

통계적 방법을 이용한 DCM설계정수 결정을 위한 제안

Suggestion for Determination of DCM Design Parameter Based on the Statistical Method

정경환¹⁾, Gyeong-Hwan Jeong, 신민식²⁾, Min-Shik Shin, 한경태³⁾, Gyeong-Tae Han, 이정화⁴⁾, Jung-Hwa Lee, 김재환⁵⁾, Jae-Hwan Kim

1) (주)동아지질 대표이사, C.E.O / Ph.D, Dong-A Geological Engineering Co., Ltd

2) (주)동아지질 설계부 부장, General Manager, Engineering Dept., Dong-A Geological Eng. Co., Ltd

3) (주)동아지질 설계부 차장, Deputy General Manager, Engineering Dept., Dong-A Geological Eng. Co., Ltd

4) (주)동아지질 지반공학부 과장, Manager, Engineering Dept., Dong-A Geological Eng. Co., Ltd

5) (주)동아지질 설계부 대리, Assistant Manager, Engineering Dept., Dong-A Geological Eng. Co., Ltd

SYNOPSIS : The quality control for DCM is based on the unconfined compressive strength of laboratory treated soils, the cement contents, setting and checking the strength of in-situ treated soils. Also the strength of in-situ is checked mainly by the core boring. In case of large size construction, it might be considered the distribution of DCM strength data as normal distribution, so it might be employed a statistical method to evaluate DCM strength easily. In Japan, it has been established correlation between the strength of laboratory treated soils, the strength of in-suit treated soil and the design strength. Also It has been employed domestically the correlation suggested by Japan. But the correlation, so called λ (ratio in the strength of laboratory treated soils and the in-suit) and γ (ratio in the strength of in-suit and the design strength), might be far different with the domestic due to different DCM system and soil properties. so it might be restrictive to use domestically. Therefore in this paper, It is presented correlation between the strength of laboratory treated soils and in-suit treated soil to be employed domestically by evaluating λ based on the domestic in-suit illustrations.

Key words : DCM, laboratory treated soils, in-suit treated soils, empirical ratio, correlation(λ , γ)

1. 서론

DCM 개량체의 품질관리는 실내배합시험에 의한 안정처리도의 실내배합강도 결과와 안정재 첨가량 설정 및 원위치강도 설정과 확인을 통해 이루어지며, 원위치강도는 주로 확인조사인 코아보링에 의해 결정된다. 대규모 개량공사에서 확인조사에 의한 강도시험 개수를 비교적 많이 확보할 수 있는 경우에는 개량체의 강도분포가 정규분포에 가까우므로, 통계적 방법으로 개량체 강도를 평가하기 용이하다. 일본에서는 과거 자료를 통해 통계적 방법을 이용하여 설계기준강도와 현장강도, 실내강도와와의 관계를 설정하였고, 국내에서는 이들 관계를 적용하고 있는 실정이다. 그러나, 지금까지의 국내 적용사례를 보면 일본에서 제시된 이들의 관계 즉, 실내배합강도와 현장강도와의 비(λ)와 현장강도와 설계기준강도와의 비(γ)는 상이한 일본 DCM 시스템 및 토질특성으로 인해 국내에 적용하는 것에 어느 정도 한계가 있는 것으로 판단된다. 따라서, 국내 실정에 적합한 계수를 설정하는 것이 필요하며, 본 논문에서는 국내현장에서 제시된 DCM 자료를 토대로 실내배합강도와 현장강도와의 비(λ)를 재평가함으로써 국내에 적합한 현장강도, 실내강도에 대한 관계식을 제시하고자 한다.

2. DCM 품질관리

2.1 DCM 품질관리방법

DCM공법에서의 품질관리는 개량체가 소정의 품질을 만족하는지 여부를 확인하는 것으로서, 시공 중에 실시되는 시공관리와는 구별된다. 개량체의 품질은 일축압축강도(q_{ul})로 평가되는 경우가 많다. 표 1은 해상 DCM에 대한 개량체 품질을 일축압축강도(q_{ul})로 평가한 경우의 기본적인 고찰 및 설계에 이용되는 허용압축응력도(f_{ca}), 설계기준강도(q_{uck}), 현장강도(q_{uf}), 실내강도(q_{ul})와의 관계를 나타낸다.

