

# 불교란 점성토를 이용한 일정변형률압밀시험의 적용성에 관한 연구

## A Study on the Application of the Constant Rate-of-Strain Test Method Using Undisturbed Clay

김 광 태\*<sup>1</sup> Kim, Kwang-Tai  
이 기 세\*<sup>2</sup> Lee, Ki-Se  
백 영 식\*<sup>3</sup> Paik, Young-Shik

### Abstract

In order to figure out the effectiveness and applicability of the constant rate-of-strain test method, undisturbed clay samples taken from a large number of regions, which are considered to be more reliable than the samples artificially made or taken from the limited areas, are utilized. The clay samples are taken from thirteen widespread regions located from the east to west coasts of the Korean peninsula. The constant rate-of-strain tests and conventional standard consolidation tests, for the purposes of comparison, are conducted one hundred thirteen times simultaneously on the 29 thin-walled tube samples filled with undisturbed clay. From the test results, engineering characteristics of the consolidation parameters are analyzed and statistical formula are processed through the regression analysis. According to the results of the analysis of two different test results, the effect of rate-of-strain on the consolidation parameters was negligible when the water pressure ratio was less than 20%. The compression index and consolidation coefficient obtained from the constant rate-of-strain test were large than, but consistent with, those of the standard consolidation test. When the Cassagrande method was applied, the pre-consolidation pressures obtained from the two different test methods were identical. It was found that the correlation formula between two different test results could be established through the statistical regression analysis.

### 요 지

일정변형률압밀시험의 효율성 및 적용성을 구체화하기 위해 인공시료 또는 한정된 지역에서 채취한 불교란 점성토 시료가 아닌 광범위한 지역에서 채취한 불교란 점성토 시료에 대해 시험을 실시하였다. 시료채취의 대상지역은 우리나라의 서해안에서 동해안에 이르는 13개 지역이며, 29개의 불교란 자연시료를 채취하여 일정변형률압밀시험을 113회 실시하였다. 또한, 비교하기 위해 표준압밀시험도 병행하였다. 시험결과로부터 얻어진 압밀정수에 대한 공학적 특성을 고찰하였고, 회기분석을 통해 통계식을 제안하였다.

두 시험법에 의해 산출된 압밀정수를 비교 분석한 결과 수압비가 20% 이내인 범위에서는 일정변형률압밀시험의 변형률 속도가 압밀정수에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 압축지수 및 압밀계수는 일정변형률시험의 결과 값이 표준압밀시험의 결과 값보다 크게 산출되었으나 일관성을 보였다. 또한, 선행압밀압력에 있어서는 두 시험법에 Cassagrande의 방법을 적용할 경우 서로 일치하는 것으로 나타났다. 본 연구로부터 일정변형률압밀시험을 사용하여 표준압밀시험에 상응하는 상호관계식 개발의 타당성을 확인할 수 있었다.

**Keywords :** Constant rate-of-strain, Consolidation coefficient, Compression index, Water pressure ratio, Regression analysis

\*1 정희원, 창조엔지니어링 부서장

\*2 정희원, 대전대학교 공과대학 토목공학과 부교수

\*3 정희원, 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수

## 1. 서 론

매립 또는 퇴적에 의한 점성토 지반에서 압밀침하량과 압밀속도의 추정이나 지반개량공법의 계획 또는 설계 시 필요한 점성토의 압밀특성에 대한 이해는 매우 중요하다. 점성토의 압밀특성은 상재하중에 의해 압밀층에 증가된 연직유효응력으로 발생하는 최종침하량과 임의의 침하량까지 걸리는 침하시간으로서 구분되며 각각 압축지수( $C_c$ )와 압밀계수( $C_v$ )의 크기에 따라 결정된다.

현재 통용되는 표준압밀시험방법은 Terzaghi에 의해 제안된 것으로 상재하중에 의해 발생된 압밀층 내 과잉간극수압의 소산에 의한 압밀변형은 미소하다는 가정 하에 얻어진 압밀이론을 적용한 단계재하( $\Delta P/P=1.0$ )에 의한 압밀시험법이다. 그러나 이 이론은 현실과 다른 많은 가정에 성립되며 시험법은 실제 압밀층에 가해진 하중증가와 일치하지 않으며 또한 압밀과정에서 투수성과 압축성이 변화되어 압밀계수는 일정치 않다. 그리고 압축지수, 압밀계수 등은 대부분 도해법에 의해 산출되고 있어 많은 개인오차 등을 유발할 수 있어 일관성을 찾는데 매우 난해할 뿐 아니라 해석에 장시간이 소요된다. 표준압밀시험에서 압밀시험결과를 분석해 보면 사용된 시료의 종류 및 두께에 따라 다소 차이는 있으나 각 하중단계에서 하중재하 후 수 시간 내에 일차압밀(primary consolidation)이 완료됨을 알 수 있다. 이것은 하중재하 시 발생하는 과잉간극수압이 시료의 압밀에 영향을 주지 않는 범위 내에서 하중재하 속도를 일정수준까지 높일 수 있음을 의미하며 또한 일정 속도로 연직변위 또는 연직하중을 증가시키는 방법을 사용한 압밀시험이 가능함을 나타낸다. 이는 변위 또는 재하하중의 증가 속도에 따라 전통적인 표준압밀시험에 비하여 매우 빠른 시간 내에 압밀을 완료시킬 수 있음을 의미한다.

본 연구에서는 연직방향의 변형률을 일정속도로 하여 시험하는 일정변형률압밀시험(Constant Rate-of-Strain Consolidation : CRSC) 특성에 관한 연구를 하였다. 현재까지 일정변형률 압밀시험에 대한 많은 연구(Crawford, C.B 1964, Smith 와 Wahls 1969, Wissa et al 1971, Lee 와 Sills 1981)가 진행되었으며 그 연구결과에 따르면 수 시간에서 수 일 내에 압밀시험을 완료할 수 있음을 보였다. 이 압밀시험으로 얻은 결과를 사용하여 기존 표준압밀시험으로 구할 수 있는 압밀정수에 상응하는 압밀정수를 구할 수 있다. 이 시험법의 장점은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 표준압밀시험과 비교하여 빠른 시간 내에 압밀시험을 완료하고 시험결과를 얻을 수 있다.
- 2) 시험자가 임의로 조절하는 측정시간 간격에 따라 기존 표준압밀시험과 비교하여 좀더 세밀한 간극비-유효응력 관계곡선을 얻을 수 있다.
- 3) 2)와 같은 조건에서 연속적인 압밀계수( $C_v$ )-유효응력 관계 곡선을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 국내 연약점성토를 대상으로 Crawford C.B(1964) 및 Wissa(1971)등이 제안한 변형률속도 제어에 의한 일정변형률압밀시험(constant rate-of-strain consolidation test ; ASTM D 4186-89)과 단계하중에 의한 기존 표준압밀시험(KS F 2316; ASTM D 2435-90)을 각각 실시하여 일정변형률압밀시험으로 구한 압밀정수(압축지수, 압밀계수, 선행압밀압력) 값과 표준압밀시험으로 구한 압밀정수 값을 비교 분석하여 연약지반 해석 시 일정변형률압밀시험으로 구한 압밀정수 적용의 타당성을 검토하였다.

## 2. 시험결과 해석 및 논거

### 2.1 시험결과

위에서 열거된 장점에도 불구하고 일정변형률 압밀시험이 현재 국내에서 많이 사용되지 않는 이유는 일정변형률 압밀시험으로부터 얻은 압밀정수가 표준압밀 시험으로부터 얻어진 압밀정수와 동등한 또는 상응하는 결과를 나타낼 것인지에 대해 확신이 없기 때문이다. 현재까지 우리나라에서 호트러지지 않은 다양한 현장시료(undisturbed sample)를 사용하여 수행된 일정변형률 압밀시험의 연구가 충분히 이루어지지 못한 결과이다. 현재의 시점에서 일정변형률 압밀시험으로 구한 압밀정수를 압밀해석시 적용하기 위해서는 상응하는 표준압밀시험으로부터 구한 압밀정수와 비교하여 상관성의 존재를 확인하고 그 적용의 타당성과 한계에 대해 우선적으로 검토되어야 할 것이다.

