

비파괴시험에 의한 기존 콘크리트 구조물의 압축강도 추정

Estimation of Compressive Strength for Existing Concrete Structures by Non-Destructive Tests

구봉근* 오병환** 김영의***
 Koo, Bong Kuen Oh, Byung Hwan Kim, Young Eui
 김태봉**** 한승환*****
 Kim, Tae Bong Han, Seung Hwan

요 약

기존 콘크리트 구조물에 대한 콘크리트의 강도나 품질상태를 비파괴적으로 추정하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 그 중에서 콘크리트 강도를 추정하는 방법들 중에서 반발경도법과 초음파속도법이 주로 많이 이용되고 있다. 그러나 이들 방법은 구조물의 종류나 재령, 각종 영향인자 등으로 콘크리트의 추정 강도가 서로 상이한 결과를 주며, 어느 경우의 특정 구조물에도 신뢰성있는 결과를 주기 어려운 문제가 있다.⁽¹⁾ 콘크리트 구조물들은 시공 후 사용 중에 갖가지 서로 다른 환경의 영향을 받게 되며, 특히 장기간 경과된 구조물은 당초의 건설이력 사항이 불분명하여 콘크리트 강도추정에 더욱 어려운 점이 많은 실정이다. 따라서, 본 연구의 목적은 우리나라 육지 및 해안 구조물에 대한 합리적인 강도 추정을 위하여 비파괴시험법을 이용하여 콘크리트 강도 추정식을 제안하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 건설 후 오랜 공용년수를 지닌 기존 콘크리트 구조물들을 육지 구조물과 해안 구조물로 분류하여 대상 구조물의 콘크리트에 직접 반발경도법, 초음파속도법 및 코어를 채취하여 코어 압축강도를 모강도로 하여 코어 강도와 반발경도와의 관계, 코어 강도와 초음파 속도와의 관계, 코어 강도와 반발경도와 초음파 속도와의 다중상관 관계를 분석하였다.

본 연구 결과 현재 이용되고 있는 강도 추정식이나 환산도표는 오래된 기존 구조물의 강도 추정에 잘 맞지 않는 것으로 나타나고 있으며, 따라서 이들 구조물의 콘크리트 강도 추정을 합리적인 비파괴시험법을 이용한 예측 공식을 유도하여 제시하였다. 본 연구에서 제시된 강도 예측 공식은 오래된 기존 구조물의 콘크리트 강도 추정에 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract

The rebound hammer test and ultrasonic pulse velocity test methods are commonly used to determine the in-situ compressive strength of concrete. One of the special feature of these methods is that they cannot give consistent and reliable results for variety of structures. In particular, very old existing structures have been generally received sreious environmental affects

* 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수, 공박
 ** 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수, 공박
 *** 정회원, 충북대학교 토목공학과 박사과정 수료
 **** 정회원, 충남전문대학 산업안전과 교수, 공박
 ***** 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사과정 수료

• 본 논문에 대한 토의를 1995년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 1995년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

and thus the strength prediction will be different from normal structures.

The purpose of the present study is, therefore, to propose realistic equations to predict the in-situ strengths of actual old concrete structures. The rebound hammer and ultrasonic pulse velocity tests, carbonation depth measurements and core compressive strength measurements have been carried out for very old hydraulic and seacoast concrete structures spanning from one to about seventy years in age. From these test results, the strength-rebound number relations, the strength-pulse velocity relations and the strength-rebound number-pulse velocity relations have been obtained through multiple regression analysis.

The present study indicates that the existing equations by nondestructive tests give quite different results from the present data. The proposed equations reasonably well predict the measured data for old concrete structures, especially for low strength concrete. The prediction equations proposed here can be efficiently used in determining the in-situ strength of old concrete structures.

Keywords : environmental, old hydraulic, regression analysis, efficiently

1. 서 론

콘크리트는 약 110년 전에 개발되어 발전면이나, 활용면에서도 현재 모든 건설·산업 분야에 있어서 철근콘크리트가 차지하는 비중이 막대할 뿐 아니라 그 현상이 다양화, 대형화되어지고 있다.^(1,2) 그러나, 최근에 와서 기존 콘크리트 구조물의 노후화와 각종 열화(기능저하)현상이 증대됨에 따라 콘크리트에 대한 신뢰도, 안정성, 유지관리, 내구성 향상과 품질관리에 대한 문제점들이 나타나고 있으며, 이에 대한 종합적인 품질평가의 중요성이 제기되고 있다. 그러나, 콘크리트는 물리적 성질이 매우 다른 이질성 재료(heterogeneous material)이면서 비균질성 복합 재료(non-homogeneous composite material)로 구성되며, 배합, 타설, 및 양생조건에 따른 특성의 차이와 구조물 축조 후 현장 여건변화 등 변수인자가 많다. 불확실성의 변화 폭을 크게 갖기 때문에 비파괴시험법을 적용하여 합리적인 콘크리트 구조물 평가 기법을 도출하기 위해서는 많은 연구와 시간이 필요할 수 밖에 없다고 본다.

콘크리트 구조물의 비파괴시험에 의한 강도를 추정하기 위한 연구가 외국에서는 이미 1930년대 부터, 국내에서는 1960년대 후반부터 시작되어 현재 그 연구의 기법이나, 목적, 사용방법 등 매우 다양하게 개발되고 발전되어 왔으며, 최근에는 비

파괴시험법으로 콘크리트 추정 강도의 신뢰도를 높이기 위하여 반발경도 및 초음파속도와 공시체 압축강도와의 다중상관 분석에 의한 콘크리트 강도 추정식의 연구가 일본을 비롯한 구미 각국에서 활발히 진행되고 있으며 국내에서도 여러 학자들에 의해 연구되어지고 있다.^(3~7)

비파괴시험법을 이용한 콘크리트 평가 방법에는 강도추정을 위한 방법과 강도 이외의 물리성 평가에 관한 방법으로 대별할 수 있겠는데 본 논문에서는 전자의 방법을 이용하여 비파괴시험법과 국부파괴법을 병용하여 여러 해 경과된 기존 콘크리트 구조물을 대상으로 다중 상관관계를 분석, 현장 콘크리트 구조물에 이용하기 용이하고 신뢰성 있는 기법을 도출하였다.

본 연구 수행을 위해 전국에 산재되어 있는 1년에서 70년 경과된 29개 지구의 육지 구조물과 29개 지구의 해안 구조물들을 대상으로 하였다.

기존 콘크리트 구조물에 측정 부위를 선정하여 반발경도와 초음파속도를 측정하고, 그 부위에서 코어를 채취하여 중성화 진행 정도를 측정하며, 채취된 코어를 이용한 실내분석 시험에서 압축강도와 굽은 골재율, 공극률을 산출하였다.

현장 측정 시험과 실내분석 시험 결과를 토대로 하여 반발경도와 코어 압축강도, 반발경도와 초음파속도, 초음파속도와 코어 압축강도, 반발경도와 초음파속도의 압축강도와의 복합 상관관계 등 다

중회귀분석을 수행하여 오래된 기존 콘크리트 구조물의 합리적인 강도추정 공식을 제시하고자 하였다.

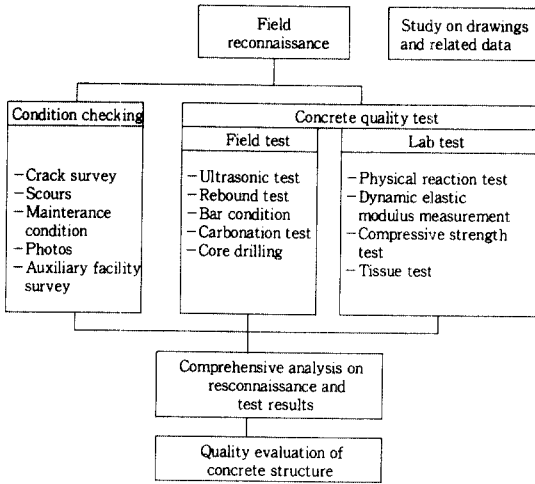


Fig.1 Flow of in-situ nondestructive test

2. 대상 구조물에 대한 비파괴시험 및 분석

2.1 대상 구조물

본 연구의 시험 대상으로 구성된 기존의 콘크리트 토목 구조물이란 전국에 산재되어 있는 수리 구조물 들로 내륙에 위치하고 있는 댐의 여수로·방수로와 양수장 및 도로교, 해안에 접하여 축조된 방조제의 배수갑문들로 구성되어 있다. 이들 구조물의 콘크리트는 대부분 오랜 공용기간과 대기중에 노출되어 있는 상태로 이루어져 구조물의 안전성과 향후 유지관리에 따른 사용성, 내용년수 추정, 각종 열화 원인 규명 등에 필요한 대상 구조물의 설치 당시의 이력이나, 콘크리트 비파괴 검사법에 필요한 제반 영향인자들인 시멘트비, 골재 종류와 최대 치수, 시멘트 종류 등 알 수 없는 상태가 대부분을 차지하고 있다.

