原子力施設の材料非線形解析による せん断照査のための部材係数の算定

株式会社クレアテック　技術部　大滝　健

1. はじめに

原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計マニュアル[1)]（以下、設計マニュアル）におけるせん断破壊に対する照査では、次の３つの選択肢を設けている。

(1) せん断耐力評価式
(2) 分布荷重を受ける部材のせん断耐力評価法
(3) 材料非線形解析を用いる評価法

(1)は腹部コンクリートの斜め圧縮破壊耐力および棒部材式およびディープビーム式について照査を行う。(2)については「等価せん断スパン比を用いた方法」と「線形被害則を用いた方法」がある。結果がＯＫとなるまで、通常は(1)→(2)→(3)の手順で照査を進めるのが一般的である。

ここで(3)の材料非線形解析による評価方法は、複雑な形状を有する部材や複雑な分布荷重を受ける部材に有効であるとされているが、解析コードの種類、構成則や使用する要素、要素分割、材料物性の設定、荷重増分の与え方、など解析者間で差が生じるため、設計マニュアルでは各解析者が表－１に示すモデルを解析し、（解析で得られたせん断耐力）／（モデルのせん断耐力）比の最大値をもって部材係数を設定することが要求されている。ここでは、これらのモデルを WCOMD（Ver.2.02.02）を用いて解析し、実際に部材係数を計算した結果を報告する。

2. 部材係数設定用モデル

表－１における集中荷重を受ける部材の基本形状を図-1 に示す。これより *a/d* の効果、コンクリート圧縮強度の効果、引張鉄筋比の効果、寸法効果、軸力の効果等を考慮できるように各ケースが設定されている。なお、表-1 に示される集中荷重部材のせん断耐力は実験値ではなく、せん断耐力評価式による算定値である。

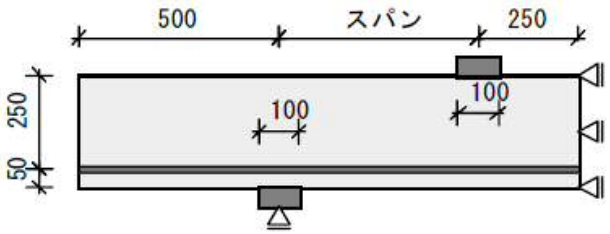


図-1 集中荷重を受ける単純梁モデル [1)]

表-1 部材係数設定用モデル [1)]

	Case No.	スパン[m]	部材幅[m]	部材厚[m]	有効部材厚[m]	コンクリート圧縮強度[N/mm²]	主筋降伏強度[N/mm²]	引張鉄筋比	軸力比	せん断補強筋比	せん断補強筋降伏強度[N/mm²]	Case No.	せん断耐力[kN]	着目点
集中荷重部材	1	0.50	1.00	0.30	0.25	24.0	350	0.030	0	0	0	1	475	No.1～9の基本ケース
	2	0.25	1.00	0.30	0.25	24.0	350	0.030	0	0	0	2	1187	
	3	1.00	1.00	0.30	0.25	24.0	350	0.030	0	0	0	3	324	a/dの効果
	4	1.50	1.00	0.30	0.25	24.0	350	0.030	0	0	0	4	294	
	5	0.50	1.00	0.30	0.25	36.0	350	0.030	0	0	0	5	581	コンクリート圧縮強度の効果
	6	0.50	1.00	0.30	0.25	24.0	350	0.010	0	0	0	6	329	引張鉄筋比の効果
	7	2.50	1.00	1.50	1.25	24.0	350	0.030	0	0	0	7	1587	寸法効果
	8	1.00	1.00	0.30	0.25	24.0	350	0.030	0.1	0	0	8	350	軸力の効果
	9	0.50	1.00	0.30	0.25	24.0	350	0.030	0	0.005	350	9	855	せん断補強の効果

	Case No.	スパン[m]	部材幅[m]	部材厚[m]	有効部材厚[m]	コンクリート圧縮強度[N/mm²]	主筋降伏強度[N/mm²]	引張鉄筋比	軸力比	せん断補強筋比	せん断補強筋降伏強度[N/mm²]	Case No.	P'/P（各立面図参照）	せん断耐力（支点位置）[kN]	着目点
分布荷重部材	10	1.00	0.15	0.30	0.25	32.3	363	0.041	0	0	0	10	0	165	No.10～14の基本ケース
	11	0.50	0.15	0.30	0.25	41.4	363	0.041	0	0	0	11	0	333	分布荷重を受けるスパンの効果
	12	1.50	0.15	0.30	0.25	41.7	363	0.041	0	0	0	12	0	127	
	13	1.00	0.15	0.30	0.25	33.6	363	0.041	0	0	0	13	1.5	188	モーメント分布の効果
	14	1.00	0.15	0.30	0.25	36.2	363	0.041	0	0	0	14	2	163	
	15	1.00	0.16	0.30	0.26	33.7	511	0.035	0.1	0	0	15	1.5	273	No.15～17の基本ケース
	16	1.00	0.16	0.30	0.26	35.0	511	0.035	0.1	0.038	332	16	1.5	356	せん断補強の効果
	17	1.00	0.16	0.30	0.26	34.4	511	0.035	0.1	0	0	17	1.5	432	ハンチの効果

