

서해점토에 대한 선행압밀하중 선정기법 비교

Comparisons of methods determining preconsolidation pressure for western marine clay of Korea

임은상¹⁾, Eun-Sang Im

¹⁾한국수자원공사 K-water연구원, 선임연구원, S. Researcher, Korea Institute of Water and Environment

SYNOPSIS : In recent days, the development project for industry or housing complex at west coast of Korea is on an increasing trend. the design of soft ground is necessarily required. So, the evaluation of consolidation characteristics for soft ground is very important in design and construction. Especially, the correct evaluation of preconsolidation pressure or OCR for given soft ground is essential at the west coast that has a large tidal range, since it affects the settlement of soft ground.

In this study, various methods determining preconsolidation pressure were carried out to investigate the application of each method. The preconsolidation pressure that evaluated from the results of conventional consolidation tests on the songsan clay were compared.

Key words : Songsan Clay, Preconsolidation pressure, western marine clay, soft ground

1. 서 론

최근 수도권 지역의 택지 및 산업단지 등에 대한 수요가 증대됨에 따라서 인천 등의 수도권 인근 서해안에 서의 단지를 조성하는 사례가 증가하고 있다. 이와 같이 서해안에 단지를 조성하는 경우에는 연약지반에 대한 설계가 필연적으로 수반되게 되며, 이 경우 조수간만의 차가 큰 서해안에서는 이를 고려하여 과압밀을 고려하는 것이 일반적이라고 하겠다. 이 과압밀의 정도는 단지의 침하량이나 성토량을 결정하는데 매우 중요한 인자일 뿐만 아니라 동일 토성을 보이는 연약지반에서는 압축강도 등과 비례하는 경향이 있기 때문에 실내시험의 신뢰성을 확인하는 요소로도 활용되기도 한다. 다시 말하면 과압밀의 정도(과압밀비)를 파악할 수 있는 선행압밀하중을 정확히 산정함으로써 효율적인 단지의 설계 및 시공을 수행할 있게 된다고 하겠다.

현재 우리나라에서는 이러한 선행압밀하중을 산정하기 위해 대부분 Casagrande(1936)가 제안한 방법에 따라 선행압밀하중을 추정하고 있으나 이 방법뿐만 아니라 다양한 산정방법 제안되어있기 때문에 이러한 다양한 방법들이 서해(송산지역)점토에는 어떠한 결과를 보이고 있는지 혹은 적절한 선정방법은 어떤 것인지에 대한 논의나 각 산정방법의 상호보완적인 사항이 있는지 하는 논의가 이루어져야 할 것이다. 이에 본 연구에서는 여러 가지 선행압밀하중 선정기법을 개략적으로 소개하고, 경기도 안산의 시화지역 서해점토에 대한 압밀시험의 결과를 이용하며 각 선정기법에 대한 비교분석을 수행하고, 이를 바탕으로 서해점토에 대한 각 선행압밀하중 선정기법의 적용성을 확인하고자 한다.

2. 선행압밀하중 산정

현재까지 선행압밀하중을 산정할 수 있는 많은 방법들이 제안되어 있지만, 실무에서 가장 널리 일반적으로 사용되는 방법은 Casagrande (1936)가 제안한 방법이다. 그러나 이 방법은 정규압밀영역이 비선형의 곡선을 보이는 경우 직선부분을 어떻게 산정하느냐 혹은 최소곡률반경의 위치를 어디로 결정하느냐 하는 등의 주관적인 오차가 크고, 간극비를 나타내는 Y축의 스케일에 따라서 다른 결과를 나타내는 등의 단점이 존재한다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 Janbu-1 및 2방법(1969), Becker방법(1987), Sridharan방법(1991), Silva방법(1970), Schmertmann(1955) 등의 여러 가지 방법이 제안되었으며, 백원진 등(2008)은 광양지역의 점토를 대상으로 실험을 수행하여 상기의 선정방법 중, 준설패류층과 같이 대변형 조건에서 압밀곡선상의 과압밀 및 정규압밀 영역이 확실하게 구분되지 않은 조건에서도 Becker(1987), Silva(1970), Sridharan(1991) 방법이 우수한 적용성을 보인다고 제시하였다. 또한, 김태준 등(2002)은 군산지역의 점토를 이용하여 보편적으로 사용되고 있는 Casagrande(1936) 방법이 비록 개인의 주관적인 오차를 포함하고는 있으나, 다른 추정 방법에 비해 비교적 정확하며, Schmertmann방법, Becker방법, Jose방법 등도 상대적으로 우수한 결과를 보인다고 제시하였다.

