Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，1992

論　文

[1079] 高強度コンクリートの耐衝撃摩耗特性に関する一考察

正会員　○松尾久幸　（日本コンクリート工業）
正会員　　丸山武彦　（日本コンクリート工業）
正会員　　村上俊夫　（四国総合研究所）
正会員　　豊島憲明　（東京電力信濃川電力所）

1．　まえがき

本研究は、小規模な越流式ダムの越流部や水たたき部の補修用に高強度コンクリートを適用する場合を想定し、高強度コンクリートの耐摩耗特性の解明を目的としたものである。摩耗特性を調査する試験方法として、掃流式、衝撃すりへり式および落下衝撃式などの摩耗試験方法の中から、衝撃すりへり試験と落下衝撃試験の２種類の試験を行い、主に衝撃を受ける場合の高強度コンクリートの摩耗特性について検討を行ったものである。

2．　実験概要

2．1　衝撃すりへり試験

摩耗試験に用いた試験装置は、奥田提案によるすりへり試験機と同等の装置で、図１に示すような摩耗試験機を用いた。摩耗方法は６個の供試体をドラム回転保持枠に取付け、内部にシルペップ（20φ－40mm21個約２kg）を投入後、注水しながらドラムを 90 rpm/分で回転させ、供試体表面に衝撃力を与えながらすりへり摩耗させる方法である。供試体は外周部と底部を厚さ 1.0 mmの鋼製型枠で補強し、その寸法は 15 x 30 x 6 cm（摩耗面積 420cm²）とした。試験は材令 28 日において、各配合３個の供試体で２配合づつの試験を行った。試験開始後、１，３および５時間ごとに供試体の重量を計り、重量差を摩耗量とした。また、摩耗重量から計算により平均摩耗深さを求めた。

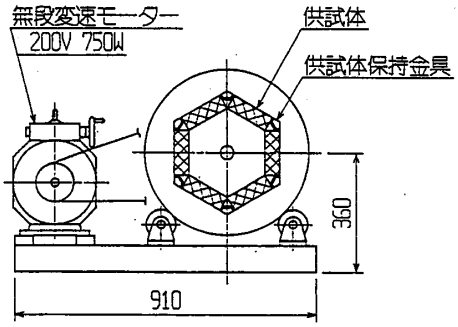
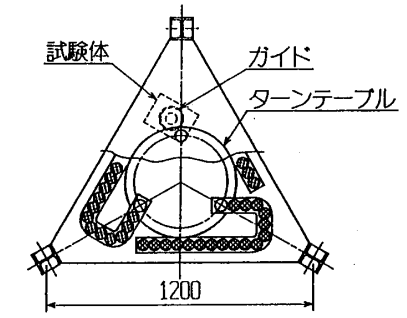


図１　衝撃すりへり試験機

2．2　落下衝撃試験

落下衝撃試験は岐阜大学・小柳研究室の落下試験装置を参考に、図２に示すような鋼球落下方式による落下衝撃試験機を製作し、それを用いた。この装置は直径51mm，重さ 536ｇの鋼球を、1.0 ｍの落下高より約10秒ごとに自由落下させ、３個の供試体を同時に試験できるもので、ガイドパイプの内径は鋼球がスムーズに落下できるよう 98 mmとした。供試体は 15 x 15 x 20 cmの角柱とし、打込面を横に、傾斜角 30 度で鋼製台にボルトで固定した。落下回数は 100，200，400



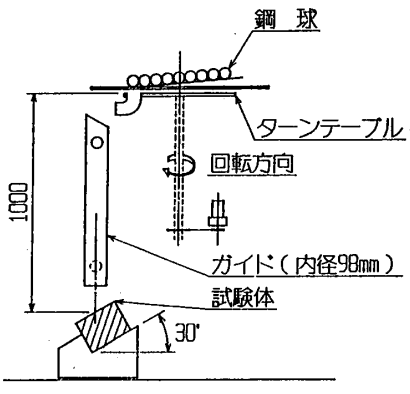


図２　　落下衝撃試験機

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

，600 および 800回とし、そのつど摩耗面積および摩耗容積（水の注入量による測定）を測定した。また、摩耗面積と摩耗容積から計算により平均摩耗深さを求めた。標準養生以外の供試体は試験２日前に水中に入れ、試験中は湿潤状態を保てる程度の散水を行った。

