論文 付着モルタルが再生コンクリートの力学特性に及ぼす影響の解析的 評価

奥山 英俊^{*1}・長井 宏平^{*2}・佐藤 靖彦^{*3}

要旨:本研究では,再生粗骨材に付着するモルタルが再生コンクリートの力学特性に及ぼす 影響を,付着モルタル及び界面の強度特性の差異を考慮できる剛体バネモデル(RBSM)に より検討した。その結果,付着モルタルと原骨材間の界面強度(旧界面)及び付着モルタル の強度が大きければ圧縮強度は大きくなるが,モルタル付着率が小さく,旧界面と新モルタ ルと旧モルタルとの界面(新界面)との距離が狭いと,ばらつきが大きくなることが明らか となった。

キーワード:再生コンクリート,付着モルタル,界面,力学特性,剛体バネモデル

1. はじめに

再生粗骨材には,付着モルタルが存在するた め,再生コンクリートの力学特性は,付着モル タル及び付着モルタルと新モルタルの間に新た に形成される界面の量及びその特性の影響を大 きく受けると考えられる。しかし,これを実験 的に把握することは難しい。そこで,本研究は, 付着モルタル及び界面が再生コンクリートの破 壊機構,圧縮強度,強度のばらつき,弾性係数 に及ぼす影響を剛体バネモデルにより検討した。

2. 各種材料特性値の設定方法

2.1 解析の概要

本研究では,著者らの研究グループが開発し た剛体バネモデル¹⁾を用いた。剛体バネモデル は,剛体を垂直バネと水平バネにより結合し(図 -1参照),そのバネに材料の持つ非線形性を考 慮することにより,複数の剛体からなる系全体 としての非線形挙動を表現する。本解析では, 材料強度及び静弾性係数に正規分布に従うばら つきを与えている。また,骨材位置は乱数によ り与えており,それゆえ,複数回の解析を行う ことにより強度のばらつきを調べられる。



2.2 原粗骨材の材料特性値

本研究では,原骨材の破壊は考えていない. すなわち,破壊を起こさない完全弾性体であり, その静弾性係数は既往の研究²⁾より,40GPa と した。

2.3 モルタルの材料特性値

モルタルの静弾性係数,引張強度は共に小阪 ら³⁾及び吉本ら⁴⁾の実験値より作成した式 (1),(2),(3)に示す近似式を用いて,セメント水比 より設定した。

$$E_m = 4.2421 f_{cm}^{\prime \ 0.4554} \tag{1}$$

$$f_{ptm} = 0.7766 f_{cm}^{\prime \ 0.4223} \tag{2}$$

$$f'_{cm} = 21.271(C/W) - 8.7091$$
(3)

ここに, *E_m*: モルタルの静弾性係数 (GPa),

*1 北海道電力㈱ 釧路支店新得電力所土木課 修士(工学)(正会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 修士(工学)(正会員)

*3 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻 博士(工学)(正会員)



図-3 モルタルの応力-ひび割れ幅関係

表 - 1 解析モデル

グループ	モデル名	原粗骨材 吸水率 (%)	新モルタル 水セメント 比 (%)	再生粗骨材 吸水率 (%)	付着モルタル			
					水セメント 比 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	付着率 (%)
Ν	Ν	1.0	50	-	-	-	-	0
R60	R60-30			3.169	60	2.29	8.23	30
	R60-50			4.615				50
	R60-100			8.230				100
R80	R80-30			-	80	-	-	30
	R80-50							50
	R80-100							100

表-2 モルタルの入力値

水セメント	引張強度	静弹性係数
比 (%)	(MPa)	(GPa)
50	3.44	21.1
60	3.11	18.9
80	2.63	15.8



図-5 再生コンクリートの構成

f_{ptm}: モルタルの純引張強度 (MPa), f'_{cm}: モ
 ルタルの圧縮強度 (MPa), C/W: セメント水
 比である。モルタルの破壊基準を図 - 2 に, モ
 ルタルの応力-ひび割れ幅関係を図 - 3 に示す。
 また 図中のf_{telem} は各要素の純引張強度を示す。

2.4 界面の材料特性値

山根ら⁵⁾によれば,骨材とモルタルの界面性 状は対象とする界面の外側に位置するモルタル の強度の影響を受ける。そこで,界面の純引張 強度は山根ら⁵⁾の実験値より作成した式(4)に示 す近似式を用いて,外側に位置するモルタルの

表-3 界面の入力値

水セメント 比 (%)	引張強度 (MPa)	粘着力 (MPa)	摩擦角 (deg)
50	1.34	3.13	
60	0.81	2.96	34
80	0.14	2.63	

圧縮強度より設定した。なお,ここで用いている圧縮強度は,式(3)より算出する。

f_{ti} = 0.0752 f'_{cm} - 1.2014 (4) ここに, f_{ti}: 界面の純引張強度 (MPa), f'_{cm}: 界面の外側に存在するモルタルの圧縮強度 (MPa)である。界面の破壊基準を図 - 4に示す。

