

층리가 발달된 암반지역에서 회전식 시추기와 충격식 천공기에 의한 경사계 곡곡도 및 신뢰도에 관한 비교연구

(Reliability and Curvature of Inclinomometer installed in Rock Zone with well-developed Bedding plane using Rotary Boring Machine and Percussion Machine)

박 철숙¹⁾, Chul-Sook, Park

요약(Abstract)

암반사면의 안정성 분석시 사면의 거동유무를 파악하는 것은 반드시 요구된다. 사면하부에서의 암반거동이 예상될 경우 안정대책 수립을 위한 추정 활동면을 확인하는 것이 매우 중요하다. 경사계는 시공이 용이하고 비교적 정확한 자료획득이 가능하기 때문에 일반적으로 안정대책의 기초자료를 얻고자 시공된다. 암반지역에서 경사계 설치를 위한 천공작업시 충격식 천공기를 사용함이 보편적이거나 보령댐 좌안사면과 같이 퇴적암의 층리가 발달된 암반지역에서는 회전식 시추기를 사용하여 경사계를 설치, 계측함이 높은 신뢰도와 낮은 곡곡도를 얻을수 있는 것으로 밝혀졌다.

Rock Slope Stability Analysis requires to understand the movement of slope, when the slope movement is expected in the lower part of slope. In that case rock slope stabilization can be made based on assumptions of the sliding plane under slope.

Inclinometers are used often for their easy installation and reliable information in relation to slope stability, and they are usually installed using the percussion drilling machine. However in rock zone consist of well-developed sedimentary bedding planes such as Poryong Dam Leftside Slope, its reliability was known to be very low. Therefore instead of percussion drilling machine the use of rotary boring machine is recommended. It was known that installation of inclinometer by a rotary boring machine may have lesser curvature and provide high confidence in the measured values.

주요어(Key Words)

예상활동면(Postulated Sliding Plane), 충격식 천공기(Percussion Drilling Machine), 회전식 시추기(Rotary Boring Machine), 경사계(Inclinometer), 곡곡도(Curvature), 신뢰도(Reliability)

1. 서론

본 연구는 보령댐 좌안사면 안정성 분석을 위해 사면 하부에서의 암반거동을 확인하고자 층

1) 한국수자원공사 보령댐수도건설사업단 공사부 대리

(Action Sub-Sec. Chief, Construction Sec., Poryong Dam & Water Supply Construction Office, KOWACO)

격식 천공기와 회전식 시추기로 천공 작업한 후 경사계를 설치, 계측한 자료의 신뢰도를 검증하고자 설치단면도, 단면도의 변화등 획득자료의 비교, 분석을 수행하였다.

자료의 비교, 분석결과 회전식 시추기에 비하여 충격식 천공기로 천공한 경사계의 설치단면 공극도가 심하고 이로 인해 계측자료중 오차범위가 매우 큰 사실을 인지하였다. 이는 보령댐 좌안사면과 같이 퇴적암의 층리가 발달된 암반지역에서는 사면하부 거동을 살펴보고자 경사계를 설치할 경우에 사면안정성 분석에 요구되는 양호한 자료획득, 분석작업의 수행을 위해서는 충격식 천공기 보다는 회전식 시추기로 천공작업이 요구됨을 알 수 있다.

2. 경사계 시공

2.1. 설치목적

경사계는 일반적으로 하부거동이 없는 암반 또는 견고한 기초지반을 지지점으로하여 상부의 지층, 토층에서의 지중변위와 변형에 대한 수평적인 거동을 측정하기 위한 계측기기로 기타 계측기에 비하여 시공 및 계측, 분석이 용이하고 경제적이다.

보령댐 좌안사면에서는 사면의 거동이 발생하는 심도를 추정하여 사면안정대책 수립에 반영하고자 거동의 가능성이 없다고 판단한 퇴적변성암류 암반을 지지점으로하여 설치하였다.

2.2. 설치방법

2.2.1. 설치순서

현장의 여건에 따라 천공 및 그라우팅 방법이 다소 차이가 있을 수 있으나 통상적으로 다음과 같은 순서로 설치한다.

