

論文

[1110] UPV および反発度によるコンクリート構造物の欠陥と劣化の判別

尼崎 省二*1・L. A. Clark*2

1. はじめに

コンクリートの超音波パルス伝播速度 (UPV) は豆板、空洞などの欠陥あるいはアルカリ骨材反応 (ASR) などの劣化によって低下し、また構造体コンクリートは均質ではなく、部材の種類、配合、締固め方法等によって異なった分布をすることは周知のところである[1,2]。そのためUPVによるコンクリート構造物の診断にあたっては、UPVの低下原因はコンクリートの欠陥、劣化あるいは品質分布によるものかを明らかにする必要がある。またASRによる強度低下を反発度法によりの確に推定できるか否かも明らかになっていないのが現状である。

本研究は、実構造物レベルのRC柱を用いて、UPVおよび反発度によるコンクリート構造物の欠陥と劣化の判別方法を検討したもので、欠陥および劣化には、それぞれ、豆板およびASRを採用した。またASR柱については、約140°Cでの3時間の加熱と散水急冷を行ない、コンクリートの加熱がASR劣化に及ぼす影響も検討した。なお実験はBS規格にしたがって行なった。

2. 実験の概要

供試体は12インチ(305mm)の公称正方形断面を有する公称高さ12フィート(2438mm)のRC柱とし、設計基準立方体強度40 N/mm²の普通コンクリートおよびこれと同配合のASRコンクリートを用いて、二リフトで打設した。柱は各リフト毎に内部振動機と衝撃型わく振動機で締固めた普通コンクリート柱A1~A3とASR柱(ASR1、ASR2)とし、数層の締固めをしない部分を有する柱Bと全く締固めをしない柱Cも普通コンクリートで作製した。柱の配筋状態、UPVと反発度の測定位置、コア採取位置を図-1に示す。

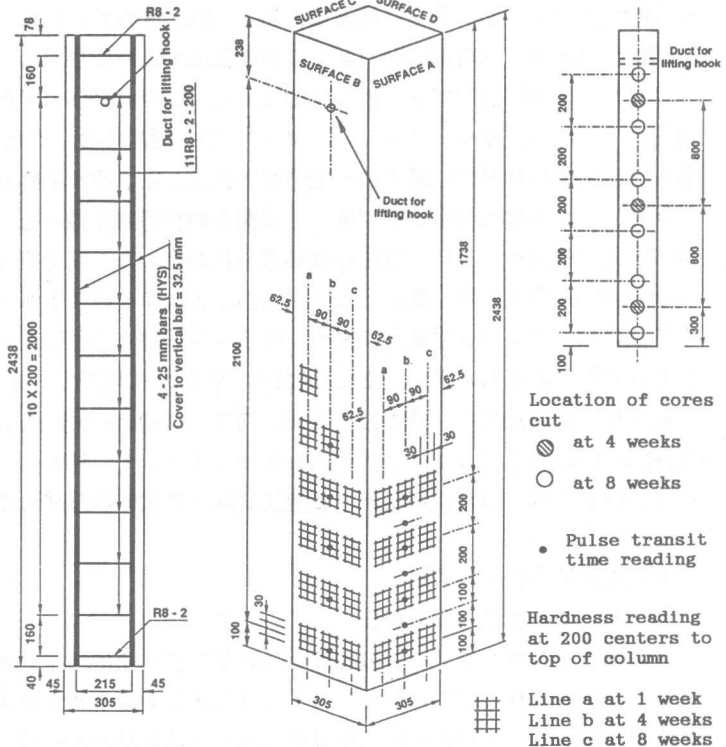


図-1 柱の配筋、UPVと反発度の測定位置、コア採取位置

*1 立命館大学教授 理工学部土木工学科、工博(正会員)

*2 Professor, The University of Birmingham, School of Civil Engineering, Ph.D

表-1 コンクリートの示方配合

コンクリートの種類	スランブの範囲 (mm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)							
					水 W	セメント C	細骨材 S	シリカ Si	粗骨材 G	NaOH	KOH	A E 剤 (ml)
普通	50±20	4±2	47.0	27.0	183	389	480	--	1298	--	--	389
ASR	50±20	4±2	47.0	27.0	183	389	213	267	1298	1.77	3.14	389

