

관중혼합처리공법 개발을 위한 혼합토 특성 및 최적배합비 산정에 관한 연구

Study on Engineering Characteristics of Mixed Material and Mix Ratio Design to Develop Pipe Mixing Method

한상재¹, 김병일^{2*}, 홍강한³, 강병윤⁴

Sang-Jae Han¹, Byung-Il Kim^{2*}, Kang-Han Hong³, Byung-Yoon Kang⁴

¹Member, President, Expert Group for Earth and Environment

²Member, Research Director, Dept. of Geotechnical Engineering, Expert Group for Earth and Environment

³Nonmember, Deputy General Manager, Dept. of Geotechnical Engineering, Expert Group for Earth and Environment

⁴Nonmember, Researcher, Future Policy Research Group, Rural Research Institute, KRC

ABSTRACT

In this study, laboratory tests (flow, unit weight, unconfined compressive strength and bleeding tests) were performed to evaluate engineering properties of treated soil to improve pipe mixing method. As a result, flow and bleeding properties are proportional to the water contents. The unit weight and unconfined compressive strength is decreased as the water contents increased. Comparing equipments contact pressure with bearing capacity of the mixed soil for dozer, backhoe and belt conveyor are immediately applicable. The applicable water content range is estimated from 80% to 200% by pipe mixing method using cement. Also, The design chart is developed from the results.

요 지

관중혼합처리공법 개발을 위한 혼합토 특성 및 최적배합비 산정에 관한 연구

Keywords : Pipe mixing method, Dredged material, Cement treated soil, Design chart

1. 서 론

준설공정과 연계하여 조성된 투기장 또는 매립지는 양질의 모래를 매립재로 활용하기 보다는 항로 준설 시 발생된 세립질 퇴적토, 하천 불량 퇴적토로 구성된다. 불량 준설토를 매립함에 따라 지반개량을 위한 장비 진입이 불가능하므로 표층처리가 필수적으로 요구된다. 이러한 추가

공정은 기간 및 비용 증가, 모래 및 골재 사용에 따른 환경 관련 비용문제(환경 훼손, 재료원 이동에 따른 비산 먼지 발생 등)가 발생하여 원활한 준설매립공사의 저해요인이 되고 있다. 이러한 문제를 해결하고자 국내에서는 준설토의 이송과정에서 불량한 준설토사를 이송관내에서 혼합(이하 관중혼합)하여 개질(改質)함으로써 양질의 재료를 매립하는 관중혼합처리공법을 개발 중에 있다. 관중혼합처리공법은 준설형식 및 이송 함수비에 따라 그래브식 준설의 경우 강도를 증진시키는 고화처리 방법이 적용되고, 펌프식 준설의 경우 침강속도 및 전단강도를 증진시키는 개질처리 방법이 주로 적용 된다(Korea institute of ocean

Received 11 Mar. 2015, Revised 20 Mar. 2015, Accepted 22 Mar. 2015

*Corresponding author

Tel: +82-31-478-4111; Fax: +82-31-478-4115

E-mail address: geokbi@ege.co.kr (B. Kim)

Table 1. Physical properties of soil (Kaolin)

Gs	Atterberg limits %		Grain size distribution (%), Finer than						U.S.C.S
	LL	PI	No.4	No.10	No.40	No.200	0.005mm	0.002mm	
2.593	48.3	24.6	100.00	100.00	100.00	98.8	39.3	26.2	CL

Table 2. Test conditions

Soil	Cement type	Water content (%)	Cement content (kg/m ³)
Kaolin	Blast slag cement	50~1,000	50, 60, 80, 100

science & technology, 2000). 이 중 강도증진을 위한 고화처리공법 적용 시 개량 대상 원지반의 함수비가 증가할수록 강도는 작아지고 블리딩(재료분리) 현상은 증가하게 되어 적용성이 급격히 낮아지게 되므로 적정 함수비 영역을 선정할 필요가 있다(Yoon et al., 2010). 본 연구에서는 관중혼합을 위한 대상토의 함수비 및 고화재 함량에 따른 공학적 특성을 파악하고자 배합시험을 실시하였다. 이를 통해 혼합토의 유동성, 강도 및 블리딩 특성을 비교/분석하였고, 그 결과를 통해 관중혼합처리토의 최적함수비 조건을 제시하였다. 또한, 제안된 함수비 영역에서 활용할 수 있는 설계 차트를 개발하여 제시하였다.

2. 재료적 특성

본 연구에서는 시험결과의 범용적 활용을 위해 카올린을 사용하였으며 시료의 공학적 특성을 파악하기 위해 입도분석시험(KS F 2309), 비중시험(KS F 2308)과 액소성한계 시험(KS F 2303 & 2304)을 실시하였다. 시험결과 카올린의 비중은 2.593, 액성한계는 약 48.3%, 소성지수는 24.6%로 나타났으며, 통일분류법상 CL로 구분되었다(Table 1).

