

長期間供用されたコンクリート構造物の材料特性

大阪第三建設部 新淀川工事事務所 瀬戸口 嘉 明
保全施設部 保全技術課 澤 登 善 誠

要 約

コンクリートは、各種の建設材料の中で最も安価で、汎用性が高いため数多く利用されている材料の一つである。また、耐久性が非常に良いとも言われている。しかしながら、高速道路を構成しているコンクリート構造物として見た場合に、長期間供用されるに伴い、その性状がどのように変化（劣化）しているかを把握しておくことは、道路管理者として不可欠であろう。

本稿は、平成元年度末に撤去されるまで、24年間供用された旧梅田入路のコンクリート構造物を対象に行った各種の性状調査に関するものである。調査は大きく分けて、試料採取後室内試験にて品質確認したものと、現地で非破壊にて調査したものとに分けられる。既存の各種の提案式ならびに推定式との比較をも併せて行っており、今後、構造物を維持管理していく上で、貴重なデータとなるであろう。

まえがき

コンクリート構造物を維持管理していく上で、長期間供用されたことに伴い、その性状がどのように変化しているかを把握することは、道路管理者にとって不可欠であると思われる。また、従来よく利用されている各種の非破壊検査についても、信頼できる精度まで確立されるに至っておらず、その適用範囲が明確ではない。また残念ながら、実構造物を対象に上記の目的の下、徹底的にその構造物の構成材料の品質まで立ち返って調査した結果は、皆無に等しい。このような状況の中で、西梅田地区市街地再開発事業に伴う入路の付け替えのため、環状線旧梅田入路が平成元年度末に撤去されることになった。本入路は昭和40年12月に供用開始されており、撤去までに実に24年間も使

用されていたものであり、またない調査対象物となった。

本稿は、旧梅田入路のフーチング・杭を含む全てのコンクリート構造物を対象に、コンクリートおよび鉄筋の材料特性の劣化度を定量的に把握するとともに、各種非破壊検査手法の確立のための基礎的資料を得ることを目的として行った、多面的な調査の結果を紹介するものである。

1 調査概要

1-1 調査対象構造物概要

今回の調査対象となった旧梅田入路は、全長約200mであり、平均勾配8.5%である。図-1に一般図を示す。また構造形式は以下の通りである。

上部工：鋼単純合成I桁4連	G 2～G 5
鋼単純H桁2連	G 6、G 7
PC単純桁2連	G 8、G 9
下部工：RC単柱式橋脚6基	P 2～P 7
RCラーメン橋脚2基	P 8、P 9
RC橋台1基	P 10
基礎工：場所打ち杭基礎9基	P 2～P 10

(ただし、調査対象はP 4のみ)

1-2 調査内容

調査は、前述の全てのコンクリート構造物（床版、橋脚、高欄、PC桁、擁壁、フーチング、場所打ち杭）を対象に行った。調査項目は以下の通りである。

①コンクリートの材料特性

コア採取による性状調査：圧縮強度、静弾性係数、中性化、含有塩分量、アルカリ含有量、酸性雨の影響

(2)鉄筋の材料特性

試料採取による性状調査：引張強さ、降伏点、発錆状況

(3)非破壊検査の精度検証

コンクリートの強度推定各種、ひびわれ深さ推定、鉄筋の位置・かぶり探査各種、発錆状況推定

2 コンクリート・鉄筋の材料特性

2-1 コンクリート

2-1-1 圧縮強度および静弾性係数

採取コアの圧縮強度試験を行ったところ、表-1に示すように、ばらつきがあるものの、各部位とも設計基準強度を上回る値を供用後24年経った現在でも維持していると判断される。本調査では、外観状況により構造物を健全部とひびわれがよく発生している損傷部とに分けて各種の調査を行ったが、図-2に示すように外観状況と圧縮強度の間では相関性は認められない。

また、圧縮強度と静弾性係数の関係を図-3に示す。コンクリートの静弾性係数は、材料、配合、材令等により異なるが、一般には圧縮強度およびコンクリートの比重と密接な関係があるとされ、種々の関係式が提案されている。土木学会RC示