또한 각종 비파괴시험법을 적용함에 있어 대상 구조물에 따라 조건이 비슷한 구조물들 별로 구분하여 시험 결과를 분석하므로써 수행된 비파괴시험법에 최소한의 영향인자들을 고려할 수 있도록 대상 구조물인 수리 구조물(댐, 배수갑문)과 양수

장 및 도로 교량 구조물 들을 크게 육지 구조물과 해안 구조물로 구분하였으며, Table 1, Table 2에서 나타난 바와 같이 총 지구수는 58개소로 그 중 육지 구조물은 29개소, 해안 구조물은 29개소로 경과년수가 1년에서 70년 사이로 대부분이 20년 이상 경과되었으며, 오래된 기존 구조물의 특성상 콘크리트의 설계기준강도는 160~240 kg/cm²의 범위에 있는 구조물들이다.

(1) 육지 구조물

대상 수리구조물 중 내륙에 위치하고 있는 댐과 양수장 및 교량 등의 시설물로서 댐에서는 여수로·방수로와 양수장에서는 건축물, 교량은 상·하부 등의 콘크리트 구조물들을 대상으로 하였다.

전국에 산재되어 있는 29개소의 육지 구조물들을 지역별로 분류하면 경기·강원 10개소, 충남북 9개소, 전남북 4개소, 경남북 6개소로 구분되었으며, 그 현황은 Table 1과 같이 조사 년도별로 나누었다.

(2) 해안 구조물

해안 구조물로는 서·남해안에 접하여 있는 방조제의 배수갑문 구조물의 콘크리트를 대상으로 하였다. 특히 해안 구조물의 특성상 동일 구조물에서 해수와 강물이 동시에 접하여 콘크리트에 영향을 미치고 있으며, 바다측의 콘크리트는 조수간만의 차이로 하루에 두번씩 콘크리트가 건조상태와 습윤상태를 반복하고 있다. 이러한 특수 상황을 고려하여 본 논문에서는 콘크리트 구조물을 육지측과 바다측으로 구분하여 29개소의 방조제 배수갑문을 대상으로 분석 시험을 하였으며, 그 현황은 Table 2와 같으며 조사 년도별로 나누었다.

2.2 현장 비파괴시험 및 분석

(1) 외관조사

외관조사는 구조물의 상태를 파악하기 위하여 숙련된 기술자가 그 기능저하 정도를 측정하는 것으로 콘크리트 구조물에 발생하는 결함은 구조종별, 구조형식, 사용부재, 주변환경, 사용조건, 관리방법에 따라 결함의 발생개소, 종류 및 정도가 다르고 그것들은 콘크리트 표면에서의 균열, 박리, 박락, 마모, 철근노출, 발색, 부식, 누수 등 다수가 발견되고 있으며, 공용 중의 콘크리트 구조

Table 1 Data for inland structures

	Station	Location	Construction year	Survey year	Age (year)	Classification of structures
1	Dal-bang	Kangwon Tonghe	1990	1994	4	Dam
2	Duk-san	Chonpuk Muju	1960	1990	10	
3	Yoi-sa	Kyonggi Yoji	1964	-	26	
4	Kum-jon	Chonnam Hwasun	1963	1989	26	
5	Pung-san	Kyongpuk Andong	1959	1987	28	
6	Shin-hu	Chungnam A-san	1959	1989	30	
7	Chil-gok	Kyonggi Ansong	1959	-	30	
8	Bak-gok	Chungpuk Jecheon	1968	1988	30	
9	Hong-yang	Chungnam Hongsong	1945	1986	41	
10	Nang-jong	Kangwon Pochon	1946	1990	44	
11	Ha-bin	Kyongpuk Chilgok	1944	1988	44	
12	Koung-gu	Kyonggi Suwon	1943	-	45	
13	Do-chok	Kyonggi Kwangju	1943	-	45	
14	Pa-jang	Kyonggi Suwon	1943	-	45	
15	Kong-am	Chungnam Chongyang	1943	-	45	
16	Hwa-am	Kyongpuk Youngil	1943	-	45	
17	Wun-san	Chungnam Sochon	1943	-	45	
18	Wang-gung	Chonpuk Iksan	1931	1986	55	
19	Ui-ilm	Chungpuk Chechon	1933	1988	55	
20	Wi-chon	Kyongpuk Talsong	1992	1993	1	Pumping station
21	Hoo-po	Kyongpuk Sangju	1973	1987	14	
22	Seo-poung	Chongpuk Chongwon	1962	1987	25	
23	Yong-am	Chonpuk Iksan	1959	1986	27	
24	Go-a	Kyongpuk Somsan	1946	-	40	
25	Hung-chon	Kyonggi Yoji	1989	1944	5	Bridge
26	Sin-gi	Kangwon Samchok	1987	-	7	
27	Chang-poung	Chungnam Kumsan	1971	-	23	
28	Mi-ho	Chungpuk Chongwon	1969	1993	24	
29	Chee-won	Chungnam Kumsan	1969	-	24	

물에서 한 종류의 결합에 대해 하나의 원인이 아니라, 오히려 여러 개의 원인이 결합되어 있는 경우가 많다.

그러므로 외관조사를 통하여 구조물의 유지보수 상태, 각종 결합, 콘크리트 표면 균열 상태를 파악하고 세굴 상태, 부대시설물 상태, 현장 사진 촬영 등을 수행하였다.

또한, 외관조사는 특별한 계측기기를 사용하지 않고 육안에 의해 조사가 이루어지므로 숙련된 기술자가 조사를 행하여도 그 주관의 판단을 좌우할 수 있으므로 기능저하 등급표의 외관조사 요령 등을 이용하여 조사를 함으로써 객관성을 유지하는 것이 중요하다.

Table 2 Data for seacoast structures

	Station	Location	Construction year	Survey year	Age (year)	Classification of structures
1	No-chen	Chungnam Poryong	1988	1990	2	
2	Dae-chi	Kyungnam NamHae	1988	1991	3	
3	Chang-po	Chonnam Haenam	1983	-	8	
4	Dang-po	Chonnam Haenam	1978	1990	12	
5	Jungdung-po	Chonnam Muan	1978	-	12	
6	Sek-po	Chonpuk Puan	1975	1991	16	
7	Ji-san	Chonnam Chindo	1967	1987	20	
8	Kwan-duck	Chonnam Changhung	1966	1986	20	
9	Song-hyun	Chungnam Taean	1969	1990	21	
10	Nam-bi	Kyonggi Hwasong	1969	-	21	
11	Hak-dong	Chonnam Haenam	1969	1991	22	
12	Ha-dun	Kyongnam Koje	1968	1990	22	
13	Sam-san	Kyonggi Kanghwa	1966	1986	30	
14	Nae-gu	Kyongnam Sachon	1959	1989	30	
15	Gun-am	Kyonggi Ansan	1958	-	31	
16	Kan-po	Kyonggi Kanghwa	1958	1990	32	
17	Hwasong-sa	Chungnam Taean	1957	-	33	
18	Ho-am	Chonpuk Puan	1957	-	33	
19	Han-kang	Kyonggi Kimp'o	1956	-	34	
20	Man-dol	Chonpuk Kochang	1955	-	35	
21	Youn-ja	Chonnam Haenam	1925	-	45	
22	Sung-yeon	Chungnam Taean	1939	1989	50	
23	Bodoek-po	Chungnam Tangjin	1937	1990	53	
24	Youn-san	Chonnam Youngkwang	1933	1987	54	
25	Ho-dong	Chonnam Haenam	1931	1990	59	
26	Hae-mung	Kyongnam Koje	1931	-	59	
27	Bu-soo	Chungnam Tangjin	1931	1991	60	
28	Baek-po	Chonnam Haenam	1925	1989	64	
29	Kwang-hwool	Chonpuk Kimje	1919	-	70	

Table 3 Specification of core drill machine

	Division	Contents	Remarks
Main body specifications	Overall height	850 mm	
	Base width	200 mm	
	Base depth	255 mm	
	Total stroke	505 mm	
	Total weight with motor	24 kg	
Motor specifications	Max. service diameter	250 mm	
	Power source voltage	100V / 220V 1phase	
	Frequency	50 / 60 Hz	
	Max. output	1.7 kw	
	Rated amperage	15 A	
	No load revolution	900 / 500 rpm	

외관조사를 통하여 대상 구조물의 특성을 파악하고, 비파괴시험에 영향을 미치는 각종 인자들과 열화의 원인 등을 분석하여 비파괴시험법의 적용에 활용하였다.