普通コンクリートの材料は、セメントが英国製普通ポルトランドセメント（比重3.15）、骨材がSutton Coldfield産の天然骨材である。細骨材（比重2.63、吸水率0.85%、FM2.17）は2.36 mm以下の細砂、粗骨材（比重2.62、吸水率0.55%、FM6.72）最大寸法は20 mm である。ASR 柱には等価Na₂O量1.00%のM I R Oセメントおよび骨材量の15%を非晶質の溶解性シリカ（粒径0.5~1.0 mm）を用い、KOHとNaOHでコンクリート中の等価アルカリ量を7 kg/m³に調整した。示方配合を表-1に示す。なおM I R Oセメントは、中庸熱セメントに近い強度発現性を有するポルトランドセメントで、英国産骨材のASR反応性試験を目的に製造されたものである。

各柱の打設と同時に100 mm立方体および100x100x500 mm角柱体をテーブル振動機を用いて作製した。非反応性柱は打設後4日間の型わく内でのポリエチレンシート養生とし、脱型後は温度15~20°C、相対湿度約40%の実験室に保存した。ASR柱は脱型後も10日間の湿布とポリエチレンシートによる養生と4日間の自然乾燥を繰り返した。立方体と角柱体の半数は材令1日後の水中養生（20±2°C）とし、残りは柱と同養生とした。また柱ASR1は工業用ファンヒータを用いて、柱頭部145~155°C、柱脚部128~138°Cの表面温度で3時間加熱し、加熱直後に散水急冷を行った。

UPVは印加電圧1000V、放電時間2 μs、入力感度250 μVの飽和増幅方式の装置と54 KHzの振動子で、反発度はシュミットハンマーN-34（製品番号 127794）で測定した。鋼材の影響を考慮して、柱のUPVは柱軸上の一定位置で測定した。非反応性柱の非破壊試験は材令1、4、8週とし、ASR柱は材令4週以降、2週間毎の自然乾燥最終日に行なった。立方体のUPVは供試体中央部の直角二方向、角柱体は軸方向に測定した。反発度は図-1に示す一箇所60x90 mmの部分で30 mm間隔の12点を測定し、平均値の±20%を越える値を除外して基準硬度を求めた。柱A1とCは材令4および8週に図-1に示す位置から水平方向の貫通コア（直径100 mm）を採取してUPVを測定した後、長さ約100および200 mmに切断し、乾燥後、UPVと強度を測定した。

ASR柱の膨張量は、高さ300、900、1500、2100 mmの水平方向と900、1500 mmの鉛直方向に、検長203 mmのダイヤルゲージ式ひずみゲージを用いて、柱と同一養生の角柱供試体の膨張量とともに、材令2週での基長測定後、2週間間隔の自然乾燥最終日に測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの特性

材令28日でのコンクリートの強度とUPVを表-2に示す。ASRコンクリートの強度が普通コンクリートよりも小さいのは、M I R Oセメントの中庸熱セメントに近い強度発現特性と等価アルカリ量調整にKOHとNaOHを添加したことが原因[3]と思われる。

普通コンクリート湿潤供試体のUPVは乾燥供試体よりも早く、また立方体のUPVは角柱軸方向よりも、湿潤供試体で1.7~2.9%、乾燥供試体で1.3~3.5%早い。この速度増は伝播時間の測定再現性[4]よりも大きく、伝播距離が大きく異なるUPVの直接比較は困難と思われる。100

mm立方体のUPVの変動係数(0.8~1.7%)が500 mm角柱体(0.1~0.9%)よりも大きいのは、伝播時間の最小測定単位 $0.1\mu s$ の差が立方体のUPVの差 0.03 km/s 、角柱体のUPVの差 0.01 km/s になることが原因と思われる。

