

論文 後付式引抜き試験による構造体コンクリートの強度推定

近藤 吾郎*1

要旨: 既存の構造体コンクリートの強度を調査するコアシリンダーの抜き取り検査が行われているが、構造物に損傷を与えるため限界がある。本研究では、微破壊試験の一つである引抜き試験を既存コンクリートに後付で行う方法を開発して、その適用性を検討したものである。さらに、試験対象のコンクリートの粗骨材量が圧縮強度と引抜き耐力との関係に及ぼす影響を実験的に調査し、試験後の破壊面における粗骨材量を用いてその関係を導いた。また、長期応力が引抜き耐力に及ぼす影響についても実験的に調査し、長期の圧縮許容応力度レベルでは引抜き耐力に及ぼす影響は小さいことを明らかとした。

キーワード: 構造体コンクリート, 非破壊試験法, 引抜き試験

1. はじめに

構造体コンクリートが所要の強度を有しているかを確認することは、特に終局強度と変形性能に基づいた耐震設計ではきわめて重要である。既存構造体コンクリートを性能調査する場合には、通常コアシリンダーの抜き取り検査が行われるが、構造物に与える損傷が大きく、多大な費用を要することから、その適用には限界があり、特に近年は鉄筋干渉が避けられなくなりつつある。

本研究では、比較的構造物に与える損傷の少ない微破壊試験の一つである引抜き試験を発展させ、既存コンクリートへの適用が可能な後付式の引抜き試験を構造体コンクリートの強度試験法として確立することを目的とするものである。

引抜き試験は、図-1 に示すようにコンクリート内に埋め込まれた加力プレートを、反カリングを支点として加力して、抜き出すのに要した最大荷重（引抜き耐力）を計測し、引抜き耐力とコンクリート強度の関係からコンクリート強度を推定するものである。

この引抜き試験は、わが国では、JCI では「硬化コンクリートの引抜き試験方法（試案）」¹⁾や土木学会では「引抜き方法による吹付けコンクリートの初期強度試験方法」²⁾が規定されているが、いずれも先付式であり、新規コンクリートにしか適用できない。ASTM C900-06 では、先付式に加えて、後付式についても規定しており、ここでは後付式におけるコンクリートの破壊機構と抜き出されるコンクリートの破壊コーン形状が先付式と同じとなることを要求している。

この規格に合致する後付式の引抜き試験は、拡底式穿孔具と拡張式埋め込み具を組み合わせた CAPO テストなどがあるが、作業手順が煩雑なうえ、わが国では装置の入手が困難である。

そこで、本研究では森田ら³⁾が行ったエポキシ系樹脂を用いた埋め込み方法を改良した方法を改良して、鉛直部材への適用を行い、先付式における破壊機構や引抜き耐力を比較するものである。引抜き試験では、抜き出されるコンクリートコーンの破壊面に位置する骨材の局所的な割合が引抜き耐力に明確な影響を与えるため、対象コンクリートは粗骨材量を変化させた配合とした（実験Ⅰ）。さらにこの結果から粗骨材量を考慮してより精度の高い強度推定を試みた。また、既存コンクリートに適用する場合長期応力が作用する条件下で行うことが避けられないため、長期応力が引抜き耐力に及ぼす影響を把握した（実験Ⅱ）。

2. 試験方法の概要

森田らが行った後付式引抜き試験を参考に試行した。その結果から、コンクリートに穿孔後加力プレートを挿入しエポキシ樹脂を充填して埋め込み作業を行ったが、エポキシ樹脂はコンクリートに比べ優れた強度特性を有するが弾性係数が小さいため、加力時に加力プレート近

