

高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた 鉄筋コンクリート部材の耐震性能に関する研究

破壊形式と靱性能

STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS USING HIGH-STRENGTH LIGHT-WEIGHT CONCRETE

Failure mode and ductility

金久保利之*, 園部泰寿**

Toshiyuki KANAKUBO and Yasuhisa SONOBE

The previous data of 115 high-strength light-weight concrete and 330 normal concrete specimens are discussed statistically to investigate the ductility of light-weight concrete members. From the results, observed failure modes and critical ductility factor are generally confirmed using the calculated values of shear and bond capacities. The critical ductility factor observed for light-weight concrete members is about 90 % and 40 % of the normal concrete members in case of shear failure and concrete compression failure, respectively. The critical ductility factor of light-weight concrete members could be calculated using the values of capacities and other variables in spite of different failure modes.

Keywords : high-strength light-weight concrete, failure mode, critical ductility factor, shear capacity, bond capacity

高強度軽量コンクリート, 破壊形式, 限界塑性率, せん断余裕度, 付着余裕度

§1. はじめに

近年, 設計基準強度が 360 kgf/cm^2 程度の高強度の軽量コンクリート1種(以下, 軽量コンクリートと略記)を使用した鉄筋コンクリート部材の構造実験が多数実施され, 剛性, ひび割れ強度, 各終局強度等の基本的な構造性能については明確になってきている¹⁾。これらの結果をふまえ, 高強度軽量コンクリート構造の実用化のためには, 終局強度の考え方にに基づき, 靱性を有する部材の設計条件を整えることが急務であると考えられる。

普通コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材においても, 部材の靱性を定量的に評価する方法は現在発展段階にある。現在提案されている方法は, せん断あるいは付着強度(応力)の, 曲げ強度(曲げ強度時の主筋の平均付着応力度)に対する比(以下, 余裕度と称する)を用いる方法, トラスおよびアーチ機構に基づく方法, およびその他の力学的モデルによる方法の3種に大別されると思われる²⁾。いずれの方法においてもそれぞれ長所, 短所があり, 決定的な方法はいまだ確立されるに至っ

ていない。この中で現在設計指針に記述されている代表的な方法としては, 余裕度による方法³⁾およびトラス・アーチ機構による方法⁴⁾が挙げられる。これらの方法は計算が容易であり, 実務設計に反映させやすい利点を持っている反面, 前者は力学的意味が明確でなく, 後者については現在せん断系の破壊に対してのみで付着系破壊には適用されないという短所を持っている。

本研究では, 軽量コンクリートを用いた梁および柱部材の靱性能を把握することを目的とする。しかし, 普通コンクリート部材においても明確に評価されていない項目について, 軽量コンクリート部材に限って検討を行うことは意味のあるものとは考えられない。したがって, まず普通コンクリート部材の靱性能について定性的に傾向を把握した後, 普通コンクリート部材と軽量コンクリート部材の差を定量的に把握することとする。また, 靱性能と破壊形式には密接な関係があると推測されるので, まず破壊形式に対する検討を行い, その後靱性能の検討を行う。

* 筑波大学大学院 大学院生・修士(工学)

** 筑波大学構造工学系 教授・博士(工学)

Graduate Student, Univ. of Tsukuba, M. Eng.

Prof., Institute of Engineering Mechanics, Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.

本研究では、普通コンクリート部材の靱性能を定性的に把握する方法として、余裕度による方法を選択した。これは、計算が容易であると同時にすべての破壊形式に対して検討が行えることを考慮したためである。定性的な傾向の把握を目的とするので、力学的意味付けはさほど重要でないと考えられる。また、靱性能を表す1つの尺度として、バックデータが豊富である限界変形および限界塑性率（定義は§4. 参照）を選択した。その他の要因については機会を改めて論じたい。

§2. 検討試験体

2.1 検討試験体の概要

検討の対象とした軽量コンクリート梁および柱試験体の出典、試験体数、コンクリート圧縮強度 (σ_B) の範囲を表一1に示す^{5)~15)}。表中には同一シリーズで実験が行われた普通コンクリート試験体もあわせて示した。試験体総数は、梁7シリーズ78体、柱4シリーズ64体で、そのうち軽量コンクリート試験体は梁55体、柱60体、計115体である。比較対象とする普通コンクリート試験体については前記実験シリーズの計27体のみでは不十分であるので、既往の実験結果から適宜補充しなければならないと考えられる。この際、過去のすべてのデータを閲覧し検討に加えることが最善の方法と考えられるが、物理的に困難である。したがって本研究では、梁試験体については、産学官の共同研究による「高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造研究開発プロジェクト」によって行われた梁実験シリーズ（以下、HFWシリーズと略記）を、柱試験体については、建設省総合プロジェクト「鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究」によって行われた柱実験シリーズ（以下、短柱シリーズと略記）を取りあげた（個々の実験シリーズの文献は割愛するが、HFWシリーズは文献16）に、短柱シリーズは文献17）に概要が示されている）。上記の資料を用い

た理由は、軽量コンクリートの目標とする設計基準強度 360 kgf/cm^2 と同程度のコンクリート圧縮強度を有する試験体が多いこと、各々のプロジェクト内で加力方法、加力履歴がある程度統一されていること、個々の実験シリーズの文献に、計算に必要とされる情報、破壊形式、限界変形、限界塑性率（定義は§4. 参照）が明記されていること等による。本研究では上記実験シリーズの中で、主筋に丸鋼を用いた試験体、袖壁を有する試験体および特殊な履歴で加力が行われた試験体を除いた計303体の普通コンクリート試験体について検討を行った。したがって、軽量コンクリート実験シリーズで行われた27体の普通コンクリート試験体とあわせて、計330体の普通コンクリート試験体を比較検討の対象とした。

2.2 検討変数と試験体諸元の範囲

本研究では、破壊形式および靱性能について余裕度による検討を行うことを目的とするが、例えば同じ余裕度を持つ試験体間でもせん断スパン比がより小さい試験体の方がせん断破壊しやすい等、余裕度以外の因子が関係している（計算上、せん断スパン比の値が変われば余裕度の値も変化するが、余裕度の値の変化以上にある1つの変数の影響度が高い）ことが考えられる。したがって、表一2に示す10の変数 ($V_1 \sim V_{10}$) について検討を行った。これらの変数の説明と若干の検討を以下に述べる。

