

PBD 공법 시공사례를 통한 교훈 및 개선안 제안

Lesson and proposal of revised equations from the PBD method application case for soft clay improvement

유한구¹⁾, Han-Goo You, 조영목²⁾, Young-Muk Cho, 김종석³⁾, Jong-Seok Kim, 박정규⁴⁾ Jeung-Gue Park

¹⁾ 도화종합기술공사 지반공학부 전문, Director, Dohwa Associated Engineering Services Co., LTD.

²⁾ 도화종합기술공사 지반공학부 과장, Section Chief, Dohwa Associated Engineering Services Co., LTD.

³⁾ 도화종합기술공사 지반공학부 대리, Assistant Manager, Dohwa Associated Engineering Services Co., LTD.

⁴⁾ 도화종합기술공사 지반공학부 대리, Assistant Manager, Dohwa Associated Engineering Services Co., LTD.

SYNOPSIS : In general, two methods have been used to predict settlement of soft ground. One method is Terzaghi's one dimensional consolidation theory which gives time-settlement relationship using the standard consolidation test results. The other is forecasting method of ground settlement to be occurred in the future using in-situ monitoring data. The above both methods have some defects in application manner or in itself especially in very deep and soft clayey ground. In view of the lessons and experiences of soft ground improvement projects, several techniques were proposed for more accurate theoretical calculation of consolidation settlement as follows ; ① Subdivision of soft ground, ② Consideration of secondary compression, ③ Using the modified compression index, etc. And also, revised hyperbolic fitting method was suggested to minimize the error of predicted future settlement. In addition, revised De-Beer equation of immediate settlement of loose sandy soil was proposed to overcome the tendency to show too small settlement calculation results by original De-Beer equation. And also, considering the various effects of settlement delay in the improved ground by vertical drains, time-settlement calculation equation(Onoue method) was revised to match the tendency of settlement delay by using the characteristics of discharge capacity decreases of vertical drain with time elapse by the pattern of hyperbolic equation.

Key Words : 쌍곡선법, logt법, Asaoka법, 장래침하, 즉시침하, Well-Resistance, Smear effect

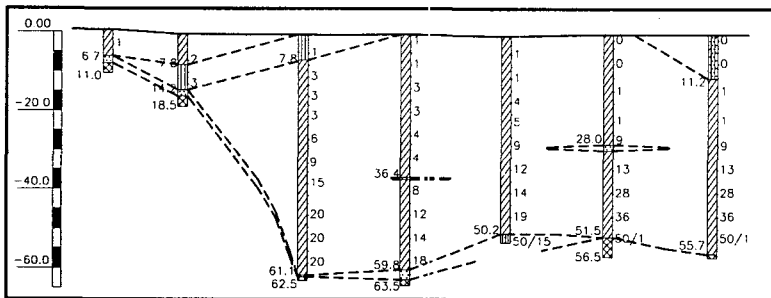
1. 서 론

종래 이론침하는 표준압밀시험 및 Terzaghi 압밀이론에 근거하여 단순하게 계산하여 왔는데 침하량이 비교적 작은 서해안 지역의 경우 혹은 침하량이 큰 남해안 지역의 경우에도 침수 우려가 적은 제방형 도로성토의 경우 지반침하 문제는 그다지 심각하지 않았다. 그러나 10여년 이전부터 낙동강하구 대심도 퇴적 지대에 녹산국가산업단지, 신호지방산업단지(삼성자동차공장), 명지주거단지, 양산·물금택지지구 등 대단위 단지가 조성되면서 이론설계 침하와 실제침하 사이의 현저한 차이로 인하여 공사진행상 많은 차질을 빚게 되었다. 따라서 연약지반 침하계산에 있어 종래 설계기법 대신 새로운 이론적 설계기법 접근이 절실한 실정이다. 여기서는 낙동강하구지역 대규모단지 조성공사시 경험한 종래 설계기법상의 오류·오차 원인을 분석하고 이에 따른 설계 개선안을 제시하고자 한다. 실측침하에 의한 장래침하 추정시 일반적으로 사용되는 예측기법으로는 시공기간내 혹은 준공후 단기간이내 추정시에 적용되는 쌍곡선법, 준공후 유지관리단계의 장기간 예측시에 이용되는 logt법이 있다. 장기간의 예측자료를 이용하는 logt법에 비해 쌍곡선법은 비교적 중·단기간 예측자료를 이용해 추정할수 있기 때문에 시공중 장래침하 추정에는 주로 쌍곡선법을 이용하게 된다. 그러나 예측기법중 가장 많이 사용되는 쌍곡선법의 경우도 단기간의 제한된 측정자료, 조기에측 불가피성, 예측기법 자체의 한계성등으로 많은 오차를 동반할수 있다. 여기서는 이러한 쌍곡선법의 장래 침하 추정상 신뢰도 한계로 인한 낙동강 하구지역 단지조성공사시 장래 침하 추정상의 과다 오차발생 경험을 토대로 본 원인을 분석하고 이에 따른 추정기법 개선안을 제시하고자 한다.

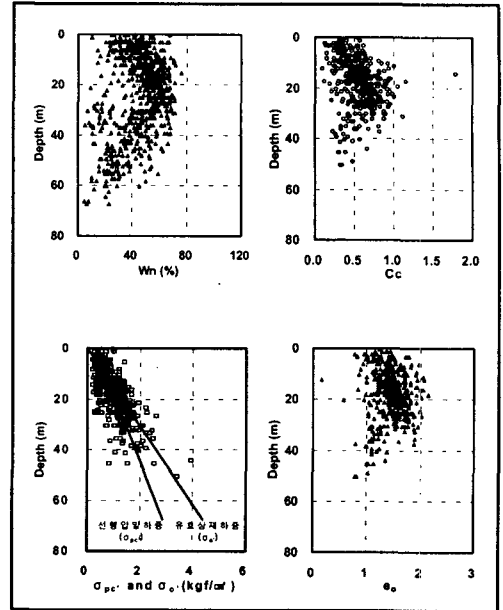
2. 연약지반 개량 설계 개요

2.1 A단지 토층 및 연약점토층 토질정수 분포현황

토 층(퇴적토)		토 질	층 두께 (m)
상부 사질토층		SC, SM, SP, SW	1.5~17.0 (평균:7.1)
중 간 점성토층	N≤10 N>10	CL, CH, ML	1.4~42.0 (평균:24.3) 0.0~26.0 (평균:12.5)
하부 사질토층 및 자갈층		SM, SP, SW, GM, GW	1.6~30.5 (평균:10.3)



[그림-1] 대표적 토층 단면도



[그림-2] 점토층 토질정수 분포현황

2.2 A단지 이론 침하계산 및 허용 침하량 설정 결과

이론 침하량 (cm)		허용침하량 설정 (cm)		비 고
구 분	범 위	구 분	허용침하량	
즉시침하	1.0~69.0(19.0)	지표면 사질토층 두께 0~5m 구역	20.0	지표면부 퇴적 사질토층의 Arching 작용으로 인한 부등침하량 축소효과를 고려하여 허용침하량 차등설정
압밀침하	19.0~222.0(110.0)	지표면 사질토층 두께 5~10m 구역	30.0	
계	32.0~222.0(129.0)	지표면 사질토층 두께 10m이상 구역	40.0	
		단지내 도로 허용 잔류 침하량	20.0	

2.3 A단지 연약지반 개량 설계 시공 및 계획 현황

1) PBD 공법 설계 방법

- Well - Resistance 영향 : Barron-Yoshikuni 식 적용
- Smear Effect : $C_h = C_v$ 로 보아 계산 (보통 $C_h \approx 2 \sim 4C_v$)
- PBD 환산 투수계수 : $k_w = 1 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 적용 (각종 PBD 재료 시험 하한치)
- PBD 미개량층 침하시간 계산 : PBD 하단부를 배수층으로 가정하여 배수거리 결정
- PBD 환산 타입심도 : 실제 PBD 타입심도 + 미개량층 중 PBD 개량층 방향으로 배수되는 층두께

