

論文 ひずみに着目したボックスカルバートの耐震性評価に関する研究

市川 卓也^{*1}・大津 仁史^{*2}・本田 国保^{*3}・酒井 俊朗^{*2}

要旨：RC ボックスカルバートの気中載荷実験で計測した斜めひび割れ位置におけるひずみ応答に着目し、これと非線形有限要素法によるシミュレーション解析でのひずみ応答を比較・分析し、解析結果から直接せん断破壊を予測する手法について検討した。更に、この手法によりボックスカルバート隅角部の載荷実験におけるせん断破壊を予測した。その結果、解析においても実験と同様なひずみ応答が生じていること、ひずみの分布および応答を指標として破壊モードの判定やせん断破壊を予測できることを明らかにした。

キーワード：ひずみ応答、ボックスカルバート、非線形解析、せん断破壊、破壊モード

1. はじめに

地中 RC 構造物の地震時挙動は、周辺地盤の変形に支配されることから、強地震動に対しては変形やひずみを指標とした耐震性評価が合理的であり、土木学会コンクリート標準示方書や原子力の耐震性能照査指針¹⁾も変形照査に移行している。変形照査では、構造物の変形性能を推定する必要があるが、ボックスカルバート等の面部材については、せん断補強鉄筋を用いない場合もあり、この様な構造物の変形性能については十分に検討されていない。

著者らは、せん断補強鉄筋が殆ど配置されていないボックスカルバートの気中載荷実験および非線形有限要素法²⁾によるシミュレーション解析を行い、非線形有限要素法が応答性状の異なる 2 試験体の最大荷重点までの挙動を再現できることを既に報告している^{3),4)}。この実験では、せん断破壊に伴って斜めひび割れ面が急激に開口するとともにずれる現象も計測していたが、上記報告ではこれらの計測値については言及していない。

本稿では、斜めひび割れ面位置でのひずみ応答に着目し、シミュレーション解析から得られるひずみ応答から直接せん断破壊を予測する手

法について検討した。更に、本手法により、他機関で行われたボックスカルバート隅角部の載荷実験におけるせん断破壊を予測できることを確認した。

2. 実験結果と解析結果の概要

解析は、岡村・前川ら²⁾が開発した有限要素解析プログラム「WCOMD-SJ」を用い、試験体を分散ひび割れモデルに基づく RC 平面要素でモデル化して行った。分散ひび割れモデルは、鉄筋の構成則とコンクリートの構成則を重ね合せて表現されている。ひび割れ後のコンクリートは、付着の影響を考慮した引張軟化特性と、ひび割れ面での噛み合い効果を考慮したせん断伝達特性およびひび割れ幅に応じて圧縮剛性を低下させるモデルで評価される。

試験体の寸法および配筋を図-1 に、実験終了時のひび割れスケッチを図-2 に、実験と解析の荷重-変位関係を図-3 に示す。

2BOX-A の実験は、 $R=7/1000$ から $R=8/1000$ (R :層間変形角) への載荷途中で隔壁上部がせん断破壊し荷重が低下した。解析は、実験と同様に $R=7/1000$ から $R=8/1000$ への載荷途中で荷重低下が生じている。

*1 東電設計 (株) 技術開発本部 構造・耐震技術部 (正会員)

*2 東京電力 (株) 原子力技術・品質安全部 土木グループ

*3 東電設計 (株) 技術開発本部 (正会員)

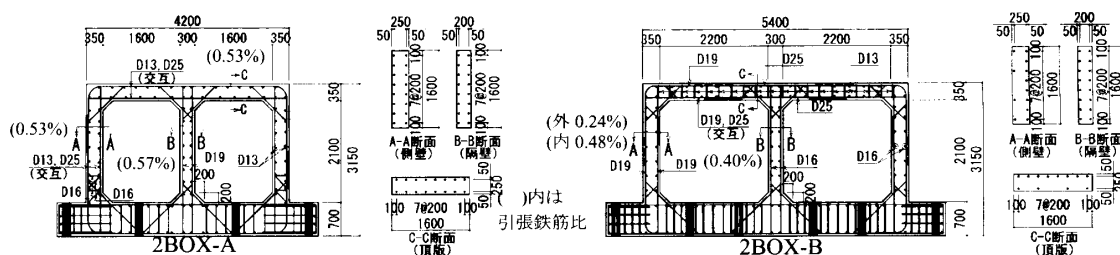


図-1 試験体の寸法および配筋[単位:mm]

