

第 9 章

結論

第9章 結論

9.1 まとめ

本報では鉄筋コンクリート造部材の構造特性評価式の検証を行うために、これまでに国内で公開されている実験に関する論文を収集し、そこから必要な試験体の特性値を抽出しデータベースを構築した。また今回構築したデータベースを用いて、全国官報販売協同組合発行の構造関係技術基準解説書（2007年版）に記載の式および日本建築学会が刊行している規準・指針類に示されている設計式を用いて鉄筋コンクリート造構造部材の各構造性能の評価精度および当該式の適用範囲について検討した。表 9.1.1 に各部材、各特性の評価精度の結果として、実験値／計算値の平均値 μ 、標準偏差 σ 、変動係数 σ / μ の一覧を示す。

表 9.1.1 実験値と計算値の比較 平均値 μ , 標準偏差 σ , 変動係数 σ / μ (実験値/計算値)

項目	梁	柱	腰壁・垂壁付梁		袖壁付柱	耐力壁					接合部				
			スリット 無し	スリット あり		全体	無開口	有開口	柱型 有り	柱型 無し	十字形	ト形	T形	L形 -閉	L形 -開
弾性剛性①	試験体数	58	285	45	8	95	123	89	34	51	38	41	33	データ 無し	9
	μ	0.42	0.73	0.73	1.16	0.65	0.72	0.66	0.88	0.67	0.63	-0.36	-0.76		0.99
	σ	0.25	0.39	0.34	0.10	0.30	0.27	0.23	0.26	0.26	0.19	15.90	10.00		0.79
	σ / μ	0.60	0.54	0.47	0.09	0.46	0.38	0.35	0.30	0.39	0.30	-44.17	-13.16		0.80
	$\mu + \sigma / 2$	0.54	0.92	0.90	1.21	0.80	0.85	0.77	1.01	0.80	0.72	7.59	4.24		1.38
	$\mu - \sigma / 2$	0.29	0.53	0.56	1.11	0.50	0.58	0.54	0.75	0.54	0.53	-8.31	-5.76		0.59
弾性剛性②	試験体数			45	8	95									
	μ			0.77	0.17	0.79									
	σ			0.37	0.05	0.31									
	σ / μ			0.48	0.30	0.39									
	$\mu + \sigma / 2$			0.95	0.19	0.94									
	$\mu - \sigma / 2$			0.58	0.14	0.63									
弾性剛性③	試験体数			45	8	95									
	μ			0.95	0.50	0.98									
	σ			0.45	0.06	0.39									
	σ / μ			0.48	0.12	0.40									
	$\mu + \sigma / 2$			1.17	0.53	1.17									
	$\mu - \sigma / 2$			0.72	0.47	0.78									
弾性剛性④	試験体数				8										
	μ				0.51										
	σ				0.05										
	σ / μ				0.10										
	$\mu + \sigma / 2$				0.53										
	$\mu - \sigma / 2$				0.48										

* 参考として、平均値 μ が 0.80~1.20 の範囲にあるものは黄色で、変動係数 σ / μ が 0.20 以下のものは緑色で欄を塗りつぶしている。

表 9.1.1 実験値と計算値の比較 平均値 μ , 標準偏差 σ , 変動係数 σ / μ (実験値/計算値)

項目	梁	柱	腰壁・垂壁付梁		袖壁付柱	耐力壁					接合部				
			スリット 無し	スリット あり		全体	無開口	有開口	柱型 有り	柱型 無し	十字形	ト形	T形	L形 -閉	L形 -開
曲げひび割れが 発生したときの 部材角	試験体数					77	63	12							
	μ					1.92	2.12	0.63							
	σ					1.59	1.61	0.56							
	σ / μ					0.83	0.76	0.89							
	$\mu + \sigma / 2$					2.71	2.92	0.91							
$\mu - \sigma / 2$					1.12	1.31	0.35								
せん断ひび割れが 発生したときの 部材角	試験体数					128	74	54							
	μ					2.27	2.82	1.50							
	σ					2.37	2.56	1.85							
	σ / μ					1.05	0.91	1.24							
	$\mu + \sigma / 2$					3.45	4.10	2.42							
$\mu - \sigma / 2$					1.08	1.54	0.57								
降伏点剛性 低下率①	試験体数	129	308	33	8	25									
	μ	0.81	1.14	1.54	1.18	1.49									
	σ	0.30	0.51	0.50	0.15	0.61									
	σ / μ	0.37	0.45	0.32	0.13	0.41									
	$\mu + \sigma / 2$	0.96	1.39	1.79	1.25	1.79									
$\mu - \sigma / 2$	0.66	0.88	1.29	1.10	1.18										
降伏点剛性 低下率②	試験体数			19											
	μ			0.73											
	σ			0.25											
	σ / μ			0.34											
	$\mu + \sigma / 2$			0.85											
$\mu - \sigma / 2$			0.60												
降伏点剛性 低下率③	試験体数			20											
	μ			1.27											
	σ			0.45											
	σ / μ			0.36											
	$\mu + \sigma / 2$			1.49											
$\mu - \sigma / 2$			1.04												

* 参考として、平均値 μ が 0.80~1.20 の範囲にあるものは黄色で、変動係数 σ / μ が 0.20 以下のものは緑色で欄を塗りつぶしている。

表 9.1.1 実験値と計算値の比較 平均値 μ , 標準偏差 σ , 変動係数 σ / μ (実験値/計算値)

項目	梁	柱	腰壁・垂壁付梁		袖壁付柱	耐力壁					接合部						
			スリット 無し	スリット あり		全体	無開口	有開口	柱型 有り	柱型 無し	十字形	ト形	T形	L形 -閉	L形 -開		
曲げ降伏が 発生したときの 部材角①	試験体数	129	192				38										
	μ	1.32	1.02				0.88										
	σ	0.47	0.53				0.38										
	σ / μ	0.36	0.52				0.43										
	$\mu + \sigma / 2$	1.55	1.28				1.07										
	$\mu - \sigma / 2$	1.08	0.75				0.69										
曲げ降伏が 発生したときの 部材角②	試験体数						38										
	μ						1.52										
	σ						0.49										
	σ / μ						0.32										
	$\mu + \sigma / 2$						1.76										
	$\mu - \sigma / 2$						1.27										
せん断 終局強度に 到達したときの 部材角①	試験体数						131	74	57	60	14						
	μ						1.84	2.21	1.36	2.20	2.24						
	σ						0.99	0.94	0.85	0.96	0.90						
	σ / μ						0.54	0.43	0.63	0.44	0.40						
	$\mu + \sigma / 2$						2.33	2.68	1.78	2.68	2.69						
	$\mu - \sigma / 2$						1.34	1.74	0.93	1.72	1.79						
せん断 終局強度に 到達したときの 部材角②	試験体数						131	74	57	60	14						
	μ						1.54	1.54	1.52	1.48	1.83						
	σ						0.55	0.60	0.50	0.53	0.75						
	σ / μ						0.36	0.39	0.33	0.36	0.41						
	$\mu + \sigma / 2$						1.81	1.84	1.77	1.74	2.20						
	$\mu - \sigma / 2$						1.26	1.24	1.27	1.21	1.45						
せん断 終局強度に 到達したときの 部材角③	試験体数						136	78	58	62	16						
	μ						2.29	2.31	2.26	2.07	3.26						
	σ						1.03	1.14	0.87	0.83	1.64						
	σ / μ						0.45	0.49	0.39	0.40	0.50						
	$\mu + \sigma / 2$						2.80	2.88	2.69	2.48	4.08						
	$\mu - \sigma / 2$						1.77	1.74	1.82	1.65	2.44						