표 1 실내배합강도, 현장강도, 설계기준강도의 관계(연안개발 기술센터, 2000)-해상

실내배합강도	현장강도	설계기준강도
$\overline{q_{ul}}$	$\overline{q_{uf}} = \lambda \times \overline{q_{ul}}$ $\lambda = 1$	$q_{uck} = \gamma \times \overline{q_{uf}}$ $\gamma = 2/3$
허용압축강도	허용전단강도	허용인장강도
$f_{ca} = a \times \beta \times q_{uck} \times \frac{1}{F_s}$ $a \cdot \beta = 0.8$ $F_s = 3(\text{평상시})$ $= 2(\text{지진시})$	$V_a = \frac{f_{ca}}{2}$	$f_{ta} = 0.15 \times f_{ca}$

여기에서, f_{ca} : 허용압축응력도 (kgf/cm²)

F : 안전율

a : 단면유효계수

β : 개량말뚝간의 겹침에 대한 신뢰도계수

γ : 안정처리토의 분산을 나타내는 계수

λ : 현장강도와 실내강도와의 비

$\overline{q_{ul}}$: 실내배합시험에 의한 일축압축강도의 평균치 (kgf/cm²)

$\overline{q_{uf}}$: 현장강도에서의 일축압축강도의 평균치 (kgf/cm²)

q_{uck} : 설계기준강도 (kgf/cm²)

품질관리는 그림 1에 나타난 것처럼, 실내배합시험에 의한 안정처리토의 실내강도 설계와 안정재 첨가량 설정 및 원위치강도 설정과 확인이 주 목적이 된다.

원위치강도는 주로 확인조사(코아보링)에 의해 결정한다. 대규모 개량공사와 같이 확인조사에 의한 강도시험 개수를 비교적 많이 확보할 수 있는 경우에는 개량체 강도분포가 정규분포에 가깝다고 보고, 통계적 방법에 의해 개량체 강도를 평가한다. 그림 2에 통계적방법을 이용한 경우의 설계기준강도와 현장강도, 실내강도와의 관계를 나타내고, 그림 3의 K는 계수로서 목표로 하는 안정처리토의 설계기준강도 q_{uck} 에 대해 얼마만큼의 불량발생율을 허용하는가의 지표가 되는 계수이다.

단, 이 방법으로 데이터를 정리하는 경우, 통계분석이 가능할 정도의 데이터를 확보해야 필요조건이 될 수 있으므로 주의를 요한다.

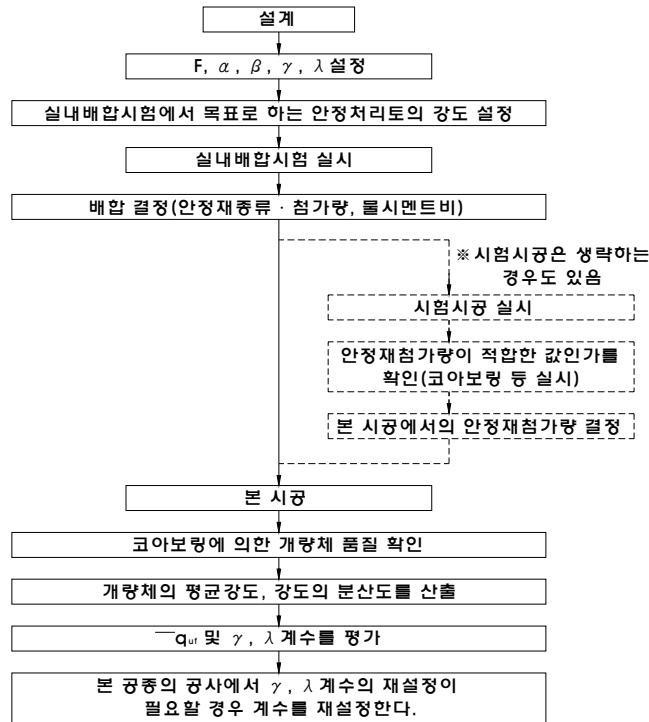


그림 1. 품질관리 흐름도(연안개발기술연구센터, 2000)