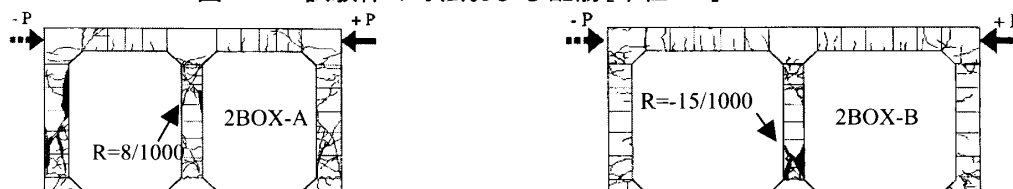


図-2 実験終了時のひび割れスケッチ

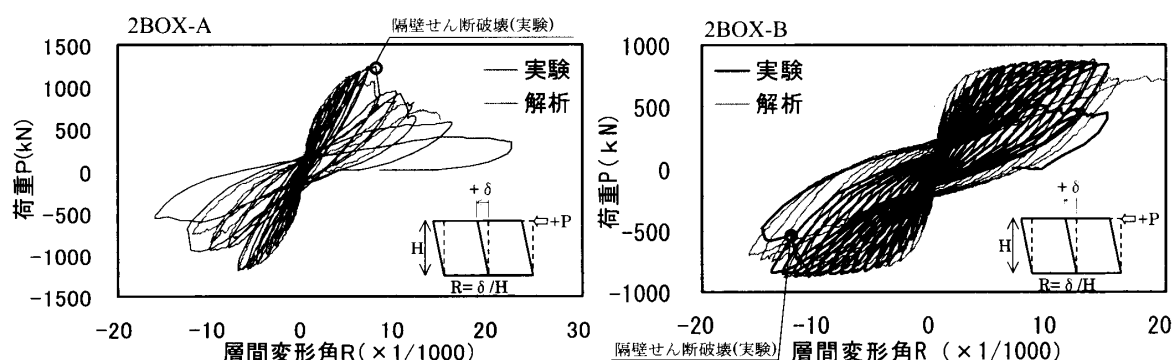


図-3 荷重-変位関係(実験, 解析)

2BOX-B の実験は、 $R=15/1000$ への载荷途中で隔壁下部がせん断破壊し荷重が低下した。解析は、実験の最大荷重をよく再現しており、荷重低下も $R=14/1000$ 载荷途中で生じ実験より 1 ループ早いものの同じ変形レベルである。

上記で示したように、使用した解析コードは、構造物の最大荷重点（最初の荷重低下点）までの挙動を精度よく再現できることから、本研究ではこの範囲のひずみ応答に着目する。

3. ひずみに着目した耐震性評価

3.1 実験と解析のひずみ応答の比較

実験では変位計をロゼット型に配置（写真-1）して 3 方向のひずみ ($\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$) を計測し、これから式(1)により最大主ひずみ ($\varepsilon_{\max}$)、最小主ひずみ ($\varepsilon_{\min}$) および最大せん断ひずみ ($\gamma_{\max}$) を算定した。ここでは、各試験体で最初にせん断破壊が生じた 2BOX-A 隔壁上部と 2BOX-B 隔壁下部における $\varepsilon_{\max}$ と $\gamma_{\max}$ を実験と解析で比較した。変位計の設置位置とひずみ応答の比較

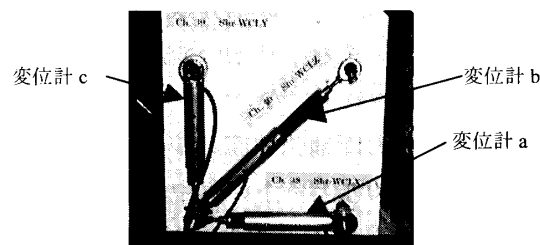


写真-1 ロゼット型に配置した変位計

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\max} &= \frac{1}{2} \left[\varepsilon_a + \varepsilon_c + \sqrt{2 \{ (\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 \}} \right] \\ \varepsilon_{\min} &= \frac{1}{2} \left[\varepsilon_a + \varepsilon_c - \sqrt{2 \{ (\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 \}} \right] \\ \gamma_{\max} &= \sqrt{2 \{ (\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 \}} \end{aligned} \right\} \text{式(1)}$$

