

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246077

研究課題名(和文) RC はりの性能に及ぼす収縮影響評価に関する耐久性力学の展開

研究課題名(英文) Evolvement of "durability mechanics" for the evaluation of shrinkage effect on performance of reinforced concrete beams

研究代表者

佐藤 良一 (Sato, Ryoichi)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・特任教授

研究者番号：20016702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 26,200,000 円

研究成果の概要(和文)：コンクリート材料と構造の連成挙動を体系的に取り扱う「耐久性力学」の発展に資するために、市販の生コンクリートで製造した鉄筋コンクリート(RC)はりの構造および耐久性能に及ぼす収縮の影響を検討した。その結果、収縮の簡易な算定方法を提示し、収縮によるかぶりコンクリート部の損傷と鉄筋腐食速度の評価を行い、コンクリートの自由収縮とRC中の鉄筋ひずみの実測値からコンクリートの引張クリープ係数の略算式を誘導し、断面の収縮勾配を取り入れた有効曲げ剛性式を定式化しPC箱型断面張出し桁の過大なたわみを予測し、収縮するRCはりのせん断耐力は膨張はりに比べ有意に低下し、寸法効果も高くなることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Effects of drying shrinkage on structural and durability performance of reinforced concrete beams made of a ready mixed concrete were experimentally investigated in order to help establish "Durability Mechanics".

The following results were obtained. A simple method to predict drying shrinkage of concrete was proposed. Effects of drying shrinkage on internal cracking in cover concrete and reinforcement corrosion rate were estimated. An abbreviated equation for creep coefficient was derived from measured concrete strain and reinforcement strain in concrete. An effective flexural stiffness equation incorporating drying shrinkage gradient in section was derived and excessive deflections of real prestressed concrete girders were predicted using this equation. It was verified that the shear strength of reinforced concrete beams was reduced remarkably and the size effect was also marked due to the effect of drying shrinkage before loading, compared with those of expansive beams.

研究分野：コンクリート

キーワード：鉄筋コンクリート 乾燥収縮 せん断強度 寸法効果 プレストレストコンクリート 過大なたわみ 内部ひび割れ 鉄筋腐食速度

1. 研究開始当初の背景

申請代表者は、本研究に至る前に、高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート(RC)はりのせん断強度が自己収縮により有意に低下することを実験的に実証した。時を同じくして骨材の乾燥収縮に起因するコンクリートの過大収縮による実構造物のひび割れが大きな問題になり、収縮と収縮ひび割れに関する研究が精力的に行われた。しかし、過大収縮は構造安全性や耐久性にも影響を及ぼし得ると考え、材料と構造の連成挙動を取り扱う耐久性力学の体系化に資するために、過大な乾燥収縮がRCはりのせん断耐力に及ぼす影響を検討し、せん断耐力が低下することを見出した。この乾燥収縮のせん断耐力への影響は、市販の生コンクリートを用いた場合であっても乾燥収縮が500 μ を越えることを考えると、無視し得ない影響の可能性があると考え本研究の申請に至った。

2. 研究の目的

市販の普通コンクリートであっても、過大収縮コンクリートに比べ乾燥収縮は小さいもののヤング係数が大きいと、鉄筋比や部材厚によっては、乾燥収縮により無視し得ない引張鉄筋ひずみが生じ、RCはりのせん断強度を低下させる可能性がある。また、乾燥収縮により鉄筋周辺に微細ひび割れが生じ鉄筋保護性能を低下させる可能性もある。本研究では(1)骨材の影響を考慮したコンクリートの収縮の実用的算定式の提案、(2)収縮によるかぶりコンクリート部の損傷評価と鉄筋腐食保護性能の評価、(3)鉄筋により収縮拘束を受ける場合の引張クリープ係数の略算式の誘導、(4)プレストレスト(PC)箱型断面張出し桁の過大なたわみを予測するための断面の収縮勾配を取り入れた有効曲げ剛性式の誘導、(5)載荷前の収縮の影響によるせん断強度低下の実証、載荷前の収縮の影響を考慮した等価鉄筋比[1]に基づくせん断強度の評価とその検証、(6)収縮低減に多用される石灰石骨材を用いたRCはりのせん断耐力の解明、を目指し、収縮を軸とする耐久性力学の確立に資することを目的とする。