2.1 지반특성

본 연구에서 사용된 점토는 경기도 화성시 송산면 일대에서 채취한 서해점토로서, 그 물성 및 역학특성은 표 1과 2에 나타냈다.

표 1. 자연시료 물성시험 결과

공 번	Depth GL.(-)m	Wn (%)	Gs	Atterberg Limits (%)		Grain Size Distribution % Finer than					U.S.C.S
				LL	PI	#4	#10	#40	#200	2 μ	
BH(1)-2	9.0~9.8	34.7	2.685	40.7	17.5	-	100	99.7	96.3	16.7	CL
BH(1)-4	4.0~4.8	30.8	2.682	30.7	6.6	-	100	99.9	96.7	8.2	ML
BH(1)-4	15.0~15.8	36.9	2.675	31.5	7.3	-	100	99.8	97.2	10.9	ML
BH(1)-5	3.0~3.8	46.3	2.693	47.7	23.1	-	100	99.8	96.6	21.3	CL
BH(1)-6	8.0~8.8	37.2	2.679	41.1	17.7	-	100	99.7	94.1	17.6	CL
BH(1)-7	3.0~3.8	33.7	2.669	26.8	3.5	-	100	99.5	95.9	6.2	ML
BH(1)-10	3.0~3.8	35.5	2.672	35.6	9.5	-	100	99.9	95.0	8.0	ML
BH(1)-11	3.2~4.0	35.7	2.663	31.7	6.4	-	100	99.9	97.3	6.8	ML
BH(1)-13	5.2~6.0	39.8	2.693	47.9	24.1	-	100	99.9	96.7	19.4	CL
BH(1)-16	2.0~2.8	53.6	2.712	54.1	29.3	-	100	99.9	98.1	20.8	CH
BH(1)-18	3.5~4.3	62.1	2.591	69.0	40.6	-	100	99.9	98.4	27.9	CH
BH(1)-21	3.0~3.8	45.4	2.683	37.8	9.6	-	100	99.7	97.7	8.4	ML
BH(1)-23	3.0~3.8	39.6	2.677	33.3	8.4	-	100	99.9	95.8	8.8	ML
BH(1)-24	3.0~3.8	39.3	2.696	50.9	26.2	-	100	99.9	98.6	19.7	CH
BH(1)-24	7.5~8.3	47.5	2.716	56.5	30.6	-	100	98.3	23.9	CH	
BH(1)-29	6.5~7.3	31.6	2.702	35.1	15.7	-	100	99.5	95.7	18.3	CL
BH(1)-30	5.0~5.8	33.8	2.689	37.9	14.0	-	100	99.9	96.9	12.0	CL
BH(1)-31	3.0~3.8	35.4	2.688	38.0	15.6	-	100	99.8	96.2	19.3	CL
BH(1)-31	6.0~6.8	35.7	2.684	36.2	13.3	-	100	99.9	96.9	14.3	CL