せん断強度に対する余裕度（以下、せん断余裕度と称する）は V_1, V_2 の2つで、 V_1 は修正大野・荒川 mean 式¹⁸⁾に対するせん断余裕度 ($cQ_{su,mean}/cQ_{mu}$)、 V_2 は学会A法⁴⁾に対するせん断余裕度 ($cQ_{su,A}/cQ_{mu}$) である。ただし学会A法により計算するにあたっては、部材両端に降伏ヒンジを計画し、降伏ヒンジ領域の回転角を $R_p = 0.02$ とした。このことは、検討対象試験体の大半が曲げ降伏後に破壊に至っており、したがって計算上せん断余裕度の値が1を超える試験体については、付着割裂破壊が生じなければ、変形の限界として部材角 $R = 0.02$

表一1 軽量コンクリート試験体の出典と試験体数

Researcher	Literature	B/C *1	Loading Cycle *2	Specimen Number	Lightweight Specimen		Normal Specimen	
					Number	σ_B (kgf/cm ²)	Number	σ_B (kgf/cm ²)
Fujisawa et al.	5)	B	Cyc.	12	9	225-432	3	226
Simizu et al.	6)	B	Cyc.	6	6	227-342	0	-
Matsuzaki et al.	7),8)	B	Cyc./Mono.	24	17	346-356	7	336
Authors	9)	B	Cyc.	12	9	359-380	3	346
Authors	10)	B	Cyc.	4	4	376	0	-
Tano et al.	11)	B	Cyc./Mono.	10	5	315-340	5	315-340
Takasaka et al.	12)	B	Cyc./Mono.	10	5	315-340	5	315-340
Hirosawa et al.	13)	C	Cyc.	14	14	228-267	0	-
Muguruma et al.	14)	C	Mono.	25	25	308-405	0	-
Authors	15)	C	Cyc.	18	14	380-400	4	379-400
Authors	10)	C	Cyc./Mono.	7	7	297	0	-

*1: B=Beam Specimen, C=Column Specimen *2: Cyc.=Cyclical Loading, Mono.=Monotonous Loading

表一 検討の対象とした変数と範囲

Variable		V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇	V ₈	V ₉	V ₁₀
		$\frac{cQ_{su,mean}}{cQ_{mu}}$	$\frac{cQ_{su,A}}{cQ_{mu}}$	$\frac{cQ_{b,s}}{cQ_{mu}}$	σ_B (kgf/cm ²)	M/QD	σ_y (kgf/cm ²)	p _t (%)	p _w (%)	σ_{wy} (kgf/cm ²)	η_0
Maximum	N	1.661	1.700	2.537	503	3.00	10700	1.91	2.44	14320	0.58
	L	1.864	2.660	2.963	432	2.50	10230	3.87	1.51	14320	0.44
Minimum	N	0.290	0.178	0.315	124	1.00	3500	0.34	0.00	2560	-0.11
	L	0.288	0.169	0.277	225	1.00	3650	0.61	0.00	2130	0.00
Average	N	1.057	0.849	1.030	263	1.92	4710	0.88	0.74	4220	0.11
	L	0.787	0.601	0.946	336	1.81	5510	1.48	0.50	5180	0.13
σ_{n-1}	N	0.274	0.295	0.337	72	0.51	1980	0.41	0.36	2520	0.11
	L	0.350	0.440	0.595	53	0.50	2410	0.81	0.36	4010	0.14

rad. をとったことになる。付着割裂強度に対する余裕度（以下、付着余裕度と称する）は $V_3 (cQ_{b,s}/cQ_{mu})$ で、付着割裂強度計算式として柴田・桜井式¹⁹⁾を選択した。なお、曲げ強度 (cQ_{mu}) は e 関数法により算出し（後述）、材料強度にはすべて材料試験による実測値を用いて計算した。また、HFW シリーズの梁試験体の中にはスラブを有する試験体が多いが、スラブの影響は無視した。

せん断および付着強度計算式は前述以外に現在多数提案されており、本研究においても、せん断強度として大野・荒川 min 式および学会 B 法、付着割裂強度として森田・藤井式、終局強度型指針式および小谷・前田らの提案する式²⁰⁾についても検討を行ったが、§3., 4 の検討で $V_1 \sim V_3$ よりも有意差が少なかったので省略する。

軽量コンクリート試験体にこれらの余裕度を適用する前提として、軽量コンクリート部材の曲げ、せん断、付着割裂強度が計算値に対してどのような位置にあるかを把握することが必要である。曲げ強度に関しては筆者らにより、コンクリート拘束効果の差により普通コンクリート部材よりも低下することが確認されている²¹⁾。しかし、文献 21) で行われた断面解析を全試験体に対して行うことは容易ではないので、せん断補強筋量の多少により拘束効果によるコンクリート圧縮強度の増加分を評価し（文献 21) 参照）、普通コンクリート部材に比して軸力比を増大させ、 e 関数法により曲げ最大強度を求めた。この方法により同一諸元の普通コンクリート部材の曲げ強度に対しておよそ 2~10 %、軽量コンクリートの曲げ強度が小さく計算される。せん断強度に関しては過去の研究^{8), 22)}を考慮し、計算値をそのまま使用した。付着割裂強度に関しては、普通コンクリート部材より小さいとする報告²⁴⁾と同等とする報告²⁴⁾があり、現在明確ではない。したがって、本研究ではせん断強度と同様特に補正を行わずに計算値をそのまま用いた。

変数 $V_4 \sim V_{10}$ は試験体諸元に関する項目でそれぞれ、コンクリート圧縮強度 (σ_B)、せん断スパン比 (M/QD)、主筋降伏強度 (σ_y)、引張主筋比 (p_t)、せん断補強筋比 (p_w)、せん断補強筋降伏強度 (σ_{wy}) および軸力比 (η_0 : 軸応力