이를 위해 본 연구에서는 국내 서해안에서 동해안에 이르는 13개 지역에서 채취된 29개의 불교란 자연시료를 사용하여 한국산업규격(Korean Industrial Standards)에 따른 압밀시험(KS F 2316)과 미국표준시험방법(ASTM)에 따른 일정변형률압밀시험(ASTM D4186-89)을 실시하였

표 1. 표준압밀시험 결과

시료번호	채취위치	Cest	Crst	Cvlog	Cvroot	Pc	w <sub>0</sub>	STRAIN	Gs	e <sub>0</sub>	LL	PI	통입분류
No.1	전북익산	0.4684	0.0399	0.00136	0.00257	-	49	24.25	2.64	1.347	48.04	24.95	-
No.2	전북익산	0.4068	0.0532	0.00115	0.00184	10	43.81	26.77	2.71	1.262	40.93	15.73	CL
No.4	전남완도	0.2627	0.0332	0.00258	0.00373	2.2	35.1	28.85	2.71	1.028	30.08	6.69	OL, ML
No.5	충남보령	0.3353	0.0498	0.00061	0.00111	19	39.25	25.55	2.68	1.053	38.49	14.99	CL
No.6	충남보령	0.3819	0.0349	0.00143	0.00371	2.6	64.42	34.66	2.72	1.463	37.85	16.65	CL
No.7	경남울산	0.3851	0.0664	0.00029	0.00065	9.9	44.72	28.37	2.616	1.226	50.6	23.42	CH
No.8	경남울산	0.3787	0.0648	0.00035	0.00078	12.7	42.86	25.1	2.619	1.182	46.42	15.96	OL, ML
No.9	경남울산	0.6299	0.088	0.00055	0.00105	6.8	70.42	36.06	2.686	1.906	56.11	20.58	OH, MH
No.10	대구	0.1975	0.0299	0.00154	0.00362	12.4	31.32	15.95	2.72	0.866	33.2	9.27	CL
No.11	대구	0.1688	0.0266	0.00123	0.00255	16.1	31.12	11.64	2.639	0.809	38.93	14.81	CL
No.13	경기구리	0.1643	0.0266	-	0.02414	-	31.87	12.81	2.735	0.884	27.99	NP	NP
No.14	경기구리	0.2361	0.0266	0.00489	0.01082	18	37.04	15.2	2.765	1.047	37.23	14.73	CL
No.15	전북부안	0.2387	0.0316	0.00207	0.00513	-	33.71	17.88	2.708	0.989	35.92	NP	NP
No.17	전북부안	0.671	0.0432	0.00017	0.00021	-	60.16	31.31	2.607	1.621	71.2	39.04	CH
No.18	전남광양	0.7023	0.0947	0.00022	0.00037	2	80.28	41.18	2.756	2.225	57.11	30.09	CH
No.19	전남광양	0.7451	0.094	0.00025	0.00043	4	76.27	43.58	2.777	2.215	59.65	36.29	CH
No.20	영광도	0.2226	0.0299	0.00421	0.00678	8.8	37.22	19.23	2.736	1.061	33.67	10.37	CL
No.21	영광도	0.1694	0.0342	-	0.01555	-	33.41	13.4	2.712	0.922	28.51	NP	NP
No.23	대구	0.2106	0.0363	0.00076	0.00134	8.5	32.67	17.65	2.687	0.91	41.29	17.56	CL
No.24	전북군산	0.394	0.0449	0.00176	0.00339	7.2	46.23	27.24	2.732	1.275	35.51	9.47	OL, ML
No.25	전북군산	0.5023	0.0577	0.00022	0.00036	12	48.65	29.6	2.737	1.363	45.28	18.68	CL
No.29	영광도	0.1933	0.0577	0.0014	0.00351	-	31.08	16.25	2.741	0.821	25.94	NP	NP

주) Cest : 표준압밀시험에 의한 압축지수 Cvlog · log-t 법에 의한 정규압밀상태 평균일립계수 Cvrroot · root-t 법에 의한 정규압밀상태 평균일립계수(cm<sup>2</sup>/sec)  
 Crst : 표준압밀시험에 의한 압축지수 Pc · 초기압축지수 w<sub>0</sub> STRAIN · 최종변형률(%) Gs · 비중 ρ<sub>s</sub> · 초기극비 LL · 액성한계(%) PI · 소성한계(%)

표 2. 일정변형률압밀시험 결과

시료번호	RATE	C <sub>vc</sub>	C <sub>cc</sub>	w <sub>0</sub>	STRAIN	G <sub>s</sub>	e <sub>0</sub>	LL	PI
Crc02-2	0.02	0.001810	0.3973	42.55	25.78	2.71	1.182	40.93	15.7
Crc02-3	0.01	0.001333	0.3736	42.52	27.35	2.71	1.118	40.93	15.7
Crc02-4	0.1	0.002146	0.3859	44.19	21.53	2.71	1.217	40.93	15.7
Crc04-2	0.1	0.010554	0.2627	44.05	21.66	2.71	1.181	30.08	6.69
Crc04-3	0.05	0.011030	0.1924	41.48	21.72	2.71	1.126	30.08	6.69
Crc04-4	0.2	0.020316	0.1785	39.94	17.53	2.71	1.083	30.08	6.69
Crc05-1	0.2	0.002690	0.3690	39.34	14.51	2.68	1.114	38.49	15
Crc05-3	0.05	0.001304	0.3577	38.87	19.21	2.68	1.048	38.49	15
Crc05-6	0.1	0.001356	0.3772	38.98	20.59	2.68	1.037	38.49	15
Crc06-2	0.1	0.012465	0.3994	53.25	29.4	2.72	1.395	37.85	16.7
Crc06-3	0.05	0.003230	0.3752	49.35	28.56	2.72	1.333	37.85	16.7
Crc06-4	0.02	0.002477	0.3924	44.52	28.91	2.72	1.359	37.85	16.7
Crc07-2	0.1	0.001188	0.4075	48.2	18.59	2.62	1.327	50.6	23.4
Crc07-3	0.05	0.001166	0.4190	45.69	24.95	2.62	1.233	50.6	23.4
Crc07-4	0.02	0.000896	0.3489	40.96	26.06	2.62	1.195	50.6	23.4
Crc08-1	0.05	0.000997	0.4079	45.61	22.45	2.62	1.259	46.42	16
Crc08-3	0.02	0.002080	0.2693	34.4	19.02	2.62	0.953	46.42	16
Crc08-4	0.04	0.001195	0.3078	38.5	21.88	2.62	1.118	46.42	16
Crc09-1	0.1	0.001246	0.7646	75.32	35.3	2.69	2.042	56.11	20.6
Crc09-2	0.05	0.001129	0.8056	78.61	37.93	2.69	2.215	56.11	20.6
Crc09-3	0.02	0.002837	0.6015	64.87	33.54	2.69	1.882	56.11	20.6
Crc10-3	0.02	0.006746	0.1892	30.55	12.24	2.72	0.86	33.2	9.27
Crc10-4	0.1	0.005907	0.1975	30.18	11.75	2.72	0.855	33.2	9.27
Crc10-5	0.05	0.005730	0.1858	29.84	11.55	2.72	0.857	33.2	9.27
Crc11-1	0.05	0.015576	0.2225	31.85	14.58	2.64	0.839	38.93	14.8
Crc11-2	0.1	0.004281	0.2280	31.91	13.62	2.64	0.853	38.93	14.8
Crc11-3	0.08	0.005533	0.2244	31.15	13.66	2.64	0.823	38.93	14.8
Crc11-4	0.05	0.003148	0.1993	29.32	12.47	2.64	0.77	38.93	14.8
Crc13-1	0.1	0.052374	0.1677	31.59	12.33	2.74	0.908	27.99	NP
Crc13-2	0.08	0.0654715	0.1649	32.79	12.13	2.74	0.936	27.99	NP
Crc13-3	0.2	0.022493	0.2247	35.54	16.43	2.74	1.026	27.99	NP
Crc14-1	0.05	0.027075	0.2969	38.38	16.69	2.77	1.079	37.23	14.7
Crc14-2	0.1	0.045492	0.2829	37.59	15.66	2.77	1.07	37.23	14.7
Crc14-3	0.2	0.020412	0.2932	37.4	17.02	2.77	1.092	37.23	14.7