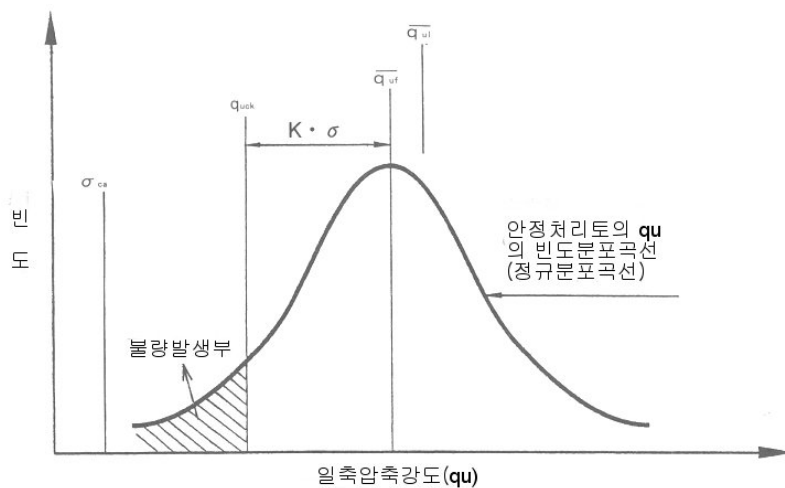


그림 2. 허용압축응력도, 설계기준강도와 원위치강도, 실내강도와의 관계 (연안개발기술연구센터, 2000)

- 여기에서,
- f_{ca} : 허용압축응력도 (kgf/cm²)
 - q_{uck} : 설계기준강도 (kgf/cm²)
 - K : 계수
 - σ : 현장강도의 표준편차 (kgf/cm²)
 - $\overline{q_{uf}}$: 코아보링 일축압축강도의 평균치 (kgf/cm²)
 - $\overline{q_{ul}}$: 실내배합에 의한 안정처리토의 일축압축강도 평균치 (kgf/cm²)

통계적방법을 이용하여 품질관리를 실시하는 경우, 안정처리토의 현장강도가 정규분포한다고 가정하면, 현장강도와 설계기준강도에는 다음관계가 성립되어야 한다.

$$q_{uck} \leq \overline{q_{uf}} - K \cdot \sigma \quad (\text{식 1})$$

즉, 안정치리토의 현장강도의 평균치는 (식 1)을 만족하도록 관리한다. (식 1)에서 불량발생율과 계수 K에는 표 2와 같은 관계가 있다.

$$\overline{q_{uf}} > q_{uck} + K \cdot \sigma \quad (\text{식 2})$$

해상공사에서 DCM공법의 K는 K=1.0을 표준으로 하는 경우가 많다.

표 2. 계수 K와 불량발생율과의 관계

계수 K	0.5	1.0	1.645	2.0	3.0
불량발생율 (%)	30.9	15.9	5.0	2.3	0.13

그림 2에 K는 평균에서 얼마만큼의 표준편차 σ 만큼 떨어진 위치에 있는지를 나타내는 계수로써 데이터 X가 표준편차의 K만큼 떨어진 범위 내에 존재할 확률은 그림 3과 같다. K=1.0일 경우의 확률은 그림 3과 같이 68.3%가 된다. 따라서 우리가 원하는 값은 (식 1)에 나타난 값 이상으로 나타나야 하므로 불량 발생율은 $(1-0.683)/2 \approx 0.159$ 가 된다.

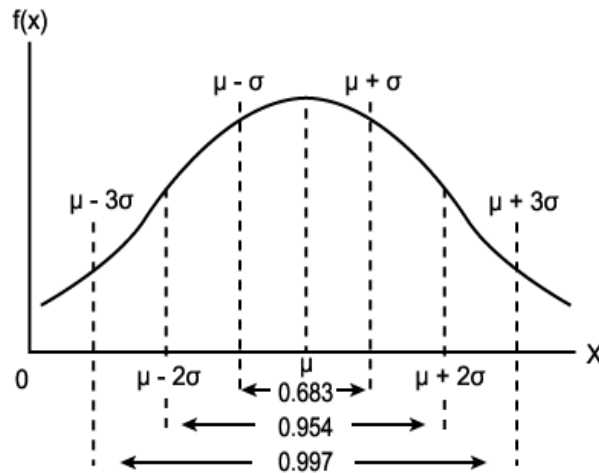


그림 3. 데이터 X가 표준편차 σ 의 k배 만큼 떨어진 범위에 속할 확률

(식 1)에서 $q_{uck} = \overline{q_{uf}} - K \cdot \sigma$ 가 되며 $q_{uck} = \gamma \cdot \overline{q_{uf}}$ 를 이용하여 γ 를 구하면

$$\overline{q_{uf}} - K \cdot \sigma = \gamma \cdot \overline{q_{uf}} \quad \text{이므로,}$$

$\therefore \gamma = 1 - K \frac{\sigma}{\overline{q_{uf}}}$ 가 되며 일본에서는 2/3값을 표준으로 하고, γ 값이 2/3가 되는 $\frac{\sigma}{\overline{q_{uf}}}$ 는 최소 1/3이

되어야 하므로 최대 1/3으로 하면 k와 γ 와의 관계는 표 3와 같다.