3. 研究の方法

(1)W/C=35、50%、体積露出面積比50~250mm、乾燥開始材齢2~28日、収縮が大きく異なる2種類の骨材を用いた100x100x400mm供試体の材齢182日における乾燥収縮の測定値に基づいて骨材岩種の影響を表す係数を求め、それを既往の部材寸法・乾燥開始材齢を考慮した評価モデルに取り入れた予測方法を提案する。

(2)コンクリートの乾燥収縮量が異なる骨材を使用したRCはり供試体の塩害促進試験を載荷条件を変えて実施し、主ひび割れ間のコンクリート中の鉄筋の腐食速度に及ぼすコンクリートの乾燥収縮量及び内部ひび割れ

の影響について検討する。

(3)同一条件下にあるコンクリートの自由収縮とそれにより生じるRCはり中の鉄筋ひずみを測定し、ひずみの適合条件、コンクリート応力と鉄筋応力の関係およびコンクリートの変動応力に関わる材齢係数からRC中のコンクリートの引張クリープ係数の略算式を誘導する。

(4)PC箱桁張出し桁の上床版、腹部、下床版それぞれの乾燥収縮から断面の収縮勾配を求め、2007年版土木学会の長期有効曲げ剛性式にそれを取り込むことにより拡張した式を誘導し、その妥当性を実構造物(桁全長:50.6m、固定部桁全高:5122mm、端ヒンジ部全高:2000mm)の実測たわみと比較して検証する。

(5)W/C=0.5の載荷前のコンクリートの収縮・膨張、引張鉄筋比($p=0.8\%$ 、 1.6%)、有効高さ($d=250\text{mm}$ 、 500mm 、 1000mm)を要因として、RCはりのせん断強度に及ぼすこれらの影響を実験的に明らかにするとともに既往のせん断強度算定式による値およびその算定式に収縮の影響を考慮した等価鉄筋比を取り入れて求めた値と比較して、せん断強度と寸法効果に及ぼす収縮・膨張の影響の評価を行う。

(6)石灰石骨材と通常の石英粗面岩骨材を用いたRCはりのせん断耐力を比較し、その相違をコンクリートの収縮と特性長さに関連付けて考察する。

4. 研究成果

(1)結果は図-1に示すように実測値と予測値はよく一致した。実用に供するために岩種の影響を表す係数のデータを多数蓄積すればこれまでになく有用になると考えている。

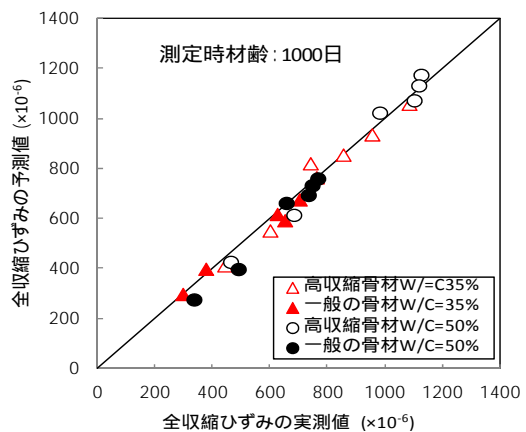
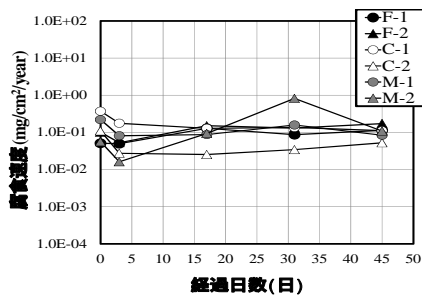


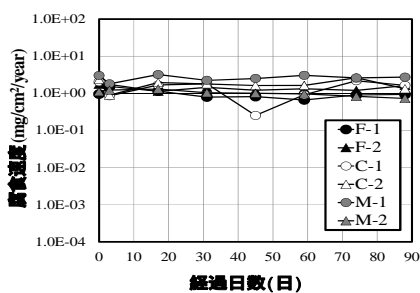
図-1 実測値と予測値の比較 (材齢 1000 日)

