

## 교대 기초말뚝의 측방유동 판정식에 관한 신뢰성 해석 Reliability Analysis on the Decision Method of Lateral Flow of Foundation Piles for Abutment

안종필<sup>1)</sup>, Jong-Pil Ahn, 김규덕<sup>2)</sup>, Gyu-Deok Kim, 김일구<sup>3)</sup>, Il-Goo Kim, 최진호<sup>4)</sup>, Jin-Ho Choi

<sup>1)</sup> 조선대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Chosun University

<sup>2)</sup> (주)서림 본부장, Director, Seolim, Co., Ltd

<sup>3)</sup> 조선대학교 토목공학과 박사과정, Graduate School, Dept. of Civil Engineering, Chosun University

<sup>4)</sup> 조선대학교 토목공학과 석사과정, Graduate School, Dept. of Civil Engineering, Chosun University

**SYNOPSIS** : This study conducted the decision method of lateral flow in abutment structures founded on the soft soils and the reliability analysis on the foundation pile for abutment. On the basis of the results, this study proposed the reliability design model.

Reliability analysis was conducted by applying second moment method, point estimation method, and expected total cost minimization to lateral movement index, lateral movement decision index, modified lateral movement decision index, and circular failure safety factor for the decision criteria of lateral flow. The reliability index by analysis method had a similar tendency each other. Point estimation method was found as a practical method in the aspect of convenience because it could conduct the analysis only by mean and standard deviation as well as the partial derivative on random variables was not necessary.

Optimum reliability index and optimum safety according to increasing in failure factors and load ratio were analyzed and loads and resistance factors of the design criteria of optimum reliability were estimated. It presented rational design model which can consider construction level and stability and economical efficiency overall.

**Key words** : Lateral flow, Reliability analysis, Foundation pile, Second moment method, Point estimation method, Expected total cost minimization

### 1. 서 론

최근 국내에서는 연약지반인 서남해안 지역을 중심으로 건설공사가 활발하게 진행되면서 측방유동과 관련된 교대기초 등의 변형문제가 빈번하게 발생하고 있으며, 특히 말뚝기초의 경우 측방유동압을 받는 수동말뚝의 거동을 무시하고 주동말뚝으로 설계 및 시공함으로써 구조물이 완성된 후 다수의 피해 사례가 발생하고 있는 실정이다(건설교통부, 2000). 그러나 이 문제의 중요성에 대한 인식은 현재까지도 일반적으로 미흡하며, 실무에서 측방유동이 구조물에 미치는 영향을 설계에 고려하지 않는 경우도 흔하게 발생하고 있는 실정이며, 이는 설계법이 확립되어 있지 않은 것에 기인한다(안종필·홍원표, 1994).

또한 측방유동 판정방법의 대부분은 주로 확정론적 경험식에 기반을 두고 있다. 연약지반 위에 교량을 설계할 경우 교대의 측방변위에 대한 안정성에 밀접한 영향을 미치는 요인으로는 하중조건이나 지반정수에 대한 신뢰도 및 이에 대한 오차의 변수 등이 있다. 또한 기존의 확정론적 경험식에서는 이를 설계에 반영하는 데 제약이 있을 수 있으며, 그 결과에 대한 정확성과 일관성이 부족할 수 있다. 특히 교

대구조물의 공사기간 내에 발생하는 뒤펀이나 적재하중 및 장비하중 등의 최대하중조건을 확정적으로 추정하기란 거의 불가능하며, 흙의 공학적 성질에 따른 여러 특성들 즉, 흙의 단위중량과 내부마찰각 및 점착력 등을 확정량으로 보기에는 너무나 많은 불확실량이 내재되어 있다.

북미와 유럽을 중심으로 구조물의 설계와 관련하여 확률론적 설계방법이 이미 도입되어 그 기준이 정비되었으며, 구조공학 분야뿐만 아니라 지반공학 분야의 설계에도 도입이 시도되고 있다. 최근 국제표준화기구의 설계표준뿐만 아니라 미국연방도로국의 시방기준 및 유럽연합의 설계코드에서 신뢰성이론에 의한 설계가 포함된 것이 그 예라 할 수 있으며, 지속적인 연구개발을 통한 국내의 대비가 필요한 시점이다(곽기석·박재현·최용규·허정원, 2006).

