

부두 내 중력식 구조물 내진 보강을 위한 공법의 적정성 연구

EA Study on Seismic Resistant Method for Gravity Structure in Port

나 석 현¹⁾ · 이 동 혁[†]
Sukhyun Na · Donghyuk Lee

Received: October 12th, 2022; Revised: October 17th, 2022; Accepted: October 26th, 2022

ABSTRACT : In this study, the suitability of the grouting method will be evaluated by analyzing seismic reinforcement methods for the stability of gravity structure in Port. The evaluation categories are liquefaction, sliding, toppling and circular failure. To compare the appropriateness of the seismic reinforcement method, the low mobility mortar injection, one of the grouting method and the SPC file and GRB method, which are pile wall type reinforcement methods, were evaluated and compared respectively. The object of the evaluation is the gravitational structure of Po-Hang old port. As a result of the evaluation, both the grouting method and the pile wall type reinforcement method are considered to have sufficient stability. Therefore, in the case of the gravity structure, the grouting method is more efficient than the seismic reinforcement method considering construction efficiency, economic efficiency, maintenance and similar construction cases.

Keywords : Seismic reinforcement method, Grouting method, Limit equilibrium analysis, Wall reinforcement method, Port structure

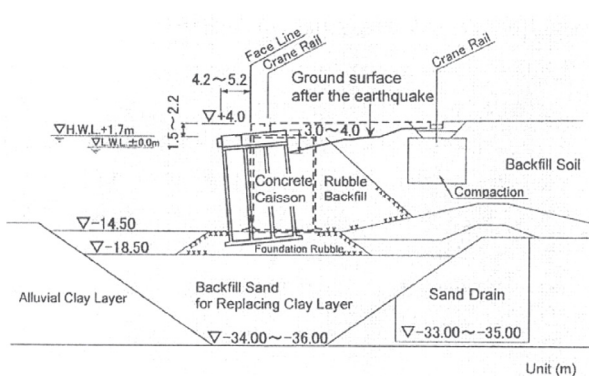
요 지 : 본 연구는 항만 중력식 구조물에 대한 내진보강을 분석하여, 그라우팅공법 적용의 적정성을 평가하고자 한다. 평가항목은 액상화, 활동, 전도 및 원호활동 등으로 공법의 적정성을 비교하기 위하여 그라우팅공법인 저유동성 모르타르 주입공법과 말뚝벽체식 보강공법인 SPC 파일 및 GRB 공법을 각각 평가하여 비교하였으며, 평가대상은 포항 구항 중력식 구조물로 선정하였다. 평가 결과, 그라우팅공법과 말뚝벽체식 보강공법 모두 평가항목에 대하여 안정성을 충분히 확보하는 것으로 검토되었다. 따라서 중력식 항만 구조물의 경우 시공성, 경제성 및 유지관리 부분과 유사 시공사례 등을 고려 시 내진보강 공법으로 그라우팅공법이 보다 효율적임을 알 수 있었다.

주요어 : 내진보강공법, 그라우팅공법, 한계평형해석, 벽체식보강공법, 항만구조물

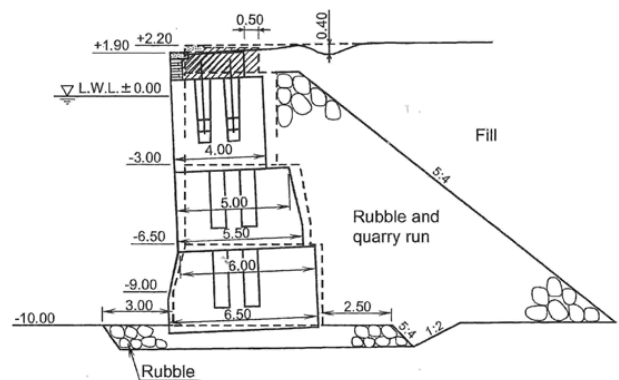
1. 서 론

2001년 일본 Kobe항에서 발생한 지진피해와 알제리아

Algeria항에서 발생한 지진피해 등의 기존 사례를 조사한 결과, 케이슨식 안벽 및 기존의 중력식 안벽 등의 구조물이 지진 시 안벽이 바다 쪽으로 이동하거나 벽체가 경사지고,



(a) Cross section of the Caisson type quay walls of Kobe Port in Japan before and after the earthquake (lai et al., 1998)



(b) Cross section of the Concrete block quay walls of Algiers Port in Algeria before and after the earthquake

Fig. 1. Seismic damaged map of the concrete block quay walls

1) Senior Managing Director, Kunil Engineering Co., Ltd.

