

# 광양만 조석 해수면 변동의 미고결 퇴적층에 대한 영향

趙 台 鎭

釜山水産大學校 應用地質學科

## Effect of the Tidal Sea Level Change on the Unconsolidated Sediment in Gwangyang Bay

Tae-Chin CHO

Department of Applied Geology, National Fisheries University of Pusan,  
Pusan 608-737, Korea

The characteristics of the unconsolidated sediment in Gwangyang bay was analyzed from the core samples. The porosity of the sediment showed irregular variation with respect to the sedimentation depth, which indicated that sediment weight-induced consolidation was not significant. Numerical analysis for the mechanical and hydraulic behavior of the unconsolidated sediment due to the tidal sea level change was processed. Because of the delayed excessive pore pressure change in the very low permeable mud medium, the magnitude of the excessive pore pressure for the duration of the minimum sea level exceeded the total stress from the sea water weight, which resulted in the negative (tensional) effective stress below the top surface. The in-situ effective stress, obtained by superposing the tensional effective stress on the solid weight-induced compressive stress, was remained to be tensile (quick-sand condition) near the top surface of the mud deposit. The occurrence of the quick-sand condition provided a theoretical evidence for the insignificant consolidation and the irregular porosity variation of the sediment. When the sand is distributed on the top surface of the mud layer, the quick-sand condition occurred below the sandy mud layer and the downward movement of sand particles was facilitated.

### 서 론

광양만은 남쪽의 여수반도 및 남동부의 남해도로 둘러싸인 반폐쇄적 지형이다. 만내의 수심은 5m 이하로 얇고, 남동쪽의 여수만쪽 입구로 부터 북동쪽의 노량해협으로 이어지는 수심 30m 이상의 노랑수로와 묘도 북쪽으로 이어지는 묘도 북수로 및 남쪽으로 이어지는 묘도 남수로가 있다(그림 1). 광양만 일대의 해저지형상 특징은 묘도주위 및 동쪽지역에서 수로를 형성하는 깊은 해저지형과 묘도 서쪽 울촌지역에 매우 낮은 해저지형을 형성하여 일반적인 만에서의 수심분포와는 좋은 대조를 보이고 있다. 즉 해수순환적인 관점에서 고에너지

지역과 저에너지 지역으로 구분될 수 있으며 퇴적물의 이동과 확산에 그 영향을 끼치고 있다. 만내에 광범위하게 분포하는 니질 퇴적물(mud)은 부분적으로 섬진강 및 수어천을 통하여 운반된 것으로 사료될 수 있으나 상당한 양이 외해로 부터 공급 되었을 것으로 추론되고 있다(박 외, 1984). 본 연구에서는 광양만 미고결 퇴적층의 퇴적양상을 조사하기 위하여 퇴적물의 입도분포 및 역학적 특성에 대한 실험 분석을 실시하였으며, 퇴적층의 역학적 특성에 대한 원인 분석을 조석 해수면 변동에 의한 퇴적층 거동변화의 측면에서 모델링을 이용하여 수치해석적으로 시도하였다.

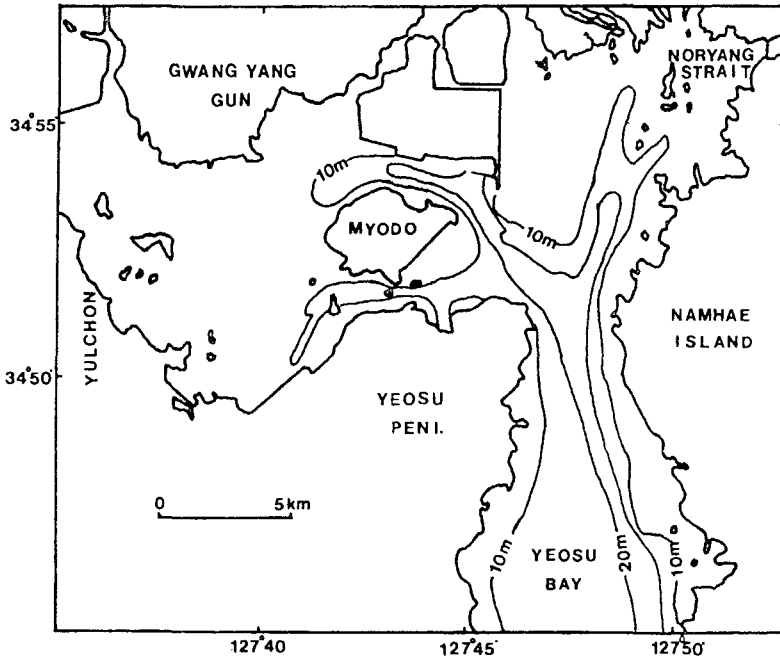


Fig. 1. Geographic map around Gwangyang bay

퇴적물 분석

광양만에 분포하는 퇴적물의 입도분석 및 물성 특성을 조사하기 위하여 Gravity Corer를 사용하여 17개 지점(그림 2)에서 퇴적층 약 80cm 깊이까지의 core를 채취하였다. 채취된 시료의 입도분석 결

과(표 1)에 의하면 조사 지역은 니질 퇴적층의 모래함량이 소량이며 깊이에 따라 유사한 분포량을 나타내는 지역과 다량의 모래성분이 일정깊이(약 30cm)이하에 분포되어 있는 지역으로 구분된다. 현장조사에 의해 다량의 모래 성분이 나타나는 지역은 양식업 목적을 위해 인공적으로 모래를 이용

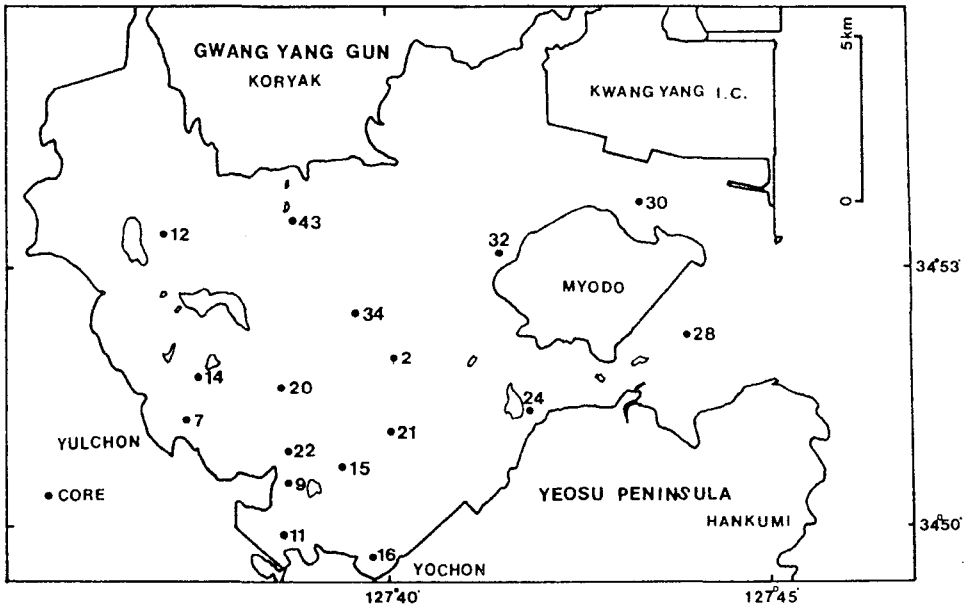


Fig. 2. Core sampling sites

Table 1. Results of the size analysis and material properties of the unconsolidated sediment in Gwangyang bay.