度のコンクリート圧縮強度に対する比) である。

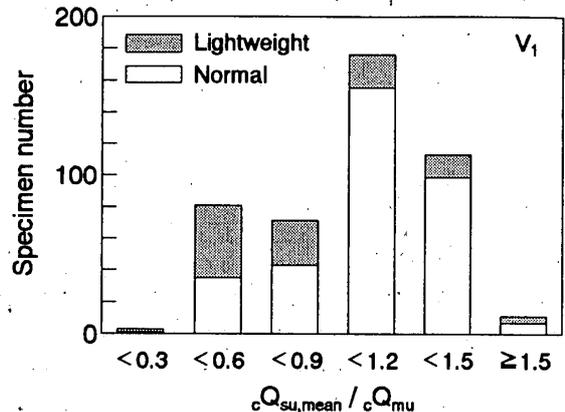
変数 $V_1 \sim V_{10}$ の全試験体に対する最大値 (Maximum)、最小値 (Minimum)、平均値 (Average)、標準偏差 (σ_{n-1}) を表一に示す。行上段が普通コンクリート試験体 (N) の、下段が軽量コンクリート試験体 (L) の値を示している。また、変数 V_1, V_5, V_{10} について、横軸に変数の範囲、縦軸に試験体数を取り、それらの分布状況を図一および図二に示す。普通コンクリート試験体と軽量コンクリート試験体間でおおむね同様な分布を示しているが、軽量コンクリート試験体の V_1, V_{10} で、横軸の第 2 の範囲で若干試験体数が多い分布になっている。

§3. 破壊形式の判別

靱性能の検討を行う 1 つのアプローチとして、まず試験体の破壊形式の判別を試みた。破壊形式は個々の実験シリーズの報告を参考にし、以下の 5 つに区別した。

- DT: せん断斜張力破壊
- ST: せん断引張破壊
- BO: 付着割裂破壊
- SC: せん断圧縮破壊
- FC: 曲げ圧縮破壊

各試験体の破壊形式の実験結果は、原則として実験者により報告されている破壊形式を採用した。1 つの試験



図一 各試験体の変数の分布状況 (V₁)

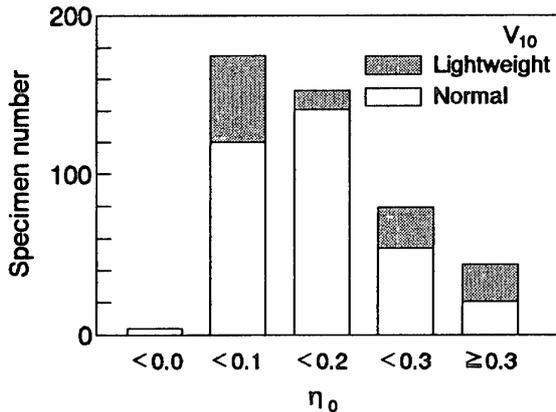
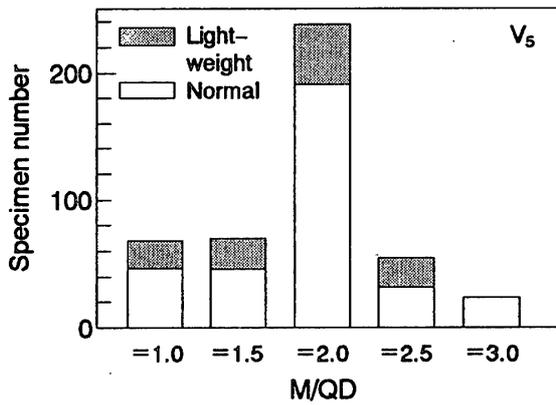
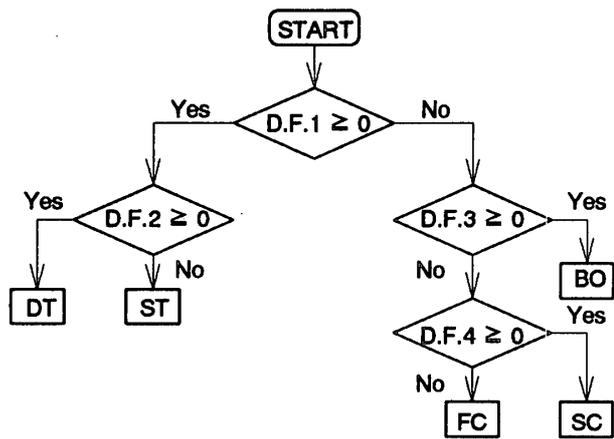


図-2 各試験体の変数の分布状況 (V_5, V_{10})

体で複数の破壊形式が報告されている試験体については、筆者が荷重-変形曲線およびひび割れ状況を確認し、卓越していると思われる形式を適宜選択したが、その数は少数であった。

判別の方法として、マハラノビスの汎距離法 (付録1)²⁵⁾ を用い、 F 値 (付録2)²⁶⁾ により各変数の有意差を判別した。判別のフローチャートを図-3に、普通コンクリート試験体の判別の際に F 値が比較的大きく、判別に使用した変数を○で表-3に示す。判別の順序はまず、判別段 D.F. 1 によっておおまかにせん断破壊系と付着割裂破壊および圧縮破壊系に分け、次に判別段 D.F. 2 によりせん断斜張力破壊 (DT) とせん断引張破壊 (ST) を、判別段 D.F. 3 により付着割裂破壊 (BO) を判別した。最後に判別段 D.F. 4 によりせん断圧縮破壊 (SC) と曲げ圧縮破壊 (FC) を判別した。