を図-4、図-5 に示す。同図は横軸を構造物の層間変形角、縦軸をひずみとし、実験および解析における荷重低下直前の応答を●印で示している。なお、解析のひずみは、図中に示す要素の平均的な値である。

2BOX-A（図-4）の実験では、せん断破壊の 1 サイクル前の $R=7/1000$ までは $\varepsilon_{\max}$ および $\gamma_{\max}$ は共に 5000μ 以下であるが、せん断破壊

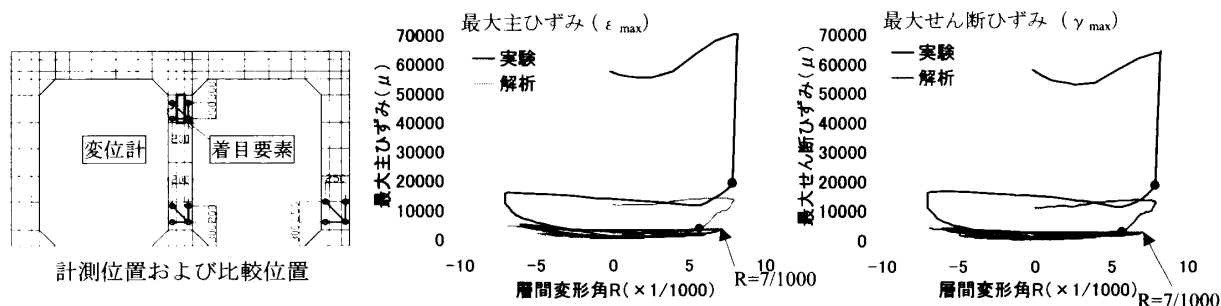


図-4 2BOX-Aのひずみ応答の比較

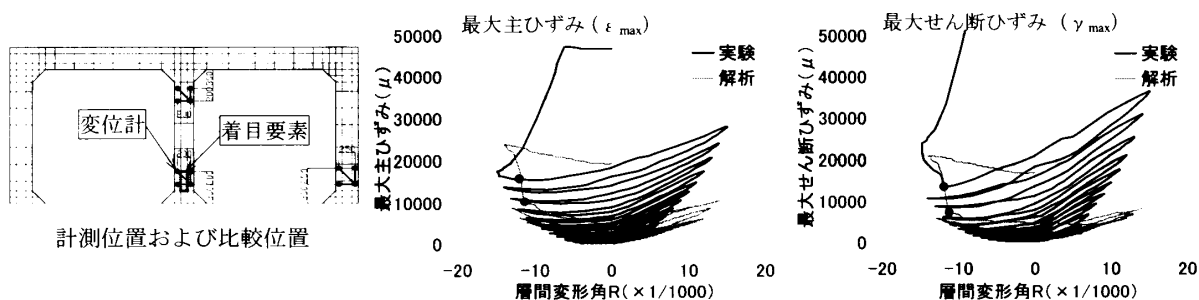


図-5 2BOX-Bのひずみ応答の比較

($R=8/1000$) によって ϵ_{max} が約 18500μ から約 70000μ に、 γ_{max} が約 18200μ から約 63000μ に急増している。これは、実験の荷重低下時には斜めひび割れ面が急激に開口するとともにずれたことを示している。一方、解析も荷重低下に伴い ϵ_{max} が約 3450μ から約 13200μ に、 γ_{max} が約 2650μ から約 13600μ に急増しており、ひずみが急増する現象は実験と一致する。

2BOX-B (図-5) の実験の ϵ_{max} および γ_{max} は、せん断破壊後直ちに急増しないが、変位が戻り始めると急増する。一方、解析は、荷重低下に伴い ϵ_{max} が約 9840μ から約 23500μ に γ_{max} が約 7020μ から約 20600μ に急増しており、2BOX-A と同様に荷重低下時にひずみが急増する挙動をよく捉えている。