3. 실내시험

3.1 시험조건

해외 사례(財団法人沿岸技術研究センター, 2009) 및 시멘트 주입공법 사례 검토결과 고화재를 사용한 관중혼합처리공법의 영향인자는 준설토의 물리적 특성(액성한계, 세립분 함량, 초기함수비 등), 이송되는 혼합토의 함수비, 고화재 첨가량 등이 제시되었다. 일반적으로 관중혼합처리공법은 말뚝체 또는 구조체와 같은 고강도($q_u=1,500\sim$

$2,000kPa$) 시멘트혼합물을 조성하는 공법과는 달리 상대적으로 낮은 강도($q_u < 100\sim 400kPa$)의 지반으로 조성되는데 이때의 고화재 첨가량은 $50\sim 100kg/m^3$ 로 조사되었다(財団法人沿岸技術研究センター, 2009). 또한, 함수비는 준설토 형식(그레브준설토, 펌프준설토)에 따라 준설토 원지반 이송토의 함수비 변동폭이 매우 크므로 액성한계 이상(50%)~1000% 미만 조건으로 조성하였다. 이에 본 연구에서는 함수비와 고화재 첨가량에 따른 유동성, 강도, 블리딩 특성 등을 평가할 수 있도록 Table 2와 같은 조건으로 실험을 수행하였다.

3.2 실험방법

시멘트혼합처리토의 유동성에 대한 직접적인 실험으로는 슬립프콘을 이용한 방법(KS F 2402), 실린더몰드를 이용한 방법(ASTM D 6103, JHS A 313)이 있으며 본 연구에서는 일본의 도로공단 규격 실린더몰드(직경 80mm×높이 80mm)와 방법(JHS A 313)을 적용하였다. 시험 방법은 먼저 평평하고 단단한 평판위에 실린더를 놓고 혼합토를 3층으로 나누어 채웠으며 액체 상태이므로 별도의 다짐은 하지 않았다. 시료가 채워진 실린더를 수직방향으로 벗기고, 혼합물이 충분히 주저앉은 다음 흐름값을 측정하였다(Han et al., 2009).

블리딩은 시료, 물, 고화재의 배합 후 시료와 고화재 등이 침하함으로써 물이 분리 상승하는 현상으로 KS F 2433를 적용하였고, 블리딩률은 식 (1)과 같이 결정하였다.

$$\text{블리딩률(\%)} = A/B \times 100 \quad (1)$$

여기서, A: 20시간 경과 후 블리딩된 물의 총량(ml)

B: 시료의 양(ml)

혼합토의 강도 특성은 일축압축강도 시험을 통해 파악

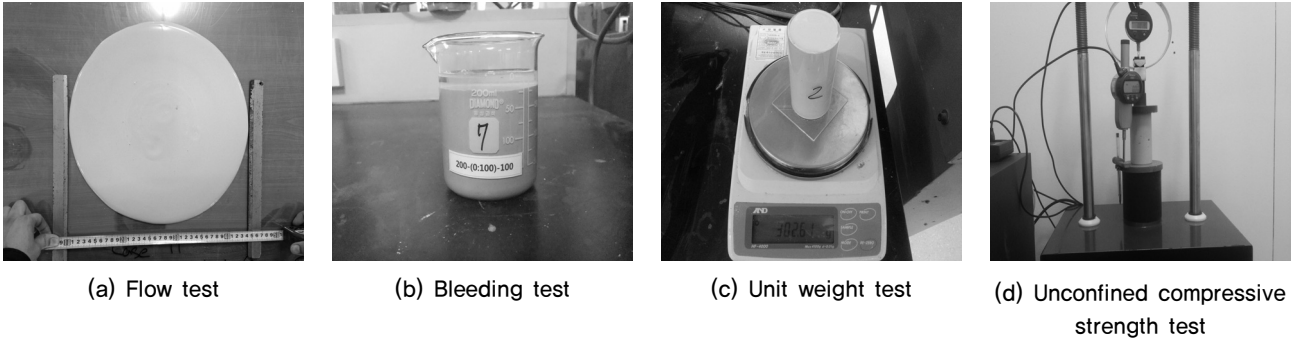
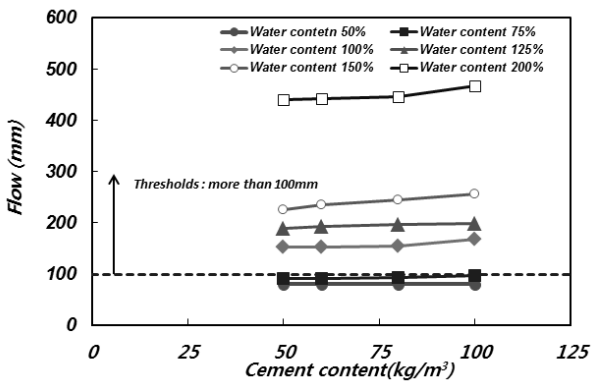
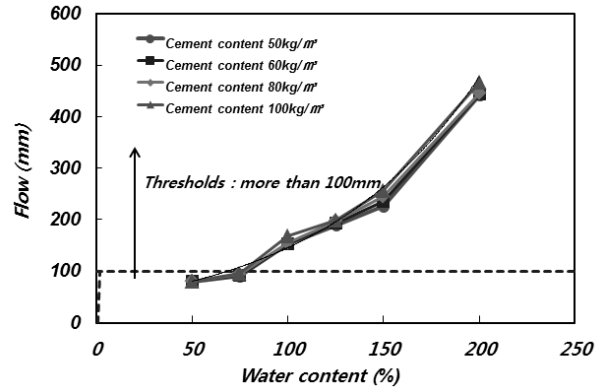