Station	Depth (cm)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	n	VS (kg/cm <sup>2</sup> )
7	10	2.07	53.15	44.78	0.721	2.747
	20	9.48	49.51	41.01	0.650	3.878
	30	18.26	47.85	33.89	0.523	4.686
	40	0.78	54.43	44.79	0.667	5.171
	50	1.68	57.86	40.30	0.691	3.232
9	60	1.28	61.21	37.50	0.695	3.555
	70	0.81	58.91	40.28	0.685	4.686
	10	1.78	51.08	47.14	0.712	3.232
	20	3.40	53.43	43.17	0.706	3.394
11	30	30.18	39.25	30.53	0.657	4.202
	40	15.49	47.04	37.47	0.555	5.494
	10	0.46	47.45	52.09	0.748	2.424
12	20	5.79	49.36	44.85	0.682	2.424
	30	19.75	36.96	42.51	0.664	1.454
	40	0.90	47.19	51.90	0.680	4.202
	50	0.77	49.50	49.72	0.707	4.363
	60	0.10	47.39	52.51	0.712	2.424
	10	0.71	52.34	46.94	0.728	2.909
	20	1.41	50.81	47.78	0.705	2.586
14	30	0.93	50.16	48.91	0.694	2.586
	40	1.80	56.85	41.35	0.687	4.363
	50	3.89	52.66	43.44	0.673	3.394
	60	1.52	50.69	49.79	0.677	5.010
	70	2.33	48.58	49.10	0.657	5.010
	10	3.02	47.05	49.93	0.711	2.262
	20	8.75	52.11	39.08	0.655	2.424
15	30	13.37	49.63	37.00	0.678	2.424
	40	3.03	55.72	41.25	0.712	3.232
	50	1.15	53.21	45.64	0.733	3.070
	60	1.17	52.65	46.19	0.719	3.394
	70	1.98	52.88	45.06	0.717	3.717
	10	3.34	54.78	41.88	0.690	3.555
	20	4.59	63.60	31.81	0.700	3.394
16	30	1.51	54.51	43.98	0.705	3.070
	40	1.29	56.44	42.27	0.712	3.878
	50	2.95	56.40	40.65	0.700	2.909
	60	5.73	53.24	40.91	0.685	3.555
	70	1.57	58.70	39.72	0.707	1.939
	80	0.93	53.72	45.35	0.693	3.717
	90	0.79	54.76	44.45	0.721	3.717
	10	1.02	50.92	48.06	0.757	1.293
	20	2.20	48.66	49.13	0.752	1.939
20	30	0.75	50.30	48.95	0.719	2.101
	40	0.98	47.48	51.54	0.712	2.262
	50	6.28	52.98	40.62	0.690	3.070
	60	16.79	39.98	43.16	0.628	3.878
	10	0.66	53.63	45.71	0.676	3.555
	20	0.58	54.02	45.40	0.679	3.878
21	30	1.90	53.82	44.28	0.686	3.070
	40	2.43	54.15	42.12	0.696	2.262
	50	1.62	55.75	42.62	0.706	1.940
	60	0.30	55.63	44.07	0.713	2.101
	10	3.07	55.99	40.94	0.668	3.717
	20	6.61	51.08	42.31	0.673	3.232
22	30	2.63	53.82	43.38	0.711	3.555
	40	3.82	81.38	14.80	0.703	2.909
	50	1.36	55.04	43.60	0.710	3.394
	60	1.31	57.36	41.33	0.725	3.717
	70	0.75	56.95	42.30	0.715	3.394
23	10	12.71	43.25	44.03	0.674	3.717
	20	9.94	46.72	43.12	0.672	4.202
	30	20.48	41.42	37.89	0.618	3.717
	40	8.45	57.71	33.36	0.647	3.878
	50	11.41	44.91	43.54	0.722	3.232
	60	9.73	49.41	40.66	0.683	3.878
24	70	32.83	31.05	34.70	0.652	3.232
	10	0.27	51.68	48.05	0.706	3.555
	20	0.15	53.88	45.97	0.706	4.040
	30	0.26	52.59	47.15	0.694	3.555
	40	0.53	51.24	48.23	0.703	2.586
	50	1.06	53.99	44.95	0.704	2.909
28	60	1.02	54.36	44.62	0.708	2.586
	10	1.94	53.04	42.02	0.730	2.101
	20	1.69	56.46	41.85	0.687	3.394
	30	13.64	48.22	37.86	0.654	4.040
30	40	15.76	54.47	29.77	0.641	3.070
	10	24.50	40.76	34.74	0.629	3.394
	20	19.06	42.63	38.30	0.652	4.040
	30	12.22	51.34	36.43	0.652	4.040
	40	11.29	55.66	33.05	0.693	4.848
	50	7.89	48.77	43.34	0.688	4.848
32	60				0.695	5.010
	10	1.92	57.07	41.02	0.663	3.878
	20	1.93	56.84	41.23	0.667	4.525
	30	4.33	55.81	39.86	0.653	5.010
	40	2.81	56.64	40.56	0.640	5.171
	50	3.22	55.68	41.09	0.648	5.818
	60	2.47	56.24	41.29	0.661	4.525
	70	1.48	55.88	42.65	0.660	5.656
34	80	4.60	57.86	37.54	0.657	6.141
	10	0.52	51.98	47.49	0.707	3.878
	20	0.57	49.97	49.46	0.691	4.363
	30	0.93	50.75	48.32	0.698	3.070
	40	2.49	49.05	48.36	0.690	3.232
	50	1.24	50.19	48.56	0.718	2.909
43	60	0.74	51.75	47.51	0.719	2.666
	10	1.61	53.12	45.27	0.671	3.070
	20	1.95	67.41	30.64	0.672	2.909
	30	1.00	52.28	46.72	0.700	2.747
	40	1.22	51.31	47.47	0.700	3.070
	50	1.22	51.93	46.86	0.674	4.363
43	60	0.82	53.71	45.47	0.668	4.525
	10	3.56	64.06	32.38	0.613	3.717
	20	0.88	61.53	37.60	0.658	4.040
	30	2.65	61.33	36.02	0.655	3.878
	40	12.67	55.06	37.08	0.617	4.202
	50	10.77	54.97	34.26	0.619	4.202
60	3.70	60.57	35.73	0.690	3.717	

n: porosity VS: shear strength

한 객토작업이 수행된 지역임이 확인되었다. Folk (1968)의 퇴적물형태(sediment type) 분류 기준도에 의하면 자연상태의 광양만 퇴적층은 니질(mud) 퇴적물로 구성되어 있으며 인공적으로 객토한 지역은 니질(mud) 퇴적물내에 모래질 이토(sandy mud)물질이 층상으로 협재되어 있다. 특이할 점은 표층에 분포되었던 모래입자들이 하강되어 퇴적층 약 30cm 깊이에서 최대 모래 함유량을 보여주며 하부에서는 모래 함유량이 극히 낮은 자연상태의 니질 퇴적층을 유지하고 있는 점이다.