BH(1)-31	9.0~9.8	32.5	2.662	28.8	3.8	-	100	99.7	96.3	3.8	ML
BH(1)-34	5.0~5.8	34.4	2.710	38.5	19.3	-	100	98.5	19.9	CL	
BH(1)-35	2.0~2.8	37.0	2.682	31.2	5.5	-	100	99.8	97.0	9.3	ML
BH(1)-39	4.5~5.3	32.1	2.667	28.6	3.9	-	100	99.9	96.6	5.7	ML
BH(1)-40	9.2~10.0	30.6	2.682	31.0	11.4	-	100	96.8	91.9	15.9	CL
BH(1)-41	3.0~3.8	34.2	2.683	35.0	14.7	-	100	99.9	97.2	19.1	CL
BH(1)-41	6.0~6.8	43.3	2.698	49.2	24.3	-	100	98.4	22.8	CL	
BH(1)-41	9.0~9.8	39.7	2.693	43.5	19.5	-	100	99.8	95.9	19.2	CL
BH(1)-41	12.0~12.8	32.5	2.670	30.4	4.6	-	99.9	96.6	7.9	ML	
BH(1)-43	3.0~3.8	34.1	2.668	31.1	4.9	-	100	99.7	95.7	6.1	ML
BH(1)-43	8.0~8.8	37.4	2.663	29.5	3.3	-	100	99.7	96.0	9.2	ML
BH(1)-45	2.0~2.8	40.9	2.680	32.7	7.3	-	100	99.9	95.1	6.6	ML
BH(1)-46	2.0~2.8	37.2	2.676	33.3	6.9	-	100	99.6	97.4	10.0	ML
BH(1)-51	3.7~4.5	36.5	2.683	39.8	16.0	-	100	99.9	97.9	14.2	CL
BH(1)-53	3.0~3.8	31.4	2.661	26.7	3.0	-	100	99.5	94.3	4.2	ML
BH(1)-53	7.0~7.8	34.2	2.687	35.5	15.4	-	100	99.9	97.7	17.8	CL
BH(1)-53	10.0~10.8	38.5	2.703	51.5	27.8	-	100	98.2	23.1	CH	
BH(1)-59	3.0~3.8	33.6	2.672	31.9	7.0	-	100	99.9	96.5	8.9	ML
BH(1)-60	4.0~4.8	36.9	2.694	41.2	18.2	-	100	99.9	98.6	19.0	CL
BH(1)-60	6.2~7.0	32.6	2.679	31.2	7.4	-	100	99.8	96.8	9.4	ML
BH(1)-61	3.0~3.8	41.4	2.682	36.9	8.8	-	100	99.8	94.5	8.1	ML
BH(1)-62	4.0~4.8	44.0	2.674	41.1	10.6	-	100	99.9	97.6	9.2	ML
BH(1)-63	3.5~4.3	37.8	2.669	31.2	4.8	-	100	99.9	95.8	8.8	ML