- 1) 설치하고자하는 위치에서 지름 100mm 내외로 목적심도까지 충격식 천공기 또는 회전식 시추기로 천공한다.
- 2) 천공을 완료한후 케이싱 한쪽끝을 보호마개(End Cap)로 씌우고 리벳건을 사용하여 리벳팅한다.
- 3) 케이싱을 카플링으로 리벳팅하여 조립하고 테이프로 sealing한다.
- 4) 굴착공 내부로 조립한 케이싱을 연결하면서 하부까지 삽입한다.
- 5) 삽입 완료된 케이싱은 상부보호마개(Top Cap)로 막고 설정된 측정방향으로 케이싱 홈을 맞춘다.
- 6) 케이싱과 굴착공 사이는 케이싱이 고정될때까지 반복하여 Cement Grouting을 실시한다.

2.2.2. 경사계 설치상의 주의할점

- 1) Grouting을 하는 도중에 측정방향과 케이싱의 홈방향이 변경되지 않도록 유의하여야 한다.
- 2) 설치도중 지하수에 의한 부력이 발생하면 케이싱내로 정수를 부어넣어 부력을 제거한다.

2.3. 구성품목 사양

2.3.1. Sensor

Sensor는 Guide wheel로 Casing 내부에서 수평으로 지지되고 연결 Cable에 의해 수직으로 매달려 Borehole에 설치된 Casing내에 삽입된다. Guide 바퀴는 계측시 방향을 제어하기 위해 Casing의 원주 내부에서 동일한 간격으로 형성된 4개의 세로방향의 홈에 의해 인도된다.

Sensor는 Casing의 수직축으로 부터 경사각에 비례하여 전기적신호를 보내는 90° 로 분리된 민감한 진자가 부착된 축을 가지고 작동되는 두개의 서브 가속도계로 구성되어 있다.

2.3.2. Digital indicator

Digital indicator는 휴대할 수 있는 기기로 indicator는 6 volt배터리로 재충전과 전기적 제어 그리고 digital로 data 출력이 가능하다.

2.3.3. 전기 Cable

Cable은 네오프론 피복과 구리도선 그리고 6개의 고립된 다중선으로 구성되며 외경은 10.7mm로 방수처리된 Connector에 의해 Sensor에 부착되어 있다. Cable은 매달려 있을때 길이 변화를 최소화시키기 위해 도선과 철심 그리고 피복사이를 일치시키는 외경 1.6mm의 꼬여진 철심이 있다. 네오프론 색깔표시는 0.5m 간격은 노란색으로, 1m 간격은 붉은색으로 표시되어 있으며 각 0.5m 마다 Sensor 바퀴사이의 중간지점의 거리를 가르킨다.

2.3.4. Casing

Casing은 수직으로 천공한 Hole내에 설치되며 재질은 ABS Resin 계열로 indicator가 삽입 되도록 원주내부의 동일한 거리에 4개의 수직홈을 가진다.

Casing의 크기는 3m 길이로 외경 85 × 내경 75 mm
외경 70 × 내경 60 mm
외경 48 × 내경 38 mm의 종류가 있다.

2.4. 계측기기의 특성

2.4.1. 측정범위

측정할수 있는 경사계의 표준범위는 연직으로부터 $\pm 53^\circ$ 이다.

2.4.2. 예민도

측정할 수 있는 경사각 변화 최소치는 약 8" 이다.

2.4.3. 정확도

30m Hole 상부의 변형측정에서 전체 오차는 센서와 digital indicator 그리고 Slope indicator casing에서 누적된 오차를 허용할지라도 $\pm 7.5\text{mm}$ 를 초과해서는 안된다.

2.4.4. digital 전압계

전압은 4-digit 화면에 나타나고 전압의 기본정확도는 한자리수에 대한 기록치는 $\pm 0.2\%$ 이다.

2.4.5. 작동온도

indicator의 작동온도 : $-23^{\circ} \sim 49^{\circ}\text{C}$

sensor의 작동온도 : $-18^{\circ} \sim 49^{\circ}\text{C}$

indicator의 온도상수 : $\pm(0.015\% \text{ Reading} + 0.001\% \text{ F.S.}) / ^{\circ}\text{C}$

sensor의 온도상수 : $\pm(0.005\% \text{ Reading} + 0.005\% \text{ F.S.}) / ^{\circ}\text{C}$

2.5. 측정원리 및 측정방법

2.5.1. 측정원리

경사계 Sensor(그림 1.)내에 내장된 서브가속도계는 경사계 파이프에 설치된 홈을 따라 움직이면서 측정하고자하는 지점에서 중력방향으로의 복원이되는 90도 각도를 가진 2개의 진자에 의해 연직방향과 이루는 사이각(θ)을 측정한다.