해양퇴적층의 공극율은 일반적으로 퇴적물을 구성하는 입자의 성분, 크기 및 배열상태에 따라 변화하며, 또한 퇴적층 상부의 압력에 의한 압밀정도에 따라 공극율이 감소한다. 광양만 일대에서 채취된 퇴적물의 물성특성에 대한 분석결과(표 1)에 의하면 퇴적물은 높은 공극율(약 70%)을 갖는 이토물질로 구성되어 있다. 코어 시료를 이용하여 측정된 공극율의 수직적 변화를 살펴보면 약 70~80 cm 깊이까지 높은 공극율이 유지되어 있어 퇴적층이 초기의 미고결상태인 것을 지시하고 있다. 상부 압력에 의한 공극율의 변화를 추정하기 위하여 표 1에 나타난 입도 분포상태가 비교적 균일한 8개 자연 퇴적지역(core 채취지점 12, 15, 20, 21, 23, 30, 32, 34)을 선정하고, 각 지역에서 퇴적물 자체하중 증가에 따른 공극율의 변화를 그림 3에 도시하였다. 그림 3에 나타난 자연 퇴적지역의 수직적 공극율변화는 퇴적 깊이에 따른 변화를 보여주지 않고 일정범위내에서 불규칙적으로 변화하고 있다. 따라서 광양만 지역에서 미고결퇴적층의 내부 공극상태는 퇴적층 자체무게에 의한 압밀의 영향이 매우 미세한 것으로 나타났다.

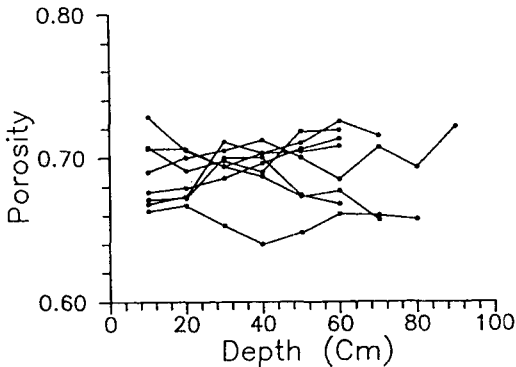


Fig. 3. Porosity change with respect to sediment depth

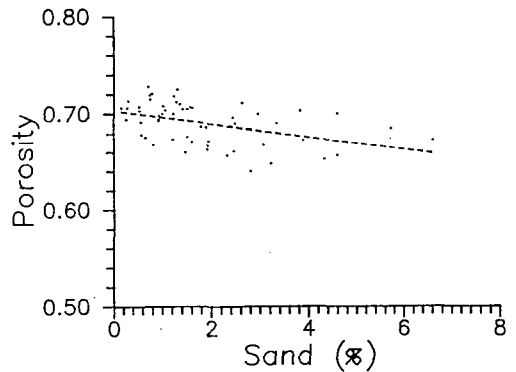
퇴적물 자체의 입도조성분포에 따른 공극율의 변화를 모래함량을 기준으로 고찰하였다. 지역에 따라 퇴적층 모래 함유량이 큰 차이를 나타내서 모래 함유량이 상대적으로 미세한 8개 자연퇴적지역과 객토한 지역에서의 모래함량에 대한 공극율 변화를 그림 4-a와 그림 4-b에 각각 도시하였다. core 채취지점 28은 자연상태의 모래질 이토층이 형성되어 있으나 높은 모래함량에 의해 객토지역에 대한 분석(그림 4-b)에 포함하였다. 그림 4-a와 4-b에 도시된 결과대로 퇴적물층의 모래함량이 증가하면 모래입자사이에 세립질이 채워질 수 있어 공극율이 감소하고 있으며, 1차 회귀분석에 의해 다음의 결과를 얻었다. 자연 퇴적지역에서

$$\text{공극율} = -0.0067 \times \% \text{ sand} + 0.703 \quad (1)$$

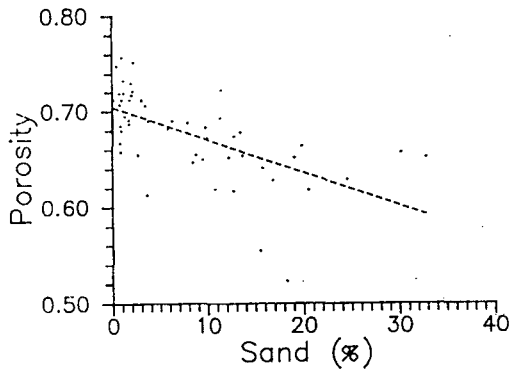
객토한 지역에서는

$$\text{공극율} = -0.0034 \times \% \text{ sand} + 0.704 \quad (2)$$

이상의 2가지 1차 회귀분석 결과를 토대로 볼때



a) natural sedimentation region



b) artificial sand-bring region

Fig. 4. Effect of sand content on sediment porosity

광양만 퇴적층의 공극율은 전지역에서 모래입자의 함유량, 즉 퇴적물의 조직분포에 따라 변화된다. 특이할 점은 2가지 회귀분석 공식의 기울기, 즉 모래함량의 공극율변화에 대한 영향에 상당한 차이가 나타난다. 모래 함유량이 높은 객토한 지역에서 공극율변화에 상대적으로 낮은 영향을 끼치는 점을 고려할 때, 퇴적층의 모래함유량이 일정범위를 넘으면 공극율변화에 대한 기여도가 현저하게 낮아진다는 점을 추론할 수 있다.

Core상태의 시료에 대해 Half-penetrated 2×4cm Vane Shear Apparatus(Maruto Ltd)를 사용하여 Vane Shear 강도 측정을 수행하였다. Vane Shear 강도는 퇴적물의 비배수전단강도(undrained shear strength)에 대한 근사값을 지시해주며(Das, 1983), 지질공학적 특성분석에 중요하게 사용된다. 본 연구 결과에 의하면 Vane Shear 강도는 공극율과 밀접한 관계를 나타내고 있다. 표 1에 의거해 모래의 함유량이 미세하고 깊이에 따라 일정한 8개 지점과 모래를 다량 함유한 9개 지점에서 측정된 Vane Shear 강도의 공극율에 대한 변화를 그림 5-a와 그림 5-b에 각각 도시하였다. 자연퇴적지역 이토층의 Vane Shear 강도는 공극율증가에 따라 급격한 감소현상을 보여준다(그림 5-a). 본 연구지역에 분포하는 퇴적물은 깊이에 따른 공극율의 변화가 일정하지 않으며(그림 3 참조), 이는 깊이에 따른 압밀이 매우 미세한 것을 지시한다. 따라서, Vane Shear 강도도 퇴적물의 압밀진행에 의한 효과보다는 공극율감소에 의한 단위 체적당 고체입자의 증가에 주로 영향을 받는 것으로 사료된다. 모래를 이용하여 객토한 지역에서의 결과(그림 5-b)는 대체적으로 자연퇴적 이토층에서와 마찬가지로 공극율증가에 따른 Vane Shear 강도의 감소를 보여준다. 그러나, 모래성분의 증가에 의한 이토층 점성도의 감소가 예상되어 Vane Shear 강도도 이토층의 경우(그림 5-a)에 비해 전체적으로 상당히 감소되어 있으며 공극율변화에 대한 영향도 매우 축소된 것으로 나타나고 있다.