各判別段で使用した変数を見ると、すべての判別段で



$$\begin{aligned}
 D.F.1 &= -2.99 V_1 + 0.785 V_3 + 1.04 \times 10^{-2} V_4 - 2.26 V_5 \\
 &\quad + 3.27 \times 10^{-4} V_6 + 0.112 V_7 - 2.83 V_8 \\
 &\quad - 4.97 \times 10^{-4} V_9 + 5.62 \\
 D.F.2 &= -4.35 V_1 - 1.47 V_5 + 40.0 V_{10} + 2.29 \\
 D.F.3 &= 0.463 V_1 - 3.67 V_3 - 3.84 \times 10^{-3} V_4 - 3.46 \times 10^{-4} V_6 \\
 &\quad + 3.26 V_7 + 2.97 \\
 D.F.4 &= -0.478 V_2 - 0.264 V_5 - 8.38 V_{10} + 2.22
 \end{aligned}$$

図-3 判別フローチャート

せん断余裕度 (V_1, V_2) が、付着割裂破壊を判別する D.F. 3 で付着余裕度 (V_3) が比較的有効であり、余裕度によりある程度の判別が可能であることを示している。しかしながら、その他の変数の影響もあり、一概に余裕度のみで判別できるとすることは難しい。

普通コンクリート試験体の判別結果 (横軸: 破壊形式の実験結果, 縦軸: 試験体数の割合) を、図-4に示す。1つの破壊形式実験結果に対し、5つの判別結果が示されており、実験結果と判別結果が等しい試験体についてその割合を数字で示した。実験結果がせん断斜張力破壊 (DT) と報告されている試験体については、その他の形式に判別される試験体が多いが、せん断引張破壊 (ST) および付着割裂破壊 (BO) は実験結果と判別結果がよく対応している。また、せん断圧縮破壊 (SC) および曲げ圧縮破壊 (FC) は互いに誤判別される割合が大きい。これらの結果はそれぞれの破壊形式の1つの性状を示しているものと思われ、せん断斜張力破壊は他の形式とは異なる性状を、せん断圧縮破壊と曲げ圧縮破壊とは共通した性状を示していると考えられる。

各々の形式に判別された試験体に対して、大野・荒川

表-3 破壊形式の判別に用いた変数

Variable	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}
	$\frac{c_{su,mean}}{c_{mu}}$	$\frac{c_{su,A}}{c_{mu}}$	$\frac{c_{b,s}}{c_{mu}}$	σ_B (kgf/cm ²)	M/QD	σ_y (kgf/cm ²)	p_t (%)	p_w (%)	σ_{wy} (kgf/cm ²)	η_0
D.F. 1	○	-	○	○	○	○	○	○	○	-
D.F. 2	○	-	-	-	○	-	-	-	-	○
D.F. 3	○	-	○	○	-	○	○	-	-	-
D.F. 4	-	○	-	-	○	-	-	-	-	○

mean 式によるせん断余裕度 ($cQ_{su,mean}/cQ_{mu} = V_1$) と柴田・桜井式による付着余裕度 ($cQ_{b,s}/cQ_{mu} = V_2$) の重心 (平均値) と標準偏差 (σ) をそれぞれ計算し、各試験体が 87% 程度含まれる範囲として重心から $\pm 1.5\sigma$ の領域を、横軸にせん断余裕度、縦軸に付着余裕度をとり図-5 に示す。各領域の大部分が重なり合っており、前述のように余裕度の値のみで明確に判別することは難しい。しかし、おおむね両余裕度の値が 1 近辺の範囲に境界が集中しており、せん断余裕度が 1 より小さい範囲でせん断引張破壊 (ST)、1 より大きい範囲でせん断圧縮破壊 (SC) または曲げ圧縮破壊 (FC)、せん断余裕度が 1 付近でかつ付着余裕度が 1 より小さい範囲で付着割裂破壊 (BO) に分割されると推測される。

次に、普通コンクリート試験体に対して行われた判別と同一の判別を、軽量コンクリート試験体に対して行った。判別のフローチャート、判別関数は図-3 に示されるものと同一である。判別結果を、図-4 と同様に図-6 に示す。図-4 と比較すると、せん断斜張力破壊 (DT) を除いて正診される (実験結果と判別結果が等しい) 試験体の割合は普通コンクリート試験体の場合と大差なく、同一諸元での試験体間であれば、普通コンクリートと軽量コンクリート試験体とで破壊形式に差がないとい

える。したがって、図-5 の領域分布を用いて、軽量コンクリート試験体についても破壊形式の傾向を予測できると考えられる。せん断斜張力破壊については、軽量コンクリート試験体の方が判別結果のとおり破壊する試験体が多く、普通コンクリートよりせん断斜張力破壊しやすい傾向がうかがえる。

§4. 限界塑性率の検討

限界塑性率 (μ) は、限界変形を曲げ降伏時の変形で除した値と定義する。限界変形および曲げ降伏時の変形は実験者により報告されている値とした。限界変形の定義は、各実験シリーズ間では統一されており、一定変形での第 1 (単調加力の場合も含む) または第 2 サイクルの荷重が最大荷重の 80% より低下した点または第 10 サイクルの荷重が最大荷重の 50% より低下した点の変形となる。曲げ降伏時の変形は、梁試験体は荷重-変形曲線の包絡線を 3 本の直線で近似したときの、第 2 直線と第 3 直線の交点から求める方法、柱試験体は主筋の降伏がみられたときの変形を採用しているものが多い。実験者により報告されていない場合は、荷重-変形曲線が記載されているシリーズについては筆者が図から読みとり、記載されていない試験体については検討の対象外とした。また、曲げ降伏以前に破壊に至った試験体の降伏時変形は、文献 (27) による曲げ降伏時の剛性低下率の計算式を用いて計算される値とした。

4.1 普通コンクリート試験体の限界塑性率

各試験体の観測された破壊形式ごとに、表-2 に示される変数を用いて、限界塑性率 (μ) に対して重回帰分析 (付録 3)²⁶⁾ を行い、 F 値により各変数の有意差を判定した。普通コンクリート試験体の分析の際に F 値が比較的大きく分析に使用した変数を、重回帰分析の結果とともに表-4 に示す。各破壊形式で使用した変数をみると、全破壊形式においてせん断余裕度 ($cQ_{su,mean}/cQ_{mu} = V_1$) が、付着割裂破壊において付着余裕度 ($cQ_{b,s}/cQ_{mu}$