２．３　供試体種類

実験に使用したコンクリートは、標準養生コンクリート（N記号）、オートクレーブ養生コンクリート（A記号）およびそれぞれに鋼繊維を混入した繊維補強コンクリート（NFおよびAF記号）の３系列で、設計強度が 270kgf/㎠から 1700 kgf/㎠の範囲の 11 種類である。また、比較用に圧縮強度 1700 kgf/㎠相当の天然石を用いた。コンクリートの使用材料を表１に、コンクリートの示方配合および硬化コンクリートの強度試験結果を表２に示す。

３．　結果と考察

衝撃すりへり試験および落下衝撃試験の結果を表３に一覧表で示す。

表１　使用材料

使用材料	材料の名称	特　性
セメント	普通ポルトランドセメント	比重 3.16 ブレーン値 3200 ㎠/g
粗骨材	茨城県鬼怒川産玉砕	Gmax 20 ㎜ 比重 2.63 吸水率 1.47 % F M 7.04
細骨材	茨城県鬼怒川産川砂	比重 2.61 吸水率 2.28 % F M 2.75
混和材	シリカフューム	ノルウェー産 比重 2.20 比表面積 200,000 ㎠/g
	ステンレス繊維	繊維長 30 ㎜ 比重 7.7 ドグボーンタイプ
混和剤	高性能減水剤	比重 1.20 配合④～⑪
	ＡＥ減水剤	比重 1.065（４倍希釈液） 配合①～③
天然石	茨城県稲田産御影石	比重 2.64

表２コンクリートの示方配合と強度試験結果

配合		水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m³) 水 W	セメント C	細骨材	粗骨材	シリカフューム	ステンレス繊維	混和剤	スランプ (cm)	圧縮強度 kgf/㎠	引張強度 kgf/㎠	ヤング率 kgf/㎠ ×10⁵
①	N 270	65.0	45	164	252	853	1051	-	-	2.9	12.0	303	29.0	2.92
②	N 500	44.9	44	157	350	807	1035	-	-	3.5	12.0	529	36.8	3.22
③	NF 500	46.0	50	184	400	847	854	-	78.5	4.6	10.5	541	47.5	3.05
④	N 700	34.4	44	155	450	772	991	-	-	5.2	12.1	741	52.7	3.45
⑤	A 700	34.4	44	155	450	772	991	-	-	5.2	11.7	786	62.5	3.51
⑥	NF 700	34.4	44	155	450	772	991	-	78.5	6.0	12.2	730	56.2	3.50
⑦	N 1000	30.0	40	120	400	728	1100	80	-	12	17.0	1137	65.5	3.95
⑧	NF 1000	35.0	48	140	400	836	912	80	78.5	12	11.0	1055	67.6	3.84
⑨	A 1400	26.8	42	134	500	709	977	100	-	15	16.5	1405	70.3	4.12
⑩	AF 1500	29.0	46	145	500	719	851	150	78.5	17	17.0	1526	73.7	4.20
⑪	A 1700	24.0	42	120	500	692	956	150	-	18	16.0	1734	70.4	4.18
⑫	天然石										-	1678	293	4.44