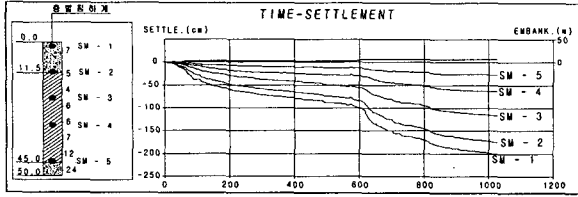
2) 연약지반개량 설계시공현황

- PBD 배치간격 : 1.3~1.6m 정삼각
- 개량 심도 : 20~28m(평균25m)
- 미개량 잔류심도 : 0~22m(평균10m)

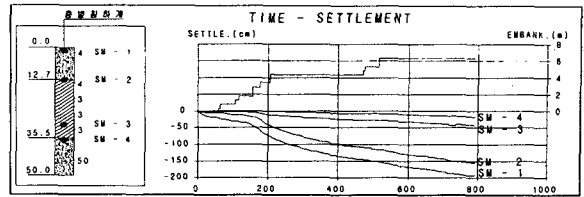
3) 계획기 매설현황

- 대표침하 관리개소 : 42개소(층별침하계, 간극수압계, 지하수위계)
- 보조침하 관리개소 : 370개소(지표침하판)
- 대표안정관리개소 : 10개소(경사계)

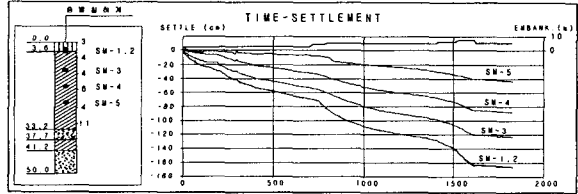
4) 침하계측결과(대표개소)



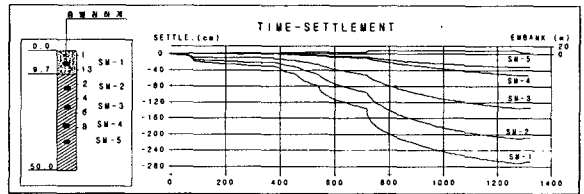
[그림-4] 대표침하곡선-1 (A단지, PBD 개량심도 : 25m)



[그림-5] 대표침하곡선-2 (A단지, PBD 개량심도 : 28m)



[그림-6] 대표침하곡선-3 (B단지, PACK/D 심도 : 30m)



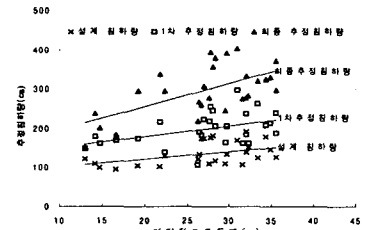
[그림-7] 대표침하곡선-4 (B단지, PACK/D 심도 : 30m)

3. 장래침하추정

3.1 장래침하 추정조건 및 추정결과

A단지에 대한 계측기위치별 침하곡선을 이용한 시기별 장래침하 추정조건 및 추정결과는 다음과 같다.

항 목	1차 추정 ('96. 9)	최종 추정 ('97. 9)	비 고
성토 및 계측기간	'95. 1 ~ '96. 4	'95. 1 ~ '97. 8	• 최종분석추정침하량은 쌍곡선법을 이용한 추정치임 • 계측 착수시기 : 위치별 '93. 7 ~ '95.11, 계측 종료시기 : '98. 4 ~ '99.8
성토고 (m)	3.2 ~ 4.3 (평균 3.9)	3.2 ~ 10.0 (평균 6.8)	
분석이용측정기간	3~5단계 성토직후 (영구성토의 평균 60% 성토) 평균 3개월	도로부 Surcharge 성토완료후 3~6개월	
기발생침하량(cm)	51.0 ~ 179.0 (117.7)	76.8 ~ 287.6 (187.5) : 분석시 95.8 ~ 377.8 (222.2) : 계측종료시	
설계 침하량(cm)	97.0 ~ 193.0 (136.5)	97.0 ~ 193.0 (136.5)	
추정 침하량(cm)	109.0 ~ 298.0 (198.7)	156.3 ~ 404.1 (298.8)	
침하증가량(cm)	(-)15.0~138.0 (62.2)	34.3~261.5 (212.9)	
설계대비추정침하비	0.9 ~ 2.1배 (1.5배)	1.3 ~ 3.2배 (2.2배)	
최종침하대비 과소추정량(cm)	6.6~184.8 (100.1)	-	

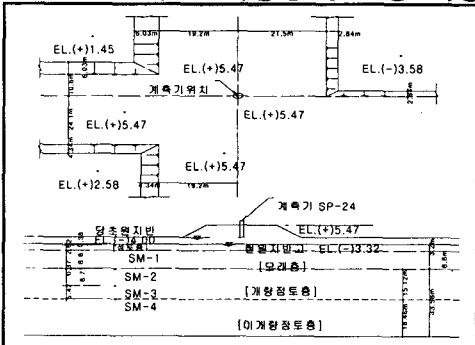


[그림-8] 장래침하량 추정결과도표

3.2 현성토 침하곡선을 이용한 영구 성토 침하 추정방법

추정기법	현성토 침하추정에 의한 영구 성토 침하 추정 방법
쌍곡선법 및 Simulation법을 이용 층별 침하 추정후 합산 압밀대기기간 : 실측곡선에서 산출된 쌍곡선 추정 침하곡선을 이용 Asaoka법에 의한 압밀계수를 역해석 산정 이용	$S_{f1} : S_{f2} = \frac{C_c'}{1+e_o} \cdot H_c \cdot \log \frac{P_o + \Delta P_1}{P_o} : \frac{C_c'}{1+e_o} \cdot H_c \cdot \log \frac{P_o + \Delta P_2}{P_o}$ <p>여기서, S_{f1}, S_{f2} : 현성토 및 영구성토 추정 침하량 C_c' : 실측정치에 의한 현성토 추정 침하량으로부터 구한 환산 압축지수 ΔP₁, ΔP₂ : 현성토 및 영구 성토 지중응력</p>

3.3 3차원 성토 지중응력 산정 적용방법 (Osterberg법 응용)