(2)図-2は乾燥収縮の違いと内部ひび割れが鉄筋腐食速度に及ぼす影響を示す。載荷履歴無しに比べて、載荷履歴有りの場合には内部

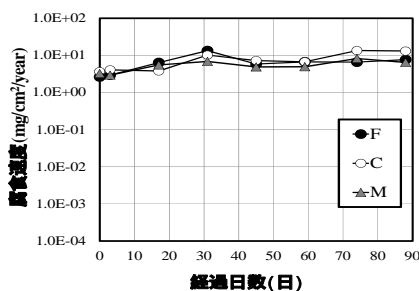
ひび割れの存在により鉄筋腐食速度が増加している。さらに持続荷重は高い腐食速度となっている。持続荷重が載荷履歴有りより腐食速度が速いのは内部ひび割れが開いた状態、すなわち内部ひび割れ幅が広いことによると考えられる。しかしながら、コンクリートの乾燥収縮量には違いが表れたものの腐食速度に関しては骨材の種類の違いによる差は認められなかった。この研究は国内外で行われておらず、従来のコンクリートに鉄筋を埋込んだ実験では実際の腐食速度を過小評価する可能性があることを示すもので、その影響は大きいと考えられる。



(a) 載荷履歴なし (40)



(b) 載荷履歴あり



(c) 持続荷重 (20)

図-2 乾燥収縮の違いと内部ひび割れが鉄筋腐食速度に及ぼす影響 (乾湿繰返しサイクル: 海水浸漬 3 日 乾燥 11 日、F: 砂岩、C: 石灰岩、M: F+C)

(3) 収縮拘束を受ける RC 中のコンクリートの引張クリープ係数の略算式を、鉄筋ひずみ/自由収縮ひずみ、材齢係数、コンクリートおよび鉄筋のヤング係数、鉄筋比、コンクリート純断面の断面積と断面二次モーメントを用いて誘導し試算した。鉄筋ひずみ/自由収縮ひずみが小さいとクリープ係数が大きく、定性的には妥当と思われたが、定量的な妥当性の検証は今後の課題となった。

(4) 定式化した有効曲げ剛性式に 2012 年版土木学会示方書設計編によるクリープ、収縮を適用し、実構造物の実測たわみと比較した。図-3 に収縮の一例を、図-4 にその結果を示す。簡易な式であるが、100 日後に急増することを概ね実測値と一致しているのが分かる。

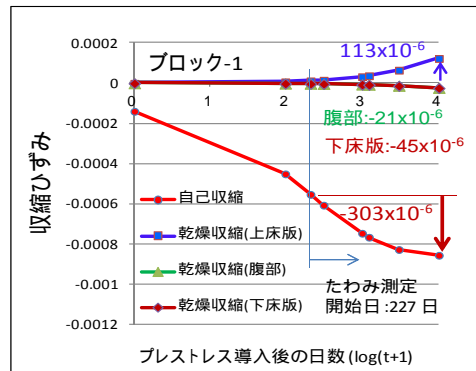


図-3 計算に用いた収縮

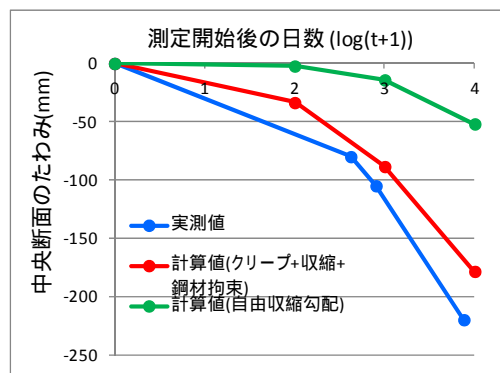
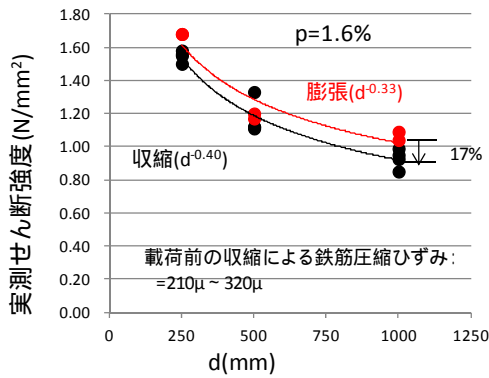