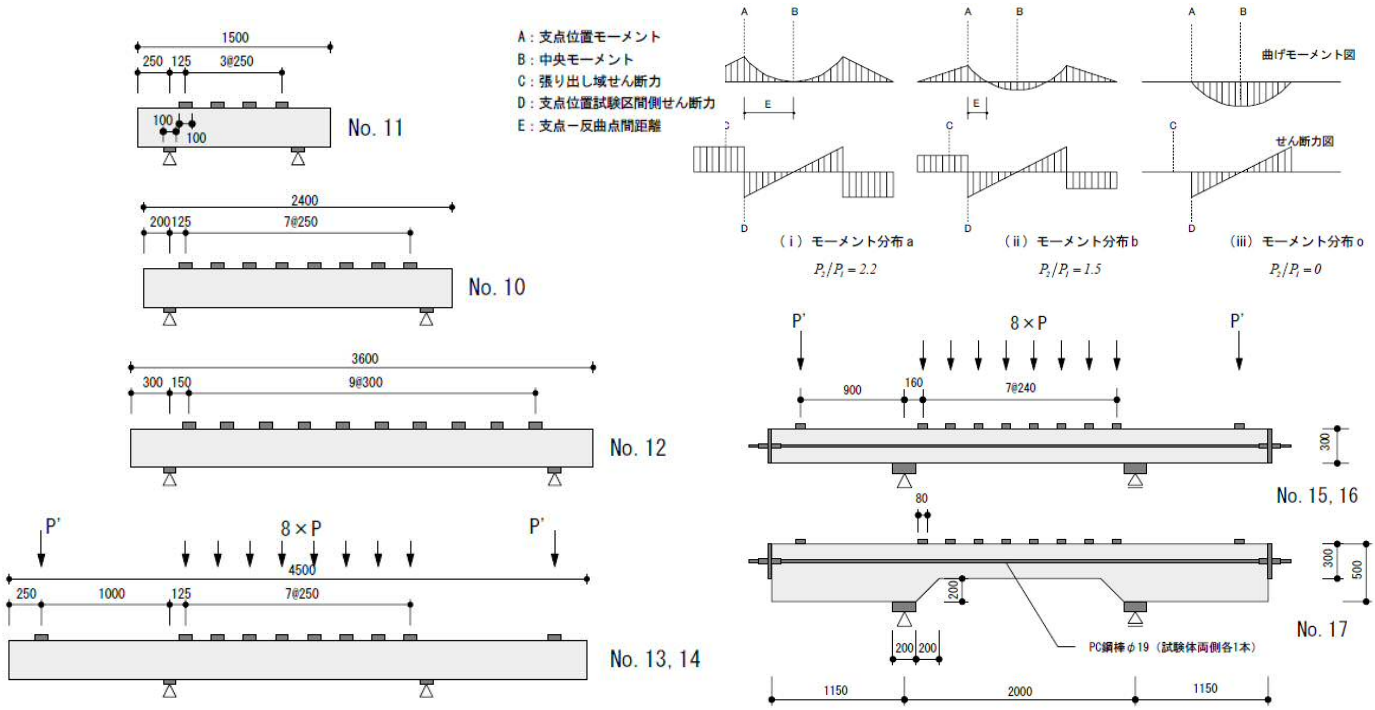


図-2 分布荷重を受ける単純梁モデル [1),2)]

同様に分布荷重を受ける部材の諸元、加力方法を図-2 に示す。ここでもせん断スパンやモーメント分布の効果、せん断補強筋やハンチの効果等を評価できるように各パラメータが設定されている。ただし、表-1 に示される分布荷重を受ける部材のせん断耐力（支点位置）は実験値を示している。

なお、これら分布荷重を受ける部材の配筋詳細については設計マニュアルを参照されたい。

3. 解析モデル

材料非線形解析による実際のせん断照査では解析モデルの作成方法は解析者の判断に任されており、照査対象外となる部材の寸法や物性値については、対象範囲の特徴を著しく変えない範囲で柔軟に設定してよいとされている。したがってここでも図-1 の集中荷重を受ける部材のモデルを作成するに当たり、耐力算定に直接関係しない部分の物性値等は適切に設定するものとした。図-2 の分布荷重を受けるモデルについては設計マニュアルに示された配筋図を参考にモデルを作成した。

各ケースの解析モデルを図-3 および図-4 に示す。支点および載荷点には鋼材支圧プレートを設置し、部材との界面には圧縮のみ伝達するジョイント要素を設けた。また支点はピンおよびピンローラーとした。なお、集中荷重は変位制御にて、分布荷重は荷重制御によって荷重を与えた。

