

異なる急速引張試験法によるコンクリートの動的引張強度特性の評価

Evaluation of dynamic tensile properties of concrete by different rapid loading tensile tests

江田 智*, 別府万寿博**, 大野友則***, 佐藤紘志****

Satoshi EDA, Masuhiro BEPPU, Tomonori OHNO and Hiroshi SATOH

* 防衛大学校理工学研究科前期課程学生 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

** 博(工) 防衛大学校助手 システム工学群建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*** 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**** 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

To establish the protective design of concrete structures against impact and/or impulsive load, the dynamic tensile and compressive properties of concrete should be studied. However, the influence of compressive strength and gravel size on dynamic tensile strength of concrete has not been cleared yet. This study is to investigate the effects of compressive strength and gravel size on the dynamic tensile strength of concrete. Thus the different two of rapid loading dynamic tests were executed. From test results, the correlation with direct tensile test and splitting tensile test are examined under rapid speed loading.

Key Words: compressive test, direct tensile test, splitting tensile test, strain-rate effect

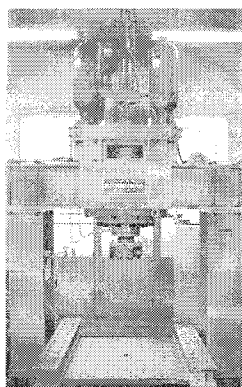
キーワード：圧縮試験，直接一軸引張試験，割裂引張試験，ひずみ速度効果

1. はじめに

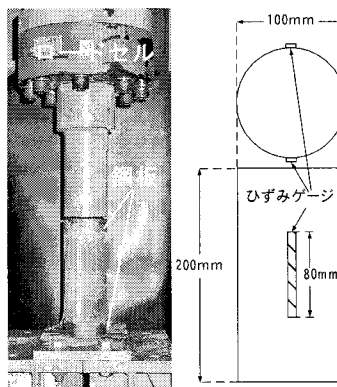
鉄筋コンクリート構造物が衝撃荷重を受けると、ひび割れ、付着・せん断破壊、裏面剥離などの破壊現象が生じることがある¹⁾。これらの現象を考える上で重要な因子として、コンクリートの引張および圧縮特性が挙げられる。これらの現象を解明するためには、ひずみ速度がコンクリートの引張・圧縮強度特性に及ぼす影響を十分に把握することが重要であると考えられる。動的荷重を受けるコンクリートの引張・圧縮強度特性に関する研究には次のようなものがある。例えば、白井ら²⁾は水セメント比に着目し、圧縮試験および直接一軸引張試験を行って水セメント比がひずみ速度効果に及ぼす影響を明らかにしている。また、藤掛らも急速圧縮・引張強度試験^{3), 4)}を行い、圧縮・引張強度に対するひずみ速度効果の評価式を示している。また著者ら⁵⁾は、引張強度試験法の中でも比較的容易に行うことのできる急速割裂引張試験を行い、①急速直接一軸引張試験による引張強度（以後、直接引張強度という）と急速割裂引張試験による引張強度（以後、割裂強度という）を静的圧縮強度で無次元化したものは、ひずみ速度によらずほぼ一致する、②割裂強度の増加率（あるひずみ速度における割裂強度を静的

割裂強度で除したもの）は、藤掛らが提案した直接引張強度の増加率評価式を用いて評価できる、③割裂引張試験において加圧板と供試体の接触幅が異なるとひび割れの発生や進展に違いがみられる、ことなどを明らかにした。しかしながら、著者らも含めて、既往の研究では静的圧縮強度、配合および供試体寸法など材料の強度特性に関する試験条件が統一されていない。したがって、これらが急速載荷時における圧縮強度特性と引張強度特性の関係や直接一軸引張試験と割裂引張試験による引張強度の相関関係に与える影響は明らかではない。また、試験装置も各研究機関で異なっているため、それぞれの試験結果を直接比較することは難しい。

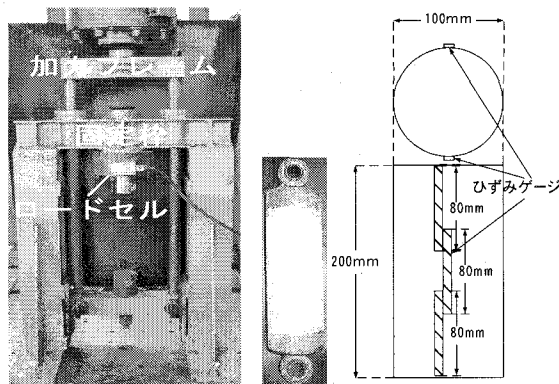
本研究は、試験に用いる急速載荷試験装置や供試体寸法を同一としたうえで、①圧縮強度特性と引張強度特性の関係、②急速直接一軸引張試験と急速割裂引張試験による引張強度の差異、を検討するために配合の異なる4種類の供試体を用いて、急速圧縮試験、急速直接一軸引張試験および急速割裂引張試験を行ったものである。



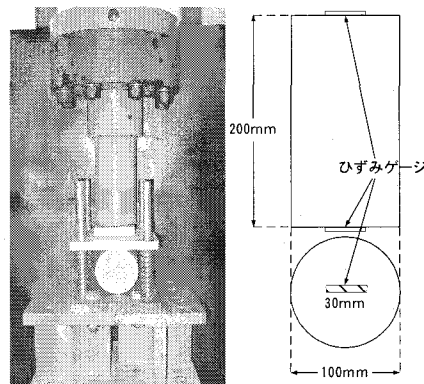
(a) 急速載荷装置



(b) 圧縮試験



(c) 直接一軸引張試験



(d) 割裂引張試験

写真-1 試験の概要

2. 試験の概要

2.1 試験装置

試験は、写真-1 (a) に示す最大載荷力 980kN、最大載荷速度 4 m/sec の能力を有するサーボ制御式急速載荷装置を用いた。本載荷装置は、本体フレーム、980kN 載荷ジャッキ、制御用サーボバルブ、アキュムレータ、油圧ポンプユニットおよび載荷制御装置等から構成されている。載荷ジャッキは、メインアクチュエータ、バランスアクチュエータおよび加圧制御用アクチュエータの3つから構成されている。この載荷装置のテストベッド上に圧縮試験、直接一軸引張試験および割裂引張試験用の治具を設置して試験を行った。

(1) 急速圧縮試験の概要

急速圧縮試験は、写真-1 (a), (b) に示すように、急速載荷装置のロードセル（最大荷重 980kN、最大応答周波数 11kHz、日本特殊測器製）に直径 100mm の載荷棒を取付け、供試体の上下に直径 100mm、厚さ 36mm の鋼板を挟んで試験を行った。端面と載荷面の摩擦の影響は、高さ/直径が 2 以上であれば小さいと報告されているので^{6), 7)}、JIS A 1108 に準じ、端面摩擦はそのままの状態で行った。計測項目は荷重およびひずみである。荷重は供試体上部のロードセルで計測した。ひずみは 80mm のひずみゲージ（ゲージ率 $119.6 \pm 0.4 \Omega$ 、共和電業製）を用い、供試体中央を対面 2 箇所計測した。

