

静的線形解析結果を対象とした矩形 RC 断面の照査用エクセルマクロ

日中構造研究所 松原勝己

同 上 朴 永軍

同 上 浦野和彦

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐震性照査では、梁要素モデルに対する構造解析により発生断面力を算出し、それに基づき許容応力度照査あるいは部材耐力照査などの断面照査を行って構造物の安全性を検討します。RC 断面照査は、市販のソフトで基本的な対処が可能ですが、設計指針の差異や各種構造解析ソフトの出力に対応したい場合など、エクセルマクロで作成しておく都合が良い場合があります。

そこで、梁要素モデルを用いた静的線形解析による断面力出力結果を前提とし、許容応力度照査および部材耐力照査のプログラムを、エクセルマクロ（VBA）を用いて作成しました。

なお、本マクロは、以前に掲載した「RC 断面照査のプログラム（エクセルマクロ）」の更新版となります。主な更新点は、以下の通りです。

- (1) 断面諸元の入力シートおよび照査対象要素を指定するシートのフォーマットを変更した。
- (2) 断面力の入力方法として、ES の出力フォーマットに従わないケースも可能とした。
- (3) 許容応力度照査時（L1 照査時）の中立軸算定に収束計算（2 分法）を導入した。

エクセルシートを添付しているので、自由に使っていただいても結構ですが、計算結果の妥当性判断については使用者に委ねることとします。また、ソースコードについても公開しています。

2. 照査の概要

上水道施設の耐震指針（「水道施設耐震工法指針・解説 社団法人 日本水道協会」）に示される照査方法に基づいて RC 断面照査を行うマクロであり、許容応力度照査、曲げ耐力照査、せん断耐力照査および破壊モード判定が可能である。以下の手順で照査を実施した。

- (1) 構造解析によって発生断面力を算出していることを前提とし、要素番号と断面力のデータをエクセルシート上に入力する。また、構造解析ソフト ES（フォーラムエイト）のワード出力形式でのアウトプットを用いることも可能である。
- (2) 部位名ごとに断面諸元（部材厚や鉄筋量など）を読み込む。
- (3) 要素番号と部位名の対応から、各要素の断面諸元を設定する。
- (4) 照査対象要素に対し、断面諸元と発生軸力により終局曲げモーメントを算出し、L2 時の発生曲げモーメントと比較して曲げ照査を実施。
- (5) 照査対象要素に対し、断面諸元と L1 時の発生断面力から発生応力度を算出し、許容応力度照査を実施。
- (6) 照査対象要素に対し、断面諸元と発生断面力によりせん断耐力を算出し、L2 時の発生せん断力と比較して、せん断照査および破壊モード判定を実施。

3. マクロの内容

(1) 発生断面力の入力

発生断面力の読み込みは、構造解析結果から得られる要素番号、I,J 端の区別および断面力をエクセルシート上に入力する。また、ES の出力フォーマット（ワード出力）をエクセルシートに貼り付け、その値をエクセルマクロに取り込むことも可能である。

(2) L1 照査時の応力度計算

具体的算出方法は解析式を用いた計算である（「6.許容応力度照査時の応力度計算」を参照）。計算仮定やモデル仮定は 2002 年版コンクリート標準示方書（土木学会）に準拠している。

(3) L2 照査時の終局曲げモーメントの算定

具体的算出方法は解析式を用いた計算である（「7.L2 照査時の曲げ耐力とせん断耐力の計算」を参照）。計算仮定やモデル仮定は 2015 年版下水道施設耐震計算例（社団法人 日本下水道協会）に準拠している。

(4) L2 照査時のせん断耐力の算定

せん断耐力式は、2009 年版水道施設耐震工法指針・設計事例集の算定式に従っている。この算定式は 2007 年版コンクリート標準示方書（土木学会）と同一である。

(5) 安全係数

安全係数は 2009 年度版水道施設耐震工法指針・設計事例集に従い、曲げ照査に関しては全て 1.0、せん断照査に関しては、コンクリート材料係数 1.3、コンクリート部材係数 1.3 および鉄筋部材係数 1.1 とした。（後に示す「5.計算例」では、曲げ照査時のコンクリート材料係数を 1.3 としている）

(6) 破壊モード判定

2015 年版下水道施設耐震計算例（社団法人 日本下水道協会）と同じ方法を用いた。せん断スパンは応答せん断力に対する応答曲げモーメントの比で求め、曲げ終局時のせん断力は鉄筋降伏強度を 2 割増しとして算出した。

4. 入力項目および使用時の留意点

(1) 入力シートの説明

「断面諸元」、「要素指定」、「断面力 L2」および「断面力 L1」に入力データを作成する。ES の断面力出力を使用する場合には、ワード出力形式のアウトプットを「断面力 L2(ES)」と「断面力 L1(ES)」に貼り付ける。

(2) 「断面諸元」の入力項目

データ数、通し番号、部位名、部材厚、部材幅、コンクリートヤング係数、鉄筋ヤング係数、コンクリート強度、鉄筋降伏強度（主鉄筋）、上筋位置、上筋断面積、下筋位置、下筋断面積、コンクリート許容応力度、鉄筋許容応力度、許容せん断応力度 τ_{a1} 、許容せん断応力度 τ_{a2} 、せん断補強筋強度、せん断補強筋面積、せん断補強筋ピッチ

(3) 「要素指定」の入力項目

データ数、通し番号、要素番号、部位名

本データにより、照査を行う要素番号を指定する。ここで指定した要素番号の断面力を「断面力 L2」および「断面力 L1」データからピックアップを行う。また、要素番号に対応付けた部位名により、先の

「断面諸元」データから断面諸元をピックアップする。

(4) 「断面力 L2」 および 「断面力 L1」 の入力項目

データ数、通し番号、要素番号、I,J 端の区別、曲げモーメント、軸力、せん断力

(5) 「断面力 L2(ES)」 および 「断面力 L1(ES)」

本マクロでは、ES から出力される断面力一覧表（ワード出力）を使用することも可能である。この一覧表には、以下の情報、着目点、荷重ケース、N'（軸力）、Syp（せん断力）、Szp（面外方向せん断力）、T（ねじりモーメント）、Myp（面外方向曲げモーメント）、Mzp（曲げモーメント）がストアされる。本マクロではこのうち、N'、Syp および Mzp を照査に用いる。

(6) 使用上の注意点

- ・ ES の出力を用いる場合 (iflag1=1)、断面力の着目点には、「○○○:x=□□□」の形で要素番号と座標を入力する。○○○が要素番号を、□□□が梁要素 i 端からの距離を表すが、この要素番号と各シートの要素番号を対比させて、断面力を埋め込んでいる。

- ・ ES の出力を用いる場合、断面力の荷重ケースには、予めユーザーが、L2 照査で用いる断面力には「L2 地震時」を、L1 照査で用いる断面力には「L1 地震時」と指定しておく必要がある。（マクロ内でそのラベルを用いてデータを抽出）

- ・ 上記の(2)～(5)のエクセルシートの全てにおいて、最初の一行目に、データ数を入力する必要がある。

- ・ 「断面諸元」データの「上筋」は正の曲げモーメントが作用するときの圧縮側の鉄筋を、「下筋」は正の曲げモーメントが作用するときの引張側の鉄筋を表す。また、「上筋位置」および「下筋位置」は、両方とも上筋側コンクリート表面からの距離を表す。

- ・ 「断面諸元」データの「部位名」は、「L1 許容応力度照査」、「L2 曲げ照査」および「L2 せん断照査」のシートの「部位名」に対応する。「部位名」が同一の断面諸元データを用いて応力度や耐力が計算される。

- ・ 「断面諸元」データの「許容せん断応力度 τ_{a1} 」はせん断補強筋を必要としないときの許容せん断応力度であり、一方「許容せん断応力度 τ_{a2} 」はせん断補強筋を使用したときの許容せん断応力度である。本マクロでは、 τ_{a2} に対する照査は実施していない。

- ・ 「断面諸元」データの「せん断補強筋ピッチ」はせん断補強筋の部材軸方向のピッチであり、「せん断補強筋断面積」は 1 ピッチあたりにせん断補強筋が占める断面積である。

- ・ マクロ内にフラグ iflag1 と iflag2 を作成した。iflag1=1 とすると、ES の出力を用いて断面力を入力する。また、iflag2=1 とすると、L1 時の照査を考慮し、「断面諸元」で入力した許容応力度を 1.5 倍する。現マクロでは、デフォルト値として iflag1=0、iflag2=1 としている。

5. 計算例

本マクロを使用した計算例として、入力および出力のエクセルシートを示す。

- 表 1 エクセルシート「断面諸元」のデータ例
- 表 2 エクセルシート「要素指定」のデータ例
- 表 3 エクセルシート「断面力 L1」のデータ例
- 表 4 エクセルシート「断面力 L2」のデータ例
- 表 5 エクセルシート「L1 許容応力度照査」のデータ例（許容応力度照査）
- 表 6 エクセルシート「L2 曲げ照査」のデータ例（曲げ耐力に対する照査）
- 表 7 エクセルシート「L2 せん断照査」のデータ例（せん断耐力に対する照査）
- 表 8 本マクロと他ソフトの比較

L1 時の断面力に対して許容応力度照査を、L2 時の断面力に対して曲げ耐力およびせん断耐力に関する照査を実施している。

上記照査においては、各要素の両端（I,J 端）における断面力のうち大きい方の断面力（曲げ照査では曲げモーメント、せん断照査ではせん断力）を用いて照査を行っている。

本マクロと他ソフトによる結果（応力度計算、終局曲げモーメントおよびせん断耐力）も比較し、ほぼ一致していることがわかる。

他ソフトのうち、「市販ソフト」は「ES（フォーラムエイト作成）」、「表計算」は「エクセル表計算による複鉄筋矩形断面の曲げ応力度算出」、「別マクロ」は「複鉄筋矩形 RC 断面の照査用エクセルマクロ」を使用している。

表1 エクセルシート「断面諸元」のデータ例

データ数	24																	
通し番号	部位名	部材厚 h(cm)	幅 b(cm)	コンクリート ヤング係数 Ec (kN/mm ²)	鉄筋 ヤング係数 Es (kN/mm ²)	コンクリート 強度 fc (N/mm ²)	鉄筋 降伏強度 fy (N/mm ²)	上筋位置 du(cm)	上筋 断面積 Asu(cm ²)	下筋位置 dd(cm)	下筋 断面積 Asd(cm ²)	コンクリート 許容応力度 σ_{ca} (N/mm ²)	鉄筋 許容応力度 σ_{sa} (N/mm ²)	せん断 許容応力度 τ_{a1} (N/mm ²)	せん断 許容応力度 τ_{a2} (N/mm ²)	せん断補強筋 降伏強度 fvy(N/mm ²)	せん断補強筋 断面積 Aw(cm ²)	せん断補強筋 ピッチ Ss(cm)
1	頂版-1	30	100	22	200	18	295	7	19.404	23	15.888	7	176	0.4	1.8	295	2.534	120
2	頂版-2	30	100	22	200	18	295	7	19.404	23	7.944	7	176	0.4	1.8	295	2.534	120
3	左側壁	35	100	23.5	200	21	295	7	19.404	28	7.944	8	176	0.42	1.9	295	2.534	120
4	中壁	27	100	23.5	200	21	295	5.5	19.404	21.5	19.404	8	176	0.42	1.9	295	2.534	120
5	右側壁	35	100	23.5	200	21	295	7	7.944	28	19.404	8	176	0.42	1.9	295	2.534	120
6	底版-1	40	100	23.5	200	21	295	7	15.888	33	19.404	8	176	0.42	1.9	295	2.534	120
7	底版-2	40	100	23.5	200	21	295	7	7.944	33	19.404	8	176	0.42	1.9	295	2.534	120

表2 エクセルシート「要素指定」のデータ例

データ数	24	
通し番号	要素番号	部位名
1	113	頂版-1
2	120	頂版-1
3	123	頂版-2
4	33	頂版-2
5	31	頂版-1
6	2	頂版-1
7	47	左側壁
8	54	左側壁
9	62	左側壁
10	68	左側壁
11	91	中壁
12	97	中壁
13	107	中壁
14	112	中壁
15	69	右側壁
16	75	右側壁
17	84	右側壁
18	90	右側壁
19	39	底版-1
20	45	底版-1
21	92	底版-2
22	114	底版-2
23	133	底版-1
24	131	底版-1

表3 エクセルシート「断面力 L1」のデータ例

データ数	48				
通し番号	要素番号	I,J端	M (kNm)	N (kN)	S (kN)
1	113	I	37.612	-28.409	-7.954
2	113	J	35.327	-27.935	-10.324
3	120	I	15.014	-25.565	-22.174
4	120	J	9.174	-25.091	-24.544
5	123	I	-28.878	-22.721	-36.394
6	123	J	-36.347	-22.342	-38.29
7	33	I	-23.791	-21.615	23.765
8	33	J	-19.228	-21.236	21.869
9	31	I	0.666	-18.866	10.019
10	31	J	2.874	-18.392	7.649
11	2	I	5.028	-16.022	-4.201
12	2	J	3.681	-15.548	-6.571
13	47	I	31.636	-2.515	-29.497
14	47	J	26.444	-1.014	-29.797
15	54	I	-3.088	7.561	-27.862
16	54	J	-8.528	9.276	-26.44
17	62	I	-33.55	21.281	-6.43
18	62	J	-34.463	22.996	-2.663
19	68	I	-27.889	31.571	15.734
20	68	J	-22.888	33.929	20.673
21	69	I	3.036	12.01	14.46
22	69	J	5.544	13.51	14.16
23	75	I	15.194	20.37	8.632
24	75	J	16.678	22.085	6.095
25	84	I	2.764	35.805	-16.145
26	84	J	0.187	37.52	-9.921
27	90	I	-2.286	46.095	-1.275
28	90	J	-3.131	48.454	-5.37
29	39	I	6.215	-23.011	-30.979
30	39	J	-2.179	-23.506	-25.039
31	45	I	-19.841	-25.839	-0.934
32	45	J	-19.174	-26.43	4.763
33	92	I	-7.971	-27.963	20.684
34	92	J	0.483	-28.564	27.723
35	114	I	38.913	1.878	-61.648
36	114	J	18.787	1.275	-53.278
37	133	I	-28.012	-0.879	-20.976
38	133	J	-33.622	-1.482	-10.96
39	131	I	-27.092	-3.293	25.344
40	131	J	-17.591	-3.811	38.226
41	91	I	16.658	70.5	-0.962
42	91	J	16.581	70.996	-1.072
43	97	I	14.667	76.288	-4.16
44	97	J	13.728	77.611	-5.242
45	107	I	-6.529	89.518	-18.094
46	107	J	-10.318	90.841	-19.802
47	112	I	-29.031	96.133	-27.1
48	112	J	-33.921	97.29	-28.791