* 参考として、平均値 μ が 0.80~1.20 の範囲にあるものは黄色で、変動係数 σ / μ が 0.20 以下のものは緑色で表を塗りつぶしている。

表 9.1.1 実験値と計算値の比較 平均値 μ , 標準偏差 σ , 変動係数 σ / μ (実験値/計算値)

項目	梁	柱	腰壁・垂壁付梁		袖壁付柱	耐力壁					接合部					
			スリット無し	スリットあり		全体	無開口	有開口	柱型有り	柱型無し	十字形	ト形	T形	L形-閉	L形-開	
限界変形角①	試験体数		21	4	26	63										
	μ		1.11	1.09	1.22	1.35										
	σ		0.27	0.13	0.59	1.41										
	σ / μ		0.24	0.12	0.49	1.05										
	$\mu + \sigma / 2$		1.24	1.15	1.51	2.05										
	$\mu - \sigma / 2$		0.97	1.02	0.92	0.64										
限界変形角②	試験体数					64										
	μ					2.60										
	σ					1.71										
	σ / μ					0.66										
	$\mu + \sigma / 2$					3.45										
	$\mu - \sigma / 2$					1.74										

* 参考として, 平均値 μ が 0.80~1.20 の範囲にあるものは黄色で, 変動係数 σ / μ が 0.20 以下のものは緑色で欄を塗りつぶしている。

表 9.1.1 実験値と計算値の比較 平均値 μ , 標準偏差 σ , 変動係数 σ / μ (実験値/計算値)

項目	梁	柱	腰壁・垂壁付梁		袖壁付柱	耐力壁					接合部					
			スリット 無し	スリット あり		全体	無開口	有開口	柱型 有り	柱型 無し	十字形	ト形	T形	L形 -閉	L形 -開	
曲げ ひび割れ強度	試験体数	73	326	37	8	114	153	129	24							
	μ	1.21	1.14	0.85	0.86	0.87	0.85	0.90	0.65							
	σ	0.39	0.34	0.22	0.33	0.41	0.40	0.41	0.27							
	σ / μ	0.32	0.30	0.26	0.39	0.47	0.47	0.46	0.42							
	$\mu + \sigma / 2$	1.40	1.31	0.96	1.02	1.07	1.05	1.10	0.78							
	$\mu - \sigma / 2$	1.01	0.97	0.74	0.69	0.66	0.65	0.69	0.51							
せん断 ひび割れ強度①	試験体数	50	183	38		138	219					161	66	5	17	18
	μ	1.09	2.31	1.25		1.47	0.95					0.91	1.08	1.23	1.15	0.97
	σ	0.39	0.63	0.36		0.49	0.39					0.28	0.31	0.17	0.32	0.20
	σ / μ	0.36	0.27	0.29		0.33	0.41					0.31	0.29	0.14	0.28	0.21
	$\mu + \sigma / 2$	1.28	2.62	1.43		1.71	1.14					1.05	1.23	1.31	1.31	1.07
	$\mu - \sigma / 2$	0.89	1.99	1.07		1.22	0.75					0.77	0.92	1.14	0.99	0.87
せん断 ひび割れ強度②	試験体数		183				219					161	66	5	17	18
	μ		2.10				0.79					0.82	0.91	1.04	0.99	0.84
	σ		0.35				0.49					0.25	0.26	0.14	0.27	0.17
	σ / μ		0.17				0.62					0.31	0.29	0.13	0.27	0.20
	$\mu + \sigma / 2$		2.27				1.03					0.94	1.04	1.11	1.12	0.92
	$\mu - \sigma / 2$		1.92				0.54					0.69	0.78	0.97	0.85	0.75
せん断 ひび割れ強度③	試験体数						219									
	μ						1.60									
	σ						0.73									
	σ / μ						0.46									
	$\mu + \sigma / 2$						1.96									
	$\mu - \sigma / 2$						1.23									
せん断 ひび割れ強度④	試験体数						219									
	μ						1.02									
	σ						0.41									
	σ / μ						0.40									
	$\mu + \sigma / 2$						1.22									
	$\mu - \sigma / 2$						0.81									

* 参考として、平均値 μ が 0.80~1.20 の範囲にあるものは黄色で、変動係数 σ / μ が 0.20 以下のものは緑色で欄を塗りつぶしている。

表 9.1.1 実験値と計算値の比較 平均値 μ , 標準偏差 σ , 変動係数 σ / μ (実験値/計算値)

項目	梁	柱	腰壁・垂壁付梁		袖壁付柱	耐力壁					接合部					
			スリット 無し	スリット あり		全体	無開口	有開口	柱型 有り	柱型 無し	十字形	ト形	T形	L形 -閉	L形 -開	
曲げ降伏強度	試験体数	148				53										
	μ	0.89				0.91										
	σ	0.12				0.13										
	σ / μ	0.13				0.14										
	$\mu + \sigma / 2$	0.95				0.97										
	$\mu - \sigma / 2$	0.83				0.84										
曲げ 終局強度①	試験体数	297	794	31	8	71	209	176	33	129	47	100	74		5	33
	μ	1.09	1.17	1.00	1.18	1.34	1.03	1.08	0.79	1.08	1.08	1.03	0.96		1.43	0.88
	σ	0.12	0.27	0.09	0.06	0.42	0.22	0.15	0.33	0.16	0.12	0.16	0.20		0.22	0.22
	σ / μ	0.11	0.23	0.09	0.05	0.31	0.21	0.14	0.42	0.15	0.11	0.16	0.21		0.15	0.25
	$\mu + \sigma / 2$	1.15	1.30	1.04	1.21	1.55	1.14	1.15	0.95	1.16	1.14	1.11	1.06		1.54	0.99
	$\mu - \sigma / 2$	1.03	1.03	0.95	1.15	1.13	0.92	1.00	0.62	1.00	1.02	0.95	0.86		1.32	0.77
曲げ 終局強度②	試験体数			31		62	209	176	33	129	47					
	μ			0.77		1.15	1.02	1.06	0.81	1.09	0.99					
	σ			0.12		0.18	0.22	0.16	0.35	0.16	0.13					
	σ / μ			0.16		0.16	0.22	0.15	0.43	0.15	0.13					
	$\mu + \sigma / 2$			0.83		1.24	1.13	1.14	0.98	1.17	1.05					
	$\mu - \sigma / 2$			0.71		1.06	0.91	0.98	0.63	1.01	0.92					
曲げ 終局強度③	試験体数			37			149	116	33	82	37					
	μ			1.26			1.00	1.07	0.73	1.04	1.14					
	σ			0.56			0.23	0.14	0.30	0.14	0.13					
	σ / μ			0.44			0.23	0.13	0.41	0.13	0.11					
	$\mu + \sigma / 2$			1.54			1.11	1.14	0.88	1.11	1.20					
	$\mu - \sigma / 2$			0.98			0.88	1.00	0.58	0.97	1.07					
曲げ 終局強度④	試験体数			37												
	μ			0.88												
	σ			0.18												
	σ / μ			0.20												
	$\mu + \sigma / 2$			0.97												
	$\mu - \sigma / 2$			0.79												