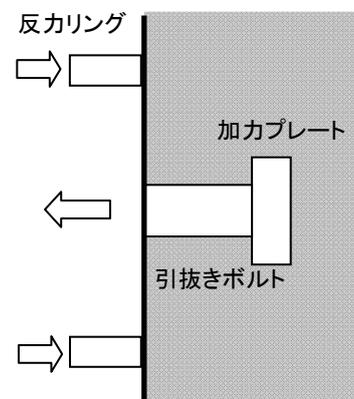


図-1 引抜き試験方法の概要

*1 千葉大学工学部都市環境システム学科准教授 工博（正会員）

傍における樹脂の変形によりコンクリートと樹脂との境界面での局所的なずれが生じること、加力プレート裏面において樹脂を介した力の伝達が生じることがわかった。そこで、エポキシ樹脂にスチールショット(おおよそφ2mm)を混入しコンクリートと同等の見かけの弾性係数とした。図-2に、スチールショットの容積率53%とした混入樹脂とエポキシ樹脂の圧縮弾性係数(圧縮ひずみ0~0.0005における割線弾性係数)の経時変化を示す。なお、試験体はφ30×60mmのシリンダーを用い、JIS K 7181に準拠した。硬化時間7日でおおよそコンクリートに匹敵する弾性係数となることがわかる。図-3に、硬化時間7日における圧縮応力-ひずみの関係を示す。

先付式埋め込み具は図-4(a)に示すように型枠に取り付け、コンクリートを打設した。後付式埋め込み具は図-4(b)のように、加力プレート部裏面にテーパを設け、樹脂との接着を妨げるためシリコンオイルを塗布した。

後付式の埋め込み手順を図-5に示す。穿孔は4枚刃のコンクリートドリル(φ25)を用い、(1)図のように5度程度下方に傾斜させた。孔内清掃後、(2)図のように、固定用亚克力板と樹脂流出防止用プラスチック板を表面ねじ切りした鋼パイプで埋め込み具と一体化し、これをコンクリート表面に固定した。プラスチック板上部を折り曲げ、(3)図のように穿孔上部の隙間よりスチールショットを充填し、(4)図のように鋼パイプ内を通した塩ビチューブにシリンジを接続してエポキシ樹脂を注入した。上部エポキシ樹脂の溜まりは、樹脂の硬化収縮に伴い気泡の穿孔内への進入を防止するためのものである。

加力方法は、先付式では加力プレート固定用の高力ボルトに、後付式では樹脂硬化後鋼パイプを取り除き、塩ビチューブを引抜いた後埋め込み具にねじ込んだ高力ボルトに引抜き力を加えるものとした。なお、反力リング内径は58mmとした。

3. 実験の概要

実験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材は最大寸法20mmの砕石である。なお、粗骨材容積率0%(モルタル)以外のコンクリートには粗骨材量調査のため酸化鉄系のコンクリート用赤色顔料を混入して着色した。