Fig. 1. Laboratory test



(a) Flow with cement contents



(b) Flow with water contents

Fig. 2. Flow characteristics of pipe mixed soil

하였다. 배합이 완료된 유동화 처리토를 사용하여 직경 50mm×높이 100mm의 몰드에 양생하여 재령 7일, 28일의 일축압축강도를 측정하였고, 양생시킨 공시체는 KS F 2314에 의해 1.0mm/min의 변형속도로 파괴시켰다. 장비의 주행성 및 지지력은 28일 강도를 기준으로 평가하였다 (Nam, 2012).

4. 결과 및 분석

4.1 유동성 및 단위중량

유동특성 분석 시험의 경우 기존 사례를 참조하여 일본의 도로공단 규격 실린더몰드(JHS A 313, 직경 80mm×높이 80mm)를 사용하였다. Fig. 2에 제시된 바와 같이 고화재 첨가량에 따른 유동특성은 큰 차이를 보이지 않으며, 혼합토의 함수비에 따라 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 혼합토의 관중 이송 효율을 고려한 최소 유동치는 별도의 규정은 마련되어 있지 않아 해외의 이송처리 사례를 참고로 100mm 이상을 적용하였다(財団法人沿岸技術研究センター, 2009). 본 실험 결과의 경우 허용 기준치를

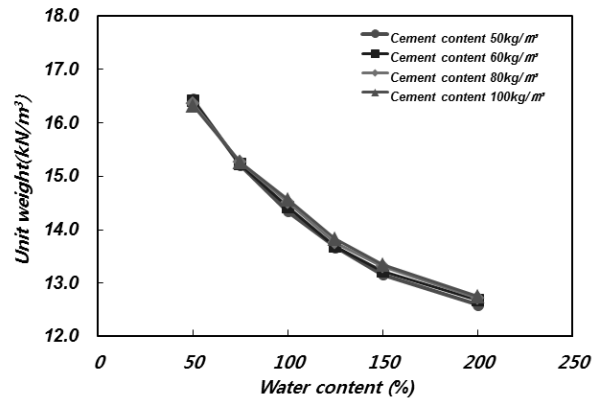


Fig. 3. Unit weight of pipe mixed soil

만족하는 함수비는 76% 이상으로 액성한계(48.3%)의 약 1.57배로 나타났다.

단위중량은 Fig. 3에 제시된 것과 같이 함수비에 반비례하는 것으로 나타났으며 고화재 첨가량에 따른 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 준설매립 시 혼합토의 경량화는 호안 또는 구조물에 작용하는 토압감소 측면에서 유리하나 관로 매설, 굴착 후 되메우기 등에는 부력에 취약할 수 있으므로 사용 목적에 맞는 기준치 설정이 필요한 것으로 사료된다.

4.2 강도 및 재료분리 특성

Table 3은 함수비 및 고화재 첨가량에 따른 혼합토의 강도 측정결과를 나타낸 것이다. 모든 고화재 함량에서 일축압축강도는 함수비 200%까지 지속적으로 감소하는 경향을 보였다(Fig 3(a)). 또한, 동일 함수비에서 시멘트 첨가량이 증가할수록 일축압축강도는 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 3(b)).

Fig. 4(a)에 나타난 것 같이 함수비 200% 이상에서 일축압축강도가 반등하는 경향을 보이는데, 이는 동일량의 고화재를 첨가했음에도 경화 전 블리딩 현상으로 인해 상등수가 발생되고, 퇴적된 시료의 체적이 감소하여 토립자의 실제 단위 체적당 고화재 첨가량이 증가하였기 때문이다.