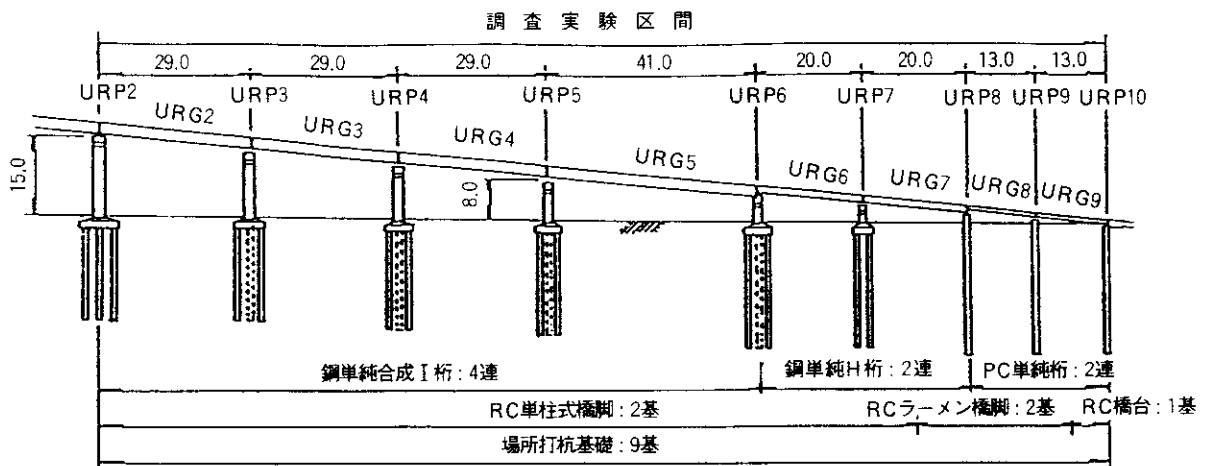
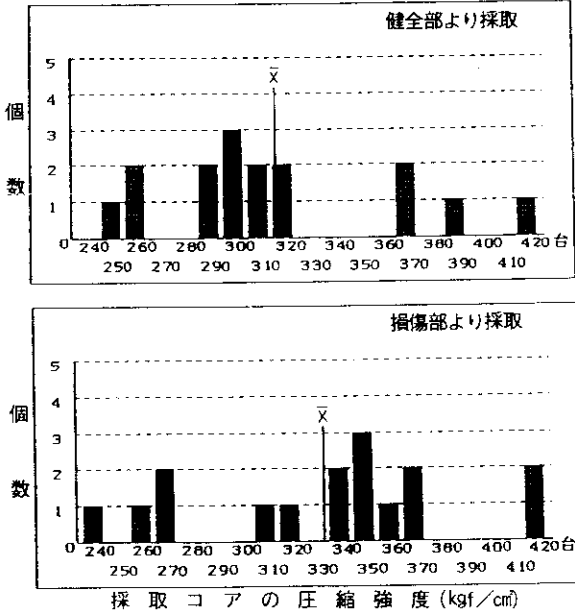


図-1 入路一般図

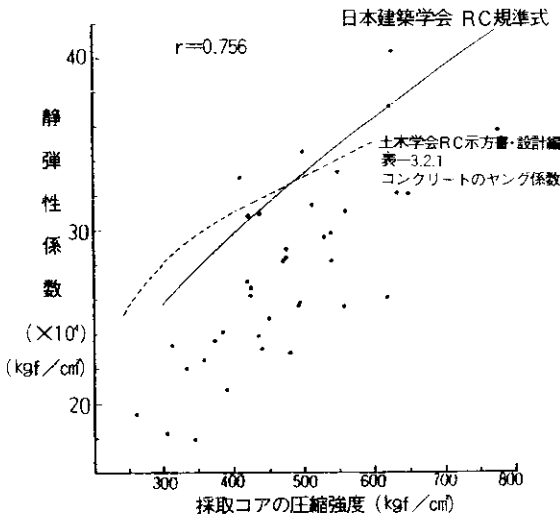
方書・設計編「3. 2. 5 ヤング係数」および日本建築学会・RC規準に記載の関係を図中に示したが、今回の試験結果は、当然のことながら圧縮強度と静弾性係数の間には比例関係が得られているものの、両学会提案の関係式よりは静弾性係数が小さい傾向を示している。

表一 採取コアの圧縮強度

構造物部位	試験数	平均値 (kgf/cm ²)	最大値 (kgf/cm ²)	最小値 (kgf/cm ²)
床版	12	366.0	475	265
梁・柱	36	441.4	546	355
高欄	32	329.3	424	244
擁壁	6	358.2	402	255
杭	15	554.7	782	409
PC桁	6	627.8	759	504
フーチング	3	449.7	475	409



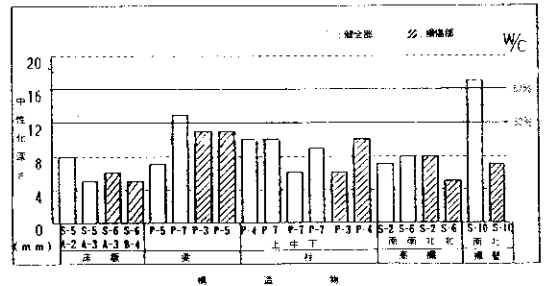
図一 採取コアの圧縮強度 (高欄部)



図一 3 圧縮強度と静弾性係数の関係

2-1-2 中性化深さ

構造物各部位ごとの中性化深さ測定結果を図一4に示す。中性化深さは最大で17mmであり、構造物ごとに見ると床版における値が他の構造物に比べて若干小さい傾向である。外観上の健全部と損傷部の差は、中性化深さに関してはほとんど認められない。一般に中性化の進行と水セメント比には密接な関係があるとされているが、岸谷式¹⁾による推定値と比較すると(図中の57、52%)、中性化の進行程度(実測値)は推定値に比べておおむね小さな値を示している(ここに、水セメント比=57%、52%は、それぞれ設計基準強度240kgf/cm²、280kgf/cm²に対応する。当時のレディミクストコンクリート配合表より算出した)。特に、床版および高欄において推定値より小さい傾向である。