Table 4 Measurement data for inland structure

Station	R	Vs (m/sec)	r	Fc (kgf/cm ²)	C (mm)	G (%)	Cv (%)	Y (year)
DB1	33	4100	0.9967	188	5	55	2.3	4
TS1	37	3557	0.9993	145	5	46	1.3	10
YS1	29	2918	0.9998	106	10	45	2.8	26
KJ1	46	3692	0.9995	157	10	55	1.1	26
PS1	38	3774	0.9995	164	8	48	2.1	28
SH1	42	2541	0.9993	107	15	43	4.1	30
CG1	38	3495	0.9995	133	18	45	3.7	30
BG1	32	3581	0.9998	105	8	39	3.1	30
HY1	22	2648	0.9996	90	12	41	2.8	41
NJ1	49	3659	0.9996	145	25	44	1.2	44
HB1	48	3678	0.9992	157	15	47	1.5	44
KG1	27	3478	0.9999	85	15	39	3.1	45
DC1	33	3098	0.9995	130	13	48	3.8	45
PJ1	27	3469	0.9999	145	18	51	2.5	45
KA1	27	3715	0.9918	98	18	46	4.1	45
HA1	24	3231	0.9999	98	18	39	3.8	45
WS1	35	3614	0.9991	130	10	47	3.9	45
WG1	24	2512	0.9968	130	15	48	1.2	55
UL1	29	3739	0.9999	143	12	47	3.2	55
WC1	36	3732	0.9997	210	2	55	1.8	1
HP1	31	3589	0.9907	120	8	48	1.2	14
SP1	33	4159	0.9985	185	8	49	1.1	25
YA1	23	2347	0.9964	107	17	46	1.8	27
GA1	24	2768	0.9862	118	19	42	2.2	40
HC1	39	2610	0.9969	180	10	53	3.1	5
CP1	37	3028	0.9938	115	18	54	2.8	23
MH1	43	3215	0.9991	186	14	51	2.7	24
JW1	37	2546	0.9769	150	14	51	2.5	24

Note :

R : rebound number, Vs : pulse velocity,
 Fc : core compressive strength (surface transmission)
 G : valume of aggregates, C : carbonation depth,
 Y : age Cv : void ratio,

(2) 비파괴 시험

대상 구조물의 안전에 영향을 미치지 않고, 그 구조물을 대표할 수 있는 지점을 외관조사를 통하여 시험부위를 선정하여 반발경도 시험과 초음파 탐상 시험을 실시하였으며, 동일 부위에서 채취한 코어를 이용하여 중성화 시험과 코어 실내분석 시험을 통해 콘크리트의 조직 상태와 압축강도 시험을 실시하였으며 대상 구조물별 분석자료를 육지 구조물과 해안 구조물로 구분하여 Table 4와 Table 5에 요약하였다.

본 연구에서 수행된 대상 콘크리트 구조물의 경과년수에 대해서는 제한을 두지 않고, 설계기준강도가 160~240 kg/cm² 범위와 최대골재 치수가 25~40mm이내에 있는 콘크리트에 적용한다

① 반발경도법

반발경도 시험은 측정이 용이하고 간편하여 시험 대상 구조물의 형상 및 크기에 관계없이 적용이 가능하나, 콘크리트 표면 정도에 국한되고, 콘

Table 5 Measurement data for seacoast structures.

Station	R	Vs (m/sec)	r	Fc (kgf/cm ²)	C (mm)	G (%)	Cv (%)	Y (year)	
N.C	sea 1	45	3775	0.9998	195	3	51	2.1	2
	land 1	42	3694	0.9999	190	3	51	2.4	
DC	sea 1	28	3456	0.9996	110	7	48	3.6	3
	land 1	34	3264	0.9963	156	5	50	3.5	
CP	sea 1	38	2139	0.9968	205	3	50	4.0	8
	land 1	36	1914	0.9862	190	3	50	3.8	
DP	sea 1	31	3064	0.9999	152	7	39	5.3	12
	land 1	36	3120	0.9987	159	7	39	5.3	
J.D.P	sea 1	40	3768	0.9933	97	15	49	5.6	12
	land 1	45	3415	0.9958	119	10	49	6.0	
SP	land 1	44	2864	0.9938	175	8	38	4.2	16
JS	sea 1	30	3308	0.9979	139	10	43	2.1	20
	land 1	32	3067	0.9962	141	8	45	2.1	30
KD	sea 1	24	3243	0.9968	132	12	45	1.5	21
	land 1	32	2865	0.9977	116	8	62	3.3	21
NB	sea 1	23	3208	0.9996	103	22	51	5.5	22
	land 1	29	2084	0.9928	110	22	50	6.8	
HD	sea 1	41	3425	0.9951	150	14	48	3.5	22
	land 1	42	3620	0.9170	170	10	46	2.8	
HD	sea 1	42	3085	0.9957	119	20	45	3.9	22
	land 1	31	2602	0.9961	114	20	50	2.7	
SS	sea 1	23	2764	0.9968	105	18	46	2.1	30
	land 1	26	3268	0.9998	150	15	50	1.9	
LG	sea 1	43	3857	0.9999	140	16	50	2.6	30
	land 1	43	3678	0.9995	180	12	51	2.4	
GA	sea 1	45	3868	0.9998	160	14	51	1.5	31
	land 1	44	3650	0.9991	151	15	47	2.5	
K.R.P	sea 1	32	2183	0.9994	120	16	50	3.5	32
	land 1	29	2312	0.9986	108	18	50	3.7	
H.S.S	sea 1	44	3636	0.9999	117	13	46	4.0	33
	land 1	47	3804	0.9999	183	10	52	3.1	
HA	sea 1	30	2225	0.9977	122	12	48	2.6	33
	land 1	38	3295	0.9907	114	10	50	2.7	
HG	sea 1	45	3419	0.9993	147	10	54	3.9	34
	land 1	40	3448	0.9996	138	10	54	3.9	
MD	sea 1	38	3258	0.9996	115	5	49	3.8	35
	land 1	31	2074	0.9958	85	10	25	4.2	
YJ	sea 1	41	3442	0.9986	141	12	49	3.7	45
	land 1	41	3624	0.9994	110	15	49	3.8	
SO	sea 1	52	3874	0.9996	210	15	52	3.1	50
	land 1	53	4195	0.9992	208	15	54	3.2	
B.D.P	sea 1	40	2703	0.9999	127	15	50	5.0	53
YS	land 1	36	3396	0.9999	148	14	50	4.7	
	sea 1	44	3694	0.9999	213	12	48	2.0	54
HD	land 1	38	3688	0.9968	151	12	44	2.5	
	sea 1	40	3497	0.9996	156	8	63	3.0	59
H.M	land 1	45	2608	0.9991	141	12	61	3.2	
	sea 1	49	3961	0.9999	165	12	55	4.6	59
BS	land 1	49	3639	0.9994	172	15	62	4.5	
BP	sea 1	40	3312	0.9961	170	12	50	3.5	60
	land 1	48	3896	0.9968	185	11	53	3.0	
K.H	sea 1	45	3284	0.9963	186	11	51	2.7	64
	land 1	49	3694	0.9997	176	11	53	1.9	
	sea 1	51	3540	0.9996	171	12	46	2.9	70
	land 1	27	3077	0.9987	164	17	50	3.3	

크리트 내부의 강도를 추정할 수 없다는 단점을 가지고 있으며 일반적으로 반발도는 타격 에너지, 피타격체의 형상·치수 및 재료의 물리적 특성으로 콘크리트의 강도나, 강성에 관계되지만 반드시 재료의 강도와 일치된다는 것은 아니다.

본 연구에 사용된 슈미트해머의 기종은 대상 구조물의 설계강도가 160~210 kgf/cm² 이므로 보통 콘크리트에 적용하고 있는 NR형(반발도 자기 기록식)으로 타격 에너지가 2.207 N·m : 0.225

kgf · cm, 강도측정 범위는 150~600 kgf/cm²을 사용하여 현장 구조물 콘크리트에 대한 반발경도 측정은 대상 구조물의 콘크리트 품질을 대표하고, 측정이 가능한 용이한 부분을 선정하였다.