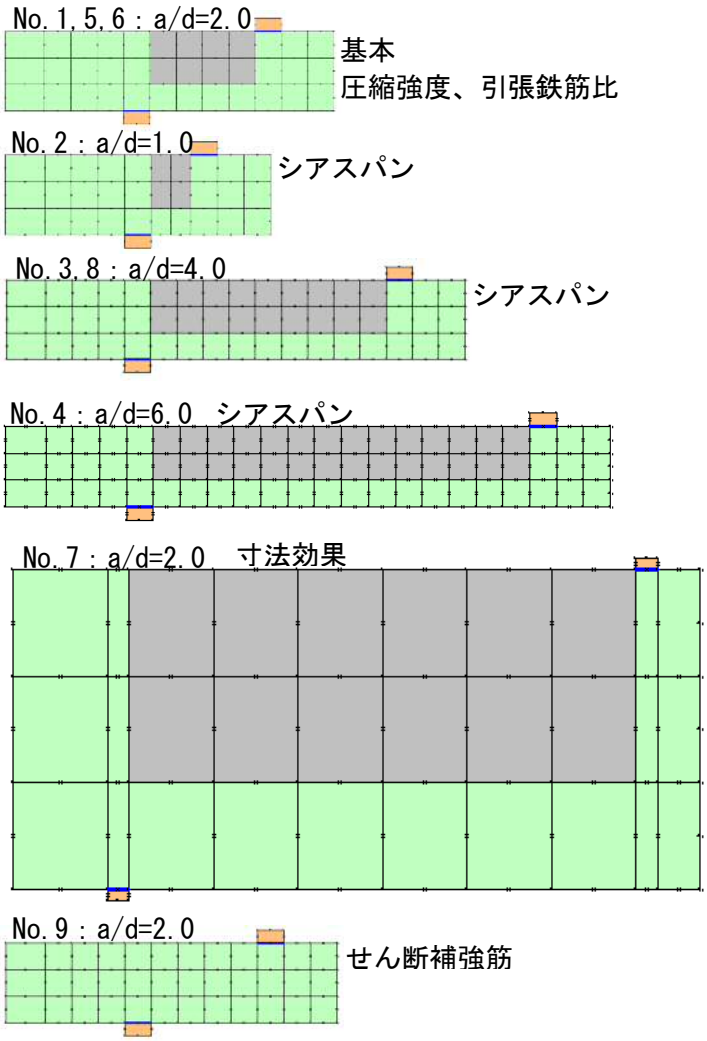


図-3 集中荷重を受ける部材の解析モデル

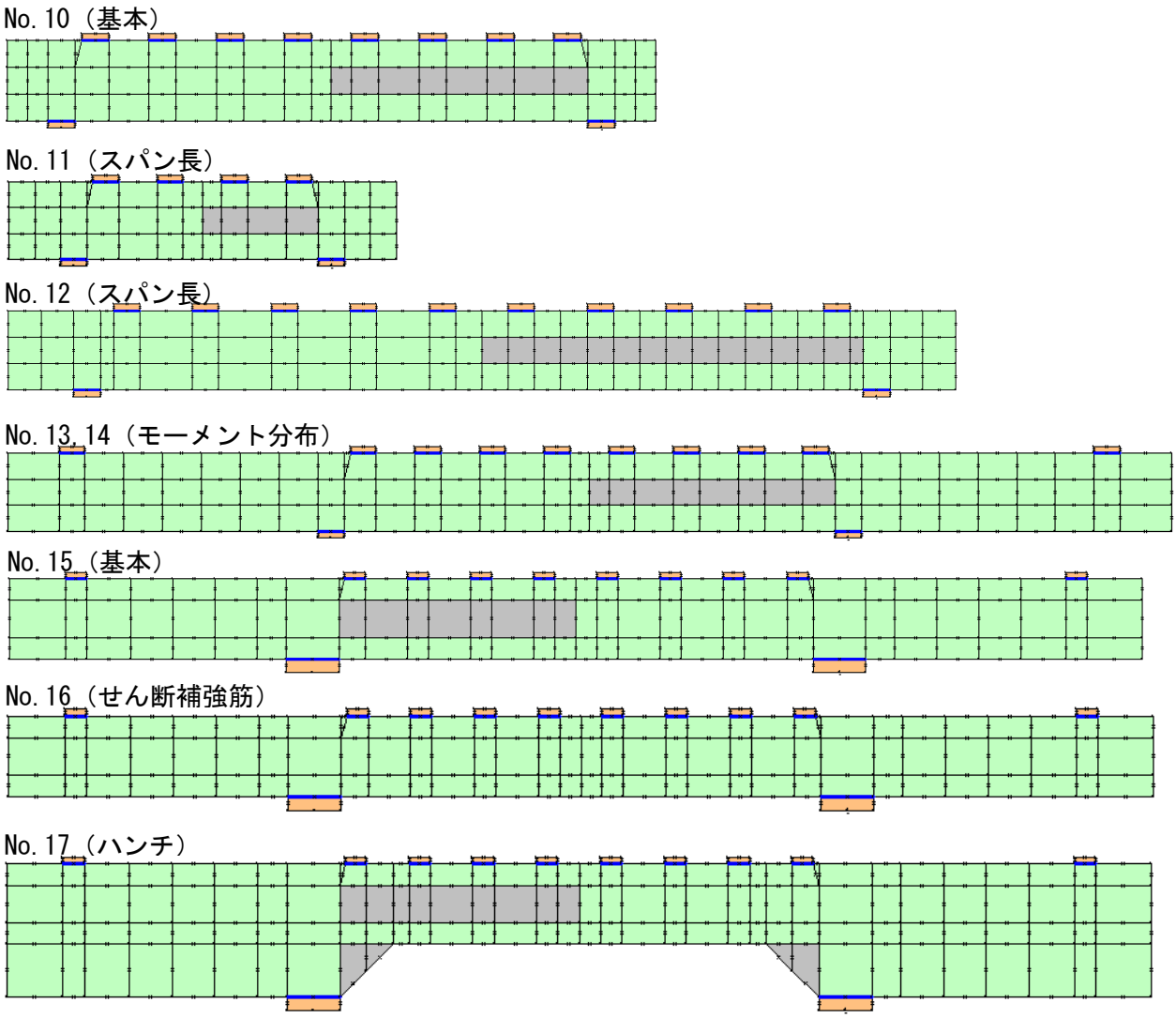


図-4 分布荷重を受ける部材の解析モデル

4. 解析結果

4.1 ひび割れ状況および破壊判定

図-5 に集中荷重を受ける部材の解析結果より得られたひび割れ状況および破壊判定を示す。ここで、圧縮、引張、せん断の各破壊判定基準は最大圧縮ひずみ、最大引張ひずみ、最大せん断ひずみいずれについても 10%以上としている。また、損傷判定基準は軽微な損傷はコンクリートの引張ひずみが 0.1%以上とし、重度の損傷をコンクリートの圧縮ひずみがコンクリート圧縮ピークひずみの 1.5 倍以上としている。