図一 4 各部位の中性化深さ

2-1-3 コンクリート中の含有塩分量

含有塩分量の試験結果を、図-5に示す。コア供試体全量を試料として試験した結果では、全供試体の平均値が Cl^- として0.037%であるのに対し、鉄筋周辺部(上下3cm程度まで)のコンクリートのみを取り出して試験した結果は、総平均値として0.042%であった。鉄筋周辺部のほうが若干塩分濃度が高い効果である。さらに健全部と損傷部とを比較すると、健全部の総平均値が0.026% (コンクリート単位容積あたり $0.572kg/m^3$)であるのに対し、損傷部の総平均値は0.049% ($1.078kg/m^3$)である。これは現行のRC示方書あるいはJISA5308の規制値 ($0.6kg/m^3$ 以下) に対して、健全部では満足しているが、損傷部は約1.5倍の値である。施工時における未除塩海砂の使用、塩分を多量に含有した早強性の混和剤の使用などが原因として考えられる。

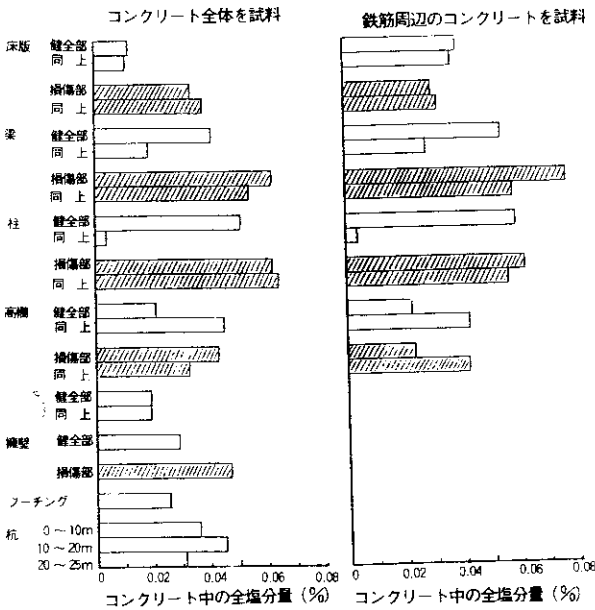


図-5 塩分含有量試験結果

2-1-4 アルカリ含有量およびコアの膨張試験結果

ASRを契機として、コンクリート中のアルカリ量が耐久性上の大きな検討課題となっている。含有アルカリ量測定結果を図-6に示す。コン

クリート中の等価アルカリ量は、総平均値で0.123% (コンクリートの絶乾単位容積質量を $2200kg/m^3$ と仮定すると、含有アルカリ量は $2.7kg/m^3$)、最大値が0.17% (同 $3.7kg/m^3$) である。現在のASR防止対策における一設定項目であるアルカリ総量規制値 ($3kg/m^3$ 以下) と比較すると、平均値はこれを下回るが、最大値では若干上回る値である。しかしながら、軽微な亀甲状のひびわれが認められたP3柱部よりコアを3体採取し、ASR促進膨張試験を行ったところ、開放膨張で最大 300×10^{-6} 程度の膨張を示したものの、以降の残存膨張量の進行はなかった。この程度の含有アルカリ量では、ASRが認められないことになる。

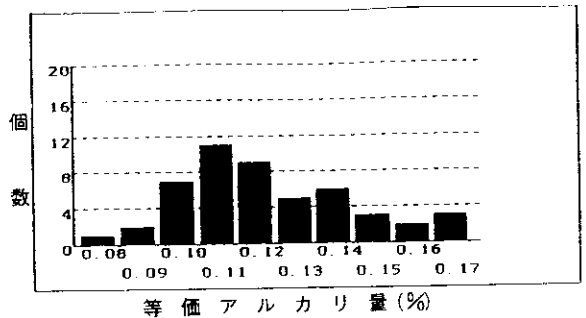


図-6 コンクリート中の特徴アルカリ量

2-1-5 酸性雨の影響に関する検討

酸性雨による土木・建築構造物の劣化問題が大きく取り上げられるところとなっている。環境庁が昭和58年度より昭和60年度にかけて実施した酸性雨のPH調査の結果²⁾を見ると、大阪地区においては、PHの最大値が5.1、最小値4.3、平均値4.5~4.6の結果が得られている。一般論として、コンクリートは化学的に見てPHが13前後のアルカリ性材料であるため、酸による侵食、腐食を受けやすいものである。しかし、酸性雨がコンクリート構造物に与える影響を化学量論的に見ると、現状の酸性雨のPH程度であればその反応はきわめて徐々に進行し、その被害が急激に現われるものではないと考えられる。本調査では、酸性雨のコンクリートに対する影響を、①酸性雨成分

の硬化体内部への侵入程度をSO₃量の定量分析により把握する、②侵食・溶出による組織の緻密さの低下を細孔径分布測定により把握することとし、調査を行った。試料は、P7橋脚から採取したコアを用い、酸性雨の影響を受けた可能性のある表層部（表面から深さ1cmまで）と、酸性雨の影響を受けていない中心部（表面から深さ約80cm位置）の2試料を対比した。