측정된 반발경도를 이용한 강도 추정값의 신뢰도를 고려하여 선정된 부위의 콘크리트 표면에 평활 작업(3~5mm 그라인딩)으로 매끈하고, 깨끗하게 처리하여 타격점은 정사각형의 모양으로 상호 3cm 간격으로 하여 평균 25회 타격하며 타격 지점의 요철, 골재 등 측정값에 나쁜 영향을 미치는 부위는 피하여 측정한다. 측정값의 평균치에서 ±7이 되는 값은 버리고 나머지를 산술 평균치(소수점 이하를 사사오입하여 정수로 표시: R_m)를 구하여 타격 방향과 기타 영향인자에 대한 값을 보정(ΔR)하여 측정지점의 반발도(R)로 한다.

$$\therefore R = R_m + \Delta R$$

여기서, R : 반발도

R_m: 산술 평균 반발도

ΔR: 타격방향 및 기타 영향인자에 대한 보정계수

② 초음파속도법

초음파속도법을 콘크리트에 적용은 측정조건, 사용 골재의 종류 · 치수 · 양, 콘크리트의 함수상태, 내부철근의 배근상태 등 많은 원인의 영향을 받기 때문에 초음파 속도만을 이용한 콘크리트의 압축강도 추정은 신뢰성이 적으나, 콘크리트의 종류, 대상 구조물의 형상 · 치수 등에 대해서 적용상의 제약은 비교적 적다.

콘크리트 구조물에 많이 이용하는 음속법의 하나인 디지털식 음속 측정장치(pundit)를 이용하여 콘크리트 내부를 통과하는 시간(pulse velocity)을 54kHz 단자를 이용하여 초음파 속도를 측정하였다.

초음파 속도 측정기는 본체와 한 조의 탐촉자(발진자와 수신자)로 구성되고, 초음파의 종파 펄스를 콘크리트 속에 통과시켜 탐촉자 거리 L(m) 간의 전달시간 T(sec)를 측정하여 음속 V(m/sec)을 구하여 콘크리트 품질을 평가하는 방법이다.

본 연구의 전달속도 측정은 표면법(indirect or surface transmission)을 이용하였으며 초음파 전달거리의 측정은 탐촉자 중심까지로 하여 대상 구조물의 콘크리트 품질을 대표하고, 측정이 용이한 부분을 선정하며 신뢰도를 고려하여 선정된 부위에 콘크리트 표면에 평활 작업으로 매끈하고, 깨끗하게 처리하여 콘크리트 면과 탐촉자의 밀착을 위해 적합한 윤활유인 구리스를 사용하였으며, 콘크리트에 밀착시킨 발진자에서 발진한 전달시간은 수신자에 가장 빨리 도달한 시간으로 한다.

발진자를 고정시킨 상태에서 수신자를 10cm 간격으로 콘크리트 면을 따라 이동시켜 대상 구조물의 품질평가에 필요한 거리(최소 3점 이상 : 30cm 이상)만큼 측정하여 각 점마다 측정된 전달시간을 회귀분석으로 최초 시작점에서 최소 3점 이상 연속된 측정치의 상관계수가 0.99 이상으로 이루어진 일차 회귀직선식 기울기의 함수식을 초음파 전달 속도로 하였다.

$$T = a + b \cdot S$$

$$dT = b \cdot dS$$

$$\therefore dS/dT = 1/b, (V_s)$$

여기서, T : 초음파 전달 시간(μsec)

S : 초음파 전달 거리(cm)

a : 일차 회귀식 y축의 절편 (μsec/cm)

b : 일차 회귀식 기울기 (μsec/cm)

1/b, (V_s) : 초음파 전달 속도(m/sec)

본 연구에 수행된 초음파 속도에 의한 콘크리트 강도 추정의 적용 범위는 오랜 공용 중에 있는 노출된 콘크리트 토목구조물에 국한하며, 대상 구조물의 콘크리트 면을 표면 건조상태를 표준으로 하여 초음파 속도를 측정하였다.

③ 복합법

콘크리트의 압축강도를 추정하기 위한 복합법은 2종류 이상의 비파괴시험법을 조합해서 사용한다. 복합비파괴시험법(combined non-destructive testing methods)은 최근 유럽을 비롯 일본을 중심으로 표준화되어 가고 있다. RILEM에서도 1976년⁽³⁶⁾에 이 방법에 관한 국제지침을 작성

하기 위한 위원회(CNDT위원회)를 설치하고 1980년⁽⁵⁴⁾에는 제1차 지침안이 제안되었으며 지침안 중 종파속도와 반발도의 복합법이 현재 가장 많이 이용되고 있다.

복합 비파괴시험법에 의한 콘크리트 강도 추정 은 콘크리트의 압축강도와 일정한 상관관계를 가지는 각각의 비파괴 시험치를 강도 추정식 중에 순차 변수로 해서 첨가해 감에 따라 강도의 추정 정도는 향상하리라는 전제에 근거를 하고 있다.

오랜 기간을 걸친 구조물의 콘크리트 강도를 추정할 때는 과거 조사 자료나, 채취한 코어 시험은 압축강도 시험을 실시 후 코어 시료를 이용하여 물-시멘트비, 배합비, 조골재의 최대치수 등이 파악되면 강도 추정에 참고하여 이용하면 강도 추정 정도를 향상시킬 수 있을 것이다.

본 연구에서는 반발경도법과 초음파속도법의 측정 방법은 전절에 기재된 방법에 의해 측정하며, 기존 콘크리트 구조물에서 채취한 콘크리트 코어 압축강도의 시험 결과를 토대로 현장 비파괴 시험 분석 결과와의 상관관계를 정립하여 대상 구조물의 콘크리트 압축강도 추정에 이용하였다.

3. 비파괴시험에 의한 강도 추정식 유도

비파괴 분석법에 영향을 주는 여러 요인들을 고려하여 비파괴 시험값과 코어 강도값을 단순 회귀 분석(simple regression analysis)시키면 시험조건에 따라 강도 추정식(회귀식)을 구할 수 있다.

본 연구에서는 코어 강도를 모강도로 설정하고, 이를 종속변수로 하여 반발경도, 초음파속도, 재령일수 등을 독립변수로 설정하여 변수들 간의 함수관계를 규명하고자 통계적 분석을 수행하였으며, 회귀분석에 이용된 SAS(statistical analysis system) 프로그램은 컴퓨터를 통한 다양한 자료 처리(data manipulation) 및 통계분석(statistical analysis)을 위한 소프트웨어로 포괄적인 패키지이다.

다음의 3.1절에서는 반발경도와 코어 압축강도의 선형회귀분석과 재령일수를 고려한 분석을 수행하였고, 3.2절에서는 초음파속도와 코어 압축강도의 관계, 3.3절에서는 반발경도와 초음파속도를

복합한 여러 형태의 회귀식을 적용하여 비파괴시험을 통한 구조물의 콘크리트 압축강도 추정식을 유도하였다.

3.1 반발경도와 코어 압축강도의 상관관계

(1) 개 설

Schmidt hammer에 의한 콘크리트의 반발경도 측정값을 통하여 콘크리트의 압축강도를 추정하는 상관관계에 대한 검토는 반발경도와 압축강도의 단순 선형회귀식과 재령일수를 고려한 경우로 나누어 수행하였고, 다른 연구 결과와 비교 분석하였다.

본 연구에서 수행된 육지 구조물과 해안 구조물들은 일반 구조물과 구별되어야 할 특이점으로 경과연수가 1~70년의 노후된 콘크리트 구조물들로 비교적 열악한 환경상태에서 낮은 설계강도로 설계된 구조물이라는 점이다.

본 절에서는 앞서 언급된 서로 다른 열화 환경 조건을 갖는 육지 구조물인 저수지, 양수장과 해안 구조물은 방조제 배수갑문을 구분하여 노후 토목 시설물에 대한 반발경도와 비파괴검사를 중심으로 대상 콘크리트 구조물에서 수행한 반발경도와 코어 압축강도의 상관관계를 비교 검토하였다.