따라서 본 연구에서는 확률론적 방법에 의해 계산되는 측방유동 판정방법에 대해 신뢰성 해석을 수행하고, 신뢰성 설계기준인 저항 및 하중계수를 제시함으로써 확률론적 방법에 따른 측방유동의 안정해석과 설계기준의 정립을 위한 기초자료로 활용하는 데 본 연구의 목적이 있다.

## 2. 측방유동 판정방법의 신뢰성 해석

### 2.1 신뢰성 해석을 위한 측방유동 판정방법

본 연구에서는 측방유동을 받는 교대 기초의 신뢰성 해석에 있어 측방유동 판정방법과 교대 기초말뚝에 대해 신뢰성 해석을 수행하였다. 본 절에서는 측방유동 판정방법의 신뢰성 해석을 수행하기 위하여 표 1과 같이 신뢰성 해석을 위한 측방유동에 대한 판정방법을 선정하였다.

표 1. 신뢰성 해석을 위한 측방유동의 판정방법

구 분	제 안 자	제 안 식
측방이동지수( $F$ ) 방법	일본도로공단(1979)	$F = (C/\gamma HD)$
측방이동판정수( $I$ ) 방법	일본건설성 토목연구소(1980)	$I = \mu_1\mu_2\mu_3(\gamma h/C)$
수정측방이동판정수( $M_I$ ) 방법	한국도로공사(1995)	$M_I = \alpha \cdot \frac{\gamma \cdot h}{c_u}$
원호활동 안전율( $F_s$ ) 방법	일본건설성토목시험소(1978)	$F_s = \frac{M_r}{M_d} = \frac{M_{rs} + M_{rp}}{M_d}$

표 1에서와 같이 신뢰성 해석을 위하여 선정한 측방유동 판정방법은 크게 세 가지로 대별할 수 있으며, 첫째로 성토하중과 점성토의 비배수전단강도 및 연약층 깊이와의 관계로부터 측방유동의 유무를 판정하는 방법, 둘째로 교대구조물의 이동량이나 지표침하량으로부터 측방유동의 유무를 판정하는 방법, 셋째로 교대배면의 사면안정해석을 통해 측방유동의 유무를 판정하는 방법 등으로 구분할 수 있다.

### 2.2 측방유동 판정방법의 불확실량 산정

본 연구에서는 기존에 제안된 지반의 강도정수 및 하중조건의 변동계수들을 고찰하고, 건설교통부(2000, 2001)에서 발표한 “측방유동을 받는 토류구조물의 안전진단 기술개발 연구과제”에서 조사된 108개 교대기초의 점착력, 연약층 두께, 흙의 단위중량 및 성토높이 등의 자료를 이용하여 측방유동에 대한 판정방법의 불확실량을 산정하였다. 표 2는 산정된 지역별 확률변수의 통계치를 나타냈다.

표 2. 지역별 확률변수의 통계 특성치

확률변수	불확실량	영남		서해				남해
		A지역	B지역	A지역	B지역	C지역	D지역	
흙의 점착력 ( <i>c</i> )	평균	2.915	1.781	4.628	2.543	2.073	1.516	1.846
	변동계수	0.473	0.128	0.106	0.249	0.239	0.325	0.047
연약층두께 ( <i>D</i> )	평균	13.964	10.791	6.271	10.4	11.429	9.01	13.592
	변동계수	0.404	0.356	0.242	0.423	0.524	0.623	0.223
흙의 단위중량 ( <i>r</i> )	평균	1.884	1.800	2.000	1.800	1.946	2.002	1.900
	변동계수	0.063	2.587e-16	0.0	2.56e-16	0.088	0.074	1.21e-16
성토높이 ( <i>H</i> )	평균	8.980	6.642	10.514	8.341	9.958	9.444	6.927
	변동계수	0.226	0.245	0.084	0.093	0.227	0.279	0.236

각 측방유동 판정방법의 저항과 하중에 대한 평균-공칭비와 변동계수를 산정하여 표 3에 나타냈다. 여기서,  $F$ 는 측방이동지수,  $I$ 는 측방이동판정수,  $M_I$ 는 수정측방이동판정수,  $F_s$ 는 원호활동 안전율에 의한 판정법을 나타내며, 변동성이 작은 성토하중은 사하중의 개념으로 적용하였으며, 변동성이 큰 상재하중은 활하중의 개념으로 적용하였다.