表-2に、SO₃量の定量分析結果を示す。SO₃量は、表層部が0.30%、中心部が0.17%の値を示しており、表層部が約1.8倍の値である。この値からは、表層部は酸性雨の影響を受けていると考えられるが、コンクリート中のSO₃量は、本来セメント中に含まれているSO₃量に起因するものが大部分を占めると考えられるので、含有セメント量を分析し、その量との対比を行った。表層部と中心部でセメント量測定結果が異なるのは、コンクリート打設時の振動効果により型枠に沿ってブリージングが生じ、そのためモルタル分が多くなったためと考えられる。単位セメント量あたりのSO₃量を求めると、表層部のほうが約1.3倍の値を示している。これより、表層部のほうがSO₃量が多く、環境中から連行されたものがあると考えられる。

表-2 SO₃量の定量分析

試料	分析結果 (%)		
	SO ₃ 量(a)	セメント量b	単位セメント量あたりのSO ₃ 量 (a/b×100)
表層部	0.30	16.7	1.80
中心部	0.17	12.3	1.38

次に、細孔径分布の測定結果を図-7に示す。空隙量は、各細孔径サイズとも表層部のほうが中心部よりも量的に少ない結果であり、全空隙量も表層部は中心部の約2/3の値である。一般に酸性雨を受けるとコンクリート構造物は組織が雑になると言われているが、酸性雨の影響を受けやすい表層部のほうが逆に、中心部よりも緻密な結果を示している。

以上のことから、本構造物は表層部においてはSO₃量が多いものの、酸性雨による影響（劣化損傷）を受けているとは考え難い結果を示している。

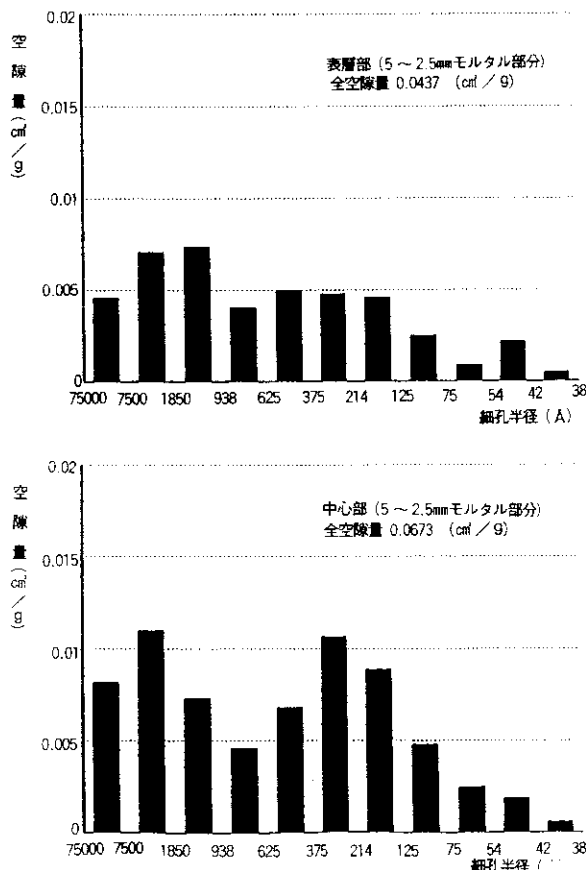


図-7 細孔径分布測定結果

2-2 鉄筋

本構造物の建設に使用された鋼材は、JISG 3110「異形丸鋼」（昭和28年制定、40年廃止）に規定の異形丸鋼2種SSD49、およびJISG3101「一般構造用圧延鋼材」に規定のSS41であった。

2-2-1 引張強さ

(1)異形丸鋼2種SSD49

引張強さは、図-8に示したように規定値に対して、28試験体のうち6試験体が下限値以下、1試験体が上限値以上の値を示している。下限値以下となった試験体は、すべて杭

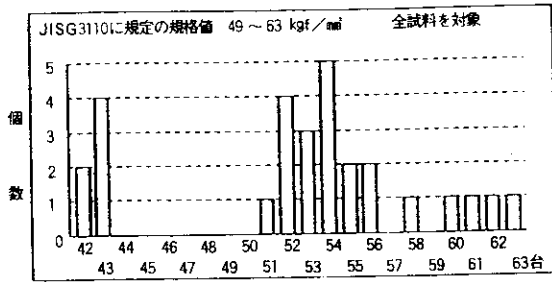


図-8 採取鉄筋の引張強さ試験結果
(その1-引張強さ)

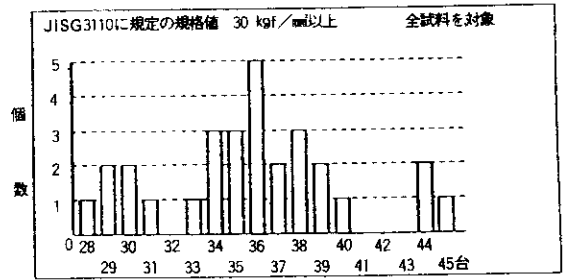


図-9 採取鉄筋の引張強さ試験結果
(その2-降伏点)