(2) 急速直接一軸引張試験の概要

急速直接一軸引張試験は、写真-1 (c) に示すように、急速載荷装置に直接一軸引張載荷装置を設置して行った。この直接一軸引張載荷装置は、加力フレームを下方方向に移動させることで、固定枠のロードセル（最大荷重 98kN、最大応答周波数 11kHz、日本特殊測器製）に取り付けた円柱供試体に引張力を加える仕組みになっている。この直接一軸引張載荷装置にベアリング付アイボルトを介して供試体を取付けた。供試体に力を伝える鋼板（直径：100mm、厚さ：36mm）はエポキシ系接着剤で固定した。計測項目は荷重およびひずみである。荷重は固定枠のロードセルで計測した。ひずみは片面に 80mm のゲージ（ゲージ率 $119.6 \pm 0.4 \Omega$ 、共和電業製）3 枚を貼付し、対面側にも同様にひずみゲージを貼付した。

(3) 急速割裂引張試験の概要

急速割裂引張試験は、写真-1 (d) に示す割裂引張試験用治具を用いて行った。なお、本試験では JIS A 1113 に準じ、寸法 200mm×400mm×20mm の鋼製加圧板を直接、供試体に接触させて荷重を加えた。計測項目は荷重およびひずみで、荷重は急速圧縮試験と同様に供試体上部のロードセルで計測した。ひずみは 30mm（ゲージ率 $121.3 \pm 1.0 \Omega$ 、共和電業製）のゲージで載荷軸直交方向のひずみを対面 2 箇所計測した。また、破壊の様子を高速度ビデオ（1 秒間 4000 コマ）で撮影した。

表-1 コンクリートの配合

配合	粗骨材 最大寸 法 (mm)	スラ ンプ (c m)	空気 量 (%)	水セメン ト比 W/C (%)	細骨材 率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						水 W	セメン ト C	SF* ¹	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤	エア 調整剤
G 10-W66	10	18.0	4.0	66	47.6	185	280		915	981	0.95	
G 10-W57	10	15.0	4.5	57	55.0	213	373		896	849	1.26	
G 20-W57	20	15.5	4.3	57	45.0	187	328		795	1029	1.11	
G 10-W21	10	61.5* ²	2.0	21	45.0	141	656	73	678	795	0.85* ³	0.044

*¹シリカフューム *²スランプフロー (cm) *³高性能 AE 減水剤

表-2 試験のパラメータ

配合	試験法	荷重速度			
		静 的	低 速	中 速	高 速
G10-W66	急速圧縮試験	3	0	3	3
	急速直接一軸引張試験	3	3	3	3
	急速割裂引張試験	3	3	3	3
G10-W57	急速圧縮試験	3	3	3	3
	急速直接一軸引張試験	3	3	3	3
	急速割裂引張試験	3	3	3	3
G20-W57	急速圧縮試験	3	3	3	3
	急速直接一軸引張試験	3	6	3	3
	急速割裂引張試験	3	3	3	3
G10-W21	急速圧縮試験	3	3	3	3
	急速直接一軸引張試験	3	3	3	3
	急速割裂引張試験	3	3	3	3

※表中の数字は供試体数

2.2 供試体

本試験には直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を用いている。これは、①この寸法の円柱供試体が一般的によく用いられていること、②圧縮試験において、高さが直径の 2 倍以上であれば端面摩擦の影響が小さくなること⁶⁾、③藤掛ら⁴⁾が行った直接一軸引張試験によると、供試体の高さ寸法が直径の 2 倍以上になると強度はほぼ一定になること、④著者ら⁵⁾が行った割裂引張試験（直径 50mm～150mm、静的圧縮強度 38.5MPa）の結果から、直径 100mm 以上になると強度がほぼ一定になること、から決定した。

コンクリートには、普通ポルトランドセメントを使用した。コンクリートの配合を表-1 に示す。G10-W66 は、水セメント比を最も大きくし、他の配合に比べ貧配合とした。G10-W57 と G20-W57 は、設計圧縮強度を同じにするため水セメント比を一定としたうえで、粗骨材寸法を 10mm および 20mm と変えた。ここで、G10-W66、G10-W57 および G20-W57 の粗骨材は同じ硬質砂岩碎石を用いている。G10-W21 は水セメント比を 21% まで抑え、シリカフュームを加えて高強度コンクリートとし、粗骨材には川砂利を用いている。これは一般に骨材粒形が丸みをもつほどコンクリートのワーカビリティがよくなり、水の使用量を少なくできるとされているため⁶⁾である。試験体は打設後 1 日で脱型、水中養生を 14 日間行い、打設から 18 日目、19 日目に両端を研磨し端面を平坦に仕上げた。水中養生終了後、実験室内にて気中養生を 14 日間以上行った。

2.3 試験パラメータ

試験パラメータを表-2 に示す。試験パラメータは、各配合に対して、強度試験法（3 種類（急速圧縮試験、急速直接一軸引張試験および急速割裂引張試験））、および荷重速度（4 段階（静的、低速、中速および高速））とした。全ての試験のひずみ速度が低速、中速および高速でそれぞれ 1.0×10^{-3} 、 1.0×10^{-2} および 1.0×10^{-1} (1/sec) 程度になるように各試験における荷重速度を調整した。試験体数は、同一の条件で 3 体ずつ（一部の急速直接一軸引張試験は 6 体）、合計 144 体である。

3. 試験結果および考察

3.1 ひずみ速度および増加率の定義

コンクリートの速度効果に関する指標として、一般にひずみ速度あるいは応力速度⁹⁾が用いられるが、ここでは以下に述べるひずみ速度を用いた。図-1 に、各試験で得られた代表的な応力とひずみの時刻歴を示す。これより、試験法によらず、荷重初期における応力勾配は緩やかで、強度の 1/3 点から強度点まで直線的に増加する傾向がある。これは、本試験に用いた急速荷重装置の性能によるもので、荷重初期において、設定した荷重速度に達するまでにやや時間を要するためであると考えられる。そこで、図-1 に示すように強度の 1/3 点から強度点までのひずみの勾配をひずみ速度と定義した。また急速直接一軸引張試験では、破断面においてひずみが局所化するため、破断面近傍のひずみは非常に大きな値を示すことが報告されている⁹⁾。よって、破断面以外のひずみの値を用いてひずみ速度を算出した。

