

論文

[1039] 高強度コンクリートのボルトの引抜き耐力に及ぼす粗骨材種類の影響

正会員○橘高義典（宇都宮大学建設学科）

正会員 上村克郎（宇都宮大学建設学科）

高瀬憲克（住友建設）

1. はじめに

建築物のコンクリート躯体への設備機器，天井材，仕上用石材の接合にはアンカーボルトを用いる場合が多い。また近年，モルタル上塗り層ならびにタイル等の剥落の防止手段として，外壁モルタル層とコンクリート躯体をボルトによって定着させる工法が普及している。これらの埋込みボルトの引抜き耐力を支配する要因としては，コンクリート表層部分の力学的性質が重要となる。また近年，その需要が高まりつつある高強度コンクリートについては，ボルト引抜き耐力に関する実験例は少なく，引抜き耐力とコンクリート母材との関係は十分検討されていない。

既報[1]では，高強度域のコンクリートについて脱型直後の養生条件とボルト引抜き耐力との関係を検討した。本報では，高強度コンクリートの力学的性状を支配する主要因子となる粗骨材の種類に着目し[2]，粗骨材ならびにモルタルマトリックスの強度を種々変化させることにより，両者の剛性の相対的な差異がコンクリートの強度性状ならびにボルト引抜き耐力に及ぼす影響について実験検討した。さらに，粗骨材の影響を評価する方法として破壊力学的手法を用い，引抜き耐力と破壊力学パラメーターとの関係を考察した。

2. 実験方法

2. 1 実験概要

モルタルマトリックスの条件を一定とし，粗骨材の種類のみ変化させたコンクリート試験体を作製し，先付け埋込みボルトの引抜き試験を行った。同時に圧縮強度，割裂引張強度，弾性係数，破壊靱性等の力学的性質を測定した。実験水準は粗骨材の条件を5種類（粗骨材無しも含む），水セメント比を25%，35%，50%，65%の4条件とした。試験材令はすべて28日とし，養生条件は20℃水中養生とした。

実験に使用した細骨材及び粗骨材の種類と品質を表-1に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを，高性能AE減水剤にはアニオン型特殊活性剤（マイティ2000WH）を使用した。

コンクリートの調合条件および性質を表-2に示す。粗骨材の単位容積はモルタル以外全て一定（400l/m³）とした。細骨材には川砂を使用し細骨材率は全て一定（42.7%）とした。

表-1 骨材の種類および品質

記号	種類	最大寸法 mm	表乾比重	吸水率 %	単位重量 kg/l	粗粒率	40t 破砕率 %
-	川砂	5	2.65	1.85	1.72	2.96	-
KG	川砂利	20	2.60	0.41	1.69	6.67	13.8
CG	石灰岩採石	20	2.65	0.19	1.63	6.84	22.3
SG	砂岩採石	20	2.62	1.13	1.53	6.70	16.0
AG	人工軽量骨材	20	1.61	22.1	0.81	6.40	32.8

表-2 コンクリートの調合条件および性質

W/C %	骨材	単位量 kg/m ³				SP c×%	SL cm	Air %	単重 kg/l
		W	C	S	G				
25	KG	129	516	790	1040	3.6	23.0	2.2	2.43
	CG	129	516	790	1060	3.6	16.5	2.1	2.48
	SG	129	516	790	1048	3.6	18.9	2.5	2.45
	AG	129	516	790	644	4.2	20.0	3.0	2.02
	-	216	866	1325	-	3.6	-	3.1	2.32
35	KG	153	438	790	1040	1.0	16.1	2.4	2.39
	CG	153	438	790	1060	1.0	19.3	1.3	2.43
	SG	153	438	790	1048	1.0	6.0	1.8	2.42
	AG	153	438	790	644	1.0	4.5	3.2	1.98
	-	257	735	1325	-	1.0	-	3.5	2.22
50	KG	179	358	790	1040	-	13.6	1.8	2.35
	CG	179	358	790	1060	-	17.3	1.1	2.43
	SG	179	358	790	1048	-	5.5	1.2	2.38
	AG	179	358	790	644	-	4.5	4.5	1.93
	-	300	600	1325	-	-	-	1.7	2.22
65	KG	197	303	790	1040	-	19.7	1.1	2.32
	CG	197	303	790	1060	-	20.4	0.5	2.37
	SG	197	303	790	1048	-	14.6	0.8	2.34
	AG	197	303	790	644	-	17.1	3.1	1.91
	-	330	508	1325	-	-	-	1.0	2.16

