

# 심층 절리암반의 구조특성 규명을 위한 시추공 자료편향 보정법

## Corrections for Sampling biases of borehole data to characterize deep fractured rock mass

엄 정 기( Um, Jeong-Gi)

부경대학교 환경탐사공학과

### 요약

시추공에서 측정된 절리자료의 샘플링 편향오류를 보정하는 절차를 기술하였다. 시추공에서 절리의 방향이 관측될 수 있는 확률은 시추공에 대한 절리의 상대적인 방향 이외에도 절리의 크기, 절리의 모양 및 시추공의 반경 과 길이와 같은 요인에 의하여 결정될 수 있으며, 이러한 요인들에 의하여 나타날 수 있는 절리자료의 방향편향을 보정할 수 있는 방법론을 제시하였다. 유한 길이의 시추공으로부터 산정된 절리의 간격분포는 샘플링 영역인 시추공 길이의 영향에 의한 산정치의 오류를 내포하고 있으며, 이에 대한 보정법을 고찰하였다.

### 1. 서론

심층 지하암반은 대·소 불연속면과 이들 불연속면 사이에 위치하는 무결암으로 구성되어 있으며, 이러한 불연속암반에 존재하는 불연속면은 불연속암반의 수리·역학적 특성에 큰 영향을 미친다. 불연속암반에 분포하는 불연속면은 지질공학적 프로젝트의 규모에 따라 대규모 불연속면(major discontinuity)과 소규모 불연속면(minor discontinuity)으로 분류 할 수 있다. 단층, 시어대, 암맥 및 일정크기 이상의 대절리 등은 대규모 불연속면에 해당하며, 이들은 공학적 대상인 불연속암반에서 확정적 단수 또는 통계적 다수의 선 구조로 취급될 수 있다. 한편, 크기가 상대적으로 작은 소절리, 층리 및 엽리 등과 같이 기하학적으로 변이성 (variability)이 큰 소규모 불연속면의 특성은 통계적으로 해석 할 수 있다. 본 연구에서 다루는 불연속면은 변이성이라는 통계적 특성을 갖는 소규모 불연속면에 한정되며, 편의상 이와 같은 소규모 불연속면을 통틀어 “절리”라 명하기로 한다.

암반공학적 프로젝트를 수행하기 위하여 절리암반의 강도 및 변형 등의 역학적 특성과 REV 및 3차원적 수리전도도 등의 암반지하수 특성을 규명함에 있어서 대상 절리암반에 존재하는 절리에 대한 현실적인 3차원적 구조해석은 매우 중요하다. 이를 위하여 지표지질조사 및 터널내부 트레이스 맵핑을 통한 선형조사선(1D)이나 조사창(2D)에서 얻은 절리자료를 토대로 3차원 암반구조 특성을 통계적으로 구현하는 방법론이 제시되었다(Kulatilake et al., 1993, 1996).

하지만, 심층 절리암반에 대한 3차원 절리계의 구현은 현장특성상 대부분의 경우에 있어서 시추공자료에 의존해야 하며, 시추공에서 제공하는 절리의 기하학적 파라미터에 대한 자료는 지표에서 실시한 여러 방향의 선형조사선 및 조사창 조사자료에 비하여 매우 제한된 정보로서 샘플링 편향으로 인한 오류를 내포하고 있다. 본 연구는 기전의 선형조사선 과 조사창 조사로부터 수행된 절리의 기하학적 파라미터에 대한 연구결과를 응용하여 시추공에서 얻은 편향된 절리자료의 오류를 보정하는 절차를 제시하였다.

현장자료로서 스웨덴의 고준위 핵연료 폐기물 처분장을 위한 부지 연구의 일환으로 아스포섬에 설치된 시추공(trend=318.04, downward plunge=84.50)에서 선 캄브리아기 결정질 암석인 아스포섬록암이 연속적으로 분포하는 457.4-536.0m 심도범위로부터 얻어진 절리의 방향자료 및 간격자료를 사용하였다. 하지만 시추공에서 관측할 수 있는 자료특성상 절리군의 방향 및 간격편향을 보정하고 3차원 암반구조 특성을 구현하는데 필요한 절리길이에 대한 자료는 시추공으로부터 얻을 수 없다. 이와 같이 심층 절리암반에 대한 절리계 특성연구를 위해 사용되는 시추공자료는 양적 및 질적으로 제한적이다.