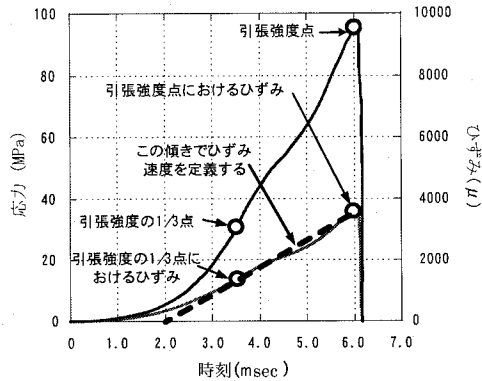
強度増加率は、各試験法における静的強度に対する動的強度の相対的な指標で、あるひずみ速度における強度を静的強度で除したものと定義されている。同様に弾性係数増加率は、圧縮試験および直接一軸引張試験において、あるひずみ速度における弾性係数を静的弾性係数で除したものと定義されている。

3.2 静的試験結果

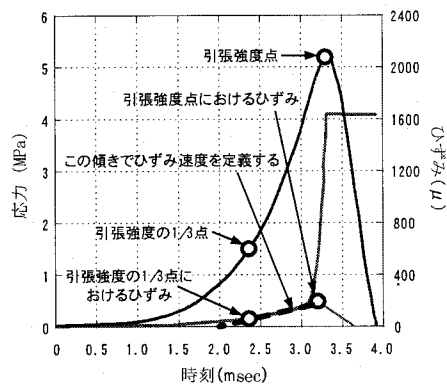
各試験における静的強度を表-3 に示す。圧縮強度は、貧配合の G10-W66 が最も小さく 27.03MPa で、水セメント比を同じにした G10-W57、G20-W57 では、ほぼ同じでそれぞれ 29.21MPa、29.93MPa であった。また、高強度コンクリートの G10-W21 の圧縮強度は 69.07MPa であった。静的圧縮試験の破壊の様子を写真

表-3 各試験における静的強度

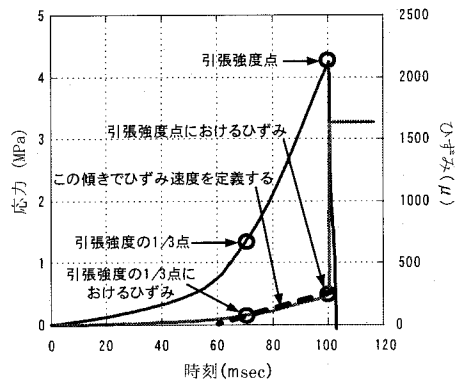
配合	圧縮強度	直接引張強度	割裂引張強度	f'_{td}/f'_c (%)	f'_{ts}/f'_c (%)	f'_{ts}/f'_{td} (%)
	f'_c (MPa)	f'_{td} (MPa)	f'_{ts} (MPa)			
G10-W66	27.03	2.22	2.29	8.2	8.5	103.2
G10-W57	29.21	3.07	2.25	10.5	7.7	73.3
G20-W57	29.93	3.30	2.97	11.0	9.9	90.0
G10-W21	69.07	3.86	4.08	5.6	5.9	105.6



(a) 急速圧縮試験

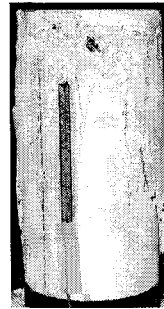


(b) 急速直接一軸引張試験



(c) 急速割裂引張試験

図-1 ひずみ速度の定義



(a) G10-W66



(b) G10-W57

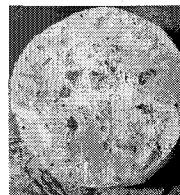


(c) G20-W57

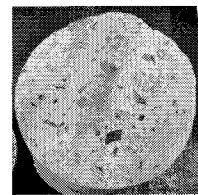


(d) G10-W21

写真-2 圧縮試験後の供試体（静的載荷）



(a) G10-W66



(b) G20-W57

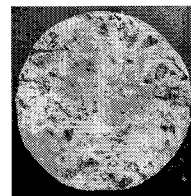
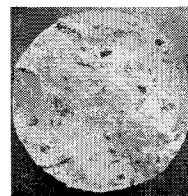
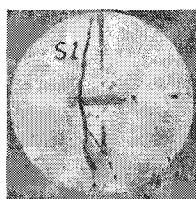


写真-3 直接一軸引張試験における破断面の様子（静的載荷）

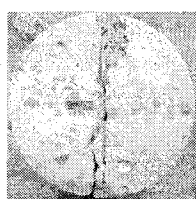
-2 に示す。これを見ると、普通強度の供試体（G10-W66, G10-W57 および G20-W57）の破壊は載荷軸方向のひび割れと斜めひび割れの複合破壊である。一方、高強度コンクリート G10-W21 は、脆性的な破壊を示していた。

直接引張強度は普通強度シリーズの場合、圧縮強度の

10%程度であるのに対して、高強度コンクリートの G10-W21 は 5.6% と相対的に小さい値となっている。これは、普通強度と高強度コンクリートの内部構造の違いによって、圧縮・引張強度の発現メカニズムが異なるためと考えられる。また、G10-W66 と G10-W57, G20-W57 を比較すると、静的圧縮強度はほぼ等しいにもかかわらず



(a) G10-W66



(b) G10-W57

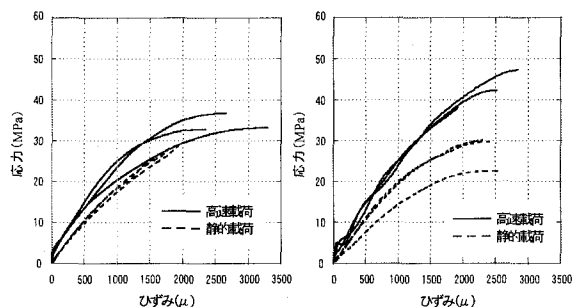


(c) G20-W57

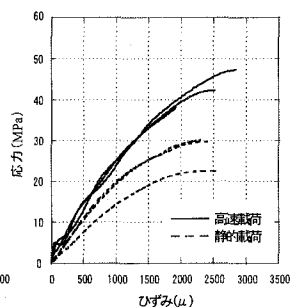


(d) G10-W21

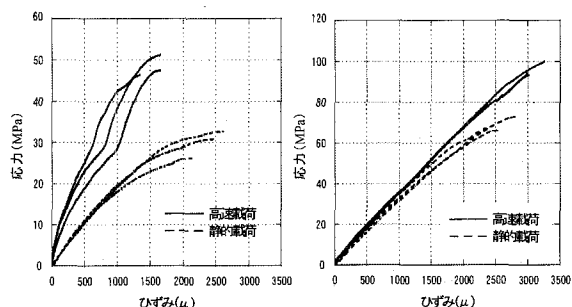
写真-4 割裂引張試験における破壊の様子（静的載荷）



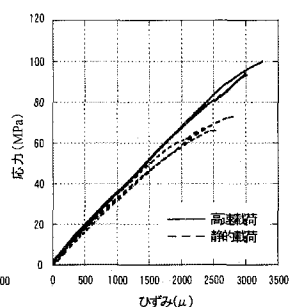
(a) G10-W66



(b) G10-W57



(c) G20-W57



(d) G10-W21

図-2 圧縮試験による応力～ひずみ関係

らずG10-W66の静的直接引張強度がやや小さい。これはG10-W66が他の配合に比べ水セメント比が大きいので、モルタルマトリクスの強度や付着力が小さく、引張強度が効果的に発現されにくいと考えられる。ちなみに、写真-3に示す直接一軸引張試験後の供試体破断面より、G20-W57は両側の破断面に均等に粗骨材が分散しているが、G10-W66は片側の破断面のみに多くの粗骨材がみられ、粗骨材とモルタルの界面での破壊が多かった。G10-W57、G10-W21もG20-W57と同様の破断面を示していた。