2.2 ボルト引抜き試験

コンクリート試験体の概要を図-1に、埋込みボルトの概要を図-2に示す。ボルトは高張力ボルト（公称引張強度120kgf/mm²）を使用し、埋め込み深さは30mm、40mmの2種類とした。ボルトは型枠にあらかじめ所定の埋め込み深さになるよう調整パイプを介し設置し、その後コンクリートを打設した。ボルト本数は一条件につき各3本とした。試験概要を図-2に示す。電動式油圧ポンプによって一定速度で油圧シリンダーに加力し、ボルトの引抜き荷重と変位をデジタル・グラフィック・レコーダーに記録した。なお、反力点のスペアンは、最大耐力時に支点の影響が無視できる距離を考慮し300mmとした。

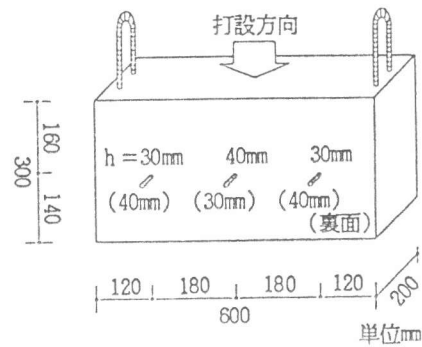


図-1 試験体の概要

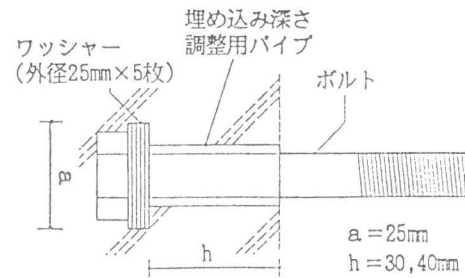


図-2 埋め込みボルトの概要

2.3 強度試験

10φ×20cmの円柱供試体（各3本）を用い、それぞれ関連JIS規格等に従って圧縮強度、静弾性係数及び割裂引張強度試験を行った。強度試験は200t高剛性万能試験機によった。圧縮試験での試験体加圧面のキャッピングは研磨機によった。

2.4 破壊靱性試験

RILEMの提唱する方法[3]を参考にし、切り欠きを有する直方試験体の3点曲げ試験結果より破壊エネルギー G_F を求めた。試験体の寸法は10×10×45cm、支点間スペアンは400mmである。試験概要を図-4に示す。切り欠き深さは5cmとし、試験直前にコンクリートカッターで作製した。試験体の数は1条件について各4本とした。荷重及び載荷点変位をデジタル・データ・アナライザーにより記録し、測定結果から下式により破壊エネルギー G_F (kgf/cm)を求めた。

$$G_F = (G_0 + mg \cdot \delta_0) / A \quad (1)$$

G_0 : 荷重-変位曲線で囲まれた面積 (kgf*cm)

mg : スペアン間の試験体の自重 (kgf)

δ_0 : 破断時の垂直変位 (cm)

A : 供試体破断部投影面積 (cm²)