粘着力は小阪ら³⁾の実験値より作成した式(5) に示す近似式を用いて,外側に位置するモルタ ルの水セメント比より設定した。

c = -0.0167(W/C)+3.9667 (5) ここに,c:粘着力 (MPa),W/C:水セメント 比(%)である。

なお,摩擦角は小阪ら³⁾の実験値より34°とした。また,界面には軟化域を与えないカットオフ型の応力-変位関係を用いている。

3. 解析モデル

本研究では,表-1に示す7種類の解析モデ





 300 µ
 600 µ
 最大応力時

 図 - 9
 Nのひび割れ図

ルを用意した。N が普通コンクリートであり, 残りの 6 種類が再生コンクリートである。表中 の表乾密度は水セメント比が 60%の時に表乾密 度が 2.29(g/cm³)であるという桂ら⁶⁾の実験値よ り設定した。吸水率は既往の研究⁷⁾より作成し た式(6)に示す近似式を用いて,表乾密度より設 定した。

 $W_a = 55.9 - 20.815 \rho$ (6) ここに, W_a :吸水率, ρ :表乾密度である。

本解析で,水セメント比,吸水率及び表乾密 度を設定し,それらの値を上述の式(1)から式(6) に代入し,解析に必要な強度及び弾性係数を求 めるのである。実際に得られたモルタルと界面 の入力値をそれぞれ表 - 2,3に示す。なお, 表 - 3中の水セメント比は界面の外側に位置す るモルタルの水セメント比である。

なお,本研究では粗骨材を全て円形としてモ デル化している(図-5)。実際の骨材は円形で はなく,かつモルタルは均等に付着していない。 この点に関する検討は今後の課題としたい。

4. 解析結果と考察

4.1 実験値との比較

図 - 6 に圧縮強度とモルタル付着率の関係を, 図 - 7 に圧縮強度の変動係数とモルタル付着率 の関係を示す。図には本解析モデルを作成する にあたり参考とした再生コンクリートの圧縮試 験結果⁸⁾も示されている。なお,式(1),(3),(5)は 材齢1週間程度を対象とした実験に基づき補完 した式であり,それゆえ,実験値も材齢7日目 のものを示した。実験の圧縮強度が解析のそれ より大きくなっているが(図 - 6),これは境界



図-10 破壊したバネ数(R80-50)



300 µ600 µ最大応力時図 - 1 1R80-50 のひび割れ図

条件の影響である。著者らは,載荷端面で拘束 を受けないコンクリート平板の圧縮強度は,端 部拘束を受ける円柱供試体の約70%程度である ことを予備実験により確認しており,この影響 を考慮すれば解析値と実験値はほぼ等しい。

図 - 7より,本解析における強度のばらつき は実験値と近い値になっていることが明らかで ある。なお,実験では10本のシリンダーの圧縮 試験からばらつきを求めているのに対し,解析 では,6回の解析によりばらつきを求めた。こ れは,普通コンクリートの解析において,圧縮 強度の変動係数は解析回数の増加に伴い小さく なり,解析数が6体でほぼ一定となったためで ある。

4.2 普通コンクリート(N)の圧縮破壊性状

図 - 8 は破壊基準に達したばねの数と応力レ ベルとの関係を,図-9はひび割れ図を示す。 応力レベルが 0.2 付近から界面の破壊が始まり, 0.4 付近から破壊を起こす界面のバネ数が大き く増加し始め,この時,モルタルのバネの破壊 が引き起こされている。ひび割れの発生状況の 観察から,最大応力付近まで界面の破壊とモル タルの破壊が交互に進行し,終局直前ではモル タルの破壊が支配的となり終局を迎えていたこ とがわかった。この界面の破壊が進行する時期 とモルタルの破壊が進行する時期が交互に見ら れると言うことは,破壊までに応力の再分配が 幾度と繰り返されていることを示している。

4.3 旧界面の強度が低い再生コンクリート (R80-30, R80-50)の圧縮破壊性状

図 - 10に R80-50 の破壊基準に達したばね の数と応力レベルとの関係を,図-11にひび 割れ図を示す。

R80-30, R80-50 は, 付着モルタルと原骨材間 (旧界面)の界面強度が低いために, 応力が小 さなレベルから旧界面にひび割れが発生する。 その破壊に起因し応力レベルが 0.2 付近から付 着モルタルの破壊が始まり, 応力レベル 0.3 付 近で付着モルタルの破壊が急激に増加した後, 応力レベルが 0.5 付近から新モルタルと旧モル タルとの界面(新界面)と新モルタルの破壊が 発生している。数度の応力の再分配を繰り返し て,最終的に新モルタルのひび割れが進行しコ ンクリート全体としての破壊に至った。