3.2 非反応性柱のUPV

図-2に締固めの有無と材令、測定面、供試柱によるUPV分布の変化を示す。なお図-2(a)の立方体と角柱体のUPVは材令28日(空中養生)のものである。

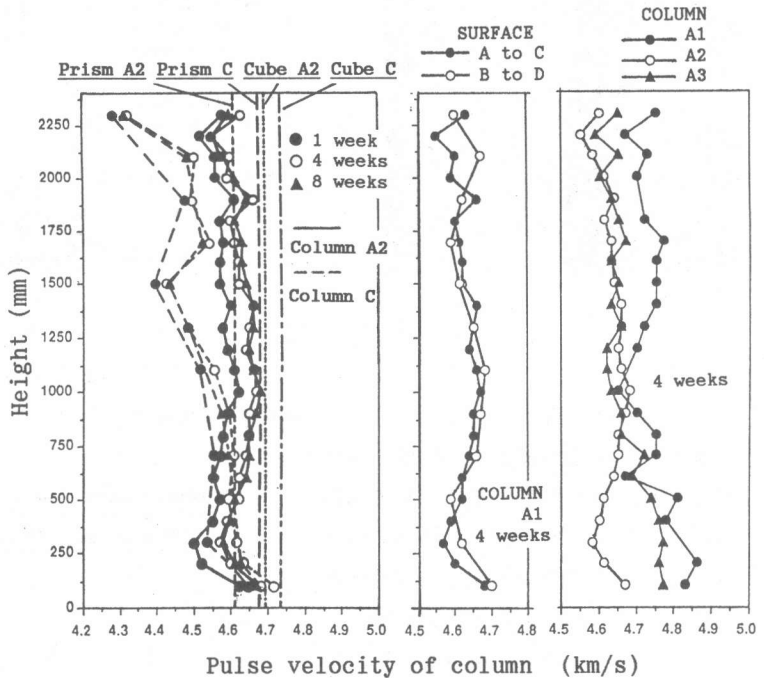
実質的に、柱A2のUPV(伝播距離約305 mm)は軸方向にほぼ一定であり、角柱体のUPVに近い。伝播距離の相違にかかわらず、柱と角柱体のUPVがほぼ同じなのは締固め方法の相違が原因であろう。一方柱C(締固めなし)のUPVは柱脚方向に増大し、柱脚でのUPVは角柱体よりも速い。柱CのUPVが柱脚方向に増大する原因はコンクリートの自重による締固め効果と思われる。またUPVは、締固めの有無にかかわらず、材令1週から4週まで増大し、4週から8週にはほとんど変化していない。普通コンクリート部材が一定の環境下であれば、締固め方法が異なっても、部材内のUPV分布は材令によって大きく変化しないと思われる。

一般的にRC柱の柱頭部20%あるいは柱頭から約300 mmの部分は低強度部分となり、この部分より下の部分ではほぼ様な強度になることが指摘されている[5]。しかしながら、柱Aは同じ締固め程度になるように作製したにもかかわらず、測定方向あるいは柱が変れば、UPVとその分布に差が生じ、また柱頭部に低強度領域も存在していない。コンクリートは本質的に異方性であり、また様なUPVを有するコンクリート部材の施工は困難であることを示唆していると思

表-2 硬化コンクリートの強度およびUPV(材令28日)

柱		A1	A2	A3	B	C	ASR1	ASR2
立方体 強度 (N/mm^2)	湿潤 供試体	56.6 (2.1)	51.5 (3.4)	56.5 (2.5)	54.2 (2.7)	54.5 (5.1)	35.9 (2.6)	35.9 (2.4)
	乾燥 供試体	55.3 (4.1)	54.3 (6.8)	58.0 (4.0)	50.6 (3.3)	52.1 (7.5)	36.7 (4.3)	37.8 (0.9)
	立方体 の UPV (km/s)	4.91 (0.8)	4.79 (1.1)	4.84 (1.3)	4.85 (1.7)	4.84 (1.1)	4.69 (0.8)	4.75 (1.3)
角柱体 の UPV (km/s)	湿潤 供試体	4.81 (0.5)	4.69 (0.9)	4.76 (0.2)	4.71 (0.1)	4.74 (0.4)	4.57 (0.3)	4.61 (0.4)
	乾燥 供試体	4.64 (0.9)	4.61 (0.4)	4.69 (0.4)	4.63 (0.2)	4.67 (0.6)	4.57 (0.1)	4.61 (0.4)

()内の値は変動係数(%)