† Ph.D., Department of Civil Engineering, Sangji University (Corresponding Author : idonghyuk@hanmail.net)

안벽 기초지반의 변형이 발생하는 등의 완전 붕괴보다 과도한 변위가 문제인 것으로 보고되어(Kim et al., 2019), 포항구항의 구조물에 적합한 보강공법을 제시하고자 한다.

2. 연구의 목적

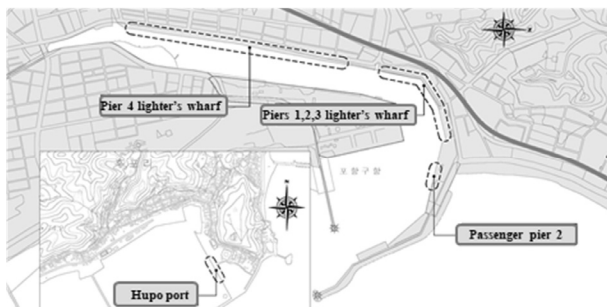
본 연구에서는 지진 발생 시 구조물에 작용하는 외력 조건과 지층 현황 등의 조건에 따라 내진 안정성을 확보하지 못할 것으로 예측되는 경우에 대하여, 포항구항의 구조물의 위치는 Fig. 2(a)와 같다.

포항구항의 대부분은 중력식 구조물이 설치되어있으며, 그 중 선정된 단면으로는 내진보강공법으로 말뚝 벽체식 보강공법이 적용된 1부두, 2부두, 4부두 4구간으로 Fig. 2(b)와 같다.

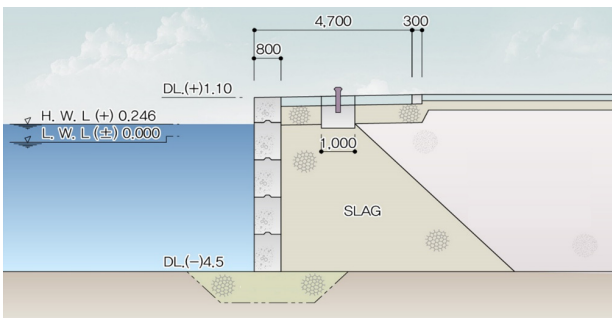
대상 구조물의 안정성을 확보하기 위한 대표적인 내진보강공법 중 Fig. 3(a)와 같은 그라우팅을 통해 지반의 강성을 증가시키는 공법, Fig. 3(b)와 같은 벽체 구조물을 설치하여 저항력을 증가시키는 공법을 포항구항 구조물의 단면을 대상으로 적용하였다.