표 3. K와 γ 와의 관계

계수 K	0.5	1.0	1.645	2.0	3.0
불량발생율 (%)	30.9	15.9	5.0	2.3	0.13
계수 γ	0.833	2/3	0.452	1/3	0.0

K=1.0일 경우의 γ 에 대한 특징은 표 4에 나타내었다. $\gamma = 1 - K \frac{\sigma}{\overline{q_{uf}}}$ 에서 γ 가 1.0에 근접할수록

q_{uf} 는 '0'이 될 수 없으므로 표준편차 σ 가 '0'에 근접해진다. 또한, 반대로 γ 가 '0'에 근접 할수록 표준 편차 σ 는 현장강도 평균인 $\overline{q_{uf}}$ 에 근접하게 된다. 즉, 분산이 크면 γ 는 '0'에 가까워지고 분산이 작으면 γ 는 '1'에 근접하게 된다.

표 4. K=1.0일 경우의 γ 의 특징

구분	경우1	경우2
γ	'0'	'1'
분산정도	평균=표준편차	분산='0'
	분산이 큼	분산이 작음

2.2 확인조사 (코아보링)

안정처리토의 확인조사는 일반적으로 각 재령에 맞는 코아보링에 의한 공시체의 연속성을 확인함과 동시에 일축압축시험에 의한 안정처리토 강도도 확인한다. 안정처리토의 품질은 원칙적으로 일축압축강도로 평가하며, 강도는 재령 28일을 목표로 하는 경우가 많지만, 상부공의 시공시기등을 고려하여 장기 재령(60일이나 91일)에서 강도확인을 실시하는 경우도 있다.

필요에 따라서 삼축압축시험이나 안정처리토의 인장강도를 확인하기 위해 할열시험 등을 실시할 수도 있으며, 개량체가 겹치는 부위의 강도-접합성 확인을 위해 경사방향조사나 대구경조사를 실시하는 경우도 있다. 또한, 안정처리토의 연속성에 대해서는 채취한 코아의 직접관찰에 의한, 코아채취율이나 RQD로 평가하는 경우도 있으며 공내 검층(Borehole Camera, Bips)에 의한 방법도 있다.(정경환외, 2006).

3. 시공사례를 통한 설계정수 제안

3.1 현장강도와 실내강도와의 비

현장(해상)별 실내배합시험을 통한 실내강도와 현장에서 시험시공 및 본 시공을 완료한 후 확인조사인 코아보링을 통한 현장강도에 대한 결과를 표 5에 나타내었으며, 자료의 신뢰도를 높이기 위해 분산이 너무 커서 분석결과에 나쁜 영향을 주는 자료는 제외하였다.

설계정수 λ 에 대해 각 현장별로 분석한 결과 $\lambda=0.29\sim 0.85$ (평균 0.67)의 범위를 나타내며 거가대교 현장을 제외한 평균값은 $\lambda=0.72$ 를 얻었다(그림 5참조). 즉, 거가대교 현장의 경우 $\lambda=0.29$ 로 타 현장에 비해 낮은 λ 를 나타내며, 이것은 타 현장보다 적은 시멘트량과 낮은 개량율, 수심이 깊은 조건 즉, 시멘트량 $175\text{kg}/\text{m}^3$, 개량율 32%, 52%, 개량체 상단 수심 38.675~49.757m의 조건 및 코아보링시 파랑과 깊은 수심에 의한 조류등의 영향으로 타 현장보다 정도가 낮은 코아보링에 의해 현장강도와 실내배합 강도와의 차이가 많이 발생된 것으로 판단된다.

현장 강도와 실내강도의 비는 그림 4. 그림 5에 나타난 것처럼 일본 매뉴얼에서 제시된 $\lambda=1.0$ 과는 다소 차이가 나며, 이것은 일본의 DCM 시스템 및 토질 조건이 국내에서의 DCM 시스템 및 토질 조건의 차이에 의해 기인된 것으로 판단된다.

각 현장별 정규분포 곡선은 그림 6~그림 11에 나타내었으며 현장강도 평균값 $\overline{q_{uf}}$ 는 실내배합강도 평균값인 $\overline{q_{uf}}$ 와는 다르게 나타나 일본에서 제시된 $\lambda=1.0$ 과는 차이가 나타난다. 그림 6~그림 11에서 점선은 현장의 일축압축 강도를 실선은 실내배합시험의 일축압축강도를 나타낸다.