Fig. 5(a)와 (b)에 제시된 바와 같이 함수비가 증가함에 따라 실제 퇴적된 시료의 높이는 함수비 200%를 기점으로 하여 급격히 감소하고 있다. 실제 형성된 시료의 체적(상등수 제거 후 몰드의 체적)과 투입된 고화재양의 관계

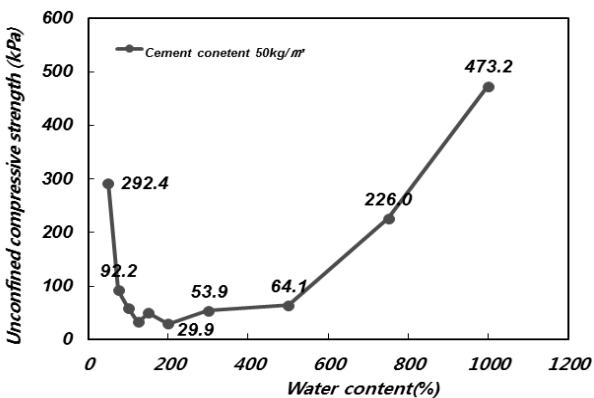
로부터 시료에 혼입된 실 고화재양(고화재 투입량/블리딩 후 체적, kg/m^3)을 계산하여 Fig. 5(b)에 제시하였다. 실제 혼입된 고화재의 양이 함수비 200%를 기준으로 급격히 증가하기 때문에 강도가 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 6에는 함수비에 따라 측정된 블리딩율을 제시하였다. 약 100% 이하에서는 재료분리가 발생하지 않았고, 이후 함수비와 선형적인 관계로 증가하는 것으로 나타났다.

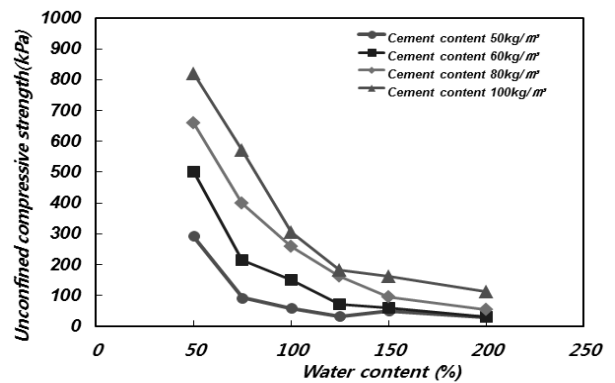
이상의 결과를 종합하면 함수비 200%에서 블리딩이 발생하여 혼합토의 체적이 감소함에 따라 실 고화재 함량(고화재 투입량/블리딩 후 체적, kg/m^3)이 증가하여 강도가 다시 증가하는 것으로부터 함수비의 범위를 200%로 제한하였다. 측정된 블리딩 시험 결과 함수비와 블리딩율은 선형적인 관계가 있으며, 일축압축강도 변곡점인 함수비 200%에서 약 10%로 나타났다. 특히, 혼합토 매립 시 블리딩 현상에 따른 지반의 압축성 증가에 따른 투기물량 증가 및 실고화재 투입량 증가에 따른 경제성 감소, 준설매립 시 상등수의 유출을 허용하고 관중혼합처리토의 목적이

Table 3. Test results of unconfined compressive strength

Water content (%)	Cement content (kg/m^3)	Unconfined compressive strength, q_u (kPa)			
		50	60	80	100
50		292.36	501.27	659.00	820.47
75		92.15	215.04	398.17	571.97
100		59.16	151.50	259.60	305.53
125		32.59	71.37	160.86	181.03
150		49.87	59.52	95.74	162.21
200		29.92	31.43	55.06	111.44
300		53.89	—	—	—
500		64.13	—	—	—
750		226.01	—	—	—
1000		473.20	—	—	—

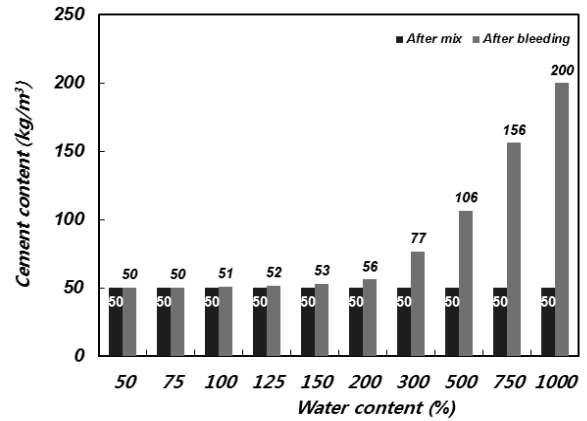
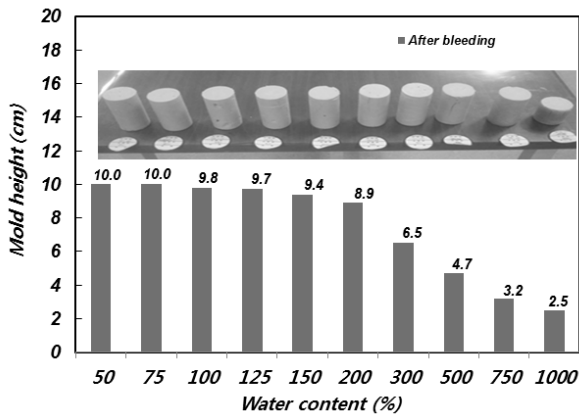