## 2. 방향편향 보정

시추공에서 관측된 절리방향자료에 대하여 절리군을 구분하기 위해서 Shanley and Mahtab(1976) 및 Mahtab and Yegulalp(1984)가 제시한 클러스터링 알고리즘을 적용하여 절리면 법선 벡터의 밀집점(dense points)을 확인하고 최적의 절리군수를 구분하는 판정함수(objective function)에 따라서 절리군을 구분할 수 있다. 하지만, 방향 변이성이 높은 실제 현장자료를 위와 같은 알고리즘에 적용하였을 때 수학적 판정함수로 절리군 개수를 구분하기에는 어려움이 많으며, 최적의 절리군 개수를 도출하기 위해서는 판정함수 이외에도 연구자의 적절한 지질공학적 판단이 필요하다. Fig. 1에 시추공 방향자료로부터 구분된 3개의 절리군이 도시되어 있다. 그림에서와 같이 3개의 절리군 공히 높은 변이성을 보이며 이는 부분적으로 방향분석을 위한 절리자료수의 부재에 기인한다고 사료된다. 각각의 절리군에 속하는 절리개수와 각각의 절리군 에서 산정된 절리면의 평균법선방향이 Table 1에 나타나 있다.

시추공에서 절리의 방향이 관측될 수 있는 확률은 다음과 같은 요인에 의하여 결정될 수 있다: (1) 시추공에 대한 절리의 상대적인 방향; (2) 절리의 크기; (3) 절리의 모양; 및 (4) 시추공의 반경 과 길이. 본 연구에서는 이러한 요인들에 의하여 나타날 수 있는 절리방향자료의 방향편향을 보정하기 위하여 각각의 절리군에 속하는 절리의 방향과 시추공의 방향 사이의 각도에 의해 파생되는 방향편향 효과만을 보정하는 기전의 방향편향보정법(Terzaghi, 1965) 이외에도 2D 조사창 조사에 의한 방향편향보정법(Kulatilake and Wu, 1984; Wathugala et al., 1990)에 기초한 이론을 응용하여 시추공상에 나타난 절리방향자료에 대한

방향편향 보정을 실시하였다. 본 연구에서는 절리를 원판형이라 가정하고 절리군 내의 각각의 원판형 절리가 시추공과 교차할 수 있는 통계적 확률을 고려하였으며, 이는 각각의 절리면과 시추공이 이루는 각도, 시추공의 직경과 길이 및 원판형 절리의 크기 등으로 인하여 발생할 수 있는 방향 편향효과를 고려한 것이다.

본 방향편향 보정을 실시함에 있어서, 절리가 시추공과 교차될 수 있는 확률을 고려하기 위한 전단계로 절리크기 모델링이 수행되어야 하지만, 선형조사선이나 조사창조사자료와 달리 시추공 절리자료는 절리의 연장분포와 3차원적 절리크기분포 모델에 필요한 절리연장에 대한 정보를 제공하지 않는다. 따라서, 절리연장분포에 대한 자료를 확보하기 위해서는 대상 암반에서의 터널내부 맵핑을 통하여, 또는 최소한 지표조사를 통한 절리연장에 대한 분석이 선행 되어야 한다. 본 연구에서는 연구지역에서 Hermanson et al.(1998)에 의해 보고된 절리트레이스와 크기에 대한 제한적 정보를 사용하여 연구지역에 분포하는 절리연장의 평균값

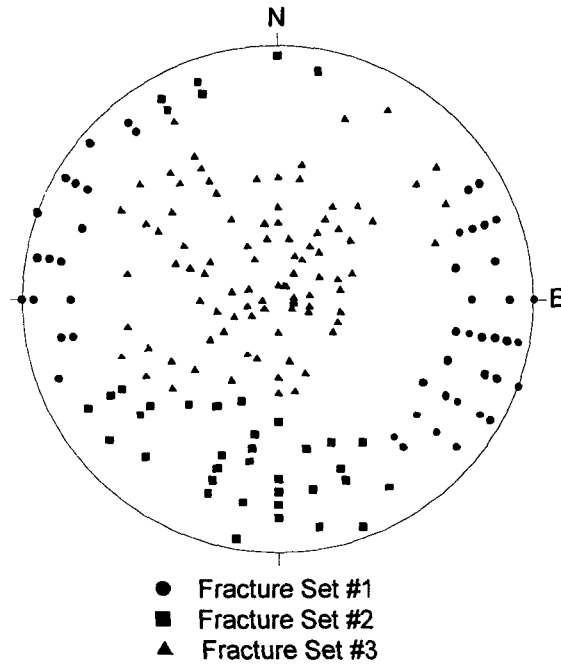


Fig. 1 Fracture set delineation results on an upper hemispherical polar equal area projection for Äspö diorite.