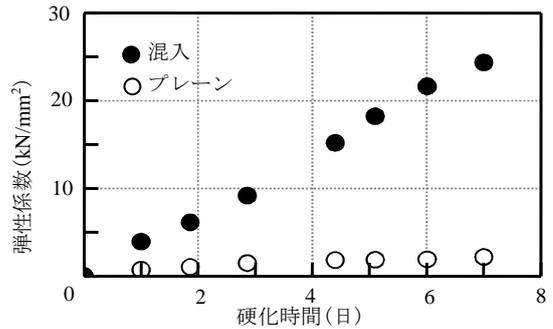


図-2 樹脂の弾性係数

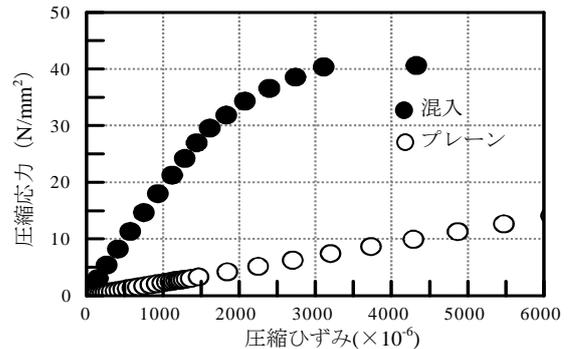


図-3 樹脂の圧縮応力-ひずみ関係

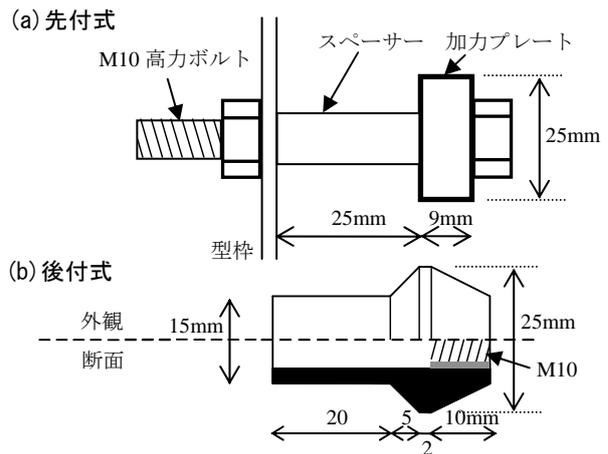


図-4 埋め込み具詳細

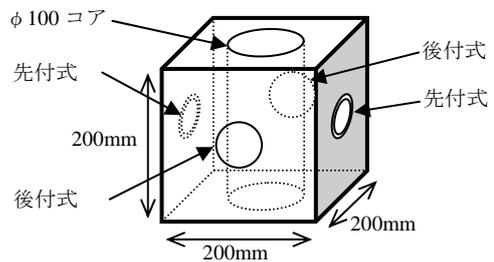


図-6 試験体詳細

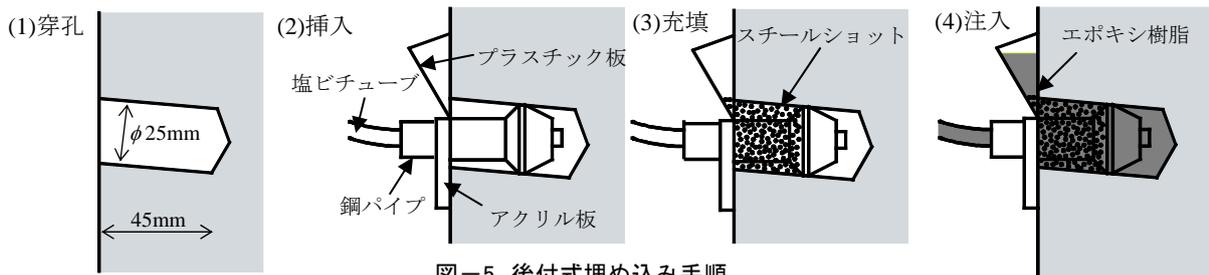


図-5 後付式埋め込み手順

試験体は図-6に示すような1辺200mmの立方体の形状で、先付式と後付式の引抜き試験をそれぞれ側面2面で行った。引抜き試験後上下方向にφ100 コアシリンダーを向き取りコア強度を計測した。試験体は、材齢7日で脱型し、脱型後材齢28日まで湿布養生とした。試験時材齢は35日から42日である。

試験体一覧を、実験結果とともに表-2に示す。表中

のPre1, Pre2は先付式の引抜き耐力、Post1, Post2は後付式の引抜き耐力をそれぞれ表す。

実験Iは、各配合につき試験体3体を用意し、粗骨材容積率が引抜き耐力に及ぼす影響を調査した。実験IIは配合60-40を用い、試験体を上下方向に所定の圧縮力を作用させた状態で引抜き試験を行ったもので、平均圧縮応力度は5, 10, 15N/mm²とした。

表-1 コンクリートの調合

名称	水セメント比(%)	粗骨材容積率(%)	単位量(kg/m ³)				4週圧縮強度(N/mm ²)
			水	セメント	細骨材	粗骨材	
60-0	60	0	250	417	1458	0	37.1
60-20	60	20	215	359	1076	520	40.5
60-40	60	40	174	290	724	1040	34.0
50-0	50	0	239	477	1431	0	46.1
50-20	50	20	209	417	1043	520	50.5
50-40	50	40	172	343	686	1040	38.1