Table 6 Relationship between concrete compressive strength and rebound number of other researchers^(3,9)

Researchers	Equations	Remarks
日本材料學會	$F_c = .184 + 13 \cdot R$	α = Correction factor for concrete age
東京材料試驗所	$F_c = 10 \cdot R - 110$	

Note : F_c = compressive strength (kgf/cm²),
R = rebound number

(2) 구조형태별 반발경도와 압축강도의 상관관계

일반적으로 반발경도와 압축강도의 상관관계는 선형식으로 표현되는 것이 지배적인 연구 결과이므로 본 연구에서도 이를 근거로 하여 분석을 수행하였다. Table 5에서와 같이 재령 28일 이내의 콘크리트에 적용된 계수는 $F_c = a_0 + a_1 R$ (여기서 F_c : 콘크리트 압축강도 kgf/cm², R : 반발계수)일

때 a_0 가 $-441 \sim -110$ 값과 a_1 는 $10 \sim 23.4$ 등의 값을 가지며 재령 1년의 경우에는 a_0 가 $-112.5 \sim 100$, a_1 은 $7.3 \sim 13.9$ 의 값을 나타내는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 Table 7과 같은데, 특이할 만한 사항은 기존 연구자들의 추정식에 비해 기울기 즉 a_1 이 작고, 상수항 a_0 의 값이 비교적 다른 값을 나타내었다.

본 연구에서는 재령에 따른 반발경도의 영향을 고려하기 위하여 기존 연구자와 다르게 반발경도 R 항에 $(a_2^2) \cdot R$ 을 사용하여 회귀분석하였으나, $a_2 \approx 1$ 로 산출되어 재령 t의 영향이 거의 없음을 보여주고 있다. 이것은 본 연구의 대상 구조물이 대부분 10년 이상 오래된 구조물이고, 중성화 깊이도 10년 이후에는 큰 변화가 없는 본 연구 결과와도 일치하는 결과이다.

또한, R에 대한 2차식을 사용하여 회귀분석하였으나, Table 6에서 보는 바와 같이 이 식의 오차 크기가 1차식과 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

그러므로 본 연구 결과 노후 구조물의 강도추정에 사용될 수 있는 가장 합리적인 식은 다음의 식이 바람직하다.

$$\text{육지 구조물} : F_c' = 53.33 + 2.347 \cdot R \quad (1)$$

해안 구조물

$$\text{— 육지측} : F_c' = -21.859 + 4.490 \cdot R \quad (2)$$

$$\text{— 바다측} : F_c' = 68.275 + 2.171 \cdot R \quad (3)$$

따라서, 반발경도법을 이용한 강도 예측공식은 Table 7에서 제시된 식들중 1차식이 현실적으로 가장 합리적인 것으로 사료된다.

연구 결과 제시된 강도 추정식은 기존 추정식에 비해 상수항이 다르고 기울기가 작은 것으로 나타났다. 이는 기존 추정식이 콘크리트 압축강도 $200 \sim 400 \text{ kg/cm}^2$ 의 범위에서 연구되어 추정된 것으로 본 연구에서 다른 압축강도 240 kg/cm^2 이하의 오래 경과된 콘크리트 구조물에 적용은 많은 오차가 있는 것으로 판단된다.

Fig.2는 저수지, 양수장 구조물의 콘크리트 코어 압축강도와 반발계수의 선형회귀식을 그린 것으로 기존식과는 상당한 차이가 있음을 보여주고

Table 7 Results of regression analysis for relationship between concrete compressive strength and rebound number

Structures location	Prediction equations	Derived coefficients			Root mean square error	
		a_0	a_1	a_2		
Inland structures	$F_c' = a_0 + a_1 R$	53.330	2.347	-	26.57	
	$F_c' = a_0 + a_1 R + a_2 R^2$	-67.652	10.452	-0.130	26.34	
	$F_c' = a_0 + a_1(a_2^2)R$	62.102	2.501	0.994	26.13	
Seacoast structures	land side	$F_c' = a_0 + a_1 R$	-21.859	4.490	-	19.30
		$F_c' = a_0 + a_1 R + a_2 R^2$	190.822	25.546	0.111	24.98
		$F_c' = a_0 + a_1(a_2^2)R$	26.278	3.513	0.997	24.95
	Sea side	$F_c' = a_0 + a_1 R$	68.275	2.171	-	22.47
		$F_c' = a_0 + a_1 R + a_2 R^2$	51.430	3.201	-0.017	26.27
		$F_c' = a_0 + a_1(a_2^2)R$	72.871	1.979	1.000	26.31

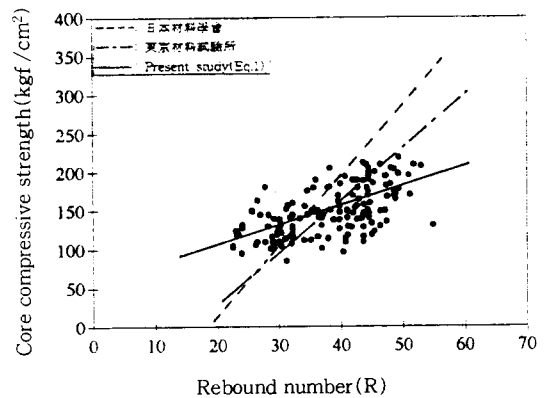


Fig.2 Relationship of inland structures between concrete compressive strength and rebound number

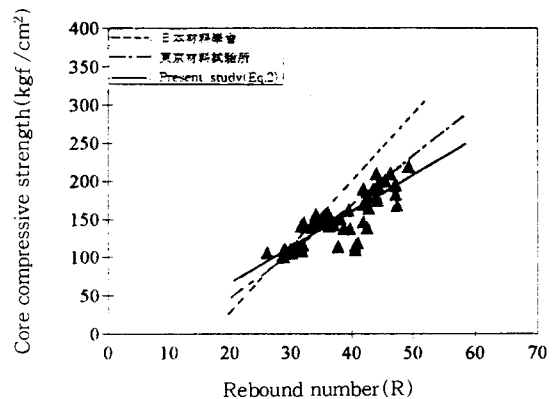


Fig.3 Relationship of seacoast structures between concrete compressive strength and rebound number (Land side)

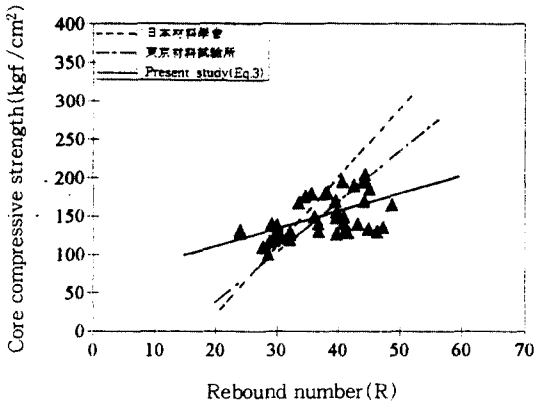


Fig. 4 Relationship of seacoast structures between concrete compressive strength and rebound number (Sea side)

있다. 다음의 Fig.3과 Fig.4는 각각 방조제 구조물의 육지측과 바다측의 콘크리트 코어 압축강도와 반발경도의 상관식을 보여주는 것으로 마찬가지로의 경향을 보여주고 있다.

3.2 초음파속도와 코어 압축강도의 상관관계

(1) 개설

초음파속도에 의한 비파괴검사가 개발되어 사용된 기간이 비교적 짧으나, 최근 그 사용이 급격히 증가하고 있는 방법이다. 다음의 Table 7에서와 같이 여러 연구자들에 의한 초음파속도와 압축강도의 상관식이 여러가지 형태를 갖는다. 선형으로 결합된 다항식의 형태는 보통 4승항까지를 연구한 결과가 발표되어 있고, 지수함수 형태의 추정식도 많이 연구되어 있다.

그러나 본 연구에서 수행된 비파괴검사법에서 측정된 자료에 의하면 선형 강도추정식 형태와 지수함수 형태가 적합한 것으로 나타나, 이에 중점을 두어 분석을 수행하였다.

본 연구 결과는 반발경도와 코어 압축강도를 이용한 강도 추정식의 경향과 같은 낮은 기울기와 높은 상수항을 나타내었는데, 이는 기존 추정식이 높은 강도에서는 강도를 높게 평가하고 낮은 강도에서는 콘크리트의 강도를 낮게 평가하는 결과를 나타내게 된다는 결론을 얻을 수 있다.

Table 8 Relationship between concrete compressive strength and ultrasonic velocity of other researchers⁽²⁾

Researchers	Equations	Remarks
日本材料學會	$F_c = k_1 \cdot V_p$ $+ k_2 \cdot V_p^2 + C$	F_c = Compressive strength (kgf/cm ²) V_p = Pules velocity (km/sec) k_1, k_2, C = Empirical constants

(2) 구조형태별 초음파속도와 코어 압축강도의 상관관계

본 연구에서 수행된 초음파속도와 코어 압축강도와의 추정식은 기존의 강도추정식들 중 선형식이 적절한 것으로 나타났으나, 가능한 여러 형태의 강도추정식에 대한 분석을 수행하였다.