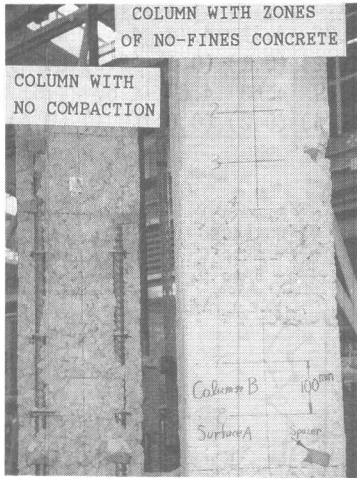


(a) 締固めと材令の影響 (b) 測定面 (c) 供試柱の影響

図-2 非反応性コンクリート柱のUPV分布およびその変化

われる。また柱Aには、部分的にその上と下のUPVより遅いUPVの部分が存在している。後述するように、柱のUPVとコア強度の分布には非常に良い相関関係があることから、UPVがその上と下よりも遅い部分は締固めが不十分であったと考えられる。

一般にUPVが3.70~4.60 km/sのコンクリートの品質は「良」と考えられている[6]が、図-3に示す柱BとCのように、多くの豆板があったり、鉄筋が露出していて、明らかに品質不良と考えられる場合でも、図-2(a)に示すように、UPVは4.2 km/s以上になっている。したがってコンクリートの品質評価には、UPVだけでなく、UPV分布も用いる必要があると思われる。



(a) 柱C (b) 柱B
図-3 柱BとCの表面状態

3.3 ASRコンクリート

図-4に柱ASR1と角柱体の膨張量と膨張方向に測定したUPVの相対的経時変化を示す。柱と角柱体の膨張は、材令4週程度から生じ、6週以降顕著になっている。角柱体の膨張は一定値に収斂する傾向にあるが、柱にはその傾向は認められない。角柱体と柱との体積/表面積比の大きな相違が原因と思われる。