3. 중력식 구조물 내진성능 평가

본 연구에서는 보강하기 이전 구조물에 대한 내진성능평가를 진행하였다(Fig. 4). 결과는 Table 1과 같다. 액상화 간

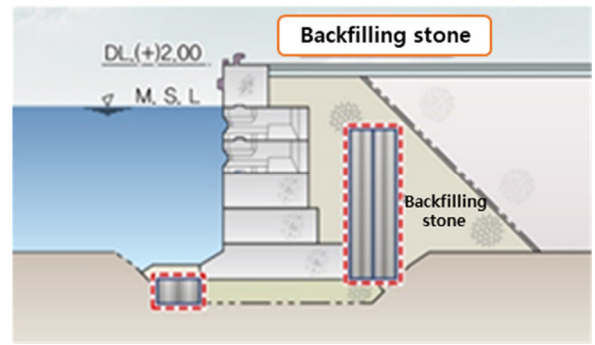


(a) Location of Pohang Port

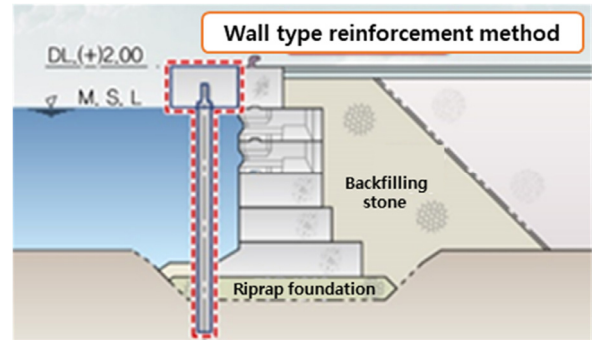


(b) Cross section of Dock #1, Dock #2, Section #4 of Dock #4

Fig. 2. Cross section and location of seismic reinforcement

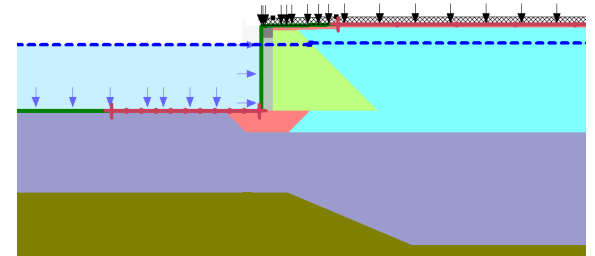


(a) Grouting method

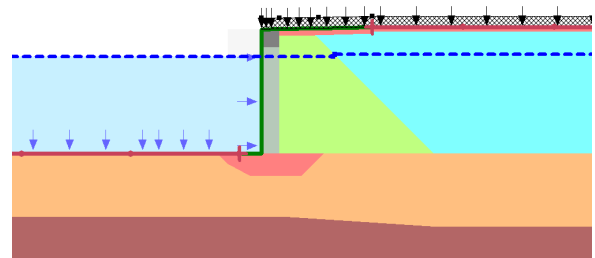


(b) Wall type reinforcement method

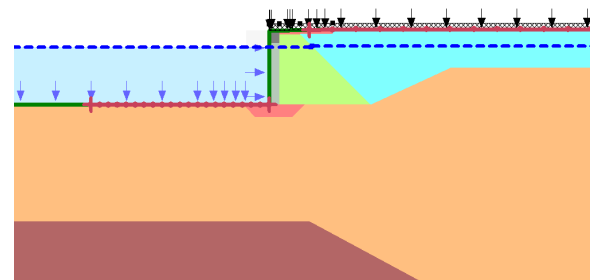
Fig. 3. Reinforcement method



(a) Dock #1 in Pohang Port



(b) Dock #2 in Pohang Port



(c) Section #4 of Dock #4 in Pohang Port

Fig. 4. Cross section of seismic analysis

Table 1. Results of the dynamic analysis of the structures

Description		Pohang old port		
		Dock #1	Dock #2	Dock #4
Factor of safety	Liquefaction	0.29 (O.K.)	1.23 (O.K.)	1.16 (O.K.)
	Sliding	0.34 (N.G.)	0.39 (N.G.)	0.50 (N.G.)
	Toppling	0.10 (N.G.)	0.12 (N.G.)	0.13 (N.G.)
	Circular failure	0.994 (N.G.)	0.837 (N.G.)	1.118 (O.K.)
Reinforcement requirement		O	O	O

*Note: Liquefaction criteria of $LPI \leq 5.0$ (Simple estimating) and Structure stability of $F.S. \geq 1.0$

Table 2. Material properties (Mohr-coulomb failure criteria models)

Soil type	Unit weight (kN/m ³)	Friction angle (°)	Cohesion (kPa)
Weathered soils	19.5	30	15
Weathered rock	20.2	33	30
Rubble mounds	20	40	0
Backfill	20	35	0
Structure	23	40	1,000

이 평가에 대해서는 허용 기준 이내의 값을 가지고 있으나 원호활동과 활동 및 전도에 대해서는 허용기준 이상의 값을 가지지 못하는 것으로 나타났다. 해석 시에는 Table 2와 같이 일반적으로 사용되는 지반모델인 Mohr-coulomb를 적용하였으며, 지반가속도는 1부두의 경우 0.177g, 2부두는 0.118g, 4부두 4구간은 0.059g를 적용하여 해석을 진행하였으며, 해석 단면은 Fig. 4와 같다.