Table 9에서와 같은 연구의 결과는 3.1절에서와 마찬가지로 선형 추정식이 낮은 기울기 값을 갖는 것으로 나타났는데 이는 본 연구 대상 시설물이 노후된 토목시설물이라는 특수상황에서 나타난 결과로 판단된다.

Table 9 Results of regression analysis for relationship between concrete compressive strength and ultrasonic velocity

Structures location	Prediction equations	Derived coefficients			Root mean square error	
		a_0	a_1	a_2		
Inland structure	$F_c' = a_0 + a_1 V_s$	-42.268	0.050	-	22.89	
	$F_c' = a_0 + a_1 V_s + a_2 V_s^2$	173.133	-0.081	0.0	22.80	
	$F_c' = a_0 V_s^{a_1}$	0.0037	1.289	-	0.166	
	$F_c' = a_0 + a_1 (a_2^2) V_s$	-20.662	0.053	0.995	20.36	
Seacoast structures	Land side	$F_c' = a_0 + a_1 V_s$	-53.173	0.062	-	19.21
		$F_c' = a_0 + a_1 V_s + a_2 V_s^2$	340.980	-0.170	0.0	24.58
	Sea side	$F_c' = a_0 V_s^{a_1}$	0.821	0.644	-	0.187
		$F_c' = a_0 + a_1 (a_2^2) V_s$	37.606	0.038	0.998	26.79
		$F_c' = a_0 + a_1 V_s$	37.462	0.033	-	25.19
		$F_c' = a_0 + a_1 V_s + a_2 V_s^2$	392.349	-0.179	0.0	28.95
		$F_c' = a_0 V_s^{a_1}$	32.655	0.184	-	0.205
		$F_c' = a_0 + a_1 (a_2^2) V_s$	118.016	0.005	1.014	29.67

앞서 3.1의(2)항에서와 비슷한 경향을 보이는 결과가 도출되었으며, 연구 결과 강도 추정식이 다른 연구자들의 추정식에 비해 낮은 강도 범위에서는 초음파속도에 따라 강도가 약간 높게 평가되고 높은 강도 범위에서는 비교적 낮게 평가가 된다.

즉 초음파속도와 압축강도의 상관관계도 본 연구에서와 같이 구조물의 재령일수가 크고, 초기

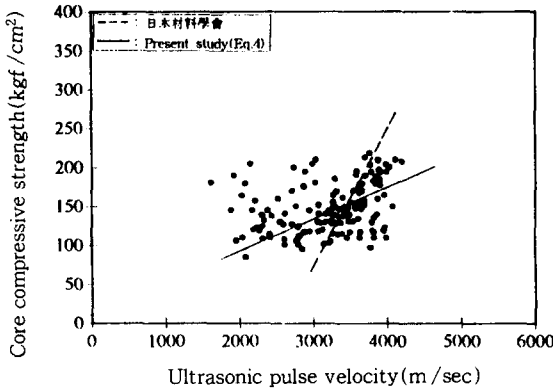


Fig.5 Relationship of inland structures between concrete compressive strength and ultrasonic velocity

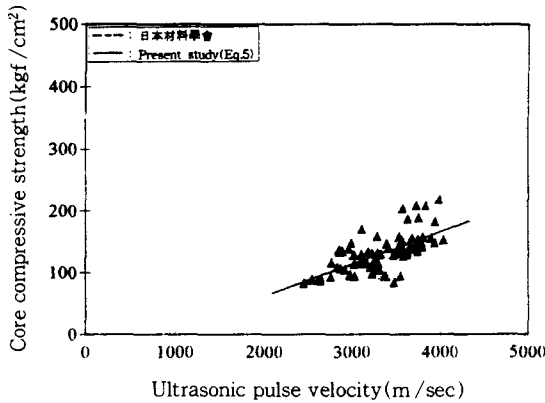


Fig.6 Relationship of seacoast structures between concrete compressive strength and ultrasonic velocity (Land side)

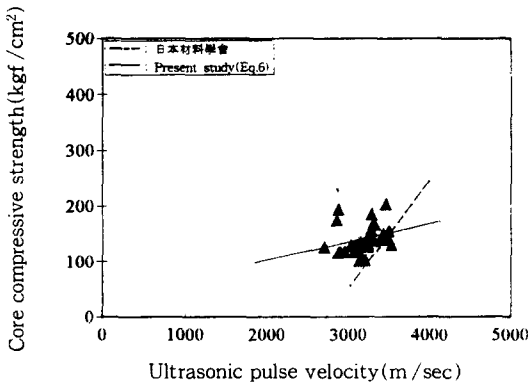


Fig.7 Relationship of seacoast structures between concrete compressive strength and ultrasonic velocity (Sea side)

배합강도가 낮은 범위의 경우는 추정식이 다른 형태를 나타낼 수 있음을 보여주는 것이라 판단된다.

다음의 Fig.5는 저수지 및 양수장 구조물에서 다른 연구자들에 의해 제안된 초음파속도와 압축강도의 상관관계식을 본 측정 자료에 그린 것으로 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 이런 경향을 Fig.6, Fig.7의 해안 구조물의 육지측, 바다측 구조체에서도 관찰되었다. 따라서, 기존 추정식의 적용이 상당한 오차를 포함할 수 있음을 판단할 수 있고, 노후된 저장도 범위의 토목 시설물에 대한 새로운 추정식이 타당성을 갖는 것으로 판단된다.

본 연구 결과 노후 콘크리트 구조물의 강도 추정에 현실적으로 사용될 수 있는 합리적인 식은 다음의 식(4)~(6)이 바람직하다.

$$\text{육지 구조물} : F'_c = -42.268 + 0.050 \cdot V_s \quad (4)$$

$$\text{해안 구조물} \\ \text{- 육지측} : F'_c = -53.173 + 0.062 \cdot V_s \quad (5)$$

$$\text{- 바다측} : F'_c = 37.462 + 0.033 \cdot V_s \quad (6)$$

3.3 반발경도 및 초음파속도의 복합법과 코어 압축강도의 상관관계

(1) 개 설

비파괴 방법에 의한 콘크리트의 품질평가는 여러가지 원인에 의해 오차를 포함할 수 밖에 없다. 이런 추정의 분산성을 줄이고 정도를 높이기 위해 많은 연구가 수행되었으며 특히 두가지 이상의 비파괴시험법의 복합을 통한 신뢰성 향상의 방법은 추가적인 비용, 시간, 복잡성에도 불구하고 최근 여러 연구자들에 의해 검토되고 있다.

다음의 Table 10는 여러 연구자들에 의한 복합식 형태를 비교한 것으로 비교적 다양한 형태의 시도가 이루어졌다.

본 연구에서는 반발경도법과 초음파속도법을 복합시킨 방법의 타당성 및 실측 자료를 통한 분석과 재령일수에 대한 영향을 추정식에 첨가하는 작업을 수행하였다. 현재 재령일수에 대한 영향은 재령 보정계수를 취함으로써 고려하고 있으나, 본

Table 10 Combined tests of other researchers⁽³⁾

Reserchers	Equations	Remarks
尾崎・明石	$V_p/F_c=195-132 \cdot R+0.316R^2-0.00257 \cdot R^3$	$F_c=MPa$
谷川・山田・小坂	$F_c=10.2 \cdot (k \cdot R)+223 \cdot V-960$	
野崎・中山	$F_c=9.9 \cdot R+79.2 \cdot V_p-273$	
Bollander	$F_c=1.11 \cdot (0.0082 \cdot R^3+11.03 \cdot V_p-32.7)^{0.942}$	
谷川	$F_c=11.8 \cdot R+129 \cdot V-642$	

Note : F_c =Compressive (kgf / cm²),
 R =Rebound number, V_p =Pulse (m / sec)

연구 대상인 노후 토목시설물들은 그 경과년수의 범위가 1년에서 70년까지 넓게 분포함으로써 대부분이 현재 재령 보정일 3000일을 넘는 자료들로 다른 방법으로는 고찰이 필요하다는 판단에 근거한 것이다.