표 3. 측방유동 판정방법의 평균-공칭비 및 변동계수

구분	평균-공칭비( $\frac{\text{평균}}{\text{공칭}}$ )				변동계수			
	$F$	$I$	$M_I$	$F_s$	$F$	$I$	$M_I$	$F_s$
저항( $R$ )	1.12	1.12	1.12	1.12	0.45	0.45	0.45	0.257
성토하중( $S_D$ )	1.10	1.10	1.10	1.10	0.10	0.10	0.10	0.10
상재하중( $S_L$ )	1.34	1.34	1.34	1.34	0.301	0.246	0.221	0.28

### 2.3 측방유동 판정방법의 신뢰성 해석결과

2차모멘트법과 점추정법 및 총기대비용 최소화에 의한 최적 신뢰성해석방법을 이용하여 측방유동의 판정방법에 대한 신뢰성 해석을 수행한 결과는 다음의 표 4와 같다. 여기서,  $s_m$ 는 평균,  $s_d$ 는 표준편차,  $\beta$ 는 신뢰성지수,  $p_f$ 는 파괴확률,  $\Omega_R$ 는 저항변동계수,  $\Omega_S$ 는 하중변동계수를 나타낸다.

표 4. 측방유동 판정방법에 대한 신뢰성 해석의 비교

구분	2차모멘트법				점추정법				총기대비용최소화법			
	$s_m$	$s_d$	$\beta$	$p_f$	$s_m$	$s_d$	$\beta$	$p_f$	$\Omega_R$	$\Omega_S$	$\beta$	$p_f$
$F$	661.83	281.24	2.353	0.0093	661.83	283.28	2.336	0.0097	0.287	0.811	2.344	0.0095
$I$	754.16	242.12	3.115	0.0009	754.16	242.62	3.108	0.0009	0.287	0.246	3.053	0.0011
$M_I$	700.74	243.62	2.876	0.0020	700.74	244.48	2.866	0.0021	0.287	0.246	2.806	0.0025
$F_s$	3.8086	1.8391	2.071	0.0192	3.8086	2.1945	1.735	0.0413	0.112	0.712	1.724	0.0423

본 연구에서 수행한 3가지 신뢰성 해석방법 중에서 2차모멘트법은 확률변수를 편미분하여 신뢰성지수와 파괴확률을 산정하는 방법이며, 확률변수의 편미분에 따른 복잡성과 편미분이 불가능할 경우에는 신뢰성 해석방법의 어려움이 있다고 할 수 있다. 점추정법은 평균과 표준편차만으로 신뢰성해석을 할 수 있으므로 확률변수가 15개 이하인 경우에는 아주 유리한 방법으로 사용되고 있다. 총기대비용 최소화에 의한 신뢰성 해석법은 물리적인 측면뿐 아니라 경제적인 측면을 고려한 방법이라 할 수 있다.

표 4에서와 같이 점추정법에 의한 측방이동지수, 측방이동판정수, 수정측방이동판정수 및 원호활동 안전율에 따른 신뢰성지수가 각각 2.336, 3.108, 2.866, 1.735의 범위로서 측방이동판정수 > 수정측방이동판정수 > 측방이동지수 > 원호활동 안전율의 순서로 나타났다. 특히, 원호활동 안전율에 대한 신뢰성지수가 가장 작은 값으로 나타났으며, 이는 다른 판정방법 보다 원호활동 안전율에 의한 판정방법의 평균과 표준편차의 비가 상대적으로 작게 나타난 것에 기인된다.

또한 2차모멘트법과 점추정법 및 총기대비용 최소화방법으로 산정한 신뢰성지수는 2.353~2.344, 3.115~3.053, 2.876~2.806, 2.071~1.724의 범위로 산정되었으며, 해석방법에 따른 신뢰성지수 값은 매우 유사한 것으로 나타났다. 확률변수에 대한 편미분이 불필요하고 평균값과 표준편차만으로 신뢰성 해석을 수행할 수 있는 점추정법이 다른 방법보다 간편성 측면에서 실용적인 방법임을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 측방유동 판정방법의 신뢰성 해석에서 점추정법으로 산정한 신뢰성지수를 이용하여 파괴비용과 파괴계수를 산정하였으며, 총기대비용 최소화법에 의한 최적신뢰성 설계규준을 제시하였다.