표 2. 일정변형률압밀시험 결과 (계속)

시험번호	RATE	Cvcr	Cccr	w <sub>0</sub>	STRAIN	Gs	e <sub>0</sub>	LL	PI
Crc15-1	0.05	0.08563	0.1790	26.56	11 53	2.71	0.795	35.92	NP
Crc15-3	0.2	0.055722	0.1448	24.77	10.26	2.71	0.714	35.92	NP
Crc15-5	0 1	0.005330	0.2387	38.67	14 17	2.71	1 114	35.92	NP
Crc17-2	0.02	0 000310	0.4573	55.75	25.79	2 61	1.508	71.2	39
Crc17-3	0 01	0.000333	0 4708	57.34	25 22	2.61	1 528	71 2	39
Crc17-5	0.03	0 000196	0.4071	49.58	17.21	2.61	1 317	71.2	39
Crc18-1	0.05	0 000546	0.8293	84 87	36.63	2.76	2.362	57.11	30.1
Crc18-2	0.08	0.000597	0.8537	81.87	35.41	2 76	2 254	57.11	30.1
Crc18-3	0 04	0.000564	0 7565	79 75	37	2.76	2 195	57 11	30.1
Crc19-3	0.04	0.000700	0.8471	74.64	38.31	2 78	2.098	59.65	36.3
Crc19-4	0 05	0.000708	0 8118	73 41	38.17	2.78	2.086	59.65	36.3
Crc19-5	0.08	0.000745	0 8374	75 1	38 21	2 78	2 095	59.65	36.3
Crc20-1	0.05	0 021339	0 2443	40.4	17.32	2 74	1.105	33.67	10 4
Crc20-2	0 1	0.024915	0.2149	37 94	16 41	2.74	1.039	33 67	10.4
Crc20-3	0.08	0.020175	0.2260	37.61	15.77	2 74	1.032	33.67	10 4
Crc21-1	0.05	0 071848	0 1846	34.13	13.51	2.71	0.946	28.51	NP
Crc21-2	0.1	0.101862	0 1811	34 57	13 18	2.71	0.96	28.51	NP
Crc21-3	0 3	0.076176	0.191	35 09	13 49	2.71	0 977	28.51	NP
Crc23-1	0 05	0 002181	0.2534	31.15	17 36	2.69	0.947	41.29	17.6
Crc23-2	0.08	0.002186	0.246	30.97	16 66	2.69	0 939	41 29	17.6
Crc23-3	0.04	0 002104	0.2533	32.35	16 83	2.69	0.927	41.29	17 6
Crc24-1	0.05	0 003174	0.3998	45.65	25.15	2.73	1.255	35.51	9.47
Crc24-2	0.08	0.002790	0.4165	46.86	24 34	2.73	1 303	35 51	9.47
Crc24-3	0.1	0.004284	0.4139	46.54	24.22	2 73	1 303	35.51	9.47
Crc25-1	0.05	0 000658	0 5096	47 95	25.04	2.74	1.371	45.28	18.7
Crc25-2	0 04	0.000553	0.5322	50 45	26.3	2.74	1.382	45 28	18 7
Crc25-3	0.02	0.000476	0.5116	48.7	26.52	2 74	1.371	45.28	18.7
Crc29-2	0.04	0 03979	0.1644	33 41	14.1	2 74	0.92	25.94	NP
Crc29-3	0.02	0.113756	0.1523	32 94	14.93	2.74	0 907	25 94	NP
Crc29-4	0.05	0 159034	0.1788	35.44	15.6	2 74	1.004	25.94	NP

주) RATE : 변형률속도(%/min) Cvcr CRS시험에 의한 정규압밀상태 평균압밀계수(cm<sup>2</sup>/sec) Cccr 압축지수  
w<sub>0</sub> 초기수분비(%) STRAIN 최종변형률(%) Gs : 비중 e<sub>0</sub> : 초기간극비 LL 액성한계(%) PI : 소성한계(%)

으며 시험기는 ASTM D4168-89의 기준에 따라 제작된 미국 GeoComp사의 일정변형률 압밀시험기를 사용하였다. 총 29개의 시료를 사용하여 표준압밀시험 22회(표 1)와 0.01 %/min.에서 0.2 %/min.사이의 변형률속도(rate)를 적용한 일정변형률 압밀시험을 91회(표 2)를 실시하였다. 일정변형률압밀시험시 시료의 포화를 위해 압력셀의 압

력과 같은 크기의 back pressure를 최소 48시간 동안 가한 후 시료저면에서 과잉간극수압을 측정하여 측정된 과잉간극수압과 시료에 가해진 전응력의 비(B-Value)가 0.99 이상인 경우에 시험을 실시하였다. 일정변형률압밀시험시 변형률속도는 한 시험에서 하나의 속도를 사용하였으며 시료 저면에서 측정된 과잉간극수압과 시료에 가

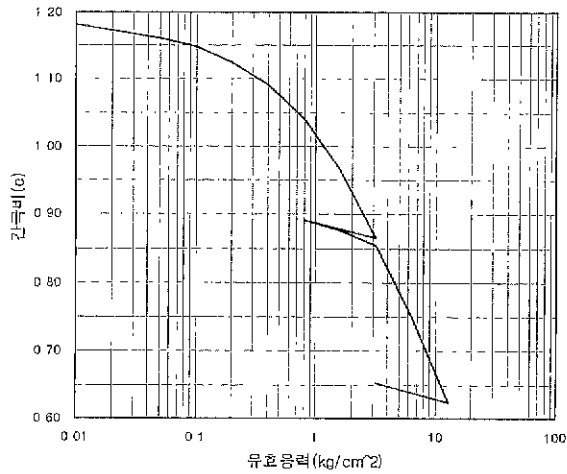


그림 1. 대표적인 표준압밀시험의 간극비-유효응력곡선. (시료 No 8)

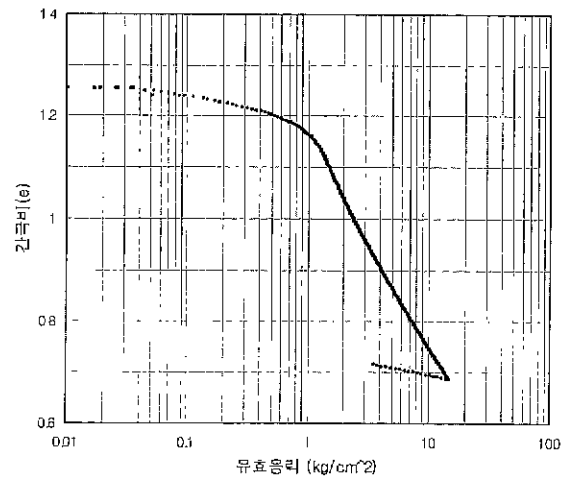


그림 2. 대표적인 일정변형률압밀시험의 간극비-유효응력곡선 (시료 No Crc24-1)

해진 전응력의 비(수압비)가 20%를 넘지 않는 범위 내에서 시험이 진행되었다. 압밀시험 실시 전후에 각각의 시료에 대하여 함수비(w), 비중(Gs), 액성한계(LL) 및 소성한계(PL) 등과 같은 흙의 물리적 특성을 알기 위한 시험을 실시하였다.

그림 1과 그림 2는 각각 본 연구에서 실시한 표준압밀시험으로 얻은 전형적인 간극비-유효응력 곡선과 일정변형률 압밀시험으로 얻은 전형적인 간극비-유효응력 곡선을 나타낸다.

## 2.2 압축지수 (Compression Index)

그림 3 은 표준압밀시험으로 구한 압축지수( $C_{c1}$ )와 일정변형률압밀시험으로 구한 압축지수( $C_{c2}$ )를 산포도로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 두 압축지수 값이 비교적 잘 일치하는 것으로 나타난다. 여기서 두 압축지수의 평균

값의 경우  $C_{c2}$  값이 약 7.4% 정도 크게 나오며 표준편차의 경우  $C_{c2}$  값이 약 19.2% 정도 크게 나오는데 표준편차의 경우는 시료수가 표준압밀시험의 시료수보다 많아서 크게 나오는 것으로 생각된다.