(a) Effect of water content



(b) Effect of cement content

Fig. 4. Unconfined compressive strength with water and cement content conditions



(a) Height of sample after bleeding

(b) Cement content in sample after bleeding

Fig. 5. Height and cement content change after bleeding

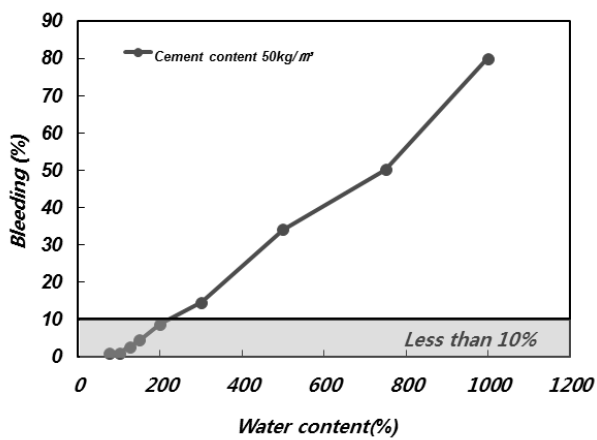


Fig. 6. Effect of water content on bleeding characteristics

후속장비의 진입을 위한 최소 강도확보에 있음을 고려하여 재료분리의 허용치를 약 10%로 설정하였다(Fig. 6).

관중혼합처리공법의 주목적은 불량한 준설토를 개질하여 지반의 강도를 증진시켜 매립 후 사용 목적별 필요 강도 예를 들면, 시공 장비의 즉시 진입이 가능하도록 하는

데 있다. 장비의 진입 가능여부를 판단하기 위해서는 시공 장비의 접지압과 혼합토의 지지력 산정이 필요하다. 매립 지반 조성에 소요되는 일반적인 장비는 백호우, 도저, 덤프, PBD 장비 등이 있으며 본 연구에서는 각 장비의 하중 및 제원을 검토하여 접지압을 Table 4와 같이 산정하였다.

점성토($\phi=0$) 지반의 지지력 추정식을 이용, 점착력을 역산한 후 $q_u = 2c_u$ 의 관계와 장비별 접지압을 바탕으로 주행 가능한 필요 일축압축강도를 산정하였다(Table 5, 6). 지지력의 안전율(F_s)은 시공시 장비 주행성 검토임을 고려하여 1.2로 가정하여 산정하였다(Terzaghi, 1943; Meyerhof, 1974; Design Standards for Harbour and Fishery Port, 2005).

장비주행에 소요되는 혼합토의 일축압축강도를 분석한 결과 벨트컨베이어, 백호우($0.2m^3$), 도저(7t, 13t) 등의 장비는 시험결과의 최소값 $29.9kPa$ (함수비 200%, 고화재침 가량 $50kg/m^3$) 이하로 모든 조건에서 주행이 가능하며, 고화재량 조절 시 PBD 장비, 덤프(2.5t), 도저(19t) 등의 장

Table 4. Calculation of equipments contact pressure

Equipments	Weight, W(kN)	Specification			Weight coefficient	Contact pressure, P (kPa)
		Wheel type	Width, b (m)	Length, a (m)		
Belt conveyor	102,0	Caterpillar	0,80	2,70	0,50	23,6
Backhoe ($0,2m^3$)	54,0	Caterpillar	0,38	2,00	0,50	35,5
Wet type dozer (7 t)	77,3	Caterpillar	0,55	3,00	0,50	23,4
Dozer (13 t)	131,0	Caterpillar	0,77	2,61	0,50	32,6
Dozer (19 t)	320,0	Caterpillar	0,76	2,80	0,50	75,2
PBD (60 t)	823,9	Caterpillar	0,76	4,47	0,50	122,9
Dump (2,5 t)	57,8	Tire	0,09	0,20	0,20	642,2
Dump (15 t)	260,0	Tire	0,125	0,20	0,10	1040,0
Dump (24 t)	378,3	Tire	0,125	0,20	0,15	2269,8

Table 5. Equations for determining bearing capacities

Quote	Equation
Terzaghi (1943)	$q_u = \frac{cN_c + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma + \gamma D_f N_q}{F_s}$
Design Standards for Harbour and Fishery Port (2005)	$q_u = \frac{1.018k \times B + 5.14c_u}{F_s}$
Meyerhof (1974)	$q_u = cN_c s_c d_c + \bar{q} N_q s_q d_q + 0.5\gamma BN_\gamma s_\gamma d_\gamma$

Table 6. Evaluation for undrained shear strength and unconfined compressive strength