측정된 사이각(θ)과 Sensor가 부착된 Guider Wheel은 일정하기 때문에 변이량은 $\text{displacement} = L \times \sin \theta$ 로 정의된다.

연속된 경사계 내부에서 전체 변이량은 최상부에서의 변이량으로 표현된다.

2.5.2. 측정방법

- 1) 케이싱에 Pulley assembly를 부착한다.
- 2) 센서와 케이블 그리고 indicator를 연결한다.
- 3) 케이싱 안에 센서를 삽입한다. (A+측 방향이 되도록 수평변형을 최대로 일으키는 방향으로 항상 같은 방위 방향의 경로를 탈수 있도록 센서 바퀴의 방향을 맞춘다.)
- 4) Pulley 바퀴를 집어넣어 센서를 케이싱 바닥까지 내리며, 이때 기기가 충격을 받지 않도록 주의한다.
- 5) 스위치를 작동시키고 센서를 끌어 올리는 것에 의해 0.5m간격으로 A와 B 계측치를 야장지에 기록한다..
- 6) 센서를 표면까지 끌어올려 계측한후 센서를 180° 회전시켜 같은 홈안으로 다시 삽입한다.
- 7) 센서가 바닥에 닿지 않을 만큼의 하부 계측심도까지 센서를 내리고 0.5m 간격으로 A측의 판독값을 되풀이 하여 기록한다.

2.6. Data 처리

2.6.1. Data reading

Digital Indicator을 이용하여 계측할 경우에 Data 출력은 4-1/2 Digit back-lighted liquid crystal display(LCD)에 4자리 숫자로 나타나는데 Data는 변형시키기 전에 먼저 $2.5\text{sine } \theta \times 10^4$ 또는 $K \times \text{sine } \theta$ 로 기록되어진다. 여기서 K는 계측기상수로 25,000이다. θ 는 A와 B sensor 방향에서 Guide casing의 경사각으로 분해승은 $\pm 53^\circ$ 에 대해 20000 등분한 것 중에서 하나이다.

거의 직각($\pm 3^\circ$)으로 Casing을 설치하였을 경우 정확도는 30m당 $\pm 6\text{mm}$ 이하로 예를 들어, 1° 의 경사에서($\text{sine } 1^\circ = 0.0175$) 판독값은 $2.5 \times 0.0175 = 0.0436$ 이다.

2.6.2. Data 정리

측정된 Data는 다음의 과정을 거쳐 처리된다.

1) Difference

어떤 깊이에서 측정된 두 방향의 판독값 평균은 첫번째 판독값과 두번째 값의 대수학적인 차이를 계산하여 처리된다. 처리된 값은 표 1.에서 보여주는 것처럼 각각 "A"와 "B" 판독값의 오른쪽의 "DIFF" 칸에 쓴다.

표 1. Field Data Sheet Example(Initial Measurement).

INCLINOMETER DATA SHEET										
204					OBSERVATION WELL NO ; SHEET OF					
INITIAL DATA SET										
DATA : 81-7-1		INSTR :		READ :		CALC :		CHKD :		
DEPTH	DIFF Initial	A		DIFF	CHANGE	DIFF Initial	B		DIFF	CHANGE
		A+	A-				B+	B-		
1.0		-57	+59(+2)	-116			-57	+58(+1)	-115	
1.5		-63	+62(-1)	-125			-57	+59(+2)	-116	
2.0		-63	+61(-2)	-124			-60	+59(-1)	-119	
2.5		-51	+49(-2)	-100			-36	+35(-1)	-71	
CHECK SUMS										

표 1.에서 "diff" 항목에 대수학적 차이를 보면 A성분 판독값에서 대수학적 차이를 얻기 위해서는 왼쪽에서 오른쪽 항목을 빼는 $\text{DIFF}(A) = [\text{RDG}(A+) - \text{RDG}(A-)]$ 가 되어야 한다.

2) CHANGES

digital 경사계의 주요목적은 원 위치에서 케이싱의 경사 변화를 조사하는 것으로 첫단계는 각

깊이에 대한 두 Data값 사이의 대수학적 차이에서의 변화를 계산하는 것으로 일단 초기값이 계산되었으면 초기 Difference는 현장야장지의 왼쪽 여백에 기입된다.

