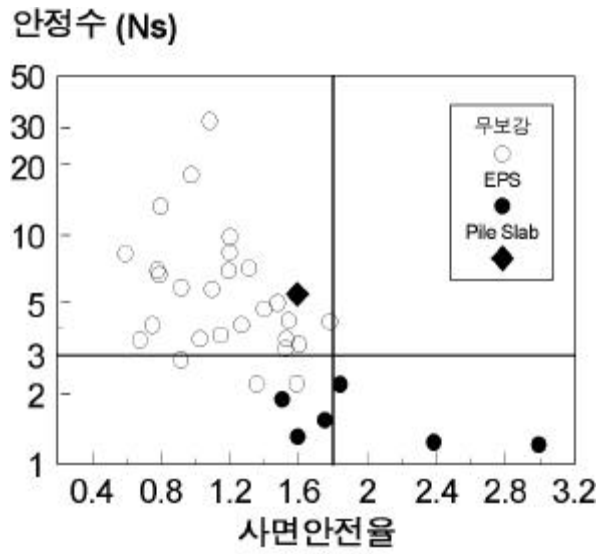


(a) Program "CHAMP" : **말뚝효과무시**

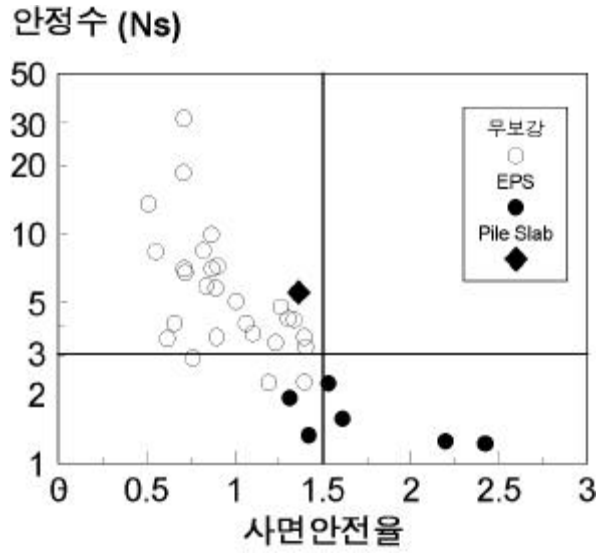


(b) Program "CHAMP" : **말뚝효과**

그림 5.11 사면안전율과 안정계수(Ns) 의 관계



(a) Program "SLOPE" : Bishop Method



(b) Program "SLOPE" : Fellenius Method

그림 5.12 사면안전율과 안정계수(Ns) 의 관계

5.3.5 측방변위와 측방유동지수 및 측방이동 판정식과의 관계

지금까지는 사면안전율과 관련하여 여러관계를 비교,분석하였으며 여기서는 앞 절에서 논의한 측방유동지수, 측방이동 판정식의 관계를 재검토코자 측방유동지수(F)와 측방변위의 관계(그림5.13) 및 측방이동 판정식(I_L)과 측방변위의 관계(그림5.14) 측방유동지수(F)와 측방이동 판정식(I_L)의 상관성을 비교,분석하려 한다.

그림 5.13은 측방유동지수(F)와 측방변위와의 관계이며 일본도로공단에서 발표한 4×10^{-2}의 값보다 다소 작은 3×10^{-2}의 값에서 한계치를 보여주고 있다. 이 한계치는 사면안전율과의 관계에서도 같은 결과를 나타났으며 국내의 연약지반상무보강 교대의 경우 F치의 상한값은 3×10^{-2}인 것으로 나타나 이 값을 교대 시공전 측방유동 판정시, 수동말뚝으로의 검토에 대한 필요여부의 판정기준으로 활용할 수 있을 것이다.

그림 5.14는 측방이동 판정식(I_L)와 측방변위의 관계이며 일본건설성 토목연구소에서 제시한 I_L치의 하한선 1.2와 거의 일치함을 보여주고 있다. 따라서 이 기준을 국내의 연약지반상 교대 측방유동 판정에 사용해도 무방할 것으로 판단된다.

그림 5.15는 측방이동판정지수(I_L)와 측방유동지수(F)와의 상관관계를 구하기 위하여 양축에 대수값을 취하여 나타내었다. 그 결과 일정한 선형관계를 보이며 이를 회귀분석한 결과 식 5.1을 얻을 수 있었다.

$$\log I_L = -0.91 \log F + 0.47 \qquad (5.1)$$

이론적으로 $I_L = K F^{-1}$ 의 관계식이 되며 여기서 $K = D/l \times b/B \times 1/A$이며 K값은 교대의 제원, 말뚝의 길이, 연약층 깊이의 함수이다.