4. 내진보강공법 및 성능평가

4.1 보강방안

4.1.1 보강 계획

항만 구조물의 안정성은 내진성능을 평가한 항목과 동일하게 활동, 전도, 원호활동에 대한 안전율로써 계산되는데, 지반의 저항력을 증가시키거나 활동을 줄이는 방향으로 안전율을 증가시켜 보강할 수 있다(Kim, 2019; Han, 2003). 포항구항의 항만구조물 중 1, 2부두와 4부두 4구간은 내진 안정성 검토 결과 기준을 만족하지 못하여 내진보강이 필요한 것으로 판단되어 말뚝벽체식 공법과 그라우팅 공법을 적용하여 안전율을 높이는 방향으로 내진보강을 계획하였다.

4.1.2 그라우팅공법 선정

내진보강공법 중 그라우팅 공법은 항만분야에서 주로 사용하는 Eco CG, MCGS, CGS공법 등의 저유동성 모르타르 주입공법, SRC, FJS공법의 고압분사 모르타르 공법과 JSP, RJP공법의 고압분사 시멘트밀크 주입공법이 존재하며 Table 3과 같은 특징을 가지고 있다.

Table 3과 같은 장단점을 가지고 있는 공법 중 지진 시 토압저감에 의한 활동, 전도와 편심, 경사하중에 의한 지지력 확보가 용이하며, 기존부지의 사용성에 대한 현장여건이 좋은 저유동성 모르타르 주입공법을 선정하고자 한다.

4.2 각 공법에 따른 내진안정성 검토 및 검증

4.2.1 내진보강 공법의 적정성 검증

일반적으로 항만구조물의 내진보강 시 중력식 구조물은

Table 3. Comparison of the grouting methods

Method	Low-flowdity grouting (Mortar)	Jet grouting (Mortar)	Jet grouting (Paste)
Description	<ul style="list-style-type: none"> Fill the relevant layer with the concrete base low-mobility mortar having a slump of 5cm or less 	<ul style="list-style-type: none"> Fill the relevant layer with the mortar through the tip outlet after ground drilling by high-pressure injection 	<ul style="list-style-type: none"> Fill the relevant layer with the cement milk through the jet grouting pipe after crushing using high-pressure injection
Variations	<ul style="list-style-type: none"> CGS, Eco CG, MCGS 	<ul style="list-style-type: none"> SRC, FJS, EJS, CJM 	<ul style="list-style-type: none"> JSP, RJP, SIG
Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> Environmental method (No sediments and slime producing) Improved constructability and efficiency with compact machine Disadvantageous on rubble layer with cured weathered soils (Loose mortar bondage occurrence) Relaxation behaviour of wall and backfill with over injection pressure 	<ul style="list-style-type: none"> Independent on intermediate geomaterial (i.e., Cured wathered soils, sediments, etc.) Large-diameter reinforcement can be conducted and less drilling needed Continuous reinforcement can be conducted in sand and slag layer Suitable determination of the slump value is needed for test construction Environmental problem through the sediments and slime producing 	<ul style="list-style-type: none"> Independent on intermediate geomaterial Large-diameter reinforcement can be conducted and less drilling needed Continuous reinforcement can be conducted in sand and slag layer Environmental problem Weaknees on stability with relatively small strength of improved layer

활동, 전도 및 원호활동 안정성이 부족하여 그라우팅 공법이 적용되고, 잔교식 및 널말뚝식 구조물에는 말뚝응력 안정성이 부족하여 말뚝벽체식 보강공법이 적용되고 있다(Jang et al., 2005). 그러나 포항구항의 경우 1부두, 2부두, 4부두 4구간의 경우 중력식 구조물임에도 불구하고 말뚝벽체식 보강공법을 적용하였다. 이에 대해 일반적으로 사용되는 그라우팅공법을 적용하였을 때 공법의 안정성을 평가하고자 한다.