(2) 구조형태별 복합법에 의한 압축강도의 추정

복합법은 비선형 다중함수로 구성되며 여러 형태가 가능하나, 본 연구에서는 가장 합리적인 다음의 식(7)~(9)와 같은 형태를 기본으로 하여 분석을 수행하였으며 그 결과는 Table 11에 요약되어 있다.

$$F_c = a_0 + a_1 \cdot R + a_2 \cdot V_s \quad (7)$$

$$F_c = a_0 + a_1 \cdot R + a_2 \cdot V_s + a_3 \cdot R^2 + a_4 \cdot V_s^2 \quad (8)$$

$$F_c = a_0 + a_1(a_5^1) \cdot R + a_2 \cdot V_s + a_3(a_6^1) \cdot R^2 + a_4 \cdot V_s^2 \quad (9)$$

그리고 식(9)에서와 같이 재령일수를 상관식에 포함시켜 구조물의 경과년수를 고려한 강도추정이 가능하도록 하게 하였다.

본 연구 결과 노후 구조물의 강도추정에 현실적으로 이용할 수 있는 간편하며 합리적인 식은 다음의 식(10)~(12)이 바람직한 것으로 사료된다.

$$\begin{aligned} \text{육지 구조물 : } F_c &= 58.085 + 1.758 \cdot R \\ &+ 0.005 \cdot V_s \end{aligned} \quad (10)$$

해안 구조물

$$\text{- 육지측 : } F_c = 15.736 + 2.129 \cdot R + 0.016 \cdot V_s \quad (11)$$

$$\text{- 바다측 : } F_c = 89.971 + 2.309 \cdot R - 0.009 \cdot V_s \quad (12)$$

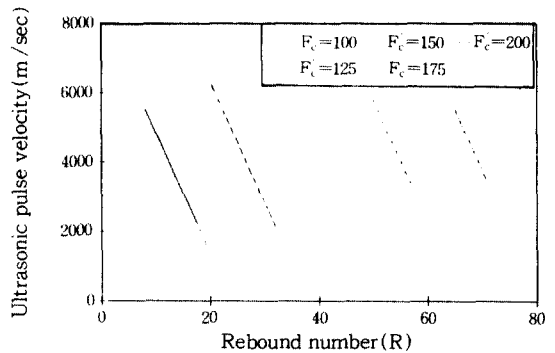


Fig. 8 Relationship between concrete core compressive strength and rebound number and ultrasonic velocity combined tests(inland)

Table 11 Results of regression analysis for relationship between concrete compressive strength and combined tests

Structure locations	Prediction equations	Derived coefficients							Root mesn square error	
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6		
Inland structures	$F_c = a_0 + a_1 R + a_2 V_s$	58.085	1.758	0.005	-	-	-	-	29.10	
	$F_c = a_0 + a_1 R + a_2 V_s + a_3 R^2 + a_4 V_s^2$	156.577	4.395	-0.088	-0.037	0.00	-	-	28.71	
	$F_c = a_0 + a_1(a_5^1)R + a_2 V_s + a_3(a_6^1)R^2 + a_4 V_s^2$	207.182	2.978	-0.075	0.012	0.00	0.866	1.008	25.47	
Seacoast structures	Land side	$F_c = a_0 + a_1 R + a_2 V_s$	15.736	2.129	0.016	-	-	-	-	24.58
		$F_c = a_0 + a_1 R + a_2 V_s + a_3 R^2 + a_4 V_s^2$	287.754	-2.428	0.110	-0.053	0.00	-	-	23.62
		$F_c = a_0 + a_1(a_5^1)R + a_2 V_s + a_3(a_6^1)R^2 + a_4 V_s^2$	168.851	1.790	-0.084	0.021	0.00	1.000	0.966	22.60
	Sea side	$F_c = a_0 + a_1 R + a_2 V_s$	89.971	2.309	-0.009	-	-	-	-	25.97
		$F_c = a_0 + a_1 R + a_2 V_s + a_3 R^2 + a_4 V_s^2$	211.036	2.343	-0.091	-0.004	0.00	-	-	26.01
		$F_c = a_0 + a_1(a_5^1)R + a_2 V_s + a_3(a_6^1)R^2 + a_4 V_s^2$	217.327	1.667	-0.087	0.047	0.00	1.003	0.862	25.20

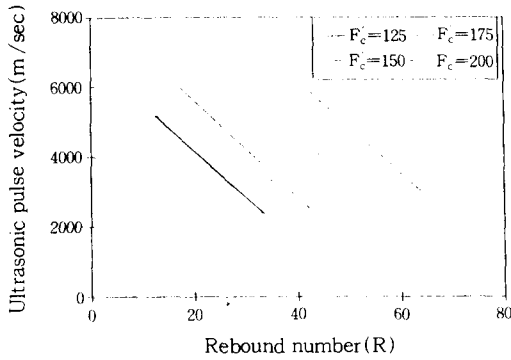


Fig. 9 Relationship between concrete core compressive strength and rebound number and ultrasonic velocity combined tests(seacoast)

4. 중성화 깊이와 코어 압축강도와와의 관계

콘크리트 압축강도는 콘크리트의 대표적 특성이라고 할 수 있다. 압축강도는 각종 내적, 외적 요인의 복잡한 영향을 받지만, 중성화(carbonation) 깊이는 압축강도에 영향을 미친다. 따라서 압축강도와 중성화 속도와의 관계는 시멘트 종류, 물시멘트비 및 양생조건의 파라메타로서 압축강도와 중성화 속도의 관계는 정량적으로 검토하여야 한다.

대기중의 탄산가스에 의하여 콘크리트 표면에서 중성화 진행과 경과시간을 나타낸 것이 중성화 속도식으로 콘크리트 구조물은 시간이 경과됨에 따라 대기중이나, 유입수의 CO₂ 성분과 반응하여 중성화가 진행되고 이의 영향으로 인해 반응한 중량만큼 무거워지고 치밀해진다.

따라서, 콘크리트의 표면경도를 통하여 압축강도를 추정하는 반발경도법의 경우 중성화로 인한 표면경도의 증가에 대한 영향을 고려해야 되는데 중성화가 20mm 깊이 이상 진행된 경우 반발계수가 50% 정도 초과하여 나오는 것으로 보고된 바 있다.

중성화 깊이를 정확하게 측정하는 것은 콘크리트 구조물의 열화의 정도를 알기 위해 필요한 것으로 측정 방법에는 페놀프탈레인법(phenolphthalein method : pp법), 시차열 중량 분석에 의한 방법, X선회석에 의한 방법, 전기화학적방법 등이 있다.

본 연구에서는 일반적으로 현장에서 간편하게 이용 되어지는 페놀프탈레인법을 이용하여 본 연구의 대상 구조물 콘크리트의 중성화 진행 정도를 측정하였다.

페놀프탈레인법은 pH 지시약의 일종이고 1% 알칼리 용액으로서 대상 부분에 분무하여 사용하고 pH 8.2~10.0 이상의 알칼리층에서 홍색으로 발색하며 중성층에서는 무색으로 중성화 진행 깊이의 측정은 콘크리트 표면에서 발색점까지의 길이를 측정한다.

페놀프탈레인을 측정 면에 가능한 한 빨리 분무하여 중성화 깊이를 측정하며, 이로 인하여 발색된 부분은 공기 중에서 1개월 정도 방치하여도 퇴색하지 않는다. 그러나, 시편의 콘크리트 표면에서 중성화가 계속 진행하여 발색이 불선명하게 된다는 점에 유의해야 한다.

중성화 속도에 영향을 미치는 요인은 일반 대기 중에서는 환경조건 즉 대기중의 탄산가스 농도, 온도, 습도, 마감재 등 외적 요인 및 콘크리트 자체의 성능이나, 품질로서 포로치, 투수성, 함수율, 강도, 시멘트의 종류, 배합조건, 시공조건 등의 내적 요인에 의해 복잡한 인자에 의해 그 진행 정도에 영향을 받는다. 콘크리트의 대표적 특성인 압축강도는 각종 내적, 외적 요인의 영향을 받아 이것으로 인하여 중성화 속도에도 영향을 미친다. 따라서 압축강도와 중성화 속도와의 관계는 시멘트 종류, 물-시멘트비 및 양생 조건의 파라메타로서 압축강도와 중성화 속도의 관계는 정량적으로 검토하여야 한다.