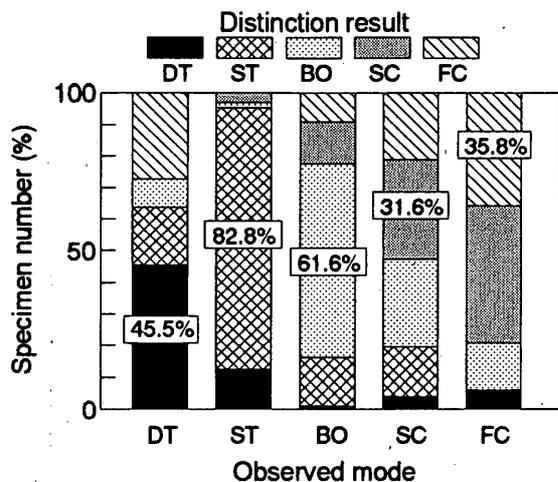


図-4 判別結果 (普通コンクリート試験体)

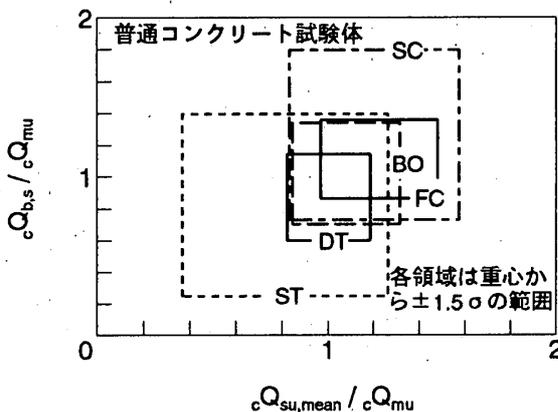


図-5 各破壊形式の占める領域

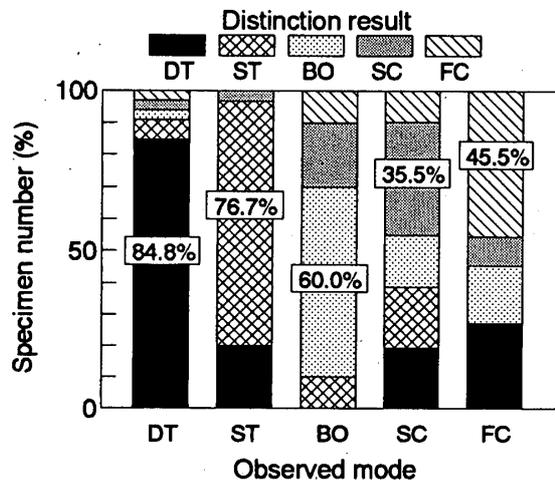


図-6 判別結果 (軽量コンクリート試験体)

表—4 限界塑性率の検討に用いた変数

Variable	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇	V ₈	V ₉	V ₁₀
	$\frac{c_{Q_{su,mean}}}{c_{Q_{mu}}}$	$\frac{c_{Q_{su,A}}}{c_{Q_{mu}}}$	$\frac{c_{Q_{b,s}}}{c_{Q_{mu}}}$	σ_B (kgf/cm ²)	M/QD	σ_y (kgf/cm ²)	p _t (%)	p _w (%)	σ_{wy} (kgf/cm ²)	η_0
DT	○	-	-	-	○	-	-	-	-	-
ST	○	-	-	○	○	-	-	○	○	-
BO	○	-	○	-	○	-	-	-	-	-
SC	○	-	-	○	○	-	-	○	○	-
FC	○	-	-	○	○	○	○	○	○	-

DT : $\mu = 6.86 V_1 + 2.75 V_5 - 7.29$

ST : $\mu = 5.90 V_1 + 3.02 \times 10^{-3} V_4 + 2.86 V_5 + 3.00 V_8 + 5.10 \times 10^{-4} V_9 - 9.69$

BO : $\mu = 1.24 V_1 + 1.43 V_3 - 0.123 V_5 + 1.44$

SC : $\mu = 3.51 V_1 + 2.09 \times 10^{-2} V_4 + 1.36 V_5 + 0.935 V_8 + 3.07 \times 10^{-5} V_9 - 6.81$

FC : $\mu = 3.19 V_1 + 9.64 \times 10^{-3} V_4 - 1.73 V_5 - 4.94 \times 10^{-3} V_6 + 0.847 V_7 + 0.750 V_8 + 1.69 \times 10^{-3} V_9 + 14.71$