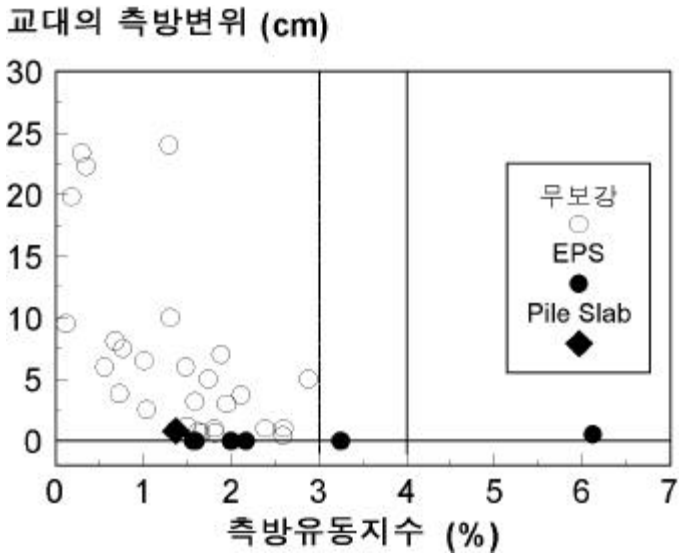


그림 5.13 측방유동지수(F)와 측방변위와의 관계

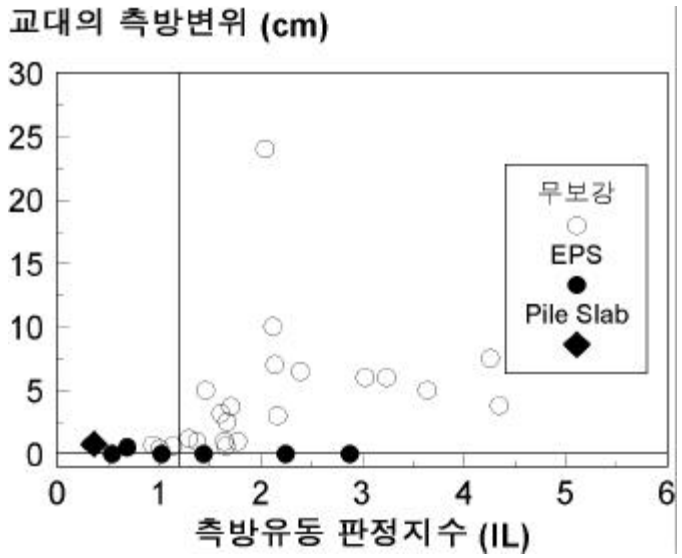


그림 5.14 측방이동 판정식(I_L)와 측방변위의 관계

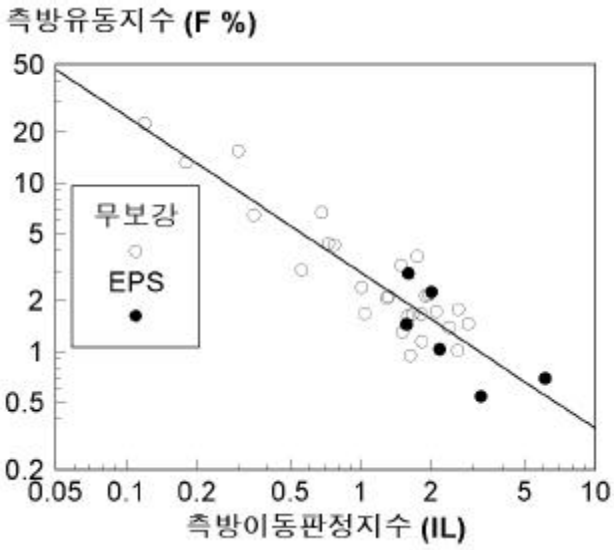


그림 5.15 측방이동 판정식(I_L)와 측방유동지수(F)의 관계

5.4 교대의 측방이동 판정법

연약지반상의 교대 측방이동을 판정하는 방법은 앞절에서 소개한 바와 같이 측방유동지수(F)에 의한 판정, 측방이동 판정지수(I_L)에 의한 판정등이 있다.

측방이동 사례 및 해석분석 결과 측방유동지수(F), 측방이동 판정지수(I_L) 등에 의한 판정 방법은 그림 5.7 그림 5.8에 나타난 사면안전율과 측방이동지수의 관계와 그림 5.9 그림 5.10에 나타난 사면안전율과 측방이동 판정지수의 관계에서 EPS, Pile Slab 등의 측방이동 방지 대책공법을 사용한 교대의 경우 사면안전율이 증가하게 되어 판정방법으로 바람직하지 못하다.

하지만 사면안전율에 의한 판정방법은 어떤 측방이동 방지 대책공법을 사용하더라도 설계정수만 잘 분석하여 채택하면 교대의 측방이동에 영향을 미치는 여러 요소를 복합적으로 잘 표현할 수 있으므로 합리적인 판정기준이 될 수 있다.

본 연구의 분석결과에서도 사면안전율에 의한 방법이 안정기준의 판단방법으로 잘 나타나고 있다.

본 연구의 분석결과 사면안전율에 의한 방법은 홍원표등(1994)에 의해 제안된 기준안전율과 잘 일치하고 있다. 다만 홍원표등(1994)에 의해 제안한 교대의 허용변위량 5㎝일 경우 사면안전율과 본 연구에서 교대의 허용변위량 1.5㎝일 경우 측방이동 판정기준 사면안전율과 그 결과는 일치한다.