表３　衝撃すりへり試験および落下衝撃試験の結果一覧表

配合		衝撃すりへり試験結果 摩耗量 (g) 1H	3H	5H	摩耗量の変化(g) 0H-1H	1H-3H	3H-5H	摩耗深さ (cm) 1H	3H	5H	落下衝撃試験結果 摩耗量 (cm³) 100回	200回	400回	600回	800回	摩耗深さ (cm) 100回	200回	400回	600回	800回
①	N 270	262	552	827	262	290	275	0.26	0.55	0.82	5.80	11.3	19.8	28.6	37.5	0.16	0.22	0.32	0.41	0.48
②	N 500	118	307	477	118	189	170	0.12	0.30	0.47	3.35	6.41	15.6	20.8	30.4	0.09	0.13	0.27	0.33	0.44
③	NF 500	141	351	535	141	210	184	0.14	0.35	0.53	4.86	8.20	15.8	22.6	30.3	0.15	0.21	0.30	0.37	0.46
④	N 700	96	279	439	96	183	160	0.10	0.28	0.44	3.74	7.54	15.4	21.3	26.3	0.15	0.20	0.30	0.34	0.39
⑤	A 700	123	297	446	123	174	149	0.12	0.29	0.44	3.70	6.74	12.6	18.2	22.3	0.13	0.18	0.25	0.32	0.36
⑥	NF 700	85	255	410	85	170	155	0.08	0.25	0.40	3.10	4.75	9.7	16.1	21.3	0.10	0.14	0.20	0.28	0.35
⑦	N 1000	47	150	257	47	103	107	0.05	0.15	0.25	3.06	4.98	9.3	13.4	17.3	0.11	0.13	0.21	0.27	0.30
⑧	NF 1000	72	208	328	72	136	120	0.07	0.20	0.32	2.55	6.25	11.9	16.1	20.5	0.10	0.17	0.27	0.32	0.36
⑨	A 1400	31	114	192	31	83	78	0.03	0.11	0.19	2.22	3.80	7.1	10.9	14.7	0.10	0.13	0.18	0.24	0.29
⑩	AF 1500	38	123	208	38	85	85	0.04	0.12	0.20	1.26	3.00	5.93	9.9	13.4	0.09	0.11	0.16	0.22	0.29
⑪	A 1700	24	88	158	24	64	70	0.02	0.09	0.15	0.88	3.21	7.02	10.1	13.2	0.07	0.13	0.17	0.22	0.27
⑫	天然石	12	83	151	12	71	68	0.01	0.07	0.14	0.25	1.22	4.16	7.8	11.5	0.06	0.10	0.14	0.20	0.27

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

3．1　衝撃すりへり試験

① コンクリート種別NおよびAについて摩耗時間と摩耗量（重量）の関係を図3に、摩耗時間の増分と摩耗量の関係を図4に示す。衝撃すりへり試験の摩耗形態は表層部の摩耗による比較的摩耗量の多い初期（処女）摩耗（1時間摩耗）とその後の時間と摩耗量が比例する定常摩耗とになった。定常摩耗範囲では高強度コンクリートほど直線的な関係が得られ、摩耗2時間ごとの平均摩耗増加量は 1400 kgf/㎠の場合図4から、 270kgf/㎠コンクリートの約30%、 700kgf/㎠コンクリートの約50%であった。また、圧縮強度が 1000 kgf/㎠を越える N1000 や A1700の摩耗量増分は一定になったが、圧縮強度 1000 kgf/㎠未満の N270 から A700 は1～3時間の摩耗量に対して、3～5時間の摩耗量増分は小さくなった。これは摩耗が進むにしたがい、粗骨材の露出に伴う摩耗抵抗の増加により摩耗量が減少することを示し、中低強度コンクリートほど早期にその影響を受けるものと考えられる。一方、初期摩耗量（0～1時間）は高強度コンクリートほど小さく、A1400 では1～3時間の摩耗量に対して50%以下となったが、 A700 では約70%であった。これは高強度コンクリートほどセメント硬化体の組織が緻密なため、初期の摩耗抵抗が大きいためと思われる。また、繊維補強コンクリート(NF,AF) についても同様な摩耗形態が得られた。