Table 1. Delineated fracture sets and goodness-of-fit results of Bingham distribution for orientation data.

Fracture Set	No. of Data	Mean Orientation		$\chi^2$ test P
		Dip Dir. (°)	Dip (°)	
1	50	101.51	81.30	0.007
2	52	187.11	63.58	0.038
3	108	331.79	12.69	0.228

Note: P=Maximum significance level at which Bingham distribution can be used to represent the statistical distribution of orientation of fracture set (a minimum of 0.05 is required to represent orientation data by a Bingham distribution)

(5m)과 표준편차(2.5m)를 산정하였다. 기전에 수행된 절리계 모델에 대한 현장적용(Kulatilake et al., 1993, 1996; Um et al., 2000)에서 2차원적 절리연장분포와 이에 의한 3차원적 원판절리의 크기분포를 추정함에 있어서 2차원적 절리연장분포로서 감마분포가 가장 적합함을 밝힌바 있다. 본 연구에서도 2차원적 절리연장분포를 추정함에 있어서 감마분포를 채택하였으며, 신뢰할만한 절리연장자료의 부재로 인하여 본 연구지역에서 결정된 3개의 절리군 공히 평균길이=5m와 변이계수(coefficient of variation, COV)=0.5의 감마분포를 사용하였다. 무한의 2차원 노출면에서 산정된 절리연장분포로부터 3차원적 원판형으로 가정된 절리크기분포를 도출하는 절차(Kulatilake and Wu, 1986)를 적용하여 본 연구지역에서 각각의 절리군에 대한 3차원적 원판절리의 크기분포를 산정 하였으며, 3개의 모든 절리군에 있어서 평균=5.26m와 표준편차=2.25m의 감마 분포가 절리의 직경분포로 적합하다고 판단되었다.

Fig 2 는 절리군1에 대한 방향편향보정 결과이다. 그림에서 방향편향 보정전과 보정후의 절리방향 특성은 상당한 차이를 보이며 이는 수직에 가까운 절리군1에 속하는 절리들과 수직에 가까운 시추공의 교차확률이 작은 이유에 기인한다. 각 절리군의 방향편향보정 전·후의 방향자료에 대하여 Fisher 분포의  $\chi^2$  적합성 검증(Kulatilake et al., 1990)을 실시하였다. 3개의 모든 절리군에 대하여 평균방향과 방향분포가 방향편향보정으로 인하여 변화하였음을 알 수 있다(Table 2, Fig. 3). 이는 시추공자료를 사용하여 절리군의 방향분포를 모델링함에 있어서 방향편향보정의 중요성을 시사하는 것이다. 또한 Table 2에 나타나 있는 방향분포 적합성검증 결과에서 본 연구지역의 3개의 절리군 공히 Fisher 분포모델이 통계적으로 적합하지 않음을 확인할 수 있다. 또한, 각 절리군의 방향자료에 대하여 Bingham분포(Bingham, 1964)의  $\chi^2$  적합성 검증이 실시되었다. Table 1에 나타난 결과는 방향성 자료의 분포모델로서 Bingham 분포가 절리군3에만 적합함을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 이론적 확률