から採取されたD22サイズのものである。また1体が上限値を超えているが、その値は63.2kgf/mm²であり、規定値に対して若干の超過である。さらに図-9に示した降伏点も同様の傾向を示している。

(2)一般構造用圧延鋼材 2種SS41

6試験体とも規定値である41kgf/mm²以上(最小42.0、最大45.4、平均44.3kgf/mm²)の値を示している。

2-2-2 発錆状況

採取鉄筋の発錆状況調査結果を表-3に示す。

発錆面積率の数値としては数10%といった大きな値のものもあるが、発錆による重量減少率の数値が小さいことからわかるように、全体としては軽微なごく表面の浮き錆が見られる程度の発錆状態である。ほとんど損傷していないため、発錆原因について考察することは難しいが、発錆の2大要因である塩分および中性化の進行による発錆促進の可能性について検討した。これら両要因と発錆面積率の関係を図-10、11に示す。発錆面積率とコンクリート中の塩分量および中性化深さとの相関関係はほとんど認められない。

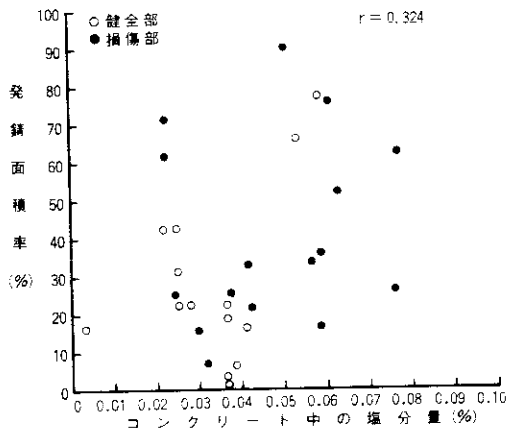


図-10 コンクリート中の塩分量と発錆面積率の関係

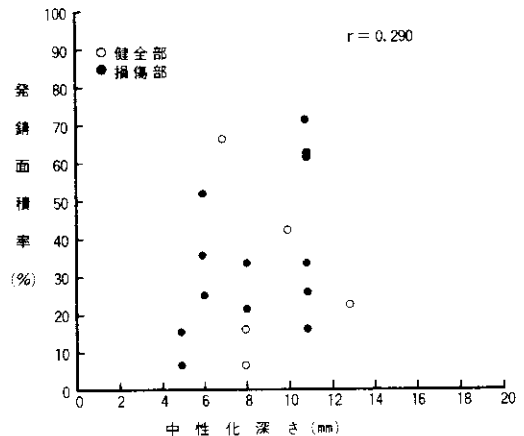


図-11 コンクリートの中性化深さと発錆面積率の関係

この原因としては、発錆程度がきわめて軽微なため差が明確に現れないことのほかに、この構造物では①塩分量が最大でも約 1 kg/m^3 と比較的少なく発錆を生じるレベルではないこと（一般には、塩分量が $0.5 \sim 1.0 \text{ kg/m}^3$ が発錆の臨界塩分量とされている）②中性化深さの進行程度が一般に提案されている数値よりは小さく、中性化域が鉄筋位置まで達していないことが挙げられる。

表-3 採取鉄筋の発錆状況調査結果

部位	採取箇所	判定	No.	発錆面積率	錆の重量	鉄筋の種類
				(%)	減少率(%)	
床	URG 6 A-4	健全部	1	6.6	0.28	D13
	URG 6 C-4	健全部	2	2.0	0.22	D13
	URG 6 A-3	損傷部	1	25.7	0.22	D13
			2	25.6	0.22	D13
版	URG 6 B-4	損傷部	1	7.6	0.30	D13
			2	16.0	0.34	D13
	URP 5 本線側	健全部	1	67.1	0.29	D25
	URP 7 本線側	健全部	1	23.6	0.26	D25
梁	URP 3 本線側	損傷部	1	25.9	0.90	D29
			2	63.2	0.80	D29
	URP 5 ランプ側	損傷部	1	16.6	0.38	D25
			2	34.3	0.66	D25
			URP 5 本線側	健全部	1	77.9
橋	URP 7 北側	健全部	1	16.3	0.20	D29
	URP 3 北側	損傷部	1	35.9	0.92	D32
			2	53.0	0.61	D32
脚	URP 5 ランプ側	損傷部	1	76.2	0.37	D32
			2	90.6	0.44	D32
高欄	URG 2 南側	健全部	1	43.5	0.50	$\phi 13$
	URG 6 南側	健全部	1	16.5	0.57	$\phi 13$
	URG 2 北側	損傷部	1	72.0	0.86	$\phi 13$
			2	62.3	0.67	$\phi 13$
欄	URG 6 北側	損傷部	1	22.3	0.54	$\phi 13$
			2	34.2	0.56	$\phi 13$
フーチング	URP 6	-	1	23.5	0.23	D29
			2	32.1	0.46	D29
			3	43.5	0.38	D29
杭	URP 5	-	1	22.9	0.08	D22
			2	4.5	0.09	D22
			3	19.7	0.10	D22
			4	23.0	0.06	D19