그림 3 에서 비교적 압축지수가 작은 값을 보이는 초반부에서는 두 압축지수 값이 비교적 잘 일치하나 압축지수가 큰 그림의 후반부에서는 일정변형률 압밀시험에 의한 압축지수( $C_{c2}$ )가 비교적 큰 것으로 나타난다. 이것은 초기 간극비가 큰 연약점성토의 최종침하량을 산정 할 때 일정변형률 압밀시험으로 구한 압축지수( $C_{c2}$ )값을 적용하면 표준압밀의 압축지수( $C_{c1}$ )를 사용한 것보다 더 많은 침하가 일어나는 것으로 계산됨을 의미한다. 따라서 일정변형률 압밀시험으로 구한 압축지수( $C_{c2}$ )를 적용하여 최종침하량 산정 시에는 이 점을 신중히 고려하여야 할 것이다.

이 문제점을 보완하는 방법으로 표준압밀시험으로 구한 압축지수( $C_{c1}$ )와 일정변형률압밀시험으로 구한 압축

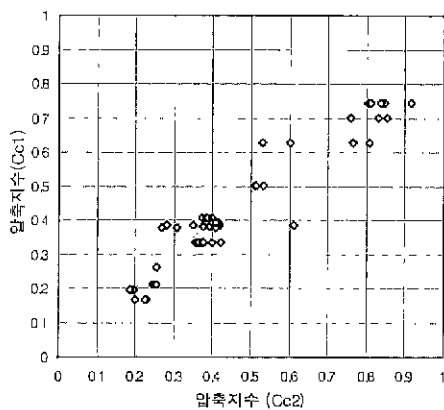


그림 3.  $C_{c1}$ - $C_{c2}$  산포도

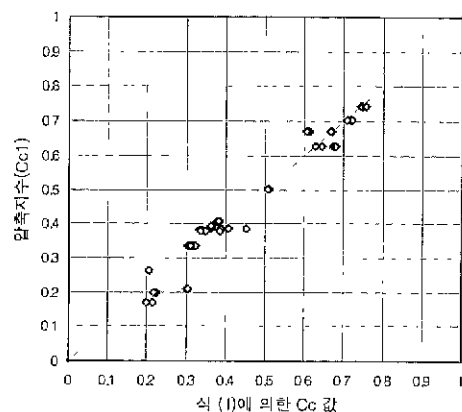


그림 4. 압축지수( $C_{c1}$ )와 식 (1)의 비교

지수 ( $C_{e2}$ ) 사이 통계적인 상관성을 분석하여 압축지수 ( $C_{ci}$ )를 종속변수로 하고 일정변형률압밀시험으로 구한 압축지수( $C_{e2}$ )를 독립변수로 하는 통계식을 구하여 일정 변형률 압밀시험으로 구한 압축지수를 보정하는 식 (1)을 만들었다. 이 식을 사용하여 일정변형률압밀시험의 압축 지수( $C_{e2}$ )값과 표준압밀시험의 압축지수( $C_{ci}$ )와의 차이를 산정 할 수 있어 일정변형률시험 결과( $C_{e2}$ )를 사용한 압 밀침하 해석 시 참고 할 수 있다.

$$C_{ci} = 0.0604 + 0.8 C_{e2} \quad (1)$$

$$R^2 = 0.908$$

그림 4는 측정된 압축지수( $C_{ci}$ )와 식 (1)로 구한 압축지 수 값의 분포도이다.

### 2.3 압밀계수 (Coefficient of Consolidation)

표준압밀시험 결과를 사용한 압밀계수( $C_v$ ) 결정 방법 은 우리나라 현장에서 가장 많이 사용하는 Root-t 법을 사 용하였다. 그림 5와 그림 6은 각각 본 연구에서 실시한 표 준압밀시험으로 압밀계수를 구하기 위한 전형적인 Root-t 법의 곡선과 Root-t 법으로 구한 압밀계수와 유효응력 사 이의 곡선을 나타낸다.

표준압밀시험에 사용한 동일시료를 사용하여 3-4회 변 형률 속도를 변경시켜 한 개의 시료에 대하여 3-5회씩 일 정변형률압밀시험을 실시하였다. 같은 시료를 사용하여 변형률속도에 따라 3-5회 실시한 이유는 일정변형률압밀

시험 시 사용한 변형률 속도가 일정변형률압밀시험으로 구한 압밀계수에 영향을 미치는지를 판단하기 위함이다. 여기서 구한 압밀계수는 Wissa(1971)가 제안한 이론에 근 거하여 구하였다. 일정변형률압밀시험의 압밀계수는 압 밀해석 시 압밀시료의 거동을 선형으로 가정하느냐 또는 비 선형으로 가정하느냐에 따라 압밀계수 식이 결정된다. 그 식은 선형거동으로 가정한 경우 압밀계수( $C_{v2}$ )의 결정 은 식 (2)와 같이 정의되며

$$C_{v2} = \frac{h^2 \Delta \sigma_v}{2 u_B \Delta t} \quad (2)$$

비 선형거동으로 가정한 경우 압밀계수( $C_{v3}$ )의 결정은 식 (3)으로 정의된다.

$$C_{v3} = \frac{h^2 \log \left( \frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}} \right)}{2 \Delta t \log \left( 1 - \frac{u_B}{\sigma_v} \right)} \quad (3)$$

여기서

- $\sigma_{v1}$ : 시간  $t_1$ 일 때 시료에 작용하는 연직전응력
- $\sigma_{v2}$ : 시간  $t_2$ 일 때 시료에 작용하는 연직전응력
- $u_B$ : 임의의 시간 t 일 때 시료하부에서 측정된 과잉간극수압
- $u_B / \sigma_v$ : 시료 저면의 수압비(과잉간극수압/전응력), 시간  $\Delta t$  동안의 평균값
- $\sigma_v$ : 임의시간 t 일 때 시료에 작용하는 연직전응력

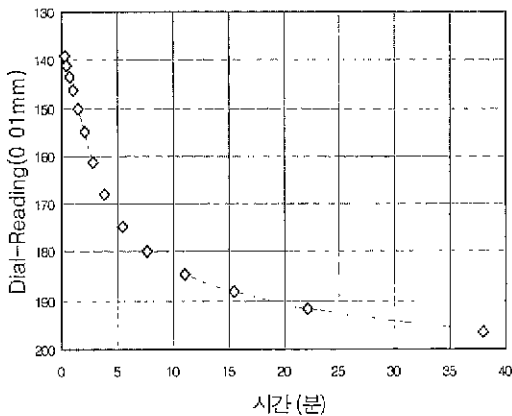


그림 5. 대표적인 표준압밀시험의 시간-침하곡선(Root-t법), (시료No.8)

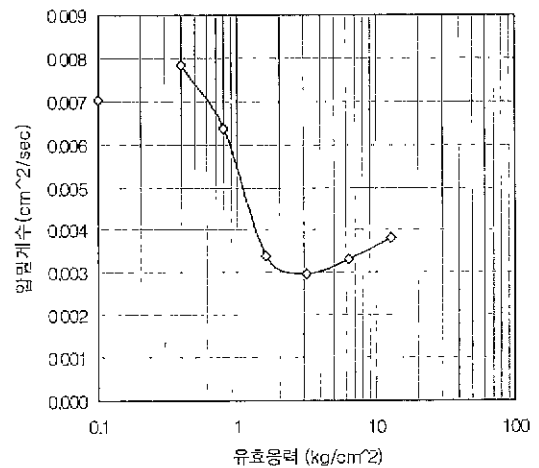


그림 6. 대표적인 표준압밀시험의 유효응력-압밀계수(Root-t법) (시료No.24)

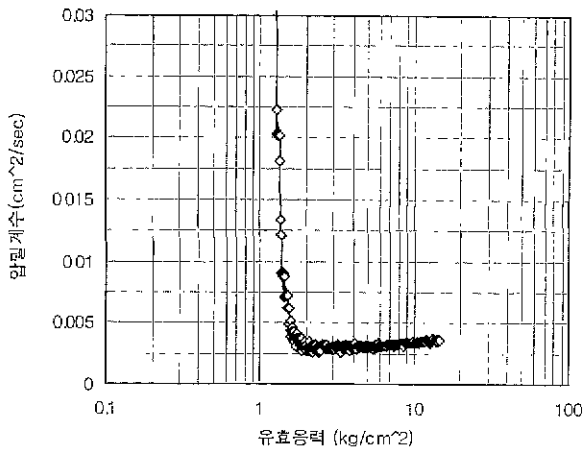


그림 7. 일정변형률압밀시험의 전형적인 유효응력-압밀계수 곡선(시료No Crc24-1)