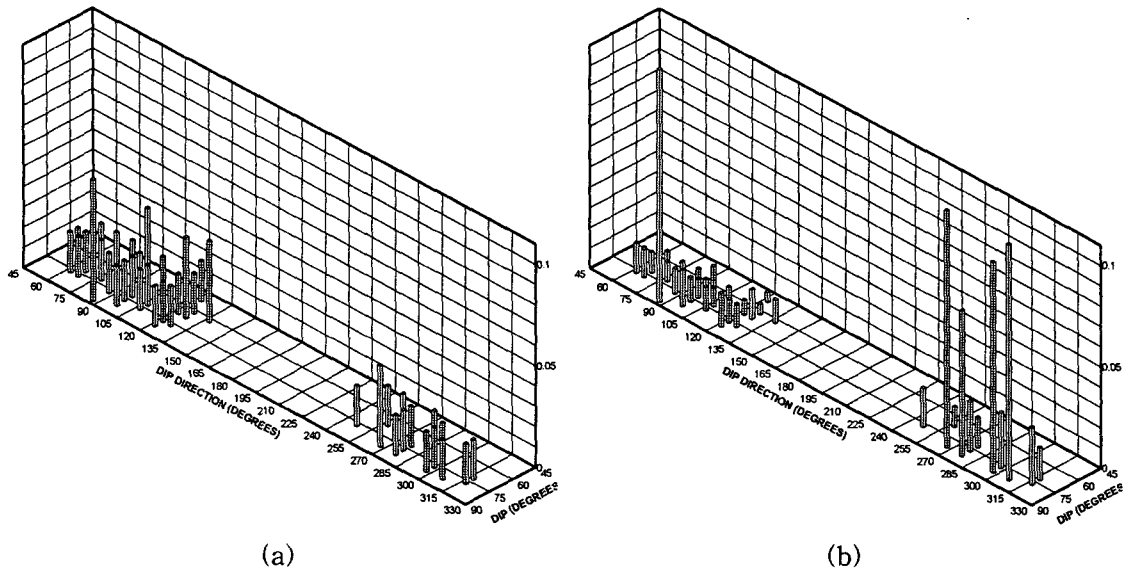


Fig. 2. Relative frequency of orientation for fracture set 1 of Äspö diorite;  
(a) observed and (b) corrected.

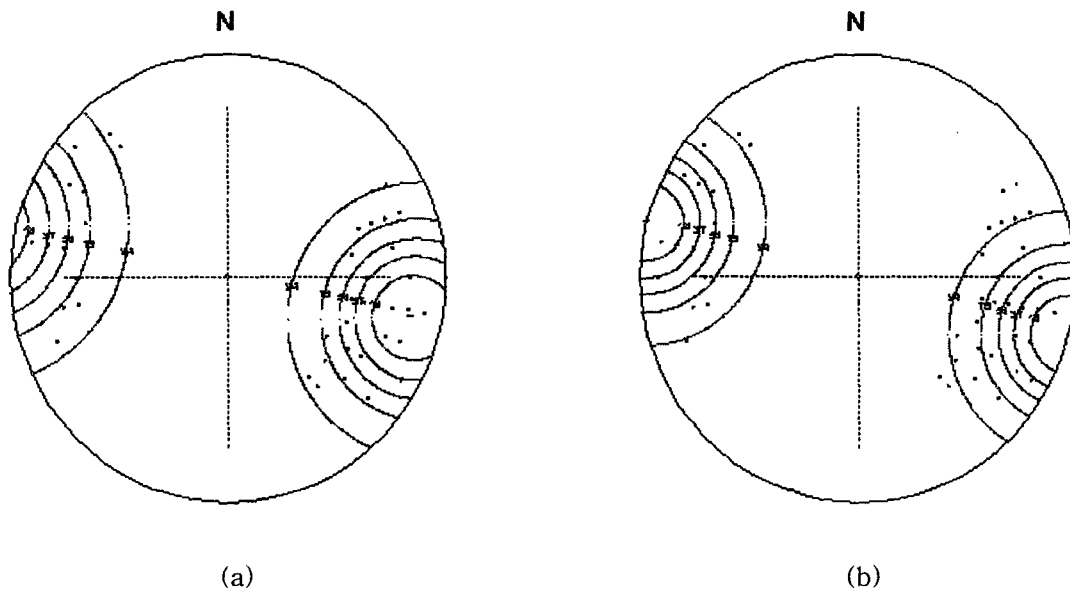


Fig. 3. Results of Fisher distribution fit for orientation data of fracture set 1  
of Äspö diorite; (a) observed fracture normals and  
(b) fracture normals corrected for sampling bias

Table 2. Goodness-of-fit results of Fisher distribution for orientation data.