3 各種非破壊検査の精度検証

3-1 コンクリートの強度

3-1-1 反発硬度法（シュミットハンマー法）

日本材料学会が制定した「シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定方法（案）」に従って測定した反発硬度値と、採取コアの圧縮強度試験の関係を図-12に示す。シュミットハンマー法は比較的容易に試験が行え、構造物に損傷を与えないことから多用されている。しかし、装置の器差、材令を経たコンクリートについては表面の中性化の進行などにより測定値が大きくなる傾向があり、コアの圧縮強度とは必ずしも一致しないことが指摘されている。今回の試験結果においても、相関係数が -0.045 ときわめて低く、推定誤差が大きい結果であった。したがって、図中に示した各推定式とも適合しない結果を示している。

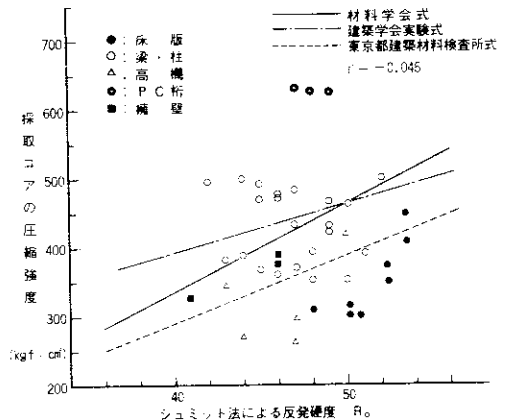


図-12 シュミット法による反発度とコア強度の関係

材料学会法では、材令を経た構造物を評価する際には、中性化の影響を除去するため材令係数を掛けることとしている。本試験の結果は、ばらつきが大きいものの、採取コアの圧縮強度の総平均値は 365 kgf/cm^2 、材料学会式による推定強度値の総平均値は 430 kgf/cm^2 であり、両者の比率として 0.86 が得られた。材令係数を考慮する際のひとつの参考となろう。

床版の測定においては、上向き打撃であったため、反発硬度値は打撃角度による補正（反発硬度値のマイナス補正）を行った後の値で示した。床版の測定結果は、いずれの関係式を用いても、推定値は実測値よりも大きな値である。材料学会式との比較で見ると、反発硬度の総平均値51.9から推定強度は491kgf/cm²が得られ、コア強度の総平均値366kgf/cm²との比較から、材令係数としては0.75が得られる。これは材料学会法の材令係数0.63（材令3000日）よりも大きく、本床版の中性化深さが5～8mmと小さいことが影響したとも考えられる。P C 桁における反発硬度の測定値Rから推定された圧縮強度値（437kgf/cm²）は、コア採取により実測した値（628kgf/cm²）に比べて著しく小さいものであり、他の部位とは傾向が逆である。試料数が少ないため、断定はできないが高強度部材に対する適用に当たってはさらに検討する必要がある。

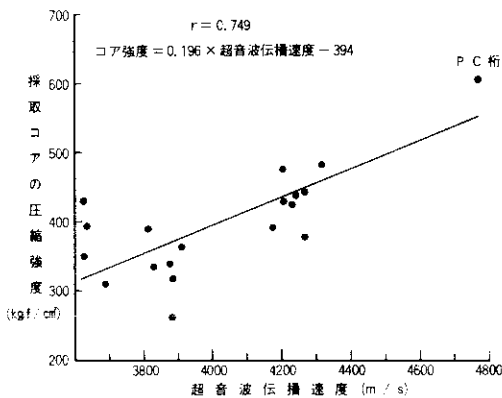


図-13 構造物の超音波伝播速度とコア強度の関係

3-1-2 超音波伝播速度法

超音波式コンクリート品質試験機（パンジット）を用いて測定した超音波伝播速度と圧縮強度試験結果の関係を、図-13に示す。相関係数としては0.749が得られた。しかし、ばらつきが大きく、超音波伝播速度からコンクリートの品質（圧縮強度）を絶対値として精度良く知ることは、やや困難な面がある。現時点では同一部材内での品質の

相対的な比較、たとえば劣化部位の検出等に超音波伝播速度法が適用しうるものと考えられる。

3-1-3 複合法

コンクリートの圧縮強度を非破壊的に推定する際に、2種類以上の試験方法を組み合わせて精度を高める複合法が種々検討されている。日本建築学会は「コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル」を制定し、反発硬度法と超音波伝播速度法を併用する方法を採用している。普通コンクリートの場合の強度推定式³⁾として、圧縮強度 F_c (kgf/cm²) = 8.2 × 反発硬度 R + 269 × 超音波伝播速度 V_p (km/s) - 1094を示している。本調査における結果を図-14に示す。複合法で整理した場合の相関係数は0.722が得られ、超音波伝播速度法と同程度の相関係数であり、精度の向上は確認できなかった。シュミットハンマー法の相関がほとんどないことが大きく影響したのと考えられ、複合法を採用するためには各々の手法の相関係数がある程度以上必要であることをも示している。