표 2. 역학시험결과

공 번	Depth GL.(-)m	Unconf. Comp.str			Triaxial Comp.str	Consolidation			e _o
		Q _u (KPa)	Q _{ur} (KPa)	S _t	C _m (KPa)	P _c (KPa)	C _c	C _{cr}	
BH(1)-2	9.0~9.8	93.54	32.85	2.85	50.18	122.6	0.290	0.356	0.942
BH(1)-4	4.0~4.8	42.94	14.18	2.90	22.38	107.5	0.208	0.281	0.850
BH(1)-4	15.0~15.8	92.88	30.24	3.07	49.23	181.8	0.195	0.263	1.000
BH(1)-5	3.0~3.8	43.57	13.01	3.35	23.39	95.3	0.380	0.415	1.248
BH(1)-6	8.0~8.8	49.44	17.70	2.79	28.86	260.4	0.369	0.425	0.997
BH(1)-7	3.0~3.8	43.05	14.74	2.92	25.19	115.8	0.270	0.313	0.909
BH(1)-10	3.0~3.8	42.81	13.72	3.12	22.41	123.0	0.285	0.325	0.961
BH(1)-11	3.2~4.0	66.89	14.93	4.48	35.84	111.4	0.427	0.452	0.988
BH(1)-13	5.2~6.0	50.55	15.94	3.17	26.86	101.2	0.332	0.404	1.079
BH(1)-16	2.0~2.8	성형불가 (폐각유함유)				76.2	0.650	0.775	1.463
BH(1)-18	3.5~4.3	54.42	14.89	3.65	30.09	81.3	0.574	0.672	1.610
BH(1)-21	3.0~3.8	31.20	7.71	4.05	17.01	83.3	0.294	0.329	1.233
BH(1)-23	3.0~3.8	16.04	5.55	2.89	9.17	63.9	0.268	0.319	1.069
BH(1)-24	3.0~3.8	25.21	11.44	2.20	14.40	72.4	0.350	0.464	1.059
BH(1)-24	7.5~8.3	75.79	20.74	3.65	38.82	93.1	0.426	0.539	1.301
BH(1)-29	6.5~7.3	106.15	27.66	3.84	54.25	155.7	0.254	0.327	0.857
BH(1)-30	5.0~5.8	50.90	18.77	2.71	26.56	155.6	0.278	0.316	0.915
BH(1)-31	3.0~3.8	44.03	16.91	2.60	25.01	55.6	0.352	0.422	0.976
BH(1)-31	6.0~6.8	53.30	13.11	4.07	26.15	109.2	0.200	0.271	0.964
BH(1)-31	9.0~9.8	58.12	21.80	2.67	30.35	179.4	0.192	0.219	0.880
BH(1)-34	5.0~5.8	96.88	27.31	3.55	54.30	245.7	0.361	0.504	0.935
BH(1)-35	2.0~2.8	35.28	10.89	3.24	19.75	123.7	0.248	0.352	1.007
BH(1)-39	4.5~5.3	57.79	22.21	2.60	30.06	171.6	0.201	0.249	0.872
BH(1)-40	9.2~10.0	73.60	19.31	3.81	39.41	272.3	0.200	0.247	0.822
BH(1)-41	3.0~3.8	58.10	15.38	3.78	31.23	62.0	0.313	0.394	0.932
BH(1)-41	6.0~6.8	63.60	20.52	3.10	34.10	76.3	0.444	0.605	1.181
BH(1)-41	9.0~9.8	86.73	30.22	2.87	48.61	146.3	0.408	0.496	1.075
BH(1)-41	12.0~12.8	65.22	23.87	2.73	34.21	165.4	0.189	0.228	0.882
BH(1)-43	3.0~3.8	46.90	10.43	4.50	24.14	161.9	0.228	0.332	1.015
BH(1)-43	8.0~8.8	61.36	15.11	4.06	34.83	241.9	0.162	0.212	1.000
BH(1)-45	2.0~2.8	19.03	7.33	2.60	11.41	66.7	0.216	0.281	1.106
BH(1)-46	2.0~2.8	23.62	10.36	2.28	13.27	91.4	0.272	0.360	1.003
BH(1)-51	3.7~4.5	47.52	18.52	2.57	24.60	146.2	0.271	0.324	0.983
BH(1)-53	3.0~3.8	82.21	23.50	3.50	42.92	247.1	0.148	0.180	0.850
BH(1)-53	7.0~7.8	73.91	20.46	3.61	38.77	125.2	0.255	0.361	0.940
BH(1)-53	10.0~10.8	96.06	34.78	2.76	50.06	162.0	0.346	0.396	1.043
BH(1)-59	3.0~3.8	59.25	15.00	3.95	32.77	181.5	0.176	0.241	0.905
BH(1)-60	4.0~4.8	50.99	18.36	2.78	26.40	140.9	0.289	0.358	0.998
BH(1)-60	6.2~7.0	71.70	24.50	2.93	36.86	172.1	0.219	0.295	0.893
BH(1)-61	3.0~3.8	18.46	5.28	3.50	10.76	125.2	0.301	0.334	1.125
BH(1)-62	4.0~4.8	29.42	5.37	5.48	16.85	84.6	0.265	0.305	1.177
BH(1)-63	3.5~4.3	27.16	12.12	2.24	16.30	97.3	0.179	0.228	1.015

2.2 선행압밀하중 선정결과

송산점토에 대하여 다양한 학자들이 제시한 선행압밀하중(Pc) 산정방법에 의해 산정하였으며 그 결과를 표 3에 나타냈다. 또한, 과압밀 및 정규압밀의 경계가 모호한 경우(BH(1)-4 4.0~4.8)에 대한 산정 예를 그림 1에 보였다.