表4 エクセルシート「断面力 L2」のデータ例

データ数	48				
通し番号	要素番号	I,J端	M (kNm)	N (kN)	S (kN)
1	113	I	48.148	-26.877	-11.746
2	113	J	44.915	-25.881	-14.116
3	120	I	19.861	-20.904	-25.966
4	120	J	13.072	-19.908	-28.336
5	123	I	-29.733	-14.931	-40.186
6	123	J	-37.962	-14.134	-42.082
7	33	I	-8.986	-14.03	10.409
8	33	J	-7.095	-13.234	8.513
9	31	I	-3.885	-8.256	-3.337
10	31	J	-5.016	-7.261	-5.707
11	2	I	-19.559	-2.283	-17.557
12	2	J	-24.245	-1.288	-19.927
13	47	I	43.579	-6.307	-29.161
14	47	J	38.417	-4.806	-29.792
15	54	I	7.371	3.769	-31.228
16	54	J	1.173	5.484	-30.662
17	62	I	-34.488	17.489	-17.732
18	62	J	-37.789	19.204	-15.267
19	68	I	-47.842	27.779	-5.501
20	68	J	-49.085	30.137	-3.548
21	69	I	31.147	25.366	-0.997
22	69	J	30.921	26.867	-1.628
23	75	I	27.014	33.727	-9.717
24	75	J	24.748	35.442	-13.064
25	84	I	-24.696	49.162	-32.062
26	84	J	-29.55	50.877	-16.944
27	90	I	-21.669	59.452	23.537
28	90	J	-14.81	61.81	25.725
29	39	I	40.983	2.172	-32.776
30	39	J	31.266	0.74	-31.879
31	45	I	-7.008	-5.944	-21.459
32	45	J	-13.877	-7.616	-17.7
33	92	I	-24.568	-11.921	-5.183
34	92	J	-25.287	-13.597	1.281
35	114	I	57.902	51.161	-78.265
36	114	J	32.107	49.487	-68.946
37	133	I	-30.479	43.553	-29.598
38	133	J	-38.625	41.903	-16.761
39	131	I	-32.758	36.982	30.604
40	131	J	-21.086	35.583	47.51
41	91	I	37.404	60.935	-3.443
42	91	J	37.137	61.431	-3.674
43	97	I	31.978	66.723	-10.16
44	97	J	29.722	68.046	-12.429
45	107	I	-15.369	79.953	-39.414
46	107	J	-23.609	81.276	-43.001
47	112	I	-64.039	86.568	-58.325
48	112	J	-74.555	87.726	-61.874

表6 エクセルシート「L1 許容応力度照査」のデータ例（許容応力度照査）

[illegible]

(注)この「L1 許容応力度照査」のデータは、せん断応力算出時の j 値 ($z=jd$ (d :有効高)が圧縮合力位置から引張鉄筋までの距離)を $j=1.0$ としている

表6 エクセルシート「L2 曲げ照査」のデータ例（曲げ耐力に対する照査）

[illegible]

(注)この「L2 曲げ照査」のデータは、曲げ耐力算出時のコンクリート材料係数 $g_{mc}=1.3$ として計算されたものである

表7 エクセルシート「L2せん断照査」のデータ例（せん断耐力に対する照査）

データ数	24															
通し番号	要素番号	部位名	M (kN・m)	N (kN)	V (kN)	有効高補正 β_d	引張鉄筋補正 β_p	軸力補正 β_n	コンクリート負 担分 V_c (kN)	補強筋負担 分 V_s (kN)	せん断耐力 V_y (kN)	せん断スパン a(m)	Vmu(kN)	Vmu/Vy	照査値 V/Vy	判定
1	113	頂版-1	48.148	-26.877	-14.116	1.444	0.8840	0.9503	103.1	11.3	114.4	3.411	35.6	0.311	0.123	OK
2	120	頂版-1	19.861	-20.904	-28.336	1.444	0.8840	0.9613	104.3	11.3	115.6	0.701	174.0	1.505	0.245	OK
3	123	頂版-2	-37.962	-14.134	-42.082	1.444	0.9449	0.9772	113.3	11.3	124.6	0.902	157.9	1.267	0.338	OK
4	33	頂版-2	-8.986	-14.03	10.409	1.444	0.9449	0.9774	113.3	11.3	124.6	0.863	165.1	1.324	0.084	OK
5	31	頂版-1	-5.016	-7.261	-5.707	1.444	0.9449	0.9884	114.6	11.3	125.9	0.879	163.4	1.298	0.045	OK
6	2	頂版-1	-24.245	-1.288	-19.927	1.444	0.9449	0.9979	115.7	11.3	127.0	1.217	118.5	0.933	0.157	OK
7	47	左側壁	43.579	-6.307	-29.792	1.375	0.6571	0.9827	96.7	13.8	110.5	1.463	64.7	0.586	0.270	OK
8	54	左側壁	7.371	3.769	-31.228	1.375	0.6571	1.0052	98.9	13.8	112.7	0.236	406.0	3.604	0.277	OK
9	62	左側壁	-37.789	19.204	-17.732	1.375	0.8849	1.0143	134.4	13.8	148.2	2.131	86.6	0.584	0.120	OK
10	68	左側壁	-49.085	30.137	-5.501	1.375	0.8849	1.0224	135.4	13.8	149.2	8.923	20.8	0.140	0.037	OK
11	91	中壁	37.404	60.935	-3.674	1.469	0.9664	1.0472	124.3	10.6	134.9	10.181	13.8	0.102	0.027	OK
12	97	中壁	31.978	66.723	-12.429	1.469	0.9664	1.0517	124.8	10.6	135.4	2.573	54.7	0.404	0.092	OK
13	107	中壁	-23.609	81.276	-43.001	1.469	0.9664	1.0629	126.1	10.6	136.7	0.549	258.3	1.890	0.315	OK
14	112	中壁	-74.555	87.726	-61.874	1.469	0.9664	1.0529	124.9	10.6	135.5	1.205	118.2	0.872	0.457	OK
15	69	右側壁	31.147	25.366	-1.628	1.375	0.8849	1.0189	135.0	13.8	148.8	19.132	9.7	0.065	0.011	OK
16	75	右側壁	27.014	33.727	-13.064	1.375	0.8849	1.0251	135.8	13.8	149.6	2.068	90.1	0.602	0.087	OK
17	84	右側壁	-29.55	50.877	-32.062	1.375	0.6571	1.0697	105.2	13.8	119.0	0.922	109.7	0.922	0.269	OK
18	90	右側壁	-21.669	59.452	25.725	1.375	0.6571	1.0814	106.4	13.8	120.2	0.842	121.2	1.009	0.214	OK
19	39	底版-1	40.983	2.172	-32.776	1.319	0.8378	1.0015	142.1	16.3	158.3	1.250	174.3	1.101	0.207	OK
20	45	底版-1	-13.877	-7.616	-21.459	1.319	0.7838	0.9873	131.0	16.3	147.3	0.647	284.0	1.929	0.146	OK
21	92	底版-2	-25.287	-13.597	-5.183	1.319	0.6221	0.9626	101.4	16.3	117.6	4.879	22.1	0.187	0.044	OK
22	114	底版-2	57.902	51.161	-78.265	1.319	0.8378	1.0368	147.1	16.3	163.3	0.740	302.6	1.853	0.479	NG
23	133	底版-1	-38.625	41.903	-29.598	1.319	0.7838	1.0350	137.4	16.3	153.6	1.305	146.0	0.950	0.193	OK
24	131	底版-1	-32.758	36.982	47.51	1.319	0.7838	1.0309	136.8	16.3	153.1	0.689	275.3	1.798	0.310	OK

表 8 本マクロと他ソフトの比較

(a) 応力度計算

要素 番号	本マクロ(A)			市販ソフト(B)			比(A/B)			表計算(C)		比(A/C)	
	σ_s	σ_c	τ	σ_s	σ_c	τ	σ_s	σ_c	τ	σ_s	σ_c	σ_s	σ_c
113	128.2	4.28	0.045	128.2	4.28	0.045	1.000	1.000	0.997	128.2	4.28	1.000	1.000
120	56.0	1.71	0.107	55.9	1.71	0.107	1.001	1.000	0.997	56.0	1.71	1.000	1.000
123	100.6	3.90	0.166	101.3	3.95	0.166	0.993	0.987	1.003	100.6	3.90	1.000	1.000
33	67.8	2.54	0.103	68.3	2.58	0.103	0.993	0.986	1.003	67.8	2.54	1.000	1.000
31	15.3	0.32	0.044	15.3	0.32	0.044	1.002	0.990	0.990	15.3	0.32	1.000	1.000
2	21.3	0.57	0.029	21.3	0.57	0.029	0.999	1.000	0.985	21.3	0.57	1.000	1.000
47	157.0	3.49	0.106	157	3.49	0.106	1.000	1.000	1.004	157.0	3.49	1.000	1.000
54	15.5	0.67	0.100	15.6	0.67	0.1	0.996	0.995	0.995	15.5	0.67	1.000	1.000
62	66.6	2.68	0.023	66.8	2.7	0.023	0.996	0.993	0.998	66.6	2.68	1.000	1.000
68	50.5	2.18	0.074	50.6	2.19	0.074	0.998	0.996	0.998	50.5	2.18	1.000	1.000
91	29.1	1.89	0.005	29.2	1.9	0.005	0.998	0.997	0.997	29.1	1.89	1.000	1.000
97	22.4	1.67	0.024	22.4	1.67	0.024	0.998	0.998	1.016	22.4	1.67	1.000	1.000
107	8.1	1.17	0.092	8.15	1.17	0.092	0.999	0.996	1.001	8.1	1.17	1.000	1.000
112	70.6	3.85	0.134	70.8	3.86	0.134	0.997	0.996	0.999	70.6	3.85	1.000	1.000
69	8.2	0.44	0.052	8.19	0.438	0.052	1.003	0.999	0.993	8.2	0.44	1.000	1.000
75	29.4	1.31	0.031	29.4	1.31	0.031	0.999	0.998	0.994	29.4	1.31	1.000	1.000
84	-0.2	0.23	0.058	0	0.22	0.058	-	1.035	0.994	-0.2	0.23	1.000	1.000
90	-0.7	0.25	0.019	0	0.22	0.019	-	1.124	1.009	-0.7	0.25	1.000	1.000
39	17.3	0.31	0.094	17.9	0.35	0.094	0.965	0.873	0.999	17.3	0.31	1.000	1.000
45	51.1	1.17	0.014	51.2	1.18	0.014	0.999	0.994	1.031	51.1	1.17	1.000	1.000
92	51.5	0.68	0.084	51.3	0.68	0.084	1.005	1.001	1.000	51.5	0.68	1.000	1.000
114	68.4	2.27	0.187	69.9	2.38	0.187	0.978	0.955	0.999	68.4	2.27	1.000	1.000
133	72.9	2.02	0.064	73.2	2.04	0.064	0.996	0.991	0.993	72.9	2.02	1.000	1.000
131	59.4	1.63	0.116	59.6	1.64	0.116	0.997	0.993	0.999	59.4	1.63	1.000	1.000

(b) 終局曲げモーメント

要素 番号	市販ソフトとの比較			別マクロとの比較		
	Mu (本マクロ)	Mu (市販 ソフト)	比 (Mu)	Mu (本マクロ)	Mu (別マクロ)	比 (Mu)
113	99.1	99.1	1.000	99.1	99.1	1.000
120	99.6	99.6	1.000	99.6	99.6	1.000
123	116.9	116.8	1.001	116.9	116.9	1.000
33	116.9	116.9	1.000	116.9	116.9	1.000
31	117.8	117.8	1.000	117.8	117.8	1.000
2	118.3	118.3	1.000	118.3	118.3	1.000
47	77.3	77.3	1.000	77.3	77.3	1.000
54	78.4	78.4	1.000	78.4	78.4	1.000
62	152.4	152.4	1.000	152.4	152.4	1.000
68	153.7	153.7	1.000	153.7	153.7	1.000
91	116.2	116.1	1.001	116.2	116.2	1.000
97	116.6	116.6	1.000	116.6	116.6	1.000
107	117.8	117.8	1.000	117.8	117.8	1.000
112	118.4	118.4	1.000	118.4	118.4	1.000
69	153.1	153.2	1.000	153.1	153.1	1.000
75	154.1	154.1	1.000	154.1	154.1	1.000
84	83.6	83.5	1.002	83.6	83.6	1.000
90	84.6	84.5	1.001	84.6	84.6	1.000
39	179.8	179.6	1.001	179.8	179.8	1.000
45	151.0	151	1.000	151.0	151.0	1.000
92	87.8	87.8	1.000	87.8	87.8	1.000
114	186.0	185.9	1.001	186.0	186.0	1.000
133	157.8	157.7	1.000	157.8	157.8	1.000
131	157.1	157	1.001	157.1	157.1	1.000