表-2 実験結果一覧

実験 I

試験体名	水セメント比(%)	粗骨材容積率(%)	圧縮応力(N/mm ²)	コア強度(N/mm ²)	圧縮強度(N/mm ²)	Pre1(kN)	Pre2(kN)	Post1(kN)	Post2(kN)
60-0-1	60.0	0.0	0.0	42.2	39.7	23.5	26.6	26.7	25.2
60-0-2	60.0	0.0	0.0	38.1	39.7	23.5	26.7	28.4	28.7
60-0-3	60.0	0.0	0.0	38.7	39.7	28.5	27.8	31.6	30.8
60-20-1	60.0	20.0	0.0	39.2	40.3	24.4	25.9	22.1	26.3
60-20-2	60.0	20.0	0.0	40.9	40.3	28.2	25.7	27.4	26.1
60-20-3	60.0	20.0	0.0	40.9	40.3	26.7	28.4	22.9	27.2
60-40-1	60.0	40.0	0.0	35.8	34.7	24.1	25.7	27.8	28.5
60-40-2	60.0	40.0	0.0	33.2	34.7	29.2	27.3	25.0	31.1
60-40-3	60.0	40.0	0.0	35.0	34.7	27.5	24.5	28.9	27.4
50-0-1	50.0	0.0	0.0	47.2	48.2	31.4	29.1	26.2	26.9
50-0-2	50.0	0.0	0.0	47.6	48.2	29.3	28.5	27.7	28.2
50-0-3	50.0	0.0	0.0	49.9	48.2	29.7	27.9	26.3	24.2
50-20-1	50.0	20.0	0.0	53.0	51.9	35.6	31.0	34.3	31.9
50-20-2	50.0	20.0	0.0	50.5	51.9	32.5	34.4	31.0	25.8
50-20-3	50.0	20.0	0.0	52.2	51.9	31.3	29.3	34.8	31.5
50-40-1	50.0	40.0	0.0	44.3	43.6	31.9	25.9	32.2	32.8
50-40-2	50.0	40.0	0.0	42.8	43.6	31.4	34.3	33.9	30.8
50-40-3	50.0	40.0	0.0	43.7	43.6	32.7	32.5	29.0	29.9

実験 II

試験体名	水セメント比(%)	粗骨材容積率(%)	圧縮応力(N/mm ²)	コア強度(N/mm ²)	圧縮強度(N/mm ²)	Pre1(kN)	Pre2(kN)	Post1(kN)	Post2(kN)
60-40-N1-1	60.0	40.0	5.0	36.6	34.7	27.7	31.8	29.3	33.8
60-40-N1-2	60.0	40.0	5.0	36.3	34.7	29.3	28.9	28.0	30.8
60-40-N2-1	60.0	40.0	10.0	37.7	34.7	27.6	31.8	26.8	27.6
60-40-N2-2	60.0	40.0	10.0	35.5	34.7	30.2	34.5	29.8	30.5
60-40-N3-1	60.0	40.0	15.0	34.1	34.7	25.4	29.8	26.7	26.3
60-40-N3-2	60.0	40.0	15.0	-	34.7	22.4	20.8	11.6	11.5

4. 実験 I の結果

4.1 破壊コーン形状

写真-1 に、破壊コーン形状を示す。(a)の粗骨材容積率 0%(モルタル)では先付式と後付式には明確な破壊コーン形状の差は見られない。(b)の粗骨材容積率 40%ではモルタルに比べ側面の凹度が特に後付式の場合著しく、樹脂と孔壁の境界面の露出が確認できる。この境界面破壊位置の孔壁には穿孔により切削された粗骨材が見られ、強度の高い骨材を迂回して境界面に破壊面が形成されたためと考えられる。先付けの場合においても加力プレート前面に粗骨材がある場合には破壊面の勾配が険しくなり、(a)とは異なる形状となっている。