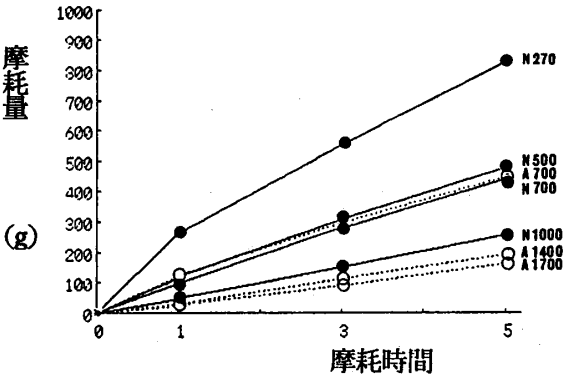


図3　摩耗時間と摩耗量の関係

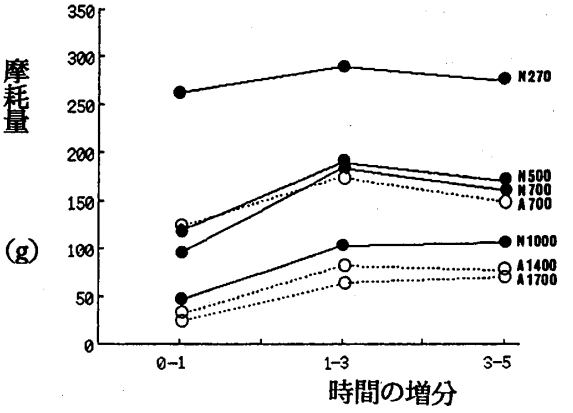


図4　摩耗時間の増分と摩耗量の関係

② 摩耗時間が5時間のときの圧縮強度と摩耗深さの関係を、コンクリートの種別(N,A,NF,AF) ごとに図5に示す。鋼繊維補強の効果に関して、 500kgf/㎠では無混入コンクリートに比べ摩耗深さは12%大きく、700 kgf/㎠では逆に 7%小さく、1000kgf/㎠では約20%大きく、1500 kgf/㎠でも摩耗深さは大きくなる傾向であった。このことは無混入コンクリートの回帰曲線と鋼繊維補強コンクリートの回帰曲線の比較によっても明らかで、全般的に鋼繊維の補強効果は現れず、むしろ、無混入と比べて、摩耗深さには増える傾向が見られた。しかし、差の検定で有意差がないこと、既往文献[1] にも有意差は見られないとの報告もあるので、さらにデータの蓄積が必要と考えられる。また、コンクリートの養生条件の違いによる有意差も判別できなかった。

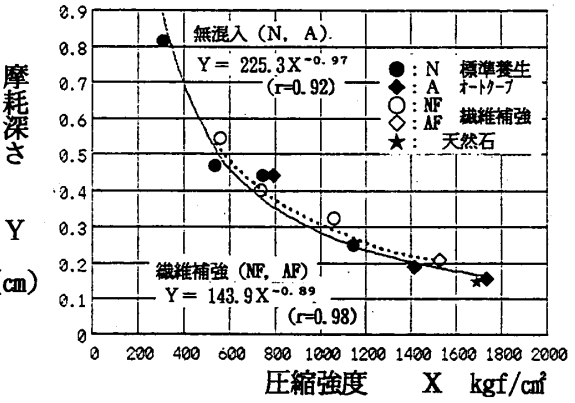


図5　圧縮強度と摩耗深さの関係

③ 摩耗時間1，3および5時間ごとの圧縮強度と摩耗深さの関係を回帰曲線の推移で図6に表し、相関係数の変化を図7に示す。摩耗時間ごとの圧縮強度と摩耗深さの関係は、いずれも90

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

%前後の相関が得られ、圧縮強度と摩耗深さの関係に強い相関関係のあることが判った。時間ごとの相関係数の変化は 0.87(1時間), 0.91（3時間）および 0.92(5時間）で、その差が小さいことも判った。以上のことから、衝撃すりへり試験がほぼ安定した試験方法であると考えられ、コンクリートの耐摩耗性を判断する場合、1時間程度の摩耗試験を行なえば、ある係数を乗ずることによって、5時間後の摩耗量が良い精度で推定しうるものと考えられる。

④ 天然御影石の摩耗量の実測値と回帰曲線から求めた推定摩耗量を比較すると、天然石の摩耗量は約20%小さく、鉱物の結晶組織や緻密性の相違が表れたものと思われる。しかし、同程度の弾性率を持つ素材の衝撃すりへり試験では圧縮強度と摩耗量の関係に強い相関性があるものと判断できる。

⑤ 5時間の衝撃すりへり試験による摩耗深さの範囲は0.14～0.82cmで、高強度になるほど摩耗深さは小さく、1700kgf/cm²の高強度コンクリートは同程度の圧縮強度をもつ天然御影石と、ほぼ同程度の摩耗深さ(0.15cm）となった。