割裂強度と直接引張強度を比較すると、G10-W66およびG10-W21では両者はほぼ一致する。しかし、G10-W57、G20-W57における割裂強度は、直接引張強度よりも小さいことがわかる。これは、割裂引張試験は2軸応力状態下での破壊であることが影響していると考えられ

る。写真-4は静的載荷時のひび割れを示しているが、G20-W57およびG10-W57は接触部に複雑なひび割れが形成され、特にG10-W57は上側接触部において圧壊している。割裂試験による引張強度の評価式はコンクリートを弾性体と仮定し、線載荷であることを前提としているため、載荷部が破壊するとこの仮定は成り立たなくなる。町田¹⁰⁾はこの載荷部の状態が供試体内の圧縮応力分布や割裂強度に影響を与えること、圧縮強度に対し引張強度が小さいほど直接引張強度と割裂強度は一致することを報告している。一方、G10-W21は載荷軸の真下においてひび割れが形成され、他の配合に比べてひび割れが直線的に進展した。これは、高強度コンクリートであるG10-W21の構造が緻密で均一であったため理想的な弾性体に近く、さらに、圧縮強度に対して引張強度がかなり小さいため、直接引張強度と割裂強度の差異も小さくなったためと考えられる。

3.3 急速試験結果

(1) 急速圧縮強度試験

急速圧縮試験による破壊状況も写真-2に示す静的試験結果と同様に引張-せん断複合破壊であった。この破壊は配合や載荷速度によらず、ほぼ全ての供試体でみられた。次に、応力～ひずみ関係を静的試験結果と比較して図-2に示す。これより、全体的に高速載荷の方が静的載荷に比べ直線的な挙動を示し、初期勾配が急であることがわかる。高強度であるG10-W21は、静的載荷、高速載荷ともに、他の配合に比べ強度点付近においても直線的で脆的な挙動を示している。図-3に粗骨材寸法を変化させたG10-W57とG20-W57の試験結果を示す。これをみると、静的載荷はほぼ同様の曲線を示す。しかし、高速載荷の場合は、G20-W57の初期勾配が極端に大きく、圧縮強度点におけるひずみも小さいことがわかる。G10-W57とG20-W57は、水セメント比を同じにして、粗骨材寸法を変えたために、G10-W57に比べG20-W57の方が20%も粗骨材が多くなっている。一般に粗骨材の弾性係数はモルタルマトリクスに比べ2～7倍程度大きいので、粗骨材の分量が多い場合は、粗骨材のひずみ速度効果が顕著に現れる可能性もある。したがって、所望の強度を発現させるために配合設計を行うが、粗骨材寸法を変化させると、強度は同じでも動的力学特性に大きな変化を生ずる可能性がある。

次に、圧縮強度および圧縮強度増加率とひずみ速度の関係を図-4に示す。圧縮強度はひずみ速度の増大とともに増加しており、ひずみ速度効果が明確にみられる。また、図-4(b)より、強度増加率におよぼす静的圧縮強度や配合の影響はあまりないようである。図には藤掛ら³⁾(水セメント比60%、静的圧縮強度45.6MPa)の評価式も示している。これより、圧縮強度や粗骨材寸法によらず、藤掛らの式とひずみ速度に対する強度増加率の傾向は一致していることがわかる。

次に弾性係数とひずみ速度の関係を図-5に示す。ここで本文中の弾性係数は、1/3割線弾性係数を示している。

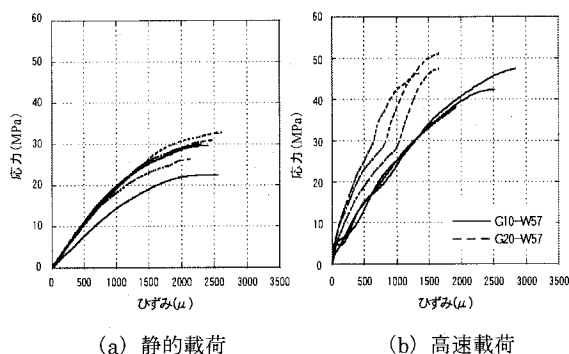
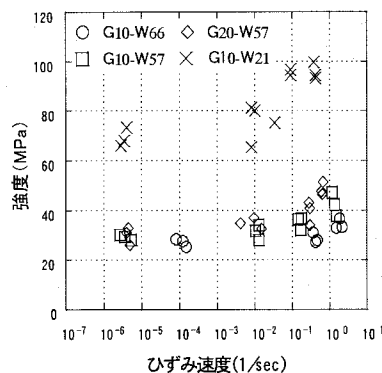
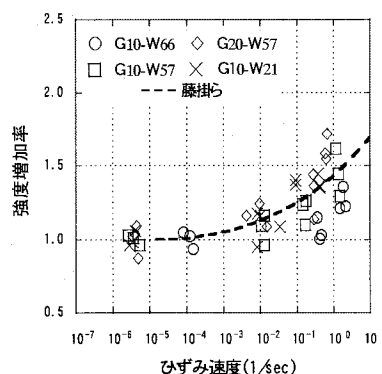


図-3 圧縮試験における粗骨材寸法の影響



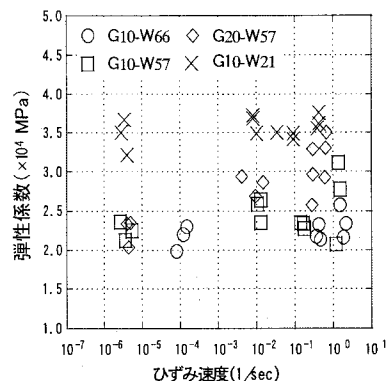
(a) 強度～ひずみ速度関係



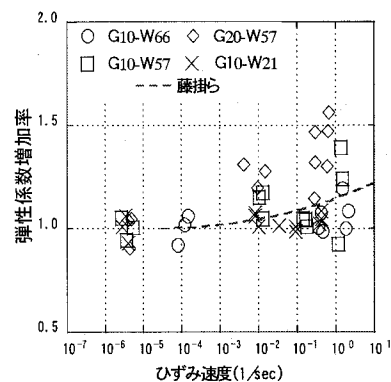
(b) 強度増加率～ひずみ速度関係

図-4 圧縮試験による動的強度

これより、弾性係数は、ばらつきが大きく明確ではないが、G10-W66やG10-W21はひずみ速度によらずほぼ一定の値を示す。一方、G10-W57、G20-W57はひずみ速度が大きくなるにつれ、他の配合に比べて弾性係数が大きくなる傾向を示している。これは、前述したように粗骨材とモルタルマトリクスの量や比率が影響していると考えられる。藤掛らが示した弾性係数増加率の評価式と本試験の結果を重ねて図-5 (b) に示す。本試験の弾性係数は、特に高ひずみ速度下においてばらつきが大きくこの式との適合性ははっきりしない。しかし、水セメント比の小さいG10-W21では、増加の傾向が小さいことがわかる。これは、白井ら²⁾が指摘している、水セメント比が小さくなると弾性係数増加率が小さくなるという傾向と一致している。