* 参考として、平均値 μ が 0.80~1.20 の範囲にあるものは黄色で、変動係数 σ / μ が 0.20 以下のものは緑色で欄を塗りつぶしている。

表 9.1.1 実験値と計算値の比較 平均値 μ ，標準偏差 σ ，変動係数 σ / μ (実験値/計算値)

項目	梁	柱	腰壁・垂壁付梁		袖壁付柱	耐力壁					接合部					
			スリット 無し	スリット あり		全体	無開口	有開口	柱型 有り	柱型 無し	十字形	ト形	T形	L形 -閉	L形 -開	
せん断 終局強度①	試験体数	115	363	7		105	275	167	108	115	52	64	61	14	27	19
	μ	1.38	1.35	1.05		1.37	1.74	1.67	1.86	1.75	1.49	1.22	1.30	1.06	1.51	1.07
	σ	0.31	0.22	0.19		0.42	0.38	0.38	0.37	0.38	0.31	0.22	0.27	0.11	0.31	0.15
	σ / μ	0.23	0.16	0.18		0.31	0.22	0.23	0.20	0.22	0.21	0.18	0.21	0.10	0.21	0.14
	$\mu + \sigma / 2$	1.53	1.46	1.14		1.58	1.93	1.86	2.04	1.94	1.64	1.33	1.43	1.11	1.66	1.14
	$\mu - \sigma / 2$	1.22	1.24	0.95		1.16	1.55	1.48	1.67	1.56	1.33	1.11	1.16	1.00	1.35	0.99
せん断 終局強度②	試験体数	114	360	7		105	275	167	108	115	52					
	μ	1.20	1.36	0.89		1.19	1.41	1.35	1.51	1.40	1.22					
	σ	0.36	0.34	0.12		0.39	0.31	0.31	0.31	0.32	0.26					
	σ / μ	0.30	0.25	0.13		0.33	0.22	0.23	0.21	0.23	0.21					
	$\mu + \sigma / 2$	1.38	1.53	0.95		1.38	1.56	1.50	1.66	1.56	1.35					
	$\mu - \sigma / 2$	1.02	1.19	0.83		0.99	1.25	1.19	1.35	1.24	1.09					
せん断 終局強度③	試験体数						249	141	108	89	52					
	μ						1.40	1.33	1.50	1.39	1.21					
	σ						0.34	0.35	0.28	0.28	0.42					
	σ / μ						0.24	0.26	0.19	0.20	0.35					
	$\mu + \sigma / 2$						1.57	1.50	1.64	1.53	1.42					
	$\mu - \sigma / 2$						1.23	1.15	1.36	1.25	1.00					
せん断 終局強度④	試験体数						249	141	108	89	52					
	μ						1.25	1.18	1.35	1.22	1.12					
	σ						0.30	0.32	0.25	0.25	0.39					
	σ / μ						0.24	0.27	0.19	0.21	0.35					
	$\mu + \sigma / 2$						1.40	1.34	1.47	1.34	1.31					
	$\mu - \sigma / 2$						1.10	1.02	1.22	1.09	0.92					

* 参考として、平均値 μ が 0.80~1.20 の範囲にあるものは黄色で、変動係数 σ / μ が 0.20 以下のものは緑色で欄を塗りつぶしている。

9.2 実験データベースの取り扱いにおける注意点

9.1 で示した各評価式の精度は、今回構築したデータベースに収集されている各試験体の特性に依存するものであり、検討に必要なデータが不足しているものや、実験変数のパラメータに偏りがあるもの、特別な目的で製作された試験体等に関しては、取り扱いに注意が必要である。以下に、各部材ごとに、今回構築した実験データベースや収集データの特徴について説明する。

梁部材

本検討で収集した梁部材の実験データは 497 体（曲げ降伏先行型 327 体、せん断破壊型 115 体、付着破壊型 55 体）を有効とし、データベースの作成を行った。統計的な検討を行うには十分な実験データが得られた。曲げ終局強度やせん断強度については、安定したデータベースの構築が出来たが、一方では初期剛性、降伏点剛性および限界変形角などの変形に関するデータベースには大きなばらつきを生じた。これは、紙面の論文において変形に関するデータの表示が難しいことや計測上の難しさも含まれていると考えられる。

初期剛性については実験値と計算値の比の平均値が 0.42 となった点については、RC 部材が連続した部材であることや構造実験における試験体の製作において、骨組みから切り離した状態で試験体を製作しているため、コンクリートの乾燥収縮の影響なども内在しているものと考えられる結果となった。その他、降伏点剛性の定義と実験データのまとめ方が統一されていない等の課題を確認した。

実施設計を考慮した詳細な梁部材に関する研究として、カットオフ筋を含む梁部材（19 体）およびスラブ付き梁部材（46 体）の研究がすすめられているが、それぞれデータに限りがあり、研究目的が必ずしも一致していないため、統計的な検討を行うには明確にデータが示されている実験データが十分ではないと考えられる。スラブ（ハーフ PCa を含む）の付着割裂強度への影響についても、試験体の条件設定が難しいこともあり、データベースを構築するにはデータ数が不足していると考えられる。

その他、有孔梁の実験データについては、近年は有孔梁の製品が多く存在しており、各種有孔梁せん断補強筋を用いた実験がなされている。しかしながら、それらのデータを横並びにして性能を評価するための方法（例えば、短期許容応力度の設定など）についても議論する必要があると考えられる。

柱部材

本検討で収集した梁部材の実験データは 1333 体（曲げ降伏先行型 905 体、せん断破壊型 391 体、付着破壊型 37 体）を有効とし、データベースの作成を行った。統計的な検討を行うには十分な実験データが得られた。梁部材と同様に曲げ終局強度やせん断強度については、安定したデータベースの構築が出来た。

初期剛性、降伏点剛性および限界変形角などの変形に関するデータベースには大きなばらつきを生じた。これは、紙面の論文において変形に関するデータの表示が難しいことや計測上の難しさも含まれていると考えられる。梁部材に比べ、柱部材の初期剛性については実験値と計算値の比の平均値が 0.72 となった点については、RC 部材が連続した部材であること示す結果となった。但し、梁部材に比べ柱部材の構造実験では軸力を作用させてから実験をスタートさせるため、試

験体の製作におけるコンクリートの乾燥収縮の影響などが低減されていると考えられる。

曲げ終局強度については、実験値と計算値の比較を行ったところ、設計式の精度が軸力に依存していることが明らかになった。今後は、従来設計式の精度をさらに向上させるためには、詳細な検討が必要であると考えられる。

せん断強度については、現行基準法に示されている設計式が適正であることが改めて確認された。今後は、梁部材と同様に変形性能に関する研究を進める必要がある。加えて、高軸力が作用する場合の破壊は、脆性的であり人命安全にかかわることから最も重要であると考えられるため、限界部材角の評価式として検討を進めていく必要があると考えられる。

腰壁・垂れ壁付き梁

本検討で収集した腰壁・垂れ壁付き梁は39体であり、他の部材と比べ実験データが少ない。特に構造スリットを設けた腰壁・垂れ壁付き梁のデータは4体と非常に少なく、今後実験による蓄積が必要である。本検討では、正負繰り返し载荷をした試験体のうち、正負の実験データがある場合は、それぞれの値で検討を行った。そのため、検討した試験体数はスリットなし46体、スリットあり8体である。以下に、構造性能評価項目毎の実験データ数を示す。なお、一つの構造性能評価項目に対して、評価式ごとにデータ数に違いがあるときは、大きいものを採用している。