4.2 引抜き耐力

図-7 に、試験体ごと(試験数 2)と配合ごと(試験数 6)の先付式および後付式の引抜き耐力の平均値(それぞれ P_{pre} および P_{post})の比較を示す。配合要因による P_{pre} と P_{post} の関係に明確な傾向はなく、データの分布は試験結果にばらつきに起因すると判断できる。全体的にはデータは 45 度ラインにあり、先付け式と後付け式の引抜き耐力には同じ取り扱いが可能と考えられる。配合ごとの引抜き耐力(試験数 6)の変動係数を図-8 に示す。この図では粗骨材容積率 20%の場合の変動係数がやや高いようであるが、平均的には 7~8%であり、既往の報告⁴⁾による引抜き試験における変動係数と一致しており、後付けによる試験結果に及ぼす変動要因は小さいといえる。

4.3 推定強度

JCI の試案によれば、ここで用いた試験装置の寸法を用いるとき引抜き耐力 $P(kN)$ とコンクリート強度の $f(N/mm^2)$ の関係は普通コンクリートについては次式で表されるとしている。

$$P = 0.78 \cdot f \quad (1)$$

この関係式を用いて、個々の引抜き耐力から求めた推

(a)モルタル (先付け式)



(後付け式)



(b)コンクリート



写真-1 破壊コーン形状

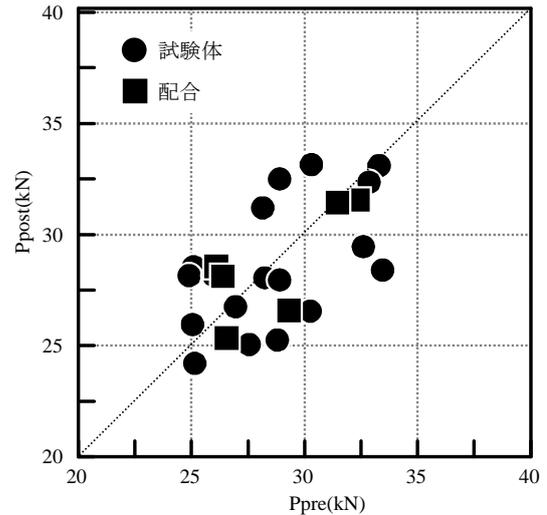


図-7 先付式と後付式の引抜き耐力の比較

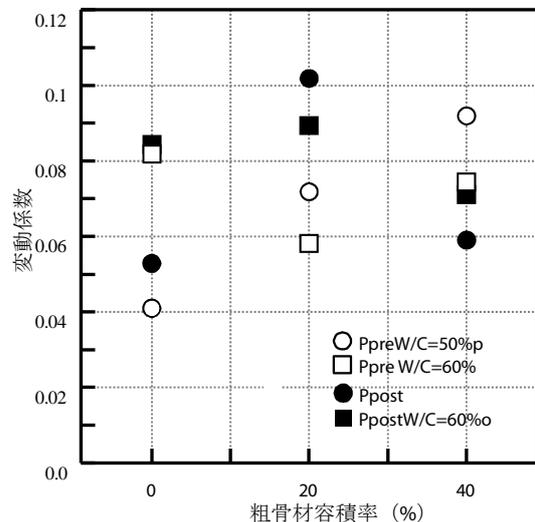


図-8 引抜き耐力の変動係数

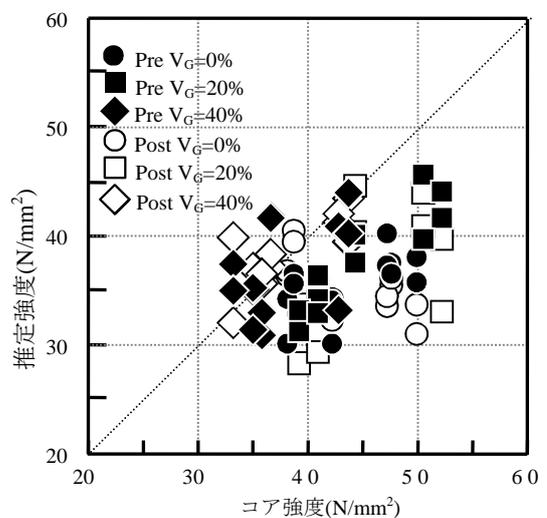


図-9 引抜き耐力による推定強度

定強度とコア強度を比較した結果を図-9 に示す。一般に用いられるコンクリートの粗骨材容積率 40%では先付式と同等に後付式の場合もコア強度の推定が可能であることがわかる。粗骨材量の少ない場合には、コア強度を過小評価しているが、粗骨材容積率が 20%とモルタルの場合の差は明確ではない。引抜き耐力とコア強度の関係に及ぼす粗骨材容積率の影響を調査するため、式(1)と同様に比例関係にあると仮定し、配合ごとに求めた引抜き耐力/コア強度を図-10 に示す。