(a) 弾性係数～ひずみ速度関係



(b) 弾性係数増加率～ひずみ速度関係

図-5 圧縮試験による弾性係数

(2) 急速直接一軸引張試験

直接一軸引張試験における破断面の位置を写真-5 に示す。供試体の両端は治具に拘束されているため、治具近傍で破断した場合、この拘束が引張強度に影響している可能性がある。そこで、破断面の位置と強度の関係を調べた。G20-W57の低速載荷におけるひずみ速度、引張強度を表-4 に示す（供試体No.5は写真-5 と対応している）。破断面の位置はかなりばらついているが、直接引張強度の大きさとの関係は特に見られない。すなわち、破断面の形成位置は直接引張強度に大きな影響を与えていないことがわかる。また、供試体No.5の6枚のゲージから得られたひずみと応力の時刻歴を図-6 に示す。これを見ると強度のピークまではほぼ6枚のゲージの挙動はほぼ等しいことがわかる。

次にG10-W66の高速載荷における応力～ひずみ関係を図-7 に示す。直接一軸引張試験のひずみは、破断面で局所化するため、破断面と破断面以外の部分で挙動が異なる⁹⁾。すなわち、図-7 に示しているように、ひずみの局所化が起こると破断面のひずみが急激に増加する。それに対して、破断面以外は、局所化によって応力が解放されるためひずみの値は小さくなる。図-8 に破断面以外のひずみを用いた応力～ひずみ関係を示す。これより、G10-W21は静的、高速載荷とも他の配合に比べて勾配がかなり急である。また、載荷速度の違いによる勾配の差は圧縮試験に比べて大きくないが、高速載荷になると

表-4 破断の形成位置と強度の関係（低速载荷）

供試体No.	1	2	3	4	5	6
ひずみ速度 ($\times 10^{-3}$ 1/sec)	2.00	2.60	2.15	2.43	2.25	2.20
直接引張強度 (MPa)	4.38	4.91	4.48	4.45	4.57	4.52

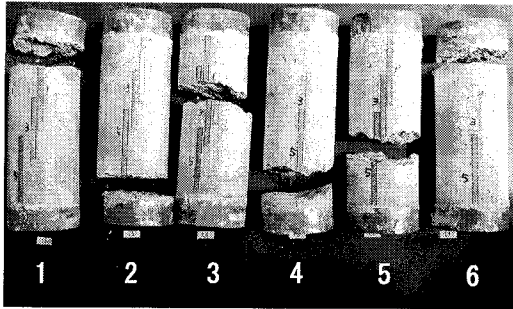


写真-5 破断面の形成位置と強度の関係（低速载荷）

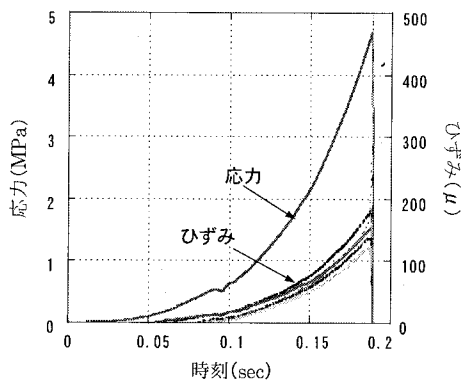


図-6 応力とひずみの時刻歴（供試体No.5, 低速载荷）

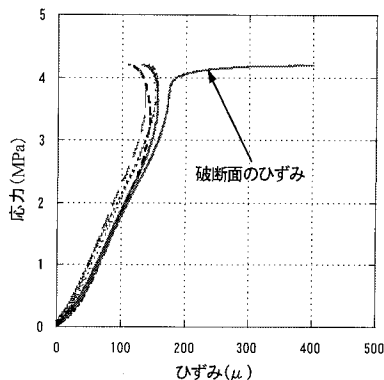


図-7 応力～ひずみ関係

（破断面と破断面以外の比較（G10-W66（高速载荷））

強度と強度点におけるひずみがともに大きくなっている。これは、直接一軸引張試験の破壊は、主として粗骨材とモルタルマトリクスの界面が起点となって破壊が進行するためであると考えられる。ここで、図-9 にG10-W57とG20-W57の応力～ひずみ関係を重ねて示す。これを見ると、静的载荷はほぼ同様の曲線を示すが、高速载荷の場合は強度の違いがほとんどないにもかかわらず、G20-W57の方が強度点でのひずみが大きい。ちなみに、図-8より全てのケースの中でもG20-W57のひずみは極めて大きいことがわかる。これは、粗骨材の割合が多くなるとそれに伴い、モルタルマトリクスと粗骨材の界面

の占める割合も大きくなると考えられるが、この界面が大きなひずみの原因となり、ひずみ速度によって増幅されたと考えられる。

次に、直接引張強度および直接引張強度増加率とひずみ速度の関係を図-10に示す。まず、動的圧縮強度では配合による差が大きく影響していたが、動的直接引張強度にはこの影響は動的圧縮強度に比べて大きくないようである。（図-10（a））。本試験の引張強度増加率～ひずみ速度関係と藤掛ら⁴⁾の評価式とを重ねて図-10（b）に示す。これを見ると静的圧縮強度、粗骨材寸法によらず、ほぼ同じ傾向を示している。

次に、弾性係数とひずみ速度の関係を図-11に示す。これより、高強度のG10-W21が極端に大きいことがわかる。弾性係数増加率～ひずみ速度の関係を図-11（b）に示す。図には、藤掛ら⁴⁾の評価式も合わせて示している。これより、ひずみ速度 10^{-2} (1/sec)までは藤掛らの式と大きく分離していないが、ひずみ速度がこれより大きくなると本試験結果の方が小さい値を示している。これは、G10-W66、G10-W57に対する高速载荷の場合、応力～ひずみ曲線の立ち上がりが緩やかであるためと考えられる。このような初期勾配の変化は中速载荷以下では確認されていないので、载荷速度が速い場合には今後詳細に検討する必要がある。