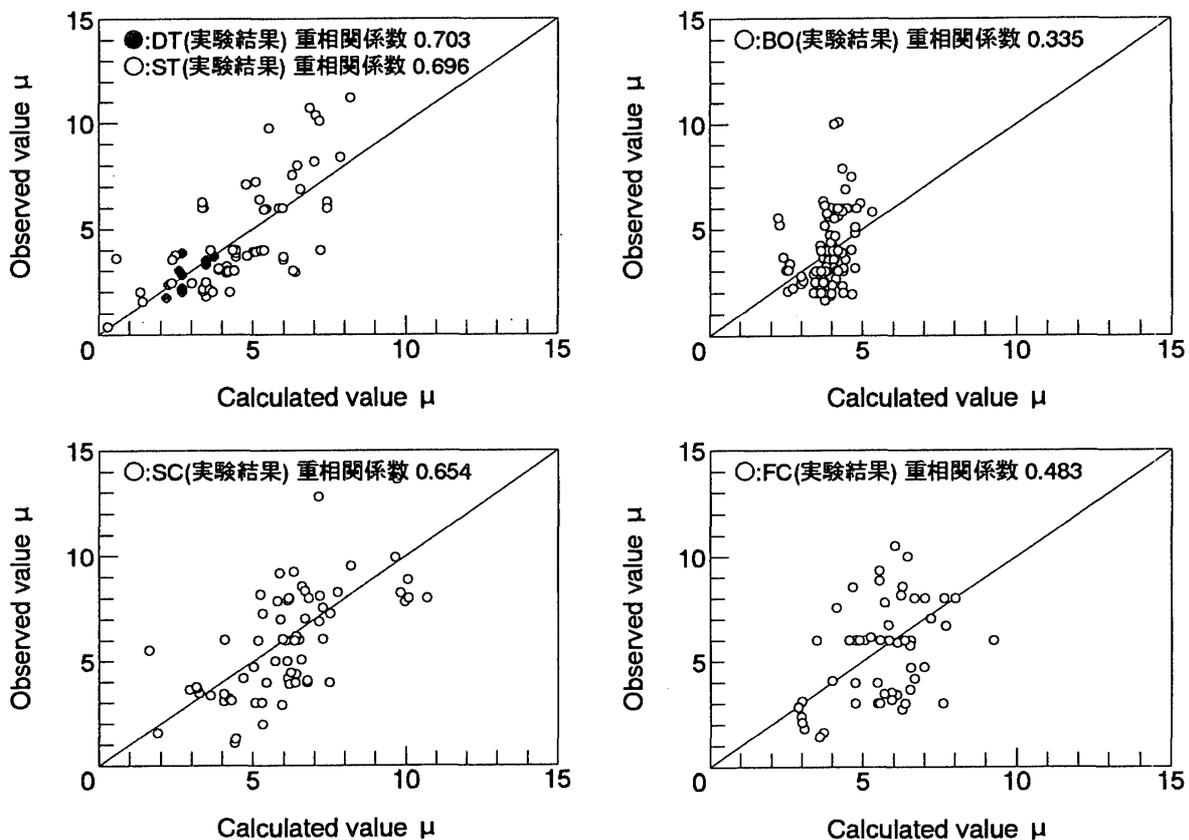
= V₃)が比較的有効であり、余裕度により限界塑性率の予測がある程度可能であることを示している。しかしながら、破壊形式の判別と同様その他の変数の影響もあり、一概に余裕度のみで予測できるとすることは難しい。

普通コンクリート試験体について、重回帰分析の結果を用いて計算した限界塑性率(μ)と、限界塑性率の実験結果を比較して、破壊形式(実験結果)ごとに図—7に示す。重相関係数は小さいもので0.34程度であるが、標本数を考慮すると(DT:10, ST:60, BO:112, SC:69, FC:67)、せん断斜張力破壊(DT)に対しては危険率2%²⁶⁾で、その他の破壊形式に対しては危険率

0.1%で有意差がみられる。重相関係数の値のみを比較すると、付着割裂破壊(BO)についてはあまりよい相関がみられないが、付着割裂破壊を生ずる試験体の荷重-変形曲線は逆S字型のエネルギー吸収能の小さい曲線になるものの、各サイクルピーク時の荷重は急激に低下しない試験体が多く、限界塑性率だけでは靱性を評価し得ないこと、本研究では特に考慮をしていない加力繰返し数の影響が大きいこと等の要因によるものと思われる。

4.2 軽量コンクリート試験体の限界塑性率

軽量コンクリート試験体に対して、表—4に示される



図—7 限界塑性率の実験値と計算値の比較(普通コンクリート 試験体)

普通コンクリート試験体に対して行った重回帰分析の結果を用いて計算される限界塑性率(μ)と、限界塑性率の実験値の比較を行った。限界塑性率の実験値と計算値の関係を、図-8に示す。相関係数を、標本数(DT:15, ST:19, BO:10, SC:23, FC:8)を考慮して検討すると、せん断斜張力破壊(DT), せん断引張破壊(ST), 付着割裂破壊(BO), せん断圧縮破壊(SC), 曲げ圧縮破壊(FC)の順にそれぞれ危険率5, 0.1, 5, 0.1, 10%で有意差がみられる。同図中の直線の勾配は計算値に対する実験値の比較値の平均を示しており、これらの値が軽量コンクリート部材の普通コンクリート部材に対する限界塑性率の評価になり得る。普通コンクリート部材に対して行った分析のうち、0.1%の危険率で有意差がみられ、かつ重相関係数の比較的小さい付着割裂破壊(BO)を除いた破壊形式について考察すると、せん断引張破壊(ST)およびせん断圧縮破壊(SC)については軽量コンクリート部材の限界塑性率は普通コンクリート部材の9割程度、曲げ圧縮破壊(FC)については4割程度である。曲げ圧縮破壊については、筆者らの研究²¹⁾により、曲げ強度と同様コンクリートの拘束効果の差により限界の変形能が小さくなる傾向にあることが解明されており、その結果を裏付けている。

以上の検討により、軽量コンクリート部材の限界塑性率は、破壊形式により普通コンクリート部材との差が異

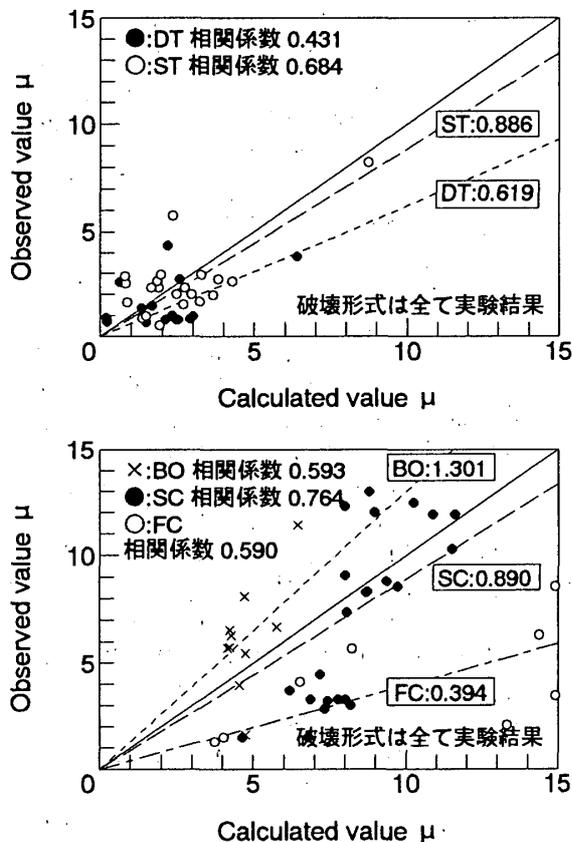


図-8 限界塑性率の実験値と計算値の比較(軽量コンクリート試験体)