集中荷重部材の解析の結果、No.9 のみ圧縮破壊と判定され、その他はいずれもせん断破壊と判定された。No.9 は載荷点近傍のコンクリート圧壊によるものと考えられる。

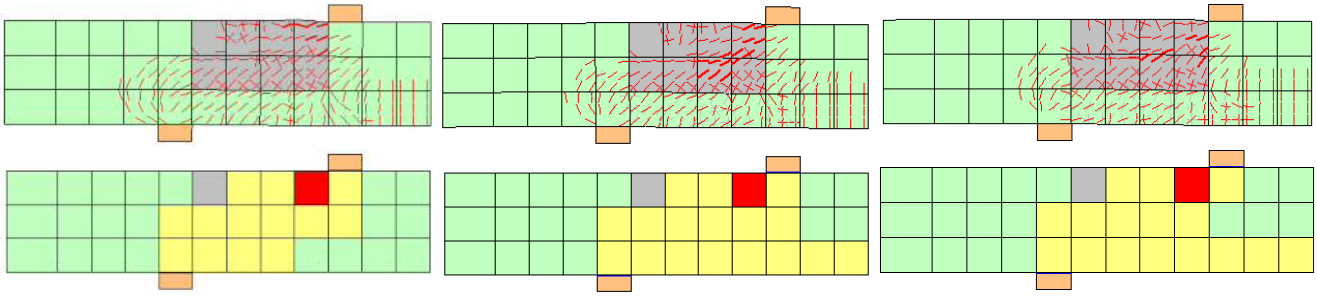
図-6 に分布荷重を受ける部材の解析結果より得られたひび割れ状況および破壊判定を示す。

解析の結果、No.13 および No.14 は引張およびせん断破壊と判定され、No.17 は引張および圧縮破壊と判定された。その他はいずれもせん断破壊と判定された。No.17 はハンチ近傍の要素における応力集中が破壊の要因と考えられる。

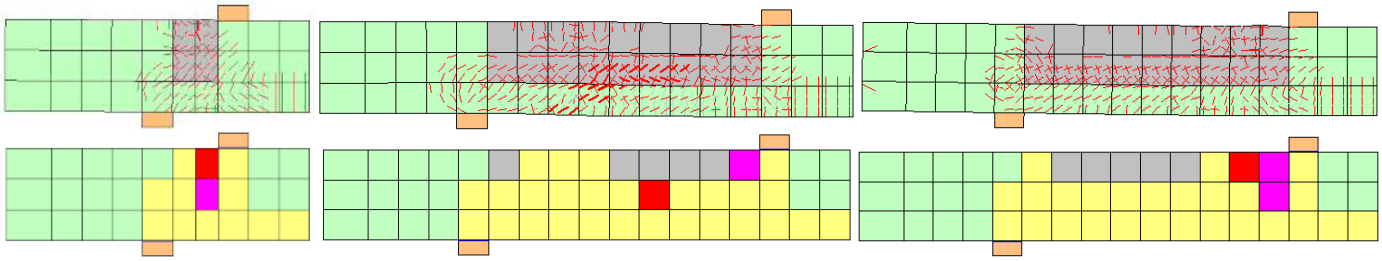
4.2 荷重変位関係

図-7 に解析の結果得られた荷重変位関係を示す。集中荷重部材については載荷点の変位および全反力の関係を、分布荷重部材についてはスパン中央の変位と支点反力（No.13～17 についてはスパン内荷重の 1/2）の関係を示している。

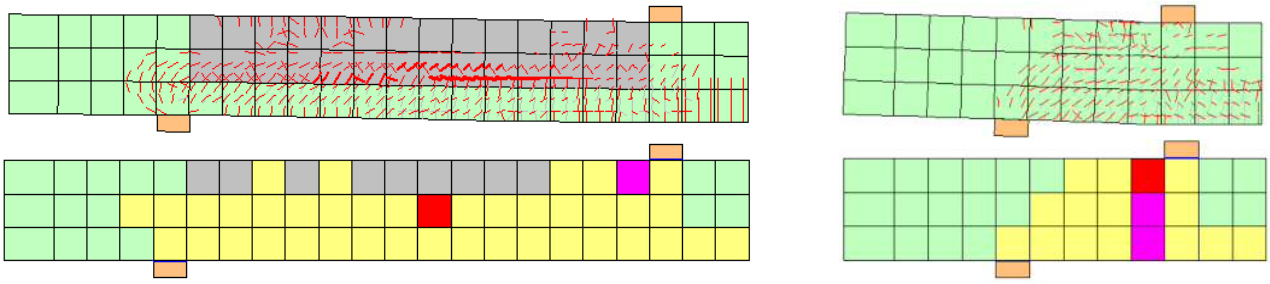
これらによると、集中荷重部材の場合、コンクリートの圧縮強度あるいは引張鉄筋比の違いによる耐力の増減、シアスパン比の違いによる耐力と変形性能の差、軸力やせん断補強筋の効果による耐力の上昇等が解析上反映されている。また、No.7 の寸法効果については基本試験体の荷重変位関係を No.7 と同等となるよう相似則を考慮した結果