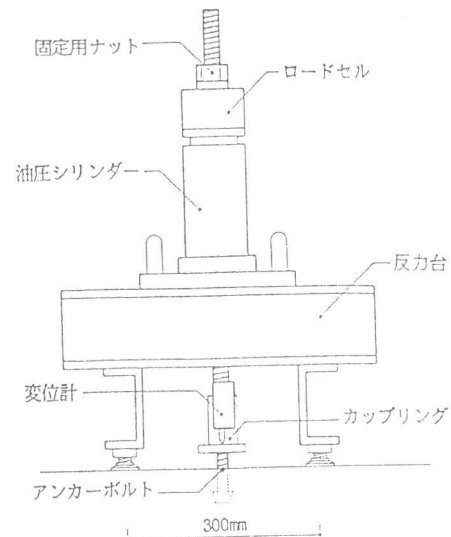


図-3 ボルト引抜き試験概要

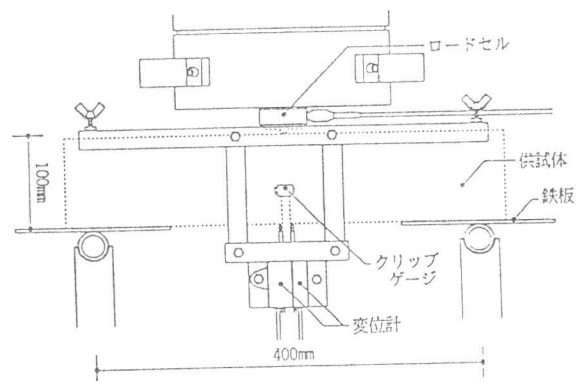


図-4 破壊靱性試験概要

3. 実験結果及び考察

3. 1 強度試験結果

セメント水比と圧縮強度の関係を図-5に示す。人工軽量骨材 (AG) を除けば両者はほぼ比例関係にあるといえる。図-6は同一水セメント比でのモルタル強度に対するコンクリートの強度比を示した。全体的にコンクリート強度はモルタル強度を下回るが、AGを除く骨材では、高強度になるほどモルタル強度に近づく傾向にある。これらの理由は、KG, CG, SGは骨材自身の強度が比較的高いため、モルタルマトリックスが低強度の場合は、粗骨材の混入により供試体内部の剛性が非均一となり、応力集中が生じ易くなるためと思われる。また、モルタル強度が高くなると、供試体内部の均一性が高まり粗骨材に分散される応力の割合が増加するため、強度低下が抑制されるもの

と考えられる。一方AGの場合、圧縮強度が500kgf/cm²程度で頭打ちとなるが、この理由は、AG自体の強度が低いため、低水セメント比においてモルタルマトリックスの強度が骨材強度よりも高くなり、コンクリートの強度が骨材の強度に支配されるためと考えられる。

セメント水比と割裂引張強度ならびにモルタルとの強度比との関係を図-7, 8に示す。圧縮強度と同様にセメント水比が大きくなるほど引張強度は増加する。また、モルタルに対する強度比は圧縮強度での傾向とは異なり、低水セメント比においてもモルタル強度を下回る。この理由は、引張強度がコンクリート構成要素の異方性に影響を受けるためと思われ、骨材の混入により生じるモルタルと骨材界面との間の欠陥部が、相対的にモルタルマトリックスの断面欠損につながり、引張強度を低下させているものと考えられる。

圧縮強度と弾性係数の関係を図-9に示す。圧縮強度の増加に伴って弾性係数も増加しているが、その伸びは徐々に小さくなっている。また、高強度になるにしたがって基準値 (図中ACI363式) を下回る傾向にある。粗骨材別にみると、同一圧縮強度の場合CGが一番