なることが考えられるので、すべての軽量コンクリート試験体について、表-2に示す全変数を用いて限界塑性率に対して重回帰分析を行った。分析の結果を用いて計算した限界塑性率(μ)と、限界塑性率の実験結果を比較して、重回帰分析の結果とともに図-9に示す。重相関係数は標本数が多いにもかかわらず、図-7および図-8の係数値よりかなり大きな値を示しており、この結果を用いて軽量コンクリート部材の限界塑性率をある程度予測することが可能である。

§5. 加力履歴の影響に対する考察

§3., §4.の検討においては、破壊形式および限界塑性率に影響を与えると考えられる加力履歴の影響は考慮されていない。普通コンクリート試験体に対する重回帰分析の結果、重相関係数が最も小さかった付着割裂破壊を生じた試験体については、特に加力履歴の影響が少なくないと考えられる。

普通コンクリート試験体について、破壊形式の判別結果における正診率(実験結果と判別結果が等しい率)、および限界塑性率(μ)実験値の、重回帰分析の結果を用いて計算される限界塑性率に対する比の平均値を、加力繰返し数(Cycle数)により分けて、表-5に示す。表中()はその項目に該当する試験体数を示す。

正診率に関して、付着割裂破壊(BO)の試験体については繰返し数が多くなるほど正診率が大きくなる傾向がみられるが、その他の破壊形式については明確な傾向がみられない。また、限界塑性率については、繰返し数が2以上20未満($2 \leq \text{Cyc.} < 20$)の項目において、全破壊形式とも計算値が実験値に対して小さくなる傾向にある。これらの結果は母集団の分布に要因があり、繰返し数で母集団を分割するとその母集団自体の性質が異なってしまうためである。すなわち、本検討で対象とした普

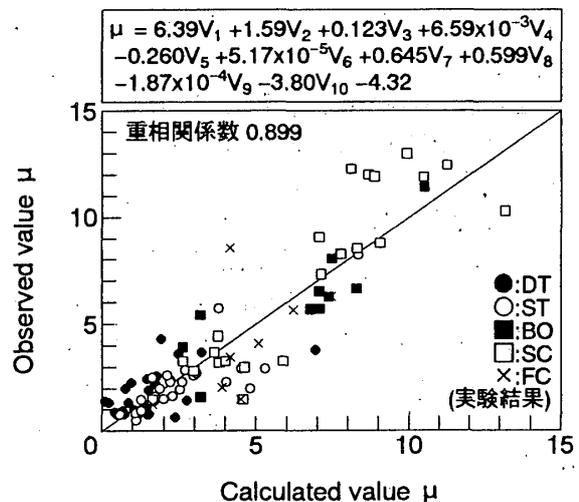


図-9 軽量コンクリート試験体の限界塑性率の実験値と計算値の比較(全変数)

表—5 加力繰返し数別にみた検討結果

Cycle数 MODE	破壊形式の判別による正診率(%)				μ の実験値の計算値に対する比の平均値			
	Mono.	2 \leq Cyc.<20	Cyc. \geq 20	Total	Mono.	2 \leq Cyc.<20	Cyc. \geq 20	Total
DT	50 (2)	60 (5)	25 (4)	45.5 (11)	0.81 (1)	1.04 (5)	0.99 (4)	1.00 (10)
ST	100 (17)	91 (22)	64 (25)	82.8 (64)	0.82 (14)	1.45 (21)	0.94 (25)	1.09 (60)
BO	38 (8)	52 (23)	67 (81)	61.6 (112)	0.87 (8)	1.27 (23)	0.94 (81)	1.00 (112)
SC	50 (8)	28 (29)	31 (39)	31.6 (76)	0.77 (1)	1.16 (29)	0.92 (39)	1.02 (69)
FC	50 (2)	33 (3)	36 (62)	35.8 (67)	1.12 (2)	1.30 (3)	1.03 (62)	1.05 (67)

MODE は実験結果、()は該当する試験体数を示す (例えば正診率の項の 50 (2) は2体中1体が正診されたことを示す)

通コンクリート試験体は、HFW シリーズおよび短柱シリーズの 2 シリーズが大部分であり、HFW シリーズの試験体は繰返し数 2 以上 20 未満の項に、短柱シリーズの試験体は繰返し数 20 以上の項に大部分が含まれるためである。加力履歴に対する考察を §3., §4. と同様検討するためには、更なるデータの蓄積が必要である。

§6. まとめ

既往の軽量コンクリートおよび普通コンクリート梁、柱試験体の破壊形式および限界塑性率に着目し、せん断余裕度、付着余裕度およびその他の構造因子を用いて検討を行った。特に軽量コンクリート試験体と普通コンクリート試験体との差異を定量的に把握することを目的とし、統計的な解析を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 軽量コンクリート部材の個々の破壊形式は、余裕度および試験体各諸元を要因と見たときには、普通コンクリート部材と大差はない。
- 2) 余裕度を用いて、ある程度の破壊形式の分類が可能である。
- 3) 軽量コンクリート部材の限界塑性率は、曲げ強度を適宜評価した余裕度、および試験体各諸元を要因と見たときには、せん断引張破壊およびせん断圧縮破壊の場合は普通コンクリート部材の 9 割程度、曲げ圧縮破壊の場合は 4 割程度である。
- 4) 余裕度および試験体各諸元の値を用いて、軽量コンクリート部材の限界塑性率が予測可能である。

謝 辞

本研究で検討に用いた軽量コンクリート試験体の詳細なデータは、日本建築学会「高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた建築物の設計と施工」に負うところが大きい。高強度人工軽量骨材小委員会委員および関係各位に謝意を表します。また、データの統計的処理にご協力いただいた、筑波大学文芸・言語研究科 金久保紀子氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会：高強度人工軽量骨材コンクリートを用い