Equipments	Weight, W (kN)	Contact pressure, P (kPa)	Required cohesion, cu(kPa)			Required unconfined compressive strength, qu (kPa)
			Terzaghi (1943)	Design Standards for Harbour and Fishery Port (2005)	Meyerhof (1974)	
Belt conveyor	102.0	23.6	5.0	5.5	5.5	11.0
Backhoe (0.2m³)	54.0	35.5	7.5	8.3	8.3	16.6
Wet type dozer (7 t)	77.3	23.4	4.9	5.5	5.5	11.0
Dozer (13 t)	131.0	32.6	6.9	7.6	7.6	15.2
Dozer (19 t)	320.0	75.2	15.8	17.6	17.6	35.2
PBD (60 t)	823.9	122.9	25.9	28.7	28.7	57.4
Dump (2.5 t)	57.8	642.2	135.2	149.9	149.9	299.8
Dump (15 t)	260.0	1040.0	218.9	242.8	242.8	485.6
Dump (24 t)	378.3	2269.8	477.9	529.9	529.9	1059.8

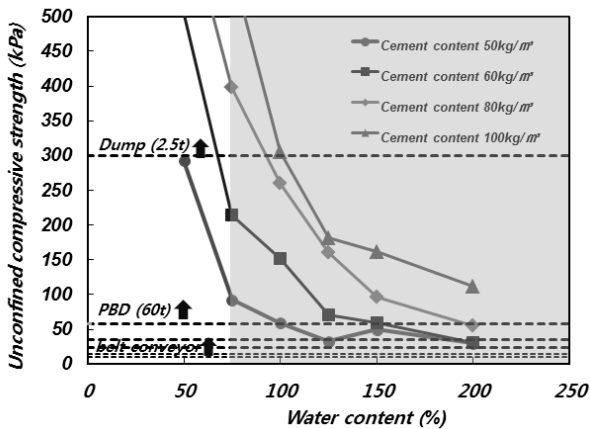


Fig. 7. Applicable equipments with treated soil

비가 추가로 주행 가능한 것으로 검토되어 혼합토의 적용성은 높은 것으로 검토되었다(Fig. 7).

이상과 같은 실내실험 분석 결과 블리딩율 10% 이하, 강도 반등 함수비 200%, 흐름값 100mm 이상 조건을 만족하는 관중혼합처리를 위한 적정 함수비 영역은 약 80~200%인 것으로 평가되었다.

4.3 상관 관계를 이용한 설계 차트 개발

본 연구에서는 함수비, 흐름값, 블리딩율, 고화재 함량

및 일축압축강도간의 관계를 상관성 분석을 통해 규명하였다. 또한, 실험결과를 통해 흐름값의 변화가 고화재 함량에 큰 영향을 받지 않았고, 블리딩율과 선형적인 관계가 있는 것으로부터 고화재 함량에 따른 블리딩율도 큰 변화를 보이지 않을 것으로 예상할 수 있다. 일반적으로 블리딩율은 고화재 첨가량에 반비례하나 배합 W/C가 매우 높은(12~14) 점을 감안하면 W/C 감소량이 크지 않기 때문이다. 이상과 같은 각 특성별 상관식을 이하에 제시하였고, 이를 설계 차트 개발 시 활용 하였다(Fig. 8).

$$\text{흐름값}, F = 43.62 \times e^{0.0117 \times w(\%)} \quad (2)$$

$$\text{블리딩율}, B = 0.084 \times w(\%) - 7.92 = 0.024 \times F - 1.623 \quad (3)$$

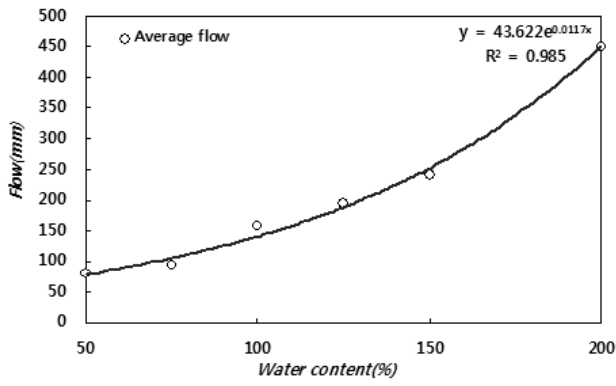
$$\text{일축압축강도}, q_u = a \times w(\%)^b \quad (4)$$

여기서, a, b : 고화재 함량에 따른 계수

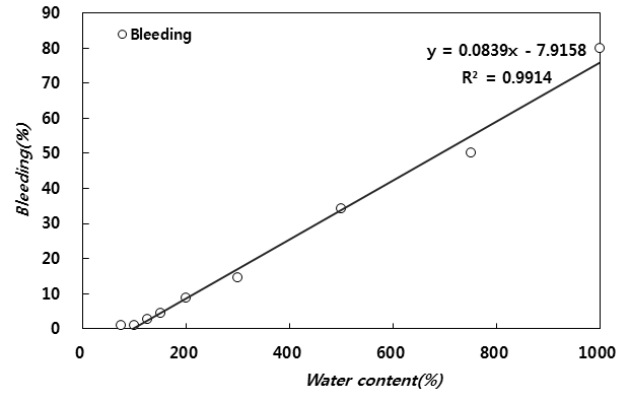
F : 흐름값(mm)

B : 블리딩율(%)