なお、2BOX-B の計測値が、せん断破壊と同時に急増しないのは、破壊時の状況 (写真-2) か

ら、斜めひび割れが変位計の固定点付近に進展したためと考えられる。

3.2 せん断破壊に対する評価方法

前述したように、せん断破壊による荷重低下は、斜めひび割れ面の急激な開口とずれに特徴付けられる。解析では、ひび割れ面の開きはひび割れ直交方向のひずみ ϵ_t (以下、直交ひずみ)、ひび割れ面のずれはひび割れ面に沿ったせん断ひずみ ϵ_{sh} (以下、せん断ひずみ) として評価されている。そこで、このひずみ成分に着目し、荷重を保持している状態と荷重低下直前の状態 (図-6) で比較した。これらの状態におけるひずみ分布 (コンター図) を図-7、図-8 に示す。同図は、 ϵ_t と ϵ_{sh} (絶対値) が 500μ 以上生じている範囲についてコンター表示している。なお、コンターレンジの最大値以上のひずみは最大値として表示している。また、図中にハンチ始点



写真-2 2BOX-Bのひび割れ状況と変位計

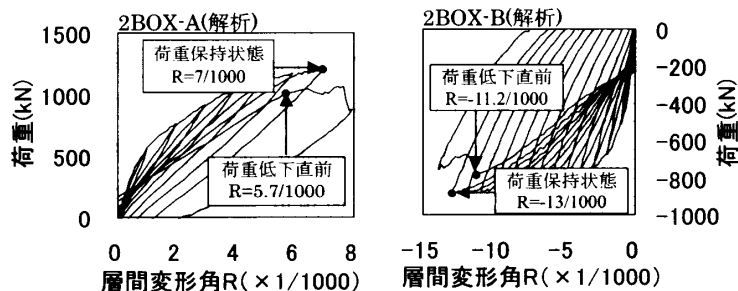


図-6 比較したステップの荷重と変位の関係

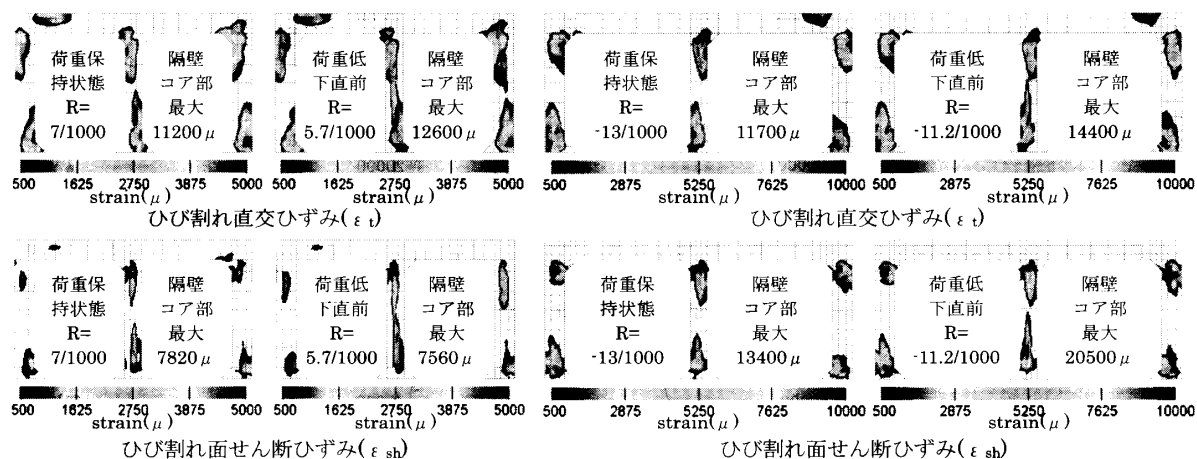


図-7 2BOX-A のひずみ分布

間の隔壁コア部（部材断面方向に 3 分割した中央の要素）での最大値を併記した。

2BOX-A（図-7）では、荷重を保持している $R=7/1000$ と、荷重低下が生じる $R=8/1000$ に至る途中の $R=5.7/1000$ の状態を比較している。隔壁に生じる直交ひずみおよびせん断ひずみの大きい領域は、 $R=5.7/1000$ の方が部材軸方向に広く進展している。また、せん断ひずみは、鉄筋が配置されていないコア部に集中している。