### 수치해석 모델

광양만에 분포된 이토질 퇴적물은 높은 공극율(약 70%)을 갖는 초기의 미고결상태를 유지하고 있으며, 모래를 이용하여 객토작업을 수행한 지역에서는 표층에 분포되었던 모래입자들이 하강하여 퇴적층 깊이 약 30cm 지점에서 최대 모래 함유량을 보여주고 있다. 이러한 퇴적층의 역학적 특성에 대

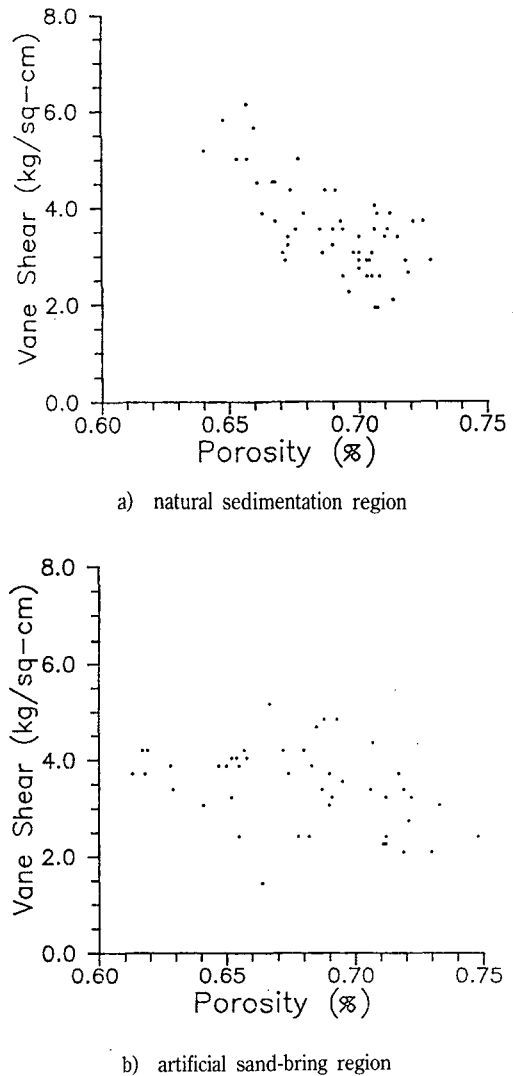


Fig. 5. Vane shear strength of Gwangyang sediment

한 원인 분석을 시도하기 위하여 광양만내 조석에 의한 해수면 변동에 따른 수압변화가 퇴적층의 거동에 미치는 영향을 조(1990)에 의해 개발된 유한요소법적(finite element method) 수치 해석모델을 이용하여 고찰하였다.

완전포화된 세립물질의 외부압력에 대한 시간적 압밀변화는 투수계수에 따른 공극수 확산에 영향을 받는다(Terzaghi, 1925). 즉, 외부압력에 대한 세립질의 유효응력(effective stress)이 과잉공극수압(excessive pore pressure)의 발생정도에 따라 변화한다. 이러한 세립물질의 역학적, 수리학적 특성에 대한 상호관계식이 Biot(1941)에 의해 제기되었고 Ghaboussi and Wilson(1973)에 의해 개정되어

다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\delta_{kl}\varepsilon_{kl} + \alpha\delta_{ij}P \quad (3)$$

$$\zeta = -\alpha\delta_{ij}\varepsilon_{ij} + \frac{1}{M} P \quad (4)$$

여기서

- $\sigma_{ij}$  = effective stress tensor
- $\varepsilon_{ij}$  = strain tensor
- $P$  = excessive pore pressure
- $\mu, \lambda$  = Lamé's constants
- $\zeta$  = volumetric fluid strain
- $\alpha, M$  = Biot's coupling constants
- $\delta_{ij}$  = Kronecker's delta

해저 미고결 퇴적층은 시간적 고결작용에 의해 과잉압밀상태(overconsolidation state)가 현저하게 나타나기도 하나(Noorany and Gizienski, 1970), Nakase and Kamei(1983)에 의하면 오사카만의 퇴적층은 정규압밀상태(normally consolidated state)를 유지하고 있어, 지역에 따라 퇴적층의 압밀상태가 상이하게 나타나고 있다. 본 연구에서는 광양만 퇴적층이 높은 공극율을 갖는 초기의 미고결상태인 점을 고려하여, 정규압밀상태에서의 표준 해수 압변화에 따른 미고결 퇴적물의 거동을 관계식 3과 4에 의해 산출되는 유효응력 및 과잉공극수압(이하 공극수압(pore pressure)으로 약칭)의 변화를 기준으로 분석하였다. 관계식 3과 4에 의거한 유한 요소모델의 구성 및 quasi-static 상태의 유효응력 및 공극수압 변화에 대한 산출방법은 조(1990)에 자세히 기술되었다.

모델 분석대상은 퇴적층 깊이 1m까지로 한정하였으며, 유한 요소법에 의거한 분석을 위해 퇴적층 두께 2cm를 한개의 요소로 선정하여 총 50개의 요소로 구성된 finite element mesh(그림 6)를 형성하였다. 퇴적층은 plane-strain condition상태로 가정하였으며, 표층수압변화를 유발하는 해수면의 변동은 광양만의 해도 및 조석표에 기준하여 최소수심 2m, 최대수심 6m을 갖는 sine곡선 형태로 가정하였고, 해수면 변동 주기는 실제보다 약간 짧은 12시간을 선정하였다. 수치해석 분석에 사용된 이토층과 모래질 이토층의 물성계수는 일반적으로 사용되는 측정치를 이용하였으며 표 2에 수록하였다. 퇴적물의 역학적, 수리학적 상호특성에 관계되는 계수  $\alpha, M$ 은 조(1990)에 서술된 관계식에 의거하여 E(modulus of elasticity),  $\nu$ (Poisson's ratio),  $\nu_u$ (undrained Poisson's ratio) 및 B(Skempton's constant)를 가정하여 산출하였다. 또한 전체 퇴적층의 공극율은 70%로 가정하여 퇴적물 자체에 의한 하