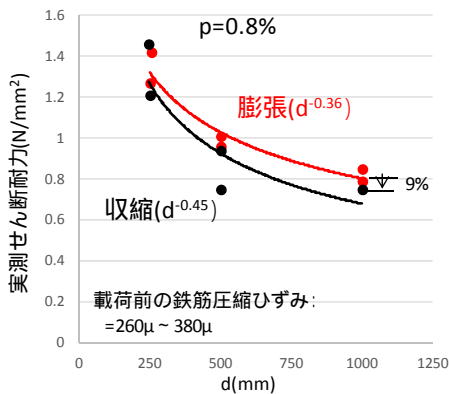
図-4 実測たわみと計算値の比較

(5) 図-5 は膨張はりと収縮はりのせん断強度と有効高さの関係を鉄筋比 1.6%、0.8%のそれぞれについて示したものである。図中に載荷前の収縮はりの鉄筋ひずみを示しているが、膨張はりの鉄筋ひずみについては信頼性が懸念されるため記載していない。有効高さ $d=1000\text{mm}$ における収縮はりのせん断強度は膨張はりに比べ $p=1.6\%$ の場合 17%、 $p=0.8\%$ の場合 9% 小さかった。寸法効果も $p=1.6\%$ の場合、収縮はりでは $d^{-2/5}$ 、膨張はりでは $d^{-1/3}$ と収縮により鋭敏になった。 $p=0.8\%$ の場合も $p=1.6\%$ の場合とほぼ同様であった。これらの寸法効果は土木学会示方書の $d^{-1/4}$ より高く、特に市販の生コンクリートであっても収縮により $d^{-2/5}$ 以上になり得ることは注意に値する。

図-6 は乾燥の影響を受けた鉄筋比=1.6%および 0.8%の RC はりのせん断耐力を土木学会の原式である二羽らの式で求めたせん断耐力で除した比率を示したものである。図中の等価鉄筋比は収縮の影響を考慮しせん断耐力を低下させた場合のせん断耐力比である。この図によれば、公称鉄筋比を用いた計算値は、 $d=500\text{mm}$ 以上では 1 以下になる。特

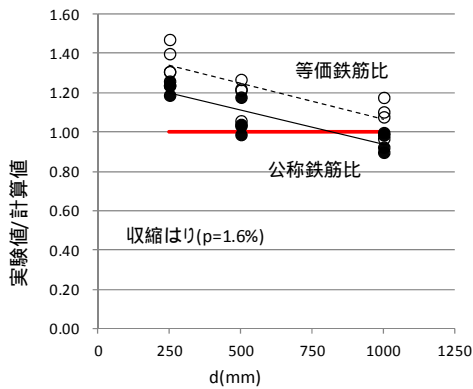


(a)鉄筋比 1.6%の場合

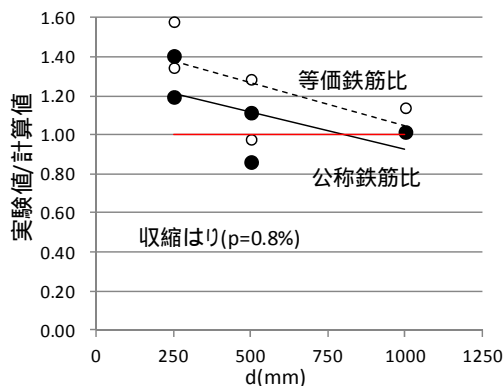


(b)鉄筋比 0.8%の場合

図-5 実測せん断耐力と寸法効果



(a)鉄筋比 1.6%の場合



(b)鉄筋比 0.8%の場合

図-6 計算値で正規化したせん断耐力

に $d = 1000\text{mm}$ の4体については比が $0.9 \sim 1.0$ となり、計算値は過大評価する傾向があったが、等価鉄筋比を用いれば $1.0 \sim 1.2$ となり安全側の評価となった。 $p=0.8\%$ の場合も、 1.6% とほぼ同様の結果であった。

以上、高強度コンクリート、高収縮コンクリートに加えて市販生コンクリートの場合でも収縮による寸法効果の増大やせん断耐力低下あるいはその可能性を見出した一連の研究は、国内外にはなく、その影響は大きいと考えている。ただし、膨張の効果の信頼性と評価については今後の課題となった。