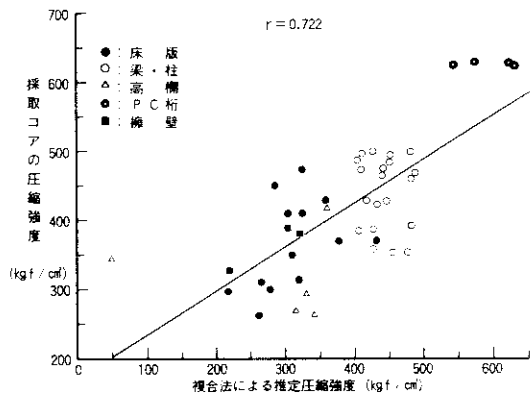


図-14 複合法による推定圧縮強度とコア強度の関係

3-1-4 硬化コンクリートの配合推定と圧縮強度

強度優先から耐久性重視へと配合設計が変化しつつある。つまり、 W/C や単位セメント量の確保である。単に圧縮強度が得られているというだけではなく、その中味（配合）が問われていると

も言える。

硬化コンクリートの配合推定試験により、得られたセメント量および骨材セメント比と採取コアの圧縮強度試験結果との関係を検討したところ、図-15、16に示したように、相関係数としては0.671および-0.614が得られた。しかし、分析値から圧縮強度を精度良く推定することは、図のデータのバラツキ度合より難しいと考えられる。

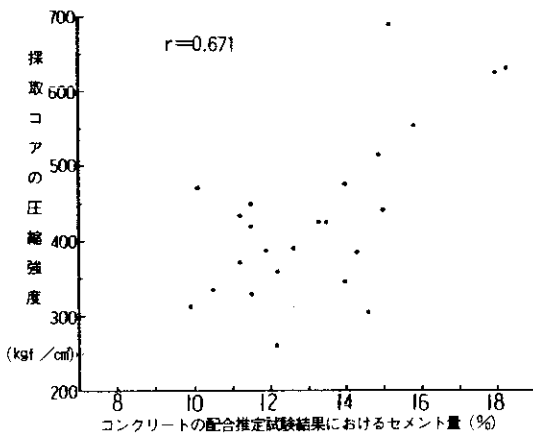


図-15 硬化コンクリートの推定セメント量とコア強度の関係

3-2 ひびわれ深さ

コンクリートに発生したひびわれは、外観上の問題のみならず、そのひびわれを通じて酸素、炭素ガス、水分などの腐食要因が侵入し内部鉄筋を錆びさせることがあるため、構造物の維持管理上きわめて重要な管理項目である。ひびわれの発生状況やひびわれ幅は比較的容易に測定しうるものの、ひびわれ深さについては、ひびわれの方向性、ひびわれ部への異物の侵入、ひびわれ自体の癒着などにより、定量的に評価するのが困難な場合が多い。ここでは、非破壊的にひびわれ深さを測定できる超音波伝播速度法の精度検証を行った。同法で測定したひびわれ深さと、コア採取して実測したひびわれ深さとを比較した。結果を図-17に示す。相関係数として0.990が得られ、超音波伝播速度法によるひびわれ深さ測定が有効であるこ