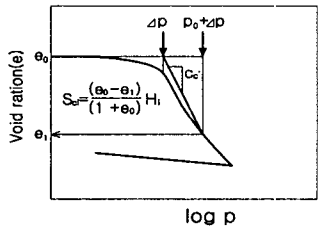
[그림-9] 3차원 성토 평면도 및 단면도

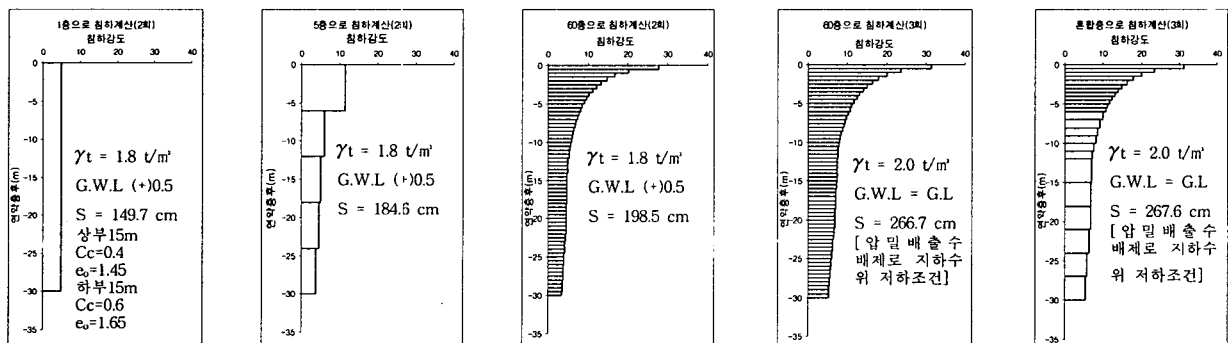
- 중간개량 점토층 환산 성토 지반고
- ZONE-① 미성토 영향 계산 결과
 $a_1 = 4.34, b_1 = 24.1, z_1 = (2.58 + 3.32) + 3.2 + 8.8 + 15.12 / 2 = 25.46$
 $a_1/z_1 = 0.579, b_1/z_1 = 3.213, I_1 = 0.413, a_1' = 4.34, b_1' = 19.2, z_1' = 25.46$
 $a_1'/z_1' = 0.579, b_1'/z_1' = 2.56, I_1' = 0.378$
 감소 H₁ = (5.47 - 2.58) × (0.5 - 0.413) × (0.5 - 0.378) = 0.03m
- ZONE-②, ③ 미성토 영향 계산 결과
 감소 H₂ 및 H₃ = 0.09m, 0.1m
 조정 EL = EL(+5.47 - (0.03 + 0.09 + 0.10) = EL(+5.25m
 (1차원 반무한대 성토로 봄)

4. 침하량 증가 원인분석 및 침하량 산정 개선안 제시

4.1 압밀침하량 산정 개선과정

A단지지역 대표적 점토층 두께 및 토질정수를 이용하여 압밀침하량에 대한 당초 설계 과정상 문제점 및 개선안을 Sample 계산을 통하여 다음과 같이 제시한다.

항 목	문 제 점	개 선 안	Sample 계산결과															
침하계산 반복 횟수	<ul style="list-style-type: none"> 일반적으로 1회에 한해 계산 → 침하량하중에 의한 추가 침하량 미고려로 과소 침하량 산출결과 초래 	<ul style="list-style-type: none"> 당초설계시 1차 침하계산후 본 침하량을 하중화하여 2차 침하 계산 시행 3차 반복 침하계산으로 개선 	1회계산 : 171.9cm(100%) 2회계산 : 198.5cm(115.5%) 3회계산 : 202.3cm(117.7%) → 과소설계침하 2.1% 개선효과															
침하층분	<ul style="list-style-type: none"> 일반적으로 단일층 혹은 자연시료채취 및 시험수량에 맞춰 층별 침하산정후 합산 → 침하량이 대부분 상부점토층에서 현저하게 크기 발생하는 현상이 무시되어 과소 침하량 산출결과 초래 	<ul style="list-style-type: none"> 당초 평균 6m 간격으로 구분하여 계산 토층을 0.5m로 세분 전 토층 0.5m로 세분시 계산이 과도하게 복잡한 경우 상부 1/3 ~ 1/4 H : 0.5m 간격 상부 1/3 ~ 1/4 H : 1.0m 간격 하부 1/3 ~ 1/2 H : 3.0m ~ 5.0m 간격으로 세분화하는 것으로 개선 	[2회 반복 계산시] 1층(30m) : 149.7cm(100%) 3층(10m) : 176.2cm(117.7%) 5층(6m) : 184.6cm(123.3%) 10층(3m) : 192.1cm(128.3%) 30층(1m) : 196.9cm(131.5%) 60층(0.5m) : 198.5cm(132.6%) • 당초 6m 대신 0.5m 간격으로 세분화 계산 → 과소 설계침하 7.5% 개선효과															
단위중량	<ul style="list-style-type: none"> 당 현장 성토재료의 80~90%가 암버력 재료임 당초 일반토사 단위중량과 동일치로 과소추정 적용 ($\gamma_t = 1.8t/m^3$, $\gamma_{sat} = 2.0t/m^3$) 	<ul style="list-style-type: none"> 실제 매립후 단위중량 측정결과 $\gamma_t = 1.9 \sim 2.2t/m^3$로 큼 단위중량을 $\gamma_t = 1.8t/m^3$ 대신 $\gamma_t = 2.0t/m^3$ 적용하는 것으로 개선 	$\gamma_t = 1.8t/m^3$: 202.3cm(100%) $\gamma_t = 2.0t/m^3$: 217.3cm(107.4%) • 단위중량 변경 적용 → 과소침하량 8.1% 개선효과															
압축지수보정	<ul style="list-style-type: none"> 자연시료 교란에 의한 압축지수 미보정 → 과소침하추정  <p>[그림-10] 일본식 C_c 보정법</p>	<ul style="list-style-type: none"> 압축지수보정 방법 제1안 : Schmertmann법 제2안 : 일본식 제3안 : Schmertmann법 및 일본식 평균치 압축지수보정치 <table border="1" data-bbox="686 1232 1037 1344"> <thead> <tr> <th>구분</th> <th>당초</th> <th>제1안</th> <th>제2안</th> <th>제3안</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>상부층 C_c</td> <td>0.40</td> <td>0.50</td> <td>0.86</td> <td>0.68</td> </tr> <tr> <td>하부층 C_c</td> <td>0.60</td> <td>0.81</td> <td>1.16</td> <td>0.98</td> </tr> </tbody> </table> 제3안 적용으로 개선 	구분	당초	제1안	제2안	제3안	상부층 C_c	0.40	0.50	0.86	0.68	하부층 C_c	0.60	0.81	1.16	0.98	[$\gamma_t = 2.0t/m^3$ 시] 당초(미보정) : 217.3cm(100%) 제1안 : 291.5cm(134.1%) 제2안 : 530.4cm(244.1%) 제3안 : 405.1cm(186.4%) • 압축지수보정 제3안 적용 → 과소침하량 117% 개선효과
구분	당초	제1안	제2안	제3안														
상부층 C_c	0.40	0.50	0.86	0.68														
하부층 C_c	0.60	0.81	1.16	0.98														
2차 압밀침하 고려	<ul style="list-style-type: none"> 당초설계시 연약층이 두꺼워 2차 압밀침하가 장기간 진행되는 것으로 보아 설계 침하량 산정시 무시 → 과소 침하 추정 결과 초래 	<ul style="list-style-type: none"> 설계시 침하기간 50년간 이상 발생 2차 압밀침하 산정 포함 C_a/C_c비 : 0.025 2차 압밀계수 평균치 $C_a = 0.5 \times 0.025 = 0.0125$ 	$S_s = C_a H_c (\log t_2 - \log t_1)$ $= 0.0125 \times 3,000 \times (\log 50 - \log 2)$ $= 52.4cm$ • 2차 압밀침하량 추가(50년간) → 과소침하량 20.1% 개선효과															



[그림-11] 침하토층 구분에 따른 심도별 침하 강도

4.2 압밀침하량 산정 개선안 제안

1) 압밀침하량 설계치 및 추정치 비교

상기 3.항의 상부사질토층 즉시침하 및 점토층 압밀침하의 설계 및 실발생 추정치중 점토층 압밀침하 부분은 다음과 같다.