4.2.2 내진보강 공법 비교

본 절에서는 내진보강공법의 적정성에 대해 비교하고자 한다.

첫째, 안정성해석에서 공통되는 부분인 원호활동에 대한 안전율로 한계평형해석을 진행하였을 때, 저유동성 모르타르 주입공법을 적용한 경우의 지진 시 안전율보다 말뚝벽체식 보강공법을 적용하였을 때, 원호활동에 대한 보강효과가 우수한 것을 확인할 수 있었다.

둘째, 지진에 대해 안전하다고 판단된 그라우팅공법과 말뚝벽체식 공법에 대한 시공성 및 경제성 등의 경우 그라우팅공법을 적용시키는 경우 재료의 품질, 지반의 고정 및 시공성 및 경제성 측면에서 우수하다는 장점을 가지고 있다.

셋째, 그라우팅공법을 적용하였을 때 시공 중 부두운영 간섭이 말뚝벽체식 공법을 적용한 경우보다 적으며, 해상 및 육상작업이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

4.2.3 포항구항 기존보강(말뚝벽체식 보강공법) 선정

말뚝벽체식 파일 공법은 대표적으로 벽강관파일, SPC파일, GRB공법이 있다. 벽강관파일의 경우 원형강관에 연결이음쇠를 부착, 연속된 벽체로 시공하여 배면에 작용하는 토압, 수압 등에 저항하는 구조물이다. SPC파일은 고강도 프리스트레스 콘크리트 말뚝을 연속된 벽체로 시공하는 구조물이고, GRB공법은 강관선단에 비트를 설치하여 내부 순환수를 주입하여 무소음, 무진동, 무변위로 시공하는 회전압입식 공법이다. 이 3가지 공법에 대한 시공성, 유지관리성, 안정성은 Table 4와 같이 정리되며 3가지의 공법은 벽강관파일의 경우 1.25, SPC파일의 경우 1.00, GRB공법은 1.01로 벽강관파일이 가장 경제성이 좋지 못한 것으로 판단되어 SPC파일 및 GRB공법을 선정하였다.

4.2.4 포항구항 기존보강(말뚝벽체식 보강공법) 적용 시 안정성 검토 결과

1, 2 부두와 4부두 4구간의 단면 형식은 솔리드 블럭으로 되어있으며, 1부두 연장은 146m, 2부두는 180m, 4부두 4구간은 343m이다.

Fig. 5의 (a) 포항구항 1부두, (b) 포항구항 2부두 및

Table 4. Comparison of the pile wall type reinforcement methods

Method	Steel pipe sheet piles	SPC pile	GRB method
Constructability	<ul style="list-style-type: none"> Poor constructability due to the additional locking component for splice-joint of piles Complainable due to the drilling and driving 	<ul style="list-style-type: none"> Simple construction procedures Microscopic construction is available with high performance precast concrete composite pile 	<ul style="list-style-type: none"> High constructability with non-drilling and less complaints High construction accuracy
Maintenance	<ul style="list-style-type: none"> Poor maintenance due to the corrosion of the steel pipe piles 	<ul style="list-style-type: none"> Well maintenance with non-corrosion of the structure 	<ul style="list-style-type: none"> Poor maintenance due to the corrosion of the steel pipe piles
Stability aspect	<ul style="list-style-type: none"> Poor resistance on displacement of the steel body 	<ul style="list-style-type: none"> Relatively stable with high resistance on displacement due to the high performance precast composite pile 	<ul style="list-style-type: none"> Non-vibration and stability is guaranteed on adjacent structure