(3) 急速割裂引張試験

急速载荷時の破壊の様子は、高速度ビデオカメラの観察から静的载荷と同じく、高強度コンクリートのG10-W21が直線的なひび割れを形成する特徴があった。次に、割裂強度および割裂強度増加率～ひずみ速度関係を図-12に示す。この図には、別に行った著者ら⁵⁾の試験結果、Ross¹¹⁾らが求めた割裂引張試験による引張強度増加率の評価式を重ねて示している。これより、強度については急速圧縮、急速直接一軸引張試験と同様にひずみ速度効果が確認でき、引張強度増加率はRossらの式で評価できることがわかる。

4. 強度間における相関関係

4.1 急速圧縮試験と急速直接一軸引張試験の比較

動的载荷時の圧縮強度と直接引張強度を比較するため、図-13に圧縮および引張強度の増加率とひずみ速度の関係を重ねて示す。これによると、全体的に圧縮強度の増加率に比べ直接引張強度の増加率が大きいことがわかる。そこで、ひずみ速度がほぼ同じであった圧縮強度と直接引張強度を圧縮強度で除したもの（ f'_{td}/f'_c 、以下強度比という）を図-14に示す。ひずみ速度は、圧縮試験3体、および直接一軸引張試験3体の計6体の平均で示している。これを見ると、ひずみ速度が大きくなると強度比は増加する傾向がわかる。図-14（b）は静的载荷時の強度比を1としてひずみ速度の影響を示している。これを見ると、ひずみ速度約 10^{-1} (1/sec)で1.2から1.7程度の値を示している。つまり、静的直接引張強度を静的

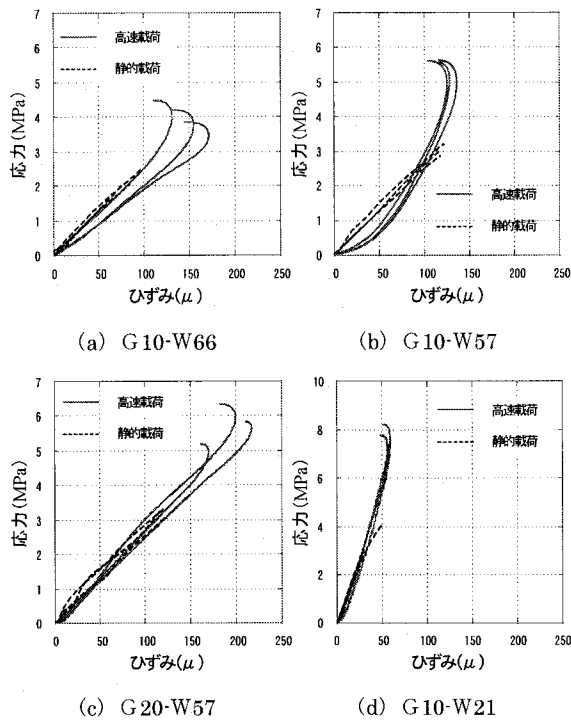


図-8 直接一軸引張試験による応力～ひずみ関係

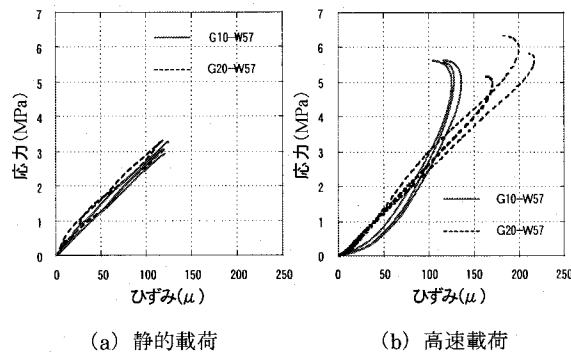
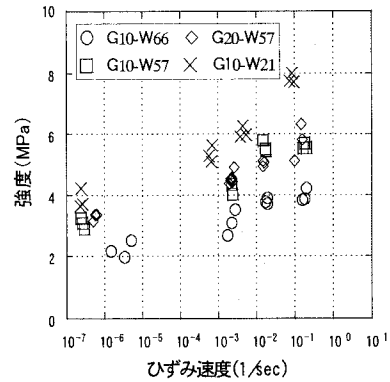


図-9 直接一軸引張試験における粗骨材寸法の影響

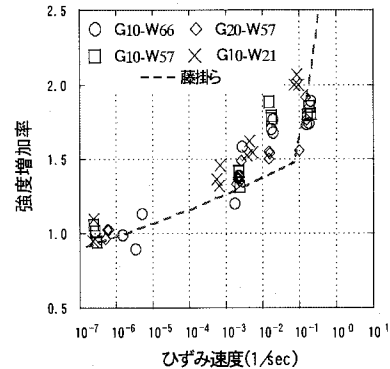
圧縮強度の 10%とすると高速荷重の動的直接引張強度は動的圧縮強度の 12%から 17%となることを示している。また、高強度の G10-W21 では強度比そのものは普通強度より小さいが、増加率で見るとほぼ同じ傾向を示すようである。図-15 に圧縮試験による弾性係数と直接一軸引張試験による弾性係数を配合毎に示す。普通強度シリーズの弾性係数は、圧縮、引張ともにあまり差がないのに対し、高強度コンクリートでは圧縮に比べ引張の弾性係数がかかなり大きい。すなわち、高強度コンクリートは、圧縮と引張の弾性係数に大きな差が見られる。

4.2 急速直接一軸引張試験と急速割裂引張試験の比較

動的荷重時の直接引張強度と割裂強度を比較するため、強度および強度増加率～ひずみ速度関係を図-16 に示す。この図には、藤掛ら(直接一軸引張試験)⁴⁾、Ross (割裂引張試験)¹¹⁾ の式も示している。図-16 (a) より強度で比較すると両引張強度はほぼ同じ (G10-W66, G10-W21) か割裂強度のほうが小さい (G10-W57, G20-W57) ようである。しかし、図-16 (b) の強度増加率では