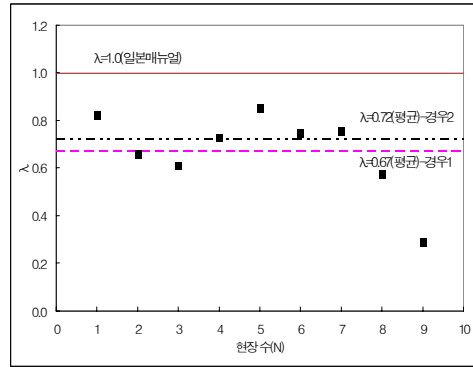
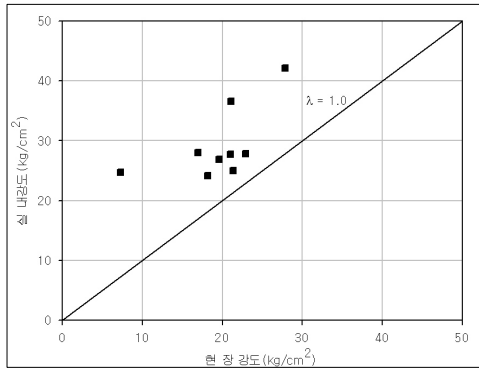


그림 4. 현장강도와 실내배합강도와의 비교 그림 5. 일본매뉴얼과 국내의 λ 비교

표 5. 국내 현장별 실내강도 및 현장강도(해상)

번호	현장명	토질	시멘트량 (kg/m ³)	실내강도 $\overline{q_{ul}}$ (kgf/cm ²)			현장강도 $\overline{q_{uf}}$ (kgf/cm ²)			시방서 $\overline{q_{uf}}$	λ	
				평균	표준편차	변동계수	평균	표준편차	변동계수		경우1	경우2
1	감만부두(1998)	점성토	300	25.00	6.47	0.26	21.32	4.24	0.20	15.0	0.85	0.85
2	나로도(2000)		330	26.90	6.58	0.24	19.56	3.44	0.18	15.0	0.73	0.73
3	여수항(2001)		330	27.97	5.51	0.20	17.16	2.12	0.12	15.0	0.61	0.61
4	신전대(2001)		300	27.83	10.87	0.39	22.90	5.08	0.22	15.0	0.82	0.82
5	영도하수처리장(2002)	실트	300	24.18	9.10	0.38	18.15	3.85	0.21	15.0	0.75	0.75
6	울산신항 남방과제(2005)	점성토	300	42.15	6.27	0.15	27.85	11.11	0.40	15.0~20.0	0.66	0.66
7	군장 신항만(2007)	점성토	200	27.72	3.87	0.14	21.00	7.03	0.33	16.0	0.76	0.76
		사질토	200	36.54	13.64	0.37	21.05	6.03	0.29		0.58	0.58
8	거가대교(2007)	점성토	175	24.73	3.12	0.13	7.22	2.73	0.38	6.6~11.0	0.29	-
평균	-	-	-	-	-	-	-	-	0.26	λ ≒ 0.5	0.67	0.72

※ 경우 1 : 전 현장, 경우 2 : 거가대교 제외

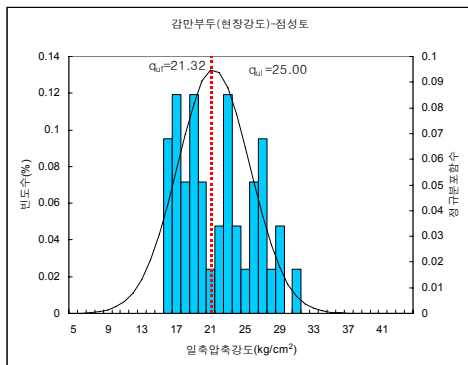


그림 6. 감만부두(점성토)

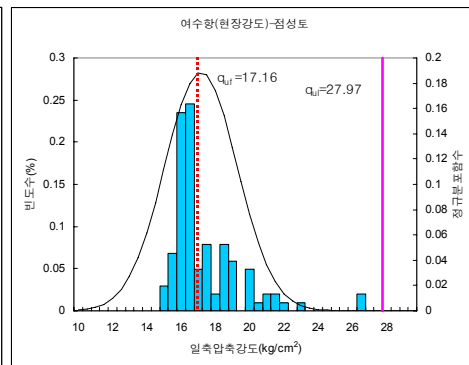


그림 7. 여수항(점성토)