(c) せん断耐力

要素 番号	市販ソフトとの比較			別マクロとの比較		
	Vy (本マクロ)	Vy (市販 ソフト)	比 (Vy)	Vy (本マクロ)	Vy (別マクロ)	比 (Vy)
113	114.4	114.2	1.002	114.4	114.0	1.004
120	115.6	115.5	1.001	115.6	115.3	1.003
123	124.6	124.5	1.001	124.6	124.6	1.001
33	124.6	124.5	1.001	124.6	124.6	1.001
31	125.9	125.8	1.001	125.9	125.9	1.000
2	127.0	127	1.000	127.0	127.0	1.000
47	110.5	110.7	0.998	110.5	109.9	1.005
54	112.7	112.7	1.000	112.7	112.8	0.999
62	148.2	148.1	1.000	148.2	148.2	1.000
68	149.2	149.1	1.001	149.2	149.3	0.999
91	134.9	135.2	0.997	134.9	135.0	0.999
97	135.4	135.8	0.997	135.4	135.5	0.999
107	136.7	137.1	0.997	136.7	136.9	0.999
112	135.5	135.5	1.000	135.5	137.5	0.986
69	148.8	149	0.998	148.8	148.9	0.999
75	149.6	149.9	0.998	149.6	149.7	0.999
84	119.0	119.4	0.997	119.0	121.3	0.981
90	120.2	121.3	0.991	120.2	122.8	0.979
39	158.3	158.3	1.000	158.3	158.3	1.000
45	147.3	147.6	0.998	147.3	147.1	1.001
92	117.6	117.8	0.999	117.6	116.5	1.009
114	163.3	163.5	0.999	163.3	163.5	0.999
133	153.6	154	0.997	153.6	154.0	0.998
131	153.1	153.1	1.000	153.1	153.4	0.998

6. 許容応力度照査時（L1 照査時）の応力度計算

許容応力度照査時の曲げ応力度の算定式を、中立軸位置が断面内にある場合と断面内に無い場合に分けて、提示する。また、せん断応力度および必要せん断補強筋量の算出式についても提示する。

6.1 中立軸が断面内にある場合の曲げ応力度

複鉄筋の矩形断面を仮定し、コンクリート圧縮縁応力および鉄筋応力の算定式を誘導する。

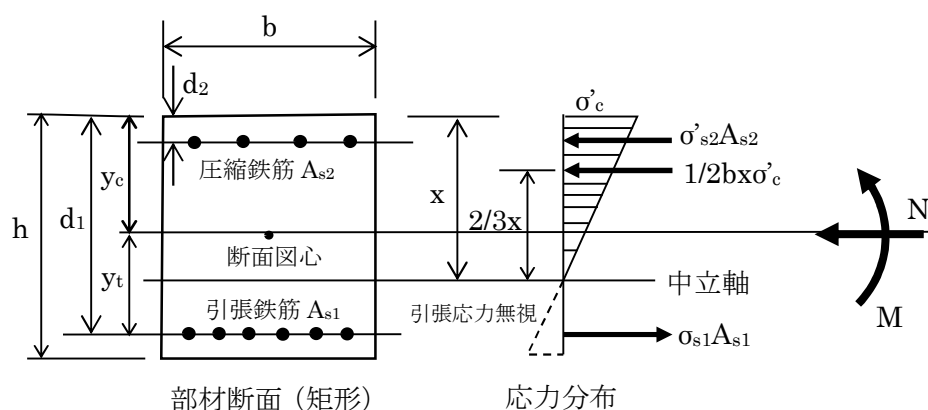


図 6-1 複鉄筋矩形断面での断面仮定

<記号の意味>

h : 部材高（全高）

d_1 : 有効高（圧縮縁から引張鉄筋中心位置までの距離）

d_2 : 圧縮鉄筋の芯かぶり（圧縮縁から圧縮鉄筋中心位置までの距離）

A_{s1} : 引張鉄筋断面積、 A_{s2} : 圧縮鉄筋断面積

b : 部材幅、 x : 圧縮縁から中立軸までの距離

y_t : 図心位置（引張鉄筋位置からの距離）、 y_c : 圧縮縁から断面図心までの距離

σ'_c : 圧縮縁でのコンクリート圧縮応力

σ_{s1} : 引張鉄筋の応力

σ'_{s2} : 圧縮鉄筋の応力

N' : 部材断面に作用する軸力（圧縮力を正とする）

M : 部材断面に作用する曲げモーメント（下縁側に引張を発生させる向きを正とする）

e : 軸力偏心距離（ $e=M/N'$ ）

E_s : 鉄筋のヤング係数

E_c : コンクリートのヤング係数

n : ヤング係数比（ $=E_s/E_c$ ）（ $n=15$ とする）

圧縮鉄筋応力 σ'_{s2} および引張鉄筋応力 σ_{s1} は、コンクリート圧縮応力 σ'_c により、次式で表される。

$$\sigma'_{S2} = E_S \frac{\sigma'_C \frac{x-d_2}{x}}{x} = n\sigma'_C \frac{x-d_2}{x} \quad (1)$$

$$\sigma_{S1} = E_S \frac{\sigma'_C \frac{x-d_2}{x}}{x} = n\sigma'_C \frac{d_1-x}{x} \quad (2)$$

RC 断面における軸力の釣り合いにより、次式が成立する。

$$N' = \frac{1}{2} b \sigma'_C x + A_{S2} \sigma'_{S2} - A_{S1} \sigma_{S1} \quad (3)$$

また、RC 断面における引張鉄筋位置回りのモーメントの釣り合いにより、次式が成立する。

$$M + N' y_t = \frac{1}{2} b x \sigma'_C \left(d_1 - \frac{x}{3}\right) + A_{S2} \sigma'_{S2} (d_1 - d_2) \quad (4)$$

式(1)および(2)を、式(3)および(4)に代入すれば、次式を得る。

$$N' = \frac{bx}{2} \sigma'_C + nA_{S2} \frac{x-d_2}{x} \sigma'_C - nA_{S1} \frac{d_1-x}{x} \sigma'_C \quad (5)$$

$$M + N' y_t = \frac{bx}{2} \sigma'_C \left(d_1 - \frac{x}{3}\right) + nA_{S2} \frac{(x-d_2)}{x} (d_1 - d_2) \sigma'_C \quad (6)$$

したがって、 $(M + N' y_t)/N'$ を計算すれば、 σ'_C を消去できる。

$$\frac{M + N' y_t}{N'} = \frac{bx^2(3d_1-x) + 6nA_{S2}(x-d_2)(d_1-d_2)}{3bx^2 + 6nA_{S2}(x-d_2) - 6nA_{S1}(d_1-x)} \quad (7)$$

式(7)を中立軸位置 x に関して整理すれば、次式を得る。

$$bd_1 N' x^3 + 3b\{(M + N' y_t) - d_1 N'\} x^2 + 6n\{A_{S1}(M + N' y_t) + A_{S2}(M + N' y_t - (d_1 - d_2)N')\} x - 6n\{A_{S1}(M + N' y_t)d_1 + A_{S2}(M + N' y_t - (d_1 - d_2)N')d_2\} = 0 \quad (8)$$

式(8)の両辺に、 $1/(bd_1^2)$ を乗じれば、次式を得る。

$$d_1 N' \left(\frac{x}{d_1}\right)^3 + 3\{M + N' y_t - d_1 N'\} \left(\frac{x}{d_1}\right)^2 - 6n \left\{ \frac{A_{S1}}{bd_1} (M + N' y_t) + \frac{A_{S2}}{bd_1} (M + N' y_t - (1 - \frac{d_2}{d_1})d_1 N') \right\} \left(\frac{x}{d_1}\right) - 6n \left\{ \frac{A_{S1}}{bd_1} (M + N' y_t) + \frac{A_{S2}}{bd_1} (M + N' y_t - (1 - \frac{d_2}{d_1})d_1 N') \frac{d_2}{d_1} \right\} = 0 \quad (9)$$

ここで、以下のパラメータを定義する。

$$k = \frac{x}{d_1} \text{ (中立軸比)}, p_1 = \frac{A_{S1}}{bd_1} \text{ (引張鉄筋比)}, p_2 = \frac{A_{S2}}{bd_1} \text{ (圧縮鉄筋比)}, \text{ および } \gamma = \frac{d_2}{d_1}$$

式(9)が、上記パラメータにより以下のように表すことができる。

$$N' d_1 k^3 + 3\{M + N' y_t - N' d_1\} k^2 + 6n[p_1(M + N' y_t) + p_2\{(M + N' y_t) - (1 - \gamma)N' d_1\}] k - 6n[p_1(M + N' y_t) + p_2\gamma\{(M + N' y_t) - (1 - \gamma)N' d_1\}] = 0 \quad (10)$$

さらに、以下のパラメータを定義する。

$$C = \frac{N' d_1}{M} \text{ および } \delta = \frac{y_t}{d_1}$$

このとき、式(10)が、次式のように書くことができる。

$$Ck^3 + 3\{1 - (1 - \delta)C\}k^2 + 6n[(p_1 + p_2) + \{(p_1 + p_2)\delta - p_2(1 - \gamma)\}C]k - 6n[(p_1 + p_2\gamma) + \{(p_1 + p_2\gamma)\delta - p_2\gamma(1 - \gamma)\}C] = 0 \quad (11)$$

ここで、

$$\eta = \frac{1-(1-\delta)C}{c} = \frac{1}{c} + \delta - 1 = \frac{M}{N'd_1} + \frac{y_t}{d_1} - 1 = \frac{e-y_c}{d_1}$$

を定義する。ここに、 $e=M/N'$ （軸力偏心距離）、 $y_c=d_1-y_t$ （圧縮縁から図心までの距離）である。

軸力 N' がゼロでないとき、式(a11)の両辺を C で除し、 $\frac{1+\delta}{c} = 1 + \eta$ になることを考慮して書き直せば、式(11)は次式となる。

$$k^3 + 3\eta k^2 + 6n\{p_1(1 + \eta) + p_2(\eta + \gamma)\}k - 6n\{p_1(1 + \eta) + p_2\gamma(\eta + \gamma)\} = 0 \quad (12)$$

式(12)が中立軸位置 x を算出するための方程式となる。 k に関する 3 次方程式を解けば、中立軸比 $k (=x/d_1)$ を求めることが可能である。

ここに、式(12)は吉川ら(2024)によって提示された式と一致している（ただし、吉川らの著書では上記パラメータ η を δ と表記している）。

なお、式(12)は軸力 N' がゼロでないときに適用可能であるが、 $N'=0$ の場合には、式(11)において $C=0$ とし次式が得られる。

$$k^2 + 2n(p_1 + p_2)k - 2n(p_1 + p_2\gamma) = 0 \quad (13)$$

次に、圧縮縁におけるコンクリート応力 σ'_c を求める。

式(6)より、

$$\sigma'_c = \frac{M+N'y_t}{\frac{bx}{2}(d_1-\frac{x}{3})+nAS_2\frac{(x-d_2)}{x}(d_1-d_2)} \quad (14)$$

先に定義したパラメータを用いると、圧縮縁でのコンクリート応力として、次式を得る。

$$\sigma'_c = \frac{6k(\sigma_M+\delta\sigma_N)}{k^2(3-k)+6np_2(k-\gamma)(1-\gamma)} \quad (15)$$

$$\text{ここに、}\sigma_M = \frac{M}{bd_1^2}, \sigma_N = \frac{N'}{bd_1}$$

また、圧縮鉄筋および引張鉄筋の応力は、式(a1)および(a2)より、次式で表される。

$$\sigma'_{s2} = n\sigma'_c \frac{x-d_2}{x} = n\sigma'_c \frac{k-\gamma}{k} \quad (16)$$

$$\sigma_{s1} = n\sigma'_c \frac{d_1-x}{x} = n\sigma'_c \frac{1-k}{k} \quad (17)$$

許容応力度照査時の照査方法については、式(15)および(17)を使用し、コンクリート圧縮応力および鉄筋引張応力が許容応力度を超えないとき、すなわち $\sigma'_c < \sigma_{ca}$ 、 $\sigma'_{s1} < \sigma_{sa}$ のとき OK（安全性が担保）とする（ここに、 σ_{ca} ：コンクリート許容応力度、 σ_{sa} ：鉄筋許容応力度）。

6.2 中立軸が断面外にある場合の曲げ応力度

中立軸が断面外にある場合、断面全体が圧縮応力あるいは引張応力となり、6.1 の定式が適用できなくなる。

本報告では、全断面圧縮時には全断面有効断面に対する応力算定式を適用して応力度を算出した。

圧縮側および引張側のコンクリート縁応力 σ_c および σ_t は、次式で表される。

$$\sigma_c = \frac{N}{A_g} + \frac{M}{I_g} y_c \quad (18)$$

$$\sigma_t = \frac{N}{A_g} - \frac{M}{I_g} (h - y_c) \quad (19)$$

ここに、N,M：軸力および曲げモーメント

y_c ：圧縮縁から断面図心までの距離（次式を参照）

h ：断面高さ

A_g, I_g ：全断面有効時の換算断面積および換算断面 2 次モーメント（次式を参照）

$$A_g = bh + n(A_{s1} + A_{s2}) \quad (20)$$

$$I_g = \frac{1}{3} b \{ y_c^3 + (h - y_c)^3 \} + n \{ A_{s1} (d_1 - y_c)^2 + A_{s2} (y_c - d_2)^2 \} \quad (21)$$

$$y_c = \frac{\frac{1}{2} b h^2 + n(A_{s1} d_1 + A_{s2} d_2)}{bh + n(A_{s1} + A_{s2})} \quad (22)$$

ここに、 b ：断面幅

n ：ヤング係数比（=15）

A_{s1} ：引張鉄筋断面積

A_{s2} ：圧縮鉄筋断面積

また、引張側および圧縮側鉄筋応力 σ_s および σ_s' は次式で表される。

$$\sigma_s = -n \left\{ \sigma_c - \frac{d_1}{h} (\sigma_c - \sigma_t) \right\} \quad (23)$$

$$\sigma_s' = n \left\{ \sigma_c - \frac{d_2}{h} (\sigma_c - \sigma_t) \right\} \quad (24)$$