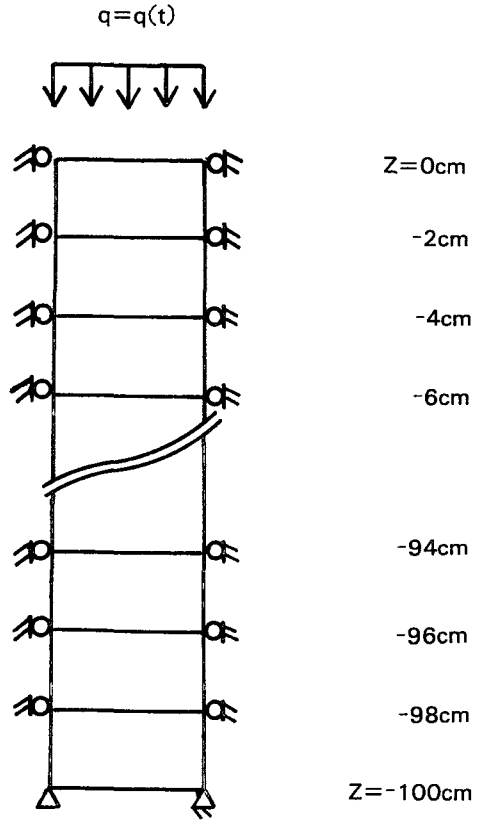


Fig. 6. Finite element mesh for modeling sediment behavior under tidal sea level changes

Table 2. Mechanical and hydraulic properties used in modeling for the unconsolidated sediment

	Mud	Sandy Mud
E	10(MPa)	50(MPa)
$\nu$	0.3	0.27
$\nu_u$	0.4	0.35
k	$10^{-14}(m^2/Pa \cdot s)$	$10^{-12}(m^2/Pa \cdot s)$
B	0.72	0.60
$\alpha$	0.74405	0.74074
M	17.369(MPa)	55.010(MPa)

중 재하량( $\sigma'_z$ )을 다음과 같이 산출하였다.

$$\sigma'_z = (1-n) (Gs-1)\gamma_w Z \quad (5)$$

여기서

- n: 공극율
- Gs: 퇴적물의 비중
- $\gamma_w$ : 물의 단위중량
- Z: 퇴적물의 깊이

퇴적물 자체무게에 의한 유효하중 재하량( $\sigma_z'$ )은 퇴적물비중을 2.65로 가정하여 산출하였으며, 관계식 3에 의해 산출된 수직유효응력( $\sigma_{zz}$ )과 합산하여 현장유효응력(in-situ effective stress)을 계산하였다.

### 결과 및 고찰

광양만의 해수면 변동에 의한 이토질 퇴적층의 거동을 수치해석적으로 분석하여 퇴적층 깊이 45 cm 지점에서의 결과를 그림 7에 도시하였다. 미고결 퇴적층은 공극율이 높아(약 70%) 수분함유량이 매우 크며 이토물질로 구성되어 극히 낮은 투수계수를 갖는 특성을 지니고 있다. 따라서 외부의 해수압력은 주로 퇴적물내의 공극수압(pore pressure)을 유발시키는데 작용하며 퇴적물의 역학적 거동에 직접적인 영향을 미치는 유효응력(effective stress)은 공극수압에 비해 상대적으로 미세하게 발생한다. 그림 7에 도시된 바와 같이 해수압력이 최대 또는 최소인 시점에 공극수압도 최대 또는 최소치를 형성하고 있다. 특히할 점은 평균 해수면 이하 구간에서 공극수압이 해수압력, 즉 전체 외부 압력보다 크게 발생한다. 이는 퇴적층의 투수계수가 매우 낮아 공극수의 유출에 소요되는 시간이 표층 해수면의 변동시간보다 길어져 최고해수면 시점에 형성되었던 공극수압이 최소해수면 시점까지 완전히 감소되지 못하는 점에 기인한다. 결과적으로 공극수압과 해수압력의 최대차이가 발생되는 최소 해수면시점 부근에 퇴적층의 유효응력이 압축력에서 인장력으로 반전된다. 해수면 변동에 의해 형성된 인장력의 유효응력은 퇴적층 깊이 45cm 부근에 퇴적물 자체하중에 의해 형성되는 압축력(관계식 5 참조)보다 절대적 크기(absolute magnitude)가 작아 결과적으로 퇴적물의 총체적인 현장유효응력(in-situ effective stress)이 압축력 상태인 것이 그림 7에 나타나고 있다.

이상에서 고찰된 바와 같이 해수압 변동에 의한 미고결 퇴적물의 거동양상은 공극수압의 변화에 큰 영향을 받고 있으며, 공극수압은 퇴적물의 역학적 압축에 의한 형성과 수리학적 공극수의 유입 또는 유출에 의해서 변화되는 특징을 지니고 있다. 따라서 해수면 변동에 대한 공극수압의 변화는 퇴적층 깊이, 즉 표층과의 거리에 의한 해수유입 또는 유출의 신속성에 따라 약간 상이한 양상을 보여 준다. 그림 8에 도시된 바와 같이 공극수압은 깊이 3cm 지점에서 최대변화를 보여주며, 깊이가 증가할

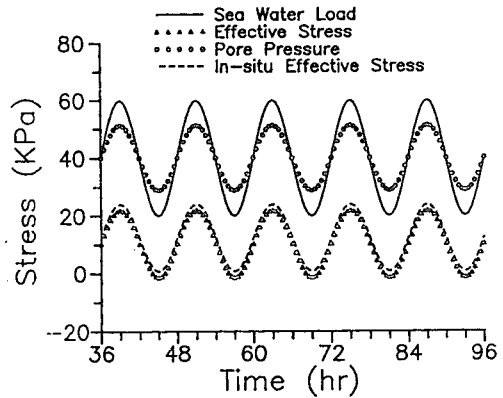


Fig. 7. Sea water weight-induced stress changes at the depth of 45cm in the uniform mud deposit

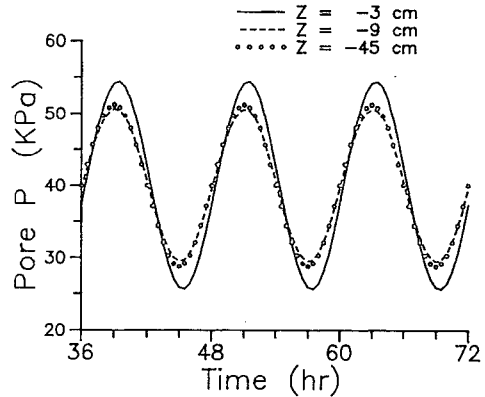


Fig. 8. Pore pressure variation at different depths in the uniform mud deposit

수록 변화량이 감소하나 깊이 45cm 지점에서의 변화폭이 깊이 9cm 지점에서 보다 크게 나타난다. 즉, 해수면 변동에 의한 공극수압의 변화가 최소인 지점이 깊이 9cm 이하 45cm 사이에 존재하는 것을 지시한다. 최대 공극수압의 시점도 깊이 9cm 및 45cm 지점에서는 최대 해수면 시점과 일치하나 깊이 3cm 지점에서는 약간 늦게 나타나는 phase-lag 현상을 보여 준다. 표층과의 수압차에 의한 해수의 유입을 고려할 때 깊이 3cm 부근에서는 해수 유입이 공극수압의 증가에 영향을 미치나 깊이 9cm 이하 지점에서는 매우 낮은 투수계수에 의해 해수압변동이 해수의 유입 및 유출에 큰 영향을 미치지 못하며 공극수압은 주로 퇴적물의 압축에 기인해 발생하는 것으로 사료된다. 해수면 변동에 의해 형성되는 퇴적물의 유효응력도 공극수압의 변화와 밀접하게 관계되어 있어 그림 9에 도시된 바와 같이

퇴적층 깊이에 따라 약간 상이한 변화를 나타낸다. 최소해수면 시점에 표층으로의 해수 유출이 가능하여 공극수압이 감소되며 결과적인 유효응력은 압축력 상태를 유지하고 있다. 최소유효응력의 크기는 깊이 9cm 지점이 깊이 45cm 지점에서의 경우보다 약간 작게 나타나며 두 지점에서 공통적으로 유효응력이 인장력상태로 반전되어 있다. 최대, 최소유효응력 시점은 깊이 3cm 지점에서는 최대, 최소해수면 시점보다 약간 선행하고 있으며 이하 9cm, 45cm 지점에서는 해수면 변동시점과 일치하고 있다.