2BOX-B（図-8）でも同様の傾向が伺え、隔壁の直交ひずみおよびせん断ひずみは、 $R=-14/1000$ に至る途中の $R=-11.2/1000$ の方が、部材軸方向に進展している。特に、隔壁下部のせん断ひずみは 10000μ を超過する領域が広がっている。

ひずみコンター図から、ハンチ始点から 1～1.5D（D：有効高さ）程度の範囲のコア部ではせん断ひずみと直交ひずみが共に大きくなっていること、ハンチ始点付近の断面外縁では直交ひずみのみが大きくなっていることが分かる。

ひび割れの方法を調べるため、隔壁のひび割れパターンを図-9に示す。同図では、各ガウス点でのひび割れの方法を直交ひずみの大きさに比例させて長さを変えている。荷重保持状態ではハンチ始点から 1.5D 程度までの範囲のコア部に斜めひび割れが生じているが、荷重低下直前の状態では部材中央付近まで斜めひび割れが生じている。これは、端部で生じた斜めひび割れ

図-8 2BOX-B のひずみ分布

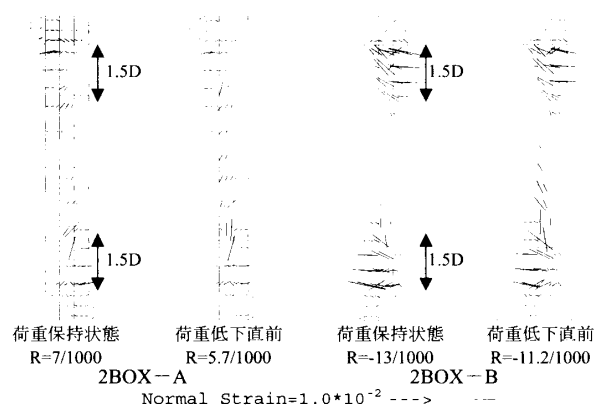


図-9 ひびわれパターン

が拘束の小さい部材中央に進展したためと推定できる。また、ハンチ始点付近には部材軸直交方向のひび割れが生じており、これは、層間変形角が大きい荷重保持状態の方が顕著である。

ひずみコンター図と考え併せると、ハンチ始点付近に生じる部材軸直交方向のひび割れは曲げによる損傷と推定できる。また、コア部に生じる斜めひび割れはせん断による損傷と推定できる。

次に、隔壁下端のハンチ始点から 1.5D 間のコア部における直交ひずみとせん断ひずみの履歴を図-10に示す。同図は、上記範囲内のガウス点における応答の包絡値（最大値）を示しており、○印は荷重低下直前の応答である。図から、部材のせん断破壊時には、ひび割れ面でのひずみが急増していること、2BOX-A では約 5000μ 以下で、2BOX-B では約 10000μ 以下で安定した経路を辿っていることが分かる。

図-11 は、隔壁下端での部材のせん断力とコア要素の平均せん断ひずみの関係を載荷ループ毎に示したグラフである。同図から、荷重低下時には、ひずみが急増するとともに部材のせん断力も低下していることが分かる。

以上から、本解析コードにおいて、斜めひび割れがハンチ始点から 1.5D 程度までの部材コア部に連続的に生じ、且つ、この範囲内のひび割れ面におけるひずみが急増する応答を示す場合はせん断破壊と判定できる。

3.3 曲げ破壊型の場合の応答

破壊モードの差異によるひずみ応答の違いを調べるため、2BOX-A の全部材にスターラップ (pw=0.2%) を配置した解析を行った。荷重-変位関係図-12 に、ひずみ分布およびひび割れ状態を図-13 に、隔壁下端 (ハンチ始点から 1.5D の範囲) のコア要素のひずみ応答を図-14 に示す。荷重-変位関係から構造系全体の挙動は安定している。また、隅角部の断面外縁では 10000 μ を超過する圧縮ひずみが生じているが、コア部での直交ひずみ、せん断ひずみには急増するような挙動は認められない。更に、顕著な斜めひび割れも生じていないことから、せん断破壊していないと判断できる。