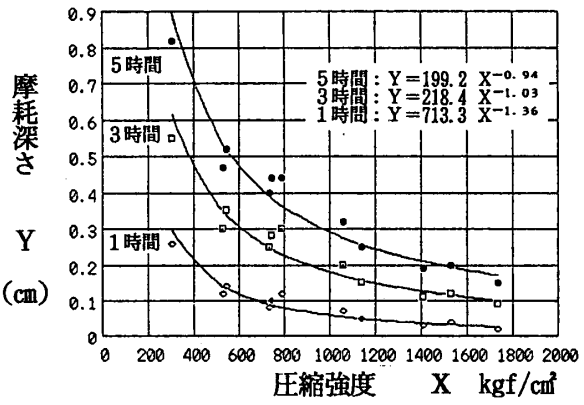


図6 圧縮強度と摩耗深さの回帰曲線推移

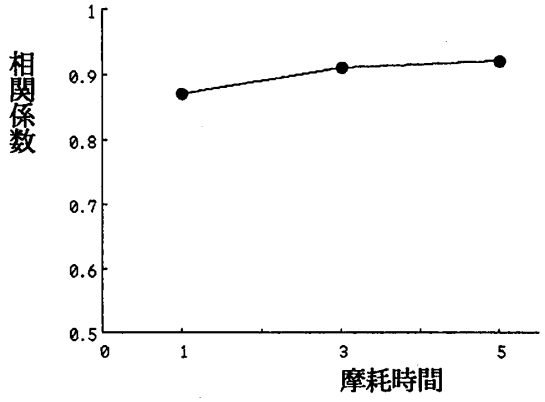


図7 摩耗時間と相関係数の関係

3．2 落下衝撃試験

① コンクリート種別NおよびAに関して、落下回数と摩耗量（容積）の関係を図8、落下回数の増分と摩耗量（容積）の関係を図9に示す。落下回数と摩耗量の関係は全般的にほぼ直線関係で、高強度コンクリートほど摩耗量は小さくなった。また、低強度コンクリート N270 は初期摩耗量（200 回まで）が大きいものの、それ以後は安定した摩耗量の増加を示した。

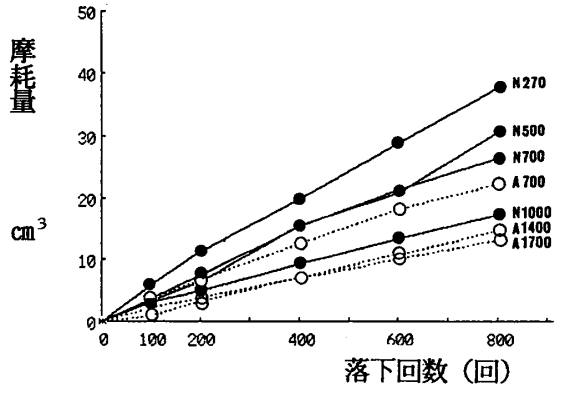


図8 落下回数と摩耗量の関係

② 落下回数 800回における圧縮強度と摩耗深さの関係を各配合系 (N, A, NF, AF)ごとに区別して図 10 に示す。鋼繊維の補強による耐摩耗性能の補強効果について、鋼繊維の混入されていないコンクリートと摩耗深さを比較した場合、図 10 に示されるように、同等かやや大きくなった。これは、衝撃すりへり試験と同様、鋼繊維補強による耐摩耗性能の向上は高強度コンクリートにおいて、期待できないように思われる。しかし、個々の配合ごとに差の検定を行ったところ有位差が得られなかったこと、また、中低強度コンクリートにおいて繊維補強の有効性を示す文献も有ることから、繊維補強効果についてはさらに検討を行う必要があると考えられる。

③ 落下回数（ 100 ~ 800回）ごとに圧縮強度と摩耗深さの関係について、回帰曲線と相関係

NII-Electronic Library Service

数の変化を求め、図 11 および図 12 に示す。図 11 から、落下衝撃試験による耐摩耗性能も圧縮強度と摩耗深さの回帰式で表すことができるものと思われる。しかし、図 12 の落下回数ごとの相関係数の変化を考察すると、100回では0.68、200 回では 0.71 で、400回以上では 0.86, 0.92 および 0.93 と変化し、落下回数が 400回を超えると90%前後の相関関係が得られた。これは、今回実施した試験方法の特徴を示し、落下回数が 200回以下では、装置のガイドパイプ径が大きいことによる落下位置のバラツキ、注水式による摩耗量の測定誤差および供試体のバラツキなどの影響によって、測定結果が分散しているものと思われる。また、落下回数が 400回を超えると安定した摩耗形態になって、摩耗量のバラツキが小さくなることを示すものと考えられる。すなわち、今回の試験装置を使用する場合、落下回数が 400回以上になれば、落下回数 800回における摩耗量の推定も可能と考えられる。しかし、推定方法を定めるにはデータ数が少ないため、より多くの実測値の蓄積が必要である。

④ 図 13 は落下回数 200回における圧縮強度と摩耗量（容積）の関係を散布図で示し、参考文献(3) における測定結果を合わせて示す。これによれば、他の文献によるデータを本試験によって得られた散布図に重ねても、バラツキの範囲内に納まるものと考えられ、小柳式落下試験装置と比較して、本装置の有効性は劣らないものと考えられる。