(6) 収縮は小さいが破砕値の大きい石灰石骨材コンクリートの破壊エネルギーは 0.117N/mm 、特性長さは 457mm と石英粗面岩コンクリートの 0.235N/mm 、 824mm と比べて 50% 弱小さく、RC はりの斜めひび割れ発生時せん断耐力は 17% 程度低下した。収縮低減に多用されている石灰石骨材使用の構造的な問題点を指摘した本研究はこれまで国内外でなく、材料と構造の技術者・研究者に警鐘を鳴らすものと考えている。

引用文献

[1] Sato, R. and Kawakane, H.: A new concept for the early age shrinkage effect on diagonal cracking strength of reinforced HSC beams, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 6, 2008, pp. 45-67

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 14 件)

1. 川井菜緒、笹田航平、半井健一郎、佐藤良二、RC はりのせん断強度に及ぼす収縮および破壊エネルギーの影響、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.36、2014、pp.451-456
2. 笹田航平、宮本和也、半井健一郎、佐藤良二、寸法および鉄筋比の異なる膨張 RC はりのせん断強度評価、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.36、2014、pp.445-450
3. Miyazawa, S., Yokomuro, T., Sakai, E., Yatagai, A., Nito, N. and Koibuchi, K., Properties of concrete using high C_3S cement with ground granulated blast-furnace slag, Construction and Building Materials, 査読有, Vol.61, 2014, pp.90-96
4. Maruyama, I. and Sugie, A., Numerical Study on Drying Shrinkage of Concrete Affected by Aggregate Size, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, Vol.12, 2014, pp.279-288
5. 半井健一郎、佐藤良二、小川由布子、河合研至、長期有効曲げ剛性式による PC 箱桁橋の長期たわみ評価、コンクリート工学年

次論文集、査読有、Vol.35、2013、
pp.469-474

6. 兵頭彦次、中山紘紀、宮本和也、佐藤良一、
乾燥収縮がRCはりのせん断強度低下に及
ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、
査読有、Vol.35、2013、pp.643-648
7. 高本直樹、森岡卓也、氏家勲、岡崎慎一郎、
乾燥収縮の違いと内部ひび割れが鉄筋腐
食に与える影響、コンクリート工学年次論
文集、査読有、Vol.35、2013、pp.1081-1086

〔学会発表〕(計 27件)

1. Okazaki, S., Kurumatani, M., Ujike, I. and Takamoto, N., Effect of internal cracking on mass transfer resistance of cover concrete, Proceedings of 5th International Conference on Concrete Repair, 3 Sept. 2014, Belfast (UK)
2. Ujike, I., Okazaki, S. and Sato, R., Experimental study on effect of internal cracking on corrosion rate of reinforcement in concrete, Proceedings of the ninth international conference on creep, shrinkage and durability mechanics, 24 Sept. 2013, Boston (USA)
3. Sato, R., Nakarai, K., Ogawa, Y. and Kawai, K., An Effective Flexural Stiffness Equation for Long Term Deflection of Prestressed Concrete with and without Cracks, Proceedings of the ninth international Conference on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete, 24 Sept. 2013, Boston (USA)
4. Hyodo, H., Sato, R., Kawai, K. and Nakayama, H., Effects of Drying Shrinkage on Shear Tension Strength of Reinforced Concrete Beams, Proceedings of 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 12 Mar. 12 2013, Toledo (Spain)

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤 良一 (SATO RYOICHI)
広島大学・大学院工学研究院・特任教授
研究者番号：20016702

(2)研究分担者

氏家 勲 (UJIKE ISAO)
愛媛大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：90143669

宮澤 伸吾 (MIYAZAWA SHINGO)
足利工業大学・工学部・教授
研究者番号：10157638

河合 研至 (KAWAI KENJI)
広島大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：90224716

半井 健一郎 (NAKARAI KENICHIRO)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：10359656

丸山 一平 (MARUYAMA IPPEI)
名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授
研究者番号：40363030

小川 由布子 (OGAWA YUKO)
広島大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：30624564

(4)研究協力者

谷村 充 (TANOMURA MAKOTO)
太平洋セメント株式会社

兵頭 彦次 (HYODO HIKOTSUGU)
太平洋セメント株式会社

亀田 昭一 (KAMETA SHOICHI)
成田国際空港株式会社