- ・弾性剛性：スリットなし45体、スリットあり8体
- ・剛性低下率：スリットなし33体、スリットあり8体
- ・限界変形角：スリットなし21体、スリットあり4体
- ・曲げひびわれ強度：スリットなし37体、スリットあり8体
- ・せん断ひびわれ強度：スリットなし38体、スリットあり0体
- ・曲げ終局強度：スリットなし37体、スリットあり8体
- ・せん断終局強度：スリットなし7体、スリットあり0体

せん断終局強度の実験データがそれぞれ7体、0体と特に少ない。平成21年度国交省建築基準整備促進事業 課題7における実験結果から、せん断余裕度の小さいスリットを設けた片側壁付梁では材端部でせん断破壊が起こる危険性があることが示されており、最近の実験結果でせん断破壊が確認された例もある。せん断破壊は脆性的な破壊であり、実験によるデータの蓄積が必要不可欠であり、早急に実験を実施する必要があると考えられる。

今回収集した論文では、論文中に記載されている情報が不足しているケースが多かった。紙面の都合などが原因で断面情報が不十分であった。特に壁筋などは鉄筋の位置の記述がないことが多い。実験結果においては最大強度や鉄筋降伏時などの荷重について、紙面上のアナログデータとしては記述があるものの、明確な数字として記述されていない場合が多い。また、腰壁・垂れ壁付き梁では、最大耐力だけでなく壁筋や梁主筋の降伏の有無やその時の変形角と強度が重要であり、弾性剛性、ひび割れ強度、終局変形角などの情報と共に、論文中に記載することが必要である。

第9章 結論

袖壁付き柱

今回、検討に使用した袖壁付き柱の試験体数は計 204 体である。他の部材に比較して実験データは極めて少ない状況であり、さらなるデータの蓄積が望まれる。また、その断面形状の内訳を見ると両側均等袖壁付き柱が 161 体、片側袖壁付き柱が 41 体、不均等袖壁付き柱が 2 体である。つまり、実験のそのほとんどが両側均等袖壁付き柱の断面で行われていることを意味する。実務設計では片側袖壁付き柱および不均等袖壁付き柱など様々な断面形状に対応する必要があるが、その情報は極めて少ない状況である。今後、片側袖壁付き柱および不均等袖壁付き柱の実験が数多く実施され、その構造性能が示されることを切に期待する。

今回の検討では一切触れていないが袖壁付き柱の変形性能を向上させるためには、袖壁圧縮端部のコンクリートを鉄筋により拘束することが極めて有効であることが多くの論文で示されている。論文中に袖壁端部拘束筋の配筋仕様並びに詳細寸法、拘束筋により拘束される部分の寸法並びに面積、被り寸法等を詳細に示して頂くと、今後、袖壁付き柱部材の限界変形角を検討・評価する上で有用なデータになると思われる。また、多くの論文では最大耐力の記載はあるものの、弾性剛性、ひび割れ強度、限界変形角といった設計上必要な情報が不足している状況であり論文中に記載されることが望まれる。

耐力壁

今回の検討では、耐力壁部材全体で 507 体の試験体の実験データを収集した。破壊形式に関しては、曲げ型（曲げ降伏後のせん断破壊含む）とせん断型の試験体がほぼ半数ずつと偏りは見られないが、2010 年版の RC 規準から新たに耐力壁部材として取り扱われることになった柱型のない耐力壁に関しては、109 体と収集した全データの 2 割に留まっている。また、柱型のない耐力壁のうち、開口を有する試験体の数は、今回、円形開口を有する試験体をデータの検証対象から除外したこともあり、7 体と少なく、十分な検証が行えていない。なお、側柱主筋やせん断補強筋（壁端拘束域の曲げ補強筋や横拘束筋）の配筋位置が不明なため、曲げ終局強度やせん断終局強度の詳細な検証ができなかった試験体が全体の 2 割程度あった。

今回データを収集した 151 体の有開口試験体では、等価開口周比の平均値が、RC 規準において耐力壁として取り扱う際の目安となる 0.4 とほぼ等しい値となっている。したがって、本検討結果には、一般的には耐力壁として取り扱われることがあまりないような大きな開口を有する試験体の実験結果も含まれている点に注意が必要である。なお、開口を有する試験体では、開口周辺に配筋した開口補強筋が、せん断終局強度等のせん断挙動に影響を及ぼすことが考えられる。現在、RC 規準では、開口周辺 500mm の範囲に配筋された鉄筋を開口補強筋として取り扱うことになっているが、今回データを収集した試験体には、試験体の縮尺や開口補強筋の配筋位置が不明なため、開口補強筋量を正確に定義できないものが多数あった。貴重なデータを有効に活用するため、側柱や壁端部の情報を含めて、詳細な試験体データの記述をお願いしたい。

柱梁接合部

十字形、ト形の試験体に比べると T 形、L 形の試験体の数は少なかった。また、T 形、L 形の試験体では主筋を折り曲げ定着した試験体の数が少なく、機械式定着を用いていない試験体は T 形試験体では全 65 体中 7 体（うち主筋降伏前の接合部破壊は 2 体）、L 形試験体では全 104 体中

39 体（うち主筋降伏前の接合部破壊は 14 体）のみであった。また、材料強度のバランスが実構造物とは異なり著しく悪いものも見られ、さらに柱梁曲げ強度比のように試験体のもつ構造特性が実構造物のそれとは異なるものも少なくなかった。そのため、データベースに収集された試験体データを用いてさまざまな設計因子の影響の検討を行う場合などは注意が必要である。

文献には、試験体の諸元、実験結果とも十分に記載されていない例も多かった。特に接合部せん断力の算定や柱や梁の強度算定に不可欠な柱、梁の鉄筋位置の情報が欠けている文献が比較的多かった。また、加力における試験体端部の拘束条件、ジャッキ等の制御方法などが十分に記述されていないものも多く、これらは実験時に接合部に作用するモーメントやせん断力が同定できないため本研究では検討対象から除外した。さらに、実験結果については破壊モードの判別に不可欠な主筋の降伏の有無が明記されていない文献もある。また、実験結果のうちひび割れ発生時や主筋降伏時の荷重や変形の記載がない文献も多く、それらはひび割れ強度の検証等に用いることができなかった。これらの情報は、各文献における実験の目的とは直接関係ない数値であったとしても、実験結果に関する基本情報として記載されることが望まれる。

9.3 技術基準に対する考察

平 19 国交告第 594 号第 1 第一号において、許容応力度等計算や保有水平耐力計算等の構造計算は、架構の寸法、耐力、剛性その他の数値を当該建築物の実況に応じて適切に設定した上で行うよう規定されている。すなわち設計者が用いるモデルの妥当性を適切に判断し、その根拠を十分に説明することが原則である。建築物の構造関係技術基準解説書の付録では、これらの構造計算において、鉄筋コンクリート造部材のモデル化を行う際に考慮する必要があると考えられる項目に関して、部材ごとにその取扱いの一例が示されている。