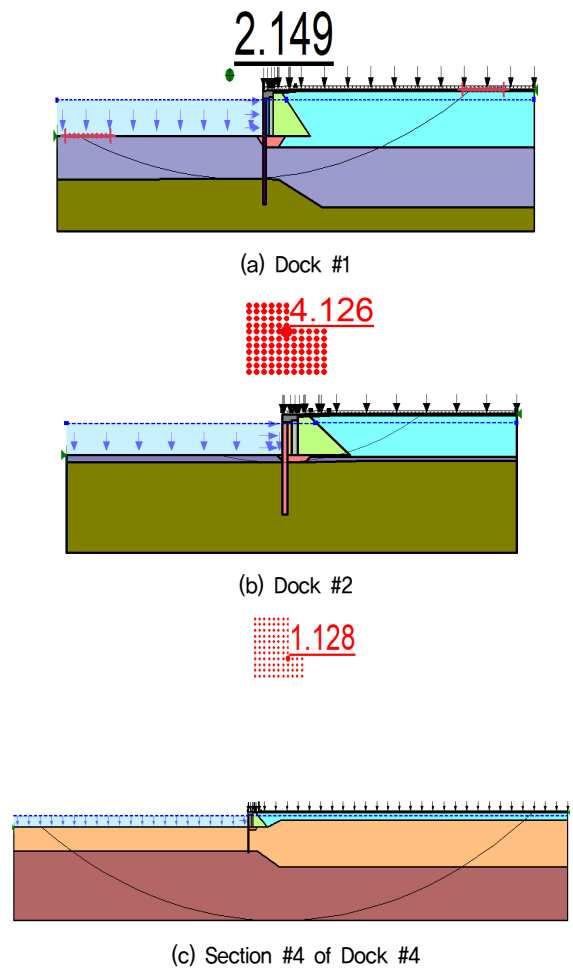


Fig. 5. Cross section with rigid wall method in Pohang old port

Table 5. Results of stability analysis on circular failure after pile wall type reinforcement

Applied reinforcement	Pile wall type reinforcement method			
	Site	(a) Dock #1	(b) Dock #2	(c) Dock #4
Ground acceleration	0.177g	0.118g	0.059g	
F.S. for circular failure	2.114	1.472	1.493	
Stability assessment	O.K.	O.K.	O.K.	

*Note: Factor of safety criteria of 1.0

Table 6. Investigated pile stress after analysis

Variables	Dock #1	Dock #2	Dock #4	
f_{cu} [MPa]	12.404	4.57	9.388	
f_{ci} [MPa]	5.093	50.34	8.072	
Allowable stress [MPa]	f_{ca}	29.9	138.31	29.9
	f_{ci}	29.9	189.0	29.9
Stress ratio	0.41	0.30	0.31	
Allowable stress ratio	1.0	1.0	1.0	
Stability assessment	O.K.	O.K.	O.K.	

(c) 포항구항 4부두-4구간에서 말뚝벽체식 보강 공법을 적용한 경우에 대한 해석을 진행하였으며, 말뚝응력에 대한 해석 또한 진행하였다.

말뚝벽체식 보강공법을 적용하여 해석한 결과 원호 활동에 대한 안정성은 Table 5와 같이 (a) 포항구항 1부두는 2.114, 2부두는 1.472, 3부두는 1.493이 나타났으며, 각 말뚝에 대한 응력비 또한 허용 응력비 이내의 값을 갖는 것으로 나타나 안전한 것으로 계산되었다.

4.2.5 그라우팅공법 적용 시 안정성 검토 결과

저유동성 모르타르 주입공법을 Fig. 6의 (a) 포항구항 1부두, (b) 포항구항 2부두 및 (c) 포항구항 4부두-4구간 단면에 적용하여 해석을 진행하였으며, 원호활동의 경우 Table 7과 같이 기준 안전율 1.0을 초과한 안전율을 확인할 수 있었다. 추가적으로 전도 및 활동에 대해 계산한 결과 Table 7과 같이 1부두의 경우 활동 1.09, 전도 1.55로 두 가지 경우 모두 기준 안전율 1.0을 초과하는 결과를 얻을 수 있었으며, 2부두와 4부두 4구간에서 결과 또한 마찬가지로 활동 및 전도에 대해 안전하다는 계산 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

과거와 달리 2016년 경주, 울산 등의 지진으로 지진의 발생가능성이 높아지면서 각 구조물의 내진성능평가 및 내진

Table 7. Results of the stability analysis after reinforcement

Description		Dock #1	Dock #2	Dock #4
Ground acceleration		0.177g	0.118g	0.059g
Factor of safety	Sliding	1.09	1.22	1.68
	Toppling	1.55	2.63	3.66
	Circular failure	1.032	1.087	1.109
	Stability assessment	O.K.	O.K.	O.K.