た建築物の設計と施工, 1992. 12

- 2) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能, 1990. 10
- 3) 日本建築センター：中高層ラーメン鉄筋コンクリート造設計施工指針・同解説, 1987. 10
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990. 11
- 5) 藤沢正視, 市川昌和, 山下時夫：軽量コンクリートを用いた T 形ばりの靱性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp. 599~602, 昭和 63 年 10 月
- 6) 清水 泰, 松岡洋行, 西川孝夫：軽量コンクリートを用いたはりのせん断耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp. 199~202, 昭和 63 年 10 月
- 7) 松崎育弘, 鈴木英之, 稲永英治：人工軽量骨材を用いた RC 梁のせん断性状に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp. 197~198, 昭和 63 年 10 月
- 8) 磯 雅人, 松崎育弘ほか 2 名：人工軽量骨材を用いた RC 梁のせん断性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp. 409~410, 1989. 10
- 9) 日本建築学会：高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた建築物の設計と施工, pp. 197~207, 1992. 12
- 10) 中村佳史, 金久保利之, 園部泰寿ほか 3 名：高強度軽量コンクリートおよび 13 000 kgf/cm² 級の高強度せん断補強筋を用いた RC 部材の耐震性能に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp. 529~530, 1992. 8
- 11) 田野健治, 松崎育弘ほか 2 名：高強度鉄筋の開発に関する研究 その 24—高強度人工軽量コンクリートを用いた RC 梁のせん断実験一, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp. 527~528, 1992. 8
- 12) 高坂 信, 松崎育弘ほか 2 名：人工軽量骨材と 13 000 kgf/cm² 級の高強度せん断補強筋を用いた RC 梁部材のせん断性状に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp. 531~532, 1992. 8
- 13) 広沢雅也, 池田昭男, 山田国正：軽量骨材を用いた鉄筋コンクリート柱の破壊試験報告, 日本建築学会論文報告集号外, pp. 325~326, 昭和 42 年 10 月
- 14) 六車 照, 富永 恵, 渡辺史夫：軽量 RC 柱のせん断破壊性状と 2, 3 の考察, セメント技術年報, pp. 357~362, 昭和 46 年
- 15) 日本建築学会：高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた建築物の設計と施工, pp. 222~237, 1992. 12
- 16) HFW 研究推進委員会：中高層壁式ラーメン鉄筋コンク

- リート造の耐震性能に関する一連の研究結果，季刊コラム，No.112，平成1年3月
- 17) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料，pp.62~85，昭和62年9月
 - 18) 広沢雅也，後藤哲郎：軸力をうける鉄筋コンクリート部材の強度とねばり（その1. 矩形断面をした耐力壁の実験結果），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.817~818，昭和46年
 - 19) 柴田拓二，桜井修次：正負繰返加力を受ける鉄筋コンクリート柱の付着割裂耐力推算式，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1769~1770，昭和53年
 - 20) 小谷俊介，前田匡樹，青山博之：鉄筋コンクリート部材の付着割裂破壊に関する研究（その1 付着割裂強度），日本建築学会大会学術講演梗概集，C構造Ⅱ，pp.921~922，1992.8
 - 21) 金久保利之，園部泰寿：高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材の耐震性能に関する研究—曲げ性能に影響される部材の強度と変形能—，日本建築学会構造系論文報告集，第441号，pp.63~72，1992.11
 - 22) 折原信吾，金久保利之，園部泰寿，広沢雅也：高強度軽量コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材の諸強度と剛性，日本建築学会大会学術講演梗概集，C構造Ⅱ，pp.187~188，1992.8
 - 23) 岩倉知行，大屋戸理明ほか4名：2段配筋を有する鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度（その1：実験概要と軽量コンクリートの付着割裂強度），日本建築学会大会学術講演梗概集，C構造Ⅱ，pp.349~350，1991.9
 - 24) 園部泰寿，藤沢正視ほか3名：連続繊維による補強コンクリート部材の付着性状（その3：片持ばり部材の主筋鉄筋の場合の横補強筋の効果），日本建築学会大会学術講演梗概集，C構造Ⅱ，pp.841~842，1991.9
 - 25) 芝 祐順，渡部 洋，石塚智一：統計用語辞典，新曜社，1984.5
 - 26) 肥田野直，瀬谷正敏，大川信明：心理教育統計学，培風館，1961.4

27) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，pp.62~63，1988

付録1 マハラノビスの汎距離

同一の母分散共分散行列 Σ によって特徴づけられる2つの正規母集団 $N(\mu_1, \Sigma)$ ， $N(\mu_2, \Sigma)$ の重心間の距離の平方で，その値は次式で与えられる。

$$(\mu_1 - \mu_2)' \Sigma^{-1} (\mu_1 - \mu_2) \dots \dots \dots (A-1)$$

なお，実際の計算にあたっては， μ_1 ， μ_2 に標本平均ベクトル， Σ に2群の標本分散共分散行列を代入すればよい。上式の値は，判別関数の2群の平均得点の差に一致し，この値が大きいくほど，判別値の理論的正診率が高くなる。

付録2 F 値

仮説検定の手法である，F分布を用いるF検定の際に得られる値。F検定は，分散分析における検定や，2組の観測資料の分散の比の検定によく用いられる。F値は次式で得られる。

$$F = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 / (m-1)}{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2 / (n-1)} \dots \dots \dots (A-2)$$

ただし， x_i ， y_j はそれぞれ，正規分布にしたがう独立変数 X ， Y の測定結果を示し， m ， n は X ， Y の個体数を示す。危険率 α の検定を行うには，自由度 $(m-1)$ ， $(n-1)$ の F 分布の両端に $(\alpha/2)$ ずつの大きさの棄却域を設け， F 値が棄却域に入ったら仮説を棄却する。

付録3 重回帰分析

線形回帰モデル

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + e \dots \dots \dots (A-3)$$

において，説明変数 x の個数 p が2以上の場合の線形回帰分析のことである。この場合の β_i ($i=1, \dots, p$) の最小二乗推定量 β'_i は偏回帰係数，さらに β'_i の推定値 β''_i を代入して得られる予測値 y' と実測値 y の相関係数は重相関係数と呼ばれる。

(1993年3月10日原稿受理，1993年8月16日採用決定)