そこで本節では、各章における検討から得られた知見に基づき、現在の技術基準解説書において示されている式の精度や適用範囲について示す。以下に評価項目とその意味合いを記載する。また、下記以外の式を用いる場合も、平均値や変動係数、適用範囲を明確にして使用することが必要である。

平均値 : 当該式の評価精度の 1 つ。この数値が 1 を下回る場合、強度式では実験結果を過大評価することになるため、当該特性値の特徴に基づき、安全側の配慮を行うことが望ましい。また、剛性低下率では、実験の降伏点の変形を過小評価することになる。

変動係数 : 当該式の評価精度の 1 つで標準偏差を平均値で除した数値。この数値が 0 に近いほどばらつきは少なく、値が大きくなるにつれてばらつきが大きいことを示す。ばらつきが大きい式を用いる場合は、当該特性値の特徴に基づき、安全側の配慮を行うことが望ましい。

適用範囲 : 当該式が実験に基づく経験式の場合、示された材料強度や配筋量などに基づき使用することができる。

以下の各部材の評価式の精度（実験値／計算値）の範囲をまとめると、曲げひび割れ強度の平均値は 0.85～1.18、変動係数は 0.26～0.47 であり、部材によって実験結果を安全側に評価するものと危険側に評価するものがある。せん断ひび割れ強度の平均値は 0.95～2.17 と曲げひび割れ強度と比べてばらつきが大きい、全体的に実験結果を安全側に評価する傾向がある。変動係数は 0.17～0.46 であり、曲げひび割れ強度と同程度である。剛性低下率の平均値は 0.72～1.49、変動係数は 0.28～0.42 であり、部材によって、実験の降伏点変形を小さく評価するものと大きく評価するものがある。曲げ終局強度の平均値は 0.99～1.24、変動係数は 0.10～0.25 であり、ここに示した評価式の中で最も評価精度が高く、ばらつきも小さい。せん断終局強度の平均値は 0.89～1.67、変動係数は 0.13～0.33 であり、腰壁・垂れ壁付きはりの（付 1.3-43）を除くと、いずれの評価式も実験結果を安全側に評価している。但し、用いる評価式や部材ごとに評価精度にはばらつきがあるので、注意が必要である。柱梁接合部のせん断終局強度の平均値は 1.01～1.51、変動係数は 0.12～0.26 である。

(1) はり

④ ひび割れ強度

a) 曲げ

コンクリート強度 60 N/mm² 未満で曲げ降伏が先行するはり試験体 49 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-1) 式の実験値/計算値の平均値は 1.18, 変動係数 0.36 であった。

$$M_c = 0.56\sqrt{\sigma_B}Z_e + \frac{ND}{6} \quad (\text{N}\cdot\text{mm}) \quad (\text{付 1.3-1})$$

b) せん断

コンクリート強度 60N/mm² 未満のはり試験体 80 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-2) 式の実験値/計算値の平均値は 1.32, 変動係数 0.31 である。

$$Q_c = \left\{ \frac{0.085k_c(F_c + 500)}{M/(Qd) + 1.7} \right\} bj \quad (\text{kgf}) \quad (\text{付 1.3-2})$$

⑤ 剛性低下率

コンクリート強度 60N/mm² 未満で曲げ降伏するはり試験体 85 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-3), (付 1.3-4) 式の実験値/計算値の平均値は 0.83 であるが, 変動係数は 0.34 である。そのうち, シアスパンが 2 以上となる試験体 66 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-3) 式の実験値/計算値の平均値は 0.72, 変動係数は 0.28, シアスパンが 2 未満となる試験体 19 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-4) 式の実験値/計算値の平均値は 1.11, 変動係数は 0.29 であった。

$$\alpha_y = (0.043 + 1.64np_t + 0.043a/D + 0.33\eta_0) \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (\text{付 1.3-3})$$

$$\alpha_y = (-0.0836 + 0.159a/D + 0.169\eta_0) \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (\text{付 1.3-4})$$

⑥ 終局強度

a) 曲げ

コンクリート強度 60N/mm² 未満で曲げ降伏が先行するはり試験体 297 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-5)式の実験値/計算値の平均値は 1.09 であり, 変動係数も 0.11 であった。基準値の 1.0 に対して±30%以内に含まれるデータは, 全体の 96.6%である。また SD490 を用いた場合も引張鉄筋比が 2%未満であれば本式を適用できる。

$$M_u = 0.9a_s \sigma_y d \quad (\text{N}\cdot\text{mm}) \quad (\text{付 1.3-5})$$

第9章 結論

b) せん断

コンクリート強度 60 N/mm² 未満でせん断破壊するはり試験体 115 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-7)式の実験値／計算値の平均値は全体で 1.32 であり、変動係数も 0.24 であった。基準値の 1.0 に対して±30%以内に含まれるデータは、全体の 48.7%であるが、実験値／計算値が 1.30 を超えるものも多くある。

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.068p_t^{0.23}(F_c + 18)}{M/(Qd) + 0.12} + 0.85\sqrt{p_w\sigma_{wy}} \right\} bj \quad (N) \quad (\text{付 1.3-7})$$

(2) 柱

④ ひび割れ強度

a) 曲げ

コンクリート強度 60 N/mm² 未満で曲げ降伏する柱試験体 255 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-1)式の実験値／計算値の平均値は 1.13, 変動係数 0.31 であった。

b) せん断

コンクリート強度 60 N/mm² 未満の柱試験体 362 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-8) 式の実験値／計算値の平均値は 1.34, 変動係数 0.26 であった。

コンクリート強度 60 N/mm² 未満でせん断破壊する柱試験体 126 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-9) 式の実験値／計算値の平均値は 2.17, 変動係数 0.17 であり、実験結果を過小評価する結果となった。一方、コンクリート強度 60 未満で曲げ降伏する柱試験体 236 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-9) 式の実験値／計算値の平均値は 1.59, 変動係数 0.32 であった。

$$Q_c = \left(1 + \frac{\sigma_0}{150} \right) \left\{ \frac{0.085k_c(F_c + 500)}{M/(Qd) + 1.7} \right\} bj \quad (\text{kgf}) \quad (\text{付 1.3-8})$$

$$V_c = \phi \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_T\sigma_0} bD \frac{1}{\kappa} \quad (N) \quad (\text{付 1.3-9})$$

⑤ 剛性低下率

曲げ降伏する柱試験体 229 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-3) 式の実験値／計算値の平均値は 0.98 であるが、変動係数は 0.42 であった。

⑥ 終局強度

a) 曲げ

コンクリート強度 60 N/mm² 未満で曲げ降伏する柱試験体 556 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-13) ～ (付 1.3-15) 式の実験値／計算値の平均値は 1.19, 変動係数 0.23 であった。

$N_{\min} \leq N < 0$ のとき

$$M_u = 0.5a_g \sigma_y g_1 D + 0.5Ng_1 D \quad (\text{N}\cdot\text{mm}) \quad (\text{付 1.3-13})$$

$0 \leq N \leq N_b$ のとき

$$M_u = 0.5a_g \sigma_y g_1 D + 0.5ND \left(1 - \frac{N}{bDF_c}\right) \quad (\text{N}\cdot\text{mm}) \quad (\text{付 1.3-14})$$