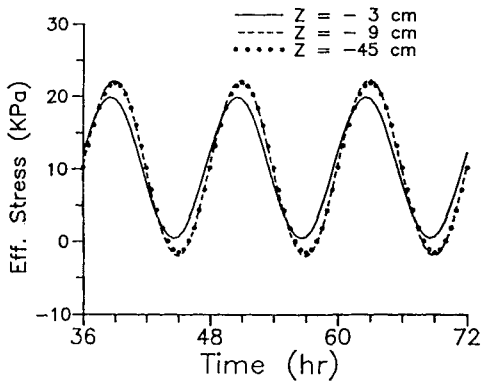


Fig. 9. Effective stress changes at different depths in the uniform mud deposit

퇴적층에 작용하고 있는 현장유효응력(in-situ effective stress)은 퇴적물 자체하중에 의한 유효응력과 해수면 변동에 의해 발생하는 유효응력 두가지가 복합되어 있다. 최소해수면 시점에서 발생하는 유효응력의 퇴적층 깊이에 따른 변화와 자체하중에 의한 유효응력을 고려한 현장유효응력의 변화를 그림 10에 도시하였다. 해수면 변동에 의해 발생하는 유효응력은 표층에서 최대치를 보여주며 깊이 9cm 지점에서 최소치를 나타내고 있다. 퇴적층 깊이가 증가함에 따라 유효응력이 약간 변동하나 깊이 20cm 이하 지점에서부터는 표층해수압 변화에 영향을 받지 않는 균일한 유효응력치를 나타내고 있다. 현장유효응력은 표층부근에서는 퇴적물 자체의 하중이 미세하여 해수면 변동에 의해 발생된 유효응력과 유사하게 나타나지만 깊이 10cm 이하부터는 자체하중의 증가에 의해 인장력상태의 현장유효응력을 압축력 상태로 반전시키는 역할을 하고 있다. 그림 10에 의하면 퇴적층 깊이 5cm~29cm 사이에서 현장유효응력이 인장력 상태인 것을 나타내고 있다. 즉 최소해수면 시점 부근에 표층을

제외한 퇴적층 상부에서 인장력에 의한 미고결 퇴적물의 파괴거동(퇴적물의 재 구성작용)이 발생할 수 있는 환경적 요소를 충족시켜 주고 있다. 또한 인장력상태의 현장유효응력의 발생은 전체적인 현장유효응력에 의한 퇴적물의 고결작용을 완화시키며, 따라서 퇴적층 깊이 70~80cm까지에서 높은 공극율이 유지되는 주요 원인으로 작용하고 있다.

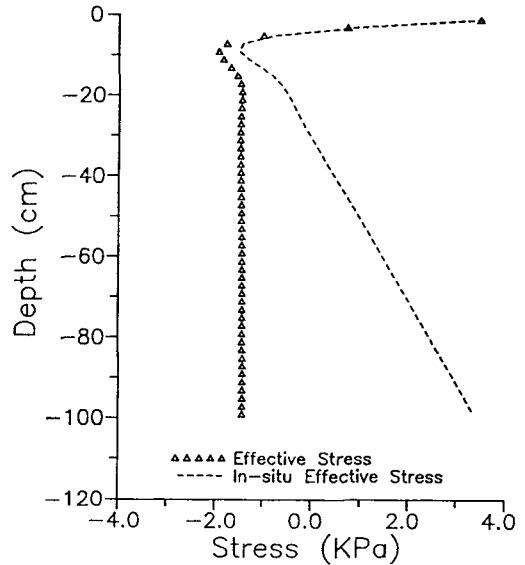


Fig. 10. Vertical changes of effective and in-situ effective stresses in the uniform mud deposit

광양만내 대부분의 조개 양식장지역에서 모래를 이용한 인공적인 객토작업이 수행되어 왔다. 코어 시료를 이용한 퇴적물 분석결과(표 1)는 객토작업 시 표층에 분포된 모래입자들이 하강하여 깊이 30cm 부근에서 약 10cm 두께를 갖는 최대 모래 함유량의 모래질 이토층(sandy mud layer)이 존재하는 것을 확인하여 준다. 이와 같은 퇴적물 이동양상을 수치해석적으로 분석하기 위해 모래질 이토층을 10cm 두께로 가정하여 다음의 3가지 경우에 대해 각각 모델링을 실시하였다. 경우 1: 표층에 모래질 이토층이 존재(그림 11-a 참조), 경우 2: 퇴적층 깊이 10~20cm 지점에 모래질 이토층(그림 11-b 참조), 경우 3: 퇴적층 깊이 32~42cm 지점에 모래질 이토층(그림 11-c 참조). 모델 분석에는 그림 6에 도시된 유한요소 mesh를 이용하였으며 표 2에 수록된 모래질 이토층의 물질계수를 모델 분석에 사용하였다. 먼저 퇴적물의 표층 10cm 부분에 모래질 이토층(sandy mud layer)이 형성되었을 경우 해수면 변동에 대한 표층의 모래질 이토층과 하부 이



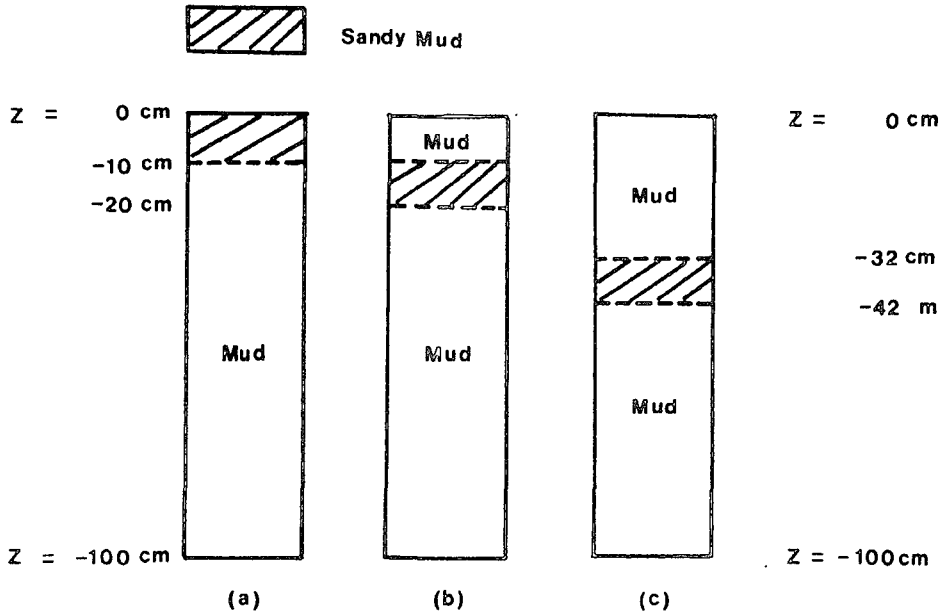


Fig. 11. Positions of sandy mud layer within the mud medium  
 a) case 1: top surface  
 b) case 2: between 10~20cm depth  
 c) case 3: between 32~42cm depth