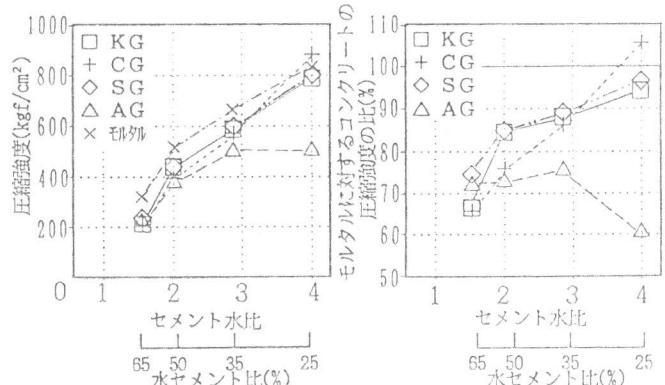


図-5 セメント水比と圧縮強度

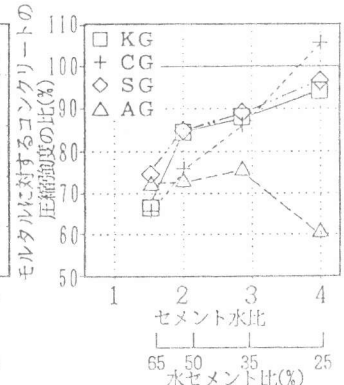


図-6 セメント水比と圧縮強度比

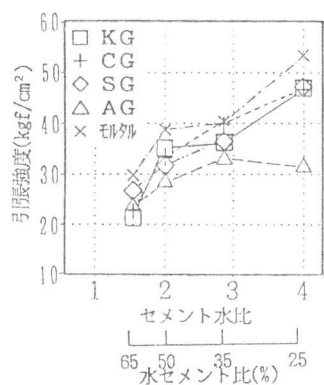


図-7 セメント水比と引張強度

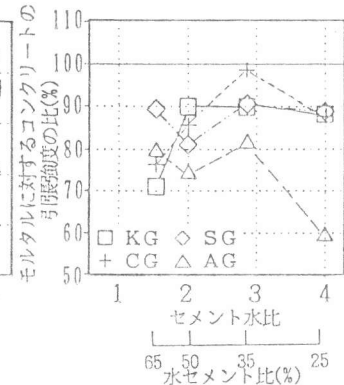


図-8 セメント水比と引張強度比

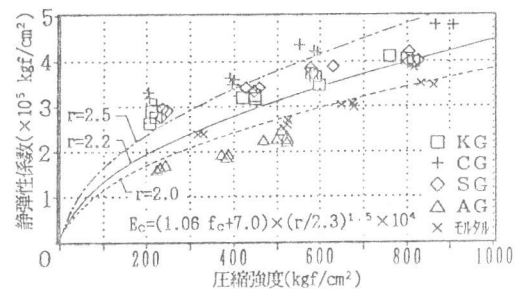


図-9 圧縮強度と静弾性係数との関係

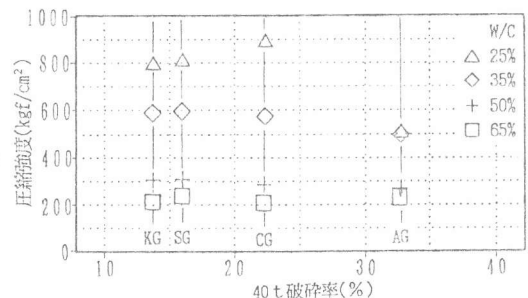


図-10 粗骨材の破碎率と圧縮強度との関係

大きく、次いでKGとSGが同程度である。AGはモルタルの値とほぼ同じである。

図-10に各水セメント別に骨材の40t 破砕率と圧縮強度との関係を示す。両者には特に明確な関係はみらず、コンクリートの強度に及ぼす骨材の強度を破砕率のみによって推定することは難しい。

3.2 ボルト引抜き試験結果

ボルト引抜き試験結果を表-3にまとめて示す。引抜き試験結果の変動は変動係数で最大10%程度である。

図-11にコンクリートの圧縮強度と引抜き耐力との関係を示す。同一圧縮強度でも、骨材の種類によって引抜き耐力が異なる。特に人工軽量骨材（AG）ならびにモルタルでの耐力が低くなる傾向にある。なお、本図中には日本建築学会での耐力設計式①[4]を示した。本式は疲労試験結果に基づいた安全側の推定式であるため、各引抜き耐力値は計算値を上まわっている。

図-12にコンクリートの引張強度と引抜き耐力との関係を示す。なお、図中には、筆者らの川砂利を用いた場合での実験式②[5]、ならびに河村式③[6]を示した。引張強度と引抜き耐力との関係は圧縮強度よりもよい対応を示すが、やはりモルタルにおいて耐力が低く、その差異は高強度になるほど大きい。

以上のように、引抜き耐力は圧縮強度ならびに引張強度とも明確な対応を示すものではないが、この理由は引抜きによる破壊が、引張とせん断との複合モードの破壊によるためと考えられる。また、粗骨材の種類によって引抜き耐力の値が異なる理由は、強度ならびにモルタルマトリックスとの付着性等の高い粗骨材を有するコンクリートほど、粗骨材によるクラック伝播の拘束効果が大きくなり、耐力が向上するためと考えられる[5]。したがって、ボルト引抜き耐力の推定においては、このような骨材の効果を考慮したものが合理的なものと考えられる。