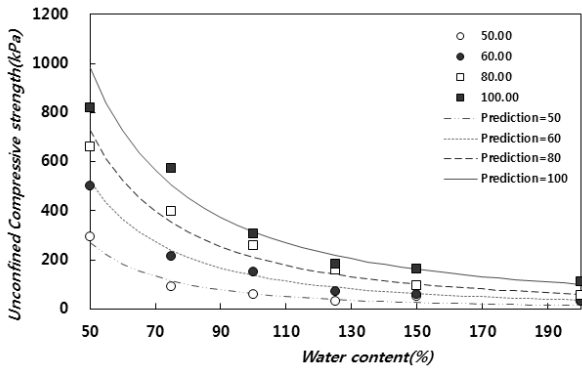
w : 함수비(%)



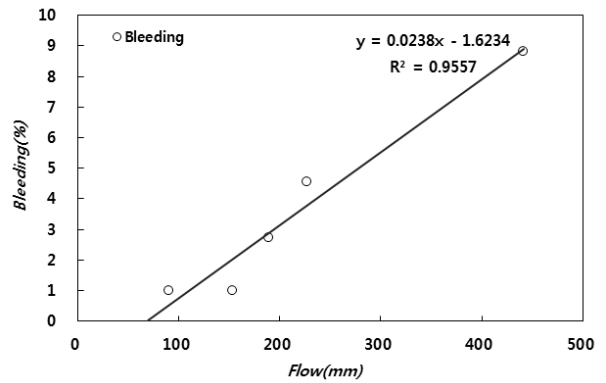
(a) Flow with water contents



(b) Bleeding with water contents

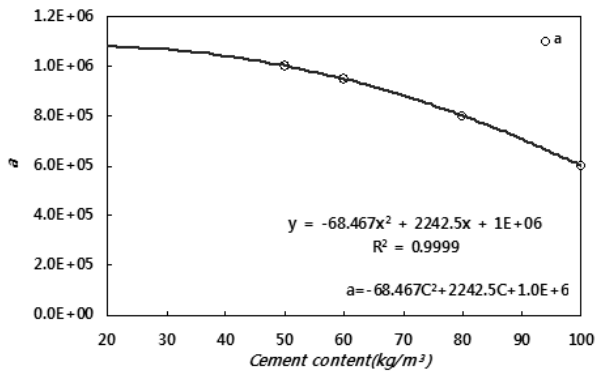


(c) q_u with water and cement contents

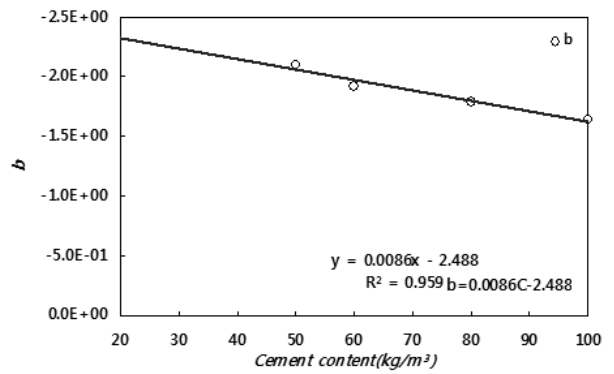


(d) Bleeding with Flows

Fig. 8. Relationship between water content, flow, bleeding and q_u



(a) Coefficient, a



(b) Coefficient, b

Fig. 9. Coefficient a and b with Cement Content

q_u : 일축압축강도(kPa)

C : 고화재 첨가량(kg/m³)

특히, Fig. 8(c)의 고화재 함량별 함수비와 일축압축 강도의 회귀분석 결과를 통해 함수비에 따른 일축압축강도의 식은 $q_u = a \cdot w^b$ 로 나타낼 수 있고, 계수 a와 b는 고화재 함량별로 Fig. 9과 같음을 알 수 있었다.

이상과 같은 계수, a와 b를 고화재 함량별로 결정할 수 있고, 함수비와 흐름값의 관계로부터 고화재 함량별 흐름값과 강도 및 블리딩율 간의 관계를 추정하여 설계 차트를 개발하였다(Fig. 10). 본 연구에서 개발된 설계 차트는 초기 함수비와 고화재 함량을 결정하면 일축압축강도, 흐름값 및 블리딩율을 간단하게 계산할 수 있어 실무에서 적용하기 편리할 것으로 판단된다. 또 다른 방법으로는 장비