토층에서의 공극수압변화를 그림 12에 도시하였다. 모래질 이토층의 투수계수는 하부의 이토층보다 매우 높아 해수압변동이 모래질 이토층의 공극수압변화에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 나타난다. 하부 이토층 깊이가 15cm 지점에서는 표층과의 해수압 차이에 기인한 해수유입의 효과가 공극수압 형성에 영향을 끼쳐 최대공극수압이 최대해수면 시점보다 약간 늦게 나타나며, 깊이가 45cm 지점에서는 이토질의 압축효과가 공극수압발생에 주원

인으로 작용하여 최대 해수면 시점에 최대 공극수압을 형성하고 있다. 각 지점에서의 유효응력의 변화(그림 13)는 대체적으로 공극수압의 크기와 상반되게 나타나고 있으나, 모래질 이토층의 경우 공극수압이 유효응력변화에 미치는 영향이 이토층에 비해 상대적으로 미세하여(Das, 1983) 공극수압 발생 지점(그림 12 참조)에 형성되는 유효응력크기가 하부 이토층에서의 낮은 공극수압에 대한 유효응력과 유사하다. 최소해수면 시점에서는 모래질

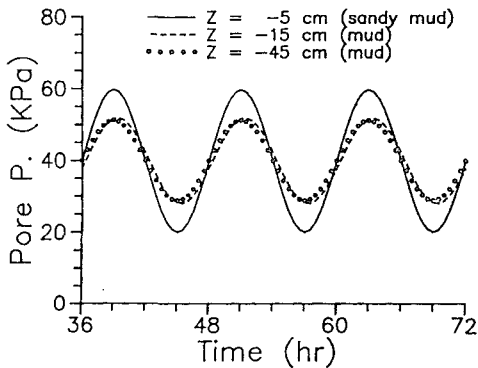


Fig. 12. Pore pressure variation at three different depths (case 1)

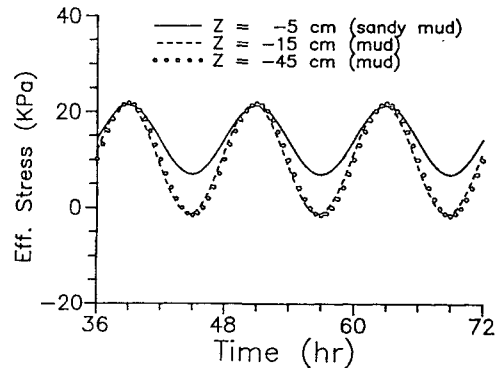


Fig. 13. Effective stress variation at three different depths (case 1)

이토층의 공극수압이 최소이며, 따라서 유효응력은 하부의 이토층에서보다 상대적으로 크게 형성되고 있다. 최소해수면 시점에서의 퇴적층 깊이에 따른 유효응력의 분포(그림 14)를 살펴보면 표층 모래질 이토층에서 높게 나타나며 하부 이토층과의 경계부분에서 감소하다가 퇴적층 깊이 약 17cm부근에서 증가하는 양상을 보여준다. 그림 14에 도시된 현장 유효응력의 변화를 기준할때 퇴적층 깊이 15cm~31cm부분에서 현장유효응력이 인장력(tension)으로 반전되어 있는 quick sand condition 환경을 지시해 준다. 모래질 이토층 하부의 quick sand condition은 표층에 이토질 함량이 증가함에 따라 다음에 설명될 경우에서 입증된 결과처럼 모래질 이토층 하부경계까지 확장되어 모래질 점토층의 모래 입자들이 하부로 이동할 수 있는 환경을 형성해 준다.

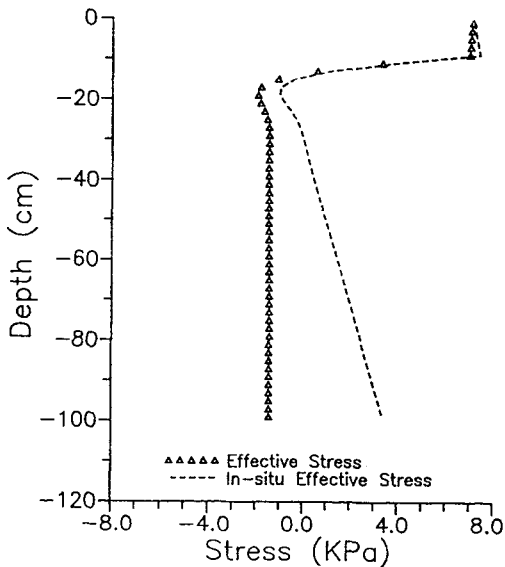


Fig. 14. Vertical changes of effective and in-situ effective stresses (case 1)

모래질 이토층이 퇴적층 깊이 10cm~20cm지점에 분포하였을 때(그림 11-b 참조) 해수면 변동에 의한 공극수압 및 유효응력의 변화를 그림 15와 16에 각각 도시하였다. 모래질 이토층 상부에 낮은 투수계수의 이토층이 존재할때 해수압 변동에 의한 해수의 유입이 상부 이토층에 의해 지연되어 모래질 이토층의 공극수압 형성에 크게 영향을 미치지 못한다. 따라서 그림 15에 도시된 바와 같이 공극수압이 각 지점에서 유사하게 형성된다. 결과

적으로 경우 1에서 설명된 원리에 의해 유효응력은 모래질 이토층에서 높게 발생된다(그림 16 참조).