초기 Difference 와 현재 Difference 사이의 변화는 오른쪽 “CHANGE” 항목에 기록된다. 이러한 방법이 경사변화의 양과 위치를 결정하는 현장에서 사용하는 방법이다. (표 2)

표 2. Field Data Sheet Example(Initial Measurement).

INCLINOMETER DATA SHEET										
204						OBSERVATION WELL NO ; SHEET OF				
INITIAL DATA SET										
DATA : 81-7-3			INSTR :		READ :		CALC :		CHKD :	
DEPTH	DIFF Initial	A		DIFF	CHANGE	DIFF Initial	B		DIFF	CHANGE
		A+	A-				B+	B-		
1.0	-116	-53	+54(+1)	-107	+9	-115	-57	+58(+1)	-115	0
1.5	-125	-60	+61(+1)	-121	+4	-116	-56	+57(+1)	-113	+3
2.0	-124	-59	+57(-2)	-116	+8	-119	-58	+59(+1)	-117	+2
2.5	-100	-50	+49(-1)	-99	+1	-71	-30	+31(+1)	-71	0
CHECK SUMS										

“Change” = Current “Difference” - Initial “Difference”로 그림 1.에서 보여지는 경우처럼 전단지역의 위치와 확인을 위해 사용되어 진다.

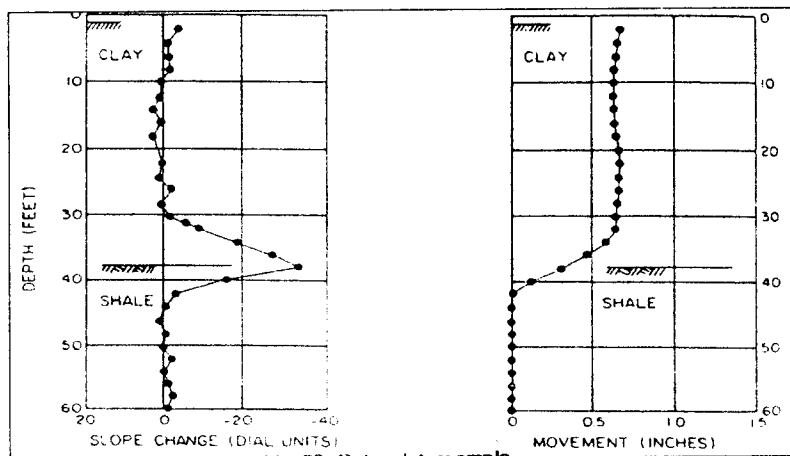


그림 1. Data plot example.

3) DEFLECTIONS

Change는 변위 또는 증가된 변형으로 변환되며 수학적 관계는 표 3과 같다.

표 3. Data summary sheet example.

Sinco Slope Indicator Company Seattle Washington U.S.A					
DEPTH	INITIAL	DATE : 81-7-3 INST : K = 20,000 C = 0.01			
	81-7-1	DIFF	CHANGE	Σ CHANGE	DEFL(mm)
1.0	-116	-107	+9	+33	0.33
1.5	-125	-121	+4	+24	0.24
2.0	-124	-116	+8	+20	0.20
2.5	-100	-99	+1	+12	0.12

앞에서 언급한 바와같이 소숫점은 무시되었을때 한 기록치는 다음처럼 표시된다.

Reading = RDG = $2.5 \sin \theta \times 10^4$ 그러므로 대수학적 차이는 다음과 같이 표현된다.

Difference = DIFF = $5 \sin \theta \times 10^4$ 마찬가지로 Change는 다음과 같다.

Change = $5 \sin \theta c \times 10^4$

그러므로 $\sin \theta c = \frac{\text{CHANGE}}{50,000}$

여기서 θc 는 계측된 깊이 증가에 대해 각의 변화를 나타낸다.

깊이 증가는 보통 센서의 게이지 길이(L)와 동일하다.

$L = 0.5 \text{ m} = 500 \text{ mm}$

깊이 증가에 따라 밀리미터에서 변위는 다음처럼 삼각함수법으로 표현된다.