引抜き強度/コア強度は面積の単位を持つが物理的な意味はない。なお、粗骨材容積率 40%の場合の比は、式(1)の 0.78 よりやや小さいがコアの抜き取り方向も影響していると思われる。この図より、引抜き耐力とコア強度の関係は先付式と後付式の相違は少ない。また、本実験のように同じ粗骨材を使用する場合には粗骨材量を考慮すればより正確な強度推定が可能になると考えられる。

4.4 破壊面の画像解析

破壊面における粗骨材割合を次の手順の画像解析によって調査した。(1)試験体およびコンクリートコーンの破壊面を正面よりデジタルカメラで撮影し、破壊面を円錐台と仮定し投影画像に変換する。この画像を加力プレート内と反力リング外をマスキングした例を写真-2 に示す。比較のためコーンの画像は鏡像変換している。(2)この画像をピクセル(実寸法 0.07mm×0.07mm に対応する)ごとに永井が行った方法⁵⁾を参考に骨材かペーストかを判別した。(3)粗骨材表面に付着した粉体セメントペーストの影響を除くため、各ピクセルについて、そのピクセルを中心とする縦3ピクセル×横3ピクセルの9ピクセルのうち5ピクセル以上が骨材と判別された場合に対象とするピクセルを骨材とした。その結果を図-11 に示す。元画像の写真-2 と比較すると褐色の骨材の判別を誤ること以外は良好に対応している。図-12 は図-11 の画像を合成し骨材破壊面を表したものである。この図では骨材の破壊状況は把握できるが、その形状までは明確ではない。これは、投影画像に変換する際円錐台と仮定していることと粉砕した骨材が剥落することに起因している。コンクリートコーンは抜き取る際に大きく欠けることもあることから、ここでは試験体の破壊面における骨材が破壊面に占めるピクセル割合を用いて、引抜き強度/コア強度を表した結果を図-13 に示す。試験体の破壊面に

おける骨材のピクセル割合は配合の骨材容積率より小さい傾向があるが、図-12 における粗骨材破壊面と骨材-モルタルの境界破壊面を加えた骨材のピクセル割合は粗骨材容積率より大きく、骨材-モルタルの境界破壊面が引抜き試験における破壊面にかなりの割合を占めることを示している。