콘크리트 구조물의 일반적인 중성화 속도식은 다음과 같이 제안되어 왔고 식(13)의 과대 평가 여부도 Brown⁽³⁾ 등에 의해 검토된 바 있다.

$$X = R \times \sqrt{t}$$

여기서, X : 중성화중성화 깊이(mm)

t : 경과년수(년)

R : 중성화속도 계수(실험 상수)

본 연구에서는 노후 구조물에서 실측한 비파괴 시험과 중성화 깊이 및 코어 강도에 대한 검토 결과 Table 11과 같이 현재 적용되는 재령 보정계수의 타당성 여부에 대한 분석을 수행하여 식 (13)

Table 12 Aging correction factor for rebound number

Age(year)	10	20	28	50	100	150	200	300	500	1000	3000	Remarks
Passage of time factor(n)	1.55	1.12	1.00	0.87	0.78	0.74	0.72	0.70	0.67	0.65	0.63	

을 유도하였다.

$$X = 3.05 \times t^{0.35}$$

여기서, X : 중성화 깊이(mm)

t : 경과년수(년)

Fig.10과 Fig.11은 일정한 반발경도를 갖는 노후 콘크리트 구조물의 경과년수에 대한 압축강도의 변화를 도시화한 것으로 약간의 분산성을 포함하고는 있으나, 10년 이전에는 압축강도가 줄어드는 경향을 보이고, 경과년수에 대한 압축강도가 10년 이후에는 거의 변화가 없음을 볼 수 있다. 이는 Fig.10과 Fig.11은 일정한 반발경도 값을 보인 구조물의 경과년수에 대한 중성화 깊이를 도시한 것으로 설명이 되는데 10년 이전에는 중성화가 진행되었다가 10년 이후 거의 일정하게 경과년수에 비해 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

따라서, 현재 3000일 이상에 공통적으로 적용되는 재령 보정계수가 타당성을 갖는 것으로 판단되며, 대부분의 측정 자료들이 10년 이상의 노후된 구조물에 의존하므로 10년 이내에서는 정확한 판단이 어려운 것으로 사료된다. 즉, 본 연구 결과 재령 10년 이하에서는 중성화 진행이 계속되고, 반발경도의 증가를 가져오며 같은 반발경도에서

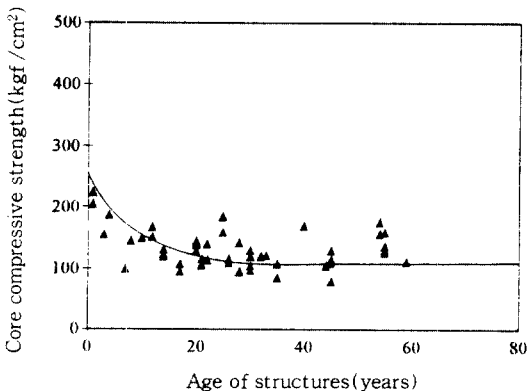


Fig.10 Core compressive strength with the passage of time

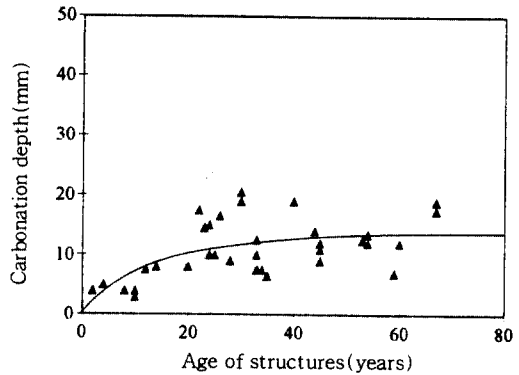


Fig.11 Carbonation depth with the passage of time

는 실제 콘크리트 강도가 작아지는 결과를 초래하는 것이 Fig.11에서 잘 나타나고 있다.

5. 결 론

최근들어 건설된 각종 콘크리트 구조물들과 재령이 증가된 노후 구조물들의 열화(기능저하) 현상에 대한 평가의 필요성이 중요하게 대두되고 있을 뿐만 아니라, 철근콘크리트 구조물에 대한 신뢰도가 저하되고 있어 안정성, 내구성 향상과 품질관리에 대한 적절하고 종합적인 평가 기법 개발이 절실히 요구되고 있다.

현재 콘크리트 구조물에 대한 비파괴적인 품질 평가 방법으로 여러가지가 있으나, 오랜 공용 중의 콘크리트 구조물의 품질평가에 영향을 주는 여러가지 인자들 중에서 가장 중요한 문제점으로는 콘크리트의 강도 저하를 들 수 있으며, 콘크리트 강도를 추정하는 방법들 중에서 대표적인 비파괴 시험으로 반발경도법, 초음파속도법 등을 이용하여 콘크리트 강도를 추정하는 식들이 제안되어 있으나, 이들 추정식을 이용함에 있어서 대상 구조물의 형식과 형태, 특수 구조물인 경우나, 오래 경과된 노후 구조물 등의 콘크리트 강도 추정을 정확히 추정하는데는 어려움이 많았다.

그러므로 본 연구에서는 여러해 경과된 구조물에 합리적으로 적용될 수 있는 콘크리트 강도 추정식을 제안하기 위해 오래 경과된 육지 구조물과 해안 구조물들을 선정하여 기존의 강도 추정식에 이용된 반발경도법, 초음파속도법 등을 사용하여 코어 압축강도에 의한 다중회귀분석 결과로 부터 식(1)~(12)와 같이 콘크리트 구조물에 적용할 수 있는 강도 추정식을 제시하며, 연구 결과로 볼 때 기존의 제안식들은 이미 오래된 구조물에서는 많은 오차를 나타내고 있어 현장에서 직접 적용하는데는 적합치 않은 것으로 생각된다.

따라서, 본 연구 결과에서 제시된 강도 추정식들이 앞으로 설계강도가 높지 않은 보통 강도 콘크리트의 노후 구조물의 강도 평가를 위한 비파괴 시험의 강도 추정식으로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 明石外世樹・尾崎省二, “콘크리트의 비파괴 시험의現状と趨勢”, 日本콘크리트工學, Vol.23, No.12, 1985, pp.11~28.
2. 笠井芳夫, 富士岳, “콘크리트 구조물의 비파괴 시험”, 日本非破壊検査學會, 第37 卷, 第3號, 1988, pp.206~221.
3. 日本建築學會, “콘크리트 強度推定のための 비파괴 시험方法 マニュアル”, 日本建築學會, 1983, pp.1~74.
4. 콘크리트工學, “콘크리트 구조물의 내구성”, 日本콘크리트工學, Vol. 23, 1985.
5. 谷川恭雄・山田和夫, “複合非破壊 시험方法による 콘크리트 強度의推定”, 日本建築 學會東海支部研究報告集, No.17, 1969, pp.5~9.
6. 谷川恭雄・山田和夫・小阪義夫, “콘크리트 複合非破壊法に關する研究”, 콘크리트工學 年次講演會 講演論文集, 1979, pp.21~24.
7. 延吉煥, “콘크리트의 反撥度 및 超音波速度와 壓縮強度의 多重相關分析”, 全北大 學校博士學位論文, 1986, pp.1~4.
8. 한국전력공사기술원, “콘크리트 강도 측정을 위한 비파괴 검사의 신뢰성 향상에 관한 연구”, 한국전력공사, 1988, pp.25~207.
9. ASTM C-129, “Technical Instructions for Non-Destructive Strength Determination by Combined Methods”, Bucuressti, 1971.
10. British Standards 4408 ; Part 4, “Recommendations for Non-Destructive Methods of Test for Concrete ; Surface hardness Method”, British Standards Institute, 1971.
11. ASTM C 597-71, “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete”, Annual Book of ASTM Standards, Part 14, 1978, pp. 354~357.
12. 岸谷孝一・西澤紀昭 他 編, “콘크리트 구조물의 내구성 시리즈 中性化”, 技報堂 出版, 1986, pp.1~48.
13. 谷川恭雄・山田和夫, “複合非破壊 시험法による 콘크리트 強度의推定”, セメント 콘크리트, No.393, 1979, pp.5~9.
14. Schmidt, E., “Der Beton-Prufhammer”, Schweizerische bauzeitung, Vol.68, No.28, 1950.
15. RILEM CNDT-Committee, “RILEM Tentative Recommendations for In-Situ Concrete Strength Determination by Non-Destructive Combined Methods”, First draft, May, 1980.
16. 한국콘크리트학회, “콘크리트 구조물의 비파괴 검사 및 안전진단”, 제2회 기술강좌, 1993, pp. I-1~II 51.
17. 農業振興公社, “超音波非破壊 시험 分析 電算化 開發研究”, 農業振興公社, 1987~1988.
18. 건설부, “콘크리트 표준시방서”, 대한토목학회, 1989.

(접수일자 : 1994. 9. 10)