⑤ 落下回数が 600回を越えると、強度1700 kgf/cm²の天然石の摩耗量は同程度の圧縮強度を持つ高強度コンクリートの摩耗量と、ほぼ同程度の摩耗量となった。

⑥ 落下回数 800回における各供試体の摩耗深さは0.27～0.47cmの範囲で、高強度コンクリートほど耐衝撃摩耗性能にすぐれることがわかった。

3．3 両試験結果の比較

① 5時間の衝撃すりへり試験と 800回の落

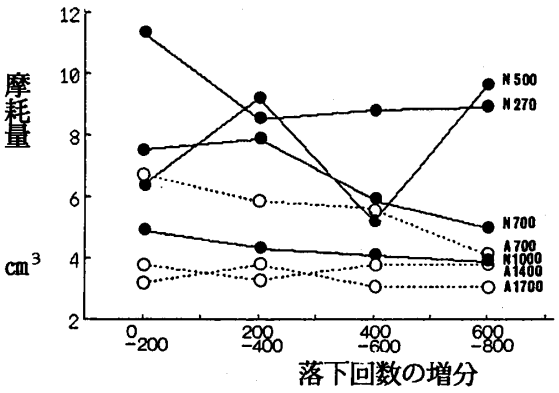


図9 落下回数の増分と摩耗量の関係

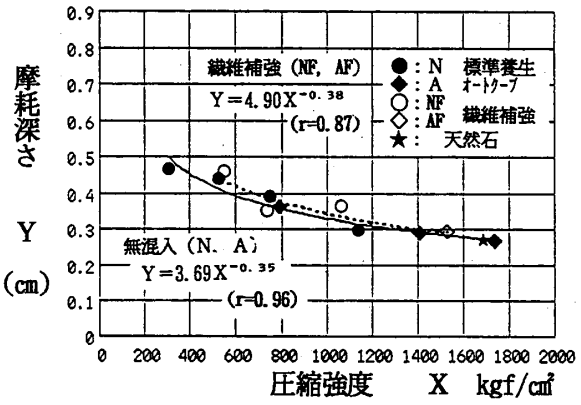


図 10 圧縮強度と摩耗深さの関係

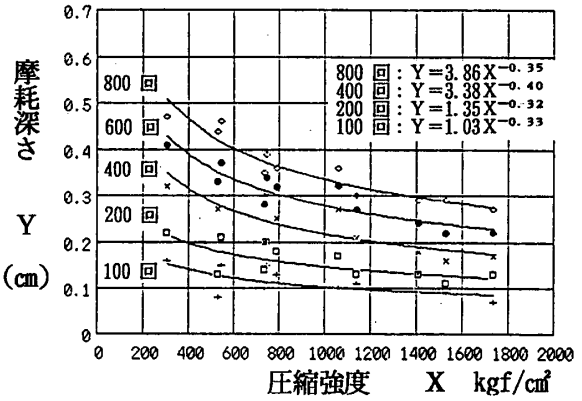


図 11 圧縮強度と摩耗深さの回帰曲線推移

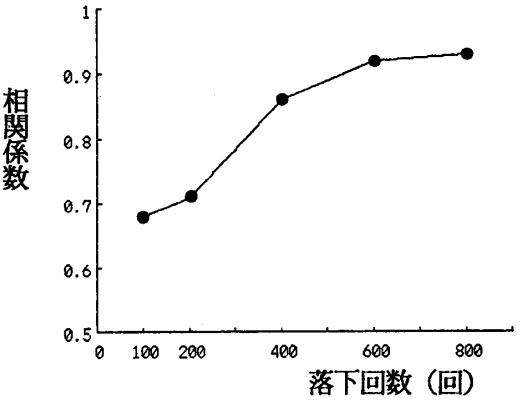


図 12 落下回数と相関係数の変化

NII-Electronic Library Service

下衝撃試験から得られた圧縮強度と摩耗深さについて、全供試体の試験結果を図 14 に示す。

いずれの衝撃試験もコンクリートの圧縮強度と摩耗量の関係に強い相関性が見られ、高強度コンクリートほど耐摩耗性能に優れていることがわかる。特に1700kgf/㎠のコンクリートの摩耗量は同程度の圧縮強度をもつ天然御影石の摩耗量とほぼ等しくなった。