4. 隅角部載荷実験のシミュレーション

ボックスカルバート隅角部を模擬した載荷実験⁵⁾を対象として、非線形有限要素法による解析を行い、ひずみ応答に着目して破壊モードおよび破壊荷重を対比した。試験体を図-15 に、実験のひび割れスケッチを図-16 に、解析のひび割れパターンを図-17 に、ひずみ分布を図-18 に示す。ひび割れ図中の赤色のひび割れは、直交ひずみ (ϵ_t) とせん断ひずみ (ϵ_{sh}) が共に 5000 μ 以上

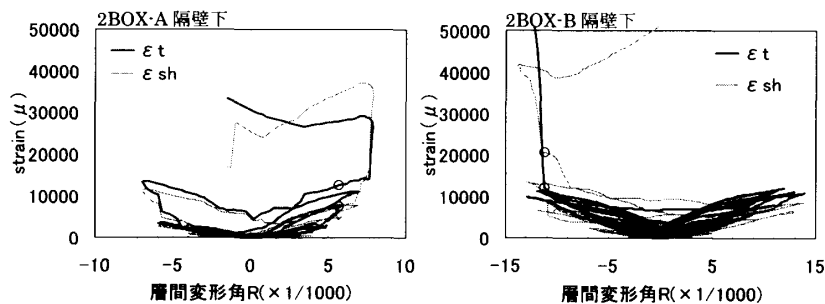


図-10 ひび割れ面ひずみの応答 (解析)

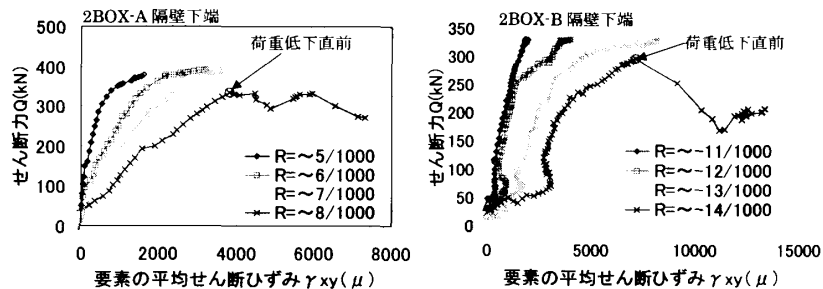


図-11 $Q-\gamma_{xy}$ 関係 (解析)

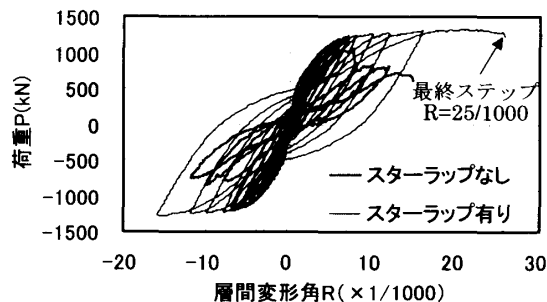


図-12 荷重-変位関係

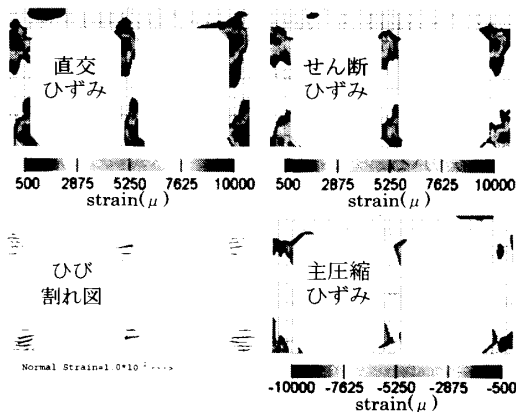


図-13 ひずみコンターおよびひび割れ図 (R=25/1000)