表-3 ボルト引抜き試験結果

埋め込み深さ(mm)	骨材の種類	水セメント比 (%)			
		6.5	5.0	3.5	2.5
30	KG	2.10 (2.52)	2.65 (4.16)	2.89 (4.84)	3.60 (4.97)
	CG	2.27 (7.19)	2.47 (3.68)	3.01 (3.41)	3.42 (3.68)
	SG	2.12 (2.59)	2.73 (5.87)	3.45 (5.15)	3.90 (3.39)
	AG	1.61 (5.52)	1.87 (3.43)	2.24 (1.61)	2.20 (4.55)
	モルタル	1.88 (3.85)	1.89 (8.90)	2.20 (0.00)	2.82 (1.02)
40	KG	2.69 (5.98)	3.55 (5.08)	4.00 (4.51)	4.60 (4.35)
	CG	2.88 (9.97)	3.80 (10.3)	4.42 (6.50)	4.57 (2.76)
	SG	3.07 (6.53)	3.80 (5.92)	4.53 (8.21)	5.05 (3.57)
	AG	2.18 (4.42)	2.48 (10.5)	3.00 (5.35)	3.10 (2.79)
	モルタル	2.53 (2.54)	2.53 (5.79)	3.24 (2.45)	3.92 (5.31)

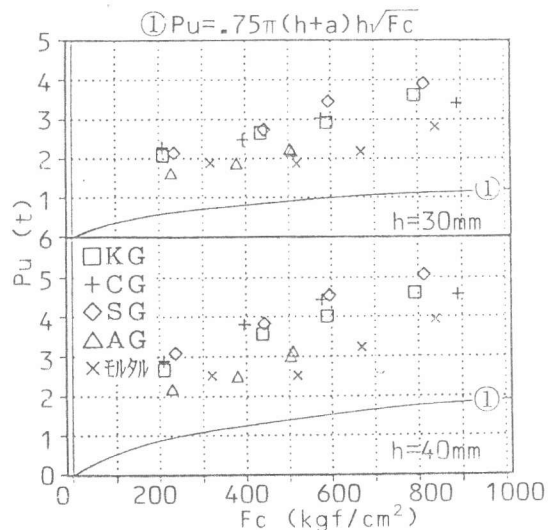


図-11 圧縮強度と引抜き耐力との関係

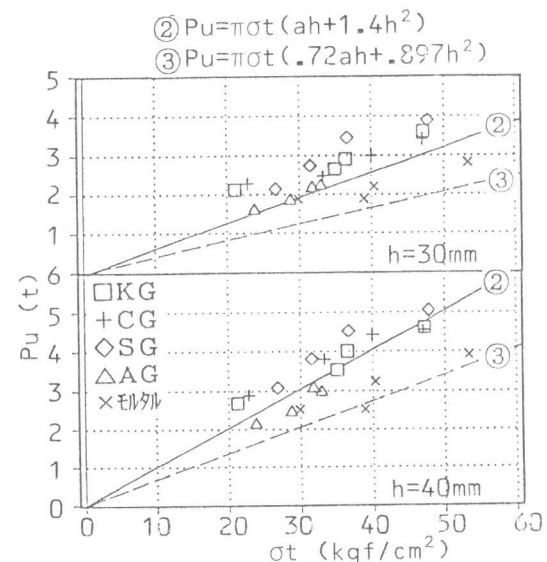


図-12 引張強度と引抜き耐力との関係

4. 破壊エネルギーによる耐力推定

次に、骨材の影響を考慮した推定方法として破壊エネルギーをパラメータとした引抜き耐力の推定式について検討する。

4.1 破壊エネルギーの測定結果

破壊靱性試験での荷重-載荷点変位曲線の測定例 ($w/c=35\%$) を図-13に示す。粗骨材の種類により変形性状に差異が認められる。モルタルならびにCGは最大荷重は大きいが破断に至るまでの変形能力が小さく、KGやSGは最大荷重はそれほど大きくないが変形能力が大きい。AGは最大荷重も変形能力も小さく変形エネルギーは小となる。