② 衝撃すりへり試験は圧縮強度の影響が摩耗量の差に顕著な形態で現れ、逆に落下衝撃試験では圧縮強度の違いが摩耗量の差に、さほど現れなかった。すなわち、衝撃すりへり試験では A1700とN270の圧縮強度比が 5.7倍であるのに対し、摩耗量比は 5.9倍である。しかるに落下衝撃試験では1.74倍であった。このことは試験方法の違いや摩耗形態および供試体形状の違いを反映しているものと考えられる。

③ 天然石を除く全供試体（養生条件の違いや鋼繊維の混入有無など、因子の相違を考慮しない場合）の圧縮強度と摩耗深さの関係を下記に示す。

衝撃すりへり試験（5 hr） $Y = 199.2\ X^{-0.94}$

落下衝撃試験　（800 回） $Y = 3.86\ X^{-0.35}$

Y：摩耗深さ（cm），X：圧縮強度

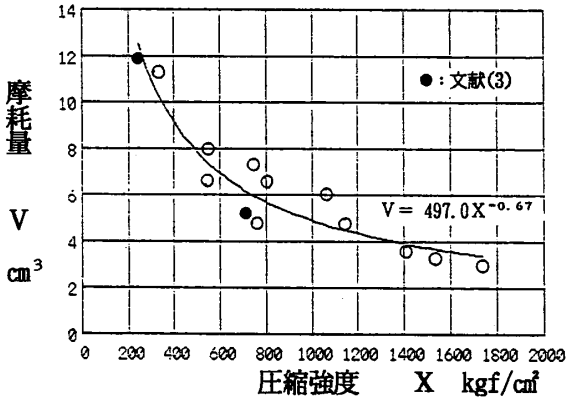


図 13　圧縮強度と摩耗量の関係
（落下回数 200回）

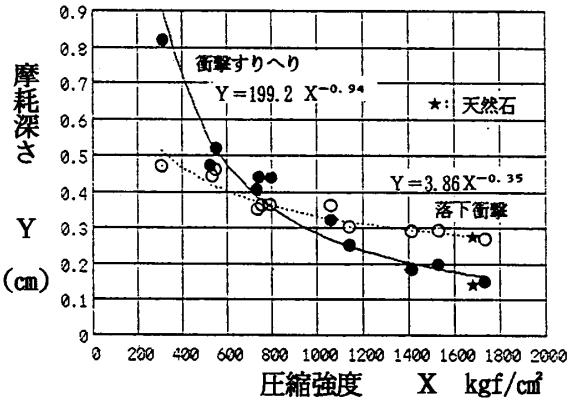


図 14　圧縮強度と摩耗深さの関係

4．まとめ

① 衝撃すりへり試験の摩耗形態は、初期摩耗と定常摩耗とに区別でき、定常摩耗は摩耗時間と摩耗量がほぼ比例する。摩耗形態が均一な衝撃すりへり試験では、１時間の摩耗試験を行えば５時間後の摩耗量の推定が可能である。② 高強度コンクリートは衝撃すりへりおよび落下衝撃の２種の衝撃摩耗に対して有効で、高強度になるほど耐衝撃摩耗性能は向上する。③ 衝撃摩耗に対する鋼繊維の混入による補強効果は、1000kgf/㎠以上の高強度コンクリートでも、必ずしも有効とは言えない。④ 衝撃すりへり試験と落下衝撃試験の比較では摩耗量に差がみられ、試験方法の違いによる摩耗特性を明らかにできた。⑤ 今後はダム堤体に要求される摩耗特性と摩耗試験結果との適合性に関するデータの蓄積が必要と思われる。本研究は徳島大学・河野清教授ならびに岐阜大学・小柳治教授のご指導をいただきました。紙面をもちまして謝意を表します。

5．参考文献

(1)杉田他「小水力ダムコンクリートの耐摩耗性評価に関する一考察」1986コンクリート工学年次論文報告集
(2)小柳他「コンクリートの衝撃摩耗について」1987セメント技術年報
(3)小柳他「コンクリートの耐衝撃摩耗特性に及ぼす各種要因の影響」1988コンクリート工学年次論文報告集
(4)小柳他「コンクリートの衝撃摩耗におよぼす乾湿条件および衝撃角度について」1989コンクリート工学年次論文報告集
(5)豊福俊英「炭素繊維補強コンクリートの衝撃・摺流作用に対する摩耗特性」1990コンクリート工学年次論文報告集

NII-Electronic Library Service