증가한 변형 = $L \sin \theta c$

그러므로 $L \times \frac{\text{CHANGE}}{50,000}$

$L = 500\text{mm}$ 라 놓을 때 증가한 변형(Deflection) = $0.01 \times \text{CHANGE}(\text{mm})$

“change” 또는 증가한 변형은 합계내어지고 케이싱의 모든 변형을 결정하기 위해 바닥으로부터 누적 되어진다. 케이싱의 초기위치로부터 구조물의 거동이나 수평적인 이동에 의한 케이싱의 변형은 일반적으로 안정적인 기반물에 설치된 케이싱의 바닥에 기준을 둔다.

Data summary sheet는 “change”와 deflection을 계산하고 계속적인 data 값에 대해 야장지로부터 전환하거나 각 센서측에 대해 summary sheet에 바로 기입된다.

Summary sheet 상에서 “Initial”항목은 계측된 다음 경사계의 변화에 대한 기준이 되는 초기 data이다. 이 항목의 오른쪽은 각 4개의 항목이 있고 이들 항목은 정기적인 계측 data와 계산값이다. 각 야장지로부터 “Difference”는 vy 3에서 보여지는 것처럼 각 4 항목의 왼쪽란에 기입된다. 선택적으로 두 판독값의 Difference 평균은 초기계측이 Initial 아래 두번째 항목에 기입됨으로써 얻어진다.

다음 Difference는 표 3에서 보여지는 것처럼 경사의 “Change”를 결정하기 위해 초기 “Difference”와 비교되어 진다.

0.5m 간격으로 기록할 때 케이싱의 상부에서 변형은 초기 판독값에 기준이 된다.

$$\text{Deflection(mm)} = 0.01 \times \text{Sum of change}$$

어떤 중간 깊이에서 변형은 그 깊이에서 Sum of charge를 사용하는 방법으로 결정된다. Deflection(DEFLL)은 표 3.에서 보여진다.

4) 변화할 수 있는 깊이 간격

비록 센서사이의 거리와 동일한 0.5M깊이 간격이 대부분 공통적으로 사용되어질지라도 다른 깊이 간격이 이용될 수 있다.

예를 들어 제한된 지역을 더 정확하게 정의하기 위해 전단지역에서 더 좁은 간격을 사용하는 것이 유용하고 data계산과 시간을 절약하기 위해 매우 깊은 Hole에서는 더 넓은 간격(약 2m)을 사용하는 것이 더 실질적일 것이다. 이러한 결정은 모든 타당한 요소가 고려되어야만 할 수 있을 것이다.

만약 깊이 간격이 0.5m와 다르다면 앞에 주어진 계산은 다음과 같이된다.

$$\begin{aligned} \text{Incremental Deflection(mm)} &= L \sin \theta \\ &= L \times \text{change} / (5 \times 10^4) \\ &= L/5 \times 10^{-4} \times \text{change} \end{aligned}$$

수평거동에 대해 Deflection(mm)=L/5 x 10⁻⁴ x sum of change이며 여기서 L은 밀리미터로 깊이 간격이다.

3. 천공에 따른 비교분석

3.1. 경사계 설치

경사계는 암반사면의 거동을 확인하고자 거동이 없는 변성암까지 천공 작업하여 설치하였으며 설치심도 및 천공에 사용된 장비는 표 4와 같다.

표 4. 경사계 설치심도 및 장비.

공 번	표 고 (M)	경사계 설치심도 (M)	천공 장비	초기값 측정일
B - 1	78.63	44.5	회전식 시추기	'97. 1. 22
B - 4	98.69	56.5	충격식 천공기	'97. 1. 22

3.2. 분석방법

경사계 설치후 계측(1회/1일)을 실시하였으나 2개소의 계측 Data를 비교한 결과 암반의 거동이 없을 것으로 예상되는 1개소 지점에서의 누적변위량이 큰 것으로 계측되었다.

변이량에 대한 원인분석을 하기위해서 다음의 방법을 시도하였다.

3.2.1. 계측기기의 고장여부

계측기기 자체의 문제점 여부를 살펴보고자 2개의 계측기기로 동일한 경사계에서 계측을 수행하였으나 차이가 없었다.