*Note: Factor of safety criteria of 1.0

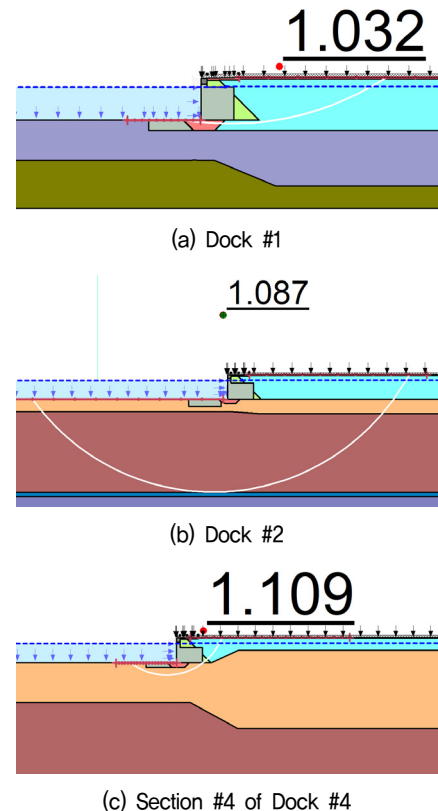


Fig. 6. Cross section of CGS

보강을 진행하고 있다. 항만의 내진보강에 있어 그라우팅공법이나 말뚝벽체식 보강공법이 구조물 종류에 따라 선별 적용되고 있으나, 포항구항의 경우 중력식 구조물에 말뚝벽체식 보강공법이 적용되어, 그라우팅공법을 적용하였을 경우와 적정성을 비교하기 위해 각 공법의 적용에 따른 안정성과 시공성 및 유지관리 등의 요인을 분석하였고, 다음과 같은 결론을 확인하였다.

- (1) 실제 항만 구조물의 내진보강에는 중력식 구조물에는 그라우팅공법이 적용되고 있으며, 잔교식 및 널말뚝식의 경우 말뚝벽체식 구조물을 적용하고 있으나 포항구항의 경우 일부 중력식 구조물에 말뚝벽체식 공법을 적용하였다.

- (2) 말뚝벽체식 공법이 적용된 중력식 구조물에 내진보강공법으로 그라우팅 공법 적용 결과 전도, 활동에 대한 안정성을 충분히 확보하는 것으로 계산되었다.
- (3) 또한 원호활동에 대한 안정성 검토결과 안정한 것으로 확인되었다.
- (4) 따라서, 보강방안별 시공성, 유지관리 및 경제성 등을 평가하였을 때 그라우팅공법이 더 다양한 유사 시공사례 및 품질관리의 용이함으로 시공성 및 경제성 부분에서 우수하다고 판단하여 포항구항 중력식 구조물에 대한 보강공법으로 그라우팅공법을 제시한다.

References

1. Kim, B. I., Hong, K. H., Kim, J. H. and Han, S. J. (2019), The study on improvement methods for the seismic performance of port structures, J Korean Geosynthetics Society, Vol. 18, No. 4, pp. 151~165.
2. Jang, I. S., Kwon, O. S., Park, W. S. and Jeong, W. M. (2005), Evaluation of seismic performance for various types of pile head of landing pier, Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, pp.70~79.
3. Han, J. T., Kim, S. R. and Kim, M. M. (2003), Evaluation of seismic performance of open caisson quay walls by shaking table tests, Korean Society of Civil Engineers, pp. 4139~4143.
4. Iai, S., Ichii, K., Liu, H. and Morita, T. (1998), Effective stressanalyses of port structures, Soils and Foundations, 38 (Special), pp. 97~114.
5. 국토해양부 한국시설안전공단(2012), 기존 시설물(항만) 내진 성능 평가 및 향상요령(안).
6. 포항구항 내진보강 설계 보고서.