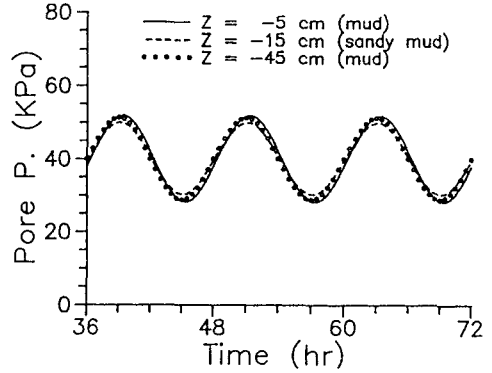


Fig. 15. Pore pressure variation at three different depths (case 2)

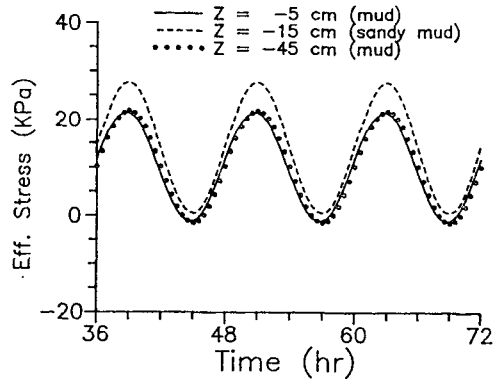


Fig. 16. Effective stress variation at three different depths (case 2)

최소 해수면 시점에 발생하는 유효응력(그림 17)은 모래질 이토층내에서 압축력으로 나타나며, 상부 이토층과의 경계부분 및 하부 이토층에서 인장력상태로 나타난다. 현장유효응력도 상하부 이토층과의 경계부분에서 인장력으로 반전되어 quick sand condition하에서 모래질 이토층의 모래 입자들이 퇴적물 재구성작용에 의해 하부로 이동될 수 있는 환경을 형성하고 있다.

모래질 이토층이 퇴적층 깊이 32cm~42cm 부근까지 하강했을 경우에(그림 11-c 참조) 최소 해수면 시점에서 발생하는 유효응력과 현장유효응력의 깊이에 따른 변화를 그림 18에 도시하였다. 이 경

요 약

우에도 유효응력과 현장유효응력이 그림 17에서와 유사한 변화를 보여주고 있으나, 하부 이토층과의 경계부분에서 자체하중에 의한 응력이 증가되어 현장유효응력이 압축력 상태를 유지하고 있다. 즉, 모래질 이토층 하부에 quick sand condition이 더이상 형성되지 않으며 모래입자 하강도 퇴적층 깊이 30cm~40cm 부근에서 한계점에 도달할 것을 지지해 주고 있다.

광양만에 분포하는 미고결 퇴적층의 물성특성을 Core 시료를 채취하여 분석하였다. 퇴적상태의 특성을 지시하는 퇴적층의 공극율이 퇴적깊이에 따라 일정한 변화를 나타내지 않으며, 이는 자체하중에 의한 자연적 압밀이 매우 미세한 것을 나타내고 있다. 조석에 의한 해수면 변동이 퇴적층 거동에 미치는 영향을 수치해석적으로 분석한 결과, 퇴적층에 형성되는 공극수압이 이토층의 낮은 투수계수에 기인하여 해수면 변동에 따른 표층 수압변화보다 느리게 진행되고 있다. 따라서, 최소 해수면 시점에 발생하는 공극수압이 해수압에 의한 역학적 응력보다 커서 퇴적층의 유효응력이 인장력으로 반전되며 일정깊이에서의 현장유효응력도 인장력상태(quick sand condition)인 것으로 나타난다. 이러한 현상은 퇴적물조직의 재구성이 내부적으로 발생될 수 있는 가능성을 제시해 주고 있다. 모래질 이토층(sandy mud layer)이 이토층내에 존재할 경우에도 이토층과의 경계부분에서 인장력상태의 현장유효응력(quick sand condition)이 발생한다. 이는 퇴적물 재구성작용에 의해 모래질 입자가 표층에서 하부층으로 하강될 수 있는 역학적 이론근거를 제시해 주고 있으며, 본 연구결과에 의하면 모래질 입자들이 약 40cm 깊이에서 하강될 때까지 quick sand condition이 형성된다.

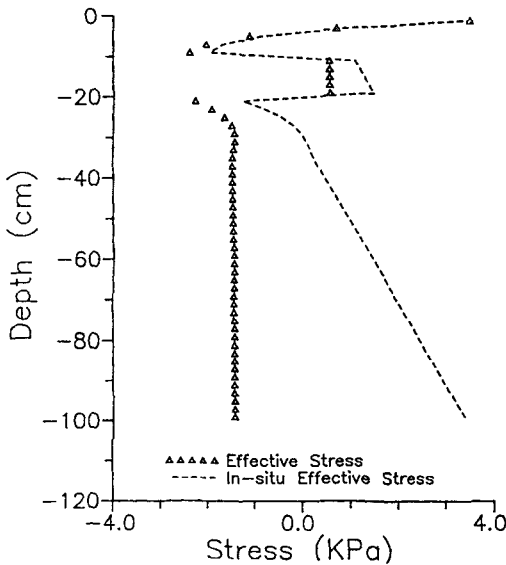


Fig. 17. Vertical changes of effective and in-situ effective stresses (case 2)

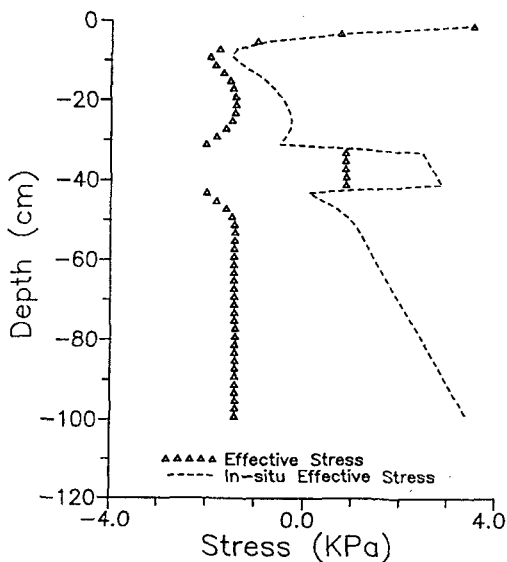


Fig. 18. Vertical changes of effective and in-situ effective stresses (case 3)

참 고 문 헌

박용안, 이창복, 최진혁. 1984. 광양만의 퇴적환경에 관한 연구. 한국해양학회지, 19(1), 82~88.  
 조태진. 1990. 미고결 퇴적물의 지질공학적 특성에 대한 수치해석적 연구. 수산학회지, 23(3), 215~224.  
 Biot, M. A. 1941. General theory of three-dimensional consolidation. J. Appl. Phys. 12, 155~165.  
 Das, B. M. 1983. Advanced Soil Mechanics. McGraw-Hill, New York.  
 Folk, R. L. 1968. Petrology of Sedimentary Rocks, Hamphill's Austin, Texas.  
 Ghaboussi, J. and Wilson, E. L. 1973. Flow of compressible fluid in porous elastic media. Int. J. Num. Method Engng, 5, 419~442.  
 Nakase, A. and Kamei, T. 1983. In situ void ratio, strength and overburden pressure anomalies in seabed clays, in Seabed Mechanics, B. Den-

- ness, ed. Graham & Trotman Ltd. 9~15.
- Noorany, I. and Gizienski, S. F. 1970. Engineering properties of submarine soils-A state-of-the-art review. Proc. ASCE, 96(SM5), 1735~1762.
- Terzaghi, K. 1925. Principles of soil mechanics. Eng. News Record.

---

1990년 11월 26일 접수

1991년 1월 21일 수리