$N_b < N \leq N_{\max}$ のとき

$$M_u = \left(0.5a_g \sigma_y g_1 D + 0.024 (1 + g_1)(3.6 - g_1)bD^2 F_c\right) \left(\frac{N_{\max} - N}{N_{\max} - N_b}\right) \quad (\text{N}\cdot\text{mm}) \quad (\text{付 1.3-15})$$

b) せん断

コンクリート強度 60 N/mm² 未満でせん断破壊する柱試験体 288 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-16) 式 (${}_B Q_{su}$ に (付 1.3-7) 式による計算値を用いたもの) の実験値/計算値の平均値は全体で 1.37 であり、変動係数も 0.17 であった。

$$Q_{su} = {}_B Q_{su} + 0.1\sigma_0 bj \quad (\text{N}) \quad (\text{付 1.3-16})$$

(3) 耐力壁

④ ひび割れ強度

b) せん断

耐力壁試験体 219 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-25) 式、(付 1.3-26) 式の実験値/計算値の平均値はそれぞれ 0.95, 1.60 で、変動係数はそれぞれ 0.40, 0.46 である。(付 1.3-26) 式については、前述の通り下限値を抑える傾向が確認されている。

$$V_c = \tau_{scr} t_w \ell_w / K_w \quad (\text{N}) \quad (\text{付 1.3-25})$$

$$Q_c = \tau_{cr} t \ell \quad (\text{kgf}) \quad (\text{付 1.3-26})$$

⑤ 剛性低下率

b) せん断

なお、壁板の両側に以下に示す条件を満たす周辺柱を有し、かつ周辺柱が令第 77 条第四号及び第六号を満足した上で、壁筋比を 0.45% 以上有する無開口耐力壁にあっては、せん断終局時変形角が 1/250 となるようせん断剛性低下率を設定してもよい。

- ・ 柱の断面積が $st/2$ 以上
- ・ 柱の最小径が $\sqrt{st/3}$ かつ $2t$ 以上

(s は壁板の内法長さ、 t は壁板の厚さ)

⑥ 終局強度

a) 曲げ

第9章 結論

曲げ降伏する耐力壁試験体 176 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-30)、(付 1.3-31) 式の実験値／計算値の平均値はそれぞれ 1.08, 1.06, 変動係数はそれぞれ 0.14, 0.15 であり、前述の通り、算定値と実験値とは、概ね 20%以内の差を確保できている。しかしながら、軸力比が 0.2 を超える高軸力を受ける試験体では、軸力が中立軸位置に与える影響を考慮できない (付 1.3-31) 式では、一部の試験体の実験結果を過大に評価するため留意する必要がある。

$$M_{wu} = 0.9a_t\sigma_y D + 0.4a_w\sigma_{wy}D + 0.5ND \left(1 - \frac{N}{BDF_c}\right) \quad (\text{N}\cdot\text{mm}) \quad (\text{付 1.3-30})$$

$$M_{wu} = a_t\sigma_y\ell_w + 0.5a_w\sigma_{wy}\ell_w + 0.5N\ell_w \quad (\text{N}\cdot\text{mm}) \quad (\text{付 1.3-31})$$

b) セン断

せん断破壊する無開口耐力壁試験体 167 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-32) 式、(付 1.3-33) 式の実験値／計算値の平均値は全体でそれぞれ 1.67, 1.34 であり、変動係数はいずれも 0.23 であった。そのうち、115 体の柱型のある耐力壁については、実験値／計算値の平均値は全体でそれぞれ 1.75, 1.40 であり、変動係数はいずれも 0.22 であった。一方、柱型がない耐力壁 52 体については実験値／計算値の平均値は全体でそれぞれ 1.49, 1.22 であり、変動係数はいずれも 0.21 であり、柱型がある場合に比べ、柱型がない耐力壁では、壁端部の圧縮領域を閉鎖型の補強筋で十分に拘束していない場合に、実験値／計算値の平均値が小さくなる傾向がある。

$$Q_{wsu} = \left\{ \frac{0.053p_{te}^{0.23}(F_c + 18)}{M/(QD) + 0.12} + 0.85\sqrt{\sigma_{wh}p_{wh}} + 0.1\sigma_0 \right\} t_{ej} \quad (\text{N}) \quad (\text{付 1.3-32})$$

$$Q_{wsu} = \left\{ \frac{0.068p_{te}^{0.23}(F_c + 18)}{\sqrt{M/(QD) + 0.12}} + 0.85\sqrt{\sigma_{wh}p_{wh}} + 0.1\sigma_0 \right\} t_{ej} \quad (\text{N}) \quad (\text{付 1.3-33})$$

(4) 腰壁・垂れ壁付きはり等

④ ひび割れ強度

a) 曲げ

垂れ壁・腰壁付き梁試験体 37 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-1) 式の実験値／計算値の平均値は 0.85, 変動係数 0.26 であった。一方スリットで壁部材と柱部材の縁が切られている場合の壁付き梁部材 (以下、スリット壁付き梁) の曲げひび割れ強度については、梁部材単体での曲げひび割れ強度を用いて算定できる。スリット壁付き梁 8 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-1) 式の実験値／計算値の平均値は 0.85, 変動係数 0.33 であった。

b) セン断

垂れ壁・腰壁付き梁試験体 38 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-35) 式の実験値／計算値の平均値は 1.25, 変動係数 0.29 であった。

$$Q_c = \left\{ \frac{0.085k_c(F_c + 500)}{M/(Qd_e) + 1.7} \right\} b_e j_e \quad (\text{kgf}) \quad (\text{付 1.3-35})$$

⑤ 剛性低下率

垂れ壁・腰壁付き梁試験体 19 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-3)式 (なお、引張鉄筋比 p_t は中立軸より引張側に位置する鉄筋の断面積に対する部材全断面積で除した値、有効せい d は(付 1.3-39)式を用いる)の実験値/計算値の平均値は 0.72、変動係数 0.35 であった。なお実験値における降伏点は、部材角 2%までの消費エネルギーが等価となるよう定義されている。

$$\alpha_y = (0.043 + 1.64np_t + 0.043a/D + 0.33\eta_0) \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad (\text{付 1.3-3})$$

$$d = \frac{\sum a_{ti}(d_i - x_n)^2}{\sum a_{ti}(d_i - x_n)} + x_n \quad (0 \leq N < 0.85A_{cc}F_c) \quad (\text{付 1.3-39})$$

⑥ 終局強度

a) 曲げ

垂れ壁・腰壁付き梁試験体 31 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-36)式の実験値/計算値の平均値は 0.99、変動係数は 0.099 であった。

$$M_u = a_{te}\sigma_y (d_e - 0.5x_n) \quad (\text{N} \cdot \text{mm}) \quad (\text{付 1.3-36})$$

b) せん断

垂れ壁・腰壁付き梁試験体 7 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-42)式、(付 1.3-43)式の実験値/計算値の平均値はそれぞれ 1.05、0.89、変動係数は 0.18、0.13 であった。

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053p_t^{0.23}(F_c + 18)}{M/(Qd_e) + 0.12} + 0.85\sqrt{p_{we}\sigma_{wh}} \right\} b_e j_e + 0.1N \quad (\text{N}) \quad (\text{付 1.3-42})$$

$$Q_{su} = Q_{suw} + Q_{suc} + 0.1N \quad (\text{N}) \quad (\text{付 1.3-43})$$

(5) そで壁付き柱等

② 弾性剛性

非対称断面となる両側不均等そで壁付き柱や片側そで壁付き柱の場合、応力度法により算定されるせん断形状係数 κ は、壁長さ比や壁厚さ比に対して不連続となる点が生じるため、せん断剛性の計算値が大きく変化し、実際の剛性と異なる計算結果となる場合がある。そのため、せん断歪エネルギーに基づくエネルギー法または置換断面法(せん断形状係数は 1.2)により計算することができる。