설계치 : 평균 129.2cm → 실발생예상 추정치 : 278.5cm (약2.2배)

2) 대표개소 침하량 산정개선안

- ① 당초 설계침하량 대표치 → 184.6cm
- ② 6m 두께 토층구분 → 0.5m 두께 토층 구분 : 184.6cm → 198.5cm (1.08배)
- ③ 2회 반복 → 3회 반복 계산 : 198.5cm → 202.3cm (1.10배)
- ④ 성토 단위중량 $\gamma_t = 1.8t/m^3 \rightarrow 2.0t/m^3$: 202.3cm → 217.3cm (1.18배)
- ⑤ 압축지수보정 (Schmertmann법 및 일본식 평균치) : 217.3cm → 405.1cm (2.20배)
- ⑥ 2차 압밀침하 고려 : 405.1cm → 457.5cm (2.5배)

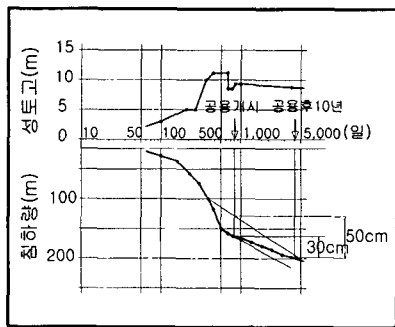
상기 1)항의 추정치는 성토 초·중기의 비교적 저압밀도 상태에서 짧은 기간 예측치를 이용하고 logt법이 아닌 쌍곡선법 및 Simulation법을 이용 추정하여 대부분 2차 압밀침하량은 추정치에 포함되지 않았기 때문에 2차 압밀침하량은 별도로 고려하여야 한다.

3) 개선안 타당성 검토

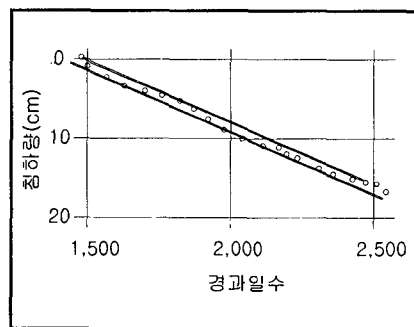
상기 2)항의 침하량 산정 개선과정 ②~⑤를 통하여 A단지 평균 대비 실발생 예상 평균침하량 증가율 2.2배와 유사하므로 본 압밀침하량 개선안은 타당한 것으로 판단된다.

4) 침하량 산정 개선을 위한 수정안 제안

압밀침하량 산정 수정안	적용 조건
$S_{ct} = S_{cp} + S_{cs} = \frac{C_c'}{1 + e_o} H_c \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o} + C_\alpha H_c (\log t_2 - \log t_1)$ <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">토층세분화 (0.5~1.0m범위)</div> <div style="font-size: 2em;">→</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">3회 반복계산</div> <div style="font-size: 2em;">→</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">침하량 수정식 적용 (압축지수보정 및 2차압밀 침하고려)</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">적정성토 단위중량적용</div> <div style="font-size: 2em;">→</div> </div> <p style="margin-left: 40px;">여기서, S_{ct}: 총침하량 S_{cp}: 1차 압밀침하량 S_{cs}: 2차 압밀침하량 C_{c1}: Schmertmann법에 의한 압축지수보정치 C_{c2}: 일본식에 의한 압축지수보정치 $C_c' = (C_{c1} + C_{c2}) / 2$, 평균치 적용 C_α: 2차 압밀계수 t_2: 침하량 산정 목표기간 t_1: 1차 압밀완료기간</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 낙동강하구등 남해안 점토층등 Fat clay에 적용 • 2차압밀 침하산정 목표기간 : 장기침하시 저지대화 침수피해 우려, 중요도등에 따라 설정 • 1차압밀 침하완료기간 : 지반개량시 상부점토층 조기압밀고려 1~2년정도가 적정 • 향후 추가 침하사례 자료 축적 분석 및 본 수정안 적용결과 분석에 의해 본 수정안 보정 필요



[그림-12] 준공후 장기침하 진행 실측사례



[그림-13] 시간-2차 압밀침하 실측곡선 사례

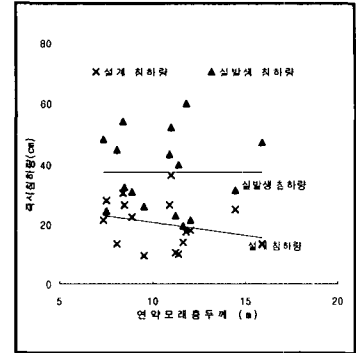
침하량 증가 사례
<ul style="list-style-type: none"> • 일,간사이국제공항 ; 설계 : 1.5m, 추정 : 5.5m 현재 : 5.5m 상회추정 • 신호지방산업단지 ; 45.2~124.6cm(평균 79.7) → 172.6~318.2cm(평균 228.5cm) • 일,명신고속도로 ; 10cm → 40~45cm (12년내 실발생잔류침하)

4.3 즉시침하량 산정 개선안 제안

1) 즉시침하량 증가현황

A단지 및 B단지에 대한 계측기 위치별 설계 및 실발생 즉시침하량을 비교·분석한 결과는 다음과 같다.

구 분	연약층 두께(m)	평균 N치	설 계 침하량(C _m)	실발생 침하량(C _m)	실발생침하 환산계수	
					I _{c1}	I _{c2}
A 단지	7.3~12.0 (9.4)	2.3~7.3 (4.1)	13.4~36.5 (24.1)	24.5~60.0 (41.3)	0.035~0.139 (0.074)	0.136~0.536 (0.234)
B 단지	9.5~15.9 (12.3)	7.0~15.0 (10.5)	9.3~25.0 (13.6)	19.5~47.4 (31.1)	0.048~0.156 (0.101)	0.208~0.692 (0.389)
평 균	10.5	6.5	20.2	37.5	0.08	0.3
즉시 침하식	당초: $S_i = \frac{I_{c1}}{N} \cdot P_o \cdot H_s \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o}$		수정 제안: $S_i = \frac{I_{c2}}{N} \cdot H_s \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o}$			



[그림-14] 즉시침하량 비교

2) 실발생 즉시 침하량 증가 원인분석

- ① 본설계 적용 De-Beer공식은 원래 중간 입자 이상크기의 느슨한 모래층(SP) 지반의 침하사례를 이용한 경험적 공식이다. 이에 비해 낙동강하구 상부 모래층의 경우 Silt 및 점토분을 다량 함유한 실트질 모래 (ML-SM, SM)이고 본층 중간층간에 Silt 및 Clay Seam이 분포하므로써 일반 모래층 즉시 침하와 점토층 압밀침하의 중간적인 침하특성을 보이며 모래층 상부일수록 더 연약한 상태를 보인다.
- ② 따라서, 본지역 상부 모래층의 즉시 침하완료기간이 평균 1~3개월정도 소요되는 경우가 많고 위치에 따라서는 단위 심도당 침하량 역시 점성토층 압밀침하량에 근접하게 크게 발생하는 경우도 많다.
- ③ 또한, De-Beer공식은 실트질 모래층 특히 상부층일수록 연약하고 유효응력 (P_o) 대비 하중증가 (ΔP)정도가 커 침하량이 크게 발생하는 지반특성을 반영할수 없어 과소 침하계산결과를 초래한 것으로 분석되었다.
- ④ 실발생침하량을 이용하여 De-Beer공식을 적용 역해석에 의해 즉시 침하 발생 환산계수를 산정한 결과 당초 0.04 대신 0.08로 나타나 이론 대비 실발생침하량은 약 2배에 이른다.

3) 즉시침하량 산정 개선안 제안

- ① De-Beer 공식 $S_i = \frac{0.04}{N} \cdot P_o \cdot H_s \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o}$ 에서 P_o항이 비례상수로 곱해 지므로써 상부 연약층 일수록 침하량이 큰 특성 고려불가.
- ② 따라서, P_o항을 삭제한 수정공식에 실발생 침하환산계수 I_{c2} = 0.3을 적용하고 침하계산층을 1.0m 두께 이하로 세분화 하여 산정.