Raw orientation data						
set #	No. of Data	Upward mean normal vector		K	Sp. Var.	$\chi^2$ test
		Trend (°)	Plunge (°)			P
1	50	101.63	8.68	9.04	0.1084	0.009
2	52	187.41	25.45	7.92	0.1238	0.047
3	108	8.01	60.91	2.48	0.3990	<0.005
Data corrected for sampling bias						
set #	No. of Data	Upward mean normal vector		K	Sp. Var.	$\chi^2$ test
		Trend (°)	Plunge (°)			P
1	50	284.55	0.16	11.86	0.0827	<0.005
2	52	182.74	11.01	7.47	0.1312	<0.005
3	108	6.05	54.48	2.47	0.4010	<0.005

Note: K=Fisher constant, Sp. Var.=Spherical variance, P=Maximum significance level at which the Fisher distribution is suitable to represent the statistical distribution of fracture orientation data(a minimum of 0.05 is required to represent orientation data by a Fisher distribution)

분포(Fisher 및 Bingham 분포)들이 연구지역에서 3개의 절리군중, 2개의 절리군에서 통계분포로서 충분하지 않음을 시사하며, 여러 연구자들에 의하여 기 수행된 방향분포에 대한 연구(Kulatilake et. al., 1993, 1996; Um et al., 2000)에서도 기전의 이론적 확률분포가 실제현장에서 방향자료의 통계분포로 충분하지 않음을 지적한 바 있다. 이와 같이 기전의 이론적 확률분포에 의해 표현될 수 없는 절리군에 대하여 방향편향 보정후 보정상대빈도를 적용하여 산정된 경험방향분포(empirical orientation distribution)를 사용할 수 있다.

### 3. 절리간격 보정

시추공에서 아스포섬록암이 분포하는 457.4-536.0m 심도구간에서 절리간격자료를 추출하였다. 각각의 절리군에 대하여 추출된 절리간격자료에 적합한 통계적 모델로 채택할 수 있는 확률분포를 찾는 동시에 사용 가능한 확률분포 중 최적의 확률분포를 추정하기 위하여 Kolmogorov - Smirnov 적합성 검증을 수행하였다. Table 3에 나타난 결과에서 3개의 절리군 모두에서 로그정규분포, 감마분포 및 음지수분포 공히 절리간격에 대한 확률분포로 매우 타당함을 알 수 있다. 2개의 절리군에서 로그정규분포가 가장 우수함을 보이고 있으며, 감마분포는 3개의 절리군 모두에서 2번째로 적합하다고 판정되었다. 또한 음지수분포는 1개의 절리군에서 가장 적합함을 보이고 있다.

일반적으로 절리의 간격분석에 있어서 유한 길이의 시추공으로부터 절리의 평균간격과 1-D 빈도수(linear frequency, 1/평균간격)를 산정한다. 이는 시추공상에서 샘플링 영역인 시

추공 길이의 영향에 의한 산정값의 오류를 내포하고 있으며, 이에 대한 보정이 이루어져야 한다. Table 4에 나타난 간격보정 결과에서 3개의 절리군 모두에 있어서 평균절리간격에 대한 관측치와 보정치 사이에 차이가 없는 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 본 연구에서 사용된 절리간격자료의 평균간격에 비하여 시추공 길이가 충분하여 샘플링 편향효과를 보정할 필요가 없음을 시사하는 것이다.

Table 3. Goodness-of-fit test results for spacing of the three fracture sets.

Fracture Set No.	No. of Data	Mean (m)	Var. (m <sup>2</sup> )	Probability Distribution	K-S stat.	K-S Test P
1	49	1.5904	5.7369	N. Exponential	0.0936	>0.2
				Gamma	0.0931	>0.2
				Log Normal	0.0356	>0.2
2	46	1.6174	3.0515	N. Exponential	0.1046	>0.2
				Gamma	0.0808	>0.2
				Log Normal	0.0627	>0.2
3	112	0.6946	0.9258	N. Exponential	0.0231	>0.2
				Gamma	0.0303	>0.2
				Log Normal	0.0345	>0.2

Note: A minimum P value of 0.05 is required to accept the tried probability distribution to represent the spacing distribution of the fracture set.

Table 4. Mean spacings and linear frequencies along the borehole and mean normal vector directions for fracture sets.