3.2.2. 경사계 설치단면 검토

계측결과가 차이가 나는 2개소는 동일한 암반에 시공되었으며 단지 천공에 사용된 장비만 차이가 있었다. 천공장비의 차이가 계측에 미치는 영향을 알아보기로 초기 계측치의 Raw Data를 상술한 바와 같은 방법으로 설치단면도를 작성하였다. (그림 2,3)

3.3. 분석결과

3.3.1. 경사계 설치단면 검토

분석을 시행하기 전에는 경사계가 수직도를 유지하고 있을 것으로 생각하였으나, 초기 측정값의 각 심도별 누적 변위량을 이용하여 경사계 설치 단면도를 작성한 결과 경사계의 설치 형태가 당초 예상한 대로 연직으로 설치되어 있지않고 B-4번공의 경우 사면방향으로 최대 13m의 편차를 가지며 최하단부에서는 수직과 약 26도의 경사를 가지면서 설치되어 있음을 확인하였다. (그림 2,3)

이는 장비의 진입이 곤란하였던 B-1번공은 시추기로 기존의 시추공을 확공하였기에 비교적 양호한 수직도를 유지하고 있는 반면에 B-4번공은 경사계 설치를 위한 천공작업시 크롤러 드릴에 의한 충격식 천공으로 작업이 진행되어 암반의 약대를 따라서 천공이 진행되는 공극현상으로 인한 것으로 판단되었다.

3.3.2. 경사계 설치 단면의 Angle 검토

경사계설치 단면도상에서는 전체적인 형상을 나타냈으며, 50Cm의 간격으로 경사계의 각도가 어떻게 변화는지를 초기치와 분석 최종일자('97.03.11)의 Angle 변화를 세부적으로 비교하였다.

경사계는 B-1번공은 수직도가 매우 양호하나, B-2, 3, 4번공은 매우 심한 공극현상이 발생하였음을 확인했고 또한 Angle의 변화 역시 최대 0.14°를 나타냈지만 0.14°의 차이에 의한 변위량은 약 1.2mm로 미약하다.

대부분의 구간에서 0.05° 내의 각도 변화가 계산되었으며 이는 변위량이 매우 작으므로 사면의 직접적인 거동이 지속되는 것으로 판단하기는 곤란하다.

3.3.3. 경사계 측정 Raw data 검토

경사계 자료를 다각도로 검토하였으나 경사계 선행이 수직도를 상실한점 외에는 변위가 크게 진행되는 징후를 발견할 수 없었다. 경사계 기록치는 하단부에서 부터 상단부까지 연속적인 누적변위량을 나타내는 것으로 A축 방향의 변위량을 계산하기 위해서는 A 0(+)방향의 측정값과 A 180(-)방향의 측정치 오차가 0.1 mm이내일때 신뢰성이 있는 것으로 볼 수 있다.

현재 측정된 값을 보면 초기치의 측정시 상부에서는 비교적 양호한 편차를 보이나, 하부에서는 편차가 증가한다.