표 3. 각 선정기법에 대한 선행압밀하중 결과

공번	Depth GL.(-)m	Pc (kPa)							
		Casagrande 방법	Janbu-1 방법	Janbu-2 방법	Becker 방법	Sridharan 방법	Silva 방법	Schmertmann 방법	
BH(1)-2	9.0~9.8	122.6	-	175.0	60.0	93.0	79.0	124.0	
BH(1)-4	4.0~4.8	107.5	-	150.0	72.0	137.0	64.0	109.0	
BH(1)-4	15.0~15.8	181.8	-	110.0	95.0	105.0	102.5	179.0	
BH(1)-5	3.0~3.8	95.3	40.0	-	30.0	118.0	83.0	93.0	
BH(1)-6	8.0~8.8	260.4	20.0	327.0	160.0	133.0	215.0	267.0	
BH(1)-7	3.0~3.8	115.8	71.5	47.0	60.0	111.0	101.0	118.0	
BH(1)-10	3.0~3.8	123.0	62.0	151.0	60.0	113.0	95.0	127.0	
BH(1)-11	3.2~4.0	111.4	95.0	235.0	59.0	120.0	104.0	113.0	
BH(1)-13	5.2~6.0	101.2	-	-	57.0	165.0	87.0	102.0	
BH(1)-16	2.0~2.8	76.2	75.0	175.0	30.0	116.0	68.0	77.0	
BH(1)-18	3.5~4.3	81.3	-	330.0	35.0	104.0	65.0	81.0	
BH(1)-21	3.0~3.8	83.3	-	-	30.0	95.0	60.0	83.2	
BH(1)-23	3.0~3.8	63.9	-	-	33.0	99.0	49.0	65.0	
BH(1)-24	3.0~3.8	72.4	-	-	97.0	117.0	57.0	73.0	
BH(1)-24	7.5~8.3	93.1	-	-	51.0	118.0	68.0	90.0	
BH(1)-29	6.5~7.3	155.7	-	-	80.0	124.0	85.0	158.0	
BH(1)-30	5.0~5.8	155.6	44.3	-	77.0	119.0	113.0	160.0	
BH(1)-31	3.0~3.8	55.6	-	-	-	83.0	42.0	56.5	
BH(1)-31	6.0~6.8	109.2	-	-	112.0	102.0	68.0	114.0	
BH(1)-31	9.0~9.8	179.4	-	-	70.0	98.0	111.0	177.0	
BH(1)-34	5.0~5.8	245.7	-	-	174.0	98.0	188.0	246.0	
BH(1)-35	2.0~2.8	123.7	-	-	134.0	164.0	85.0	125.0	
BH(1)-39	4.5~5.3	171.6	28.0	-	79.0	110.0	88.0	171.0	
BH(1)-40	9.2~10.0	272.3	-	-	135.0	148.0	155.0	284.0	
BH(1)-41	3.0~3.8	62.0	-	-	67.0	85.0	60.0	62.8	
BH(1)-41	6.0~6.8	76.3	-	-	94.0	131.0	72.0	77.5	
BH(1)-41	9.0~9.8	146.3	-	-	83.0	143.0	116.0	149.5	
BH(1)-41	12.0~12.8	165.4	68.5	-	77.0	120.0	115.0	167.0	
BH(1)-43	3.0~3.8	161.9	-	-	142.0	113.0	102.0	158.0	
BH(1)-43	8.0~8.8	241.9	-	-	108.0	140.0	120.0	254.0	
BH(1)-45	2.0~2.8	66.7	-	-	99.0	95.0	43.0	71.0	
BH(1)-46	2.0~2.8	91.4	-	-	96.0	120.0	63.0	89.0	
BH(1)-51	3.7~4.5	146.2	-	-	77.0	108.0	105.0	149.0	
BH(1)-53	3.0~3.8	247.1	-	-	80.0	127.0	93.0	268.0	
BH(1)-53	7.0~7.8	125.2	-	-	106.0	138.0	105.0	128.0	
BH(1)-53	10.0~10.8	162.0	52.0	-	83.0	138.0	136.0	164.0	
BH(1)-59	3.0~3.8	181.5	-	-	130.0	127.0	207.0	178.0	
BH(1)-60	4.0~4.8	140.9	-	-	82.0	132.0	108.0	144.0	
BH(1)-60	6.2~7.0	172.1	-	-	107.0	152.0	122.0	170.0	
BH(1)-61	3.0~3.8	125.2	40.0	-	63.0	94.0	99.0	130.0	
BH(1)-62	4.0~4.8	84.6	-	-	53.0	86.0	65.0	84.0	
BH(1)-63	3.5~4.3	97.3	-	-	124.0	92.0	50.0	95.0	

주) "-" 은 선행압밀하중 선정을 하기위한 경향이 보이지 않을 경우임.
 짙은색 쉼표는 통일분류상 ML에 해당하는 점토임.