④ ひび割れ強度

a) 曲げ

第9章 結論

そで壁付き柱試験体 114 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-1)式の実験値／計算値の平均値は 0.87，変動係数は 0.47 であった。

b) せん断

そで壁付き柱試験体 138 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-37)式の実験値／計算値の平均値は 1.47，変動係数 0.33 であった。

$$Q_c = \left(1 + \frac{\sigma_0}{150}\right) \left\{ \frac{0.085k_c(F_c + 500)}{M/(Qd_e) + 1.7} \right\} b_e j_e \quad (\text{kgf}) \quad (\text{付 1.3-37})$$

⑤ 剛性低下率

そで壁付き柱試験体 25 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-3)式（なお、引張鉄筋比 p_t は中立軸より引張側に位置する鉄筋の断面積に対する部材全断面積で除した値，有効せい d は(付 1.3-39)式を用いる）の実験値／計算値の平均値は 1.49，変動係数は 0.41 であった。なお実験値における降伏点は，最大荷重の 0.8 倍に達した際の部材角と定義されている。

$$\alpha_y = (0.043 + 1.64np_t + 0.043a/D + 0.33\eta_0) \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (\text{付 1.3-38})$$

$$d = \frac{\sum a_{ti}(d_i - x_n)^2}{\sum a_{ti}(d_i - x_n)} + x_n \quad (0 \leq N < 0.85A_{cc}F_c) \quad (\text{付 1.3-39})$$

⑥ 終局強度

a) 曲げ

両側に均等配置されたそで壁付き柱試験体 58 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-40)式の実験値／計算値の平均値は 1.24，変動係数は 0.25 であった。なお，片側のみに配置されたそで壁付き柱試験体に本式を適用する場合，以下の点に留意する必要がある。

- ・そで壁が引張力を負担する場合，そで壁内の鉄筋は曲げ強度に考慮されないため実験値より小さく評価される
- ・そで壁が圧縮力を負担し，かつ柱主筋が多段配置されている場合，本式の引張側柱主筋の断面積を 1 段筋のみを採用して計算した場合には，計算値は実験値を過少に評価する傾向がある。

以上のことから，上記の場合は，断面解析を行うなどして適切な曲げ強度を算定することができる。

$$M_u = (0.9 + \beta)a_t\sigma_y D + 0.5ND \left\{ 1 + 2\beta - \frac{N}{b_e D F_c} \left(1 + \frac{a_t\sigma_y}{N} \right)^2 \right\} \quad (\text{N} \cdot \text{mm}) \quad (\text{付 1.3-40})$$

そで壁付き柱試験体 62 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-41)式の実験値／計算値の平均値は 1.15，変動係数は 0.16 であった。

$$M_0 = \sum a_{ti} \sigma_{yi} (d_i - L_{cc}) + N(d_N - L_{cc}) \quad (\text{N} \cdot \text{mm}) \quad (\text{付 1.3-41})$$

b) せん断

そで壁付き柱試験体 105 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-42)式、(付 1.3-43)式の実験値／計算値の平均値はそれぞれ 1.37，1.19，変動係数は 0.31，0.33 である。いずれの式も柱主筋に丸鋼を用いた試験体を除けば概ね安全側に評価できることが確認されている。なお上記調査では、各補強筋比 p_{cwe} および p_{wh} が 1.2% を超える試験体は検証されていないため、いずれの値も 1.2% を上限値とする。

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (F_c + 18)}{M / (Q d_e) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{we} \sigma_{wh}} \right\} b_e j_e + 0.1N \quad (\text{N}) \quad (\text{付 1.3-42})$$

$$Q_{su} = Q_{suw} + Q_{suc} + 0.1N \quad (\text{N}) \quad (\text{付 1.3-43})$$

(6) 柱はり接合部

⑥ 終局強度

十字形柱はり接合部試験体 55 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-47)式の実験値／計算値の平均値は 1.23，変動係数は 0.17 である。ト形柱はり接合部試験体 23 体を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-47)式の実験値／計算値の平均値は 1.26，変動係数は 0.26 である。L 形柱はり接合部試験体 14 体（閉じる方向）を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-47)式の実験値／計算値の平均値は 1.51，変動係数は 0.22 である。一方、L 形柱はり接合部試験体 11 体（開く方向）を対象とした本式の精度検証について、(付 1.3-47)式の実験値／計算値の平均値は 1.01，変動係数は 0.12 である。

9.4 今後の課題

(1) 建築研究所で実施すべき今後の課題

実務設計の観点においては、将来行われるであろう部材の実験研究の結果を定期的に収集し、現在の構造設計で用いられている評価式の精度を明確にできれば構造設計者が安全性を確保する際に有用な情報になる。また現在の試験体情報を構造設計者の目的に応じて検索するシステムがないため、それらを構築し、それらを利用できるように整備することが当面の課題として挙げられる。

研究の観点においては、変形情報、剛性情報、履歴エネルギー吸収に関する情報が明記されていることは極めて少なく、論文中のグラフから、その情報をデジタルに変換して得ることも検討する（例えば、アナログからデジタルに変換する手法を検討するなど）必要がある。関連して限界耐力計算においては、部材の変形性能など、安全限界時変形の評価が必要となるが、これらの評価式は技術基準解説書には記載されていないため、部分的に提案式のある部材のみ検討対象とした。今後は、変形性能に関する評価精度を検討する必要がある。さらには、実験データベースに収集された各因子の偏りやばらつきを統計的に評価できるような手法についても検討することが望ましい。

(2) 合理的な設計手法の提案のための今後の課題

現在は設計式の評価精度を直接考慮した設計体系ではないが、将来的に包括的なデータが整備され、各設計式の評価精度が明確になれば、各部材の評価式に応じて安全余裕度を適切に設定できる設計体系を構築することができる。そのために現時点においては、現在収集したデータベースの粗密を分析し、設計において不足している部材についての情報収集を行うことが必要である。また精度の高いデータベースの構築の為には、実験論文に記載される内容に的確に記載される必要がある。今回、本資料で取り纏める過程で、部材毎の課題を以下に挙げる。

【梁】

今後の設計体系が変形を陽に評価する手法に移行する傾向があるのであれば、せん断強度式としては、経験式による荒川式からトラス・アーチ理論式への移行を検討する必要があると考えられる。付着設計については、付着強度の評価式に加え、実情に合致した設計用付着応力度の設定を合理的に定める必要があると考えられる。

今後、有用な実験データを蓄積するためには、変形性能までを評価する場合には、片側の破壊によって、実験データの荷重-変形関係が支配的にならない平行機構を有するダブルカーバチャータイプの構造実験が必須となると考えられる。

実施設計を前提とした研究をさらに進めるためには、短期許容応力度レベルなどの構造設計について、各種のせん断補強筋によって取り扱いが異なっているなど、構造設計者が考える小さい変形（部材角 $1/100$ から $1/50\text{rad}$ ）レベルの構造性能に着目した研究が望まれると考えられる。近年は、限界耐力計算法などの設計法の整備も進められており、データベースを作成するにあたって荷重変形関係などのデータのデジタル化も合わせて進める必要があると考えられる。