このように骨材は骨材破壊により引抜き耐力を上昇させるだけでなく、骨材位置によっては境界面破壊により低下させると考えられる。また、圧縮強度に及ぼす骨

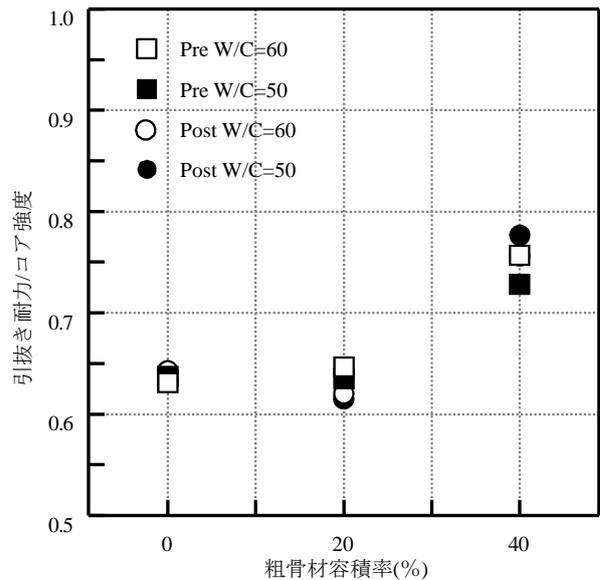


図-10 引抜き強度/コア強度比

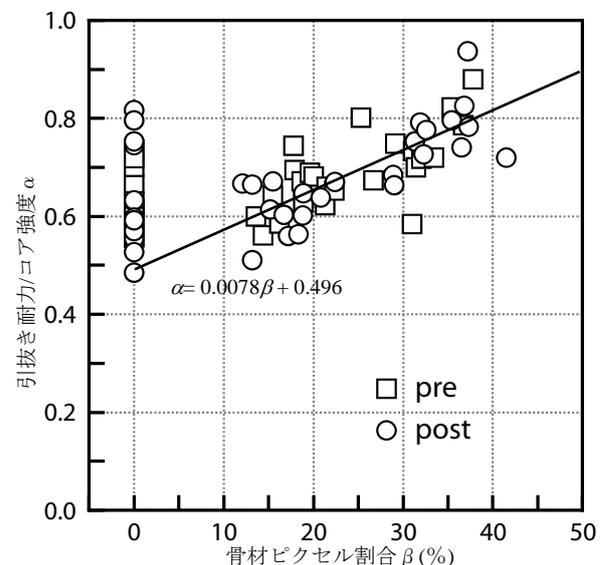


図-13 骨材ピクセル割合と引抜き耐力/コア強度

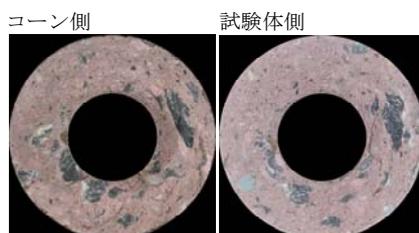


写真-2 破壊面投影図

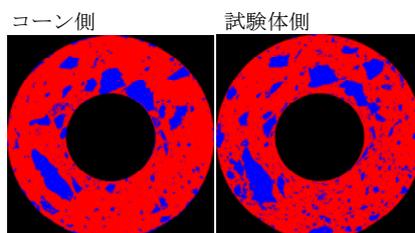


図-11 骨材分布図

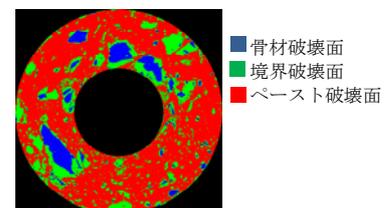


図-12 骨材破壊状況

材の影響とは異なると思われることから図-13 よりモルタルを除いた骨材のピクセル割合と引抜き耐力/コア強度の関係を求めると次式が得られる。

$$\alpha = 0.0078\beta + 0.496 \quad (2)$$

ここで、 α は引抜き耐力/コア強度を、 β は骨材のピクセル割合(%)を表し、 $\alpha \geq 0.63$ とする。

図-13 では試験体の破壊面における骨材ピクセル割合は配合の粗骨材容積率のおおよそ0.6倍から1.1倍の範囲に分布している。通常のコンクリートでは骨材ピクセル割合が1%局所的に変化すると式(2)による α はおおよそ1%変化することから、実験室実験よりも材料分離の起こりやすい実構造物においては粗骨材の偏在の影響を考慮する必要はより高くなると考えられる。式(2)を用いて強度推定を行った結果を図-14に示す。全体的には骨材量を考慮しない図-9に比べると推定精度が向上したことが確認できる。

5. 実験Ⅱの結果

実験Ⅱの結果を図-15に示す。なお、試験体60-40-N3-2ではPre1の試験中に試験体が割裂破壊したため、その後行ったPre2, Post1, Post2の引抜き耐力は極端に小さく、コアシリンダーの採取も行えなかった。長期許容応力度レベルの軸圧縮応力度 10N/mm^2 を加えた場合も引抜き耐力に及ぼす影響は小さく、試験体が小さく引抜き試験を行うことによる断面欠損が大きいことを考慮すれば長期許容応力度レベルであればその影響は無視しようと思われる。なお軸圧縮応力度が 10N/mm^2 以下の範囲では軸応力度の増加に伴い引抜き耐力が増加する傾向が見られるが、先付式および後付式ともに無応力状態で埋め込み具を設置しているため軸圧縮力载荷により加力プレート側面において摩擦力が作用したものと思われる。