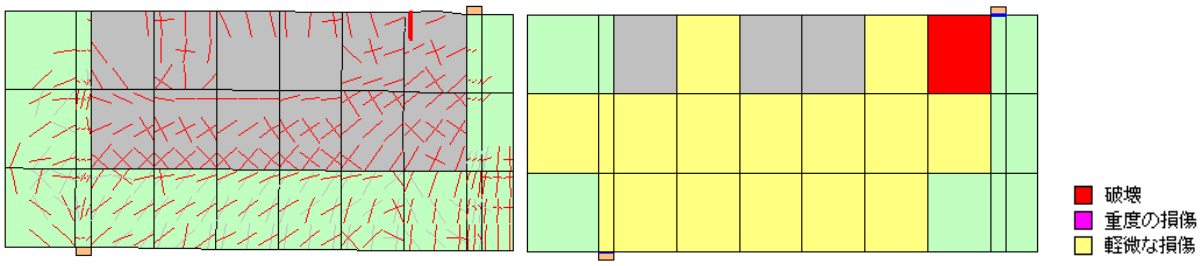
No.1（基本:a/d=2.0）　No.5（圧縮強度：a/d=2.0）　No.6（引張鉄筋比：a/d=2.0）



No.2（a/d=1.0）　No.3　(a/d=4.0)　No.8（軸力：a/d=4.0）

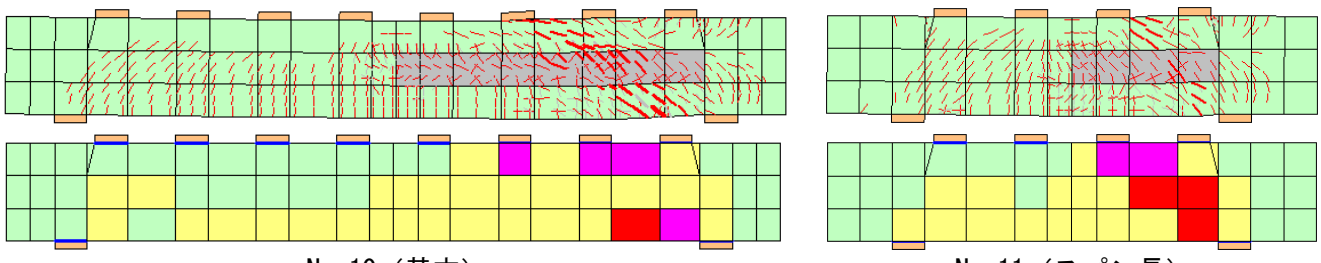


No.4（a/d=6.0）　No.9（せん断補強筋：a/d=2.0）



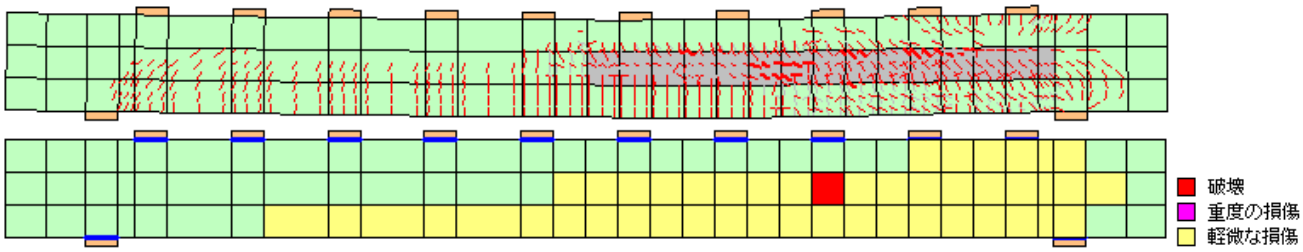
No.7（寸法効果：a/d=2.0）

図-5 集中荷重を受ける部材の破壊状況

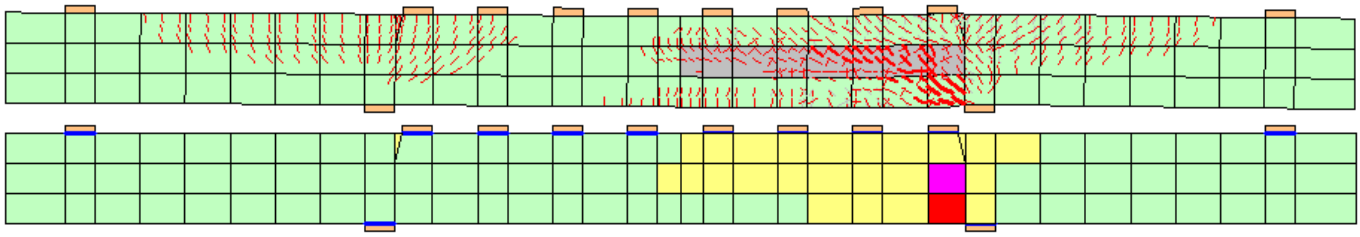


No.10（基本）　No.11（スパン長）

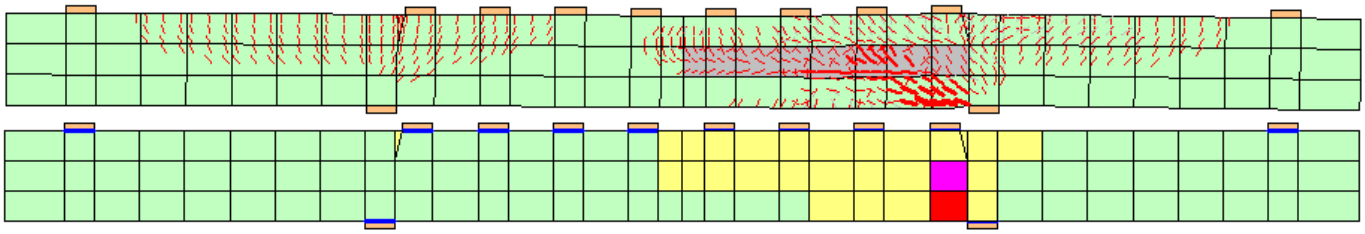
図-6 分布荷重を受ける部材の破壊状況（1/2）



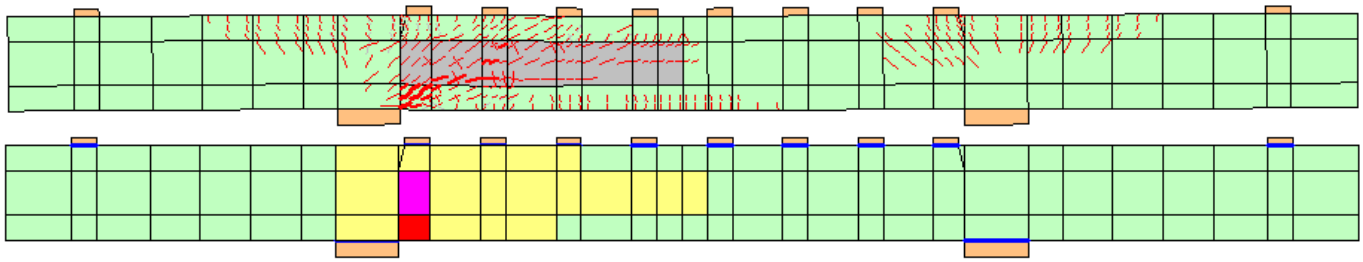