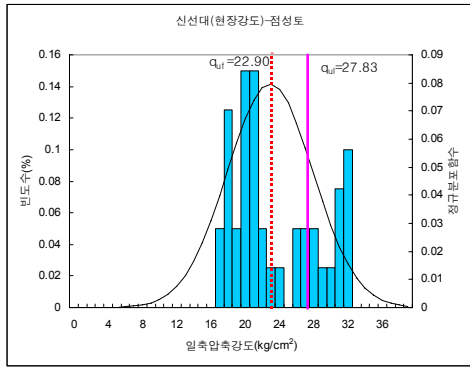


그림 8. 신선대(점성토)

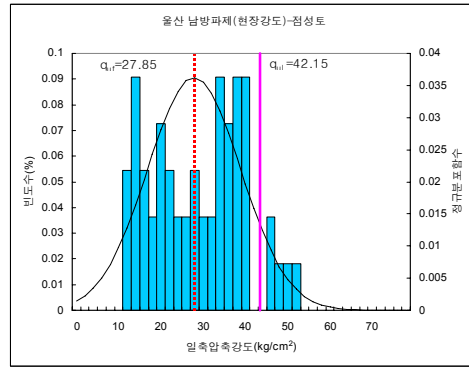


그림 9. 울산 남방과제(점성토)

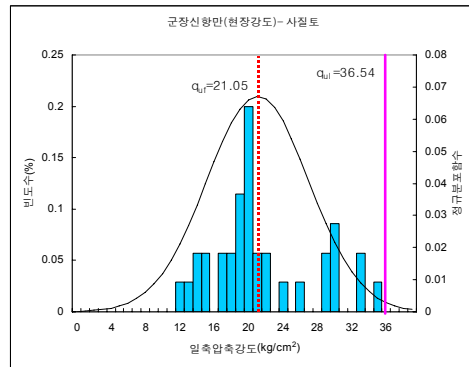
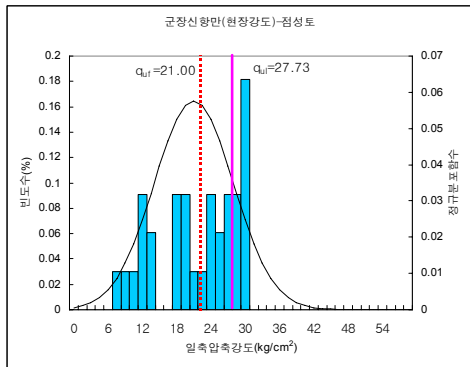


그림 10. 군장 신항만(점성토) 및 군장 신항만(사질토)

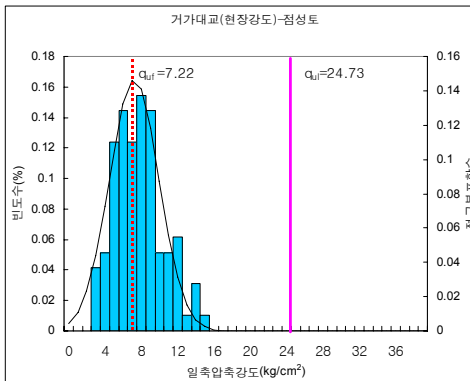


그림 11. 거가대교(점성토)

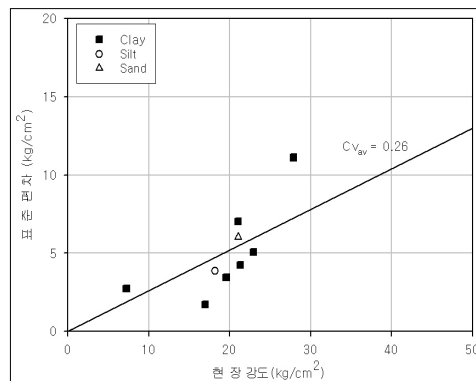


그림 12. 현장강도 q_{uf} 의 변동계수

현장강도에 대한 변동계수 분포는 그림 12에 나타내었으며, 범위는 0.12~0.40(평균 0.26)으로 분포한다.

토질별 및 시멘트 첨가량 별 λ 의 분포는 그림 13과 그림 14에 나타내었다. 그림 13에서는 점성토에 대한 λ 는 평균 0.68으로 나타났으며, 그 외 사질토 및 실트와 같은 지층에 대해서는 자료가 축적이 필요하다. 또한, 그림 14에서 시멘트 300~330kg/m³에서의 λ 에 대한 분산도가 시멘트 175, 200kg/m³ 보다 작으며 분산도를 작게 하기 위해서는 설계단계에서 적합한 시멘트량의 설정이 필요하고 그에 상응하는 품질 관리가 필요하다고 판단된다.