표 5에서 측방유동 판정방법의 파괴비용 및 파괴계수는 저항과 하중의 변동계수에 따라 민감하게 변화하게 된다. 즉, 저항의 변동계수가 작고 하중의 변동계수가 작을수록 파괴비용과 파괴계수가 작아짐을 알 수 있다. 따라서 측방유동 판정방법의 신뢰성 설계규준을 검정함에 있어서 물리적인 측면의 변동계수와 경제적인 측면의 파괴계수 선정의 중요성을 알 수 있다.

표 5. 측방유동 판정방법의 신뢰성 설계규준

구 분	공칭저항 계수	공칭성도 하중계수	공칭상재 하중계수	파괴비용	파괴계수
측방이동지수	0.6703	1.2377	1.5077	19.8089	396.197
측방이동판정수	0.4092	1.1120	1.3546	14.7039	294.079
수정측방이동판정수	0.5253	1.1108	1.3532	7.03803	140.761
원호활동 안전율	1.0346	1.1108	1.3971	4.97693	99.4572

### 3. 결과 분석 및 고찰

#### 3.1 파괴계수 증가에 따른 신뢰성 해석결과 및 설계규준의 분석

측방유동의 판정방법에 대한 최적신뢰성지수 및 최적안전율을 산정하는데 있어 적절한 경제적 수준을 고려하기 위해 본 연구에서는 파괴계수의 변화에 따른 최적신뢰성지수 및 최적안전율을 분석해 보았다. 파괴계수는 파괴손실비용과 초기비용의 비로 정의되며, 보통 2~1,000까지 변하는 것으로 가정한다. 파괴계수를 크게 고려할 경우 최적신뢰성지수와 최적안전율은 당연히 증가하나 시공수준 및 사회적·경제적·환경적인 요인을 종합적으로 판단하여 파괴계수의 크기를 고려해야 될 것이다.

본 연구에서는 파괴계수 즉,  $\tau = c_f/k$  ( $c_f$ 는 파괴비용,  $k$ 는 비용증가비)의 증가에 따른 신뢰성 해석의 분석을 위하여 파괴계수가 5, 50, 100, 250, 500, 750, 1,000일 경우의 최적신뢰성지수 값과 최적안전율 값을 산정하였다.

표 6에서와 같이 최적신뢰성지수는 측방이동지수는 2.6937~4.2088의 범위, 측방이동판정수는 2.8285~4.3016의 범위, 수정측방이동지수는 2.8944~4.3471의 범위, 원호활동판정법은

2.5471~4.1064의 범위로 나타났다. 최적안전율은 측방이동지수는 1.6173~3.2344의 범위, 측방이동판정수는 1.7367~3.3665의 범위, 수정측방이동지수는 1.7983~3.4383의 범위, 원호활동판정법은 1.2626~1.9937의 범위로 나타났다. 한편, 원호활동 판정법의 경우 최적신뢰성지수는 다른 판정법과 유사하게 나타났으나 최적안전율은 비교적 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 하중의 변동계수는 각 판정법이 서로 유사하나 원호활동 판정법에 대한 저항의 변동계수가 상대적으로 작은 것에 기인되며 최적안전율 산정 시 저항의 변동계수에 민감한 변화를 나타냄을 알 수 있다.

표 6. 파괴계수에 따른 측방유동 판정방법의 신뢰성 해석결과

파괴계수	최적신뢰성지수 $\beta_{opt}$				최적안전율 $n_{opt}$			
	F	I	M <sub>I</sub>	F <sub>S</sub>	F	I	M <sub>I</sub>	F <sub>S</sub>
5	2.6937	2.8285	2.8944	2.5471	1.6173	1.7367	1.7983	1.2626
50	3.4348	3.5447	3.5986	3.3148	2.2701	2.3959	2.4621	1.5811
100	3.6285	3.7334	3.7850	3.5136	2.4804	2.6080	2.6756	1.6759
250	3.8698	3.9693	4.0182	3.7606	2.7698	2.8996	2.9688	1.8016
500	4.0428	4.1388	4.1859	3.9373	2.9979	3.2906	3.1995	1.8973
750	4.1407	4.2348	4.2810	4.0371	3.1352	3.2670	3.3382	1.9536
1000	4.2088	4.3016	4.3471	4.1064	3.2344	3.3665	3.4383	1.9937