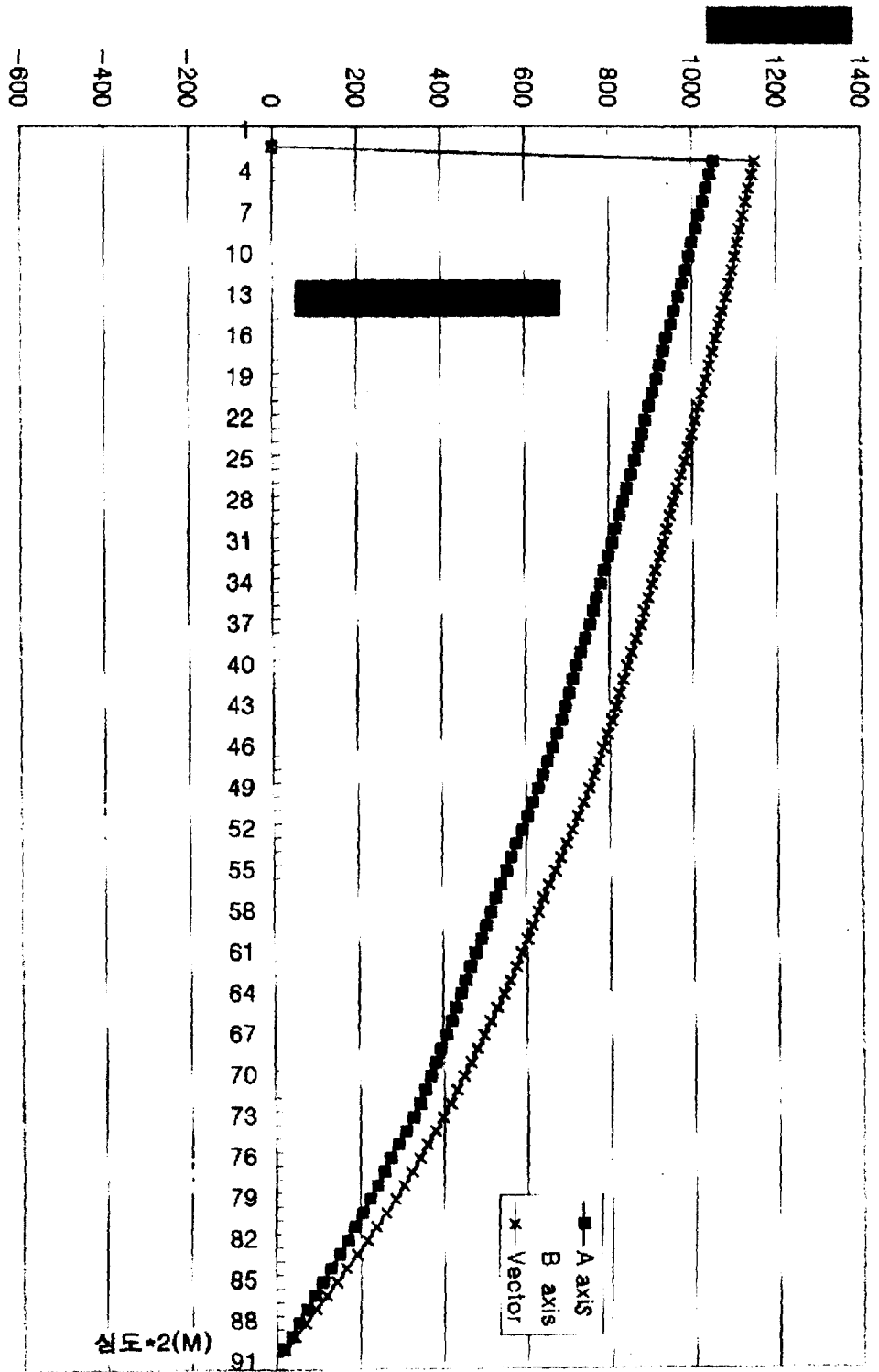


그림 2. 경사계 설치단면도(B-1).