また材令18週での加熱・急冷により膨張量が増大する傾向にあり、ASRを生じている構造物が加熱されると、ASR損傷がより大きくなると考えられる。

一方柱のUPVはいずれの位置でも材令4週まで増大し、コンクリートの膨張とともに低下しており、UPVの

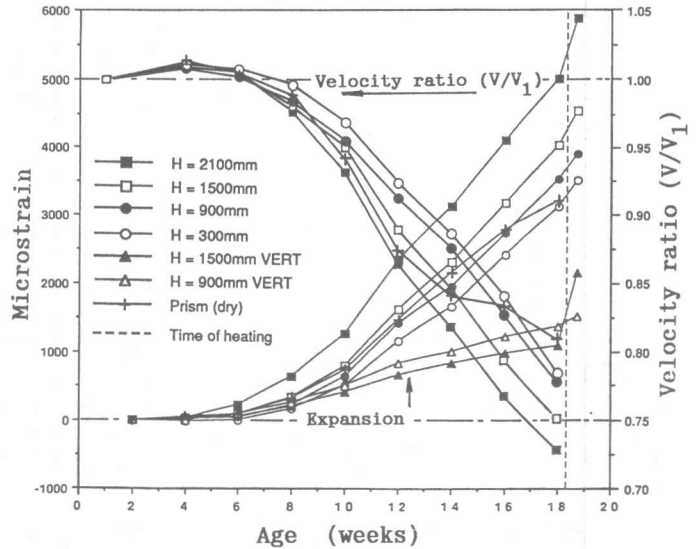


図-4 ASRコンクリート柱の膨張とUPVの経時変化

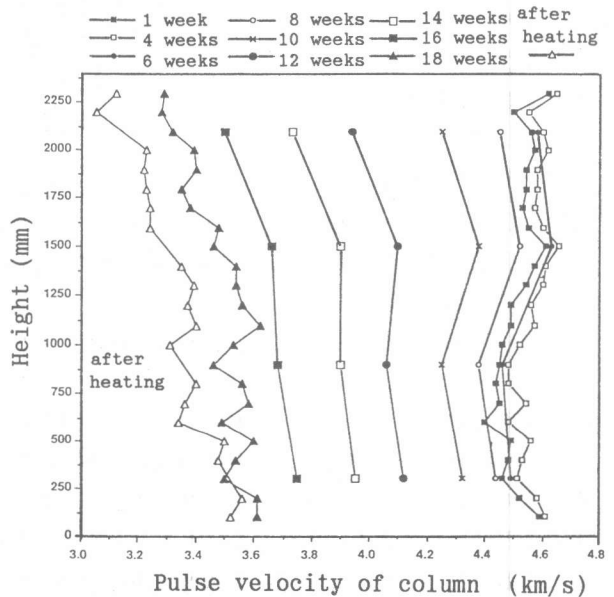


図-5 ASRコンクリート柱のUPV分布の経時変化

低下傾向はASR膨張量の傾向によく一致している。

図-5は柱ASR1でのUPV分布の経時変化である。材令8週までは、第2リフト部のUPVは締固めが不十分であったと思われる第1リフト部よりも遅くなっているが、UPVの分布形には時間的な大きな変化は生じていない。しかしASRによる劣化の進展とともに、UPV分布は大きく変化し、柱頭部のUPVが柱脚部よりも遅くなっている。

ASRによる膨張とともに、UPVの分布も変化していることから、UPVによる構造物の欠陥と劣化の判別には、UPV分布とその経時変化も測定する必要があると思われる。

3.4 反発度による評価について

図-6に材令による反発度分布の変化を示す。非反応性コンクリート柱A1の立方体強度は材令4週まで増大しているが、反発度の材令による顕著な変化なく、材令4週の反発度が材令1週よりも小さい場合も認められる。一方ASR柱は材令18週まで膨張を続け、さらに表-3に示すように18週推定立方体強度が4週立方体強度よりも小さく、柱脚方向に低下しているにもかかわらず、反発度は18週まで増大する傾向

にあるとともに、18週の反発度が柱脚方向に減少する傾向は認められない。したがって反発度によってASR損傷を受けたコンクリート強度を的確に推定することは困難であり、ASR損傷による強度低下はひび割れが主な原因と思われる。

表-3の立方体強度が材令18週まで増加しているのは、MIROセメントの強度発現性と立方体のASRひびわれが柱よりも少なかったことが原因と思われる。なお推定立方体強度はコア強度と載荷持の直径/高さ比rを用いて換算するBS 1881:Part 120式で求めた。

推定立方体強度 =

$$1.7 \text{コア強度} \times 2.5 / (1.5 + 1/r) \quad (1)$$

3.5 強度とUPVの関係

図-7に柱のUPVと推定立方体強度の分布を示す。コアの長さにかかわらず、UPVと強度の分

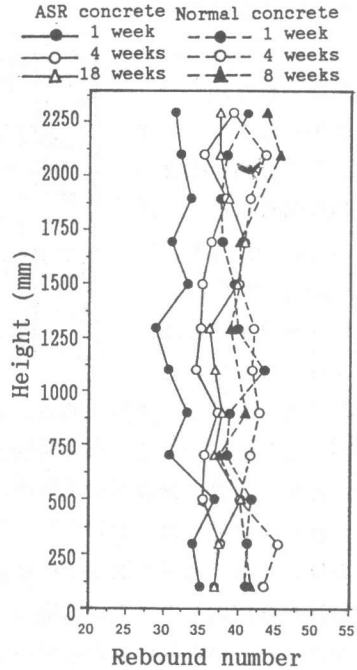


図-6 反発硬度の分布

表-3 ASRコンクリートの強度変化

供試体	100 mm 立方体			長さ100 mm コア			
				採取高さ (mm)			
				300	900	1500	2100
材令 (週)	1	4	18	1	8	(加熱前)	
強度(N/mm ²)	31.9	36.7	38.7	34.5	32.0	29.2	26.6