No.12（スパン長）



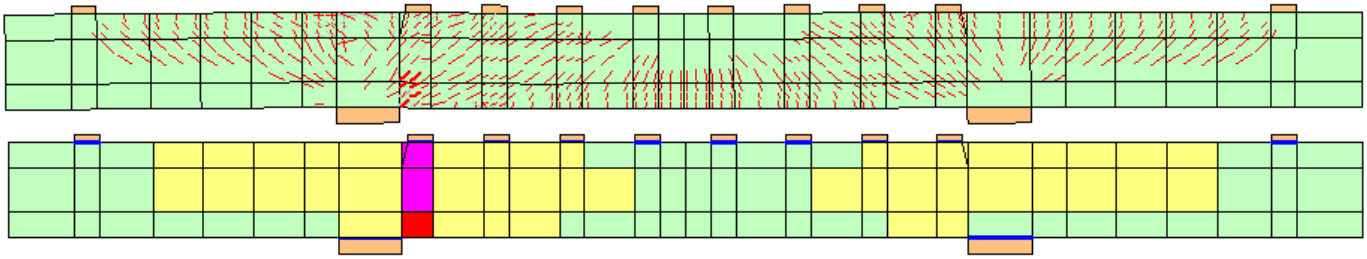
No.13（モーメント分布）



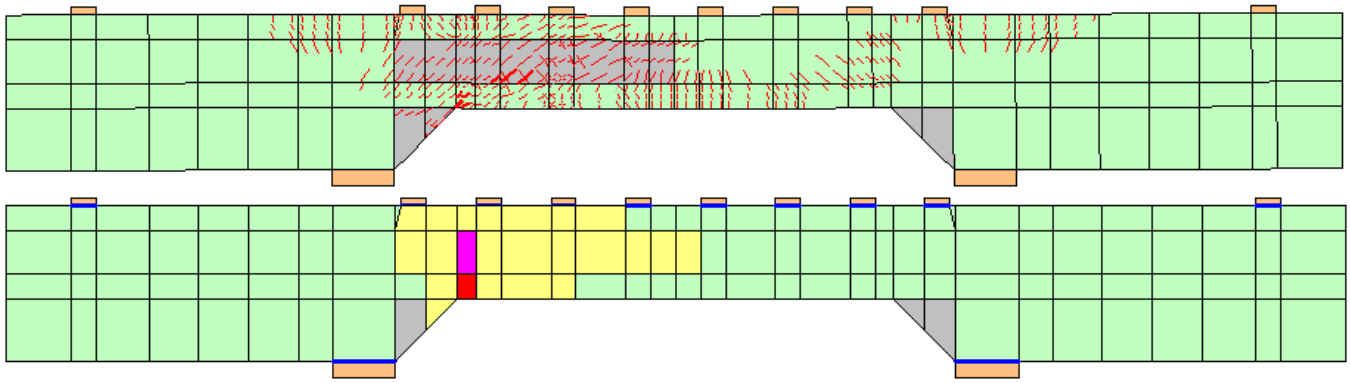
No.14（モーメント分布）



No.15（基本ケース）

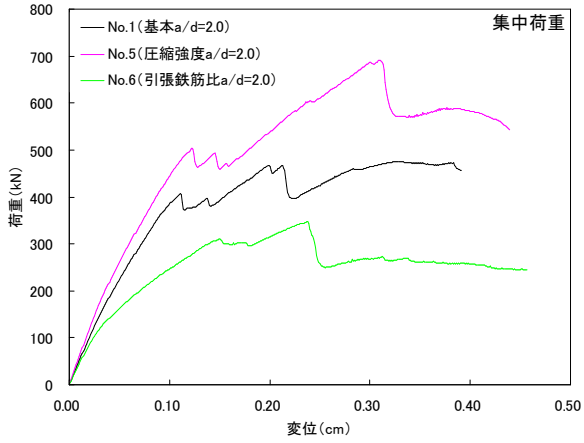


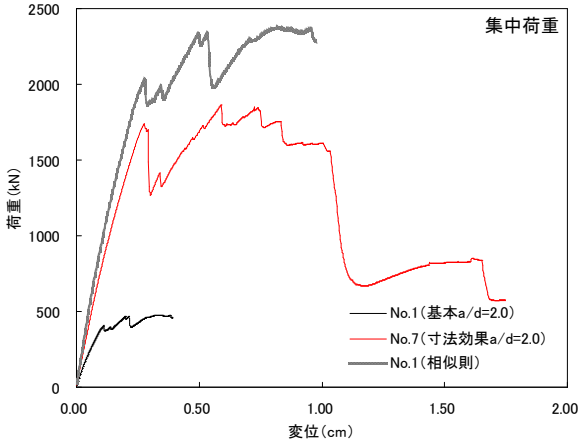
No.16（せん断補強筋）

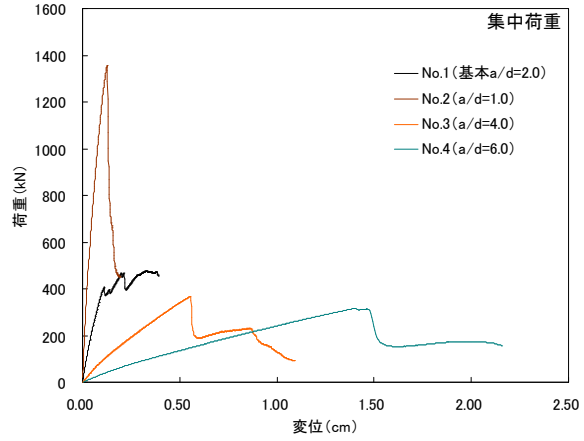


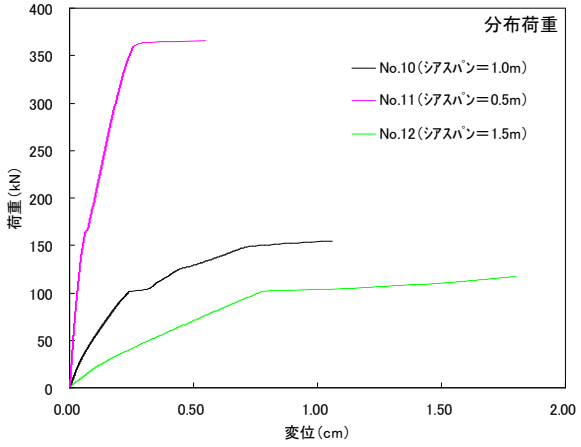
No.17（ハンチ）

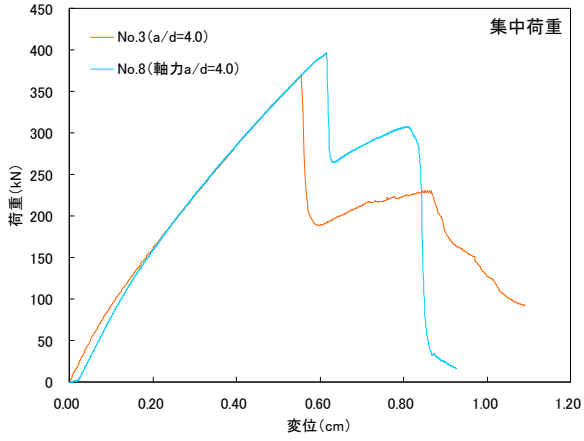
図-6 分布荷重を受ける部材の破壊状況（2/2）

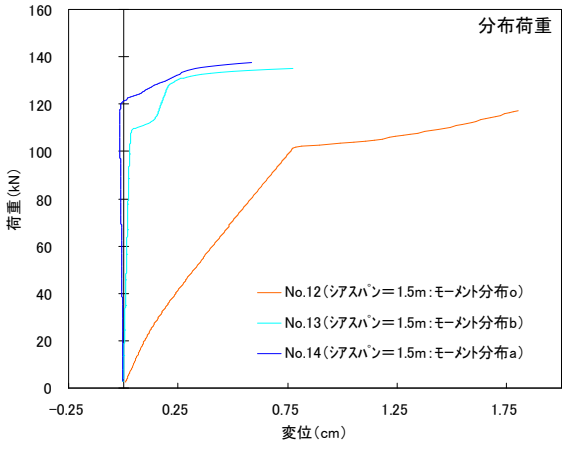

集中荷重
No.1（基本a/d=2.0）