上式において、コンクリート応力 σ_c および σ_t は圧縮正、鉄筋応力 σ_s は引張正、および σ_s' は圧縮正としている。

次に、全断面引張時では、式(20)および(21)の換算断面積および換算断面 2 次モーメント、式(22)の y_c において、コンクリート寄与分をゼロ値とすることにより、鉄筋応力を求めた。

6.3 せん断応力度および必要せん断補強筋量

許容応力度法せん断照査では、コンクリートせん断応力の照査と必要せん断補強筋量の照査を実施している。土木学会コンクリート標準示方書 2002 年版に準拠した。

(1) コンクリートせん断応力

コンクリートせん断応力の照査については、以下の通り、コンクリートせん断応力が許容せん断応力度を超えないとき、OK とする。

コンクリートせん断応力： $\tau < \tau_a \rightarrow \text{OK}$

$$\tau = \frac{V}{bjd} \times 1000 \quad (25)$$

ここに、 τ ：コンクリートのせん断応力 (N/mm²)

V ：応答せん断力 (kN)

b ：部材幅 (mm)

j ： $j=1/1.15$ ($z=jd$ が圧縮応力の合力位置から引張鉄筋までの距離)

(先の「5.計算例」では、 $j=1.0$ としている)

d ：有効高 (mm)

τ_a ：コンクリートのみで負担する場合の許容せん断応力度 (N/mm²)

(2) 必要せん断補強筋量

上記(1)の照査において、コンクリートせん断応力 τ が、許容せん断応力度 τ_a を超えたとき、必要せん断補強筋量の照査を行う。すなわち、必要せん断補強筋量及使用せん断補強筋量を超えないとき、OK とする。

必要せん断補強筋量： $A_{wn} < A_w \rightarrow \text{OK}$

ここに、 τ ：コンクリート応答せん断応力 (N/mm²)

A_w ：せん断補強筋の部材軸方向 1 ピッチあたりの使用せん断補強筋量 (mm²)

A_{wn} ：せん断補強筋の部材軸方向 1 ピッチあたりの必要せん断補強筋量 (mm²)

$$A_{wn} = \frac{\tau - 0.5 \times \tau_a}{\sigma_{saw}} bs \quad (26)$$

σ_{saw} ：せん断補強鉄筋の許容応力度 (N/mm²)

τ_a ：コンクリートのみで負担する場合の許容せん断応力度 (N/mm²)

b ：部材幅 (mm)

s ：せん断補強筋の部材軸方向ピッチ (mm)

7. L2 照査時の曲げ耐力およびせん断耐力の計算

7.1 終局曲げモーメント

7.1.1 解析式の誘導

終局曲げモーメントを算出するにあたり、以下の仮定を設ける。

- ①複鉄筋の矩形断面を仮定する。
- ②断面内のひずみ分布は、直線分布を仮定する。
- ③コンクリート圧縮側の応力ひずみ関係を非線形（放物線型）とする（図 7-2 参照）。
- ④終局時にはコンクリート圧縮縁がちょうど限界ひずみ $\epsilon_{cu}' (=0.0035)$ に達しているものとする。
- ⑤コンクリート引張応力は無視する。
- ⑥引張鉄筋は降伏しているものとする。すなわち、引張鉄筋降伏前に圧縮限界ひずみに達する破壊モードは考慮しないこととする。
- ⑦軸力は断面図心位置に作用するものと仮定する。

以下では、(i)圧縮側鉄筋が未降伏の場合、(ii)圧縮側鉄筋が圧縮降伏する場合、および(iii)圧縮側鉄筋が引張降伏する場合の3つのモードに対し、終局曲げモーメントを算出する。

(i) 圧縮側鉄筋が未降伏の場合

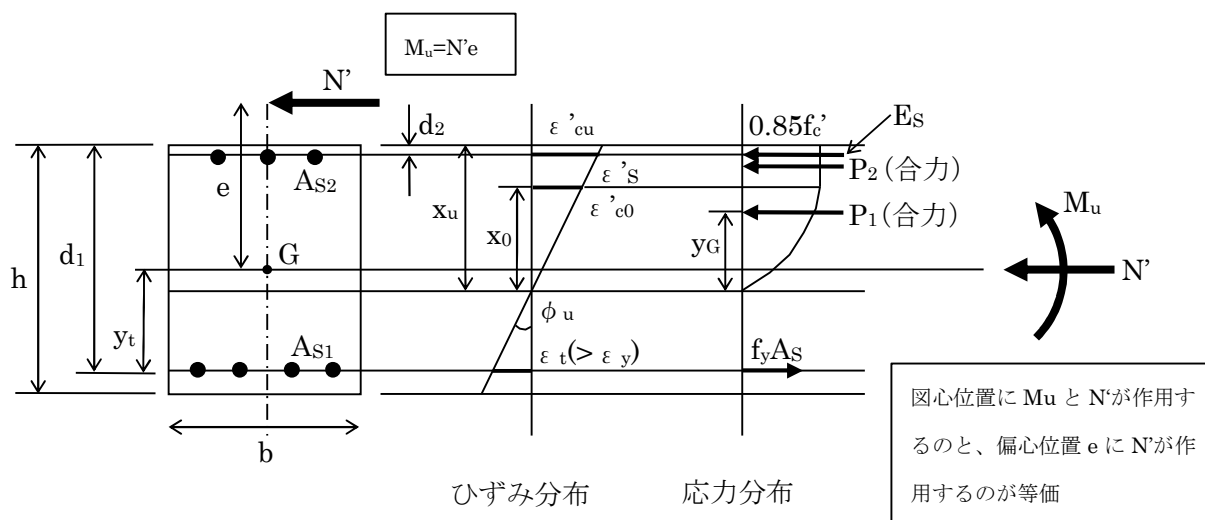


図 7-1 終局曲げモーメント算出時の断面仮定

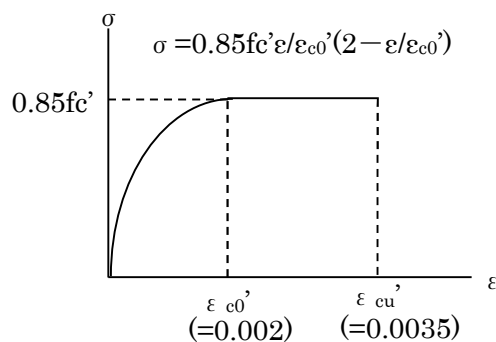


図 7-2 コンクリート応力-ひずみ関係（圧縮側）

【記号の説明】

h : 部材高さ (m)

d_1 : 有効高さ (m)

b : 部材幅 (m)

y_t : 引張鉄筋位置から断面図心位置までの距離 (m)

d_2 : 圧縮鉄筋のかぶり (圧縮縁から圧縮鉄筋位置までの距離) (m)

A_{s1} : 引張鉄筋断面積 (m²)

A_{s2} : 圧縮鉄筋断面積 (m²)

N' : 軸力 (圧縮を正) (kN)

e : 軸力の偏心量 (曲げモーメントを M として、 $M=N'e$) (m)

x_u : 終局時の中立軸位置 (圧縮縁から中立軸までの距離) (m)

x_0 : 中立軸からコンクリートひずみが ϵ'_{c0} ($=0.002$) になる位置までの距離 (m)

ϵ'_{c0} : コンクリート応力ひずみ関係において、圧縮応力が $0.85f'_c$ に達したときのひずみ (無次元)

f'_c : コンクリート強度 (kN/m²)

ϵ'_{cu} : コンクリートの限界ひずみ ($=0.0035$) (無次元)

ϵ'_s : 圧縮鉄筋のひずみ (圧縮を正) (無次元)

ϵ_t : 引張鉄筋のひずみ (無次元)

ϕ_u : 終局時の曲率 (1/m)

f_y : 鉄筋降伏強度 (kN/m²)

E_s : 鉄筋ヤング係数 (kN/m²)

E_c : コンクリートヤング係数 (kN/m²)

P_1 : コンクリート圧縮力のうち、中立軸からひずみ ϵ'_{c0} に達する位置までの圧縮応力の合力 (kN)

P_2 : コンクリート圧縮力のうち、ひずみが ϵ'_{c0} に達した位置から圧縮縁までの圧縮応力の合力 (kN)

y_G : 中立軸位置から P_1 までの距離 (m)

終局曲げモーメントを算出するために、上記の仮定のもとに、①部材軸方向の力の釣り合い式 (コンクリート圧縮応力、圧縮鉄筋圧縮応力、引張鉄筋引張応力および軸力の釣り合い) と②引張鉄筋位置周りのモーメントの釣り合い式 (コンクリート圧縮応力のモーメント、圧縮鉄筋応力のモーメント、曲げモーメントおよび軸力のモーメントの釣り合い) を立式する。そして、前者の①より中立軸位置を算出し、後者の②より終局曲げモーメントを求めることになる。

以下で、終局曲げモーメントの具体的な解析式の誘導を行う。

中立軸位置から、圧縮ひずみ ϵ'_{c0} ($=0.002$) となる位置までの距離 x_0 は、次式で表される。

$$x_0 = \frac{\epsilon'_{c0}}{\epsilon'_{cu}} x_u \quad (1)$$

また、圧縮鉄筋のひずみ ϵ'_s は、次式で表される。

$$\epsilon'_s = \frac{x_u - d_2}{x_u} \epsilon'_{cu} \quad (2)$$

部材軸 (水平) 方向の力の釣り合いにより、次式が成立する。

$$N' = P_1 + P_2 + E_s \epsilon'_s A_{s2} - f_y A_{s1} \quad (3)$$

ここに、 P_1 および P_2 は、それぞれ、応力値が $0.85f'_c$ を超えない区間におけるコンクリート圧縮応力の合力値および応力値が $0.85f'_c$ に達した区間におけるコンクリート圧縮応力の合力値である。すなわち、 P_1 は中立軸から x_0 までの距離の区間の圧縮応力、 P_2 は中立軸から x_0 離れた位置より外側の区間の圧縮応力に対応している。

式(3)に、上記の式(1)および(2)と「補足資料」の式(補 2)を用い、両辺を $0.85f'_c b d_1^2$ で割って無次元化した後、中立軸位置のパラメータ k_u に関する2次方程式として、次式が得られる。

$$(3 - \beta)k_u^2 + 3(\delta\psi_2 - \psi_1 - \bar{N}')k_u - 3\delta\psi_2\gamma = 0 \quad (4)$$

式(4)を k_u に関して解けば、次式を得る。

$$k_u = \frac{-3(\delta\psi_2 - \psi_1 - \bar{N}') + \sqrt{9(\delta\psi_2 - \psi_1 - \bar{N}')^2 + 12(3 - \beta)\delta\psi_2\gamma}}{2(3 - \beta)} \quad (5)$$

ここに、

$$k_u = \frac{x_u}{d_1}, \quad \beta = \frac{\varepsilon_{c0}'}{\varepsilon_{cu}'}, \quad \varepsilon_{cu}' = 0.0035, \quad \varepsilon_{c0}' = 0.002, \quad \delta = \frac{\varepsilon_{cu}'}{\varepsilon_y}, \quad \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s},$$

$$\psi_1 = \frac{f_y A_{s1}}{0.85f'_c b d_1}, \quad \psi_2 = \frac{f_y A_{s2}}{0.85f'_c b d_1}, \quad \gamma = \frac{d_2}{d_1}, \quad \bar{N}' = \frac{N'}{0.85f'_c b d_1}$$

また、 k_u に関しては、圧縮側鉄筋が未降伏の条件 $-\varepsilon_y < \varepsilon_s' < \varepsilon_y (=f_y/E_s)$ より、

$$\frac{\gamma\delta}{\delta+1} < k_u < \frac{\gamma\delta}{\delta-1} \quad (6)$$

の条件が付与される。

次に、引張鉄筋周りのモーメントの釣り合いにより、次式を得る。

$$M_u + N'y_t = P_1 \cdot (d_1 - x_u + y_G) + P_2 \cdot (d_1 - \frac{x_u - x_0}{2}) + E_s \varepsilon_s' A_{s2} \cdot (d_1 - d_2) \quad (7)$$

式(7)に、上記の式(1)および(2)と「補足資料」の式(補 2)および(補 4)を用い、両辺を $0.85f'_c b d_1^2$ で割って無次元化した後、 M_u に関して解けば、次式が得られる。

$$M_u = \bar{M}_u \cdot 0.85f'_c b d_1^2$$

$$\bar{M}_u = \frac{2}{3}\beta k_u \left(1 - \frac{8-5\beta}{8}k_u\right) + (1 - \beta)k_u \left(1 - \frac{1-\beta}{2}k_u\right) + \frac{k_u - \gamma}{k_u} \delta\psi_2(1 - \gamma) - \bar{N}' \frac{y_t}{d_1} \quad (8)$$

ここに、 $\beta = \frac{\varepsilon_{c0}'}{\varepsilon_{cu}'}, \quad \varepsilon_{c0}' = 0.002, \quad \varepsilon_{cu}' = 0.0035, \quad \delta = \frac{\varepsilon_{cu}'}{\varepsilon_y}, \quad \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s},$

$$\psi_2 = \frac{f_y A_{s2}}{0.85f'_c b d_1}, \quad \gamma = \frac{d_2}{d_1}, \quad \bar{N}' = \frac{N'}{0.85f'_c b d_1}, \quad y_t = d_1 - \frac{h}{2}$$

以上より、式(6)の条件のもとに、式(5)を用いて k_u をも求め、式(8)により終局曲げモーメント M_u を算定できる。

なお、上記において y_t は引張鉄筋位置から断面図心までの距離であるが、ここでは断面図心を断面中心とした場合を仮定している。断面図心を正確に求める場合には、鉄筋位置、鉄筋断面積、鉄筋ヤング係数、コンクリート断面積、およびコンクリートヤング係数をもとに算出する。その際には、以下の式(9)で算出することができる。

$$y_t = d_1 - y_c \quad (9)$$

ここに、 $y_c = \frac{\frac{bh^2}{2} + n(A_{s1}d_1 + A_{s2}d_2)}{bh + n(A_{s1} + A_{s2})}$ (圧縮縁から断面図心までの距離), $n = \frac{E_s}{E_c}$ (ヤング係数比)