그림 7은 일정변형률압밀시험으로 얻은 전형적인 압밀계수-유효응력 곡선을 나타낸다. 표준압밀시험의 압밀계수( $C_{v1}$ )-유효응력 곡선(그림 6 참조)의 경우 가해진 하중단계수만큼의 한정된 수의 점으로 표시되는 것과 비교하여 일정변형률압밀시험의 압밀계수( $C_{v2}$  또는  $C_{v3}$ )-유효응력 곡선은 연속적으로 표시됨을 알 수 있다. 표준압밀시험의 경우 시험결과 측정 시 발생할 수 있는 기계적인 오차와 특히 시험자에 따른 개인적인 오차가 압밀계수( $C_{v1}$ ) 값에 치명적일 수 있으나 일정변형률압밀시험의 경우는 표준압밀시험과 비교하여 시험 시 발생할 수 있는 기계적 오차와 시험자의 개인적 오차를 최소화하여 더욱 안정적인 시험결과 즉 일관된 압밀계수( $C_{v2}$  또는  $C_{v3}$ ) 값을 얻을 수 있다.

그림 6과 그림 7에서와 같이 압밀계수는 유효응력의 증가에 따라 그 값이 변화됨을 알 수 있다. 표준압밀시험과 일정변형률압밀시험의 모두에서 압밀계수는 하중의 초반부에서 큰 값을 보이다가 선행압밀압력점을 중심으로 안정화되어지며 시험결과 대부분 정규압밀응력 상태에

서 압밀응력이 증가함에 따라 압밀계수가 조금씩 증가하는 것으로 나타난다. 압밀 초기에는 시료가 지중에서 받던 구속응력이 시료채취로 제거되어 시료가 팽창하여 원지반의 투수계수( $k$ )값보다 채취된 시료의 투수계수 값이 증가되어 생기는 현상이고 시료의 응력이력에 따라 나타난 현상이다.

본 논문에서 표준압밀시험과 일정변형률압밀시험으로 구한 압밀계수( $C_{v1}$ ,  $C_{v2}$ ,  $C_{v3}$ ) 값들은 채취된 시료가 지반 내에서 받았던 최대 연직유효응력(선행압밀압력) 이후의 각 하중단계에서 얻어지는 압밀계수의 평균값을 사용하였다.

일정변형률압밀시험으로 구한 압밀계수( $C_{v2}$ ,  $C_{v3}$ )는 본 시험에 사용된 변형률 속도의 범위 (0.01%/min ~ 0.2%/min)와 시료 저면에서 측정된 과잉간극수압과 시료에 가해진 전응력의 비가 20%이하인 경우에 압밀계수( $C_{v2}$ ,  $C_{v3}$ )가 변형률속도에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 즉 본 연구의 시험조건 내에서 압밀계수( $C_{v2}$ ,  $C_{v3}$ )와 변형률속도 사이에는 통계적 유의성을 찾기 어려운 것으로 나타났다.

압밀시험으로 구한 압밀계수( $C_{v1}$ ,  $C_{v2}$ ,  $C_{v3}$ ) 값들 사이의 관계를 그림 8 과 그림 9에 산포도로 나타내었다. 그림 8은 표준압밀시험으로 구한 압밀계수( $C_{v1}$ )와 일정변형률압밀시험으로 구한 압밀계수( $C_{v2}$ ) 사이의 산포도이며 그림 9는 표준압밀시험으로 구한 압밀계수( $C_{v1}$ )와 일정변형률압밀시험으로 구한 압밀계수( $C_{v3}$ ) 사이의 산포도이다. 그림에서 보듯이  $C_{v2}$ 와  $C_{v3}$ 가  $C_{v1}$ 보다 전체적으로 크게 나타나며 또한  $C_{v2}$ 가  $C_{v3}$ 보다 전체적으로 큰 값을 보임을 알 수 있다.

표 3은 시험으로 구한 압밀계수( $C_{v1}$ ,  $C_{v2}$ ,  $C_{v3}$ ) 값들의 통계분석표이다. 표에서 보듯이  $C_{v2}$  값이  $C_{v1}$  값보다 평균적으로 42.0% 정도 크게 나타나며  $C_{v3}$ 는  $C_{v1}$  값보다 평균적

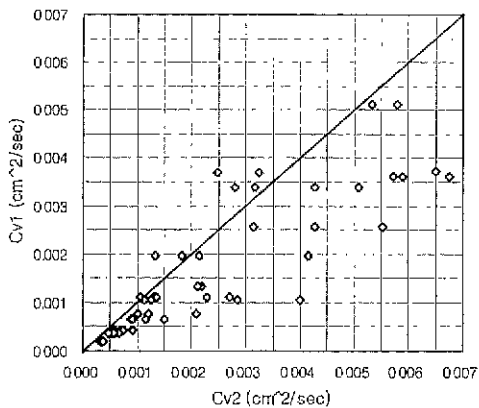


그림 8.  $C_{v1}$  과  $C_{v2}$  사이의 산포도

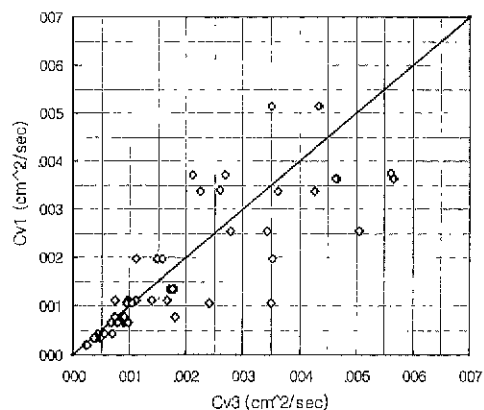


그림 9.  $C_{v1}$  과  $C_{v3}$  사이의 산포도



표 3. 압밀계수들의 통계분석표

	평균	중앙값	표준오차	최소값	최대값	Range	표준편차	분산
$C_{v1}$	0.00157	0.00111	0.00018	0.00021	0.00513	0.00492	0.00137	1.866E-06
$C_{v2}$	0.00223	0.00136	0.00025	0.00031	0.00675	0.00644	0.00185	3.434E-06
$C_{v3}$	0.00180	0.00110	0.00021	0.00022	0.00567	0.00544	0.00154	2.362E-06

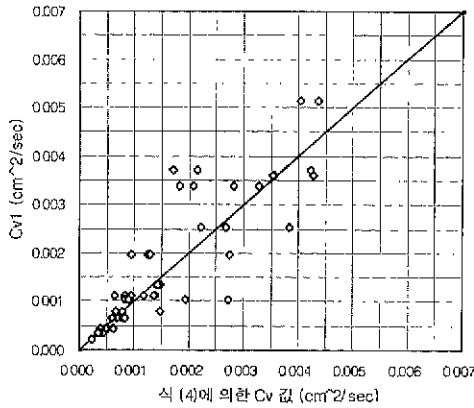


그림 10.  $C_{v1}$  과 식(4) 사이의 산포도

으로 14.6% 정도 크게 나타난다. 이는 그림 8과 그림 9에서 보는 바와 같다. 결과적으로  $C_{v3}$  값이 현재 일반적으로 사용중인 표준압밀시험으로 구한 압밀계수( $C_{v1}$ )에 근접함을 알 수 있다. 미국표준시험방법(ASTM)에서 제시된 일정변형률압밀시험(ASTM D4186-89)에서도 압밀계수 값은 비선형거동 가정으로 구한 압밀계수 값을 사용하도록 규정하고있다. 결론적으로 본 시험에서 얻어진 결과를 볼 때 일정변형률압밀시험으로 구한 압밀계수는 비선형거동가정으로 구한 것을 사용하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 그러나 일정변형률압밀시험의 압밀계수( $C_{v3}$ )를 설계에 적용시  $C_{v3}$  값이 표준압밀의 압밀계수( $C_{v1}$ ) 값보다 평균적으로 14.6% 크게 나온 사실을 염두에 두어야한다.