그림 1에서 그림 4는 각 측방유동 판정법에 대한 파괴계수의 증가에 따른 공칭저항 및 공칭하중계수의 변화를 도식화하여 나타낸 것으로서, 공칭저항계수의 경우 파괴계수증가에 따라 가장 민감하게 변화되는 것을 알 수 있으며, 공칭성토하중계수에 비해 공칭상재하중계수가 더욱 민감하게 변하게 되는 것을 알 수 있다.

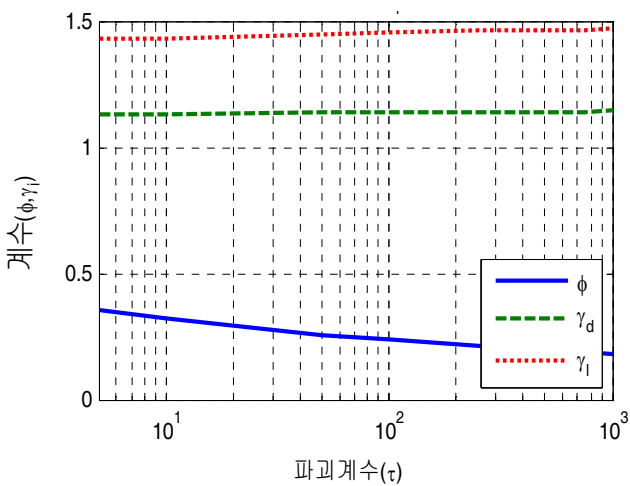


그림 1. 측방이동지수의 하중-저항계수

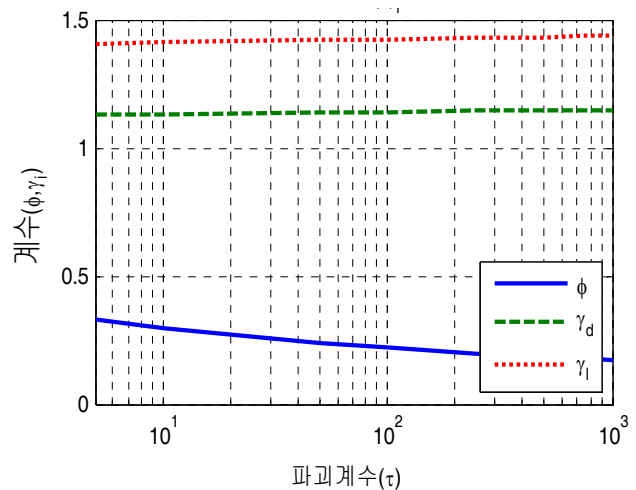


그림 2. 측방이동판정수의 하중-저항계수

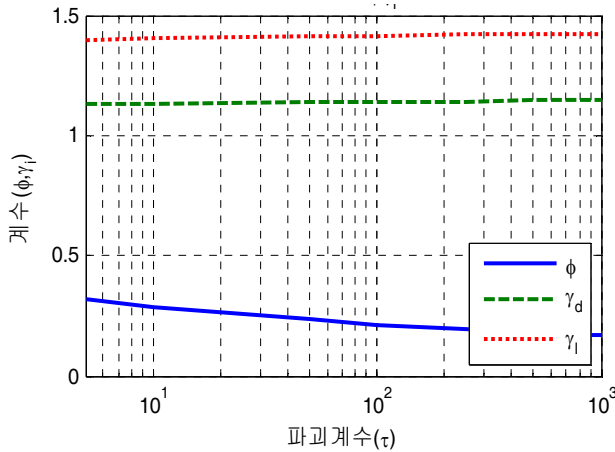


그림 3. 수정측방이동판정수의 하중-저항계수

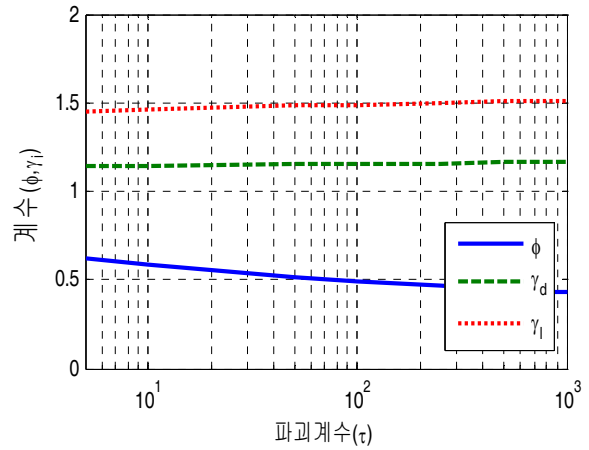


그림 4. 원호활동 안전율의 하중-저항계수

### 3.2 하중비 증가에 따른 신뢰성 해석결과 및 설계기준의 분석

구조신뢰성에서 하중비는 활하중과 사하중의 비로 정의되며, 하중비의 변화에 따라 경제적인 설계방법의 수단이 되기도 한다. 대개 구조신뢰성의 경우 사하중이 지배적인 하중이 되면 하중-저항계수 설계방법이 유리하고, 활하중이 지배적일 경우 오히려 허용응력설계법이 더 경제적인 설계가 된다.

측방유동을 받는 교대 기초와 같은 지반구조물의 경우 성토하중은 사하중의 개념으로, 적재하중이나 장비하중 또는 공사에 따른 작업하중 등은 활하중의 개념으로 생각할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 하중비를 0.5에서 5.0까지 증가함에 따라 최적신뢰성지수 및 최적안전율의 변화를 검토하여 보았다. 검토조건으로 Chou가 최적신뢰성지수를 산정하기 위하여 사용한 공식으로 계산한 정규화 비용증가비( $k$ )는 0.0065, 정규화 파괴비용( $c_f$ )는 8.6954, 정규화 파괴계수( $\tau$ )는 1,338.9의 값을 적용하였다.

표 7은 하중비의 증가에 따른 최적신뢰성지수와 최적안전율의 산정 결과를 정리하여 나타내었다. 산정 결과 하중비가 증가함에 따라 최적신뢰성지수와 최적안전율이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 파괴계수 증가에 따른 최적신뢰성지수와 최적안전율과 비교하여 볼 때 하중비의 증가에 따른 결과값이 비교적 높은 값을 보이고 있으며, 이는 하중비에 따른 최적신뢰성지수와 최적안전율 산정시 정규화파괴계수( $\tau$ )를 1,000보다 큰 1,338.9의 값으로 하여 산정하였기 때문인 것으로 판단된다.