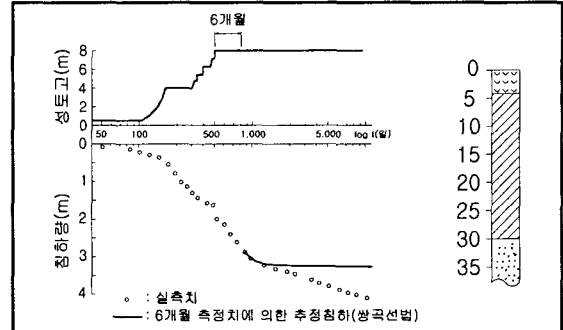
즉시침하량 수정공식	적 용 조 건
<ul style="list-style-type: none"> • $S_i = \frac{0.3}{N} \cdot H_s \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o}$ • 토층은 1.0m 간격으로 세분화 계산 후 합산 	<ul style="list-style-type: none"> • Silt분이 비교적 다량 함유한 SM층에 적용 • 중사이상의 SP, SW층의 경우 De-Beer공식 적용 추천 • 향후 추가침하사례 자료축적분석 및 본 수정공식 적용 결과 분석에 의해 본 수정공식 보정 필요

5. 장래 침하추정 수정 기법 제안

5.1 장래침하량 추정

쌍곡선법을 포함한 모든 도식적 장래추정방식은 기 형성 침하곡선 형상(침하수렴경향)에 전적으로 의존하게 되므로 장래침하 추정에 적용하는 침하곡선은 장래 발생예정 침하곡선 경향과 유사해야하는 조건을 갖는다.

또한 개량지반 장래침하추정의 경우에도 총침하곡선을 이용하게되면 전체침하곡선은 조기에 크게 발생하는 상부 점토층 침하경향이 적고 늦게 발생하는 하부점토층의 침하경향을 흡수하여 상부점토층 침하경향이 절대적으로 지배(Governing)하게되므로 전체 침하곡선 형상에는 하부점토층의 장기 직선적으로 발생하는 지속적 지연침하 경향이 반영되지 않아 전체침하량 과소추정결과를 초래하게 되는데 최대한 이를 개선하기 위해서는 각층의 침하경향을 그대로 반영할 수 있도록 층별로 장래침하를 분석하고, 합산하여 장래 침하량을 추정하여야 한다.

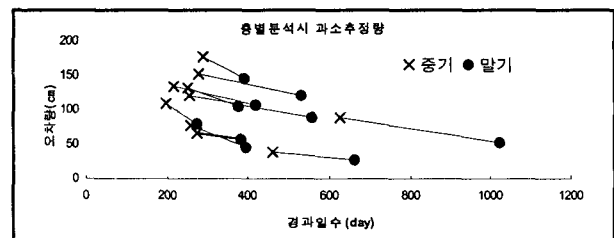
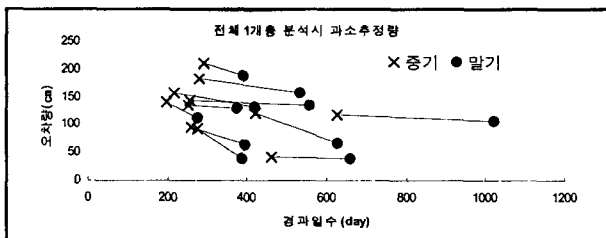


[그림-15] 연약층이 두꺼운 경우 장래침하 측정 사례

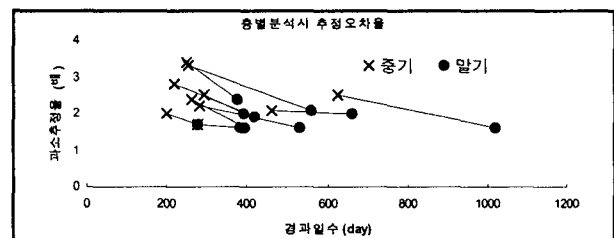
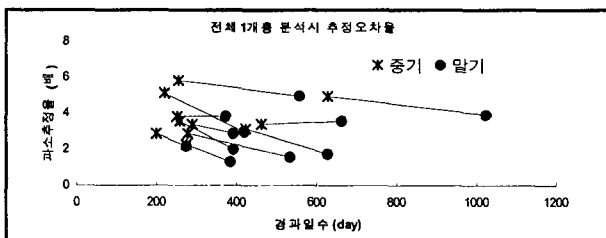
5.2 압밀침하량 추정결과

대표개소 실측곡선을 이용하여 쌍곡선법 및 logt법에 의한 장래압밀침하량을 추정하여 logt법에 의한 예상침하량을 진의실예상 총침하량, 쌍곡선법에 의한 침하량을 장래추정 침하량이라고 할 때 실발생예상 침하량, 추정침하량, 과소추정량, 과소추정 오차를 분석결과는 다음과 같다. (추정오차율 $\alpha = (S_f - S_{o2}) / (S_p - S_{o2})$, [그림-19]참조)

추정 시기	분석곡선 계측기간 (월)	추정침하량(cm), 쌍곡선법		실발생 예상침하량 (cm)logt법	과소추정량(cm)		추정 오차율, α (배)	
		전체1개층분석	층별분석		전체1개층분석	층별분석	전체1개층분석	층별분석
초기	3.8~10.8 (5.5)	75.1~246.7 (136.9)	78.7~272.9 (143.0)	174.6~543.1 (304.8)	44.3~296.4 (171.7)	41~270.2 (163.8)	2.8~21.1 (8.6)	2.5~8.6 (5.8)
중기	6.6~20.9 (10.7)	112.4~332.4 (177.6)	131.7~365.3 (197.3)		43.0~210.7 (131.1)	39.3~177.8 (109.6)	2.3~5.8 (3.8)	1.7~3.4 (2.5)
말기	9.2~34.1 (17.1)	135.9~354.8 (202.3)	147.3~398.6 (224.2)		38.7~188.3 (106.3)	27.3~144.5 (82.6)	1.3~5.0 (2.8)	1.6~2.4 (1.9)
평균	11.1	172.3	188.2		136.4	118.7	5.0	3.4



[그림-17] 과소 압밀침하 추정량 분석결과 도표



[그림-18] 과소 압밀침하 추정율 분석 결과 도표

장래침하분석결과, 분석곡선 계측기간이 길수록 추정시기가 늦을수록 추정오차가 줄게되는데 초기 추정치는 추정오차가 과도하게 크게 되고 전체 1개층 분석보다 층별분석시 추정침하량 오차가 현저하게 적게 되는 것을 알 수 있다.

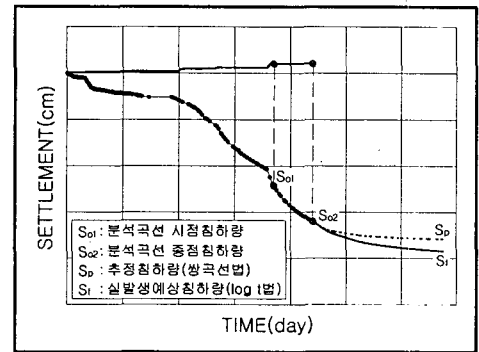
5.3 압밀침하량 추정 개선안 제시

중·대심도 연약지반 개량 지역에서도 성토초기 침하곡선(3.8~10.8개월, 평균5.5개월)을 이용하여 쌍곡선법으로 장래침하를 추정시에는 상술한 바와 같이 2.8~21.1(평균 8.6)의 크고 불규칙한 추정오차율(α)로 인하여 장래추정 자체의 의미가 없을 정도이다.

따라서, 중·대심도 연약지반에서는 성토후 최소 3~6개월 이후 곡선으로서 최소 4~6개월간 이상의 실측곡선을 이용하여 추정하는 것이 바람직 하다. 이러한 경우에도 쌍곡선법에서는 중·하부 점토층의 지연침하 및 2차 압밀침하진행 특성을 충분히 반영하지 못하기 때문에 1~3년간의 실측 침하곡선 형태를 이용하여 일반적인 시설물 수명인 50~80년 장구한 세월이후의 침하량을 정확하게 추정하는 것은 불가능에 가까우므로 장래 침하 추정의 최대 목표는 「얼마나 추정오차를 최소화」 하느냐 하는것과 본 추정오차에 대한 적정 대책수립 여부가 관건으로 된다.