また、終局時の曲率 φ_u は、

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}'}{x_u} \quad (10)$$

以上より、式(5)、(8)および(10)より、終局時の中立軸位置、曲げモーメントおよび曲率が算定できる。

(ii) 圧縮側鉄筋が圧縮降伏する場合

部材軸（水平）方向の力の釣り合いにより、次式が成立する。

$$N' = P_1 + P_2 + f_y A_{S2} - f_y A_{S1} \quad (11)$$

ここに、 P_1 および P_2 は、それぞれ、応力値が $0.85f'_c$ を超えない区間におけるコンクリート圧縮応力の合力値および応力値が $0.85f'_c$ に達した区間におけるコンクリート圧縮応力の合力値である。すなわち、 P_1 は中立軸から x_0 までの距離の区間の圧縮応力、 P_2 は中立軸から x_0 離れた位置より外側の区間の圧縮応力に対応している。

式(11)に、上記の式(1)および「補足資料」の式(補 2)を用い、両辺を $0.85f'_c b d_1^2$ で割って無次元化した後、中立軸位置のパラメータ k_u に関して解けば、次式が得られる。

$$k_u = \frac{3(\psi_1 - \psi_2 + \bar{N}')}{3 - \beta} \quad (12)$$

ここに、 $k_u = \frac{x_u}{d_1}$, $\beta = \frac{\varepsilon_{c0}'}{\varepsilon_{cu}'}$, $\varepsilon_{cu}' = 0.0035$, $\varepsilon_{c0}' = 0.002$,

$$\psi_1 = \frac{f_y A_{S1}}{0.85f'_c b d_1} , \psi_2 = \frac{f_y A_{S2}}{0.85f'_c b d_1} , \bar{N}' = \frac{N'}{0.85f'_c b d_1}$$

また、 k_u に関しては、圧縮側鉄筋が圧縮降伏する条件 $\varepsilon_s' \geq \varepsilon_y (=f_y/E_s)$ より、

$$k_u \geq \frac{\gamma \delta}{\delta - 1} \quad (13)$$

の条件が付加される。

次に、引張鉄筋周りのモーメントの釣り合いにより、次式を得る。

$$M_u + N' y_t = P_1 \cdot (d_1 - x_u + y_G) + P_2 \cdot (d_1 - \frac{x_u - x_0}{2}) + f_y A_{S2} \cdot (d_1 - d_2) \quad (14)$$

式(14)に、上記の式(1)と「補足資料」の式(補 2)および(補 4)を用い、両辺を $0.85f'_c b d_1^2$ で割って無次元化した後、 M_u に関して解けば、次式が得られる。

$$\begin{aligned} M_u &= \bar{M}_u \cdot 0.85f'_c b d_1^2 \\ \bar{M}_u &= \frac{2}{3} \beta k_u \left(1 - \frac{8-5\beta}{8} k_u\right) + (1 - \beta) k_u \left(1 - \frac{1-\beta}{2} k_u\right) + \psi_2 (1 - \gamma) - \bar{N}' \frac{y_t}{d_1} \end{aligned} \quad (15)$$

ここに、 $\beta = \frac{\varepsilon_{c0}'}{\varepsilon_{cu}'}$, $\varepsilon_{c0}' = 0.002$, $\varepsilon_{cu}' = 0.0035$, $\psi_2 = \frac{f_y A_{S2}}{0.85f'_c b d_1}$,

$$\gamma = \frac{d_2}{d_1} , \bar{N}' = \frac{N'}{0.85f'_c b d_1} , y_t = d_1 - \frac{h}{2}$$

以上より、式(13)の条件のもとに、式(12)を用いて k_u をも求め、式(15)により終局曲げモーメント M_u を算定できる。

また、終局時の曲率 φ_u は、式(10)と同じである。

(iii)圧縮側鉄筋が引張降伏する場合

部材軸（水平）方向の力の釣り合いにより、次式が成立する。

$$N' = P_1 + P_2 - f_y A_{S2} - f_y A_{S1} \quad (16)$$

ここに、 P_1 および P_2 は、それぞれ、応力値が $0.85f'_c$ を超えない区間におけるコンクリート圧縮応力の合力値および応力値が $0.85f'_c$ に達した区間におけるコンクリート圧縮応力の合力値である。すなわち、 P_1 は中立軸から x_0 までの距離の区間の圧縮応力、 P_2 は中立軸から x_0 離れた位置より外側の区間の圧縮応力に対応している。

式(16)に、上記の式(1)および「補足資料」の式(補 2)を用い、両辺を $0.85f'_c b d_1^2$ で割って無次元化した後、中立軸位置のパラメータ k_u に関して解けば、次式が得られる。

$$k_u = \frac{3(\psi_1 + \psi_2 + \bar{N}')}{3 - \beta} \quad (17)$$

ここに、 $k_u = \frac{x_u}{d_1}$, $\beta = \frac{\epsilon_{c0}'}{\epsilon_{cu}'}$, $\epsilon_{cu}' = 0.0035$, $\epsilon_{c0}' = 0.002$,

$$\psi_1 = \frac{f_y A_{S1}}{0.85f'_c b d_1} , \psi_2 = \frac{f_y A_{S2}}{0.85f'_c b d_1} , \bar{N}' = \frac{N'}{0.85f'_c b d_1}$$

また、 k_u に関しては、圧縮側鉄筋が引張降伏する条件 $\epsilon_s' \leq -\epsilon_y (= -f_y/E_s)$ より、

$$k_u \leq \frac{\gamma \delta}{\delta + 1} \quad (18)$$

の条件が付加される。

次に、引張鉄筋周りのモーメントの釣り合いにより、次式を得る。

$$M_u + N' y_t = P_1 \cdot (d_1 - x_u + y_G) + P_2 \cdot \left(d_1 - \frac{x_u - x_0}{2} \right) - f_y A_{S2} \cdot (d_1 - d_2) \quad (19)$$

式(19)に、上記の式(1)と「補足資料」の式(補 2)および(補 4)を用い、両辺を $0.85f'_c b d_1^2$ で割って無次元化した後、 M_u に関して解けば、次式が得られる。

$$\begin{aligned} M_u &= \bar{M}_u \cdot 0.85f'_c b d_1^2 \\ \bar{M}_u &= \frac{2}{3} \beta k_u \left(1 - \frac{8-5\beta}{8} k_u \right) + (1 - \beta) k_u \left(1 - \frac{1-\beta}{2} k_u \right) - \psi_2 (1 - \gamma) - \bar{N}' \frac{y_t}{d_1} \end{aligned} \quad (20)$$

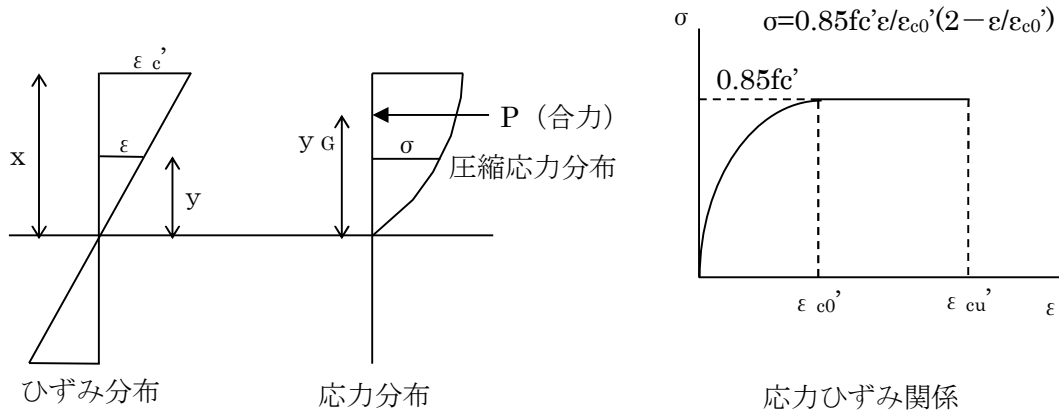
ここに、 $\beta = \frac{\epsilon_{c0}'}{\epsilon_{cu}'}$, $\epsilon_{c0}' = 0.002$, $\epsilon_{cu}' = 0.0035$, $\psi_2 = \frac{f_y A_{S2}}{0.85f'_c b d_1}$,

$$\gamma = \frac{d_2}{d_1} , \bar{N}' = \frac{N'}{0.85f'_c b d_1} , y_t = d_1 - \frac{h}{2}$$

以上より、式(18)の条件のもとに、式(16)を用いて k_u をも求め、式(20)により終局曲げモーメント M_u を算定できる。

また、終局時の曲率 ϕ_u は、式(10)と同じである。

補足資料 コンクリート圧縮応力の合力値と作用位置



中立軸から y の距離のひずみ ϵ は、

$$\epsilon = \frac{y}{x} \epsilon_c'$$

応力 σ は、

$$\sigma = 0.85f_c' \frac{\epsilon}{\epsilon_{c0}'} \left(2 - \frac{\epsilon}{\epsilon_{c0}'} \right) = 0.85f_c' \left(\frac{2\epsilon_c'}{\epsilon_{c0}'} \frac{y}{x} - \frac{\epsilon_c'^2}{\epsilon_{c0}^2} \frac{y^2}{x^2} \right)$$

応力分布の総和 P は、 b を奥行き幅として、

$$P = b \int_0^x \sigma dy = 0.85f_c' \frac{bx}{3} \frac{\epsilon_c'}{\epsilon_{c0}'} \left(3 - \frac{\epsilon_c'}{\epsilon_{c0}'} \right) \quad (\text{補 1})$$

特に、 $x=x_0$ および $\epsilon_c'=\epsilon_{c0}'$ のとき、

$$P = 0.85f_c' \frac{2bx_0}{3} \quad (\text{補 2})$$

次に、中立軸位置から合力の作用点までの距離 y_G は、

$$y_G = \frac{b \int_0^x y \sigma dy}{P}$$

$$b \int_0^x y \sigma dy = 0.85f_c' \frac{bx^2}{12} \frac{\epsilon_c'}{\epsilon_{c0}'} \left(8 - 3 \frac{\epsilon_c'}{\epsilon_{c0}'} \right)$$

したがって、

$$y_G = \frac{8 - 3 \frac{\epsilon_c'}{\epsilon_{c0}'}}{4 \left(3 - \frac{\epsilon_c'}{\epsilon_{c0}'} \right)} x \quad (\text{補 3})$$

特に、 $x=x_0$ および $\epsilon_c'=\epsilon_{c0}'$ のとき、

$$y_G = \frac{5}{8} x_0 \quad (\text{補 4})$$

7.1.2 市販ソフトとの比較（終局曲げモーメント）

(1) 解析条件

解析条件として、以下の RC 断面を設定する。

部材高さ $h=80\text{cm}$

部材幅 $b=100\text{cm}$

鉄筋ヤング係数 $E_s=200\text{kN/mm}^2$

鉄筋降伏強度 $f_y=295\text{N/mm}^2$

コンクリートヤング係数 $E_c=23.5\text{kN/mm}^2$

コンクリート設計基準強度 $f'_{ck}=21\text{N/mm}^2$

コンクリート材料係数 $\gamma_c=1.3$

引張側鉄筋断面積 $A_{s1}=13.247\text{cm}^2$ (D16@150)

圧縮側鉄筋断面積 $A_{s2}=13.247\text{cm}^2$ (D16@150)

引張側鉄筋かぶり $c=10\text{cm}$ (有効高さ $d_1=70\text{cm}$)

圧縮側鉄筋かぶり $d_2=17\text{cm}$

作用軸力 $N'=300\text{kN}$ 、 1000kN および 4000kN (3 種類を設定)

(軸力作用位置は断面中心とする)

(2) 解析式による計算結果

(a) 軸力 $N'=300\text{kN}$ の場合

7.1.2(1)の解析条件のもとに軸力 300kN を設定した場合、7.1.1 で示したモードのうち、(iii)の圧縮側鉄筋が引張降伏するケースとなる。この場合、先の解析式に従い、終局時の中立軸比 k_u を算出して圧縮側鉄筋が引張降伏する条件を満足することを確認する必要がある。以下で、その計算を行う。

$$\psi_1 = \frac{f_y A_{s1}}{0.85 f'_c b d_1} = \frac{295 \times 1324.7}{0.85 \times 16.154 \times 1000 \times 700} = 0.04066$$

$$\psi_2 = \frac{f_y A_{s2}}{0.85 f'_c b d_1} = \frac{295 \times 1324.7}{0.85 \times 16.154 \times 1000 \times 700} = 0.04066$$

$$\beta = \frac{\epsilon'_{c0}}{\epsilon'_{cu}} = \frac{0.002}{0.0035} = 0.5714$$

$$\bar{N} = \frac{N'}{0.85 f'_c b d_1} = \frac{300000}{0.85 \times 16.154 \times 1000 \times 700} = 0.03121$$

式(17)を用いて、中立軸比 k_u を算出する。

$$k_u = \frac{3(\psi_1 + \psi_2 + \bar{N})}{3 - \beta} = \frac{3 \times (0.04066 + 0.04066 + 0.03121)}{3 - 0.5714} = 0.1390$$

ここで、圧縮側鉄筋が引張降伏する条件として、中立軸比 k_u がある値以下になることを確認する。すなわち、式 7.1.1(18)より、

$$\delta = \frac{\epsilon'_{cu}}{\epsilon_y} = \frac{0.0035}{295/200000} = 2.373$$

$$\gamma = \frac{d_2}{d_1} = \frac{170}{700} = 0.2429$$

$$k_u \leq \frac{\gamma\delta}{\delta+1} = \frac{0.2429 \times 2.373}{2.373+1} = 0.1709$$