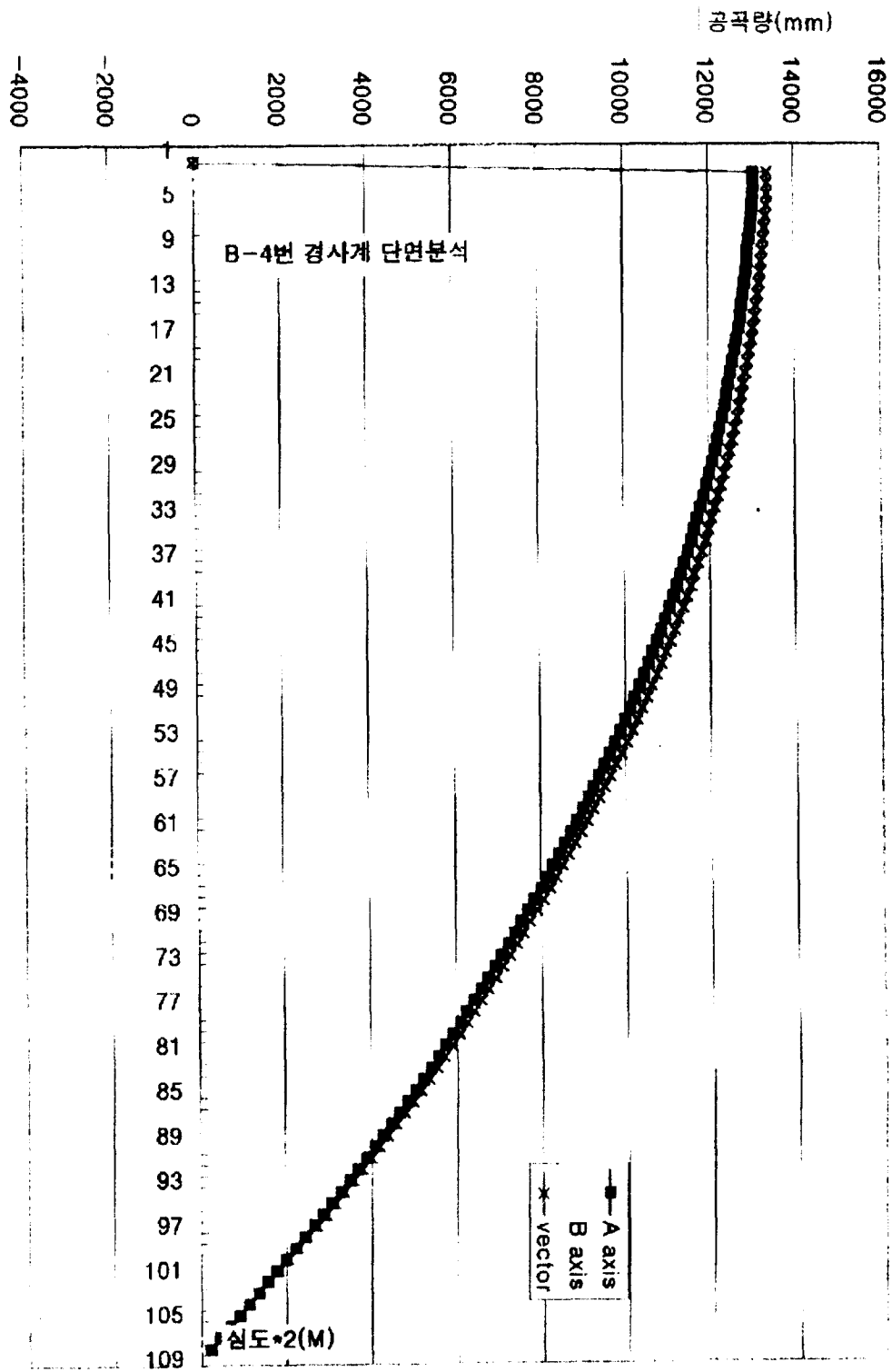


그림 3. 경사계 설치단면도(B-4).

초기치와의 비교시점인 분석 최종일(97.03.11)의 경우에는 상,하부모두 큰 편차를 기록하고 있다. 각 공별 초기값과 분석최종일의 A, B축의 누적편차는 다음의 표 5와 같다.

표 5. 경사계 기록치의 편차비교 및 최대변위량.

구 분	B - 1		B - 4	
	A 방향	B 방향	A 방향	B 방향
초기값	21.86	17.97	26.09	23.83
최종값	76.68	44.75	74.02	71.79
(초기값 - 최종값)/2	27.41	13.39	23.97	23.98
최대 변위량	-8.07	-5.55	-42.05	-31.38
변위폭	-0.79	+4.08	+1.65	+16.46
최종일 변위량	7.28	9.63	43.70	47.84
비 고	-4.36	+3.18	-17.59	-31.68
비 고				

위 표 5에서 보는바와 같이 누적편차가 상당히 높은 수치를 보여주고 초기측정(97.01.22)에 서부터 분석 최종일까지의 변위량중 각 방향별 이들 변위량이 나타내는 변동폭은 누적편차량 에 비하여 적은 수치를 보여준다.

그리고 최종일의 변위량은 동일한 일자의 누적변위량에 비하여 매우 적은 수치를 보여주고 있음을 알 수 있다.

B-1번공의 경우 변위폭이 10mm 미만으로 거의 변화가 없는 안정된 상태로 보아도 별 문제 점이 없을 것으로 추정되나, B-4번공의 경우 누적편차량 차이와 변위량이 거의 일치하는데 이 는 경사계의 선형이 매우 심한 경사를 이루고 있기 때문으로 추정된다.

4. 결론

본 연구를 통하여 밝혀진 내용은 다음과 같다.

- 1) 층리가 발달된 지역에서 천공작업을 수행할시 회전식 시추기가 충격식 천공기에 비하여 양호한 공곡도를 유지한다.
- 2) 경사계 설치후 초기계측치의 Raw Data을 이용한 설치단면도 분석은 반드시 요구된다.
- 3) 경사계 계측치를 안정성 분석에 반영하고자 경사계 계측치를 이용하여 사면 내 활동면을 추정할 경우에는 회수된 Core의 시추주상도와 Cross Check 하는 것이 필요하다.

참고문헌

1. (주) 삼안건설 기술공사, 1997, 보령댐 좌안사면 안정대책 검토보고서, 129p.
2. 박철숙, 1998, 구조·에너지 지질학 분과위 14차 심포지움 및 학술답사, 대한지질학회, p23-245.
3. (주) 신평건설탄트, 1995, 보령댐 계측기기.