이와같이 변위량이 차이가 나는 것은 본 연구에서 수집된 자료들은 구조물 완성 이후에 측정한 결과치이고,시공중에 얼마만큼 변위가 발생되었는지는 알 수 없기 때문에 분석결과에 반영되지 않아 실제보다 적게 측정되었다고 판된단된다.

따라서 홍원표등(1994)에 의해 제안된 기준 안전율이 보다 합리적인 판정기준에 적합하리라 판단되며 본 논문결과 그것을 입증해 주고 있다.

결국, 교대의 측방이동 판정기준 사면안전율과 교대의 허용이동량 5㎝일때 교대의 안정기준 사면안전율을 각각 구분하여 나타내면 표 5.6와 같다.

표 5.6 측방이동 판정 사면안전율 기준

사면안정 해석법		측방이동 판정기준 사면안전율		비고
		측방이동 발생 판단	허용이동량 5㎝일 경우	
SLOPE	Bishop	1.8	1.6	
	Fellenius	1.5	1.4	
CHAMP	말뚝 무시	1.5	1.4	
	말뚝 고려	1.8	1.6	

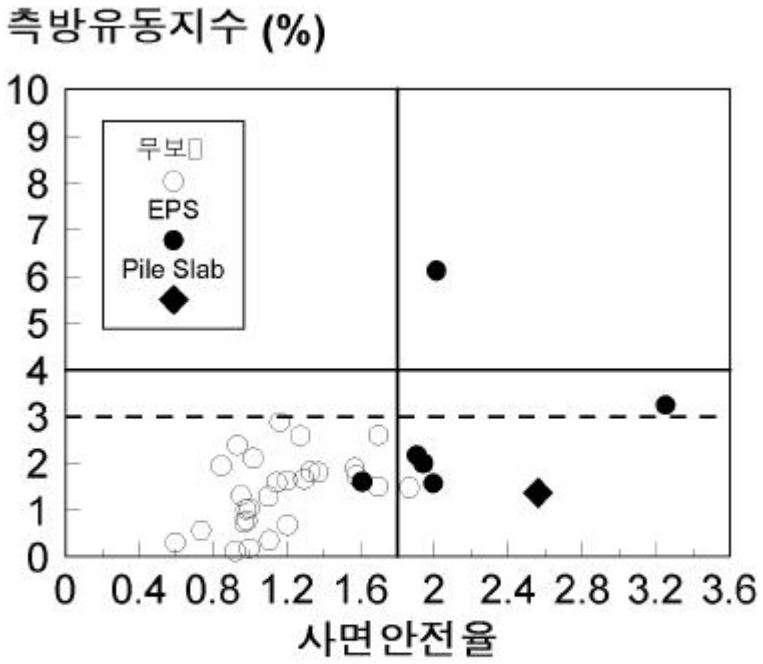
측방이동 판정기준 사면안전율(말뚝무시1.5, 말뚝고려1.8, Bishop법1.8, Fellenius법1.5)과 안정수(Ns)의 관계에서 안정수(Ns)≥3인 경우 교대의 측방이동이 발생한 것으로 나타났으며 분석결과 측방이동 방지 대책공법을 시공한 교대를 제외하고는 거의 Tschebotarioff 제안식과 일치하고 있다.

하지만 안정계수를 사용하는 방법이 측방유동의 발생에 대한 판단을 어느 정도 가능하게 하겠지만 측방이동량은 연약층의 두께 및 말뚝의 강성과 매우 관련성이 있기 때문에 이를 무시한 Tschebotarioff의 안정수에 의한 판정방법은 정성적 판정이고 정량적으로 판단하기에는 부족하다.

결론적으로 교대의 측방이동을 판정하는 방법은 교대의 제원, 말뚝사용본수, 성토체의 단위중량, 연약층의 설계정수 등을 복합적으로 고려된 사면안전율에 의한 방법이 가장 합리적인 방법이 될 것이다.

이는 교대의 측방이동 대책방법에 대한 기본원리인 재하하중의 경감, 연약지반부의 개량, 교대 형식에 의한대책, 기초 저항력의 증가 등에 대한 것들을 복합적으로 고려하여 사면안전율을 계산하여 본 연구에서 밝힌 기준사면 안전율과 비교함으로써 교대의 안정성을 판정할 수 있고 설계단계에 연약지반상 교대의 측방이동 대책공법을 제시할 수 있을 것이다.

또한 연약지반상에 교대기초를 설계할 경우, 측방이동이 발생하는 지반속의 말뚝 변위량을 산정하기 위해서는 수동말뚝 해석법이 반드시 병행되어야 하며, 연약지반의 강도 및 변형계수, 성토재의 단위중량, 말뚝의 제원, 연약층의 두께등 사면안정 계산에 필요한 자료에 대한 정확한 조사가 필요하다.



- Program "CHAMP" 말뚝효과 고려 -