이는  $C_{v3}$  값을 사용하면 압밀해석 시  $C_{v1}$ 을 사용하여 계산한 것과 비교하여 보다 빠른 시간 내에 압밀이 진행되는 것으로 계산되어진다. 이 점을 보완하는 방법으로 표준압밀시험으로 구한 압밀계수( $C_{v1}$ )와 일정변형률압밀시험으로 구한 압밀계수( $C_{v3}$ ) 사이의 통계적인 상관성을 분석하여  $C_{v1}$ 을 종속변수로 하고  $C_{v3}$ 를 독립변수로 하는 통계식을 구하여 일정변형률 압밀시험으로 구한 압밀계수( $C_{v1}$ )를 보정하는 식 (4)를 구하였다. 이 식을 사용하면 일정변형률압밀시험의 압밀계수( $C_{v3}$ )와 표준압밀시험의 압밀계수( $C_{v1}$ ) 사이의 관계를 알 수 있어 일정변형률압밀시험 결과를 사용한 압밀침하 해석 시 참고 할 수 있다. 그림 10은

$C_{v1}$ 과 식 (4) 사이의 관계를 산포도로 나타낸 것이다.

$$C_{v1} = 0.5077 C_{v3}^{0.9238} \quad (4)$$

$$R^2 = 0.872$$

#### 2.4 선행압밀압력(Pre-Consolidation Pressure)

본 연구에서는 동일한 시료를 사용한 표준압밀시험과 일정변형률압밀시험 으로부터 각각의 선행압밀압력을 구하여 두 시험으로 구한 값의 상관성을 분석하여 일정변형률압밀시험 으로부터 구한 선행압밀압력을 표준압밀 시험 으로부터 구한 값과 비교하여 설계 시 사용할 수 있는지를 검토하였다. 이를 위해 표준압밀시험의 압밀곡선 ( $e - \log \sigma'$ )을 이용하여 첫째로 Cassagrande 방법(1936)으로 선행압밀압력( $P_{c1}$ )을 구하고 둘째로 Burmister 방법(1951)을 사용하여 선행압밀압력( $P_{c2}$ )을 구하였다. 일정 변형률압밀시험의 압밀곡선 ( $e - \log \sigma'$ )을 사용해서는 첫째로 Cassagrande 방법으로 선행압밀압력( $P_{c3}$ )을 구하고, 둘째로 Wissa(1971)가 제안한 방법을 사용하여 D-modulus 와 유효압밀응력사이의 관계곡선으로부터 선행압밀압력( $P_{c4}$ )을 구하였다. 이후 전술된 4 종류의 선행 압밀압력의 명칭을 약어로  $P_{c1}$ ,  $P_{c2}$ ,  $P_{c3}$ ,  $P_{c4}$  등과 같이 표기한다.

그림 11에서 그림 16까지는 위에서 정의된 압밀시험방법에 따라 4가지의 방법으로 구한 선행압밀압력들 사이의 관계를 나타낸다. 그림 11에서 그림 13까지는 표준압밀 시험으로 구한  $P_{c1}$ 에 대하여  $P_{c2}$ 와  $P_{c3}$ ,  $P_{c4}$  사이의 관계를 산포도로 나타낸 것이며, 그 분포 값들을 정량적으로 비교해보면  $P_{c2}$ ,  $P_{c3}$ ,  $P_{c4}$ 가  $P_{c1}$ 에 비해 각각 평균적으로 38.4%, 47.3%, 65.0% 정도 크게 나타난다. 그림 14는  $P_{c3}$ 와  $P_{c4}$ 사이의 산포도를 나타내며, 두 결과가 상당한 유사성을 갖는 것으로 보이며,  $P_{c4}$ 가  $P_{c3}$ 에 비해 평균적으로 약 12.2 % 정도 크게 나타난다. 그림 15와 그림 16은 각각  $P_{c3}$ ,  $P_{c4}$ 와  $P_{c2}$ 사이의 산포도이며, 그 값들을 정량적으로 비교해보면  $P_{c3}$ ,  $P_{c4}$ 가  $P_{c2}$ 에 비해 각각 평균적으로 9.3%, 28.3% 정도 크

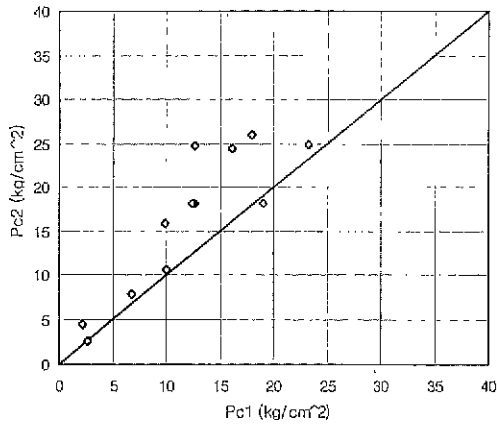


그림 11.  $P_{c1}$ 과  $P_{c2}$  사이의 산포도

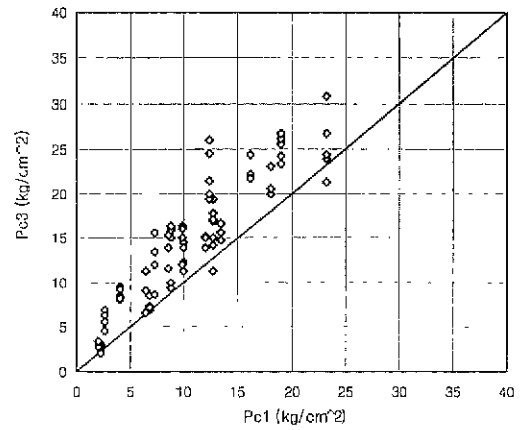


그림 12.  $P_{c1}$ 과  $P_{c3}$  사이의 산포도

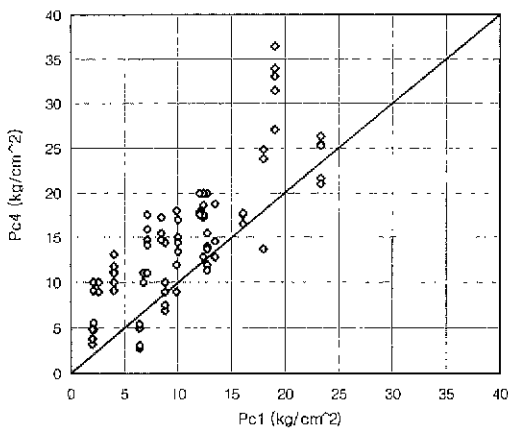


그림 13.  $P_{c1}$ 과  $P_{c4}$  사이의 산포도

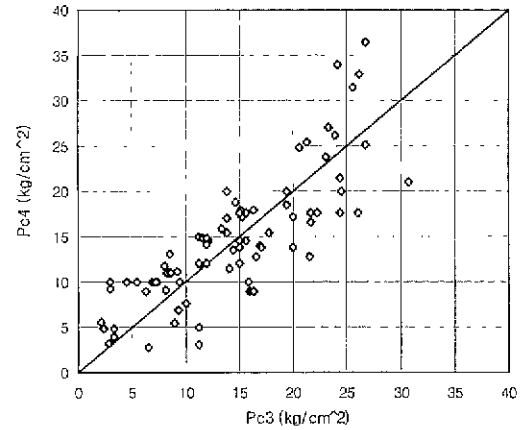


그림 14.  $P_{c3}$ 과  $P_{c4}$  사이의 산포도

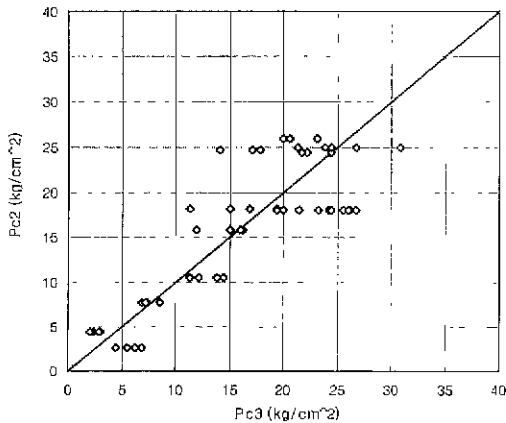


그림 15.  $P_{c3}$ 과  $P_{c2}$  사이의 산포도

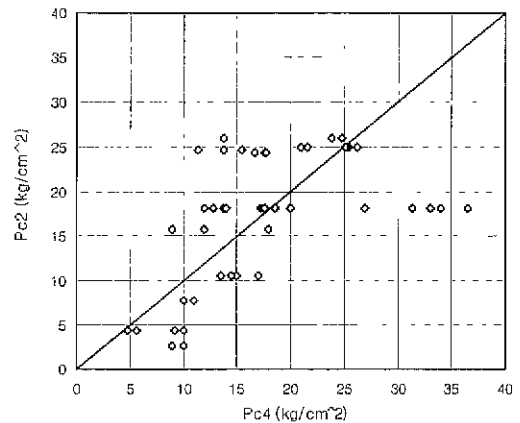


그림 16.  $P_{c4}$ 와  $P_{c2}$  사이의 산포도

게 나타난다.