上記より、中立軸比 k_u が 0.1709 より小さく、圧縮側鉄筋が引張降伏するモードであることがわかる。

次に、終局曲げモーメントを、式 2.1.1(19)により算出する。

$$\begin{aligned} \bar{M}_u &= \frac{2}{3}\beta k_u \left(1 - \frac{8-5\beta}{8}k_u\right) + (1-\beta)k_u \left(1 - \frac{1-\beta}{2}k_u\right) - \psi_2(1-\gamma) - \bar{N}'\frac{\gamma_t}{d_1} \\ &= \frac{2}{3} \times 0.5714 \times 0.1390 \times \left(1 - \frac{8-5 \times 0.5714}{8} \times 0.1390\right) \\ &\quad + (1-0.5714) \times 0.1390 \times \left(1 - \frac{1-0.5714}{2} \times 0.1390\right) \\ &\quad - 0.04066 \times (1-0.2429) - 0.03231 \times \frac{300}{700} = 0.06186 \\ M_u &= \bar{M}_u \cdot 0.85f'_c b d_1^2 = 0.06186 \times 0.85 \times 16.154 \times 1000 \times 700^2 = 416200000 \text{ Nmm} = 416.2 \text{ kNm} \\ \varphi_u &= \frac{0.0035}{x} = \frac{0.0035}{0.1390 \times 0.7} = 0.03597 \text{ 1/m} \end{aligned}$$

(b) 軸力 $N' = 1000\text{kN}$ の場合

7.1.2(1)の解析条件のもとに軸力 1000kN を設定した場合、7.1.1 で示したモードのうち、(i)の圧縮側鉄筋が未降伏のケースとなる。この場合、先の解析式に従い、終局時の中立軸比 k_u を算出して圧縮側鉄筋が未降伏の条件を満足することを確認する必要がある。以下で、その計算を行う。

$$\bar{N} = \frac{N'}{0.85f'_c b d_1} = \frac{1000000}{0.85 \times 16.154 \times 1000 \times 700} = 0.1040$$

式(5)を用いて、中立軸比 k_u を算出する。

$$\begin{aligned} k_u &= \frac{-3(\delta\psi_2 - \psi_1 - \bar{N}') + \sqrt{9(\delta\psi_2 - \psi_1 - \bar{N}')^2 + 12(3-\beta)\delta\psi_2\gamma}}{2(3-\beta)} \\ &= \frac{-3 \times (2.373 \times 0.04066 - 0.04066 - 0.1040) + \sqrt{9 \times (2.373 \times 0.04066 - 0.04066 - 0.1040)^2 + 12 \times (3 - 0.5714) \times 2.373 \times 0.04066 \times 0.2429}}{2 \times (3 - 0.5714)} \\ &= 0.2025 \end{aligned}$$

ここで、圧縮側鉄筋が未降伏である条件として、中立軸比 k_u がある範囲内にあることを確認する。すなわち、式 7.1.1(6)より、

$$k_u \geq \frac{\gamma\delta}{\delta+1} = \frac{0.2429 \times 2.373}{2.373+1} = 0.1709$$

$$k_u \leq \frac{\gamma\delta}{\delta-1} = \frac{0.2429 \times 2.373}{3.373-1} = 0.4198$$

上記より、圧縮側鉄筋が未降伏のモードであることがわかる。

次に、終局曲げモーメントを式 7.1.1(8)により計算する。

$$\begin{aligned}
\bar{M}_u &= \frac{2}{3}\beta k_u \left(1 - \frac{8-5\beta}{8}k_u\right) + (1-\beta)k_u \left(1 - \frac{1-\beta}{2}k_u\right) + \frac{k_u-\gamma}{k_u}\delta\psi_2(1-\gamma) - \bar{N}'\frac{y_t}{d_1} \\
&= \frac{2}{3} \times 0.5714 \times 0.2025 \times \left(1 - \frac{8-5 \times 0.5714}{8} \times 0.2025\right) \\
&\quad + (1-0.5714) \times 0.2025 \times \left(1 - \frac{1-0.5714}{2} \times 0.2025\right) \\
&\quad + \frac{0.2025-0.2429}{0.2025} \times 2.373 \times 0.04066 \times (1-0.2429) \\
&\quad - 0.1040 \times \frac{300}{700} \\
&= 0.09099 \\
M_u &= \bar{M}_u \cdot 0.85f'_c b d_1^2 = 0.09099 \times 0.85 \times 16.154 \times 1000 \times 700^2 = 612200000 \text{ Nmm} = 612.2 \text{ kNm} \\
\varphi_u &= \frac{0.0035}{x} = \frac{0.0035}{0.2025 \times 0.7} = 0.02469 \text{ 1/m}
\end{aligned}$$

(c) 軸力 $N' = 4000 \text{ kN}$ の場合

7.1.2(1)の解析条件のもとに軸力 4000kN を設定した場合、7.1.1 で示したモードのうち、(ii)の圧縮側鉄筋が圧縮降伏するケースとなる。この場合、先の解析式に従い、終局時の中立軸比 k_u を算出して圧縮側鉄筋が圧縮降伏する条件を満足することを確認する必要がある。以下で、その計算を行う。

$$\bar{N} = \frac{N'}{0.85f'_c b d_1} = \frac{4000000}{0.85 \times 16.154 \times 1000 \times 700} = 0.4162$$

式(12)を用いて、中立軸比 k_u を算出する。

$$k_u = \frac{3(\psi_1 - \psi_2 + \bar{N}')}{3 - \beta} = \frac{3 \times (0.04066 - 0.04066 + 0.4162)}{3 - 0.5714} = 0.5141$$

ここで、圧縮側鉄筋が圧縮降伏する条件として、中立軸比 k_u がある値よりも大きいことを確認する。すなわち、式 7.1.1(13)より、

$$k_u \geq \frac{\gamma\delta}{\delta-1} = \frac{0.2429 \times 2.373}{2.373-1} = 0.4198$$

上記より、圧縮側鉄筋が圧縮降伏するモードであることがわかる。

次に、終局曲げモーメントを式 7.1.1(15)により計算する。

$$\begin{aligned}
\bar{M}_u &= \frac{2}{3}\beta k_u \left(1 - \frac{8-5\beta}{8}k_u\right) + (1-\beta)k_u \left(1 - \frac{1-\beta}{2}k_u\right) + \psi_2(1-\gamma) - \bar{N}'\frac{y_t}{d_1} \\
&= \frac{2}{3} \times 0.5714 \times 0.5141 \times \left(1 - \frac{8-5 \times 0.5714}{8} \times 0.5141\right) \\
&\quad + (1-0.5714) \times 0.5141 \times \left(1 - \frac{1-0.5714}{2} \times 0.5141\right) \\
&\quad + 0.04066 \times (1-0.2429) - 0.4162 \times \frac{300}{700} = 0.1797 \\
M_u &= \bar{M}_u \cdot 0.85f'_c b d_1^2 = 0.1797 \times 0.85 \times 16.154 \times 1000 \times 700^2 = 1219000000 \text{ Nmm} = 1209 \text{ kNm} \\
\varphi_u &= \frac{0.0035}{x} = \frac{0.0035}{0.5141 \times 0.7} = 0.009726 \text{ 1/m}
\end{aligned}$$

(3) 市販ソフトによる計算結果（終局曲げモーメント）

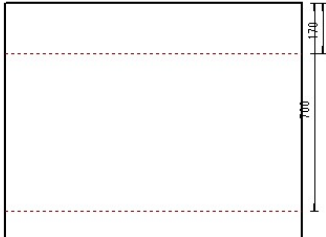
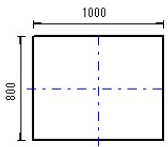
7.1.2(2)の解析式による算出結果を検証するために、市販ソフトを用いて終局曲げモーメントを計算した。市販ソフトは、RC断面計算（フォーラムエイト）を使用した。解析条件は、7.1.2(1)で提示したものと同一である。市販ソフトによる終局曲げモーメントの算出結果を、表 7-1 に示す。また、表 7-2 に、解析式と市販ソフトの比較を示す。

解析式による結果は、市販ソフトの結果とほぼ一致していることがわかる。

表 7-1 市販ソフトによる終局曲げモーメントの算出結果

CASE-No	形状	LOAD-No	Mc(kN-m)	My0(kN-m)	Mls2(kN-m)	Mls3(kN-m)	$\phi_c(1/m)$	$\phi_{y0}(1/m)$	$\phi_{ls2}(1/m)$	$\phi_{ls3}(1/m)$
1	矩形	1	234.646	346.162	416.197		0.000225511	0.002908510	0.035961118	
1	矩形	2	329.074	542.359	612.034		0.000316262	0.003341299	0.024688143	
1	矩形	3	733.762	1164.670	1208.214		0.000705195	0.005279208	0.009723617	

解析条件入力パラメータ



Case1 : t=800

再描画(F5) スム(X) 150 前(B) 後(A)

寸法 | 材料 | 主鉄筋 | 計算設定 | 許容応力度法 | 境界状態設計法

配置方法: ☒ Type1 ☐ Type2

種類	タイ*	位置d(m)	径(mm)	本数/枚数	As(cm²)	分布長(m)
1	1	0.7000	0.00	0.000	13.247	1.000
2	1	0.1700	0.00	0.000	13.247	1.000
3						

断面力一覧入力

確定 取消 ヘルプ(H)

許容応力度法 | 境界状態設計法

一軸断面

ケースNo.	出力タイトル	断面力No.	ケース名称	曲げM(kN-m)	軸力N(kN)	せん断S(kN)
1	t=800	1	断面力ケース1	0.000	300.000	0.000
1	t=800	2	断面力ケース2	0.000	1000.000	0.000
1	t=800	3	断面力ケース3	0.000	4000.000	0.000

コンクリート | 鉄筋

設計基準強度 (N/mm²)	16.15
許容曲げ圧縮応力度 (N/mm²)	7.00
許容軸圧縮応力度 (N/mm²)	5.50
許容せん断応力度(道示Ⅲ) (N/mm²)	0.360
許容せん断応力度(道示Ⅳ) (N/mm²)	0.220
平均せん断応力度 (N/mm²)	0.330
平均せん断応力度の最大値 (N/mm²)	2.800
許容斜引張応力度 (N/mm²)	0.80
許容付着応力度 (N/mm²)	1.400
曲げ引張強度 (N/mm²)	1.7500
ヤング係数 (× 10⁴N/mm²)	2.35

コンクリート | 鉄筋

設計引張強度 (N/mm²)	440.0
降伏点応力度 (N/mm²)	295.0
せん断補強鉄筋引張強度 (N/mm²)	440.0
せん断補強鉄筋降伏強度 (N/mm²)	295.0
ねじり補強鉄筋引張強度 (N/mm²)	440.0
ねじり補強鉄筋降伏強度 (N/mm²)	295.0
許容引張応力度 (N/mm²)	180.00
許容圧縮応力度 (N/mm²)	180.00
ヤング係数 (× 10⁴N/mm²)	2.00

表 7-2 解析式と市販ソフトの比較（終局曲げモーメント、終局曲率）

軸力(kN)	解析式(A)		市販ソフト(B)		比 (A/B)	
	Mu(kNm)	$\phi_u(1/m)$	Mu(kNm)	$\phi_u(1/m)$	Mu	ϕ_u
300	416.2	0.03597	416.2	0.03596	1.000	1.000
1000	612.2	0.02469	612.0	0.02469	1.000	1.000
4000	1209	0.009726	1208.2	0.009724	1.001	1.000

7.2 せん断耐力

7.2.1 せん断耐力式（棒部材式）

せん断照査では、以下に示すように、構造解析によって算出される発生せん断力（応答せん断力） V_d が、設計せん断耐力 V_{yd} を上回らないことを確認する。

$$\gamma_i \frac{V_d}{V_{yd}} \leq 1.0$$

ここに、 V_d ：設計せん断力（発生せん断力）

V_{yd} ：設計せん断耐力

γ_i ：構造物係数（=1.0）

なお、上記の設計せん断耐力 V_{yd} については、以下により算出する。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$$

ここに、 V_{cd} はせん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力で、コンクリートで負担するせん断力を表すものである。また、 V_{sd} はせん断補強鋼材が受け持つせん断力である。

(1) せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力 V_{cd}

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$$

上式のせん断耐力式は、コンクリート強度に依存するせん断強度 f_{vcd} にせん断断面積 $b_w \cdot d$ を乗じて耐力に換算し、さらに有効高、引張鉄筋比および軸力に関する補正をして求められたものである。それぞれの補正係数は、以下に示される。

$$f_{vcd} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{cd}} \quad (\text{N/mm}^2) \quad \text{ただし } f_{vcd} \leq 0.72 \quad (\text{N/mm}^2)$$

f'_{cd} ：コンクリートの設計圧縮強度（N/mm²）

（ $f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_c$ 、 f'_{ck} ：設計基準強度、 γ_c ：コンクリート材料係数（=1.3））

$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d} \quad (d: \text{mm})$ ただし $\beta_d \geq 1.5$ となる場合は 1.5 とする

d ：有効高さ（mm）

$\beta_p = \sqrt[3]{100p_v} \quad \text{ただし } \beta_p \geq 1.5 \text{ となる場合は } 1.5 \text{ とする}$

$p_v = A_s / (b_w \cdot d)$

A_s ：引張側鋼材の断面積（mm²）

$\beta_n = 1 + 2M_0 / M_{ud} \quad (N'_d \geq 0)$ ただし $\beta_n \geq 2$ となる場合は 2 とする

$= 1 + 4M_0 / M_{ud} \quad (N'_d \leq 0)$ ただし $\beta_n \leq 0$ となる場合は 0 とする

N'_d ：設計軸方向圧縮力

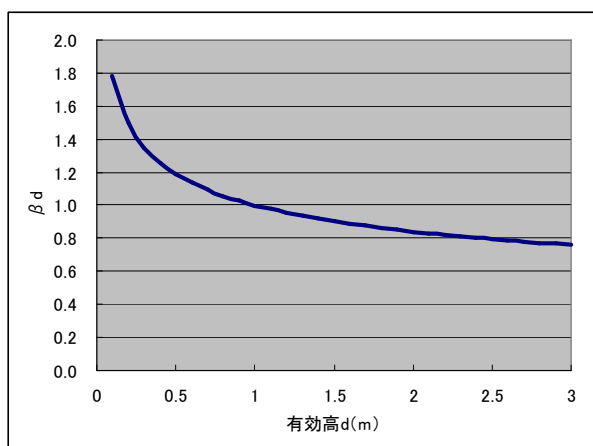
M_{ud} ：軸方向力を考慮しない純曲げ耐力

M_0 ：設計曲げモーメント M_d に対する引張縁において、軸方向力によって発生する応力を打ち消すのに必要な曲げモーメント（矩形断面では $M_0 = N'_d \cdot h / 6$ 、 h ：部材の全高）