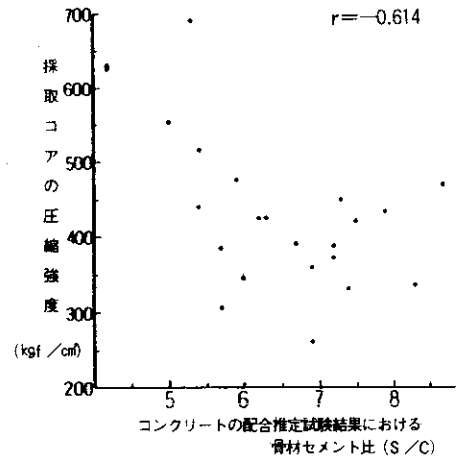


図-16 硬化コンクリートの推定骨材セメント比とコア強度の関係

とがわかる。また、ひびわれ深さの値としては、超音波伝播速度法によるひびわれ深さは実際の値(コア採取法による確認値)の約90%であった。

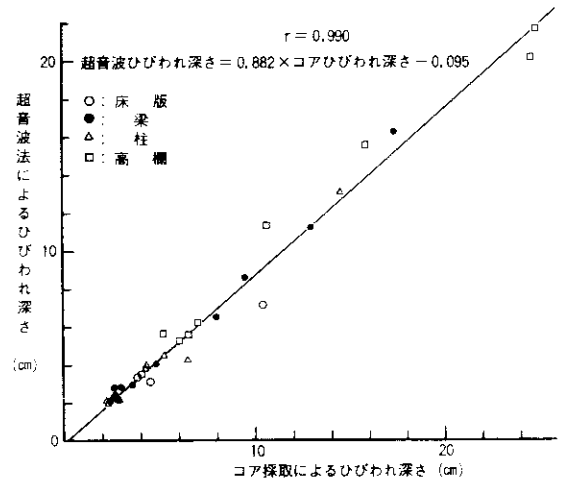


図-17 超音波伝播速度法によるひびわれ深さ推定と実測値の関係

3-3 鉄筋の位置およびかぶり

鉄筋の位置およびかぶりについては、鉄筋計およびレーダーにより同一箇所において非破壊的に測定を行った後、はつりを行い、非破壊検査手法

の検証を行った。

3-3-1 鉄筋位置の探査

鉄筋位置の非破壊検査手法2種による探査結果を、床版、梁・柱、高欄に分けて整理した。実際の鉄筋位置とのずれ量を表-4に示す。梁・柱においては、鉄筋計の場合の試料数が少ないが、これは測定が不可能であった件数が多いことを示すものである。床版、梁・柱、および高欄のいずれにおいても、レーダーによる測定結果のほうが鉄筋計による値よりも誤差が少ない結果となっている。また、測定値のばらつきを構造物ごとに見ると、ばらつきの大小は鉄筋量に応じて、梁・柱、高欄、床版の順に小さくなっている。適用にあたっては、これらの鉄筋量との関係などに留意する必要があるだろう。

表-4 鉄筋位置の非破壊探査結果

部位	鉄筋計による測定			レーダーによる測定		
	試料数	実測値との 平均ずれ量 (mm)	標準偏差 (mm)	試料数	実測値との 平均ずれ量 (mm)	標準偏差 (mm)
床版	111	7.306	17.61	110	3.136	6.73
梁・柱	65	9.538	43.26	220	2.136	37.34
高欄	140	1.500	13.29	136	0.221	14.39

3-3-2 鉄筋かぶりの探査

鉄筋かぶりの非破壊検査結果を実測値に対する比率として、表-5に示す。同一部材で測定したにもかかわらず、鉄筋計のほうが試料数が少ないが、これは鉄筋位置の場合と同様、測定が不能であった件数が多いためである。高欄を除いて、レーダーによるほうが鉄筋計の場合に比べて誤差が小さい傾向であった。また、ばらつきも同様であった。

表-5 鉄筋かぶりの非破壊探査結果

部位	鉄筋計による測定			レーダーによる測定		
	試料数	平均値	標準偏差	試料数	平均値	標準偏差
床版	74	1.065	0.286	100	0.988	0.199
梁・柱	34	1.408	0.202	134	1.015	0.090
高欄	79	1.119	0.280	137	1.252	0.857

3-4 鉄筋発錆状況

3-4-1 自然電位による鉄筋調査

ASTM C876には、電位Eが測定されたその箇所での鋼材の腐食について、以下の評価基準が定められている。

$-200\text{mV} < E$	の場合	90%以上の確率 で腐食が生じて いない
$-350\text{mV} \leq E \leq -200\text{mV}$	の場合	不確定
$E < -350\text{mV}$	の場合	90%以上の確率 で腐食が生じて いる

本調査の結果では、高欄部で $-304 \sim -1\text{mV}$ 、床版部で $-254 \sim -10\text{mV}$ 、梁部で $-179 \sim -10\text{mV}$ 、柱部で $-254 \sim -12\text{mV}$ と各構造物とも -350mV よりも卑な値は確認されておらず、発錆していても比較的軽微な腐食状況にあると判断される。また、この結果ははつりによる検証結果とよく一致していた。

3-4-2 X線による鉄筋調査

床版を対象にX線による撮影を行った。撮影に際しては、フィルムによる現像方法と、一部IP(イメージングプレート)による方法を用いた。鉄筋の存在は確認できたが、発錆はしていなかった。またフィルムと比較すると、IPの方が画像処理などを行うことができるために、異形鉄筋のふしはより鮮明に確認することができた。したがって発錆に伴う減肉の検出などにはIPは有効であると考えられる。

以上のように、本構造物中の鉄筋の発錆状況はきわめて軽微であったため、非破壊検査手法については一応の有効性を確認できたものの、精度・適用範囲などについてはさらに検討が必要である。

あとがき

阪神高速道路の湊町～土佐堀間が昭和39年6月に供用されて、早や28年が経とうとしている。この間の交通量の増大、特に大型車交通量の増加には著しいものがあり、構造物の経年とともに、建

設時には予想しがたい損傷がコンクリート構造物に現れてきている。供用年数の長期化に伴って、ますます維持管理の難しさが増してくるであろうと思われるが、ここに紹介したデータが、今後構造物を維持管理していく上で、一助となれば幸いである。

謝 辞

本調査の実施にあたり、適切な指導、助言をいただいた京都大学工学部藤井学教授ならびに宮川豊章助教授に心から感謝いたします。

参考文献

- (1)岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性、鹿島建設技術研究所出版部、1963
- (2)環境庁大気保全局：酸性雨対策調査の中間結果概要、環境と測定技術、1987、vol.14
- (3)日本建築学会：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル、昭和58年2月
- (4)既設コンクリート構造物の材料特性調査業務（その1）・（その2）、阪神高速道路公団・社日本材料学会、平成2年3月・平成3年3月