여기서는 logt법에 의해 추정한 침하량을 실발생 예상침하량(S_f)의 진의 값으로 간주하고 쌍곡선법에 의한 장래 침하량추정 개선안을 다음과 같이 제시하고자 한다.

장래침하추정 수정공식	적 용 조 건
[기존쌍곡선식] $S_p = S_{o1} + \frac{1}{\beta}$	<ul style="list-style-type: none"> • 중·대 심도 점토지반 경우, 성토이후 3~6개월 이상 대기후 4~6개월이상 계측곡선을 이용 침하 추정 • 준공이후 20~30년 혹은 50~80년 장기간 경과후 발생예상 총침하량 • 준공이전 기간내 추정은 쌍곡선법 층별분석적용이 바람직함 • 향후 추가침하사례 자료 축적분석 및 본 수정공식 적용결과 분석에 의해 본 수정공식 보정 필요
[수정 쌍곡선] $S_f = S_{o2} + \alpha (S_p - S_{o2})$	
$\alpha = (S_f - S_{o2}) / (S_p - S_{o2})$, 장래 침하추정 오차율	
$\alpha = 3.0$: 전체 1개층 분석시 $\alpha = 2.0$: 층별 침하 분석시	



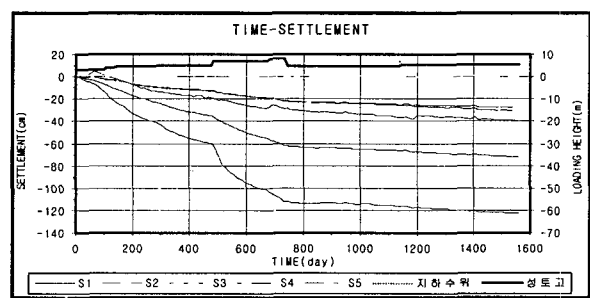
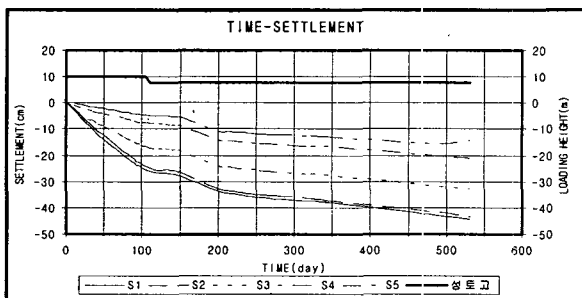
[그림-19] 장래 침하량 추정 곡선

6. 침하시간 계산 개선안 제시

6.1 침하시간 지연현황

PBD 처리층에 대한 침하시간 계산은 Barron-Yoshikuni 식을 이용하여 Well-Resistance를 고려하고 $C_h = C_v$ 로 보아 Smear Effect 역시 고려하여 설계하므로써 대부분 9개월 이내에 90% 압밀도에 이르는 것으로 설계하였으나 실침하 측정결과, 다음과 같이 침하 지연 현상이 두드러지게 나타났다.

구 분	계측지점	침하소요기간(개월)								비 고
		20% 압밀도		50% 압밀도		70% 압밀도		90% 압밀도		
		이론	실제	이론	실제	이론	실제	이론	실제	
A단지	SP-9	0.7	1.3	2.2	4.8	3.7	11.3	7.5	43.4	PBD
	SP-32	0.5	0.9	1.5	3.1	2.5	7.1	4.8	28.9	
B단지	SP-13	0.6	1.6	1.7	6.3	2.9	14.6	5.7	59.1	PACK/D
	SP-20	1.2	1.8	3.5	6.9	6.0	16.1	12.0	62.0	
C단지	시험시공	0.9	0.9	2.9	3.6	5.1	8.4	10.1	30.1	PBD
		1.3	1.3	4.2	5.0	7.0	11.7	14.2	43.3	PACK/D



[그림-20] A단지 준공후 지연 침하 진행 사례

6.2 개선안 제시 기본방향

유사 지역 적용성	낙동강하구 혹은 남해안등 유사 지역 적용성을 고려하여 낙동강하구지역 계측사례이용
개량 공법	PBD 및 Pack Drain 각 공법에 대해 개선안제시
개량 재료	PBD 재료중 국내산(녹산), 외산(Mebra Drain, 양산시협시공) 공히 분석
간격 및 심도	실적용 차등 개량심도 및 간격의 계측, 결과분석으로 개선안 범용성 증대

6.3 침하시간 계산 개선안 수립방법

1) 이론침하시간 계산조건

이론 대비 실제 침하시간 비교·분석을 위하여 이론 침하시간 계산시 적용한 기본 조건은 다음과 같다.

계측 위치	개량 공법	개량심도(m)	개량간격(m)	압밀계수 $C_h=C_v$ ($10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$)	투수계수 $k_h=k_v$ (10^{-7}cm/s)	환산투수계수 $k_w(\text{cm/s})$
A 단지	PBD	25.0/28.0	1.6/1.3	0.77 / 2.53	0.56 / 1.74	1.0×10^{-1}
C 단지	PBD	25.5	1.0	0.45	0.96	1.0×10^{-1}
B 단지	Pack/D	30.0/30.0	1.2+2.0	6.6 / 0.97	4.0 / 0.61	1.0×10^{-2}
C 단지	Pack/D	25.5	1.2+1.2	0.45	0.96	1.0×10^{-2}

2) 침하시간 계산 개선안 정립 방법 및 과정

- ① 쌍곡선법을 이용하여 실측침하곡선의 전·후곡선 추정보완
- ② Onoue 및 Yoshikuni에 의한 이론침하시간 계산 및 계산결과와 실측곡선 비교검토 및 수정적용계획이론식 결정 → Onoue식 적용
(Well Resistance 산정시 하부 미개량층의 수직배수재를 통한 압밀배수 영향고려)

- ③ Onoue식을 이용 시간경과에 따른 배수재 통수능 저하 경향을 지연침하(Time lag) 특성을 대표하는 쌍곡선식을 이용하여 시간경과에 따른 배수재 환산투수계수(k_w)감소관계 공식을 Simulation (Curve Fitting)법에 의해 시산식으로 결정

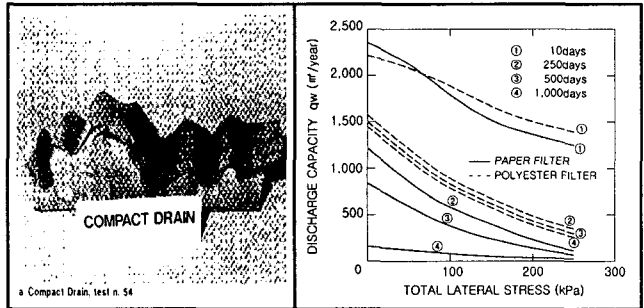
$$k_w = k_{wo} + \frac{t}{\alpha + \beta t}$$

여기서,

k_w : 시간경과에 따른 감소 배수재 환산투수계수(cm/s)

k_{wo} : k_w 초기치(cm/s)