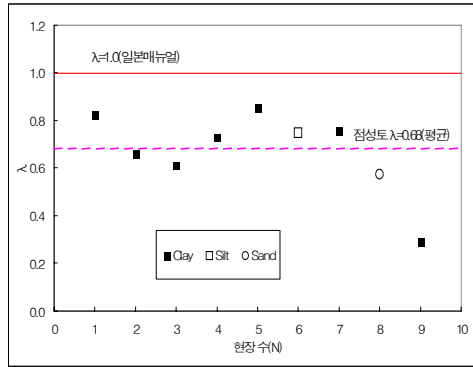


그림 13. 토질별 λ 분포

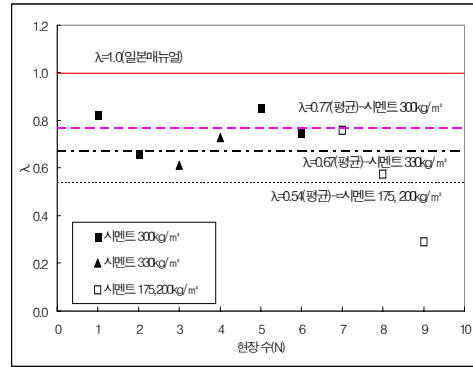


그림 14. 시멘트 첨가량별 λ 분포

3.2 설계정수 제안

국내 DCM 설계 및 시공을 위한 실내배합강도 및 현장강도와의 관계는 표 6 에 나타내었다. 일본에서의 실내배합시험과 현장강도와의 비는 대형장비를 기준으로 해상에서는 $\lambda=1.0$ 을 기준으로 하고 있지만 실제 국내 현장에 대한 자료를 분석하면, 3.1절에 제시된 $\lambda=2/3$ 에 근접한 값을 나타낸다. 통상 국내에서의 DCM설계는 일본 매뉴얼에 제시된 설계정수를 따르고 있으며 실제 현장에서 제시하는 품질관리에 대한 기준은 현장에서 코아보링을 통한 현장 확인강도로 설정하고 있는 즉, 시방서에서 제시된 $\overline{q_{uf}}$ 를 기준으로 코아보링을 한 후에 획득된 현장 확인강도의 평균값이 시방서에서 제시된 $\overline{q_{uf}}$ 를 동일 내지는 상회 하도록 관리하고 있다. 따라서, 현장에서 실제 적용된 $\overline{q_{uf}}$ 는 일본에서 제시된 강도보다 작게 평가되므로 설계상에서도 일본에서 제시된 $\lambda=1.0$ 이 아닌 합리적인 현장강도 $\overline{q_{uf}}$ 을 통해 허용압축강도를 산정하는 것이 바람직할 것이다.

일본의 경우 실제 현장(육상+ 해상)에서 적용된 데이터를 통해 λ 에 대한 평가한 한 예를 그림 15, 그림 16에 나타내었는데 1.0으로 평가하기에는 문제가 있는 것으로 나타나며 다만, 최근에는 $\lambda=1.0$ 내외의 자료도 보고되고 있으므로 이에 대한 끊임없는 기술축적과 노력이 필요할 것으로 본다.

표 6. 국내에 실정에 적합한 설계정수 제안(해상)

실내배합강도		현장강도		설계기준강도		
$\overline{q_{ul}}$		$\overline{q_{uf}} = \lambda \times q_{ul}$		$q_{uck} = \gamma \times \overline{q_{uf}}$		
		일본	국내	일본	국내	
		$\lambda = 1.0$	$\lambda = 2/3$	$\gamma = 2/3$	미적용	
허용압축강도		허용전단강도		허용인장강도		
일본	$f_{ca} = \frac{1}{F_s} \alpha \times \beta \times q_{uck}$	$v_a = \frac{f_{ca}}{2}$		$f_{ta} = 0.15 \times f_{ca}$		
국내	$f_{ca} = \frac{1}{F_s} \alpha \times \beta \times \overline{q_{uf}}$					
$\alpha \cdot \beta$	안전율 F_s					
	평상시					지진시
0.8	3	2				