No.5（圧縮強度a/d=2.0）
No.6（引張鉄筋比a/d=2.0）
荷重（kN）
変位（cm）

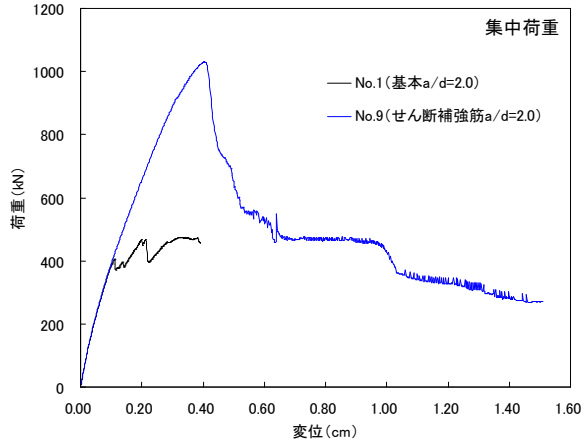

集中荷重
No.1（基本a/d=2.0）
No.7（寸法効果a/d=2.0）
No.1（相似則）
荷重（kN）
変位（cm）


集中荷重
No.1（基本a/d=2.0）
No.2（a/d=1.0）
No.3（a/d=4.0）
No.4（a/d=6.0）
荷重（kN）
変位（cm）


分布荷重
No.10（ｼｱｽﾊﾟﾝ＝1.0m）
No.11（ｼｱｽﾊﾟﾝ＝0.5m）
No.12（ｼｱｽﾊﾟﾝ＝1.5m）
荷重（kN）
変位（cm）


集中荷重
No.3（a/d=4.0）
No.8（軸力a/d=4.0）
荷重（kN）
変位（cm）


分布荷重
No.12（ｼｱｽﾊﾟﾝ＝1.5m：ﾓｰﾒﾝﾄ分布o）
No.13（ｼｱｽﾊﾟﾝ＝1.5m：ﾓｰﾒﾝﾄ分布b）
No.14（ｼｱｽﾊﾟﾝ＝1.5m：ﾓｰﾒﾝﾄ分布a）
荷重（kN）
変位（cm）