試験体スケールをある程度確保し、制御できる荷重レベルでの初期変位の剛性を計測できる実験手法の確立が望まれる。今後、標準試験方法の提示など、精度のよい構造実験に関する情報を

公示し、有用な実験データを蓄積することが望まれる。また、変形性能を議論する場合には、厳密には加力サイクルの影響も考えられることから、標準的な加力サイクルの提示を、官民学で協力して定めることも重要であると考えられる。

【柱】

梁部材と同様に柱部材についても、せん断強度式としては曲げ降伏後の変形性能についても検討が可能なトラス・アーチ理論式への移行を検討する必要があると考えられる。付着設計については、構造設計者が検討する合理的な設計用付着応力度の設定が必要であると考えられる。これは、近年は構造解析技術およびソフトの開発が進展しており、構造設計者は静的増分解析結果から予め極大地震時における曲げモーメント分布を把握することが可能である。そのため、柱部材の設計用付着応力度を、一義的に階高中央位置を反曲点として求めるのではなく、実情に合わせた設計用付着応力度の設計を可能とする合理的な設計手法の確立が必要であると考えられる。過去に経験した RC 造建物の甚大な地震被害要因の一つに、高軸力が作用することで柱部材が破壊し鉛直支持能力を喪失してしまう破壊モードに関する設計法を明確に示していく必要があると考えられる。

梁部材と同様であるが、今後、様々な目的によって実施されると予想される構造実験に対して、標準的で理想的な構造実験例を提示し、日本の研究レベルの底上げを行うことができないか。また、研究者から共有データの提出を行うことで何らかのインセンティブを享受しながら、複数の研究者または任命された研究者によって精度のいいデータベースの構築ができないか、今後議論を行う必要があると考えられる。

【腰壁・垂れ壁付き梁】

本研究で検討を行なった構造スリットを設けた腰壁・垂れ壁付き梁および腰壁・垂れ壁付き梁の評価式では、矩形の梁断面の評価式を壁付の梁に準用しているものが多く精度が良いとは言えなかった。重要な耐震性能項目である、腰壁・垂れ壁付き梁の曲げ終局強度や降伏点剛性低下率の精度はまだ十分とはいえない。これは、実験による腰壁・垂れ壁付き梁の履歴性状を三折れ線でモデル化する際の手法にも依存するため、今後は部材のモデル化も含めた総合的な評価が必要と考えられる。

【袖壁付き柱】

袖壁付き柱の変形性能評価について言及すれば、現在、曲げ理論の解釈に基づいた合理的な設計法の開発が様々な機関で実施、検討され始めている。今後は、それらを発展させ部材降伏時の変形や限界変形角の精度を高めることが期待される。とくに、限界変形角は、袖壁圧縮端部の拘束状態に依存するため、そのことを考慮した設計法の開発が望まれる。一方、袖壁付き柱は、独立柱に比べて剛性が高く、大きなせん断力を負担できる特徴を有し、それらを有効に利用する設計法も考えられる。しかし、その部材が大きく損傷する可能性を秘めていることを忘れてはならない。以上より、袖壁付き柱を有効かつ安全に設計するためには、ある耐力、変形時にどのような損傷になるかを把握し、推定する必要があると考えられる。例えば、袖壁付き柱のひび割れ幅の推定方法の開発やせん断ひび割れ発生荷重の正確な推定手法の開発も必要と考えられる。

【耐力壁】

耐力壁部材の復元力特性には、3本柱モデル（壁谷澤モデル）が使われるのが一般的である。今回の検討では、試験体を高さ方向に細かく分割し、分割された各断面に作用するモーメントに対応する曲率を積分する形で、曲げ変形を計算したため、曲率の分布など曲げの復元力特性に関する設定が異なっている。今後は3本柱モデルと実験結果との対応の確認も必要である。また、変形に関しては、せん断破壊時の変形角を計算値が過小評価する傾向が見られた。その一因として、せん断破壊した試験体の最大耐力が、いずれのせん断終局強度式を用いた場合にも過小評価されたことが挙げられる。せん断終局強度を低めに見積もること自体は安全側の考え方であり、問題ないように考えられるが、その結果、せん断破壊する試験体の変形性能が実験結果と大きく乖離しているようであれば何らかの対応が必要になると考えられる。

また、X形配筋とした試験体や二方向水平载荷の試験体など、今回、検討を行わなかった試験体についても、構造性能の評価方法を確認しておく必要がある。

【柱梁接合部】

本調査での精度検証のほとんどは直交梁やスラブのない平面試験体を対象としたものであり、より実構造物に近い直交梁やスラブを有する試験体についての検討が必要である。また、これらは試験体数自体も少ないため、実験結果の蓄積も必要といえる。さらに、本研究では2方向加力を行った場合については対象外としているが、2方向加力された場合については評価方法の確立も含め今後の課題である。

柱梁接合部の復元力特性に関しては評価方法の提案も含めて研究は十分とはいえない。また、復元力特性の検証には複雑な柱梁接合部の変形を詳細に測定する必要があり、測定方法の共有化と実験データの蓄積も今後の課題である。

謝辞

本研究の実施にあたり、多くの研究者による貴重な実験データを引用させていただいた。また、以下にあげる国土交通省建築基準整備促進事業の事業者からは測定データの電子データを含む詳細な実験データを提供していただいた。ここに記して厚く謝意を表します。

- ・平成 20 年度 課題 6：鉄筋コンクリート造の柱はり接合部のせん断破壊に関する実験（事業主体：東京大学）
- ・平成 20～22 年度 課題 7：鉄筋コンクリート造の変断面部材の構造特性評価に関する実験（事業主体：東京大学，横浜国立大学，福井大学）
- ・平成 20～21 年度 課題 8：開口の数や位置を考慮した鉄筋コンクリート造の耐力壁の強度・剛性評価方法に関する実験・解析（事業主体：大阪大学，豊橋技術科学大学，京都大学，竹中工務店）
- ・平成 20～21 年度 課題 9：鉄筋コンクリート造の耐力壁周辺架構の条件設定に関する実験（事業主体：名古屋大学，名古屋工業大学，豊橋技術科学大学，矢作建設工業）
- ・平成 21 年度 課題 6：鉄筋コンクリート造の各種柱はり接合部の耐力評価に関する実験（事業主体：東京大学，大林組）
- ・平成 22～24 年度 課題 27-1：長周期地震動に対する鉄筋コンクリート造建築物の安全性検証方法に関する検討（事業主体：大林組，鹿島建設，小堀研究所，清水建設，大成建設，竹中工務店）
- ・平成 22～23 年度 課題 29：鉄筋コンクリート造の壁はり接合部等の耐力評価に関する実験（事業主体：東京大学，大林組）
- ・平成 22～23 年度 課題 30：有開口耐力壁の変形能力の評価等に関する実験・解析（事業主体：大阪大学，豊橋技術科学大学，京都大学，竹中工務店）
- ・平成 23～24 年度 課題 39：鉄筋コンクリート造連層耐力壁の構造詳細と部材種別に係る基準の整備に資する検討（事業主体：京都大学，東京工業大学，東京大学，名古屋工業大学，大阪大学，豊橋技術科学大学）