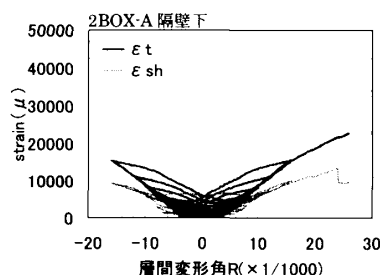
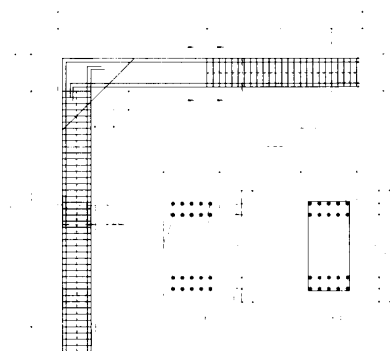


図-14 ひずみ応答 (曲げ破壊先行型)

図-15 試験体の寸法および配筋⁵⁾

[単位:mm]

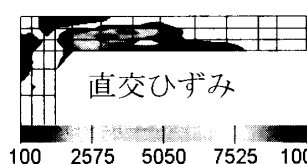
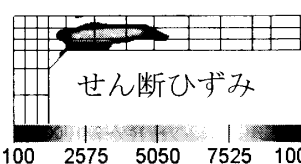
strain(μ)strain(μ)

図-18 ひずみ分布図 (P=130kN)

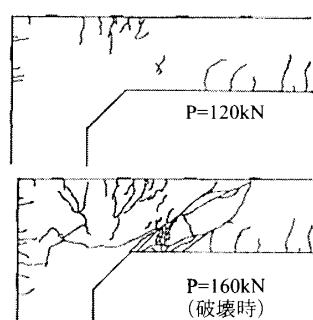
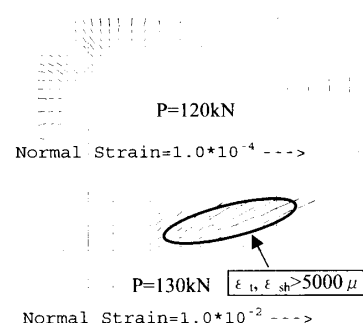
図-16 ひび割れスケッチ⁵⁾

図-17 ひび割れ図

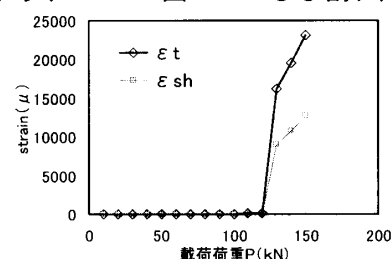


図-19 ひずみ応答

発生しているひび割れである。

解析は、実験の斜めひび割れの発生位置および方向を概ね再現している。また、 $P=130\text{kN}$ で斜めひび割れが連続的に生じ、且つ、この範囲でひずみが急増する挙動(図-19)を示すことから、せん断破壊と判定でき、解析でのせん断破壊荷重は $P=130\text{kN}$ と評価できる。この破壊荷重は、実験の破壊荷重 160kN に対し約 20%程小さく若干安全側の評価であるが、ひずみ応答に着目しても破壊モードおよび破壊荷重を予測できることが分かる。

5. まとめ

本研究の範囲において以下の知見を得た。

- (1) 実験より、せん断破壊による荷重低下時には斜めひび割れ位置での最大主ひずみと最大せん断ひずみは急増する。
- (2) 非線形有限要素法による解析でも、荷重低下時のひび割れ直交ひずみとひび割れ面せん断ひずみの急増を再現しており、このとき部材のせん断力は低下する。
- (3) ひずみ分布およびひずみ応答は、破壊モードの判定やせん断破壊の予測に用いることができる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、東京大学前川宏一教授から、貴重なご指導をいただきました。ここに厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会:原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・同マニュアル, pp.112-126, 2002
- 2) 岡村甫,前川宏一:鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991
- 3) 曾良岡宏, 足立正信, 本田国保, 田中浩一: 地中ボックスカルバートの変形性能に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1123-1128, 2001
- 4) 本田国保, 曾良岡宏, 足立正信, 市川卓也, 相京泰仁:実規模載荷実験に基づくボックスカルバートの破壊過程, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.225-230, 2001
- 5) 土木学会:原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル, pp.2-104-2-128, 1992