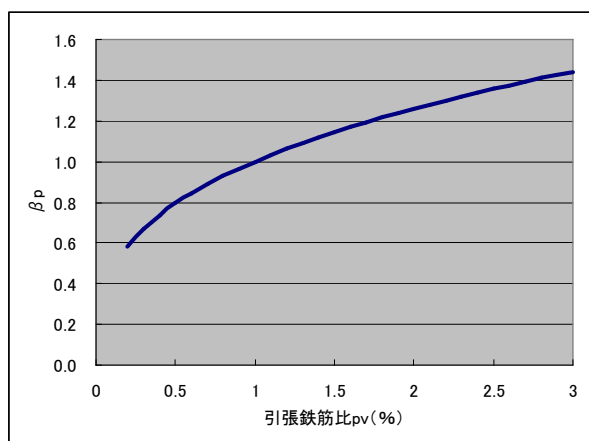
b_w ：腹部の幅（mm）

d ：有効高さ（mm）

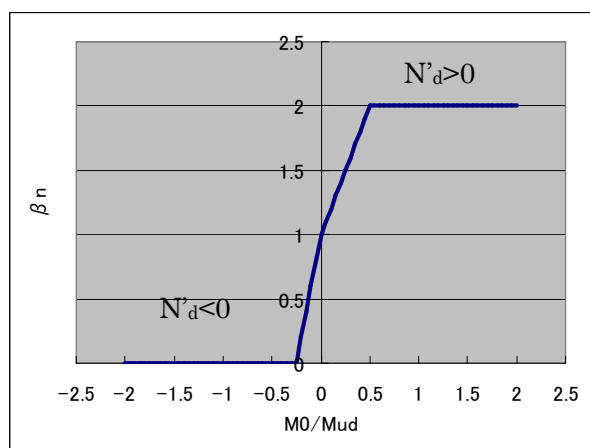
γ_b ：コンクリート部材係数（=1.3）



(a)有効高 d に関する補正係数 β_d



(b)引張鉄筋比 p_v に関する補正係数 β_p



(c)軸力に対する補正係数 β_n

図 7-3 セン断耐力の補正係数

(2) セン断補強鋼材により受け持たれる設計せん断耐力 V_{sd}

$$V_{sd} = (A_w f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s) z / \gamma_b$$

A_w : 区間 s_s におけるせん断補強筋の総断面積 (mm²)

s_s : セン断補強鉄筋の部材軸方向の配置間隔 (mm)

f_{wyd} : セン断補強鉄筋の設計降伏強度で 400N/mm²以下とする。ただしコンクリート圧縮強度の特性値 f'_{ck} が 60N/mm²以上のときは 800N/mm²以下としてよい。

($f_{wyd} = f_{wy} / \gamma_s \cdot f_{wy}$: セン断補強鉄筋の降伏強度, γ_s : 鉄筋材料係数 (=1.0))

α_s : セン断補強鉄筋が部材軸となす角度

z : 圧縮応力の合力作用位置から引張鋼材図心までの距離で一般に $d/1.15$ としてよい

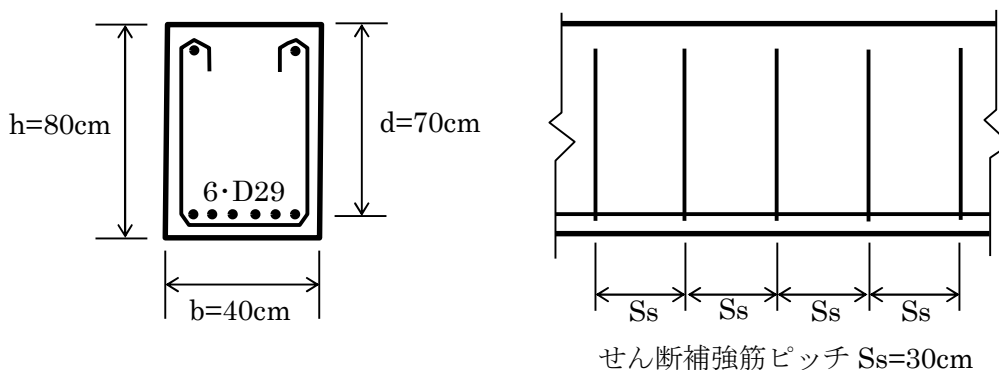
γ_b : 鉄筋部材係数 (=1.15)

7.2.2 市販ソフトとの比較（せん断耐力）

(1) 解析条件

7.2.1 で示したせん断耐力式（棒部材式）による計算結果を確認するため、市販ソフトを用いてせん断耐力を算出した。市販ソフトは、RC 断面計算（フォーラムエイト）を用いた。

せん断耐力算出の解析条件を、図 7-4 に示す。



部材高さ： $h=80\text{cm}$ （有効高さ $d=70\text{cm}$ ）

主鉄筋：6 本 - D29（芯かぶり 10cm）（D29 の公称断面積： 6.424cm^2 ）

せん断補強筋：2 本 - D22@300（D22 の公称断面積： 3.871cm^2 ）

コンクリート設計基準強度： $f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$

鉄筋種類：SD345（降伏強度 $f_y=345\text{N/mm}^2$ ）

軸力： $N=500\text{kN}$

図 7-4 せん断耐力算出の解析条件

(2) せん断耐力式による計算結果

(a) せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力 V_{cd}

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$$

$$f_{vcd} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{cd}} = 0.20 \times \sqrt[3]{30/1.3} = 0.569\text{N/mm}^2$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d} = \sqrt[4]{1000/700} = 1.093$$

$$p_v = A_s / b_w d = 6 \times 642.4 / (400 \times 700) = 0.01378 \quad (\text{D29 が 6 本分の鉄筋比})$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_v} = \sqrt[3]{100 \times 0.01378} = 1.113$$

次に、 β_n を計算するために、純曲げ耐力（軸力を考慮しない曲げ耐力）を計算する。以下では簡単のために、単鉄筋での純曲げ耐力を算出する。単鉄筋矩形断面に対する純曲げ耐力 M_{ud} は、次式で表される。

$$\begin{aligned} M_{ud} &= b d^2 \cdot p f_y (1 - p f_y / 1.7 f_c) \\ &= 400 \times 700^2 \times 0.01378 \times 345 \times (1 - 0.01378 \times 345 / (1.7 \times 30)) \\ &= 8.449 \times 10^8 \text{Nmm} = \underline{\underline{844.9\text{kNm}}} \end{aligned}$$

$$M_0 = N'_d \cdot h/6 = 500 \times 0.8/6 = 66.7 \text{ kNm}$$

$$\beta_n = 1 + 2M_0/M_{ud} = 1 + 2 \times 66.7/844.9 = 1.158$$

$$V_{cd} = 1.093 \times 1.113 \times 1.158 \times 0.569 \times 400 \times 700/1.3 = 172600 \text{ N} = \underline{172.6 \text{ kN}}$$

(b) セン断補強鋼材により受け持たれる設計せん断耐力 V_{sd}

せん断補強鉄筋の部材軸方向ピッチ当たりの断面積 A_w

$$A_w = 3.871 \text{ cm}^2 \times 2 \text{ 本} = 7.742 \text{ cm}^2 = 774.2 \text{ mm}^2$$

せん断補強鉄筋が部材軸となす角度 α_s

$\alpha_s = 90^\circ$ (スターラップ筋)

$$V_{sd} = (A_w f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s) z / \gamma_b$$

$$= 774.2 \times 345 / 300 \times 700 / 1.15 / 1.15 = 471300 \text{ N} = \underline{471.3 \text{ kN}}$$

(c) 設計せん断耐力

設計せん断耐力 V_{yd}

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} = 172.6 + 471.3 = \underline{643.9 \text{ kN}}$$

(3) 市販ソフトによる計算結果 (せん断耐力)

市販ソフトによるせん断耐力の計算結果を、表 7-3 に示す。(2)のせん断耐力式による結果とほぼ一致していることがわかる。

表 7-3 市販ソフトによるせん断耐力の計算結果

せん断		$V_{yd}(\text{kN})$	644.757				
		$V_{wcd}(\text{kN})$	1293.342				
		$\gamma_i \cdot V_d / V_{yd}$	0.000 < 1.00				
		$\gamma_i \cdot V_d / V_{wcd}$	0.000 < 1.00				

<解析条件入力パラメータ>

断面力ケース1 断面力ケース2 断面力ケース3

No.2: 断面力ケース2

曲げモーメント(kN・m)	300.000
軸力(kN)	500.000
せん断力(kN)	0.000
ねじりモーメント(kN・m)	0.000

終局限界状態 曲げ・軸耐力	1.10
終局限界状態 軸方向圧縮耐力	1.30
終局限界状態 せん断耐力(コンクリート)	1.30
終局限界状態 せん断耐力(鉄筋・鋼材)	1.15
終局限界状態 ねじり耐力	1.30
使用限界状態	1.00
疲労限界状態	1.00
疲労限界状態 せん断耐力(コンクリート)	1.30

Case2: h=800

配置方法: ☒ Type1 ☐ Type2

種別	No.	位置(m)	径(mm)	本数/枚数	As(cm²)	分布長(m)
1	1	0.700	20.0	6.000	98.544	6.400
2						
3						

コンクリート 鉄筋

設計基準強度 (N/mm²)	30.00
許容曲げ圧縮応力度 (N/mm²)	10.00
許容軸圧縮応力度 (N/mm²)	8.50
許容せん断応力度(表示Ⅲ) (N/mm²)	0.450
許容せん断応力度(表示Ⅳ) (N/mm²)	0.250
平均せん断応力度 (N/mm²)	0.370
平均せん断応力度の最大値 (N/mm²)	4.000
許容斜引張応力度 (N/mm²)	0.80
許容付着応力度 (N/mm²)	1.800
曲げ引張強度 (N/mm²)	2.2200
ヤング係数 (×10⁴N/mm²)	2.80

コンクリート 鉄筋

設計引張強度 (N/mm²)	490.0
降伏点応力度 (N/mm²)	345.0
せん断補強鉄筋引張強度 (N/mm²)	490.0
せん断補強鉄筋降伏強度 (N/mm²)	345.0
ねじり補強鉄筋引張強度 (N/mm²)	490.0
ねじり補強鉄筋降伏強度 (N/mm²)	345.0
許容引張応力度 (N/mm²)	180.00
許容圧縮応力度 (N/mm²)	200.00
ヤング係数 (×10⁵N/mm²)	2.00

基本定数 | 材料・構造物係数 | 部材係数 | せん断補強鉄筋 | 断

スターラップ 鉄筋量 A_w (cm²)	7.742
スターラップ ピッチ S_s (mm)	300.0
スターラップ 角度 α_s (°)	90
折曲鉄筋 鉄筋量 A_b (cm²)	0.000
折曲鉄筋 ピッチ S_b (mm)	0.0
折曲鉄筋 角度 α_b (°)	0
せん断有効高さ d (mm)	0.000
引張鉄筋量 A_s (cm²)	38.544
f_{vcd} の低減率 (%)	100

7.2.3 破壊モード判定

破壊モード判定は、2015 年版下水道施設耐震計算例に従い、以下の方法によった。

$$\frac{V_{mu}}{V_{yd}} < 1.0 \rightarrow \text{曲げ破壊モード}$$

$$\frac{V_{mu}}{V_{yd}} \geq 1.0 \rightarrow \text{せん断破壊モード}$$

ここに、 V_{mu} ：終局曲げ耐力に達するときのせん断力（ $=Mu/a$ 、kN）

Mu ：鉄筋降伏強度を 1.2 倍したときの終局曲げ耐力（kNm）

a ：せん断スパン（ $=M/V$ 、m）

M ：応答曲げモーメント（kNm）

V ：応答せん断力（kN）

V_{yd} ：せん断耐力（kN）

せん断破壊に対する安全性については、L2 地震動に対する照査用震度に構造特性係数 C_s が乗じられているものとし、上記のモード判定がせん断破壊モードで、かつせん断照査値が C_s 以上であるとき、せん断に対して NG と判定する。

$$\frac{V_{mu}}{V_{yd}} \geq 1.0 \text{ かつ } \frac{V}{V_{yd}} \geq C_s \rightarrow \text{せん断 NG}$$

ここに、 V_{mu} ：終局曲げ耐力に達するときのせん断力（kN）

V_{yd} ：せん断耐力（kN）

V ：応答せん断力（kN）

C_s ：構造特性係数（ $=0.45$ 、2015 年版下水道施設耐震計算例による）

8. マクロでの計算手順

(1) 照査対象要素の入力

- ・シート「要素指定」のデータの要素番号と部位名を読み込む。

(2) L2 断面力データの入力

- ・シート「断面力 L2」から、断面力データ数、通し番号、要素番号、I,J 端区別、曲げモーメント M、軸力 N およびせん断力 S を読み込む。
- ・シート「L2 曲げ照査」、「曲げ耐力(軸力無し)」、「曲げ耐力(破壊モード)」、「L2 せん断照査」に、データ数、通し番号、要素番号、部位名、および断面力(M,N,S)を、埋め込む。
- ・断面力は 1 つの要素に対し I 端および J 端の値が入力されるが、曲げモーメントと軸力については曲げモーメントの大きい方、せん断力についてはせん断の大きい方が照査に使用される。