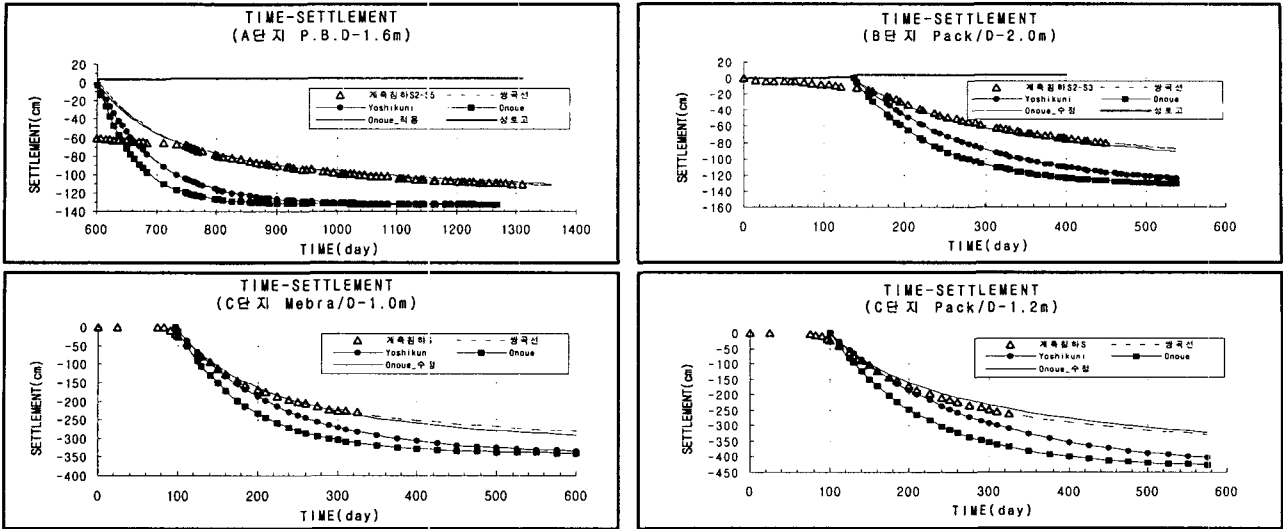
α, β : 쌍곡선 계수, t : 경과시간(일)



[그림-30] 배수재 절곡 현상 [그림-31] 배수재 통수능 감소 특성

3) 침하시간계산 개선안

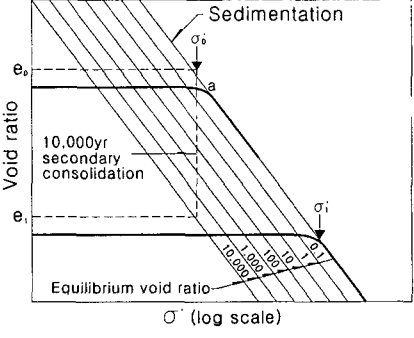
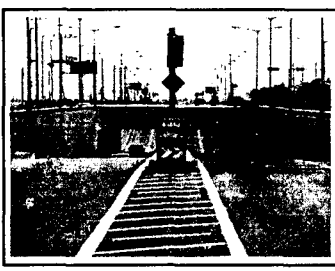
침하시간 계산 수정공식		적용 조건
Onoue공식	$U_h(T_h) = 1 - \exp\{-8T_h/(F(n)+0.8L)\}$ $F(n') = \frac{(n')^2}{(n')^2-1} \ln(n') - \frac{3(n')^2-1}{4(n')^2}, \quad n' = nS^{2-1}$ $\eta = k_h/k_s, \quad L = \frac{32}{\pi^2} \frac{k_h}{k_s} \left(\frac{H}{d_w}\right)^2 \quad (\text{배수저항계수})$	<ul style="list-style-type: none"> • 낙동강하구 및 남해안점토 • 중·대심도 연약지반 개량시 • 장래 향후 추가침하사례 자료 축적분석 및 본 수정공식 적용 결과 분석에 의해 본 수정 공식 보정 필요
PBD공법	$k_w = k_{wo} + \frac{t}{\alpha + \beta t} = 0.03 + \frac{t}{6,000 + 35t} \quad (\text{cm/s})$	
Pack/D공법	$k_w = k_{wo} + \frac{t}{\alpha + \beta t} = 0.004 + \frac{t}{43,000 + 300t} \quad (\text{cm/s})$	
	여기서, t : 경과시간 (일)	



[그림-32] 침하시간 계산 수정공식 정립 및 적용예

7. 교훈 및 건의사항

항목	문제점 및 현황	교훈 및 건의 사항
① 연약 지반 개량 공법	<ul style="list-style-type: none"> 지표면으로부터 5~15m 이내 얇은 심도분 포 연약점토 지반 경우 지표면부 상부층에서 극단적으로 큰 초기침하진행 	<ul style="list-style-type: none"> 지반교란 영향이 큰 수직배수공법 대신 Pre-loading 및 Surcharge 공법 적용 적극고려
	<ul style="list-style-type: none"> 미개량시 전제층 평균환산 C_v 값을 적용 침하시간 계산시 침하강도가 큰 상부 점토층 초기침하 현상 무시로 실제 대비 설계 침하압밀도 과소 계산 <p>[그림-33] 지반개량/미개량실측침하비교</p>	<ul style="list-style-type: none"> 미개량시 "Consol" 등 FDM 해석 Program을 이용하여 상부층 큰 침하량 초기침하 진행 영향 고려 설계
② 토공량 /공기	<ul style="list-style-type: none"> 중·대심도 연약지반을 수직배수공법 개량 경우에도 이론대비 실제 침하지연 현상이 현저한 반면, Surcharge 공법 적용 경우 본 공법효과는 매우 큰 것으로 나타남 단, Sur.공법 적용시는 상부 점토층 발생과 압밀침하량 별도 고려 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 수직배수재 타입간격의 과도한 축소 대신 Surcharge 공법 추가 적용으로 지연침하 대부분을 차지하는 상부 및 중간부 점토층 1,2차 압밀 침하 초기발생효과 유발로 잔류침하 최소화 가능 ([그림-34] 참조)
	<ul style="list-style-type: none"> 침하량 및 침하시간 산정시 종래 이론식에 대한 맹종으로 인해 대부분 침하량 및 침하시간 과소추정으로 과다공사비 및 공기증가로 막대한 공사차질을 빚고 있는 실정임 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 수정제안 공식 과감한 적용 혹은 일반설계 개념의 안전을 적용 도입으로 오차율 감소를 기하고 연약지반상 공사 시공시는 발주처의 정책적 공기뿐 아니라 초자연적 침하지연 현상도 동시에 고려하여야 함
③ 시험 시공	<ul style="list-style-type: none"> 중·대규모 연약지반상 부지조성공사 및 도로공사 시행시 이론 대비 실제 침하사이의 큰 차이로 과다문제발생 	<ul style="list-style-type: none"> 대표개소에 사전 혹은 본 공사 초기 완성 단면에 대한 시험시공으로 조기 이론·실제침하 비교 및 신뢰도 있는 장래 침하추정
④ 공사 순서	<ul style="list-style-type: none"> 단지조성공사의 경우 공사 편의상 부지용도별 특성고려 없이 동시공사 진행 경우가 많은데 이 경우 각종 기반 시설이 매설되는 도로부 침하지연으로 전체공기 지연 초래 	<ul style="list-style-type: none"> 도로부부터 우선적으로 공사 진행하고 중요도를 고려하여 도로부 허용침하량 제한 및 Surcharge 공법등 추가적용 적극고려