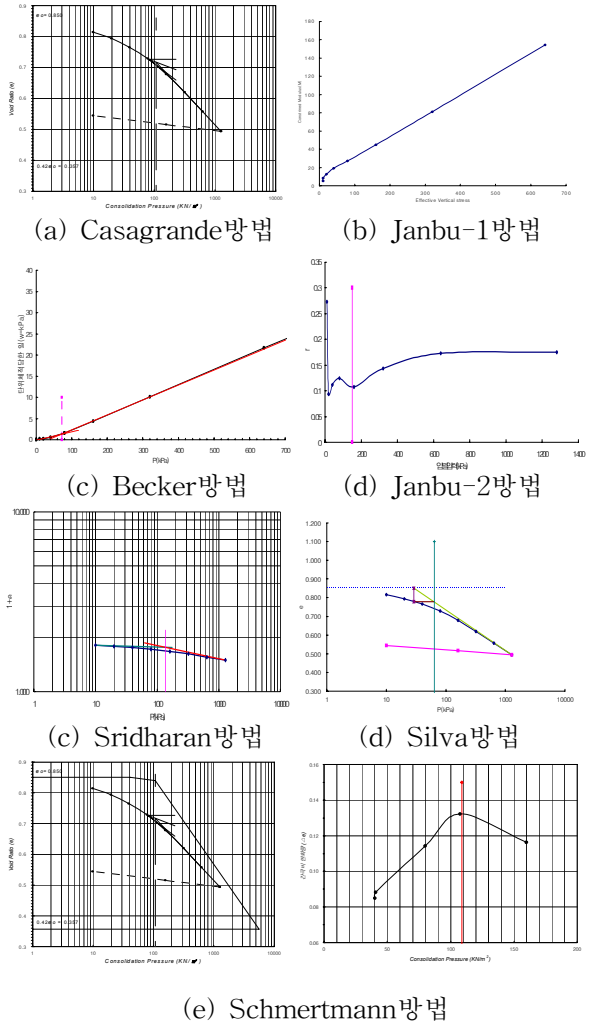


그림 1. BH(1)-4 (4.0~4.8)에 대한 산정결과

2.3 각 선정기법 비교

다양한 학자들이 제시한 선행압밀하중(Pc) 산정방법에 의해 산정결과를 살펴보면, 점토의 저항개념을 이용한 Janbu-1과 2방법은 과압밀 및 정규압밀영역의 구분이 모호한 경우에 있어서 선행압밀하중을 선정하기가 쉽지 않기 때문에 그 적용성이 미흡하다고 하겠고, Sridharan방법의 경우에는 간극비축을 log로 변환하여 과압밀과 정규압밀 영역에 대한 구분을 명확히 하고 있기 때문에 선행압밀하중이 비교적 명확하게 산정되며, Silva의 방법 역시 정규압밀 영역이 선형성이 확보되면 간단히 선행압밀하중을 산정할 수 있다는 것이 확인되었다. 또한, Becker의 방법은 단위체적당 일을 산정하여 과압밀과 정규압밀 영역을 구분하기 때문에 비교적 활용도가 높은 방법이며, 본 연구에서도 그 적용성을 확인 할 수 있었다. Schmertmann의 방법은 교란의 영향을 고려하여 선행압밀하중을 산정하는 방법으로서 초기간극비의

0.42배 되는 위치에서 시료의 교란정도에 관계없이 일치한다는 가정하에서 수행되기는 하지만 명확한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