コア強度は推定立方体強度

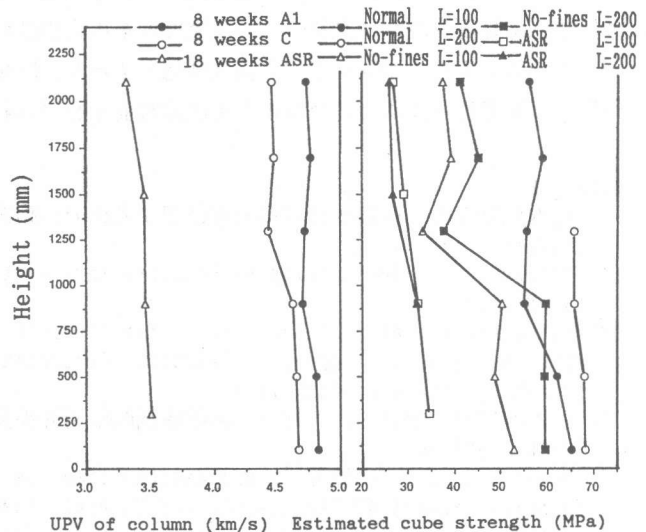


図-7 柱のUPVと推定立方体強度の変化

布形状に高い相関関係が認められる。例えば、長さ100 mmコアから求めたUPVと推定立方体強度の相関係数は柱A1が0.982 (n=5)、柱Cが0.973 (n=5)、柱ASR1が0.995 (n=3)である。

表-4 柱とコアのUPV (km/s) の変化

高さ (mm)	柱A1 (材令8週)				柱C (材令8週)				ASR柱 (材令18週)			
	柱	コアの長さ(mm)			柱	コアの長さ(mm)			柱	コアの長さ(mm)		
		305	200	100		305	200	100		305	200	100
100	4.83	4.86	4.91	4.94	4.67	4.72	4.78	--	--	--	--	
300	--	--	--	--	--	--	--	3.50	3.24	3.46	3.60	
500	4.81	4.85	4.90	4.86	4.65	4.65	4.75	--	--	--	--	
900	4.70	4.80	4.78	4.81	4.57	4.62	4.73	3.46	3.10	3.36	3.65	
1300	4.72	4.74	4.73	4.74	4.48	4.43	4.66	--	--	--	--	
1500	--	--	--	--	--	--	--	3.46	3.03	3.33	3.39	
1700	3.77	4.78	4.91	4.85	4.52	4.48	4.64	--	--	--	--	
2100	4.73	4.78	4.82	4.83	4.48	4.46	4.71	3.32	2.91	3.18	3.41	

ここで、nはデータ数である。したがって柱のUPV分布を求めれば、強度分布を推定することができると思われる。なお普通コンクリートの推定立方体強度はコア長さによって相違していることから、BS換算式の汎用性は少ないと思われる。

表-4に柱とコアのUPVを示す。普通コンクリート柱A、Cでは、305 mmコアのUPVが柱のUPVよりも速くなる傾向にあるが、ASR柱では、柱のUPVよりも遅くなっている。ASR柱から採取したコアが鉄筋による膨張拘束の解放により膨張したためであり、柱とコアではコンクリートの性状が異なっていると思われる。また柱AのコアのUPVは、コアの長さによってほとんど変化していないが、柱CとASR1のコアのUPVは、コアが短くなるほど増大している。コンクリートの品質が悪いほど、またASR劣化が大きいほど、超音波パルスの減衰は増大すると考えられるが、コアが短くなると、パルスの減衰が少なくなり、受振パルスの立上りが鋭くなるためUPVが早くなったと思われる。

4. まとめ

本実験で得られた結果をまとめると、以下のようなものである。

- (1) 締固め程度によりUPVとその分布は大きく変化する。締固め方法が同じであっても、UPVとその分布は変化し、同一部材内のUPVの変化はコア強度の変化によく一致する。
- (2) 非反応性高強度コンクリートの反発度とその分布は材令による大きな変化はない。ASRによってコンクリート強度は低下するが、反発度には大きな変化は生じない。
- (3) UPVだけでなくUPV分布とその経時変化を用いれば、欠陥と劣化の判別が可能である。

参考文献

- 1) 日本建築学会、構造体コンクリート強度に関する研究の動向と問題点、日本建築学会、pp.77-94、1977.11
- 2) Bungey, J. H.:The Testing of Concrete in Structures, Surrey University Press, pp.14-18, 1989
- 3) Takemura, K., et al.: Mechanical characteristics of reinforced concrete column affected by alkali aggregate reaction, Proceedings of 8th International Conference on AAR, pp.665-670, July 1989
- 4) 日本コンクリート工学協会、コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、pp.70-79、1992.3.
- 5) Davies, S. G. :Further investigations into the strength of concrete in structures, Technical Report 42.514, Cement and Concrete Association, Slough, 1976
- 6) Malhotra, V. M. :Testing hardened concrete: Nondestructive Methods, ACI Monograph No. 9, pp.86-89, 1976