まとめと今後の課題

- (1) 後付式の引抜き試験を粗骨材量の異なるコンクリートに適用した結果、先付式とは粗骨材の配置条件が異なるためコンクリートコーン形状がやや異なる傾向があるが、引抜き耐力は先付式と同様に取り扱うことが可能である。
- (2) 引抜き試験後のコーン抜き跡の破壊面の画像から得られる骨材量を考慮すればより精度の高い強度推定が可能と思われるが、そのためには様々な種類の骨材についての資料の蓄積が必要である。
- (3) 引抜き試験対象域に圧縮応力が作用していても長期許容応力度以下であれば試験結果に及ぼす影響は小さい。
- (4) 後付式試験では樹脂の充填性を優先して粘度の低

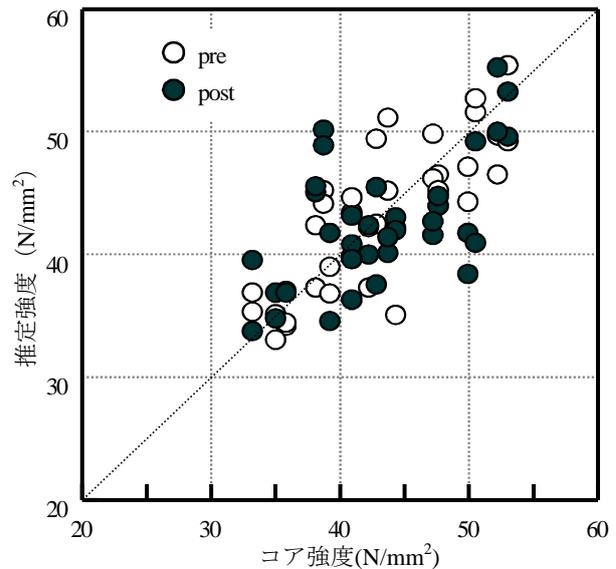


図-14 骨材量を考慮した強度推定

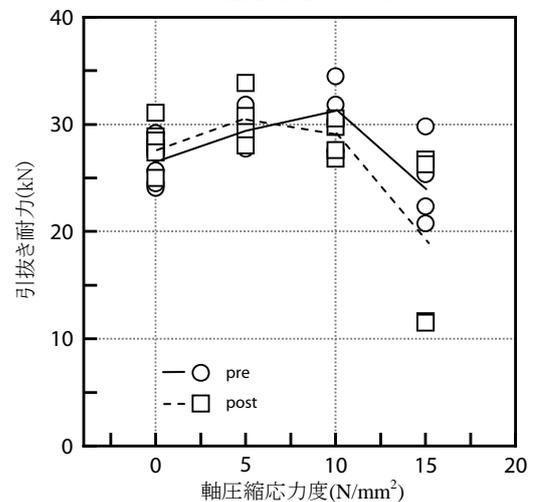


図-15 軸圧縮応力度の影響

いひび割れ注入用のエポキシ樹脂を使用した、より硬化時間の短いものが実用上望ましい。

- (5) 破壊面における骨材量を調査は、フェノールフタレイン溶液で染色すれば着色した場合と同様に行えると思われるが、中性化が進行したコンクリートについては今後の検討が必要である。

参考文献

- 1) JCI 基準集, コンクリート工学会, 2004.4
- 2) コンクリート標準示方書 [規準編], 土木学会, 2013.11
- 3) 森田司郎: 引抜き試験法の開発と構造物コンクリートの品質管理システムの提案, 昭和62年科学研究費補助金研究成果報告書, 1988.3
- 4) Dilly, R. and Ledbetter, W. B.: Concrete strength Based on Maturity and Pullout, J. of Structural Engineering, ASCE, Vol.110, No.2, Feb., 1984
- 5) 永井学志: コンクリート微視構造の破壊解析のための有限要素解析手法, 東京工業大学学位論文, 平成12年3月