各試験体の破壊エネルギー G_F をセメント水比別に図-14に示した。セメント水比の増加に伴って G_F は単調に増加せず上に凸の変化を示す。すなわち、強度増加とともに破壊エネルギーは必ずしも増加せず脆性的になる傾向がある。これは、モルタルマトリックスの強度増加に伴い、骨材強度が相対的に低下し、クラックの伝播が骨材界面から骨材を貫通するモードに移行するためと考えられる[7]。

G_F の値はSGの値が最も大きく、KG, CG, モルタル, AGの順に小さくなる。この傾向は引抜き耐力での骨材の差異の傾向と類似しており、 G_F 値をパラメータとして骨材の効果を評価することの有効性がうかがわれる。

4.2 引抜き耐力の推定式

Eligehausen[8] は、線形破壊力学により引抜き耐力の解析を行っている。ボルト引抜き時の自由エネルギー (弾性歪エネルギー+ひび割れ表面エネルギー) ψ は下式で表せる。

$$\psi = 1/2 \cdot K w^2 + G_F \cdot A(\xi) \quad (2)$$

w : 変位, K : 剛性 $= F/w = E \cdot h (k_0 (r_0/h, \nu) + k_1 (\xi, \nu))^{-1}$

$A(\xi)$: ひびわれ面の面積 ξ : ひびわれ進展長さの比 h : 埋込み深さ E : 弾性係数
ひびわれ面の面積 $A(\xi)$ は、ボルト先端部の径 a を考慮に入れると下式となる。

$$A(\xi) = h \cdot (h + a) \cdot \alpha(\xi) \quad (3)$$

ψ は最小値をとることより ($d\psi/d\xi = 0$) 荷重 F とひびわれ長さとの関係は下式となる。

$$F = (E \cdot G_F)^{1/2} \cdot h \cdot (h + a)^{1/2} \cdot f(\xi) \quad (4)$$

$$f(\xi) = [\varepsilon \cdot \delta \alpha(\xi) / \delta \xi \cdot 1 / (\delta k_1 / \delta \xi)]^{0.5}$$

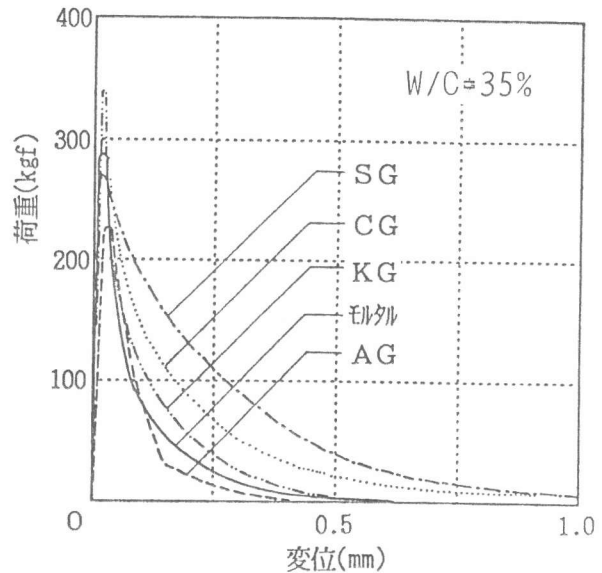


図-13 破壊靱性試験結果

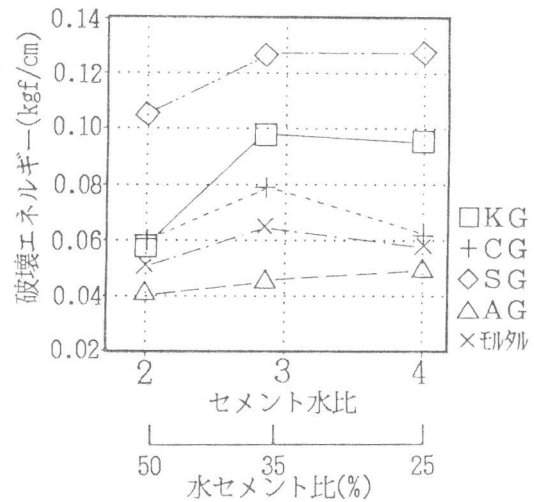


図-14 セメント水比と破壊エネルギーとの関係

最大耐力 F_{max} 時での $f(\xi)$ の値には Eligehausen の計算結果 (=2.1) をそのまま代入するとボルト引抜き耐力 P_u は (5) 式で表せる。

$$P_u = 2.1 (E \cdot G_F)^{1/2} \cdot h \cdot (h + a)^{1/2} \quad \text{----- (5)}$$