항목	문제점 및 현황	교훈 및 건의 사항
⑤ 허용 침하량 설정	<ul style="list-style-type: none"> • 지반개량시 과소 추정 이론침하시간에 대한 과신으로 허용침하량을 2.5~10.0cm 정도로 과소 설정. 향후 실제 침하지연시 허용침하량 기준 변경문제가 분양자 및 피분양자간 분양조건 변경으로 되어 심각한 문제로 대두됨 • 최근에 허용 잔류침하량을 적용하지 않는 이유 <ul style="list-style-type: none"> - 경제적인 방법으로 장기침하를 작게 할수 없는 점 - 도로 체재의 경우, 상당한 장기침하에 대해서도 유지관리단계에서 처리가 가능한 점 - 시간과 침하량의 관계 예측이 어려운 점 - 상부층의 Arching 현상에 의한 부등침하 정도 축소효과 기대 	<ul style="list-style-type: none"> • 낙동강하구 중·대심도 연약지반 경우 허용 침하량은 20.0~50.0cm 혹은 50년~80년이후 까지 고려하면 50.0~100.0cm 정도로 상향조정하고 다음과 같이 이에 대비한 설계가 이루어져야 함. - 잔류침하에 대비 단지 성토완성고 상향조정 → 침수방지 - 부등침하에 대비 지하매설물에 Flexible Joint 사용, 종방향 강성증대, Expansion Joint 간격 축소  <p>[그림-34] Sur.공법에 의한 2차압밀침하 축소효과 설명도</p>
⑥ 단 지 계획고	<ul style="list-style-type: none"> • 연약지반상 단지 조성시 고성토공법 및 우수지 및 배수펌프장 시설을 동반한 저성토공법 중 남해안지역의 경우 조위차가 적어 우수지 수위조절 효과 저감으로 대부분 고성토공법 적용 	<ul style="list-style-type: none"> • 중·대심도 연약지반에서는 침하량이 하중화하여 추가 침하를 유발시키는 악순환을 최소화 하기 위해 우수지 면적 증대 및 배수펌프 용량증대를 통해 저성토공법 적극 적용 필요
⑦ 연약지반 개량 심도/간격	<ul style="list-style-type: none"> • 중·대심도 연약지반상 수직배수공법 적용시 개량 심도를 최대한 깊게하는 경우에도 배수재 유효단면의 한계, 또한 배치 간격을 최소화하는 경우에도 Smear Effect의 역효과 유발등으로 소기의 침하시간 단축효과 구득 곤란 	<ul style="list-style-type: none"> • 개량심도는 N치 5이하 기준으로 D=30~40m 이내 개량이 가장효과적임 • 개량간격은 0.8~1.2m 대신 1.2~2.0m 간격 적용이 바람직함.(양산물금지구 시험시공결과 1.0~1.4m 간격까지는 침하시간이 유사함)
⑧ 구조물 기초공법	<ul style="list-style-type: none"> • 허용침하량을 최대한 크게 설정하는 경우에도 대부분 잔류침하량은 점토층 중·하부층에서 장기간 서서히 발생하게 되고 상부 퇴적 모래층이 분포하는 경우 성토층 침하완료 상부점토층 및 상부모래층의 Arching 효과 현상에 의해 중·하부 잔류침하가 지표면부 구조물 기초부에 전달 지반침하는 부등침하가 최소화하여 나타나게 됨.  <p>[그림-35] Compaction Pile+직접기초 공법적용예 (명지 지하차도)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 지하매설 BOX : E/J 간격축소, E/J 차수재증강, 종방향 철근 및 부재단면증강에 의한 종방향 부재 강성증대 • 우·우수관로 : Con'c관 대신 가요성 STL 보강 PE관 혹은 일반 고강도 PE관 사용 • 중·저층 건축물 : 동다짐/동치환 혹은 compaction pile 항타후 고강성 Mat 기초 혹은 독립기초 + 고강성 Tie Beam 공법, Friction Pile 기초적용 • 중·고층, 초정밀 공장건물 : 부마찰력을 고려한 선단지지말뚝 공법적용 • 말뚝기초 적용 건물의 기반시설 인입·인출부 : 기반시설 배치집중화 및 EPS Block 성토 혹은 다단계 Flexible Joint 설치 • 공통사항 : 연약지반상의 모든 구조물은 어느정도의 하자유발은 불가피한 실정을 인정하고 사전 시설물유지 보수비용 계상 필요

항목	문제점 및 현황	교훈 및 건의 사항
⑨지 표 면 초연약층 침하영향	<ul style="list-style-type: none"> • 낙동강하구지역은 현재 상당크기의 속도로 지속적인 퇴적이 이루어지고 있는바, 퇴적표면층은 초연약상태임 • 본층은 퇴적두께대비 거의 90%이상 침하가능한데 일반적으로 표단부 0.0~2.0m에 대해서는 자연시료채취가 이루어지지않아 본층의 극도로 큰 압축성이 설계에 반영되지 못해 근본적 과소 침하계산 결과 초래 원인으로 됨 	<ul style="list-style-type: none"> • A단지의 경우에도 대부분 자연시료채취는 지표면하 1.5~3.0m이하에서만 시행하므로서 과소 침하산정결과 초래 • 기본적으로 지표면 0.0m~0.8m내에서 자연시료채취후 본 시료로 압밀시험 시행 적용
⑩압 밀 배출수 배 제	<ul style="list-style-type: none"> • 집수정을 설치하고 Pump로 압밀배출수를 배제하는 경우 형성지하수위는 침하진전과 함께 계속 저하되어 지하수위 저하량에 비례하여 유효성도 재하하중이 증가되고 배출수 Pump 배제 종료이후에는 지하수위가 제위치로 상승하므로 결과적으로 유효하중증가량만큼 Surcharge 공법에 의한 침하 촉진 적용 효과를 거두게 됨 	<ul style="list-style-type: none"> • 침하량이 2~5m 이상으로 매우 큰 경우 지하수위 저하에 따른 Surcharge공법 효과가 크므로 이를 충분히 활용하여 추가 Sur.성토고 축소 혹은 삭제를 기할수 있는데, 이를 위해서는 지하수위계를 충분한 수량 매설하여 위치별 정량적 지하수위를 확인하여야 함. • 집수정 운용 추가 효과로는 압밀배출수의 원활한 배제로 고가의 Sand Mat 두께 감소가 가능한점임.

8. 결 론

- 1) 압밀침하량 산정 개선안으로서 토층 세분화 계산, 2차압밀침하등 정량적 해석이 가능한 증가 요인은 최대한 정밀 계산을 기하고, 나머지 복합적인 증가요인에 대해서는 이론 대비 실측침하량을 종합분석하여 압축지수 보정방식으로 일원화하여 압밀침하량 산정 개선안을 제시하였다.
- 2) 또한 즉시침하량 산정 개선안으로서는 본지역 실트질 모래층이 점토층과 모래층 침하특성의 중간특성을 띄는 점을 감안하여 상부층 모래층에서 침하가 크게 발생하는 특성을 지니도록 De-Beer 공식에서 Po 단일비례항을 삭제하고 실 발생즉시침하 환산계수를 도출하여 즉시침하산정 수정공식을 제안하였다.
- 3) 쌍곡선법에 의한 장래침하량 추정시 장기지연침하특성을 충분히 반영할 수 없어 대부분 과소추정 결과를 낳는데 여기서는 실 침하시례 분석 결과를 토대로 추정 잔류침하 증가율 개념을 도입하여 과소 침하 정도를 최소화 할 수 있도록 장래침하추정 쌍곡선법 수정공식을 제안하였다.
- 4) PBD, Pack Drain공법 적용시 연약지반 침하 실측곡선을 종합분석하여 복합적인 침하지연 원인을 시간경과에 따른 배수재 통수능(환산투수계수) 감소로 일원화하여 시간-환산투수계수 감소특성 공식을 쌍곡선식을 응용유도하여 대입하므로써 압밀침하시간 계산 수정공식을 제안하였다.

참고문헌

1. 김상규(1999). “김해 점토의 공학적 특성과 기초설계와의 관련”, Sang-Kyu Symposium on Geotechnical Engineering
2. 정성교(1999a). “낙동강 하구점토의 압밀특성”, 연약점토지반에 대한 국제심포지엄, 동아대학교.
3. 정성교 외3(1999b). “낙동강 삼각주 점토에 대한 과압밀비의 평가”, 한국지반공학회 논문집, 22권, 2호, pp. 65-76.
4. 稻田倍穂, 軟弱地盤における土質工學, 鹿島出版會