여기서 구한 4 종류의 선형압밀압력과 시험변수들 사이의 상관성을 분석하기 위해 상관계수 해석을 하였다.

표 4는 표준압밀시험 및 일정변형률시험 결과를 사용하여 구한 4종류의 선형압밀압력( $P_{c1}$ ,  $P_{c2}$ ,  $P_{c3}$ ,  $P_{c4}$ )과 시험변수들을 포함하는 변수들 사이의 상관성을 나타내는 상

관계수 표이다. 이 표에 의하면 일정변형률압밀시험 결과를 사용하여 구한  $P_{c1}$  과  $P_{c2}$  사이에는 상관계수 값이 0.910 이고 같은 시료를 사용한 일정변형률압밀시험 결과로부터 구한  $P_{c3}$  과  $P_{c4}$  사이에는 상관계수 값이 0.818을 보인다.  $P_{c1}$  과  $P_{c3}$  및  $P_{c4}$  사이의 상관계수 값은 각각 0.921 및 0.818 이며 또한  $P_{c2}$ 와  $P_{c3}$  및  $P_{c4}$  사이의 상관계수 값은 각각

표 4. 선행압밀압력과 토질정수 사이의 상관계수표

	Pc1	Pc2	Pc3	Pc4	RATE	수압비
Pc1	1.000	0.910	0.921	0.818	-	-
Pc2	0.910	1.000	0.870	0.585	-	-
Pc3	0.921	0.870	1.000	0.818	0.047	0.100
Pc4	0.818	0.585	0.818	1.000	0.058	0.163
RATE	-	-	0.047	0.058	1.000	0.080
수압비	-	-	0.100	0.163	0.080	1.000

주) Pc1 : 표준압밀시험에서 Cassagrande의 방법에 의한 선행압밀압력(kg/cm<sup>2</sup>)  
 Pc2 : 표준압밀시험에서 Burnister의 방법에 의한 선행압밀압력(kg/cm<sup>2</sup>)  
 Pc3 : 일정변형률압밀시험에서 Cassagrande의 방법에 의한 선행압밀압력(kg/cm<sup>2</sup>)  
 Pc4 : 일정변형률압밀시험에서 Wissa의 방법에 의한 선행압밀압력(kg/cm<sup>2</sup>)  
 RATE : 변형률속도(%/min)  
 수압비 : 과잉간극수압 / 전응력

0.870, 0.585 이다. 현재 표준 시험방법으로 사용되는 표준 압밀시험 결과를 사용하여 구한 선행압밀압력(P<sub>c1</sub>)을 기준으로 다른 선행압밀압력과 비교할 때 P<sub>c3</sub>와는 0.921, P<sub>c2</sub>와는 0.910, P<sub>c4</sub>와는 0.818의 상관계수 값을 보인다. 이는 상관계수 값에서 보듯이 P<sub>c1</sub> 과 P<sub>c3</sub> 사이의 상관성이 다른 선행압밀압력 사이의 상관성과 비교하여 가장 크다는 것을 의미하며 일정변형률시험을 사용하여 압밀시험을 할 경우 표준압밀시험으로 구한 선행압밀압력(P<sub>c1</sub>)과의 상관성이 높은 P<sub>c3</sub>을 구하여 P<sub>c1</sub>을 추정하는 것이 가장 신뢰성이 높고 합리적인 것을 의미한다.

일정변형률압밀시험의 경우 변형률속도에 따라 구한 압밀곡선이 정확히 일치하지는 않는다(그림 17 참조). 이는 하중 재하속도에 따른 영향으로 발생하는 것으로 일반적으로 그 속도가 증가하게 되면 시료내의 과잉간극수압을 증가시키며 주어진 전응력 범위 내에서 증가된 과잉간극수압만큼 압밀이 적게 일어나기 때문이며, 이때 만약 과잉간극수압의 증가량이 재하하중(전응력)의 증가량과 같아지면 압밀이 이루어지지 않는다. 표 4 에서 보듯이 일정변형률압밀시험 에서 구한 P<sub>c3</sub> 와 P<sub>c4</sub>는 변형률속도(RATE)와의 상관계수 값이 각각 0.047 및 0.058로 본 시험에서 사용된 변형률속도 내에서는 선행압밀압력(P<sub>c1</sub> 과 P<sub>c3</sub>)에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 시험시 사용된 변형률 속도내에서는 같은 시료의 경우 선행압밀압력 값이 큰 차이가 없음을 의미한다. 또한 시료하단에서 시험동안 측정된 과잉간극수압과 시료에 가해진 전응력의 비와 P<sub>c3</sub> 및 P<sub>c4</sub> 사이의 상관계수 값은 각각 0.100 및 0.163이다. 이 값은 변형률속도와의 상관계수 값보다는

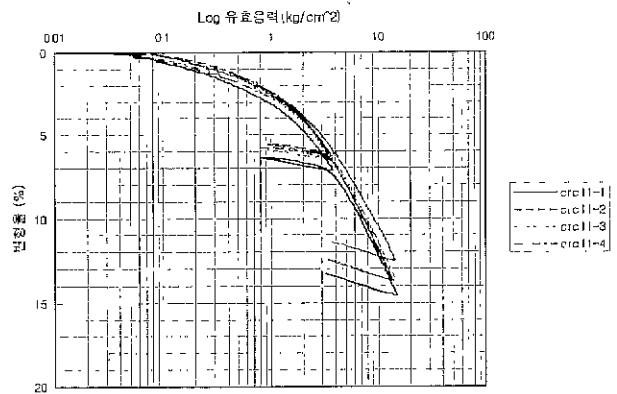


그림 17. 일정변형률압밀시험에 의한 압밀곡선

약간 큰 값을 보이기는 하지만 상관성은 거의 없는 것으로 판단된다.

표 4 에서 보듯이 P<sub>c1</sub> 과 P<sub>c3</sub>사이에서 가장 높은 상관계수 값(0.921)을 나타내며 또한 그림 12 에서 보듯이 일정변형률압밀시험의 선행압밀압력(P<sub>c3</sub>)은 표준압밀시험의 선행압밀압력(P<sub>c1</sub>)과 비교하여 일정한 추세를 가지고 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 설계조건이 동일한 경우 일정변형률 압밀시험의 선행압밀압력(P<sub>c3</sub>)을 압밀해석 시 사용하면 표준압밀시험의 선행압밀압력(P<sub>c1</sub>)을 사용하여 구한 압밀침하량 보다 작게 산출됨을 의미한다.

앞서 언급했듯이 P<sub>c3</sub>가 P<sub>c1</sub>보다 평균적으로 47.3% 정도 크게 나타난다. 이것은 시험법의 차이에서 기인하는 것으로 생각되며 그 추세가 일관성을 보이므로 두 값 사이에 통계적인 관계를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 이런 가정 하에서 P<sub>c1</sub> 을 P<sub>c3</sub> 및 토질특성계수들의 함수로 나타내는 통계 식을 구한다면 일정변형률 압밀시험으로 구한 선행압밀압력(P<sub>c3</sub>)을 보정하면 압밀해석시 표준압밀시험의 선행압밀압력(P<sub>c1</sub>)을 대신할 수 있을 것으로 생각된다. 이를 위해 표준압밀시험에 의한 선행압밀압력(P<sub>c1</sub>)을 종속 변수로 하고 일정변형률압밀시험의 선행압밀압력(P<sub>c3</sub>)과 시험변수들 및 토질정수들을 포함시켜서 다항회귀분석을 실시하였다.