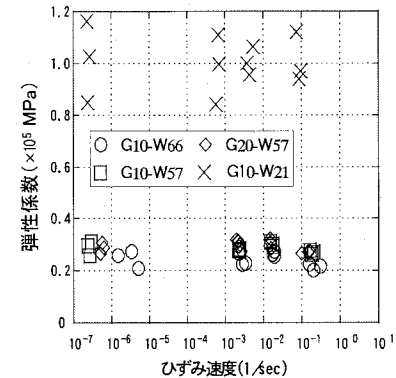


(a) 直接引張強度～ひずみ速度関係

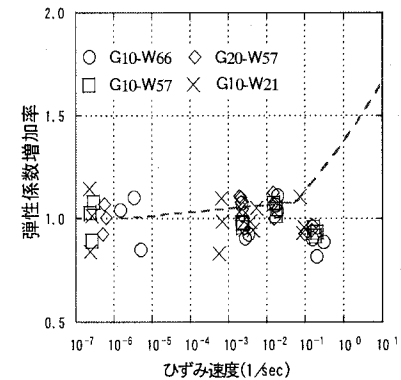


(b) 直接引張強度増加率～ひずみ速度関係

図-10 直接一軸引張試験による動的強度

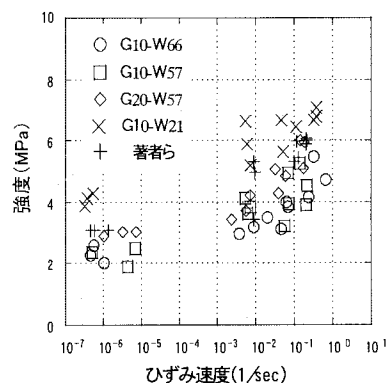


(a) 弾性係数～ひずみ速度関係

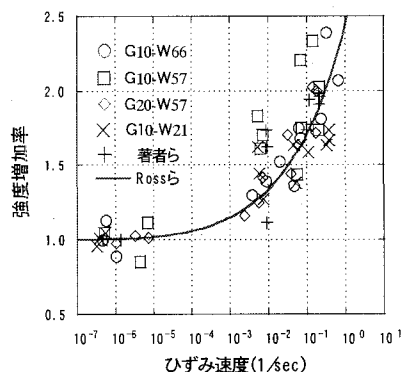


(b) 弾性係数増加率～ひずみ速度関係

図-11 直接一軸引張試験による弾性係数

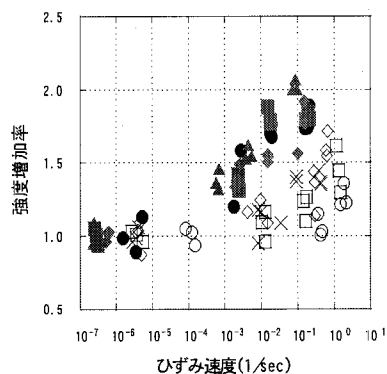


(a) 割裂強度～ひずみ速度関係



(b) 割裂強度増加率～ひずみ速度関係

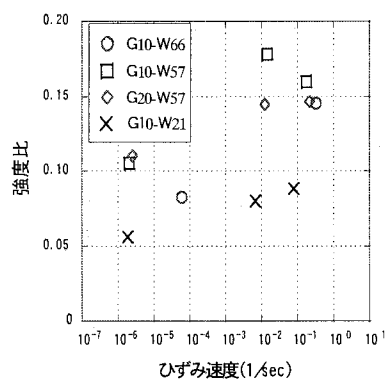
図-12 割裂引張試験による動的強度



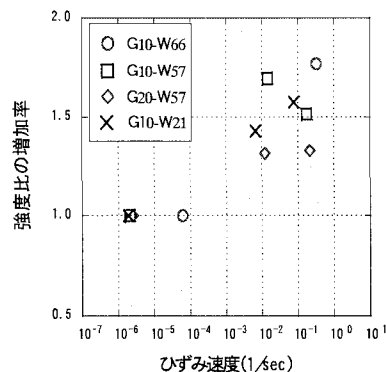
圧縮強度増加率		直接引張強度増加率	
○	G10-W66	●	G10-W66
□	G10-W57	■	G10-W57
◇	G20-W57	◆	G20-W57
×	G10-W21	▲	G10-W21

図-13 圧縮強度増加率と直接引張強度増加率の比較

両者はほぼ一致している。これは、どのひずみ速度レベルにおいても割裂強度と直接引張強度の比がほぼ等しいからである。このことは、図-17 に示すひずみ速度がほぼ同じであった割裂強度を直接引張強度で除したもの (f'_{ts}/f'_{td}) からわかる。すなわち、動的割裂強度が動的直接引張強度よりやや小さい場合、その原因は静的割裂強度が静的直接引張強度より小さいことに起因しているが、強度増加率で表すと試験法による相違はほぼみられなくなる。

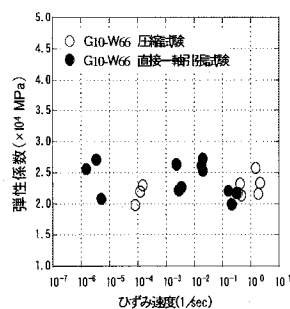


(a) 直接引張強度／圧縮強度

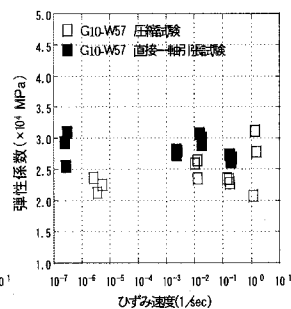


(b) 直接引張強度／圧縮強度の増加率

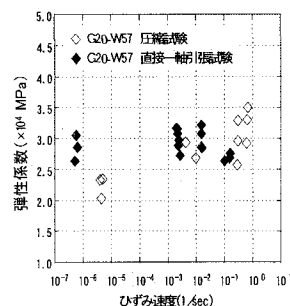
図-14 圧縮強度と直接引張強度の比較



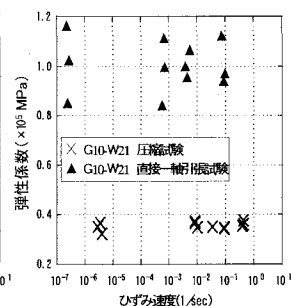
(a) G10-W66



(b) G10-W57

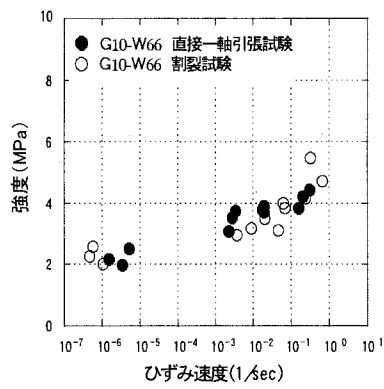


(c) G20-W57

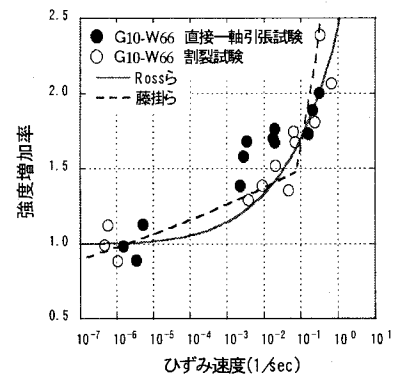


(d) G10-W21

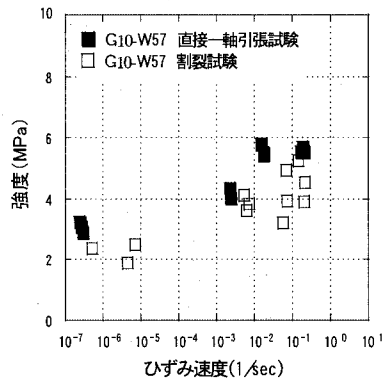
図-15 圧縮試験と直接一軸引張試験の比較
(弾性係数)