표 7. 하중비에 따른 측방유동 판정방법의 신뢰성 해석결과

하중비	최적신뢰성지수 $\beta_{opt}$				최적안전율 $n_{opt}$			
	F	I	M <sub>I</sub>	F <sub>S</sub>	F	I	M <sub>I</sub>	F <sub>S</sub>
0.5	4.3512	4.4268	4.4632	4.2519	3.4446	3.5709	3.6344	2.0340
1.0	4.2767	4.3684	4.4134	4.1757	3.3365	3.4690	3.5412	2.0346
1.5	4.2334	4.3312	4.3795	4.1294	3.2949	3.4170	3.4871	2.0514
2.0	4.2060	4.3070	4.3569	4.0996	3.2787	3.3899	3.4563	2.0698
2.5	4.1871	4.2902	4.3411	4.0790	3.2727	3.3747	3.4376	2.0865
3.0	4.1734	4.2779	4.3295	4.0639	3.2711	3.3656	3.4255	2.1008
3.5	4.1630	4.2685	4.3206	4.0524	3.2717	3.3599	3.4173	2.1129
4.0	4.1548	4.2611	4.3136	4.0433	3.2731	3.3562	3.4114	2.1232
4.5	4.1482	4.2551	4.3079	4.0360	3.2750	3.3537	3.4072	2.1321
5.0	4.1428	4.2502	4.3032	4.0299	3.2770	3.3521	3.4039	2.1397

표 7에서와 같이 최적신뢰성지수는 측방이동지수의 경우 4.3512~4.1428의 범위, 측방이동판정수는 4.4268~4.2502의 범위, 수정측방이동판정수는 4.4632~4.3032의 범위, 원호활동 판정방법은 4.2519~4.0299의 범위로 각각 산정되었고, 최적안전율은 측방 이동지수는 3.4446~3.2770의 범위, 측방이동판정수는 3.5709~3.3521의 범위, 수정측방이동판정수는 3.6344~3.4039의 범위, 원호활동 판정방법은 2.0340~2.1397의 범위로 각각 산정되었다.