集中荷重
No.1（基本a/d=2.0）
No.9（せん断補強筋a/d=2.0）
荷重（kN）
変位（cm）

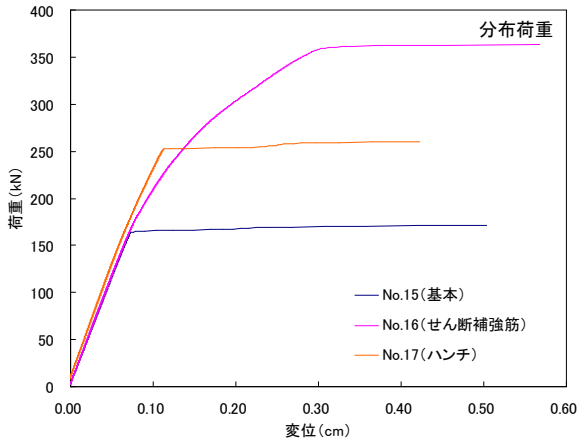

分布荷重
No.15（基本）
No.16（せん断補強筋）
No.17（ハンチ）
荷重（kN）
変位（cm）

図-7 荷重変位関係

併記しているが、寸法効果による耐力の低下が表現されていることがわかる。

分布荷重部材の場合も同様に、シアスパンやモーメント分布の違いが耐力および変形性能に及ぼす影響、またせん断補強筋やハンチの有無が耐力に及ぼす影響等が解析結果に反映されている。ただし、荷重制御であるため耐力低下は考慮できないことから、実験結果を忠実に再現することはできない。

このように、解析上設定したパラメータはそれぞれの特徴を適切に反映する結果となっており、今回の解析はほぼ妥当な結果を与えているものと考えられる。

4.3 部材係数の算定

解析の結果得られた最大耐力およびせん断耐力との比較、および算定した部材係数の一覧を表-2および表-3 に示す。これによると、集中荷重部材の場合、解析値/耐力比は 1.0～1.21、分布荷重部材の場合、0.60～1.10 となった。分布荷重部材でばらつきが大きいのは、せん断耐力が実験値であり、実験結果そのものにばらつきがあること、載荷治具や自重の取扱いなど実験条件が詳細に示されていないため、解析モデルの境界条件やパラメータ設定に実験との差異があること等によるものと考えられる。

部材係数は設計マニュアルによれば、「解析値/耐力比の最大値をもって設定する。ただし、1.0 を下回る場合は 1.0 とする」、とされているので、今回のケースでは集中荷重部材の場合 1.21、分布荷重部材の場合、1.10 となる。なお、実験では No.16 はせん断破壊に至らず耐力を保持、No.17 は解析結果同様ハンチ端における圧壊により耐力低下しているので部材係数設定の対象外となる。

5. まとめ

本論では、原子力施設の材料非線形解析によるせん断照査のための部材係数を求めるため、鉄筋コンクリートの 2 次元非線形解析プログラムである WCOMD (Ver.2.02.02) を用いて設計マニュアルに提示されているモデルについて解析を行った。その結果、得られた部材係数は集中荷重モデルで 1.21、分布荷重モデルで 1.10 となった。なお、設計マニュアルでは、解析値とモデル耐力の比が極端に大きいあるいは小さいケースがある場合は相違の理由が明らかでないかぎりこの解析法を用いないと記されているが、大きい、小さいの具体的判断基準は示されていない。本解析によれば、集中荷重モデルについては妥当な結果を与えていると考えられる。

一方、分布荷重モデルの部材係数において、No.13 および No.14、No.15 の解析値が 0.63～0.84 と小さめに出ている要因は現時点で不明である。今後これを改善するためには、解析結果の詳細な検討はもちろん、メッシュ分割や境界条件の設定方法、引張軟化係数等の物性値の検討、荷重の与え方による耐力低下の再現、あるいは midasFEA 等、他のソフトウェアによる解析結果との比較検討を行う必要がある。

表-2 部材係数結果（集中荷重モデル）

ケース	解析結果	せん断耐力	解析値/耐力	部材係数 γb
No.1	475	475	1.00	1.00
No.2	1357	1187	1.14	1.14
No.3	368	324	1.14	1.14
No.4	318	294	1.08	1.08
No.5	691	581	1.19	1.19
No.6	347	329	1.05	1.05
No.7	1866	1587	1.18	1.18
No.8	396	350	1.13	1.13
No.9	1032	855	1.21	1.21
			部材係数	1.21

表-3 部材係数結果（分布荷重モデル）

部材係数(分布荷重)

ケース	解析結果	せん断耐力	解析値/耐力	部材係数 γb
No.10	154	165	0.94	1.00
No.11	365	333	1.10	1.10
No.12	117	127	0.92	1.00
No.13	135	188	0.72	1.00
No.14	138	163	0.84	1.00
No.15	171	273	0.63	1.00
No.16	363	356	1.02	1.02
No.17	260	432	0.60	1.00
			部材係数	1.10

参考文献

1) 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル，土木学会原子力土木委員会，2005 年 6 月
2) 原子力発電所屋外重量土木構造物の耐震性能照査指針(技術資料)，2005 年 6 月