(3) L1 断面力データの入力

- ・シート「断面力 L1」から、断面力データ数、通し番号、要素番号、I,J 端区別、曲げモーメント M、軸力 N およびせん断力 S を読み込み、シート「L1 許容応力度照査」に埋め込む。
- ・断面力は 1 つの要素に対し I 端および J 端の値が入力されるが、曲げモーメントと軸力については曲げモーメントの大きい方、せん断力についてはせん断の大きい方が照査に使用される。

(4) 断面諸元の読み込み

- ・シート「断面諸元」から、以下の断面諸元データを読み込む。
データ数、通し番号、部位名、部材厚、部材幅、コンクリートヤング係数、鉄筋ヤング係数、コンクリート強度、鉄筋降伏強度（主鉄筋）、上筋位置、上筋断面積、下筋位置、下筋断面積、コンクリート許容応力度、鉄筋許容応力度、許容せん断応力度 τ_{a1} 、許容せん断応力度 τ_{a2} 、せん断補強筋強度、せん断補強筋面積、せん断補強筋ピッチ

(5) L2 照査時の安全係数の設定

- ・L2 断面力の照査時におけるコンクリートおよび鉄筋の安全係数を、以下の通り設定する。

せん断照査時のコンクリート材料係数：gmc=1.3

せん断照査時の鉄筋材料係数：gms=1.0

せん断照査時のコンクリート部材係数：gbc=1.3

せん断照査時の鉄筋部材係数：gbs=1.1

破壊モード判定に使用する終局曲げモーメント算定の鉄筋材料係数：gms2=1/1.2

曲げ照査時のコンクリート材料係数（降伏耐力を含む）：gmc_曲げ=1.0

(6) 照査計算の開始 (iax=1 to 5)

- ・以下の 5 ケースに関して計算および照査を実施。

iax=1 : L2 曲げ照査

iax=2 : 軸力ゼロ時の曲げ耐力（せん断照査時の軸力補正係数の計算に使用）

iax=3 : L1 許容応力度照査（RC 断面弾性計算）

iax=4 : 破壊モード判定時の曲げ耐力（鉄筋降伏強度を 1.2 倍して曲げ耐力を算出）

iax=5 : L2 せん断照査

(7) ワークシートをアクティブ化

- ・iax に応じて、シート「L2 曲げ照査」、「曲げ耐力(軸力無し)」、「L1 許容応力度照査」、「曲げ耐力(破壊モード)」、「L2 せん断照査」をアクティブにする。

- (8) 対象要素に対する照査計算の実施 (i=4 to ic)
- ・対象要素のケース数分 (icase) の照査を実施。
- (9) 断面諸元データの番目を定める
- ・対象要素の部位名を断面諸元データから探し、断面諸元データの番目 jpt を求める。
 - ・断面諸元データが見つからないとき、メッセージを出して次の要素の照査に移る。
- (10) 断面諸元の設定
- ・照査対象要素に対し、以下の断面諸元を設定する。
- 全高 h(m)、幅 b(m)、下筋被り c(m)、上筋被り d2(m)、下筋断面積 as1(m²)、上筋断面積 as2(m²)、鉄筋ヤング係数 es(kN/m²)、コンクリートヤング係数 ec(kN/m²)、鉄筋降伏強度 fy(kN/m²)、コンクリート強度 fc(kN/m²)、コンクリート引張強度 ft(kN/m²)、せん断補強筋降伏強度 fwy(kN/m²)、せん断補強筋断面積 aw(m²)、せん断補強筋ピッチ ss(m)、鉄筋許容応力度 ssa(kN/m²)、コンクリート許容応力度 sca(kN/m²)、せん断許容応力度 ta1(kN/m²)、せん断許容応力度 ta2(kN/m²)
- ・iax=1 のとき fc にコンクリート材料係数 gmc_曲げを考慮し、iax=4 のとき fy に鉄筋材料係数 gms2 を考慮する。
 - ・ft は、 $ft=0.23 \cdot f_c^{2/3}$ (単位：N/mm²) により算出。
 - ・iflag2=1 のとき、許容応力度 (ssa,sca,ta1,ta2) を 1.5 倍する。
- (11) 断面力の設定
- ・曲げモーメント mbend(kNm)、軸力 np(kN)およびせん断力 shr(kN)を設定する。
 - ・iax=2 のとき、np=0 とする。
 - ・負曲げのとき上筋と下筋を逆転させる。具体的には mbend<0 のとき、c と d2、および as1 と as2 の値を入れ替える。
- (12) 各種パラメータの設定
- ・ヤング係数比 n の設定。n=es/ec で求める。ただし、iax=3 のとき、n=15 とする。
 - ・有効高 d1=h-c、有効高で定義した引張鉄筋比 p1=as1/b/d1、有効高で定義した圧縮鉄筋比 p2=as2/b/d1、部材高で定義した引張鉄筋比 p1d=as1/b/h、部材高で定義した圧縮鉄筋比 p1d=as2/b/h を算出する。
 - ・無次元化軸力 npbar=np/0.85/fc/b/d1、npbars=np/fc/b/d1、npbarc=np/ft/b/d1 を算出。
 - ・軸力作用位置 ycd,ytd,ycd2,ytd2,yc および yt の算出。
ycd,ytd：断面図心の圧縮縁および引張縁からの距離 (応力度計算の全断面圧縮時)
ycd2,ytd2：鉄筋断面積の図心の圧縮縁および引張縁からの距離 (応力度計算の全断面引張時)
yc(=h/2),yt：断面中心の圧縮縁および引張鉄筋からの距離 (曲げ耐力、降伏耐力および応力度計算で使用)
 - ・力学的鉄筋比 ps1=p1*fy/0.85/fc、ps2=p2*fy/0.85/fc、ps1s=p1*fy/fc、ps2s=p2*fy/fc
 - ・無次元パラメータ m=ec/es*fy/fc、gam=d2/d1、epy=fy/es、delt=0.0035/epy、gam2=h/d1、beta=0.002/0.0035、alph=epy/0.002
- (13) 終局曲げモーメントの計算 (iax=1,2,4 のとき)
- ・圧縮鉄筋が未降伏のとき (modu=1)、終局曲げモーメント mu と終局曲率 faiu の計算 (式 7.1.1(8),(10)による)
 - ・圧縮鉄筋が圧縮降伏するとき (modu=2)、終局曲げモーメント mu と終局曲率 faiu の計算 (式 7.1.1(15),(10)による)

- ・圧縮鉄筋が引張降伏するとき ($\text{modu}=3$)、終局曲げモーメント μ と終局曲率 faiu の計算 (式 7.1.1(20),(10)による)
- (14) 釣合断面力の計算
- ・圧縮鉄筋が未降伏のとき、釣合時 (降伏と圧縮限界が同時) の曲げモーメント mb と軸力 nb の計算
 - ・圧縮鉄筋が降伏のとき、釣合時 (降伏と圧縮限界が同時) の曲げモーメント mb と軸力 nb の計算
- (15) L2 曲げ照査結果の書き出し
- ・以下の結果を、ワークシートに書き出す。
- 終局曲げモーメント $\mu(\text{kNm})$ 、終局曲率 $\text{faiu}(1/\text{m})$ 、終局時中立軸位置 $\text{x}(\text{cm})$ 、降伏曲げモーメント $\text{my}(\text{kNm})$ 、降伏曲率 $\text{faiy}(1/\text{m})$ 、降伏時中立軸位置 $\text{xy}(\text{cm})$ 、ひび割れ曲げモーメント $\text{mc}(\text{kNm})$ 、ひび割れ時曲率 $\text{faic}(1/\text{m})$ 、ひび割れ時中立軸位置 $\text{xc}(\text{cm})$ 、釣合軸力 $\text{nb}(\text{kN})$ 、釣合曲げモーメント $\text{mb}(\text{kN})$ 、釣合時中立軸位置 $\text{xb}(\text{cm})$ 、降伏時のモード mody 、終局時のモード modu 、釣合時のモード modb 、照査値 M/μ 、判定(OK or NG)、繰り返し回数(降伏) nrep
- (16) 軸力ゼロ時と破壊モード判定時の終局曲げモーメントをストア
- ・ $\text{iax}=2$ のとき、軸力ゼロ時の終局曲げモーメントを $\text{muzero}(\text{i})$ にストア
 - ・ $\text{iax}=4$ のとき、破壊モード判定時の終局曲げモーメントを $\text{mumode}(\text{i})$ にストア
- (17) 許容応力度照査の開始 ($\text{iax}=3$ のとき)
- ・パラメータの設定
- 軸応力パラメータ $\text{nstr}=\text{np}/\text{b}/\text{d1}$ 、曲げモーメントの応力パラメータ $\text{mstr}=\text{Abs}(\text{mbend})/\text{b}/\text{d1}^2$
 $\text{cnm}=\text{np}*\text{d1}/\text{Abs}(\text{mbend})$ 、 $\text{dpar}=\text{yt}/\text{d1}$
- (18) 中立軸位置の算出
- ・中立軸比を求める 3 次方程式の係数値の算出 (式 6.1(11)による)
 - ・繰り返し計算 (2 分法) により、中立軸比 kkk1 を求め、 $\text{xs}=\text{kkk1}*\text{d1}$ により中立軸位置を算出する。
- (19) コンクリート圧縮縁応力 sigc 、引張鉄筋応力 sigs 、圧縮鉄筋応力 sigs2 の算出
- ・中立軸位置 xs が断面内 ($0 \leq \text{xs} \leq \text{h}$) にあるときの応力度を求める。
(式 6.1(15),(16),(17)による)
- (20) 全断面圧縮時および全断面引張時の応力度算出
- ・中立軸位置が断面外 ($\text{xs}<0, \text{xs}>\text{h}$) で $\text{np}>0$ のとき、あるいは偏心軸力位置がコア内にあるとき、全断面圧縮と判定して $\text{xs}=\text{”圧縮”}$ とし、全断面圧縮時の応力度を算出する。
(式 6.2(18),(23),(24)による)
 - ・中立軸位置が断面外 ($\text{xs}<0, \text{xs}>\text{h}$) で $\text{np}<0$ のとき、全断面引張と判定して $\text{xs}=\text{”引張”}$ とし、全断面引張時の応力度を算出する。
- (21) セン断応力の計算
- ・せん断応力 tau の算出 (式 6.3(25)による)
 - ・必要せん断補強筋量 awn の算出 (式 6.3(26)による)
- (22) 応力度照査値の計算
- ・引張鉄筋、コンクリート、せん断応力およびせん断補強筋の照査値 $\text{rs}, \text{rc}, \text{rc}$ および rw を、以下の式で算出。

$rs=Abs(sigs/ssa)$ 、 $rc=Abs(sigc/sca)$ 、 $rt=Abs(tau/ta1)$ 、 $rw=awn/aw$

(23) 許容応力度照査結果の書き出し

- ・以下の結果を、ワークシートに書き出す。

鉄筋応力 $sigs(N/mm^2)$ 、コンクリート応力 $sigc(N/mm^2)$ 、せん断応力 $tau(N/mm^2)$ 、圧縮鉄筋応力 $sig2(N/mm^2)$ 、中立軸位置 $x(cm)$ 、 j 値 $jarm$ 、鉄筋許容応力 $ssa(N/mm^2)$ 、コンクリート許容応力 $sca(N/mm^2)$ 、せん断許容応力 $ta1(N/mm^2)$ 、せん断許容応力 $ta2(N/mm^2)$ 、鉄筋照査値 rs 、コンクリート照査値 rc 、せん断照査値 rt 、鉄筋判定(OK or NG)、コンクリート判定(OK or NG)、せん断判定(OK or NG)、必要せん断補強筋量 $awn(cm^2)$ 、せん断補強筋量 $aw(cm^2)$ 、せん断補強筋判定(OK or NG)、繰り返し回数 $nrep$ 、軸力偏心量 $e(cm)$ 、圧縮縁からコアまでの距離 $kc(cm)$ 、引張縁からコアまでの距離 $kt(cm)$

(24) L2 せん断照査の開始 ($iax=5$ のとき)

(25) 補正係数の計算

- ・有効高に関する補正係数 $betd$ 、引張鉄筋に関する補正係数 $betp$ 、軸力に関する補正係数 $betn$ を求める (7.2.1 の βd 、 βp および βn による)。

(26) せん断耐力の計算

- ・コンクリート負担分 vc 、せん断補強筋負担分 vs およびせん断耐力 vy を求める。
(式 7.2.1 の Vcd 、 Vsd および Vyd による)

(27) 破壊モード判定

- ・せん断スパン $aspan=Abs(mbend)/Abs(shr)$ 、曲げ終局時のせん断力 $vmu=mumode(i)/aspan$ 、せん断耐力に対する曲げ終局時せん断力の比 $rrr=vmu/vy$

(28) L2 せん断照査結果の書き出し

- ・以下の結果を、ワークシートに書き出す。

有効高補正係数 $betd$ 、引張鉄筋補正係数 $betp$ 、軸力補正係数 $betn$ 、せん断耐力コンクリート負担分 vc 、せん断耐力鉄筋負担分 vs 、せん断耐力 vy 、せん断スパン $aspan$ 、曲げ終局時のせん断力 vmu 、せん断耐力に対する曲げ耐力の比 rrr 、せん断照査値 $Abs(shr)/vy$ 、判定(OK or NG)

(29) 対象要素に対する照査計算の終了

- ・次の対象要素の照査計算に移るため、(8)に戻る。

(30) 照査計算の終了

- ・別の iax に対する照査計算に移るため、(6)に戻る。

【参考文献】

- (1)土木学会 (2002) : 2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]
- (2)土木学会 (2007) : 2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】
- (3)社団法人 日本水道協会 (2009) : 水道施設耐震工法指針・解説 2009 年版 I 総論
- (4)社団法人 日本水道協会 (2009) : 水道施設耐震工法指針・解説 2009 年版 設計事例集
- (5)社団法人 日本下水道協会 (2015) : 下水道施設耐震計算例
- (6)吉川弘道・富山潤 (2024) : 鉄筋コンクリートの設計 第 2 版、丸善出版