그림 5에서 그림 8은 각 측방유동 판정법에 대하여 하중비의 증가에 따른 공칭저항 및 공칭하중계수의 변화를 도식화하여 나타낸 것으로서, 하중비가 증가하더라도 공칭저항계수의 경우 거의 변화가 없는 것으로 나타났으며, 공칭성토허중계수는 약간 감소하는 경향이 나타났고, 공칭상재하중계수는 약간 증가하는 것으로 나타났다.

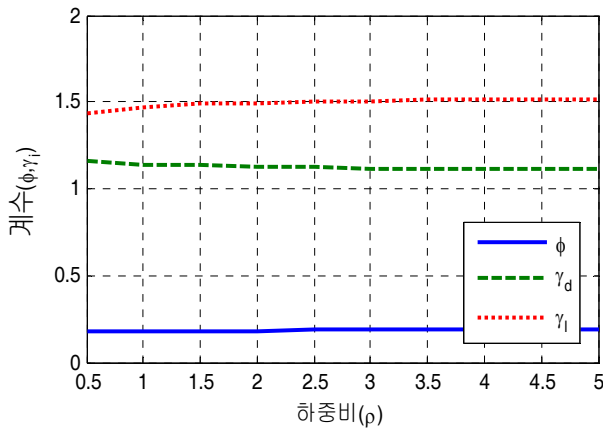


그림 5. 측방이동지수의 하중-저항계수

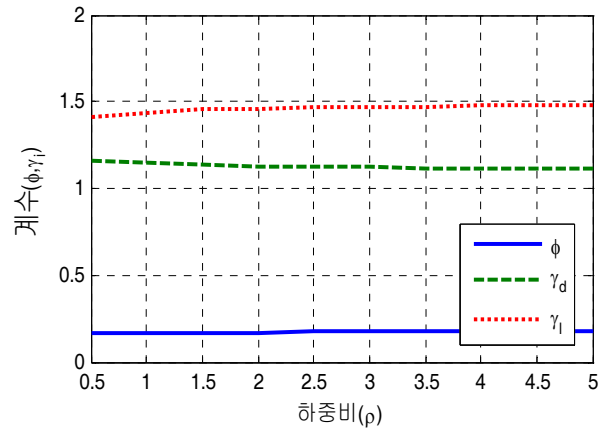


그림 6. 측방이동판정수의 하중-저항계수

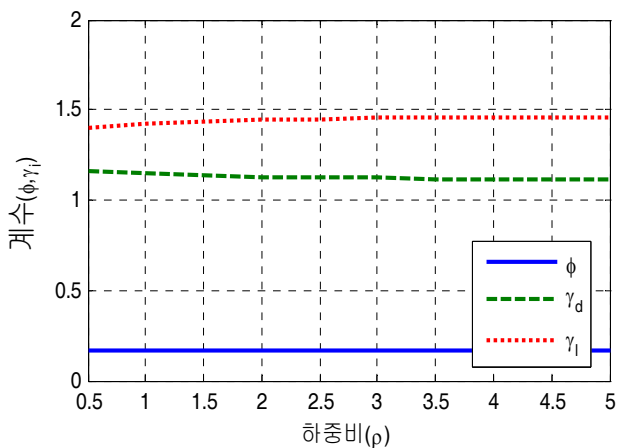


그림 7. 수정측방이동판정수의 하중-저항계수

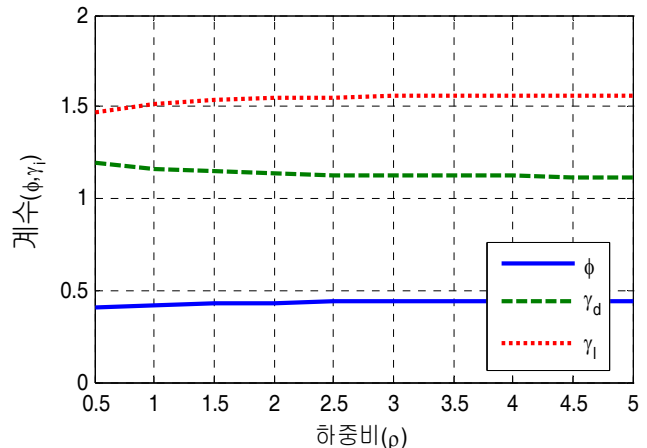


그림 8. 원호활동 안전율의 하중-저항계수

#### 4. 결론

본 연구에서는 연약지반에 설치된 교대구조물의 측방유동에 관한 확률론적 안정해석을 수행하였다. 측방유동 판정방법에 대한 불확실량 산정 및 한계상태 해석모델을 제안하여 신뢰성 해석을 수행하였으며 해석결과를 비교·분석하였다. 안정성과 경제적 중요도를 고려하기 위해 파괴계수와 하중비의 증가에 따른 최적신뢰성지수 및 최적안전율을 산정하였으며, 최적신뢰성 설계기준인 저항 및 하중계수를 산정하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 측방유동 판정방법인 측방이동지수, 측방이동판정수, 수정측방이동판정수 및 원호활동 안전율의 안정해석에 대하여 2차모멘트법과 점추정법 및 총기대비용 최소화법을 이용하여 신뢰성 해석을 수행한 결과, 각각의 신뢰성지수는 2.353~2.344, 3.115~3.053, 2.876~2.806, 2.071~1.724의 범위로 산정되었으며, 해석방법에 따른 신뢰성지수는 매우 유사한 것으로 나타났다. 특히, 확률변수에 대한 편미분이 불필요하고 평균과 표준편차만으로 신뢰성 해석을 수행할 수 있는 점추정법이 다른 방법보다 간편성 측면에서 실용적인 방법임을 확인할 수 있었다.

(2) 파괴계수와 하중비의 증가에 따른 최적신뢰성지수와 최적안전율을 분석하고, 신뢰성 설계기준인 하중계수와 저항계수를 산정하여 시공수준 및 안정성과 경제성을 종합적으로 고려할 수 있는 합리적인 신뢰성 설계모델을 제시하였다.