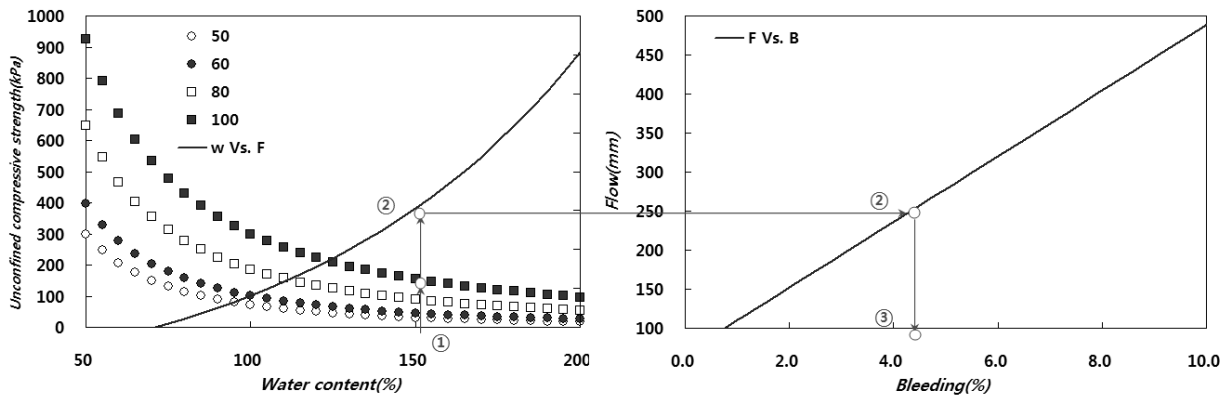


Fig. 10. Design Chart for Pipe Mixing Method

주행성 확보를 위해 요구되는 지지력에 대응하는 일축압축강도를 결정하면 소요 고화재 함량, 흐름값 및 블리딩율을 결정할 수 있을 것이다(Table 4 참조). 본 설계차트는 “환경친화적 준설토 확보, 매립 및 운송거리 30km 이상급 이송기술 개발” 연구단 성과물인 배합설계 매뉴얼 중 배합비 산정방법에 적용되었다.

5. 결론

본 연구에서는 기존 불량한 준설매립토의 활용성을 증대시키고자 현재 국내에서 개발되고 있는 이송관내 관중혼합처리공법에 대하여 적정 함수비 영역 선정을 위해 실내실험을 수행하였으며, 유동성, 강도, 재료분리 특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 관중혼합처리를 위한 시멘트 고화처리토의 유동성 검토 결과 허용 기준치, 100mm 이상을 만족하는 함수비는 76%로 액성한계(48.3%)의 1.57배 범위로 나타났다.
- (2) 강도특성 분석 결과 함수비 200%까지는 함수비에 따라 강도가 감소하는 경향을 나타내었고, 200% 이상에서는 재료분리가 발생하여 혼합토에 혼입되는 실제 고화재량의 증가로 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이를 기준으로 관중혼합처리공법을 위해 적용 가능한 최대 함수비는 약 200%인 것으로 나타났다.
- (3) 본 연구에서 제시한 혼합토의 함수비 범위 내에서 관중혼합처리 직후 진입이 가능한 장비를 검토한 결과 벨트컨베이어 및 도저 등 무한궤도식 경량 장비가 있으며, 고화재 첨가량 조절 시 PBD 장비와 같은 중장비도 진입이 가능할 것으로 판단된다.

- (4) 관중혼합토의 개질처리에 있어 유동성, 소요 강도 및 재료분리 기준을 만족하여 고화처리가 가능한 함수비 영역은 80~200%로 판단된다.
- (5) 본 연구에서는 함수비, 고화재 함량, 블리딩, 일축압축강도 간의 상관성을 이용하여 설계 차트를 개발하였다. 개발된 설계 차트를 이용할 경우, 관중혼합토로 조성된 부지의 활용 목적에 대응하는 일축압축강도를 결정하면 소요 고화재 함량, 흐름값 및 블리딩율을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

The research presented in this paper was conducted with funding by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) as parts of the “Research on Eco-friendly Procurement, Reclamation and Transferring Technology of Transport Distance more than 30 km of Dredged Materials” research project.

References

1. Han, S. J., An, D. W., Park, J. M., Kim, S. S (2009), “Engineering Properties of Liquefied Stabilized Soil by Contents of Humic Acid”, *Journal of Korean society of civil engineering*, Vol.29, No.5, pp.229-237.
2. Korea institute of ocean science & technology (2000), *Recycling Strategies of Dredged Soils(I)*, Ministry of maritime affairs & fisheries.
3. Korea Ports & Harbours Association (2005), “Design Standards for Harbour and Fishery Port”, Ministry of oceans and fisheries.

4. Meyerhof, G.G. (1974), "Ultimate bearing Capacity of footings on sand layer overlying clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.11, No.2, pp.223-229.
5. Nam, S. K (2012), *Characteristics of Unconfined Compressive Strength of Soil Mixed Stiffness Material for Recycling of Dredged clay*, Master Thesis, Kyungpook national university.
6. Terzaghi, K. (1943), "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley & Sons, New York.
7. Yoon, G. L, Yoon, Y. W, Kim, S. H, Bae, Y. S (2010), "Compressive Strength and Environmental Investigation for Beneficial Use of Dredged Sediments", *Journal of Korean society of civil engineering*, Vol.30, No.2, pp.119-13.
8. 財団法人沿岸技術研究センター (2009), "管中混合固化処理工法 技術マニュアル".