Fracture Set No.	Observed mean spacing along borehole (m)	Corrected mean spacing along borehole (m)	Angle between borehole and MNV (°)	Corrected mean spacing along MNV (m)
1	1.59	1.59	70.00	0.54
2	1.62	1.62	60.06	0.81
3	0.69	0.69	18.08	0.66

Note: Trend of borehole=318° , Downward plunge of borehole=85° , Length of borehole=78.6m, MNV=Mean Normal Vector of fracture set

#### 4. 결론

선형조사선 과 조사창조사로부터 수행된 절리의 기하학적 파라미터에 대한 연구결과를 응용하여 시추공에서 얻은 편향된 절리자료의 오류를 보정하는 절차를 기술하였다. 일반적으로 방향 변이성이 높은 실제 현장자료의 절리군을 구분하기 위하여 기전의 알고리즘을 적용하였을 때 최적의 절리군 개수를 도출하기에는 어려움이 많으며, 연구자의 적절한 지질공학적 판단이 필요하다. 시추공에서 절리의 방향성이 관측될 수 있는 확률은 시추공에 대한

절리의 상대적인 방향, 절리의 크기, 절리의 모양 및 시추공의 반경과 길이와 같은 요인에 의하여 결정될 수 있다. 이러한 복합적인 요인들에 의하여 나타날 수 있는 절리자료의 방향편향을 보정할 수 있는 방법론을 제시하고, 현장자료에 적용하여 시추공상에 나타난 절리 방향자료에 대한 방향편향 보정을 실시하였다. 기전의 이론적 확률분포가 방향자료의 확률분포로 충분하지 못하며, 이론적 확률분포가 채택될 수 없는 절리군에 대하여는 방향편향 보정후 보정상대빈도를 적용하여 경험방향분포를 채택할 수 있다. 각각의 절리군에 대한 절리간격자료에 적합한 확률분포로 로그정규분포, 감마분포 및 음지수분포 공히 매우 타당하였다. 유한 길이의 시추공으로부터 산정된 절리의 간격분포는 시추공 길이의 영향에 의한 산정치의 오류를 내포하고 있으며, 이에 대한 보정이 이루어져야 한다. 본 연구에서 사용된 절리간격자료의 평균간격에 비하여 샘플링 영역이 되는 시추공 길이가 충분하여 간격자료 보정을 실시한 결과 샘플링 편향효과를 보정할 필요가 없음을 확인하였다.

#### 참고문헌

- Bingham, C., 1964. Distributions on the sphere and on the projective plane: unpubl. Doctoral dissertation. Yale Univ. 93 p.
- Hermanson, J., Stigsson, M. and Wei, Lingli, 1998. A discrete fracture network model of the Äspö Zedex Tunnel section. A Technical Report submitted to Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Kulatilake, P.H.S.W. and Wu, T.H., 1984. Sampling bias on orientation of discontinuities. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 17, 243-254.
- Kulatilake, P. H.S.W. and Wu, T.H., 1986. Relation between discontinuity size and trace length. *Proc. of the 27th U.S. Symp. on Rock Mech.*, 130-133.
- Kulatilake, P.H.S.W., Wathugala, D.N. and Stephansson, O., 1993. Joint network modeling including a validation to an area in Stripa Mine, Sweden. *Int. Jour. of Rock Mech. & Mining Science*, 30, 503-526.
- Kulatilake, P.H.S.W., Wu, T.H. and Wathugala, D.N., 1990. Probabilistic modeling of joint orientation. *Int. Jour. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 14, 325-350.
- Kulatilake, P.H.S.W., Chen, J., Teng, J., Shufang, X., and Pan G., 1996. Discontinuity geometry characterization for the rock mass around a tunnel close to the permanent shiplock area of the Three Gorges dam site in China. *Int J Rock Mech and Min Sci.*, 33: 255-277.
- Mahtab, M.A. and Yegulalp, T.M., 1984. A similarity test for grouping orientation data



- in rock mechanics. Proc. of the 25th U.S. Symp. on Rock Mech., 495-502.
- Shanley, R. J. and Mahtab, M.A., 1976. Delineation and analysis of clusters in orientation data. *Mathematical Geology*, 8, 9-23.
- Terzaghi, R. 1965. Sources of error in joint surveys. *Geotechnique*, 15, 287-304.
- Um, J., Morin M., Kulatilake, P.H.S.W., 2000. Discontinuity characterization and laboratory investigations conducted for the rock around and below the stationary crusher area on the north side of Esperanza pit. Technical Report submitted to Phelps Dodge Sierrita Inc., Arizona.
- Wathugala, D.N., Kulatilake, P.H.S.W. and Wathugala, G.W., Stephansson, O.A., 1990. A general procedure to correct sampling bias on joint orientation using a vector approach. *Computer and Geotechnics*, 10, 1-31.