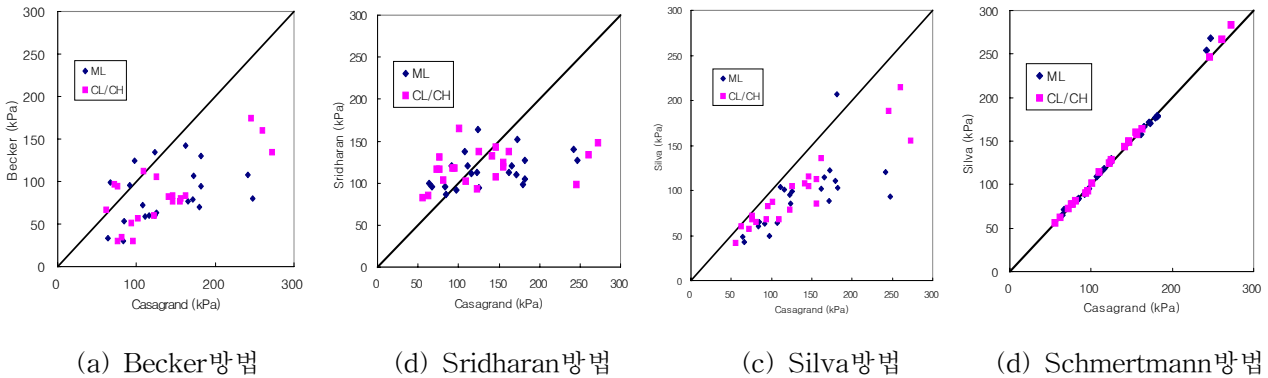


그림 2. Casagrande방법과 기타 선정방법과의 비교 검토

서해점토에 대한 선행압밀하중 선정기법의 적용성을 알아보기 위하여 상기에서 언급한 선정방법과 실무에서 가장 널리 활용되고 있는 Casagrande방법에 의하여 선정된 선행압밀하중을 비교·검토 하였으며, 그 결과를 그림 2에 나타냈다.

Becker방법의 경우에는 Casagrande방법에 비하여 비교적 작은 선행압밀하중을 보이고, 선행압밀하중에 Casagrande방법의 결과에 비례하는 결과를 보이고 있으며, 이러한 경향은 실트나 점토 등의 토성에 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 이는 Casagrande방법에 비하여 작은 OCR값을 갖게 되는 것을 의미하여 실제 연약지반 설계시 Casagrande방법에 의해서 산정한 OCR값보다 작은 값을 설계에 적용하는 경우가 많은 것을 고려해 볼 때 좋은 적용성을 보이는 것으로 사료된다.

Silva방법의 경우 역시 Casagrande방법에 비하여 비교적 작은 선행압밀하중을 보이고 있으며, 이러한 경향은 실트보다 점토의 경우가 더 크다고 할 수 있다. 선행압밀하중의 관계 역시 좋은 비례관계를 갖고 있으며, Becker방법과 더불어 좋은 적용성을 보이는 것으로 판단된다.

Sridharan방법의 경우에는 Casagrande방법과 거의 관계없는 결과를 보이고 있으며, Casagrande방법에 비하여 선정된 선행압밀하중의 범위가 상당히 작은 것으로 나타났다. 이는 Casagrande방법가 비례하는 여타의 선정방법과도 상이한 결과로서 이 방법을 서해점토에 적용할 경우에는 주의가 필요할 것으로 판단된다.

Schmertmann방법은 Casagrande방법과 매우 근사한 결과를 나타내고 있다. 이는 두 방법모두 최소극률반경을 선정하는 과정을 거치기 때문으로 판단되며, 이 두 방법을 설계에 적용할 경우에는 다른 선정방법의 결과를 고려하여 보수적으로 적용하는 것이 필요할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 송산지역(서해안)의 점성토를 대상으로 다양한 기법들을 적용하여 선행압밀하중을 선정하였으며, 그 결과 Becker방법, Silva방법, Sridharan방법, Schmertmann 방법 등이 과압밀 및 정규압밀의 영역구분이 불분명한 경우에 대해서도 적용가능하다는 결과를 얻을 수 있었다.

또한, Casagrande방법으로 결정된 선행압밀 하중은 실제값보다 15~50% 정도 과대평가되는 경향이 있다고 하는 연구결과 (Jose,1989)를 고려하면, Becker방법과 Silva방법을 이용하여 선행압밀하중을 선정하는 것이 바람직하며, Casagrande방법이나 Schmertmann방법은 수행할 경우에는 보수적인 적용이 바람직할 것으로 사료된다.