통계해석시 독립변수를 추가할 때마다 통계 식의 결정계수(R<sup>2</sup>) 값이 크기에 차이는 있지만 지속적으로 증가됨을 알 수 있다. 그러나 결정계수의 경우 일정변형률압밀시험의 선행압밀압력(P<sub>c3</sub>)에서 큰 값의 증가를 보이거나 나머지 독립변수의 추가 시 각 추가 단계별 최대 0.022에서 최소 0.002까지의 R<sup>2</sup> 값이 증가를 보이고 표준오차는 일정변형률압밀시험의 선행압밀압력(P<sub>c3</sub>)을 독립변수를 포함하는 통계 식의 표준오차 값과 비교하여 이후 식에 독립변수

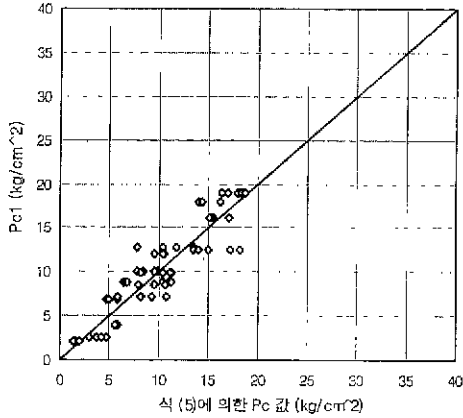


그림 18. 선행압밀압력( $P_{c1}$ )과 식 (5)의 비교

추가 시 큰 변화가 없는 것으로 나타난다. 일정변형률압밀 시험의 선행압밀압력( $P_{c3}$ )을 제외한 나머지 토질특성계 수 추가 시 결정계수 값의 증가가 미미한 이유는 일정변형률압밀시험의 선행압밀압력( $P_{c3}$ ) 값이 이미 토질특성계 수의 영향을 포함하였기 때문이다. 이런 이유에서 표준압 밀시험에 의한 선행압밀압력( $P_{c1}$ )을 종속변수로 일정변형률압밀시험의 선행압밀압력( $P_{c3}$ )을 독립변수로 하는 식 (5)을 최종적인 통계 식으로 선택하였다. 그림 18는 표준압밀시험의 선행압밀압력( $P_{c1}$ ) 과 식 (5)로 구한 값의 분포도이다.

$$P_{c1} = 0.6475 P_{c3}^{1.0248} \quad (5)$$

$$R^2 = 0.875$$

### 3. 결론

본 연구는 국내 연약점성토에 대하여 전통적인 표준압 밀시험 과 일정변형률압밀시험을 실시하여 두 시험법에 서 얻어진 압밀정수(압축지수, 압밀계수, 선행압밀압력) 들 사이의 통계적인 상관성 및 일관성에 대한 연구결과 다 음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 두 시험법으로 구한 압밀정수들 사이에 통계적 상관관 계가 높은 것으로 나타났으며 일정 변형률압밀시험의 시험변수인 변형률속도는 과잉간극수압과 전응력의 비(수압비)가 시험 중에 20%를 넘지 않는 한도에서 는 압밀정수에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타 났다.
- (2) 압축지수의 경우 일정변형률압밀시험의 압축지수가

표준압밀시험의 압축지수보다 평균적으로 7.4% 정도 크게 나오며 그 추세가 통계적으로 일관성을 보였다.

- (3) 압밀계수의 경우 일정변형률압밀시험의 압밀계수 ( $C_{v2}$  와  $C_{v3}$ )가 표준압밀 시험의 압밀계수( $C_{v1}$ )에 비하여 평균적으로 42.0% 및 14.6% 크게나오며 그 추세가 통계적으로 일관성을 보였다.
- (4) 표준압밀시험에서 Cassagrande 방법으로 구한 선행압 밀압력( $P_{c1}$ )과 일정변형률압밀시험에서 Cassagrande 방법으로 구한 선행압밀압력( $P_{c3}$ ) 사이에 높은 통계적 인 상관성을 보였다.

### 참고문헌

1. Armour, D. W., Jr. and Drnevich, V. P. (1986), "Improved Techniques of the Constant Rate-of-Strain Consolidation Test", *Consolidation of Soils. Testing and Evaluation*, ASTM STP 892. R. N. Yong and F. C. Townsend, Eds, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp 170 ~ 183.
2. Burmister, D. M., (1951), "The Application of Controlled Test Methods in Consolidation Testing", *Consolidation Testing of Soils*, ASTM STP 126, pp. 83 ~ 91.
3. Carrier, W. D., III. (1985). "Consolidation Parameters derived from Index Tests", *Geotechnique* Vol. 35, No 2, pp.211 ~ 213, pp.291 ~ 292.
4. Cassagrande, A (1936), "Determination of the Preconsolidation Load and Its Practical Significance", *Proceedings, 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* Cambridge. Mass, Vol 3, pp 60 ~ 64.
5. Crawford, C B. (1959), "The Influence of Rate-of-Strain on Effective Stresses in Sensitive Clay", *ASTM Special Technical Publication No 254*, pp.36 ~ 61.
6. Crawford, C. B. (1986), "State of the Art: Evaluation and Interpretation of Soil Consolidation Test", *Consolidation of Soils Testing and Evaluation*, ASTM STP 892, pp.71 ~ 103.
7. Lee, K., Choa, V., Lee, H., and Quek, S. H. (1993), "Constant Rate-of-Strain Consolidation of Singapore Marine Clay". *Geotechnique*, Vol 43, No.3, pp.471 ~ 488
8. Leroueil, S. and Kabbaj, M (1985). "Stress-Strain-Rate Relation for the Compressibility of Sensitive Natural Clays", *Geotechnique*, Vol. 35, No.2. pp.283 ~ 292
9. Lowe, J., III. (1974). "New Concepts in Consolidation and Settlement Analysis," *Journal of Geotechnical Division*, ASCE, Vol. 100. No. G16, Proc. Paper 10623, pp.571 ~ 612.
10. Mikasa, M. (1965), "The Consolidation of Soft Clay, A New Consolidation Theory and It's Application," *Japanese Society of Civil Engineers, Kajama Institution Pub Co.*, Reprint from Civil Engineering in Japan, 1965, pp.21 ~ 26.
11. Nagaraj, T and Murty, B. R. S. (1985), "Prediction of the Preconsolidation Pressure and Recompression Index of Soils", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.8, No.4, pp 199 ~ 202.
12. Raju, P. S. R., Pandian, N S., and Nagaraj, T. S. (1995), Analysis and Estimation of Coefficient of Consolidation, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18, No 2, pp.252 ~ 258.

13. Smith, R. E. and Wahals, H. (1969), "Consolidation under Constant Rate of Strain," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 95, No. SM2, Proc. Paper 6452, pp.519~539
14. Sällfors, G. (1975). *Preconsolidation Pressure of Soft High-Plastic Clays*, Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
15. Umehara, Y. and Zen, K. (1980), "Constant Rate-of-Strain Consolidation for very Soft Clayey Soils", *Japanese Society of Soil Mech and Found Eng.*, Vol. 20, No.2, pp.79~95.
16. Wissa, A. E Z and Christian, J. T. (1971), "Consolidation at Constant Rate-of-Strain," *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 97, No. SM10, Proc. Paper 8447, pp.1393~1413.
17. Zen, K. and Umehara, Y. (1986), "A New Consolidation Testing Procedure and Technique for Very Soft Soil", *Consolidation of Soils Testing and Evaluation*, ASTM STP 892, R. N. Yong and F. C. Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.405-432.
18. 백영식(1978), "토질공학에서의 안전율, 파괴확률에 관한 연구", *대한토목학회지*, 제26권, 제 5호, pp, 18~21.
19. 김광태(1999), "표준압밀시험과 일정변형률압밀시험에 의한 연약 점성토의 압밀정수 추정에 관한 연구", 경희대학교, 석사학위 논문
20. 양구승(1987), "액성한계와 압밀계수와의 관계에 대한 시험적 연구", 서울대학교, 석사학위 논문.

(접수일자 2000. 6. 1)