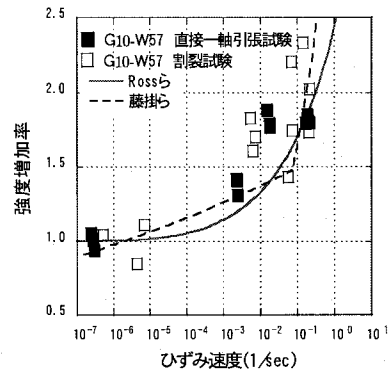
G10-W66



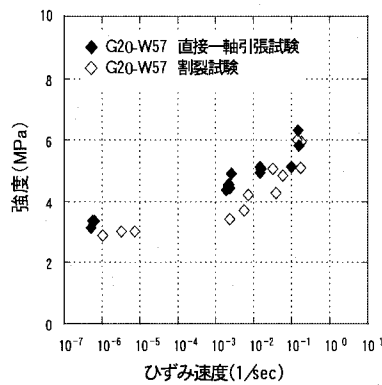
G10-W66



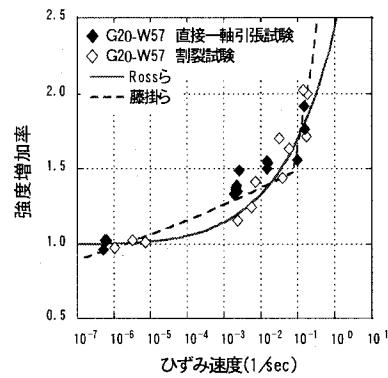
G10-W57



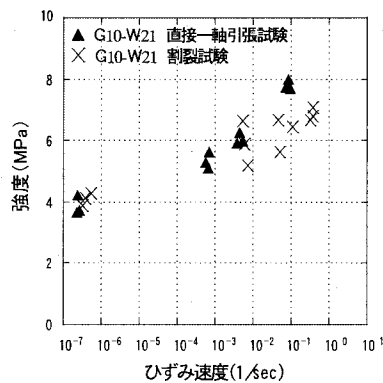
G10-W57



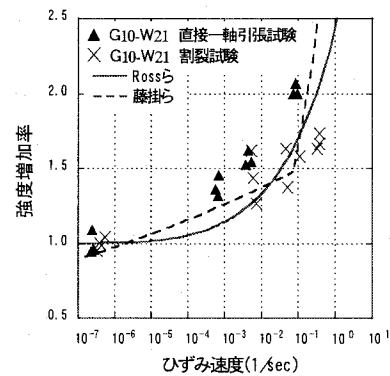
G20-W57



G20-W57



G10-W21

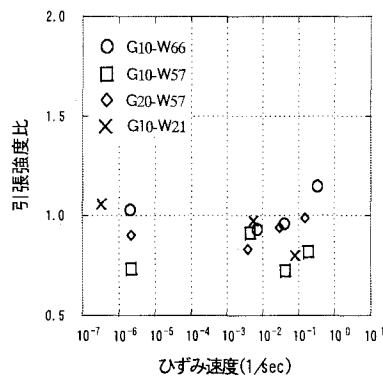


G10-W21

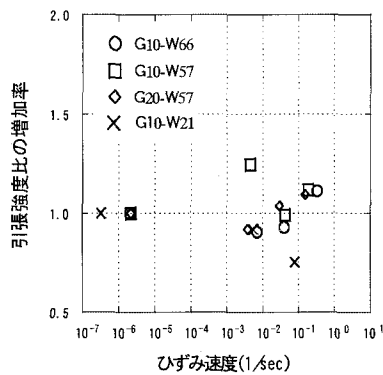
(a) 引張強度

(b) 引張強度増加率

図-16 直接一軸引張試験と割裂引張試験の比較



(a) 割裂強度／直接引張強度



(b) 割裂強度／直接引張強度の増加率

図-17 直接引張強度と割裂強度の比較

5. 結論

本研究は動的荷重における圧縮強度特性と引張強度特性および急速直接一軸引張試験と急速割裂引張試験における引張強度の関係を検討したものである。本研究の成果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 静的荷重および急速荷重試験において直接引張強度と割裂強度が一致しない配合もあるが、引張強度増加率では試験法の相違はほぼ見られなくなる。
- (2) 配合や最大粗骨材寸法の相違は、強度増加率に大きな相違を与えない。
- (3) ひずみ速度効果は、圧縮強度増加率より引張強度増加率の方に大きく影響を及ぼす。
- (4) 圧縮弾性係数と引張弾性係数は普通強度ではほぼ同じであるが、高強度コンクリートでは引張弾性係数が極端に大きい。

- (5) 水セメント比を等しくして最大粗骨材寸法を大きくすると、強度はほぼ同じであるが圧縮の応力～ひずみの弾性係数が大きくなること、また引張強度点におけるひずみが大きくなることがわかった。

謝辞

多数におよぶ供試体の製作や試験の実施には、防衛大学校建設環境工学科前期研究科学生、田中信行氏、千賀孝宣氏の多大なご助力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会：構造工学シリーズ 6，構造物の衝撃挙動と設計法，pp.74-78，1993.12
- 2) 白井孝治，柳下拓也，伊藤千浩：コンクリートの材料特性に及ぼすひずみ速度効果の評価式，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1665-1672，2001.3
- 3) 藤掛一典，篠崎敬一，大野友則，水野 淳，鈴木 篤：急速一軸圧縮荷重を受けるコンクリートのポストピーク挙動に関する実験的研究，土木学会論文集，No.627/V-44，pp.37-54，1999.8
- 4) 藤掛一典，山根茂樹，大野友則，水野 淳，鈴木 篤：急速一軸引張試験においてコンクリート円柱供試体の高さ寸法の違いが引張特性に及ぼす影響，土木学会論文集，No.592/V-39，pp.83-95，1998.5
- 5) 江田 智，別府万寿博，大野友則，藤掛一典，佐藤紘志：引張試験法および試験体寸法の相違がコンクリートの動的引張強度に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.49A，pp.1279-1288，2003.3
- 6) 岡田清，明石外世樹，小柳治共著：土木材料学，国民科学社，pp.175，1998.4.20 初版 1 刷発行
- 7) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮性状に及ぼす供試体の高さ直径比の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.651-656，1994
- 8) 永山功，佐々木隆，波多野政博：コンクリートの引張強度の荷重速度依存性に関する検討，土木学会第 52 回年次学術講演会，pp.480-481，1997.9
- 9) 上田 稔，長谷川宣男，佐藤正俊，奥田宏明：コンクリートの引張破壊メカニズムと引張強度の破壊力学的研究，土木学会論文集，No.466/V-19，pp.69-78，1993.5
- 10) 町田篤彦：コンクリートの圧裂試験に関する基礎研究，土木学会論文報告集第 297 号，pp.99-112，1978.11
- 11) Ross, C.A., Jerome, D.M., Tedesco, J.W. and Hughes, M.L.: Moisture and strain rate effects on concrete strength, ACI Materials Journal, Vol.93, No.3, pp.293-300, May-june, 1996

(2003 年 9 月 12 日受付)