4.4 旧界面の強度が高い再生コンクリート (R60-30, R60-50)の圧縮破壊性状

図 - 12に R60-50 の破壊基準に達したばね の数と応力レベルとの関係を,図-13はひび 割れ図を示す。



図 - 1 3 R60-50のひび割れ図

R60-30, R60-50 は, R80-30, R80-50 よりも旧 界面の強度及び付着モルタルの強度が大きいた め, R80-50 のように旧界面の破壊が小さな荷重 レベルから始まることはなく,かつ領域全体で はなく限られた一部の領域に発生する傾向にあ る。応力レベルがほぼ0.3 から,旧モルタルと 付着モルタルにほぼ同程度の割合でひび割れが 発生している。旧界面の強度が低い場合には, 旧界面と新界面,ならびに,新モルタルと旧モ ルタルの破壊進行時期に差異が見られたが(図 -10参照),強度が高い場合,それらの破壊進 行レベルに差が見られなくなる。すなわち,一 種類の界面及びモルタルからなる普通コンクリ ートの破壊プロセスに近くなる。

図-7より,R60-30のばらつきが他と比較し て大きいことが明らかである。図-14は R60-30の6回の解析において最も大きな圧縮強 度を示した場合と,最も小さな圧縮強度を示し た場合のひび割れ図を示す。圧縮強度が高い場

(a) 大さい場合 (b) 小さい場合 図 - 1 4 R60-30 のひび割れ図

合には,ひび割れは全体に発生しているが,強 度が小さい場合には,ひび割れが局所的に発生 している。R60-30 は付着モルタルが少なく,2 つの界面間の距離が他と比べ近い。界面間の距 離が近く,2 つの界面の強度差が小さく,破壊 が同時に起こる場合には,骨材の配置の影響を 大きく受け,ばらつきが大きくなるものと思わ れる。すなわち,比較的粒径の小さい骨材が, 圧縮試験においてしばしば観察されるせん断破 壊面に一致するような角度で斜め方向に連続的 に配置されると(図-14の点線で囲まれる範 囲),ひび割れの進展を抑制すると思われる粒径 の大きな骨材が存在しないためにひび割れが急 激に発生かつ連結し,強度が小さくなる場合が ある。

4.5 静弹性係数

図 - 15 に静弾性係数と圧縮強度の関係を示 す。図には比較のため,実験値⁸⁾も示されてい る。解析値,実験値共に土木学会コンクリート



標準示方書⁹⁾による値と近い値となっている。 なお,静弾性係数には圧縮強度のようなばらつ きは小さく変動係数は全て 0.8%以内に収まっ ている。これは,図-16に示すように,荷重 が低い段階で破壊するバネ数のばらつきが小さ いことによる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 付着モルタルと原骨材間の界面強度(旧界面)及び付着モルタルの強度が大きければ 圧縮強度は大きくなるが,旧界面と新界面の距離が狭く2つの界面の強度差が小さければ,強度のばらつきが大きくなる。
- (2) 初期の応力 ひずみ関係は骨材配置の影響 を受けないため,静弾性係数には圧縮強度 のようなばらつきは見られない。

謝辞

本研究の遂行にあたり,角田與史雄教授,上 田多門助教授にご助言を賜った。ここに感謝の 意を表す。また,本研究は平成14年度産業技術 研究助成事業により実施したものである。

参考文献

- Nagai,K., Sato,Y. and Ueda,T.: Numerical Simulation of Fracture Process of Plain Concrete by Rigid Body Spring Method, Proceeding of the first *fib* congress 2002, CD3, session13, pp.99-106
- 2) 西沢紀昭:コンクリート用骨材(3・完), コンクリートジャーナル, Vol.5, No.7, pp.60-67, 1967
- 小阪義夫,谷川恭雄,太田福男:コンクリ ートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響(第 1報:モデル解析法による検討),日本建 築学会論文報告集,No.228,pp.1-11,1975
- 4) 吉本彰,長谷川博,川上正史:コンクリートおよびモルタルの純引張,圧裂および曲げ強度の比較,セメント・コンクリートNo.435,pp.42-48,1983
- 5) 山根洋之,大即信明,鬼塚良介,宮里心一:
 再生骨材コンクリート内部の界面の微小
 曲げ強度,第45回日本学術会議材料研究
 連合講演会講演論文集,pp.274-275,2001
- 6) 桂修,吉野利幸,鎌田英治:セメント硬化
 体の凍害機構モデル,コンクリート工学論
 文集, Vol.11, No.2, pp.49-62, 2000
- 7) 長瀧重義ほか: ライフサイクルを考慮した 建設材料の新しいリサイクル方法の開発, 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事 業研究成果報告書,2001
- 奥山英俊,佐藤靖彦,伊藤正澄,進藤邦雄: 再生粗骨材の品質が再生コンクリートの 圧縮強度に及ぼす影響,土木学会第56回 年次学術講演会講演概要集,pp.392-393, 2000
- 9) コンクリート標準示方書 [構造性能照査 編], 土木学会, 2002