(3) 신뢰성 이론에 따른 측방유동 안정해석은 기존의 확정론적 방법에 의한 일률적인 안전율의 적용 방식과는 달리 파괴계수 및 하중비에 따라 구조물의 안정성과 경제성을 동시에 고려할 수 있는 합리적인 방법으로써, 향후 측방유동을 받는 구조물에 대한 광범위한 통계적 불확실량 데이터의 확충과 분석을 통해 보다 신뢰도 높은 안정해석 및 설계기준을 정립할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 건설교통부(2000), “측방유동을 받는 토류구조물의 안전진단기술개발 1차·2차년도 연구보고서”, 건설교통부, pp.12~19(1차), pp.125~130(2차).
2. 안중필·홍원표(1994), “측방유동을 받는 연약지반의 변형거동에 관한 연구”, 한국지반공학회지, 한국지반공학회, 제10권, 제2호, 6월.
3. 안중필·이증빈·박주원·김규덕·김성현(2007), “측방유동을 받는 교대말뚝기초의 신뢰성해석”, 2007년도 한국구조물진단학회 가을 학술발표대회 논문집, pp.317~324.
4. 안중필·이증빈·박상범·김규덕·김성현(2008), “측방유동을 받는 교대기초의 PEM 해석”, 2008년도 한국구조물진단학회 봄 학술발표대회 논문집, pp.145~151.
5. Chou. T.(1991), “Optimum Safety Indices Based on Expected Total Cost Minimization”, Journal of Structural Engineering(in Japanese), Vol, 37A, pp.543~555.
6. Frangopol, D. MEnright, M. P.(1999), “Reliability-based Condition Assessment of Deteriorating Concrete Bridges Considering Load Redistribution”, Structural Safe, Elsevier, 21(2), pp.159~195.
7. Kanda, J-Adachi, T.(2001), “Influence of Probability Distribution of Load on Optimum Reliability”, Reliability Engineering and System Safety, Elsevier 73, pp.197~204.