なお本式の a を 0 とすることにより Eligehausen の提案する $a \ll h$ の場合での表示式となる。

図-15 に引抜き耐力の実測値と (5) 式による計算値とをプロットし示した。両者はよい対応を示していることより、粗骨材の種類が異なる場合でも (5) 式により引抜き耐力を精度よく説明することが可能といえよう。ただし、実用的な観点からは破壊エネルギーの試験方法が複雑な面もあり、今後は骨材の効果の簡便な評価法の確立が望まれる。

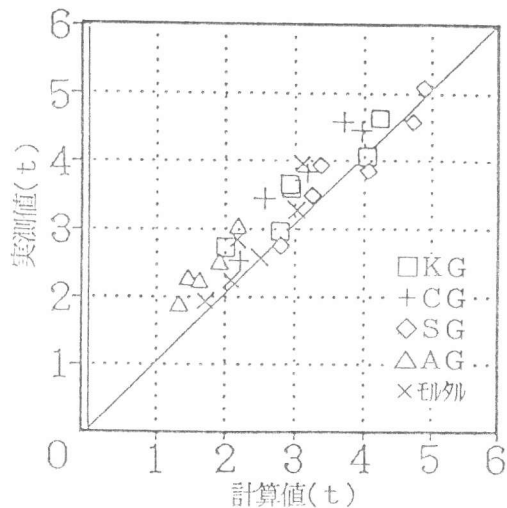


図-15 ボルト引き抜き耐力の実測値と計算値との対応

5. まとめ

粗骨材の種類ならびにモルタルマトリックスの強度を変えたコンクリート試験体のボルト引抜き耐力を求め、コンクリート強度との関係、粗骨材の影響等を明らかにした。さらに破壊エネルギー G_F を用いた Eligehausen 式による評価の有効性を確認した。

謝辞 実験に御協力戴きましたスミコンクリートエンジニアリング (株) 宇都宮試験所の皆様、金子和人氏 (本学技官) ならびに中村成春氏 (本学大学院) に感謝いたします。また、実験材料等にご協力戴きました山宗化学 (株)、日本マサキ工業 (株)、三幸商事 (株) ならびに各社に感謝いたします。

参考文献

- 1) 橘高義典, 上村克郎, 小西敏正, 飯島昌史: 埋込みボルトの引抜き耐力に及ぼすコンクリート母材の性質, コンクリート工学年次論文報告集12-2, PP.331-336, 1990
- 2) P.C.Aitcin and P.K.Mehta: Effect of Coarse-Agregate Characteristics on Mechanical Properties of High-Strength Concrete, ACI Materials Journal, V.87, No.2, pp.103-107, March-April 1990
- 3) RILEM Draft Recommendation, Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, Materials and Structures, pp.285-290, No.106, 1985
- 4) 日本建築学会「各種合成構造設計指針」
- 5) 上村克郎, 小西敏正, 橘高義典, 関 和彦: メカニカルアンカーボルトの引抜き耐力に及ぼすコンクリート母材の性質, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, PP.405-408, 1986
- 6) 河村博之: プレキャスト鉄筋コンクリート構造接合部耐力についての基礎的研究、種々な定着金物を持つ埋込み鉄筋の引張耐力の性状および内部から局部引抜き力を受けるコンクリートの弾性応力分布と耐力, 日本建築学会構造系論文報告集, 第353号, PP.1-11, 1985.7
- 7) 野村希晶, 三橋博三, 鈴木 篤, 和泉正哲: 非線形破壊力学手法に基づく高強度コンクリートの脆性化機構の考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第416号, PP.9-16, 1990.10
- 8) Eligehausen, R.; Fuchs, W.; Mayer, B.: Behavior of fastenings under tension loading. Betonwerk+Fertigteil-Technik, No.12, pp.826-832, 1987; No.1, pp.29-35, 1988