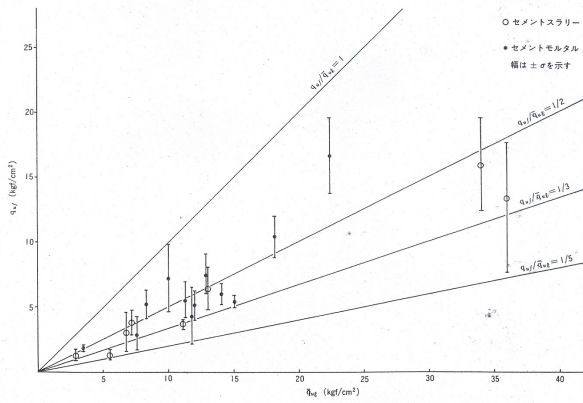


그림 15 일본의 λ 에 대한 평가(CDM 연구회, 1993)

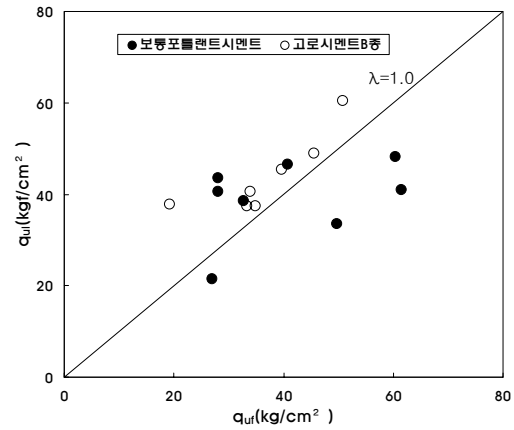


그림 16 일본의 λ 에 대한 평가(연안 개발기술 연구센터 2000)

4. 제안 및 향후과제

국내현장에서 제시된 해상 DCM 자료를 토대로 실내배합강도와 현장강도와의 비(λ)를 평가하여 실내강도, 현장강도와의 관계를 조사한 결과 및 향후과제는 다음과 같다.

1. 설계정수 λ 에 대해 각 현장별로 분석한 결과 $\lambda=0.29\sim0.85$ (평균 2/3)의 범위를 나타내었다. 일본 매뉴얼에서 제시된 $\lambda=1.0$ 과는 다소 차이가 나며 이것은 일본의 DCM 시스템 및 토질 조건등이 국내에서의 DCM시스템 및 토질 조건 등과는 상이한 것으로 인해 발생된 것으로 사료된다.
2. 일본에서 제시된 $\lambda=1.0$ 보다는 국내 실정에 맞는 $\lambda=2/3$ 을 적용하는 것이 타당하다고 보므로, 다음과 같은 내용을 제안한다.

실내배합강도	현장강도	
$\overline{q_{ul}}$	$\overline{q_{uf}} = \lambda \times \overline{q_{ul}}, \lambda = 2/3$	
허용압축강도	허용전단강도	허용인장강도
$f_{ca} = \alpha \times \beta \times \overline{q_{uf}} \times \frac{1}{F_s}$ $\alpha \cdot \beta = 0.8$ $F_s = 3(\text{정상시})$ $= 2(\text{지진시})$	$v_a = \frac{f_{ca}}{2}$	$f_{ta} = 0.15 \times f_{ca}$

3. 본 논문에서 제시된 현장별 자료를 통해 설계정수를 산정하였으나 보다 양질의 데이터를 산출하기 위해서는 많은 자료를 축적해야 하겠다.
4. 코아보링을 한 후에 획득된 현장 확인강도의 분포는 정규분포(그림 6~그림11)를 따르기 때문에 시방에서 제시된 현장강도 평균값 $\overline{q_{uf}}$ 을 상회 하거나 하회하는 결과가 나올 수 있다. 따라서, 현장 확인 강도 평균값 $\overline{q_{uf}}$ 가 시방서에서 제시된 현장 강도 평균 값 $\overline{q_{uf}}$ 를 동일 내지는 상회 하도록 관리하는 것이 타당하다.

참고문헌

1. 사단법인 연안개발 기술연구 센터(2000) : “해상공사에서의 심층처리혼합 공법의 기술 매뉴얼”
2. CDM 연구회(1993) : “DCM(Deep Cement Mixing) 설계와 시공 매뉴얼”
3. Osamu MATSUO(2002) “Determination of Design Parameters for Deep Mixing”, **Tokyo Workshop 2002 Deep Mixing**
4. 정경환, 김용환, 신민식, 한경태, 김태효(2006), “DCM(심층혼합처리공법)에 의한 자립식 흙막이 적용사례”
한국지반공학회 2004년 학술발표회 논문집
5. 통계학의 이해 2nd, 법문사